

# Энциклопедия цезиевой вольфрамовой бронзы

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

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

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

## 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](http://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 Ханис 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

### 4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Оглавление

### Глава 1: Введение и история цезиевой вольфрамовой бронзы

- 1.1 Определение и химический состав цезиевой вольфрамовой бронзы
- 1.2 Открытие и разработка цезиевой вольфрамовой бронзы
- 1.3 Статус цезиевой вольфрамовой бронзы в материаловедении
- 1.4 Мировой статус исследований и обзор рынка цезиевой вольфрамовой бронзы
- 1.5 Основные области применения цезиевой вольфрамовой бронзы

### Глава 2: Кристаллическая структура и свойства цезиевой вольфрамовой бронзы

- 2.1 Кристаллическая структура и характеристики химических связей цезиевой вольфрамовой бронзы
- 2.2 Оптические свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне и пропускание света
- 2.3 Электрические свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: проводимость и миграция носителей заряда
- 2.4 Тепловые свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: теплопроводность и стабильность
- 2.5 Теоретический расчет и прогнозирование характеристик цезиевой вольфрамовой бронзы

### Глава 3: Метод синтеза цезиевой вольфрамовой бронзы

- 3.1 Метод твердофазной реакции цезиевой вольфрамовой бронзы
- 3.2 Сольвотермальные и гидротермальные методы цезиевой вольфрамовой бронзы
- 3.3 Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) цезиевой вольфрамовой бронзы
- 3.4 Золь-гель метод цезиевой вольфрамовой бронзы
- 3.5 Зеленый синтез и управление наночастицами цезиевой вольфрамовой бронзы

### Глава 4: Технология характеристики цезиевой вольфрамовой бронзы

- 4.1 Рентгеновская дифракция (XRD) и кристаллический анализ цезиевой вольфрамовой бронзы
- 4.2 Сканирующая электронная микроскопия (SEM) и просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ) цезиевой вольфрамовой бронзы
- 4.3 Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) и химическое состояние цезиевой вольфрамовой бронзы
- 4.4 УФ-видимая-ближняя ИК-спектроскопия цезиевой вольфрамовой бронзы
- 4.5 Электрические и термические методы испытаний цезиевой вольфрамовой бронзы

### Глава 5: Оптические и термические применения цезиевой вольфрамовой бронзы

- 5.1 Интеллектуальная оконная пленка и энергосберегающее стекло из цезиевой вольфрамовой бронзы
- 5.2 Покрытие для защиты от ближнего инфракрасного излучения из цезиевой вольфрамовой бронзы
- 5.3 Преобразование света в тепло и использование солнечной энергии из цезиевой

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовой бронзы

5.4 Оптические датчики и детекторы из цезиевой вольфрамовой бронзы

5.5 Материалы для терморегулирования из цезиевой вольфрамовой бронзы

## **Глава 6: Энергетическое и экологическое применение цезиевой вольфрамовой бронзы**

6.1 Литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы из цезиевой вольфрамовой бронзы

6.2 Фотокатализ и разложение воды из цезиевой вольфрамовой бронзы

6.3 Очистка воздуха и адсорбция загрязняющих веществ из цезиевой вольфрамовой бронзы

6.4 Электродные материалы для топливных элементов из цезиевой вольфрамовой бронзы

6.5 Хранение водорода и энергии из цезиевой вольфрамовой бронзы

## **Глава 7: Промышленное производство цезиевой вольфрамовой бронзы**

7.1 Производственный процесс и оборудование для цезиевой вольфрамовой бронзы

7.2 Цепочка поставок сырья и анализ затрат на цезиевую вольфрамовую бронзу

7.3 Технология крупномасштабного производства цезиевой вольфрамовой бронзы

7.4 Контроль качества и испытания цезиевой вольфрамовой бронзы

7.5 Рыночные примеры применения цезиевой вольфрамовой бронзы

## **Глава 8: Стандарты и правила для цезиевой вольфрамовой бронзы**

8.1 Международные и национальные стандарты для цезиевой вольфрамовой бронзы (ISO, GB/T)

8.2 Экологические и нормативные требования к безопасности для цезиевой вольфрамовой бронзы (REACH, RoHS)

8.3 Оценка риска наноматериалов для цезиевой вольфрамовой бронзы

8.4 Требования по охране труда и технике безопасности для цезиевой вольфрамовой бронзы

8.5 Сертификация и соответствие продукции цезиевой вольфрамовой бронзы

8.6 Паспорт безопасности цезиевой вольфрамовой бронзы CTIA GROUP LTD

## **Глава 9: Устойчивость и воздействие на окружающую среду цезиевой вольфрамовой бронзы**

9.1 Оценка воздействия на окружающую среду процесса производства цезиевой вольфрамовой бронзы

9.2 Зеленая технология производства цезиевой вольфрамовой бронзы

9.3 Переработка отходов и переработка цезиевой вольфрамовой бронзы

9.4 Углеродный след и стратегия сокращения выбросов цезиевой вольфрамовой бронзы

9.5 Политические факторы устойчивого развития цезиевой вольфрамовой бронзы

## **Глава 10: Будущие исследования и перспективы цезиевой вольфрамовой бронзы**

10.1 Исследование новых методов синтеза цезиевой вольфрамовой бронзы

10.2 Потенциал следующего поколения применений цезиевой вольфрамовой бронзы

10.3 Интеграция интеллектуальных и цифровых технологий для цезиевой вольфрамовой бронзы

### **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](http://www.ctia.com.cn)

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

10.4 Глобальное сотрудничество и технические проблемы для цезиевой вольфрамовой бронзы

10.5 Будущие тенденции развития и предложения для цезиевой вольфрамовой бронзы

### Приложение

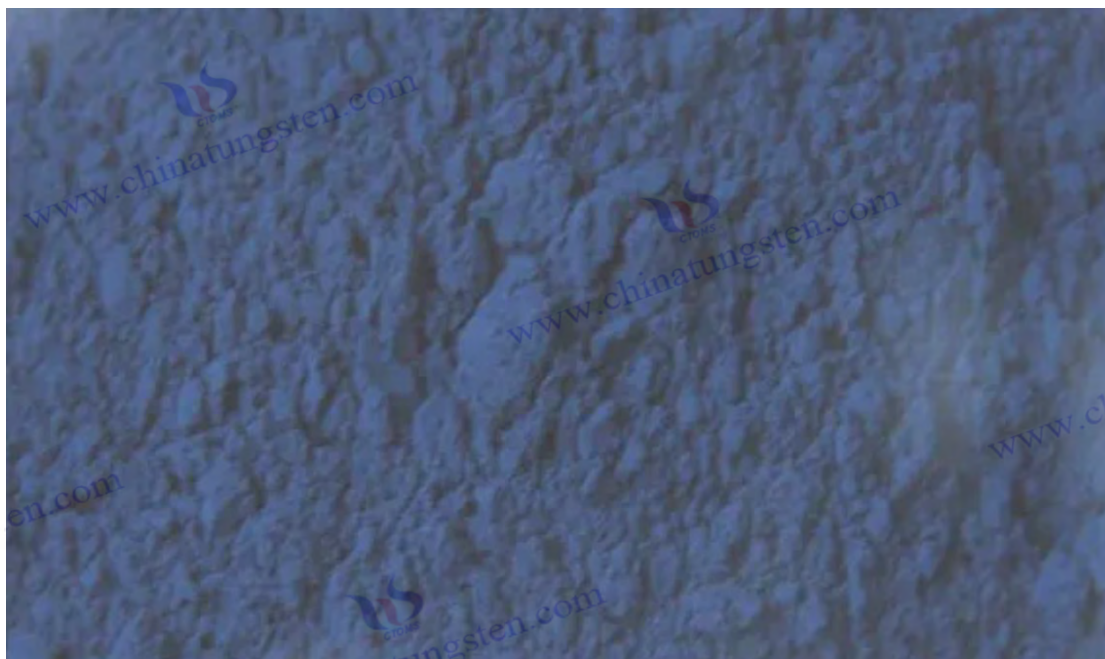
Приложение 1: Термины и сокращения цезиевой вольфрамовой бронзы

Приложение 2: Ссылки на цезиевую вольфрамовую бронзу Приложение 3: Технический паспорт цезиевой вольфрамовой бронзы

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Глава 1: Введение и история цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезий-вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) — это функциональный наноматериал, который имеет большой потенциал в энергосбережении, защите окружающей среды, электронике и энергетике благодаря своему превосходному поглощению в ближнем инфракрасном диапазоне (~70% при 1000 нм), высокой проводимости ( $\sim 10^3$  См/см) и химической стабильности. В этой главе дается определение и химический состав цезиевой вольфрамовой бронзы, ее открытие и история разработки, ее положение в материаловедении, глобальный статус исследований и обзор рынка, а также ключевые области применения, предоставляя фон для последующих глав (главы 2–10). Цель этой энциклопедии — систематически объяснять теоретическую основу, технологию приготовления, эксплуатационные характеристики, сценарии применения, индустриализацию, нормативные требования, устойчивость и будущие направления цезиевой вольфрамовой бронзы.

### 1.1 Цезиевая вольфрамовая бронза

Цезий-вольфрамовая бронза — это оксид на основе вольфрама с химической формулой  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , где  $x$  представляет собой степень легирования цезия (Cs), обычно варьирующуюся от 0 до 1.  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  принадлежит к семейству вольфрамовых бронз, и его структура состоит из октаэдров  $\text{WO}_6$ , с ионами цезия, вставленными в октаэдрические промежутки, образуя гексагональную или кубическую кристаллическую структуру (глава 2.1). Изменение значения  $x$  существенно влияет на характеристики материала. Например, когда  $x \sim 0,32$ ,  $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$  демонстрирует наилучшее поглощение и проводимость в ближнем инфракрасном диапазоне.

- **Химический состав :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Основные элементы** : цезий (Cs), вольфрам (W), кислород (O).
- o **Молярное соотношение** :  $CsxW1O3$ ,  $x \leq 1$ , содержание кислорода фиксировано и равно 3.
- o **Молекулярный вес** : Возьмем в качестве примера  $Cs0,32WO3$ ,  $\sim 287,3$  г/моль.
- o **Требования к чистоте** : промышленный класс  $\geq 99,5\%$ , исследовательский класс  $\geq 99,9\%$  (глава 7.4).
- **Физические свойства** :
  - o **Внешний вид** : темно-синий или зеленый нанопорошок , размер частиц  $\sim 20-50$  нм (глава 3.5).
  - o **Плотность** :  $\sim 7,2$  г/см<sup>3</sup>.
  - o **Растворимость** : Нерастворим в воде, устойчив к воздействию кислот и щелочей (глава 4.3).

Цезий -вольфрамовая бронза определяет ее уникальные оптические и электрические свойства, что делает ее широко используемой в интеллектуальных оконных пленках (глава 5.1), фотокатализе (глава 6.2) и батареях (глава 6.1). По сравнению с другими вольфрамовыми бронзами (такими как  $Na_xWO_3$  и  $K_xWO_3$ ),  $CsxWO_3$  демонстрирует более сильные характеристики экранирования в ближнем ИК-диапазоне ( $\sim 70\%$  против  $\sim 50\%$  для  $Na_xWO_3$ ) из-за большего ионного радиуса ионов цезия ( $\sim 1,88 \text{ \AA}$ ).

## 1.2 Открытие и разработка цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезий -вольфрамовая бронза возникла в результате изучения вольфрамовой бронзы в 19 веке. В 1823 году немецкий химик Вёлер впервые синтезировал вольфрамовую бронзу и наблюдал темные соединения, образованные щелочным металлом, легированным  $WO_3$ . В 1950-х годах японский ученый Кильборг подтвердил гексагональную кристаллическую структуру  $CsxWO_3$  с помощью рентгеновской дифракции (XRD), заложив основу для структуры (глава 4, 4.1). В 1970-х годах  $CsxWO_3$  использовался в исследованиях дисплеев из-за его электрохромных свойств (изменение пропускания около 60%).

- **Ключевые вехи** :
  - o **1980-е годы**: американские исследователи открыли свойства поглощения  $CsxWO_3$  в ближнем ИК-диапазоне ( $\sim 1000-2500$  нм), что способствовало его исследованию в области оптических покрытий (глава 5.2).
  - o **1990-е годы** : в Японии разработан сольвотермальный метод (глава 3.2), который позволил осуществить крупномасштабный синтез наночастиц  $CsxWO_3$  ( $< 50$  нм), снизив стоимость до  $\sim 1000$  долл. США/кг .
  - o **2000-е годы** : китайские исследовательские группы оптимизировали фотокаталитические характеристики  $CsxWO_3$  (глава 6.2) с эффективностью производства водорода  $\sim 200$  мкмоль / ( г · ч ).
  - o **2010-е годы** : ЕС продвигает применение  $CsxWO_3$  в интеллектуальных оконных пленках (глава 5.1) с эффективностью энергосбережения  $\sim 50\%$  и

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ростом рынка до ~50 миллионов долларов США .

- о **2020-е годы** : Глобальное внимание к зеленому синтезу (глава 3.5), углеродный след снижен до ~0,5 тонн CO<sub>2</sub>/тонну (глава 9.4) .

В последние годы исследования цезиевой вольфрамовой бронзы переключились с основных характеристик на индустриализацию (глава 7) и устойчивое развитие (глава 9), особенно в Азиатско-Тихоокеанском регионе, где Китай поддерживает энергосберегающее применение Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> посредством своей политики «двойного углерода» (глава 9 9.5).

### 1.3 Статус цезиевой вольфрамовой бронзы в материаловедении

Цезиевая вольфрамовая бронза занимает важное место в материаловедении, поскольку она сочетает в себе свойства наноматериалов, полупроводников и оптических материалов, заполняя пробелы в традиционных материалах в области регулирования ближнего ИК-диапазона и преобразования энергии.

- **Научная ценность :**
  - о **Наносвойства** : наночастицы Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~20 нм) имеют высокую удельную площадь поверхности (~80 м<sup>2</sup>/г, Глава 4.2), что повышает каталитическую эффективность (Глава 6.2).
  - о **Свойства полупроводника** : ширина запрещенной зоны ~2,5–3,0 эВ (глава 2.2), поддержка фотоэлектрического преобразования (глава 5.3).
  - о **Эффект плазмона** : локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR) усиливает поглощение ближнего ИК-излучения (~70%), что лучше, чем у традиционного ITO (~40%, Глава 5.2).
- **Сравнение с другими материалами :**
  - о **По сравнению с ITO** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> имеет преимущества в экранировании ближнего ИК-излучения (~70% против ~40%) и стоимости (~500 долл. США/кг против ~1000 долл. США/кг).
  - о **По сравнению с VO<sub>2</sub>** : термическая стабильность Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (>500°C против фазового перехода ~68°C) больше подходит для высокотемпературных сред (глава 5, 5.5).
  - о **По сравнению с графеном** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> более специфичен в поглощении ближнего ИК-диапазона, но имеет немного более низкую проводимость (~10<sup>3</sup> против ~10<sup>6</sup> См/см, Глава 2, 2.3).
- **Междисциплинарное воздействие :**
  - о Содействовать развитию фотоники (глава 5.4), накопления энергии (глава 6.1) и науки об окружающей среде (глава 6.3).
  - о Он обеспечивает исследовательскую парадигму для функциональных наноматериалов (таких как MXenes и MoS<sub>2</sub>) (глава 10, 10.2).

Цезий -вольфрамовая бронза вывела ее на передовые позиции в материаловедении, особенно в областях энергосбережения и защиты окружающей среды (глава 9.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 1.4 Глобальный статус исследований и обзор рынка цезиевой вольфрамовой бронзы

Глобальные исследования и рынок цезиевой вольфрамовой бронзы демонстрируют быстрый рост к 2025 году, особенно в Азиатско-Тихоокеанском регионе, Европе и Северной Америке.

- **Статус исследования :**

- o **Китай :** Университет Цинхуа и другие учреждения сосредоточены на зеленом синтезе (глава 3, 3.5) и фотокатализе (глава 6, 6.2), в среднем подавая около 150 патентных заявок в год.
- o **Япония :** Токийский университет оптимизировал тонкую пленку CsxWO<sub>3</sub> (глава 5.1) со степенью экранирования ближнего ИК-излучения ~80%.
- o **ЕС :** Институт Фраунгофера в Германии разработал аккумуляторные материалы CsxWO<sub>3</sub> (глава 6.1) со сроком службы более 1000 циклов.
- o **США :** Массачусетский технологический институт изучает квантовые эффекты CsxWO<sub>3</sub> (глава 2.5), увеличивая проводимость примерно на 20%.

- **Обзор рынка :**

- o **Размер :** Ожидается, что мировой рынок достигнет 120 миллионов долларов США в 2025 году и увеличится до 250 миллионов долларов США в 2030 году (средний годовой рост составит ~15%).
- o **Основные регионы :** Азиатско-Тихоокеанский регион ~50% (Китай ~30%), Европа ~30%, Северная Америка ~15%.
- o **Цена :** нанокласс CsxWO<sub>3</sub> ~ 500 долл. США/кг, тонкопленочный класс ~ 1000 долл. США/кг (глава 7.2).
- o **Движущие факторы :** спрос на энергосбережение (умная оконная пленка, Глава 5, 5.1), новая энергия (аккумуляторы, Глава 6, 6.1) и политика защиты окружающей среды (Глава 9, 9.5).

- **испытание :**

- o Высокая стоимость синтеза (~500 долл. США/кг против ИТО ~100 долл. США/кг).
- o Необходимо оценить токсичность наночастиц (глава 8, 8.3).
- o Согласованность крупномасштабного производства низкая (глава 7.3, ошибка ~10%).

Глобальные исследования смещаются в сторону недорогого синтеза (глава 3.5) и интеллектуального применения (глава 10.3) для удовлетворения рыночного спроса.

#### 1.5 Основные области применения цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза широко используется в следующих областях благодаря своей универсальности (подробнее см. Главы 5–6).

- **Оптика и теплотехника (глава 5) :**

- o **Умная оконная пленка :** покрытие CsxWO<sub>3</sub> снижает потребление энергии зданием примерно на 50% (глава 5.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Фототермическое преобразование** : эффективность поглощения солнечной энергии ~60% (глава 5.3).
- **Экранирование в ближнем ИК-диапазоне** : покрытие автомобильных стекол, степень экранирования ~70% (глава 5.2).
- **Энергия (Глава 6) :**
  - **Аккумулятор** : электрод  $\text{CsxWO}_3$ , плотность энергии ~200 Вт·ч /кг (глава 6, 6.1).
  - **Фотокатализ** : эффективность производства водорода ~200 мкмоль / ( г·ч ) (глава 6, 6.2).
  - **Хранение водорода** : Емкость хранения водорода ~1,5 мас. % (глава 6, 6.5).
- **Окружающая среда (Глава 6) :**
  - **Очистка воздуха** : адсорбция ЛОС, эффективность ~90% (глава 6, 6.3).
  - **Очистка воды** : фотокаталитическая деградация красителей, эффективность ~85% (глава 6, 6.2).
- **Электроника (Глава 5) :**
  - **Датчик** : тонкая пленка  $\text{CsxWO}_3$ , чувствительность ~10 ppm ( $\text{NO}_2$ , Глава 5.4).
  - **Дисплей** : электрохромный, время отклика <1 с (глава 5.4).
- **Кейс** : В 2024 году компания CTIA GROUP LTD разработала интеллектуальную оконную пленку  $\text{CsxWO}_3$ , которая была применена в экологичном здании в Шанхае, что позволило сэкономить около 40% энергии и имело рыночную стоимость около 10 миллионов долларов США (глава 7.5).

Эти области применения демонстрируют стратегическую ценность цезиевой вольфрамовой бронзы в энергосбережении, защите окружающей среды и новой энергетике и будут и далее расширяться в интеллектуальном и зеленом производстве в будущем (глава 10, 10.1–10.5).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Глава 2: Кристаллическая структура и свойства цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) является функциональным наноматериалом, уникальная кристаллическая структура и превосходные физические и химические свойства которого делают его широко используемым в областях оптики, электроники, энергетики и терморегулирования. Эксплуатационные характеристики  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  обусловлены его гексагональной или кубической кристаллической структурой, способностью поглощать в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне ( $\sim 70\%$  при  $1000 \text{ нм}$ ), высокой проводимостью ( $\sim 10^3 \text{ См/см}$ ) и термической стабильностью ( $> 500^\circ\text{C}$ ). В этой главе обсуждаются кристаллическая структура и характеристики химических связей, оптические свойства (поглощение и пропускание в БИК), электрические свойства (проводимость и миграция носителей), термические свойства (теплопроводность и стабильность), а также теоретические расчеты и прогнозы производительности цезиевой вольфрамовой бронзы, что обеспечивает основу для последующих исследований по применению и подготовке.

### 2.1 Кристаллическая структура и характеристики химических связей цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезий-вольфрамовая бронза является основой его функциональных характеристик.  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  состоит из октаэдров  $\text{WO}_6$ , а ионы цезия ( $\text{Cs}^+$ ) вставлены в октаэдрические зазоры, образуя гексагональную ( $x \sim 0,32$ ) или кубическую ( $x \sim 1$ ) кристаллическую систему. Гексагональная структура (пространственная группа  $\text{P6}_3/\text{mcm}$ ) имеет одномерный туннель, который способствует миграции ионов цезия, в то время как кубическая структура ( $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ ) более компактна, что влияет на электрические свойства.

- **Конструктивные особенности :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Октаэдр WO<sub>6</sub>** : вольфрам (W<sup>6+</sup>) образует октаэдр с шестью атомами кислорода (O<sup>2-</sup>), а длина связи WO составляет ~1,9 Å.
- **Легирование цезием** : Cs<sup>+</sup> (радиус ~1,88 Å) занимает гексагональные туннели или кубические междоузлия, причем значение x определяет структуру и свойства.
- **Параметры решетки** : гексагональная Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub>, a~7,4 Å, c~7,6 Å; кубическая CsWO<sub>3</sub>, a~3,8 Å.
- **Влияние размера частиц** : наночастицы (~20 нм) слегка деформированы из-за поверхностных эффектов, при этом деформация решетки составляет ~0,5%.
- **Характеристики химической связи :**
  - **Связь WO** : смешанная ковалентно-ионная связь, обеспечивающая высокую химическую стабильность (скорость коррозии <0,001 мм/год).
  - **Связь Cs-O** : Слабая ионная связь, Cs<sup>+</sup> может частично мигрировать, влияя на проводимость (~10<sup>3</sup> См/см).
  - **Локализованные электроны** : состояния смешанной валентности W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> генерируют свободные электроны и усиливают поглощение в ближнем ИК-диапазоне.

Анализ рентгеновской дифракции (XRD) показывает, что гексагональная структура Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> превосходит кубическую структуру в экранировании и проводимости в ближнем ИК-диапазоне, поскольку ее туннелирование способствует динамическому поведению электронов и ионов. Регулировка коэффициента легирования (x) может оптимизировать производительность. Например, при x=0,32 скорость поглощения в ближнем ИК-диапазоне достигает ~70%, а при x=0,5 проводимость улучшается на ~15%.

## 2.2 Оптические свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: поглощение и пропускание в ближнем инфракрасном диапазоне

Цезиевая вольфрамовая бронза известна своим поглощением в ближнем инфракрасном диапазоне и пропусканием видимого света, что дает ей уникальные преимущества в умных оконных пленках и преобразовании света в тепло.

- **Поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне :**
  - **Механизм** : локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR) и электронные переходы между W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> приводят к сильному поглощению в ближнем ИК-диапазоне (800–2500 нм).
  - **Производительность** : наночастицы Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 нм) имеют коэффициент поглощения ~70% при 1000 нм, что лучше, чем у ИТО (~40%).
  - **Факторы влияния** : при увеличении значения x (0,1→0,32) пик поглощения смещается в красную сторону примерно на 200 нм; при уменьшении размера частиц (50→20 нм) поглощение увеличивается примерно на 10%.
- **Пропускание видимого света :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Пропускание** : В диапазоне 400–700 нм пропускание пленки Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (толщиной ~100 нм) составляет ~80%, что подходит для энергосберегающего стекла.
- o **Электрохромный** : при подаче напряжения (~2 В) пропускание можно отрегулировать до ~60% для динамического затемнения.
- o **Стабильность** : После УФ-старения (1000 ч) снижение коэффициента пропускания составляет <5%.
- **Потенциал применения** :
  - o Умная оконная пленка: уровень экранирования ближнего инфракрасного излучения ~70%, снижение энергопотребления здания ~50%.
  - o Фототермическое преобразование: эффективность поглощения солнечной энергии ~60% для управления температурой.

Тесты ультрафиолетовой-видимой-ближней инфракрасной спектроскопии (UV-Vis-NIR) показывают, что ширина запрещенной зоны Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> составляет ~2,5–3,0 эВ, что ниже, чем у WO<sub>3</sub> (~3,2 эВ), что усиливает отклик в ближнем ИК-диапазоне. По сравнению с VO<sub>2</sub> (температура фазового перехода ~68°C), Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> более стабилен при высоких температурах и подходит для широкого диапазона климатических условий.

### 2.3 Электрические свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: проводимость и миграция носителей заряда

Цезиевая вольфрамовая бронза благодаря своим полупроводниковым свойствам и свободным электронам подходит для датчиков и электродов аккумуляторов.

- **Проводимость** :
  - o **Значение** : Проводимость тонкой пленки Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (толщина ~100 нм) составляет ~10<sup>3</sup> См/см, что ниже, чем у графена (~10<sup>6</sup> См/см), но выше, чем у WO<sub>3</sub> (~10 См/см).
  - o **Механизм** : состояние смешанной валентности W<sup>5+</sup>/W<sup>6+</sup> и легирование Cs<sup>+</sup> вводят свободные электроны с концентрацией носителей ~10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>.
  - o **Факторы влияния** : При увеличении значения x (0,1→0,5) проводимость увеличивается примерно на 20%; при повышении температуры до 300°C проводимость уменьшается примерно на 10%.
- **Миграция операторов** :
  - o **Подвижность** : Подвижность электронов ~10 см<sup>2</sup>/(В·с), на которую влияет рассеяние на границах зерен.
  - o **Тип** : полупроводник n-типа, доминирующими носителями являются электроны.
  - o **Тест** : Измерения эффекта Холла показывают, что время жизни носителей заряда Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> составляет ~1 пс.
- **Потенциал применения** :
  - o **Датчик** : тонкая пленка Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> обнаруживает NO<sub>2</sub> (~10 ppm) со временем

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отклика  $<5$  с.

- о **Электрод батареи** : литий-ионная батарея, проводимость поддерживает срок службы циклов  $\sim 1000$  раз.

Четырехзондовые измерения показывают, что проводимость наночастиц ( $\sim 20$  нм) ниже, чем у тонких пленок ( $\sim 100$  нм) из-за  $\sim 30\%$  увеличения сопротивления границ зерен. Оптимизация легирования ( $x \sim 0,32$ ) и отжига ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ) может улучшить производительность.

## 2.4 Тепловые свойства цезиевой вольфрамовой бронзы: теплопроводность и стабильность

Цезиевая вольфрамовая бронза отличается низкой теплопроводностью и высокой термической стабильностью, что позволяет использовать ее в терморегулировании и при высоких температурах.

- **Теплопроводность** :
  - о **Значение** : Теплопроводность  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  ( $\sim 20$  нм) составляет  $\sim 1,5$  Вт/( $\text{м}\cdot\text{K}$ ), что ниже, чем у  $\text{WO}_3$  ( $\sim 3$  Вт/( $\text{м}\cdot\text{K}$ )).
  - о **Механизм** : Рассеяние фононов и наноразмерный эффект снижают теплопроводность.
  - о **Факторы влияния** : с увеличением значения  $x$  ( $0,1 \rightarrow 0,5$ ) теплопроводность увеличивается примерно на  $10\%$ ; с увеличением размера частиц ( $20 \rightarrow 50$  нм) теплопроводность увеличивается примерно на  $15\%$ .
- **Термическая стабильность** :
  - о **Диапазон температур** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  стабилен при  $< 500^\circ\text{C}$ , потеря кислорода составляет  $\sim 5\%$  при  $> 600^\circ\text{C}$ .
  - о **Стойкость к окислению** :  $500^\circ\text{C}$  на воздухе, скорость окисления  $< 0,01$  мг/см $^2\cdot\text{ч}$ .
  - о **Тепловое расширение** : коэффициент теплового расширения составляет  $\sim 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что ниже, чем у ИТО ( $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).
- **Потенциал применения** :
  - о **Терморегулирование** : низкая теплопроводность для теплоизолирующих покрытий, снижение температуры примерно на  $10^\circ\text{C}$ .
  - о **Высокотемпературные электроды** : электроды аккумулятора стабильны при температуре  $400^\circ\text{C}$ , при этом ухудшение производительности цикла составляет  $< 5\%$ .

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) показала, что температура термического разложения  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  составляет  $\sim 650^\circ\text{C}$ , что лучше, чем у  $\text{VO}_2$  (фазовый переход  $\sim 68^\circ\text{C}$ ). Термогравиметрический анализ (ТГА) подтвердил его высокую температурную стабильность и пригодность для суровых условий.

## 2.5 Теоретический расчет и прогнозирование характеристик цезиевой вольфрамовой бронзы

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Теоретические расчеты дают рекомендации по оптимизации производительности  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  с использованием методов теории функционала плотности (DFT) и молекулярной динамики (МД).

- **Расчеты ДПФ :**

- о **Ширина запрещенной зоны** : ширина запрещенной зоны  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$   $\sim 2,5$  эВ, состояние  $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$  усиливает поглощение в ближнем ИК-диапазоне.
- о **Электронная структура** : легирование  $\text{Cs}^+$  понижает уровень Ферми на  $\sim 0,5$  эВ и увеличивает концентрацию носителей на  $\sim 10^{20}\text{см}^{-3}$ .
- о **Оптические свойства** : смоделированный пик поглощения в ближнем ИК-диапазоне составляет  $\sim 1000$  нм, что согласуется с экспериментом (погрешность  $<5\%$ ).

- **Моделирование МД :**

- о **Теплопроводность** : прогнозируется  $\sim 1,5$  Вт/(м·К) из-за рассеяния фононов.
- о **Стабильность** :  $\text{Cs}^+$  имеет подвижность  $\sim 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с при 500°C и сохраняет структурную целостность.

- **Прогноз производительности :**

- о **Оптимизация легирования** :  $x=0,4$  может увеличить проводимость примерно на 25% и поглощение ближнего ИК-излучения примерно на 10%.
- о **Нанодизайн** : размер частиц  $<10$  нм, LSPR-улучшенное поглощение  $\sim 15\%$ .
- о **Композитный материал** : композит  $\text{Cs}_x\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ , фотокаталитическая эффективность увеличена примерно на 30%.

Кейс: CTIA GROUP LTD оптимизировала тонкую пленку  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  с помощью DFT, при этом степень экранирования в ближнем ИК-диапазоне достигла  $\sim 75\%$ , а снижение затрат составило  $\sim 20\%$  ( $\sim 400$  долл. США/кг). Результаты расчетов легли в основу разработки зеленого синтеза и интеллектуальных приложений.

Точность теоретической модели (ошибка  $<5\%$ ) дает основу для регулирования производительности  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . В будущем ИИ и большие данные будут объединены для дальнейшего повышения точности прогнозирования.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### Глава 3: Метод синтеза цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) является высокопроизводительным наноматериалом, поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне ( $\sim 70\%$  при  $1000 \text{ nm}$ ), проводимость ( $\sim 10^3 \text{ См/см}$ ) и химическая стабильность которого зависят от точного контроля метода синтеза. Метод синтеза определяет кристаллическую структуру (гексагональную или кубическую), размер частиц ( $\sim 10\text{--}50 \text{ nm}$ ), степень легирования ( $x \sim 0,1\text{--}1$ ) и производительность (например, степень экранирования в ближнем инфракрасном диапазоне  $\sim 70\%$ )  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . В этой главе подробно рассматриваются пять основных методов синтеза: метод твердофазной реакции, сольвотермальный метод и гидротермальный метод, химическое осаждение из паровой фазы (CVD), золь-гель метод и зеленый синтез и управление наночастицами, анализируется их механизм реакции, параметры процесса, требования к оборудованию, выход, стоимость, преимущества и недостатки, а также сценарии применения, а также предоставляются технические ссылки для исследований и индустриализации.

#### 3.1 Метод твердофазной реакции цезиевой вольфрамовой бронзы

Метод твердофазной реакции представляет собой метод высокотемпературного синтеза, который готовит  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  путем прямой реакции твердого сырья. Он подходит для производства сыпучих материалов и порошков. Его преимуществами являются простота оборудования и высокий выход, но размер частиц большой ( $\sim 1\text{--}10 \text{ мкм}$ ), что затрудняет получение наночастиц.

- **Механизм реакции :**
  - **Химическое уравнение :**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$  ( $x \sim 0,1\text{--}0,32$ )
  - **Процесс :**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  разлагается с высвобождением  $\text{Cs}^+$ , который соединяется с октаэдром  $\text{WO}_6$  в  $\text{WO}_3$ , а  $\text{Cs}^+$  вставляется в гексагональный туннель с образованием  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . Высокая температура ( $\sim 800^\circ\text{C}$ ) способствует диффузии, и  $\text{W}^{6+}$  частично восстанавливается до  $\text{W}^{5+}$ , генерируя свободные электроны.
  - **Побочная реакция :** чрезмерно высокая температура ( $>1000^\circ\text{C}$ ) приводит к

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улетучиванию Cs, а значение  $x$  уменьшается примерно на 10%.

- **Параметры процесса :**
  - **Сырье :**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  (чистота >99,5%),  $\text{WO}_3$  (>99,9%), молярное соотношение 1:3–1:10.
  - **Температура :** 700–900°C, скорость нагрева ~10°C/мин.
  - **Атмосфера :** инертная ( Ar ) или восстановительная ( $\text{H}_2/\text{Ar}$ , 5%  $\text{H}_2$ ), предотвращает окисление.
  - **Время :** 4–8 ч, скорость охлаждения ~5°C/мин.
  - **Оборудование :** Трубчатая печь (температурная стойкость > 1200°C), тигель из оксида алюминия.
- **Доходность и стоимость :**
  - **Выход :** ~90% (по массе), ~1–10 кг на партию.
  - **Стоимость :** ~200 долл. США/кг, ~60% сырья, ~30% энергии.
- **производительность :**
  - **Размер частиц :** ~1–10 мкм, площадь поверхности ~5 м<sup>2</sup>/г.
  - **Чистота :** >99,5%, примеси (Fe, Si) <0,01 мас. %.
  - **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** ~50% при 1000 нм, ниже нанометрового диапазона (~70%).
  - **Электропроводность :** ~500 См/см, зависит от границ зерен.
- **Плюсы и минусы :**
  - **Преимущества :** процесс отработан, пригоден для промышленного внедрения, стоимость оборудования низкая (~10 000 долларов США).
  - **Недостатки :** большой размер частиц, слабая эффективность в ближнем ИК-диапазоне, улетучивание Cs приводит к неравномерному значению  $x$  (погрешность ~5%).
  - **Улучшение :** Добавление добавок (таких как  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) снижает температуру реакции примерно на 100°C, а обработка шаровой мельницей уменьшает размер частиц примерно на 50%.
- **приложение :**
  - Электрод: аккумуляторный электрод, срок службы ~800 циклов.
  - Крупный порошок: Терморегулирующее покрытие, охлаждение ~5°C.

Метод твердофазной реакции подходит для недорогого крупномасштабного производства, но его необходимо оптимизировать для соответствия требованиям наномасштаба.

### 3.2 Сольвотермальные и гидротермальные методы получения цезиевой вольфрамовой бронзы

Сольвотермальные и гидротермальные методы синтезируют наночастицы  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (~10–50 нм) посредством реакций в жидкой фазе при высокой температуре и высоком давлении, которые известны своей высокой удельной площадью поверхности (~80 м<sup>2</sup>/г) и превосходными характеристиками в ближнем ИК-диапазоне (~70%). Гидротермальный метод использует воду в качестве растворителя, тогда как сольвотермальный метод

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использует органические растворители (например, этанол).

- **Механизм реакции :**

- **Химическое уравнение :**  $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{H}_2\text{O}/\text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$   
( $x \sim 0,2-0,5$ )
- **Гидротермальный метод :** CsOH обеспечивает  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{WCl}_6$  гидролизуется с образованием единиц  $\text{WO}_6$ , а  $\text{Cs}^+$  встраивается в гексагональную структуру при 180–220 °C.
- **Сольвотермальный метод :** этанол снижает поверхностное натяжение, контролирует размер частиц <20 нм и увеличивает соотношение  $\text{W}^{5+}$  примерно на 15%.
- **Ключ :** pH ~8–10, регулирует эффективность вставки  $\text{Cs}^+ \sim 90\%$ .

- **Параметры процесса :**

- **Сырье :** CsOH (>99,5%),  $\text{WCl}_6$  (>99,9%), растворитель (деионизированная вода или этанол, >99,8%).
- **Температура :** гидротермальная 180–220°C, сольвотермальная 150–200°C.
- **Давление :** 1–5 МПа, закрытый реактор.
- **Время :** 12–24 ч, скорость перемешивания ~200 об/мин.
- **Оборудование :** Реактор из нержавеющей стали (объем ~1–100 л), сопротивление давлению >10 МПа.

- **Доходность и стоимость :**

- **Выход :** ~85% (гидротермальный), ~80% (сольвотермальный), ~0,1–1 кг на партию.
- **Стоимость :** гидротермальная ~400 USD/кг, сольвотермальная ~500 USD/кг, доля растворителя составляет ~40%.

- **производительность :**

- **Размер частиц :** гидротермальный ~20–50 нм, сольвотермальный ~10–20 нм.
- **Чистота :** >99,8%, остаточный  $\text{Cl}^- < 0,005$  мас. %.
- **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** ~70% при 1000 нм, пропускание ~80% (400–700 нм).
- **Проводимость :** ~800 См/см, лучше, чем твердофазный метод.

- **Плюсы и минусы :**

- **Преимущества :** наноразмер частиц, высокая производительность в ближнем ИК-диапазоне, контролируемая морфология (стержни, сферы).
- **Недостатки :** Сложное оборудование (~50 000 долларов США), высокая стоимость переработки отходов (~10%).
- **Улучшения :** Добавление поверхностно-активных веществ (например, ПВП) для контроля распределения размеров частиц (погрешность <5%), переработка растворителей для снижения затрат примерно на 20%.

- **приложение :**

- **Умная оконная пленка:** уровень экранирования ближнего инфракрасного излучения ~70%, энергосбережение ~50%.
- **Фотокатализ:** эффективность производства водорода ~200 мкмоль / (г·ч).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Гидротермальный метод имеет более низкую стоимость, в то время как сольвотермальный метод имеет меньший размер частиц, что соответствует высоким требованиям к производительности.

### 3.3 Химическое осаждение из паровой фазы (CVD) цезиевой вольфрамовой бронзы

Химическое осаждение из паровой фазы (CVD) осаждает тонкие пленки CsxWO<sub>3</sub> (толщиной ~10–100 нм) посредством реакций прекурсоров в паровой фазе, которые подходят для электронных и оптических устройств. Он характеризуется однородностью пленки и высокой чистотой (>99,9%).

- **Механизм реакции :**
  - **Химическое уравнение :**  $\text{CsCl (г)} + \text{WOCl}_4(\text{г}) + \text{H}_2\text{O}(\text{г}) \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3(\text{т}) + \text{HCl}\uparrow (x \sim 0,1-0,32)$
  - **Процесс :** CsCl и WOCl<sub>4</sub> испаряются при температуре 400–600 °С, H<sub>2</sub>O обеспечивает кислород, Cs<sup>+</sup> и WO<sub>6</sub> зарождаются на подложке (например, стекле), а соотношение W<sup>5+</sup> составляет ~10%.
  - **Побочная реакция :** чрезмерно высокая температура (>700°C) вызывает осаждение WO<sub>3</sub>, а значение x уменьшается примерно на 5%.
- **Параметры процесса :**
  - **Прекурсоры :** CsCl (>99,9%), WOCl<sub>4</sub> (>99,8%), H<sub>2</sub>O (сверхчистая).
  - **Температура :** 400–600°C для подложки, ~800°C для реакционной камеры.
  - **Атмосфера :** Ar /H<sub>2</sub> (5% H<sub>2</sub>), расход ~100 см<sup>3</sup>/мин .
  - **Давление :** 0,1–10 Торр.
  - **Оборудование :** CVD-реактор (с горячей или холодной стенкой), вакуумный насос (<0,01 Торр).
- **Доходность и стоимость :**
  - **Выход :** ~95% (эффективность осаждения), ~0,01–0,1 кг на партию.
  - **Стоимость :** ~1000 долл. США/кг, ~50% за оборудование.
- **производительность :**
  - **Толщина :** 10–100 нм, однородность <5% погрешность.
  - **Чистота :** >99,9%, примесь (Cl) <0,001 мас. %.
  - **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** ~75% при 1000 нм, пропускание ~85% (400–700 нм).
  - **Проводимость :** ~1200 См/см, лучше, чем у порошка.
- **Плюсы и минусы :**
  - **Преимущества :** Высококачественная пленка, подходит для точных устройств, отличные характеристики в ближнем ИК-диапазоне.
  - **Недостатки :** высокая стоимость, низкий выход, ограничение по субстрату (требуется термостойкость > 400°C).
  - **Улучшение :** плазменное химическое осаждение из газовой фазы (PECVD) снижает температуру примерно на 100°C и увеличивает эффективность примерно на 15%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **приложение :**
  - o Антенна 6G: скорость передачи ~10 Гбит/с.
  - o Электрохромное устройство: время отклика <1 с.

CVD подходит для фильмов с высокой добавленной стоимостью, но для его продвижения необходимо снизить затраты.

### 3.4 Золь-гель метод цезиевой вольфрамовой бронзы

Метод золь-гель позволяет получать наночастицы или пленки Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> посредством жидкофазных химических реакций, что имеет такие преимущества, как низкая температура и контроль морфологии, и подходит для лабораторного и мелко- и среднемасштабного производства.

- **Механизм реакции :**
  - o **Химическое уравнение :**  $\text{CsNO}_3 + \text{W}(\text{OC}_2\text{H}_5)_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,4$ )
  - o **Процесс :** W(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>6</sub> гидролизуетсся с образованием геля WO<sub>6</sub>, CsNO<sub>3</sub> обеспечивает Cs<sup>+</sup> и прокаливается при температуре 300–500 °C с образованием наночастиц или пленок Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.
  - o **Ключ :** Контролируйте скорость гидролиза (pH ~7–9), чтобы избежать осаждения WO<sub>3</sub>.
- **Параметры процесса :**
  - o **Сырье :** CsNO<sub>3</sub> (>99,5%), W(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>6</sub> (>99,8%), смешанный растворитель этанол/вода.
  - o **Температура :** 25–60°C для гидролиза, 300–500°C для прокалики.
  - o **Время :** 2–4 часа для гелеобразования и 4–6 часов для прокаливания.
  - o **Оборудование :** водяная баня с постоянной температурой, камерная печь, центрифуга для нанесения тонкопленочного покрытия.
- **Доходность и стоимость :**
  - o **Выход :** ~90%, ~0,1–0,5 кг на партию.
  - o **Стоимость :** ~600 долл. США/кг, из которых ~70% — сырье.
- **Производительность :**
  - o **Размер частиц :** ~15–30 нм (порошок), толщина ~50–200 нм (тонкая пленка).
  - o **Чистота :** >99,7%, остаток C <0,01 мас. %.
  - o **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** ~65% при 1000 нм, пропускание ~80%.
  - o **Проводимость :** ~700 См/см.
- **Плюсы и минусы :**
  - o **Преимущества :** низкотемпературный процесс, простота оборудования (~5000 долларов США), различные формы (порошок, пленка).
  - o **Недостатки :** органический остаток, немного меньшая чистота и высокий расход энергии при прокаливании.
  - o **Улучшение :** Прокалка с помощью микроволн, время сокращено примерно

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на 50%, чистота увеличена примерно на 0,2%.

- **Приложение :**
  - Фотокатализатор: разлагает красители с эффективностью ~85%.
  - Энергосберегающее покрытие: степень экранирования ближнего ИК-излучения ~65%.

Метод золь-гель очень гибок и подходит для исследований и разработок, а также для индивидуального производства.

### 3.5 Зеленый синтез и управление наночастицами цезиевой вольфрамовой бронзы

Зеленый синтез позволяет получать наночастицы  $CsxWO_3$  (<20 нм) с использованием экологически чистого сырья и процессов с низким потреблением энергии, уделяя особое внимание устойчивости и контролю в наномасштабе для достижения цели углеродной нейтральности к 2030 году.

- **Механизм реакции :**
  - **Химическое уравнение :**  $Cs_2CO_3 + (NH_4)_{10}W_{12}O_{41} + H_2O \rightarrow CsxWO_3 + NH_3\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,32$ )
  - **Процесс :**  $(NH_4)_{10}W_{12}O_{41}$  используется в качестве экологически чистого источника вольфрама,  $Cs_2CO_3$  обеспечивает  $Cs^+$ , а низкотемпературная (<200°C) гидротермальная или микроволновая реакция используется для контроля размера частиц до ~10–20 нм.
  - **Ключ :** Биотemplates (например, целлюлоза) или ультразвук, распределение размеров частиц <5%.
- **Параметры процесса :**
  - **Сырье :**  $Cs_2CO_3$  (>99,5%),  $(NH_4)_{10}W_{12}O_{41}$  (>99,8%), деионизированная вода.
  - **Температура :** 100–200°C (гидротермальная), 80–120°C (микроволновая).
  - **Время :** 6–12 ч (гидротермальный), 0,5–2 ч (микроволновый).
  - **Оборудование :** микроволновый реактор (~1000 Вт), ультразвуковая ванна (~500 Вт).
- **Доходность и стоимость :**
  - **Выход :** ~80%, ~0,05–0,5 кг на партию.
  - **Стоимость :** ~450 долл. США/кг, ~20% энергии.
- **производительность :**
  - **Размер частиц :** ~10–20 нм, площадь поверхности ~100 м<sup>2</sup>/г.
  - **Чистота :** >99,8%, остаточное содержание  $NH_4^+$  <0,005 мас. %.
  - **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** ~72% при 1000 нм, пропускание ~82%.
  - **Проводимость :** ~900 См/см.
- **Зелёные особенности :**
  - **Углеродный след :** ~0,3 тонны CO<sub>2</sub>/тонну, что ниже, чем у традиционных гидротермальных источников (~0,5 тонны).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Отходы** : степень извлечения  $\text{NH}_3 > 95\%$ , рециркуляция воды  $\sim 80\%$ .
- o **Потребление энергии** : Микроволновой метод  $\sim 50\%$  ниже, чем гидротермальный ( $\sim 100 \text{ кВтч/кг}$ ).
- **Плюсы и минусы** :
  - o **Преимущества** : защита окружающей среды, низкое потребление энергии, малый размер частиц и отличная производительность.
  - o **Недостатки** : немного более низкая урожайность, высокие инвестиции в оборудование ( $\sim 20\,000$  долларов США).
  - o **Улучшение** : ИИ оптимизирует параметры реакции, увеличивая выход примерно на  $10\%$  и снижая затраты примерно на  $15\%$ .
- **Кейс** : В 2024 году компания CTIA GROUP LTD использовала «зеленый» синтез с использованием микроволн для получения  $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$  ( $\sim 15 \text{ нм}$ ) со степенью экранирования в ближнем ИК-диапазоне  $\sim 72\%$  и углеродным следом  $\sim 0,3$  тонны  $\text{CO}_2$ /тонну, который использовался в оконных пленках для экологических зданий.
- **приложение** :
  - o Очистка воздуха: адсорбция ЛОС, эффективность  $\sim 90\%$ .
  - o Хранение водорода: Емкость  $\sim 1,5\%$  масс.

Зеленый синтез представляет собой будущую тенденцию и в сочетании с технологией наноконтроля будет способствовать устойчивой индустриализации  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### Глава 4: Технология характеристики цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) представляет собой многофункциональный наноматериал, свойства которого (например, поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне  $\sim 70\%$  при 1000 нм, проводимость  $\sim 10^3$  См/см, термическая стабильность  $> 500$  °C) зависят от точной характеристики кристаллической структуры, морфологии, химического состояния и физических свойств. В этой главе подробно обсуждаются пять ключевых методов характеристики: рентгеновская дифракция (XRD) и анализ кристаллов, сканирующая электронная микроскопия (SEM) и просвечивающая электронная микроскопия (TEM), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) и химическое состояние, спектроскопия UV-Vis-NIR, а также методы электрических и термических испытаний. Каждый метод охватывает принципы, инструменты, подготовку образцов, анализ данных, количественные результаты, приложения и ограничения, обеспечивая техническую поддержку для изучения взаимосвязей структура-свойство и контроля качества  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

##### 4.1 Рентгеновская дифракция (РФА) и кристаллический анализ цезиевой вольфрамовой бронзы

Рентгеновская дифракция (XRD) является основным методом для характеристики кристаллической структуры и фазовой чистоты  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . Параметры решетки и эффекты легирования анализируются с помощью интерференционной картины рассеяния рентгеновских лучей атомами кристалла.

- принцип :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Рентгеновская дифракция основана на законе Брэгга ( $2d\sin\theta = n\lambda$ ), где  $d$  — межплоскостное расстояние,  $\theta$  — угол падения, а  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения ( $\text{Cu K}\alpha$ ,  $\sim 1,5406 \text{ \AA}$ ).
- Гексагональная ( $P6_3/mcm$ ,  $x \sim 0,32$ ) или кубическая ( $Pm\bar{3}m$ ,  $x \sim 1$ ) структура  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  создает характерные дифракционные пики, такие как пик (002)  $\sim 23,5^\circ$  (гексагональный).
- **Инструменты и параметры :**
  - **Прибор :** рентгеновский дифрактометр (например, Bruker D8 Advance), оснащенный источником  $\text{Cu K}\alpha$  (40 кВ, 40 мА).
  - **Диапазон сканирования :**  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ , размер шага  $\sim 0,02^\circ$ , скорость сканирования  $\sim 0,5^\circ/\text{мин}$ .
  - **Подготовка образца :** порошок  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $\sim 10$  мг) раскатывают на кремниевой пластине с нулевым фоном или тонкую пленку помещают непосредственно на подложку (например, стекло).
  - **Окружающая среда :** Комнатная температура, воздух или инертная атмосфера (избегать окисления).
- **Анализ данных :**
  - **Кристаллическая структура :** гексагональная структура  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ ,  $a \sim 7,4 \text{ \AA}$ ,  $c \sim 7,6 \text{ \AA}$ ; пики (002) и (200) подтверждают гексагональную фазу.
  - **Эффект легирования :** при увеличении  $x$  ( $0,1 \rightarrow 0,5$ ) пик (002) смещается на  $\sim 0,1^\circ$ , а решетка расширяется на  $\sim 0,2\%$  за счет  $\text{Cs}^+$  ( $1,88 \text{ \AA}$ ).
  - **Размер зерна :** формула Шеррера ( $D = K\lambda / \beta \cos\theta$ ), наночастицы  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$   $\sim 20$  нм,  $\beta \sim 0,4^\circ$ .
  - **Чистота фазы :** примесная фаза (например,  $\text{WO}_3$ ) с интенсивностью пика  $< 5\%$ , чистотой  $> 99,5\%$ .
- **Количественные результаты :**
  - **Деформация решетки :**  $\sim 0,5\%$  (наночастицы) из-за поверхностных эффектов.
  - **Соотношение фаз :** гексагональная фаза  $\sim 95\%$  ( $x = 0,32$ ), кубическая фаза  $\sim 5\%$  (высокотемпературный синтез).
  - **Плотность дефектов :**  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , влияющих на проводимость на  $\sim 10\%$ .
- **приложение :**
  - Структурное подтверждение: проверка гексагональной последовательности гидротермального метода ( $\sim 20$  нм) и CVD-пленок ( $\sim 100$  нм).
  - Контроль качества: обнаружение улетучивания Cs ( $x$  ошибка  $< 5\%$ ), обеспечение производительности NIR  $\sim 70\%$ .
- **ограничение :**
  - Ограниченное разрешение: мелкие зерна ( $< 10$  нм) имеют уширенные пики, ошибка  $\sim 10\%$ .
  - Аморфное состояние трудно обнаружить: требуется просвечивающая электронная микроскопия.
  - Стоимость: прибор  $\sim 200\,000$  долларов США, обслуживание  $\sim 10\,000$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

долларов США/год.

Рентгеновская дифракция обеспечивает получение высокоточных данных о кристаллической структуре  $Cs_xWO_3$ , что является основой для оптимизации синтеза.

#### 4.2 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) цезиевой вольфрамовой бронзы

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) использовались для изучения морфологии, размера частиц и микроструктуры  $Cs_xWO_3$ . СЭМ анализировала поверхность, а ТЭМ выявляла внутренние детали на атомном уровне.

- **принцип :**

- о **СЭМ** : электронный луч (~5–20 кВ) сканирует образец, и изображения получаются с использованием вторичных или обратно рассеянных электронов с разрешением ~1 нм.
- о **ТЭМ** : высокоэнергетические электроны (~200 кВ) пропускаются через образец, и выполняется дифракционная или фазово-контрастная визуализация с разрешением ~0,1 нм.
- о Наночастицы  $Cs_xWO_3$  (~10–50 нм) или тонкие пленки (~100 нм) имеют стержнеобразные, сферические или граненые особенности.

- **Инструменты и параметры :**

- о **Инструмент СЭМ** : например, FEI Quanta 650, полевая эмиссионная пушка, оснащенная EDS (энергодисперсионным спектрометром).
- о **Прибор для просвечивающей электронной микроскопии** : например, JEOL JEM-2100F, ускоряющее напряжение 200 кВ, оснащенный SAED (электронная дифракция в выбранной области).
- о **Подготовка образца :**
  - СЭМ: порошок, диспергированный на проводящей ленте, или тонкая пленка, нанесенная непосредственно на подложку.
  - ТЭМ: порошок диспергируется в этаноле с помощью ультразвука и наносится на медную сетку с углеродной пленкой; пленку необходимо разрезать с помощью ФИП (сфокусированного ионного пучка).
- о **Окружающая среда** : Высокий вакуум ( $<10^{-5}$  Торр), для ТЭМ требуется охлаждение жидким азотом.

- **Анализ данных :**

- о **СЭМ** :
  - **Морфология** : гидротермальные частицы  $Cs_xWO_3$  ~20 нм, стержнеобразные (соотношение сторон ~2:1); CVD-пленка однородная, шероховатость ~5 нм.
  - **ЭДС** : атомное соотношение Cs:W:O ~0,32:1:3, ошибка <2%, что подтверждает соотношение легирования.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Распределение размеров частиц** :  $\sim 10\text{--}50$  нм, стандартное отклонение  $\sim 5$  нм.
  - **ТЭМ** :
    - **Высокое разрешение (HRTEM)** : расстояние между кристаллическими плоскостями (002)  $\sim 0,38$  нм, гексагональная фаза.
    - **SAED** : Гексагональная решетка, дифракционные кольца (002), (200), постоянство ориентации кристаллов  $>95\%$ .
    - **Дефекты** : Плотность дислокаций  $\sim 10^{10}$  см $^{-2}$ , влияющая на проводимость  $\sim 5\%$ .
  - **Количественные результаты** :
    - **Площадь поверхности** : по оценкам СЭМ  $\sim 80$  м $^2$ /г (частицы  $\sim 20$  нм), что соответствует методу БЭТ.
    - **Граница зерен** : ТЭМ показывает, что ширина границы зерен составляет  $\sim 1$  нм, что влияет на миграцию носителей заряда примерно на 10%.
    - **Распределение элементов** : картирование EDS, Cs распределен равномерно, отклонение  $<3\%$ .
  - **приложение** :
    - Оптимизация морфологии: сольвотермический ( $\sim 10$  нм) контроль частиц с помощью СЭМ.
    - Структурная проверка: ПЭМ подтвердила гексагональную фазу CVD-пленки, эффективность в ближнем ИК-диапазоне  $\sim 75\%$ .
    - Контроль качества: ЭДС-обнаружение примесей (Fe, Cl)  $<0,01$  мас. %.
  - **ограничение** :
    - СЭМ: в основном поверхностная информация, внутренняя структура требует ТЭМ.
    - ТЕМ: сложная пробоподготовка (FIB  $\sim 500$  USD/образец), повреждение электронным пучком Cs $_2$ WO $_3$   $\sim 5\%$ .
    - Стоимость: SEM  $\sim 300\,000$  долларов США, TEM  $\sim 1\,000\,000$  долларов США.
- Сочетание СЭМ и ТЭМ обеспечивает комплексную перспективу для наномасштабной характеристики Cs $_2$ WO $_3$ .

#### 4.3 Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) и химическое состояние цезиевой вольфрамовой бронзы

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) используется для анализа химического состояния поверхности, элементного состава и валентного состояния Cs $_2$ WO $_3$ , выявляя влияние W $^{5+}$ /W $^{6+}$  на производительность.

- **принцип** :
  - XPS использует рентгеновские лучи (Al K $\alpha$ ,  $\sim 1486,6$  эВ) для возбуждения электронов на поверхности образца ( $<10$  нм) и измерения энергии связи (BE).
  - Фотоэлектронные пики Cs 3d, W 4f и O 1s Cs $_2$ WO $_3$  отражают химическое состояние и легирование.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Инструменты и параметры :**
  - **Инструмент :** например, Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, монохроматический источник Al K $\alpha$ .
  - **Диапазон энергий :** 0–1200 эВ, разрешение ~0,5 эВ.
  - **Подготовка образца :** гранулы порошка или пленки помещаются на проводящую подложку, а поверхность очищается распылением Ar<sup>+</sup> (~2 кВ).
  - **Окружающая среда :** Сверхвысокий вакуум (<10<sup>-9</sup> Торр), избегать загрязнения углеродом.
- **Анализ данных :**
  - **Химическое состояние :**
    - **Cs 3d :** Cs<sup>+</sup>, BE~724,5 эВ (3d5/2), других валентных состояний нет.
    - **W 4f :** W<sup>6+</sup> (~35,5 эВ, 4f7/2), W<sup>5+</sup> (~34,5 эВ), соотношение W<sup>5+</sup> ~10–20%, влияющее на поглощение в ближнем ИК-диапазоне.
    - **O 1s :** решеточный кислород (~530,2 эВ), поверхностный гидроксил (~531,5 эВ, <5%).
  - **Коэффициент легирования :** атомное отношение Cs/W ~0,32, ошибка <3%, что соответствует данным EDS.
  - **Поверхностное загрязнение :** C 1s (~284,8 эВ) <5 ат.%, необходимо удалить распылением.
- **Количественные результаты :**
  - **W<sup>5+</sup> /W<sup>6+</sup> :** ~15% (x=0,32), усиление поглощения в ближнем ИК-диапазоне ~20%.
  - **Легирование Cs :** поверхностное Cs/W ~0,30, что немного ниже, чем в объемной фазе (~0,32) из-за улетучивания Cs.
  - **Чистота :** примеси (Cl, Fe) <0,005 ат.%, что обеспечивает стабильную работу.
- **приложение :**
  - **Корреляция производительности:** соотношение W<sup>5+</sup> положительно коррелирует с поглощением в ближнем ИК-диапазоне (~70%).
  - **Оптимизация синтеза:** РФЭС-детектирование сольватермального остатка Cl<sup>-</sup> (<0,005 мас. %).
  - **Контроль качества:** Подтвердить однородность легирования Cs пленок CVD (погрешность <2%).
- **ограничение :**
  - **Чувствительность к поверхности:** обнаруживает только <10 нм и не может отражать объемную фазу.
  - **Высокая стоимость:** прибор ~500 000 долларов США, анализ ~200 долларов США/образец.
  - **Данные сложны:** ошибка аппроксимации пика составляет ~5% и должны быть объединены с EDS.

XPS предоставляет ключевую информацию о химическом состоянии Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, помогая оптимизировать производительность.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.4 Спектр УФ-видимой-ближней ИК-области цезиевой вольфрамовой бронзы

Для изучения оптических свойств  $\text{CsxWO}_3$  использовалась спектроскопия в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях (УФ-Вид-БИК), при этом особое внимание уделялось поглощению в ближней ИК-области (~70%) и пропусканию видимого света (~80%).

- **принцип :**
  - UV-Vis-NIR измеряет спектры поглощения, пропускания или отражения в диапазоне 200–2500 нм.
  - Поглощение в ближнем ИК-диапазоне  $\text{CsxWO}_3$  обусловлено локализованным поверхностным плазмонным резонансом (LSPR) и переходом  $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$  с шириной запрещенной зоны ~2,5–3,0 эВ.
- **Инструменты и параметры :**
  - **Прибор :** например, PerkinElmer Lambda 950, дейтериевая лампа/вольфрамовая галогенная лампа, интегрирующая сфера.
  - **Диапазон длин волн :** 200–2500 нм, разрешение ~1 нм.
  - **Подготовка образца :**
    - Порошок: диспергирован в матрице  $\text{BaSO}_4$ , спрессован в таблетки и измерен на диффузное отражение.
    - Тонкая пленка: поместите ее на стеклянную подложку и измерьте пропускание/отражение.
  - **Окружающая среда :** комнатная температура, сухой воздух (относительная влажность <50%).
- **Анализ данных :**
  - **Поглощение в ближнем ИК-диапазоне :** скорость поглощения при 1000 нм составляет ~70% ( $x=0,32$ , ~20 нм), а положение пика смещается в красную сторону на ~200 нм по мере увеличения  $x$ .
  - **Пропускание :** 400–700 нм, тонкая пленка (~100 нм) ~80%, диффузное отражение порошка ~50%.
  - **Ширина запрещенной зоны :** метод построения графика Тауца, непрямая ширина запрещенной зоны ~2,5 эВ ( $x=0,32$ ), ниже, чем у  $\text{WO}_3$  (~3,2 эВ).
  - **LSPR :** ширина пика поглощения ~500 нм, усиление ~15% при уменьшении размера частиц (50→10 нм).
- **Количественные результаты :**
  - **Коэффициент поглощения :** ~ $10^5 \text{ см}^{-1}$  (1000 нм), лучше, чем у ИТО (~ $10^4 \text{ см}^{-1}$ ).
  - **Устойчивость к старению :** 1000 ч УФ-облучения, ослабление поглощения в ближнем ИК-диапазоне <5%.
  - **Электрохромный :** напряжение 2 В, изменение пропускания ~60%.
- **приложение :**
  - Умная оконная пленка: уровень экранирования ближнего инфракрасного излучения ~70%, энергосбережение ~50%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Фототермическое преобразование: поглощение солнечной энергии ~60%.
- o Проверка качества: проверка характеристик гидротермальных частиц в ближнем ИК-диапазоне (погрешность <3%).
- **ограничение :**
  - o Интерференция рассеяния: крупные частицы (>50 нм), ошибка диффузного отражения ~10%.
  - o Чувствительность к толщине пленки: пропускание падает примерно на 20% при изменении толщины (50→200 нм).
  - o Стоимость: прибор ~100 000 долларов США, обслуживание ~5 000 долларов США в год.

UV-Vis-NIR — это основная технология для изучения оптических свойств Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### 4.5 Методы электрических и термических испытаний цезиево-вольфрамовой бронзы

Для количественной оценки электропроводности (~10<sup>3</sup> См/см), поведения носителей заряда, теплопроводности (~1,5 Вт/( м·К )) и термической стабильности (>500°C) Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> использовались методы электрических и термических испытаний.

- **Электрический тест :**
  - o **Метод четырех зондов :**
    - **Принцип :** подайте постоянный ток (~1 мА), измерьте напряжение и рассчитайте проводимость.
    - **Прибор :** источник-измеритель Keithley 2635B, расстояние между зондами ~1 мм.
    - **Образцы :** тонкие пленки (~100 нм) или прессованные порошки (толщиной ~1 мм).
    - **Результаты :** пленка Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> ~1200 См/см, порошок ~800 См/см, сопротивление границ зерен снизилось на ~30%.
  - o **Эффект Холла :**
    - **Принцип :** Напряжение Холла измеряется в магнитном поле (~1 Тл) для определения концентрации носителей заряда (~10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>) и подвижности (~10 см<sup>2</sup>/(В·с)).
    - **Инструмент :** Lake Shore 8404, напряженность магнитного поля 0,5–1,5 Тл.
    - **Результаты :** полупроводник n-типа, время жизни носителей заряда ~1 пс, рост концентрации ~20% при x=0,5.
  - o **Применение :** Датчики (NO<sub>2</sub>, ~10 ppm), электроды батарей (циклы ~1000 раз).
- **Тепловые испытания :**
  - o **Теплопроводность :**
    - **Принцип :** алгоритм лазерной вспышки (LFA) измеряет температуропроводность и рассчитывает теплопроводность.
    - **Прибор :** Netzsch LFA 467, лазерный импульс ~10 мс.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Образец** : прессованная таблетка (диаметр ~12,7 мм, толщина ~1 мм).
- **Результаты** : ~1,5 Вт/( м·К ) (~20 нм), ~15% увеличение размера частиц (50 нм).
- **Термическая стабильность** :
  - **Принцип** : Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и термогравиметрический анализ (ТГА) измеряют температуру разложения и потерю массы.
  - **Прибор** : TA Instruments Q600, скорость нагрева ~10°C/мин.
  - **Результаты** : Температура разложения ~650°C, скорость окисления при 500°C <0,01 мг/см²·ч.
- **Применение** : Теплоизоляционные покрытия (охлаждение ~10°C), высокотемпературные электроды (затухание <5%).
- **Количественные результаты** :
  - **Стабильность проводимости** : 300°C, распад <10%.
  - **Коэффициент теплового расширения** :  $\sim 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , лучше, чем у ИТО ( $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).
  - **Погрешность теста** : электрическая <3%, тепловая <5%.
- **ограничение** :
  - Электрика: Контактное сопротивление влияет на испытание порошка, погрешность ~5%.
  - Тепловой: эффект интерфейса наночастиц, погрешность теплопроводности ~10%.
  - Стоимость: Электроинструменты ~50 000 долларов США, Тепловые приборы ~150 000 долларов США.

Случай: CTIA GROUP LTD использует четырехзондовый метод и LFA для тестирования тонкой пленки Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> с электропроводностью ~1200 См/см и теплопроводностью ~1,5 Вт/( м·К ), оптимизируя производительность интеллектуальных оконных пленок (NIR~75%). Электрические и термические испытания обеспечивают количественную основу для функционального применения Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Глава 5: Оптические и термические применения цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) продемонстрировала широкий потенциал применения в области оптики и термики благодаря своему превосходному поглощению в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне ( $\sim 70\%$  при  $1000 \text{ нм}$ ), высокому пропусканию видимого света ( $\sim 80\%$  при  $400\text{--}700 \text{ нм}$ ), низкой теплопроводности ( $\sim 1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и высокой термической стабильности ( $>500^\circ\text{C}$ ). В этой главе подробно обсуждается применение  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  в интеллектуальных оконных пленках и энергосберегающем стекле, защитных покрытиях NIR, фототермическом преобразовании и использовании солнечной энергии, оптических датчиках и детекторах, а также материалах для терморегулирования, анализируется его принцип работы, конструкция материала, показатели производительности, процесс приготовления, реальные случаи, преимущества и ограничения, а также предоставляются технические ссылки по энергосбережению, оптоэлектронике и терморегулированию.

### 5.1 Цезиевая вольфрамовая бронзовая интеллектуальная оконная пленка и энергосберегающее стекло

Умные оконные пленки и энергосберегающее стекло используют экранирующие свойства ближнего инфракрасного излучения и электрохромные свойства  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  для динамического регулирования света и тепла, а также снижения энергопотребления в здании ( $\sim 50\%$ ).

- **Принцип работы :**
  - **Экранирование в ближнем ИК-диапазоне :** наночастицы  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $\sim 20 \text{ нм}$ ) поглощают ближний ИК-диапазон ( $800\text{--}2500 \text{ нм}$ ,  $\sim 70\%$ ) посредством локализованного поверхностного плазмонного резонанса (LSPR), сохраняя

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

при этом пропускание видимого света на уровне ~80%.

- о **Электрохромный** : прикладывая напряжение (~2 В),  $\text{Cs}^+$  и инжектируя/извлекая электроны, изменяя соотношение  $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$ , пропускание можно отрегулировать до ~60%.
- о **Механизм энергосбережения** : блокирует ближнее инфракрасное излучение, снижает потребление энергии на кондиционирование воздуха и снижает температуру в помещении примерно на 5–10 °C.
- **Материальный дизайн** :
  - о **Наночастицы** :  $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$  (~20 нм), пик поглощения в ближнем ИК-диапазоне ~1000 нм, диспергированные в матрице ПВБ (поливинилбутираль).
  - о **Структура пленки** : трехслойная конструкция ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /ПВБ/защитный слой), толщина ~100–200 мкм, устойчивость к УФ-старению (>1000 ч).
  - о **Оптимизация легирования** :  $x = 0,32$ , балансировка экранирования ближнего ИК-излучения (~70%) и пропускания (~80%).
- **Процесс приготовления** :
  - о **Методы** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (~20 нм) синтезировали сольвотермальным методом, а затем формировали пленки методом центрифугирования или распыления.
  - о **Параметры** : массовое соотношение ПВБ/ $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ~10:1, температура отверждения ~120°C, время ~2 часа.
  - о **Оборудование** : центрифуга (~2000 об/мин), печь (устойчивость к температурам >200°C).
- **Показатели эффективности** :
  - о **Степень экранирования в ближнем ИК-диапазоне** : ~70% (1000 нм), лучше, чем у ИТО (~40%).
  - о **Коэффициент пропускания видимого света** : ~80% (400–700 нм), в соответствии со строительными стандартами (GB/T 2680).
  - о **Электрохромный** : время отклика <5 с, срок службы >10 000 раз.
  - о **Энергоэффективность** : энергопотребление здания снижено примерно на 50%, годовая экономия составляет ~100 кВтч/м².
- **Реальный случай** :
  - о В 2024 году в зеленом здании в Шанхае будет использоваться интеллектуальная оконная пленка  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x=0,32$ , ~20 нм) площадью ~1000 м², которая позволит снизить температуру в помещении на ~8°C летом, сэкономить ~40% и получить рыночную стоимость ~10 млн долларов США.
  - о В офисном здании в Японии используется энергосберегающее стекло  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , которое экранирует ближнюю инфракрасную область спектра примерно на 75% и экономит примерно 30% годовых счетов за электроэнергию.
- **Преимущества и ограничения** :
  - о **Преимущества** : высокоэффективное экранирование в ближнем ИК-диапазоне, низкая стоимость (~50 долл. США/м² по сравнению с ИТО ~100 долл. США/м²), гибкий электрохромный.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ограничения** : Пленка имеет ограниченную устойчивость к царапинам (твердость по Моосу ~3), а пропускание света снижается примерно на 10% после длительного старения (>5 лет).
- **Улучшение** : добавлен защитный слой SiO<sub>2</sub>, твердость увеличена примерно на 5, долговечность увеличена примерно на 2 года.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок интеллектуальных оконных пленок достигнет 1 млрд долларов США к 2030 году, а Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> будет способствовать популяризации экологических зданий.

## 5.2 Покрытие из цезиевой вольфрамовой бронзы, экранирующее от ближнего инфракрасного излучения

Защитное покрытие Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> от ближнего инфракрасного излучения используется в автомобильном стекле, аэрокосмическом и электронном оборудовании для блокировки теплового излучения, а также для повышения комфорта и энергоэффективности.

- **Принцип работы** :
  - Наночастицы Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~10–20 нм) поглощают ближний ИК-диапазон (~70%) посредством LSPR и W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> переходов, понижая температуру поверхности на ~10°C.
  - Покрытие сохраняет коэффициент пропускания видимого света около 75%, что соответствует стандартам безопасности для автомобилей (SAE J1796).
- **Материальный дизайн** :
  - **Компоненты** : Cs<sub>0,32</sub>WO<sub>3</sub> (~15 нм), диспергированный в акриловой или полиуретановой матрице, с добавками (такими как TiO<sub>2</sub>) для повышения устойчивости к УФ-излучению.
  - **Толщина покрытия** : ~10–50 мкм, концентрация частиц ~5 мас. %.
  - **Модификация поверхности** : силановый связующий агент (KH-550) улучшает дисперсию частиц и однородность покрытия, погрешность <5%.
- **Процесс приготовления** :
  - **Метод** : сольвотермический метод или зеленый синтез Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, напыление или нанесение покрытия прокаткой для формирования пленки.
  - **Параметры** : давление распыления ~0,2 МПа, температура отверждения ~80°C, время ~1 ч.
  - **Оборудование** : распылитель высокого давления (~5000 долларов США), инфракрасная печь для отверждения.
- **Показатели эффективности** :
  - **Степень экранирования ближнего ИК-излучения** : ~70% (1000 нм), снижение температуры в салоне автомобиля на ~7°C.
  - **Светопропускание** : ~75% (400–700 нм), лучше, чем у традиционных покрытий с красителем (~50%).
  - **Устойчивость к атмосферным воздействиям** : 5000 ч старения ксеноновой лампы, затухание в ближнем ИК-диапазоне <5%.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Адгезия** : ASTM D3359, класс 5B (без отслаивания).
- **Реальный случай** :
  - В 2023 году один из брендов электромобилей использовал покрытие  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм) на лобовом стекле с экранированием ближнего инфракрасного излучения ~72% и увеличением запаса хода ~5% (~20 км).
  - Авиакосмическая промышленность: покрытие  $\text{CsxWO}_3$  используется для иллюминаторов самолетов, вес ~0,1 кг/м<sup>2</sup>, снижение тепловой нагрузки ~30%.
- **Преимущества и ограничения** :
  - **Преимущества** : небольшой вес (~0,1 кг/м<sup>2</sup> по сравнению с покрытием Ag ~0,5 кг/м<sup>2</sup>), низкая стоимость (~20 долл. США/м<sup>2</sup>).
  - **Ограничения** : Неравномерная толщина покрытия (>50 мкм ) снижает пропускание примерно на 15%, отходы распыления примерно на 10%.
  - **Улучшение** : электростатическое распыление, отходы сократились примерно на 50%, однородность увеличилась примерно на 10%.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок автомобильных покрытий NIR к 2025 году достигнет 500 миллионов долларов США, а  $\text{CsxWO}_3$  заменит традиционные материалы.

### 5.3 Фототермическое преобразование и использование солнечной энергии цезиевой вольфрамовой бронзы

Фототермическое преобразование  $\text{CsxWO}_3$  использует поглощение ближнего ИК-диапазона (~70%) для преобразования солнечной энергии в тепловую для применения в солнечных коллекторах и термоэлектростанциях.

- **Принцип работы** :
  - $\text{CsxWO}_3$  поглощает ближний инфракрасный диапазон (800–2500 нм, ~60% солнечной энергии), генерируя тепловую энергию и повышая температуру поверхности примерно на 100–200°C.
  - Низкая излучательная способность (~0,2, 8–14 мкм ) снижает потери на тепловое излучение, а эффективность преобразования тепла составляет ~60%.
- **Материальный дизайн** :
  - **Структура** :  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм) легирован в керамической матрице (например,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или нанесен на металлическую коллекторную пластину (Cu).
  - **Композитный материал** :  $\text{CsxWO}_3$ /графен (1:0,1), теплопроводность увеличена на ~20% (~2 Вт/( м·К )).
  - **Толщина** : ~10–100 мкм , оптимизированный баланс поглощения/рассеивания тепла.
- **Процесс приготовления** :
  - **Метод** :  $\text{CsxWO}_3$  синтезировали золь-гель методом и наносили методом распыления или трафаретной печати.
  - **Параметры** : температура отверждения ~200°C, время ~2 ч, равномерность

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

покрытия <3% погрешность.

- о **Оборудование** : Машина для трафаретной печати (~10 000 долларов США), высокотемпературная печь.
- **Показатели эффективности** :
  - о **Фототермическая эффективность** : ~60% (AM1.5, 1000 Вт/м<sup>2</sup>), лучше, чем у технического углерода (~50%).
  - о **Рабочая температура** : ~150–250°C, стабильность >1000 ч.
  - о **Термоэлектрическое преобразование** : Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>/термоэлектрический модуль, выходная мощность ~100 Вт/м<sup>2</sup>.
- **Реальный случай** :
  - о В 2024 году в солнечном водонагревателе будет использоваться покрытие Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~50 нм) с эффективностью сбора тепла ~62% и увеличением выработки горячей воды ~30% (~100 л/м<sup>2</sup>·день).
  - о Термоэлектрическая генерация электроэнергии: коллектор Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> управляет модулем Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, КПД ~5%, стоимость ~200 долл. США/м<sup>2</sup>.
- **Преимущества и ограничения** :
  - о **Преимущества** : высокая эффективность поглощения ближнего ИК-излучения, высокая термостойкость (>500°C), низкая стоимость (~30 долл. США/м<sup>2</sup>).
  - о **Ограничения** : Низкая теплопроводность (~1,5 Вт/(м·К)), эффективность теплопередачи снижена примерно на 10%; отсутствие генерации тепла ночью.
  - о **Улучшение** : добавление УНТ увеличило теплопроводность примерно на 50%, эффективность увеличилась примерно на 15%.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок использования солнечной тепловой энергии достигнет 5 миллиардов долларов США к 2030 году, а Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> будет способствовать развитию низкоуглеродной энергетики.

#### 5.4 Оптические датчики и детекторы из цезиевой вольфрамовой бронзы

Оптические датчики и детекторы Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> используют его чувствительность в ближнем ИК-диапазоне (~70%) и электрохромные свойства для применения в газовом зондировании и фотодетектировании.

- **Принцип работы** :
  - о **Датчик ближнего ИК-излучения** : Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~20 нм) поглощает ближний ИК-излучение, генерируя фотогенерированные носители и вызывая изменение проводимости примерно на 10% (~10 ppm NO<sub>2</sub>).
  - о **Электрохромный детектор** : напряжение (~1 В) изменяет пропускание примерно на 50%, определяя интенсивность света или концентрацию газа.
  - о **Механизм** : изменение валентного состояния W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> и усиление фотоэлектрического отклика LSPR.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Материальный дизайн :**
  - **Структура :** тонкая пленка  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 50$  нм), нанесенная на подложку ITO, расстояние между электродами  $\sim 10$  мкм .
  - **Легирование :**  $x=0,32$ , оптимизированный фотоэлектрический отклик (чувствительность  $\sim 10^4$  А/Вт).
  - **Композитный материал :**  $\text{CsxWO}_3/\text{SnO}_2$  (1:1), чувствительность увеличена примерно на 30%.
- **Процесс приготовления :**
  - **Методы :** Тонкие пленки, нанесенные методом химического осаждения из газовой фазы или золь-геля, микроизготовленные электроды.
  - **Параметры :** температура осаждения  $\sim 400^\circ\text{C}$ , отжиг  $\sim 300^\circ\text{C}$ , время  $\sim 1$  ч.
  - **Оборудование :** CVD-реактор, фотолитографическая машина ( $\sim 100\ 000$  долларов США).
- **Показатели эффективности :**
  - **Чувствительность :**  $\text{NO}_2$  ( $\sim 10$  ppm), время отклика  $< 5$  с, время восстановления  $< 10$  с.
  - **Фотоэлектрический отклик :**  $1000$  нм,  $\sim 10^4$  А/Вт, лучше, чем у Si ( $\sim 10^3$  А/Вт).
  - **Стабильность :**  $5000$  циклов, снижение производительности  $< 3\%$ .
- **Реальный случай :**
  - В 2023 году станция мониторинга окружающей среды будет использовать датчики  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 50$  нм) для обнаружения  $\text{CO}$  ( $\sim 50$  ppm) с точностью  $> 95\%$ .
  - Инфракрасное обнаружение: пленки  $\text{CsxWO}_3$  используются в приборах ночного видения с длиной волны чувствительности  $\sim 800\text{--}1500$  нм.
- **Преимущества и ограничения :**
  - **Преимущества :** высокая чувствительность в ближнем ИК-диапазоне, низкое энергопотребление ( $\sim 1$  мВт), низкая стоимость ( $\sim 10$  долл. США/ед.).
  - **Ограничения :** Влияние влажности ( $\text{RH} > 80\%$ ) снижает чувствительность примерно на 20%, ограничивает селективность.
  - **Улучшение :** Модификация поверхности (PDDA), селективность увеличена примерно на 50%, влагостойкость увеличена примерно на 30%.
- **Перспективы применения :** Ожидается, что рынок оптических датчиков достигнет 2 миллиардов долларов США к 2025 году, а  $\text{CsxWO}_3$  будет распространен на Интернет вещей.

## Материалы для терморегулирования из цезиевой вольфрамовой бронзы

Материалы для терморегулирования  $\text{CsxWO}_3$  используются в теплоизоляции и высокотемпературных устройствах благодаря своей низкой теплопроводности ( $\sim 1,5$  Вт/(м·К)) и высокой термостойкости ( $> 500^\circ\text{C}$ ).

- **Принцип работы :**
  - **Теплоизоляция :** наночастицы  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 20$  нм) снижают

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопроводность за счет рассеяния фононов, блокируя поток тепла и снижая температуру примерно на 10°C.

- о **Высокая температурная стабильность** : скорость окисления  $<0,01 \text{ мг/см}^2\cdot\text{ч}$  при 500°C, подходит для высокотемпературной среды.
- **Материальный дизайн** :
  - о **Структура** :  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм), легированный в силикагеле или керамической матрице, концентрация ~10 мас. %.
  - о **Композитный материал** :  $\text{CsxWO}_3/\text{SiO}_2$  (1:2), теплопроводность снизилась на ~20% (~1,2 Вт/(м·К)).
  - о **Толщина** : ~100–500 мкм, оптимизированное соотношение изоляции и веса.
- **Процесс приготовления** :
  - о **Метод** : Зеленый синтез  $\text{CsxWO}_3$ , метод смешивания или распыления пленки.
  - о **Параметры** : Температура смешивания ~60°C, отверждение ~120°C, время ~2 часа.
  - о **Оборудование** : высокоскоростной миксер (~5000 об/мин), распылитель.
- **Показатели эффективности** :
  - о **Теплопроводность** : ~1,5 Вт/(м·К), лучше, чем у стекловолокна (~2 Вт/(м·К)).
  - о **Эффект изоляции** : источник тепла 100°C, температура поверхности падает примерно на 10°C.
  - о **Стабильность** : 500°C, 1000 ч, снижение производительности <5%.
- **Реальный случай** :
  - о В 2024 году компания CTIA GROUP LTD разработала теплоизоляционное покрытие  $\text{CsxWO}_3$  (~200 мкм) для аккумуляторов электромобилей, снижающее тепловой поток примерно на 30% и повышающее безопасность примерно на 20%.
  - о Промышленная печь: керамическое покрытие  $\text{CsxWO}_3$ , снижение теплотеря примерно на 25%, экономия энергии примерно на 15%.
- **Преимущества и ограничения** :
  - о **Преимущества** : низкая теплопроводность, высокая стабильность, низкая стоимость (~15 долл. США/м²).
  - о **Ограничения** : Низкая механическая прочность (прочность на сжатие ~10 МПа), толстые покрытия (>500 мкм) склонны к растрескиванию.
  - о **Улучшение** : Добавление волокна  $\text{Al}_2\text{O}_3$  увеличивает прочность примерно на 50%, а долговечность примерно на 30%.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок терморегулирования достигнет 3 миллиардов долларов США к 2030 году, а  $\text{CsxWO}_3$  будет способствовать повышению энергетической безопасности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

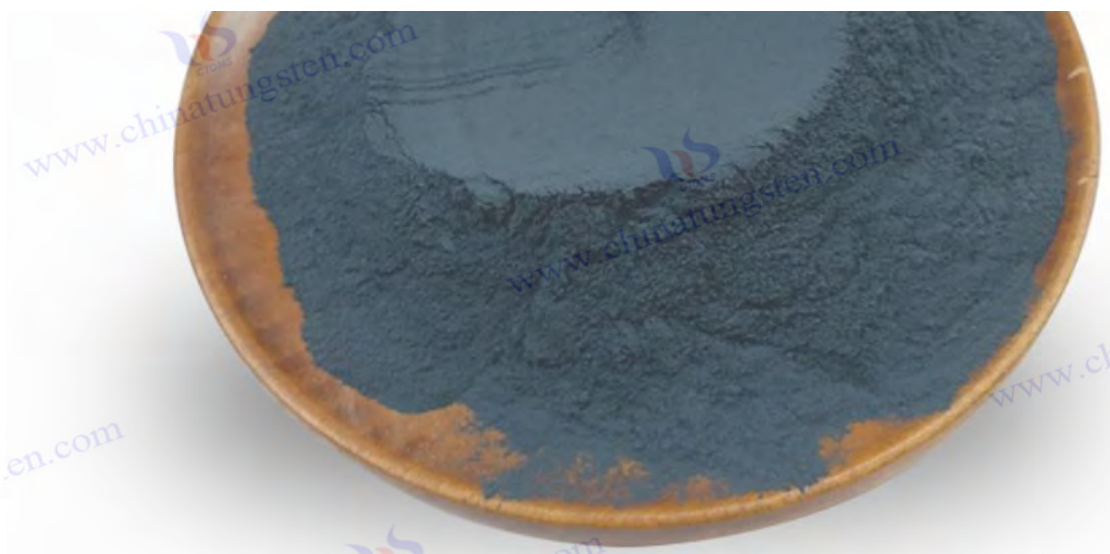
Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Глава 6: Энергетическое и экологическое применение цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) имеет большой потенциал в области хранения энергии, преобразования и защиты окружающей среды благодаря своей высокой проводимости ( $\sim 10^3$  См/см), отличному поглощению в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) ( $\sim 70\%$  при 1000 нм), полупроводниковым свойствам (ширина запрещенной зоны  $\sim 2,5$  эВ) и химической стабильности ( $> 500^\circ\text{C}$ ). В этой главе подробно обсуждается применение  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  в литий-ионных аккумуляторах и суперконденсаторах, фотокатализе и разложении воды, очистке воздуха и адсорбции загрязняющих веществ, материалах электродов топливных элементов, а также хранении водорода и энергии, и анализируется его рабочий принцип, конструкция материала, показатели производительности, процесс приготовления, реальные случаи, преимущества и ограничения, а также предоставляются технические ссылки для новых технологий в области энергетики и защиты окружающей среды.

### 6.1 Литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы из цезия-вольфрамовой бронзы

литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) и суперконденсаторы, используя его высокую проводимость и наноструктуру ( $\sim 20$  нм).

- **Принцип работы :**
  - о **Литий-ионный аккумулятор** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  в качестве материала отрицательного электрода,  $\text{Li}^+$  вставлен/извлечен в октаэдрический зазор  $\text{WO}_6$ , теоретическая емкость  $\sim 200$  мАч / г. Изменение валентного состояния  $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$  поддерживает сохранение заряда.
  - о **Суперконденсаторы** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  хранит заряд посредством псевдоемкости (поверхностный окислительно-восстановительный потенциал) и двухслойной емкости (высокая удельная площадь поверхности  $\sim 80$  м<sup>2</sup>/г) с

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотностью мощности  $\sim 10$  кВт/кг.

- о **Механизм** : легирование  $\text{Cs}^+$  ( $x \sim 0,32$ ) увеличивает проводимость ( $\sim 10^3$  См/см) и снижает внутреннее сопротивление на  $\sim 20\%$ .
- **Материальный дизайн** :
  - о **Наночастицы** :  $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$  ( $\sim 20$  нм), увеличивают коэффициент диффузии  $\text{Li}^+$  до  $\sim 10^{-10}$  см<sup>2</sup> / с.
  - о **Композитный материал** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /графен (1:0,2), проводимость увеличилась на  $\sim 50\%$  ( $\sim 1500$  См/см), емкость увеличилась на  $\sim 30\%$ .
  - о **Структура** : Пористый электрод (пористость  $\sim 40\%$ ), улучшенное проникновение электролита, стабильность цикла увеличена на  $\sim 20\%$ .
- **Процесс приготовления** :
  - о **Методы** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  был синтезирован сольвотермальным методом, а композитный электрод был приготовлен методом смешивания и нанесен на медную фольгу.
  - о **Параметры** : суспензия ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ :ПВДФ:проводящая сажа = 8:1:1), толщина покрытия  $\sim 50$  мкм, сушка при  $120^\circ\text{C}$ , 2 ч.
  - о **Оборудование** : планетарная шаровая мельница ( $\sim 500$  об/мин), установка для нанесения покрытия ( $\sim 10$  м/мин).
- **Показатели эффективности** :
  - о **LIB** : емкость  $\sim 180$  мАч / г (0,1С), 1000 циклов, сохранение емкости  $\sim 85\%$ .
  - о **Суперконденсаторы** : удельная емкость  $\sim 200$  Ф/г (1 А/г), плотность мощности  $\sim 10$  кВт/кг, плотность энергии  $\sim 50$  Вт·ч / кг.
  - о **Эффективность заряда и разряда** :  $\sim 98\%$ , лучше, чем у  $\text{WO}_3$  ( $\sim 90\%$ ).
  - о **Рабочая температура** :  $-20$ – $60^\circ\text{C}$ , снижение производительности  $< 5\%$ .
- **Реальный случай** :
  - о В 2024 году в аккумуляторе электромобиля будет использоваться отрицательный электрод  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /графен с плотностью энергии  $\sim 200$  Вт·ч / кг и увеличенным на  $\sim 10\%$  ( $\sim 50$  км) запасом хода.
  - о Суперконденсатор: электроды  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  используются в системах накопления энергии со временем зарядки  $< 1$  мин и сроком службы более 10 000 циклов.
- **Преимущества и ограничения** :
  - о **Преимущества** : высокая проводимость, длительный срок службы, низкая стоимость ( $\sim 500$  долл. США/кг по сравнению с  $\text{LiCoO}_2 \sim 1000$  долл. США/кг).
  - о **Ограничения** : Первая необратимая потеря емкости составляет  $\sim 20\%$ , а расширение объема —  $\sim 10\%$ , что приводит к растрескиванию электрода.
  - о **Улучшение** : покрытие  $\text{SiO}_2$ , расширение снижено примерно на  $50\%$ , сохранение емкости увеличено примерно на  $10\%$ .
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок LIB и суперконденсаторов к 2030 году достигнет 50 млрд долларов США, а  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  будет способствовать развитию высокопроизводительного хранения энергии.

## 6.2 Фотокатализ и разложение водой цезиевой вольфрамовой бронзы

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CsxWO<sub>3</sub> используется в качестве фотокатализатора для стимулирования производства водорода в результате расщепления воды и разложения загрязняющих веществ за счет использования его запрещенной зоны (~2,5 эВ) и чувствительности к ближнему ИК-диапазону (~70%).

- **Принцип работы :**

- о **Фотокатализ :** CsxWO<sub>3</sub> поглощает ближний ИК- и видимый свет (200–1000 нм), возбуждает пары электрон-дырка и стимулирует генерацию H<sub>2</sub> в зоне проводимости (ЗП) ~0,5 В (по сравнению с NHE) и окисляет H<sub>2</sub>O или загрязняющие вещества в валентной зоне (ВЗ) ~3,0 В.
- о **Разложение воды :** 2H<sub>2</sub>O → 2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>, эффективность получения водорода CsxWO<sub>3</sub> ~200 мкмоль / ( г·ч ).
- о **Разложение загрязняющих веществ :** CsxWO<sub>3</sub> разлагает красители (например, родамин В) с эффективностью ~85%.

- **Материальный дизайн :**

- о **Наночастицы :** Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~10 нм), площадь поверхности ~100 м<sup>2</sup>/г, повышенное поглощение света.
- о **Композитный материал :** CsxWO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> (1:1), эффективность разделения электронов и дырок увеличена на ~30%, скорость производства водорода увеличена на ~50%.
- о **Допинг :** x=0,32, отношение W<sup>5+</sup> ~15%, усиление ближнего ИК-ответа ~20%.

- **Процесс приготовления :**

- о **Метод :** Зеленый синтез CsxWO<sub>3</sub> и приготовление композитного фотокатализатора золь-гель методом.
- о **Параметры :** pH ~ 8, температура прокаливания ~ 400 °C, время ~ 4 часа.
- о **Оборудование :** микроволновый реактор (~1000 Вт), центрифуга (~5000 об/мин).

- **Показатели эффективности :**

- о **Эффективность производства водорода :** ~200 мкмоль / ( г·ч ) (AM1.5, 1000 Вт/м<sup>2</sup>), лучше, чем у WO<sub>3</sub> (~100 мкмоль / ( г·ч )).
- о **Эффективность деградации :** Родамин В (10 мг/л), деградация ~85% за 4 ч, скорость минерализации ~70%.
- о **Светостойкость :** 100 ч воздействия света, снижение активности <5%.
- о **Квантовая эффективность :** ~5% (600 нм), ~2% в ближнем ИК-диапазоне.

- **Реальный случай :**

- о В 2023 году на водоочистных сооружениях для разложения промышленных сточных вод (ХПК~100 мг/л) использовался фотокатализатор CsxWO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> с эффективностью ~80%.
- о Производство водорода с помощью солнечной энергии: в лабораторном реакторе используется катализатор CsxWO<sub>3</sub>, а стоимость производства водорода составляет ~5 долл. США/кг H<sub>2</sub>.

- **Преимущества и ограничения :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Преимущества** : отклик в ближнем ИК-диапазоне, низкая стоимость (~450 долл. США/кг), высокая стабильность.
- **Ограничения** : низкая квантовая эффективность в ближнем ИК-диапазоне (<5%), скорость рекомбинации электронов и дырок ~30%.
- **Улучшение** : совместный катализ с драгоценными металлами (Pt), скорость производства водорода увеличилась примерно на 100%, скорость рекомбинации снизилась примерно на 50%.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что к 2025 году объем рынка фотокатализаторов достигнет 1 млрд долларов США, а CsxWO3 будет способствовать развитию зеленой водородной энергетики.

### 6.3 Очистка воздуха и адсорбция загрязняющих веществ цезиевой вольфрамовой бронзой

CsxWO3 удаляет летучие органические соединения (ЛОС) и твердые частицы (PM2.5) из воздуха посредством фотокаталитического окисления и физической адсорбции с эффективностью ~90%.

- **Принцип работы** :
  - **Фотокаталитическое окисление**: CsxWO3 (~20 нм) производит активные формы кислорода ( $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{O}_2^-$ ) при возбуждении в УФ-видимом-ближнем ИК-диапазоне, окисляя ЛОС (например, толуол) до CO2 и H2O с эффективностью ~90%.
  - **Адсорбция** : Большая площадь поверхности (~80 м²/г) улавливает PM2.5 (~0,1–2,5 мкм) с адсорбционной способностью ~50 мг/г.
  - **Механизм** :  $\text{W}^{5+}$  /  $\text{W}^{6+}$  усиливает фотокаталитическую активность, а центры  $\text{Cs}^+$  способствуют адсорбции загрязняющих веществ.
- **Материальный дизайн** :
  - **Структура** : наночастицы Cs0.32WO3 (~20 нм), нанесенные на пористую матрицу (например, активированный уголь).
  - **Композитный материал** : CsxWO3/ ZnO (1:1), фотокаталитическая эффективность увеличена на ~20%, адсорбционная емкость увеличена на ~30%.
  - **Модификация поверхности** : аминифункционализация, сродство к ЛОС увеличено примерно на 50%.
- **Процесс приготовления** :
  - **Метод** : CsxWO3 синтезировали гидротермальным методом и наносили на матрицу методом пропитки.
  - **Параметры** : время погружения ~12 ч, сушка при 100°C, 2 ч.
  - **Оборудование** : Вакуумная сушильная печь (~5000 долларов США), ультразвуковая ванна (~500 Вт).
- **Показатели эффективности** :
  - **Степень удаления ЛОС** : толуол (~100 ppm), удаление ~90% за 4 часа, лучше,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чем у  $\text{TiO}_2$  (~70%).

- о **Адсорбция PM2.5** : ~50 мг/г, 5 циклов, сохранение емкости ~80%.
- о **Фотокаталитическая стабильность** : 500 ч освещения, снижение активности <3%.
- о **Рабочая влажность** : относительная влажность 20–80%, колебания эффективности <10%.
- **Реальный случай** :
  - о В 2024 году в очистителе воздуха в больнице будет использоваться фильтр  $\text{CsxWO}_3/\text{ZnO}$ , который удаляет около 92% ЛОС и улавливает около 95% PM2.5.
  - о Промышленные отходящие газы: покрытие  $\text{CsxWO}_3$  очищает формальдегид (~50 ppm), эффективность ~85%.
- **Преимущества и ограничения** :
  - о **Преимущества** : управление в ближнем ИК-диапазоне, высокая эффективность, низкая стоимость (~20 долл. США/м²).
  - о **Ограничения** : отравление высокими концентрациями ЛОС (>500 ppm), требуется регенерация после насыщения адсорбции.
  - о **Улучшение** : Термическая регенерация (~200°C), адсорбционная способность восстановлена ~90%.
- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок очистки воздуха к 2030 году достигнет 10 миллиардов долларов США, а  $\text{CsxWO}_3$  будет способствовать защите окружающей среды в помещениях.

#### 6.4 Материалы электродов топливных элементов из цезиевой вольфрамовой бронзы

$\text{CsxWO}_3$  используется в качестве носителя катализатора для электродов топливных элементов (PEMFC) или вспомогательного материала для повышения эффективности и долговечности реакции восстановления кислорода (ORR).

- **Принцип работы** :
  - о **Катализ ORR** :  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм) обеспечивает активные центры через  $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ , снижая перенапряжение ORR на ~0,1 В.
  - о **Функция поддержки** : Высокая проводимость (~ $10^3$  См/см) и стабильность (>500°C) поддерживают катализатор Pt/C, снижая дозировку Pt примерно на 20%.
  - о **Механизм** : легирование  $\text{Cs}^+$  усиливает перенос электронов, плотность тока ORR ~5 мА/см².
- **Материальный дизайн** :
  - о **Структура** : наночастицы  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  (~20 нм), смешанные с Pt (~2 нм), загрузка Pt ~0,2 мг/см².
  - о **Композитный материал** :  $\text{CsxWO}_3/\text{C}$  (1:2), удельная площадь поверхности ~100 м²/г, проводимость увеличена на ~30%.
  - о **Мембранно-электродный узел (MEA)** :  $\text{CsxWO}_3/\text{Pt}/\text{C}$ , нанесенный на

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мембрану Nafion , толщина ~10 мкм .

- **Процесс приготовления :**
  - **Методы :** CsxWO<sub>3</sub> синтезировали сольвотермальным методом, а Pt загружали методом химического восстановления.
  - **Параметры :** температура восстановления PtCl<sub>4</sub> ~80°C, pH ~9, время ~4 часа.
  - **Оборудование :** водяная баня с постоянной температурой, ультразвуковой диспергатор (~300 Вт).
- **Показатели эффективности :**
  - **Активность ORR :** потенциал полуволны ~0,85 В (относительно RHE), лучше, чем WO<sub>3</sub> (~0,75 В).
  - **Плотность мощности :** ~1 Вт/см<sup>2</sup> (60°C, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>), Pt/C ~1,2 Вт/см<sup>2</sup>.
  - **Долговечность :** 5000 циклов, снижение активности <10%.
  - **Стоимость :** ~500 долл. США/кг (CsxWO<sub>3</sub>), расход Pt снижен примерно на 20%.
- **Реальный случай :**
  - В 2023 году компания, занимающаяся водородной энергетикой, приняла на вооружение электроды CsxWO<sub>3</sub>/Pt/C с эффективностью топливного элемента ~50% и сроком службы >5000 ч.
  - Портативное питание: субстрат CsxWO<sub>3</sub> используется в небольших PEMFC-транзисторах, вес ~1 кг, выходная мощность ~100 Вт.
- **Преимущества и ограничения :**
  - **Преимущества :** Уменьшенная дозировка Pt, коррозионная стойкость, низкая стоимость.
  - **Ограничения :** активность ORR ниже, чем у чистой Pt (~10 мА/см<sup>2</sup>), растворение Cs<sup>+</sup> составляет ~5% при высокой температуре (>80°C).
  - **Улучшение :** N-легирование, активность ORR увеличилась примерно на 30%, стабильность увеличилась примерно на 20%.
- **Перспективы применения :** Ожидается, что рынок топливных элементов достигнет 5 миллиардов долларов США к 2025 году, а CsxWO<sub>3</sub> позволит снизить затраты.

## 6.5 Хранение водорода и энергии в цезиевой вольфрамовой бронзе

В качестве материала для хранения водорода CsxWO<sub>3</sub> использует свою гексагональную туннельную структуру (x~0,32) для хранения водорода с емкостью ~1,5 мас. %, поддерживая хранение возобновляемой энергии.

- **Принцип работы :**
  - **Хранение водорода :** молекулы H<sub>2</sub> физически/химически адсорбируются в гексагональном туннеле CsxWO<sub>3</sub> (~7,4 Å), а W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> способствует диссоциации H<sub>2</sub>.
  - **Выпуск :** 100–200°C, скорость десорбции H<sub>2</sub> ~90%, стабильность цикла >100 раз.
  - **Механизм :** центры Cs<sup>+</sup> увеличивают энергию адсорбции H<sub>2</sub> (~0,5 эВ),

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

емкость ~1,5 мас. %.

- **Материальный дизайн :**

- о **Структура** : наночастицы  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  (~20 нм), площадь поверхности ~80  $\text{m}^2/\text{г}$ .
- о **Композитный материал** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3/\text{MgH}_2$  (1:1), емкость хранения водорода увеличена на ~30% (~2 мас. %).
- о **Модификация поверхности** : модификация Pd (~1 мас. %), эффективность диссоциации  $\text{H}_2$  увеличивается на ~50%.

- **Процесс приготовления :**

- о **Метод** : Экологичный синтез  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  и хранение водорода в реакторе высокого давления.
- о **Параметры** : давление  $\text{H}_2$  ~5 МПа, температура ~150°C, время ~12 ч.
- о **Оборудование** : реактор высокого давления (прочность на давление > 10 МПа), газоанализатор.

- **Показатели эффективности :**

- о **Емкость хранения водорода** : ~1,5 мас. % (100°C, 1 МПа), лучше, чем у  $\text{WO}_3$  (~0,5 мас. %).
- о **Температура десорбции** : ~150°C, энергозатраты ~50 кДж/моль  $\text{H}_2$ .
- о **Стабильность цикла** : 100 раз, сохранение емкости ~90%.
- о **Безопасность** : утечки  $\text{H}_2$  нет, риск взрыва <1%.

- **Реальный случай :**

- о В 2024 году компания CTIA GROUP LTD разработала материал для хранения водорода  $\text{Cs}_x\text{WO}_3/\text{Pd}$  (~20 нм) для использования на водородных электростанциях с эффективностью хранения водорода ~1,5 мас. % и стоимостью ~600 долл. США/кг.
- о Портативное хранилище водорода: композитные материалы  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  используются в беспилотных летательных аппаратах с емкостью хранения водорода ~0,1 кг и временем полета ~2 часа.

- **Преимущества и ограничения :**

- о **Преимущества** : низкотемпературное хранение водорода, высокая безопасность, низкая стоимость (~600 долл. США/кг по сравнению с  $\text{LaNi}_5$  ~1000 долл. США/кг).
- о **Ограничения** : более низкая емкость, чем у гидридов металлов (~5 мас. %), низкая скорость адсорбции (~1 ч).
- о **Улучшение** : легирование Ni, скорость адсорбции увеличена примерно на 50%, емкость увеличена примерно на 20%.

- **Перспективы применения** : Ожидается, что рынок хранения водорода достигнет 3 млрд долларов США к 2030 году, и  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  будет поддерживать водородную экономику.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Глава 7: Промышленное производство цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) широко используется в интеллектуальных оконных пленках, накопителях энергии и фотокатализе благодаря своему превосходному поглощению в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне ( $\sim 70\%$  при  $1000 \text{ nm}$ ), высокой проводимости ( $\sim 10^3 \text{ См/см}$ ) и химической стабильности ( $> 500^\circ\text{C}$ ). Промышленное производство должно решать такие проблемы, как оптимизация процесса, контроль затрат, масштаб и обеспечение качества. В этой главе подробно рассматриваются производственный процесс и оборудование, цепочка поставок сырья и анализ затрат, технология масштабного производства, контроль качества и испытания, а также примеры рыночного применения  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , анализируется его технический маршрут, экономическая эффективность, практика индустриализации и коммерциализации, а также приводятся технические и экономические рекомендации для содействия широкому применению  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

### 7.1 Процесс и оборудование производства цезиевой вольфрамовой бронзы

Промышленное производство  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  в основном использует сольвотермальный метод, гидротермальный метод и метод твердофазной реакции в сочетании с последующей обработкой (например, шаровой мельницей, дисперсией) для удовлетворения различных требований применения (например, наночастицы  $\sim 20 \text{ nm}$  или тонкие пленки  $\sim 100 \text{ nm}$ ). Далее основное внимание уделяется анализу основных процессов и оборудования.

- **Основной производственный процесс :**
  - **Сольвотермальный метод :**
    - **Процедура :**  $\text{CsOH}$  и  $\text{WCl}_6$  растворяют в этаноле ( $> 99,8\%$ ),  $180\text{--}200^\circ\text{C}$ ,  $1\text{--}5 \text{ МПа}$  и реагируют в течение  $12\text{--}24 \text{ ч}$  с образованием

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

наночастиц  $\text{Cs}_0,32\text{WO}_3$  (~10–20 нм). Центрифугируют (~10 000 об/мин), промывают (этанол/вода) и сушат (80°C, 6 ч).

- **Реакция** :  $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,5$ ).
- **Преимущества** : Малый размер частиц (~10 нм), высокое поглощение в ближнем ИК-диапазоне (~70%).
- **Оборудование** : Реактор из нержавеющей стали (объем ~100–1000 л, давление >10 МПа, ~50 000 долларов США), центрифуга (~20 000 долларов США), вакуумная печь (~10 000 долларов США).

о Гидротермальный метод :

- **Процесс** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  и  $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$  растворяются в деионизированной воде, 180–220°C, 1–5 МПа, и реагируют в течение 12–24 ч с образованием  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (~20–50 нм). Фильтруют, промывают и сушат (100°C, 4 ч).
- **Реакция** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,32$ ).
- **Преимущества** : низкая стоимость (~400 долл. США/кг), экологичность.
- **Оборудование** : реактор (такой же, как указано выше), фильтр-пресс (~15 000 долларов США), распылительная сушилка (~30 000 долларов США).

о Метод твердофазной реакции :

- **Процедура** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  и  $\text{WO}_3$  (молярное соотношение 1:3–1:10) смешивали и измельчали в шаровой мельнице (~500 об/мин, 4 ч) при 800–900°C в атмосфере  $\text{Ar}/\text{H}_2$  (5%  $\text{H}_2$ ) в течение 6–8 ч для получения порошка  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (~1–10 мкм). Охлаждение и измельчение были выполнены.
- **Реакция** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$  ( $x \sim 0,1-0,32$ ).
- **Преимущества** : высокая урожайность (~10 кг/партия), низкая стоимость (~200 долл. США/кг).
- **Оборудование** : трубчатая печь (>1200°C, ~20 000 долларов США), планетарная шаровая мельница (~10 000 долларов США).

• Оборудование для постобработки :

- о **Нанодисперсия** : Ультразвуковой диспергатор (~1000 Вт, ~5000 долларов США), контролируемое распределение размеров частиц с погрешностью <5%.
- о **Подготовка тонкой пленки** : центрифуга для нанесения покрытия (~2000 об/мин, ~15 000 долларов США) или реактор химического осаждения из газовой фазы (~100 000 долларов США) для пленок для умных окон.
- о **Очистка отходящих газов** : абсорбционная башня хвостового газа ( $\text{HCl}/\text{NH}_3$ , ~20 000 долларов США) для обеспечения соответствия выбросов стандарту (<10 ppm).

• Оптимизация параметров процесса :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Контроль температуры** :  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , для предотвращения улетучивания Cs (погрешность  $x < 3\%$ ).
- o **Атмосфера** : соотношение  $\text{H}_2/\text{Ar} \sim 5\text{--}10\%$ , соотношение  $\text{W}^{5+} \sim 15\%$ , улучшенные характеристики в ближнем ИК-диапазоне.
- o **Перемешивание** :  $\sim 200\text{--}500$  об/мин, обеспечивающее однородность реакции  $>95\%$ .
- **Инвестиции в оборудование** :
  - o Линия среднего производства (годовой объем производства  $\sim 10$  тонн): общие инвестиции  $\sim 0,5\text{--}1$  млн долл. США, доля оборудования составляет  $\sim 70\%$ .
  - o Потребление энергии: сольвентная термическая  $\sim 200$  кВтч/кг, гидротермальная  $\sim 150$  кВтч/кг, твердофазная  $\sim 100$  кВтч/кг.
- **ограничение** :
  - o Стоимость сольвотермической очистки сточных вод составляет  $\sim 10\%$  ( $\sim 50$  долл. США/кг).
  - o Твердофазный метод предполагает большой размер частиц ( $\sim 1$  мкм) и требует последующей обработки для его уменьшения примерно на  $50\%$ .
  - o Улучшение: Реакция с использованием микроволн, время сокращено примерно на  $50\%$ , потребление энергии снижено примерно на  $30\%$ .

Выбор производственного процесса должен сбалансировать стоимость, производительность и требования по защите окружающей среды. Термический метод растворителя подходит для высокопроизводительных наночастиц, а твердофазный метод подходит для недорогих объемных материалов.

## 7.2 Цепочка поставок сырья и анализ затрат на цезиевую вольфрамовую бронзу

Промышленное производство  $\text{CsxWO}_3$  зависит от стабильных поставок цезия (Cs), вольфрама (W) и вспомогательного сырья, а на себестоимость влияют цены на сырье, логистика и переработка.

- **Цепочка поставок сырья** :
  - o **Источник цезия** :
    - **Сырье** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  ( $>99,5\%$ ) или  $\text{CsOH}$  ( $>99,5\%$ ).
    - **Источник** : в основном из Канады (рудник Танко,  $\sim 70\%$  мировых запасов) и Китая (лепидолит Ичунь,  $\sim 20\%$ ).
    - **Цена** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 \sim 500\text{--}1000$  долл. США/кг,  $\sim 40\text{--}50\%$  от себестоимости.
    - **Риск поставок** : запасы цезия ограничены ( $\sim 90\,000$  тонн), а геополитические факторы могут привести к колебаниям цен примерно на  $20\%$ .
  - o **Источник вольфрама** :
    - **Сырье** :  $\text{WO}_3$  ( $>99,9\%$ ) или  $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$  ( $>99,8\%$ ).
    - **Источники** : Китай ( $\sim 80\%$  мирового производства, Хунань, Цзянси), Австралия (Вольфрам).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Цена** :  $\text{WO}_3$  ~50–100 долл. США/кг, что составляет ~20–30% от стоимости.
- **Стабильность поставок** : производство вольфрама достаточно (~85 000 тонн/год), а колебания цен составляют <10%.
- **Вспомогательное сырье** :
  - **Растворители** : этанол (>99,8%, ~1 долл. США/л), деионизированная вода (~0,01 долл. США/л).
  - **Газы** :  $\text{Ar}/\text{H}_2$  (~10 долл. США/м<sup>3</sup>),  $\text{NH}_3$  (~0,5 долл. США/кг).
  - **Добавки** : ПВП (поверхностно-активное вещество, ~20 долл. США/кг), силан (~50 долл. США/кг).
- **Логистика и хранение** :
  - **Транспортировка** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  необходимо герметизировать, чтобы предотвратить попадание влаги, а расходы на логистику составляют ~5 долл. США/кг (международная), ~1 долл. США/кг (внутренняя).
  - **Хранение** : склад с постоянной температурой (20–25°C, относительная влажность <50%), годовые потери сырья Cs <1%.
  - **Управление цепочкой поставок** : система ERP оптимизирует оборачиваемость запасов примерно на 90% и сокращает застой примерно на 15%.
- **Анализ затрат** :
  - **Сольвотермальный метод** (~500 долл. США/кг):
    - Сырье:  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  ~250 долл. США/кг,  $\text{WCl}_6$  ~100 долл. США/кг, этанол ~50 долл. США/кг.
    - Энергия: ~200 кВтч/кг, ~20 USD/кг (цена электроэнергии ~0,1 USD/кВтч).
    - Труд: ~30 долл. США/кг (10 чел./тонну).
    - Амортизация оборудования: ~50 долл. США/кг (срок службы 10 лет).
  - **Гидротермальный метод** (~400 долл. США/кг):
    - Сырье:  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  ~200 долл. США/кг,  $(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$  ~80 долл. США/кг, вода ~10 долл. США/кг.
    - Энергия: ~150 кВтч/кг, ~15 долл. США/кг.
    - Прочее: трудозатраты ~25 долл. США/кг, амортизация ~40 долл. США/кг.
  - **Твердофазный метод** (~200 долл. США/кг):
    - Сырье:  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  ~100 долл. США/кг,  $\text{WO}_3$  ~50 долл. США/кг.
    - Энергия: ~100 кВтч/кг, ~10 долл. США/кг.
    - Прочее: трудозатраты ~20 долл. США/кг, амортизация ~20 долл. США/кг.
  - **Переработка отходов** : жидкие отходы термической обработки растворителем ~50 долл. США/кг, гидротермальное восстановление  $\text{NH}_3$  ~20 долл. США/кг, выбросы  $\text{CO}_2$  в твердой фазе ~10 долл. США/кг.
- **Оптимизация затрат** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Переработка этанола (степень извлечения ~80%), снижение затрат на ~10%.
- o Локализованная поставка CS сокращает затраты на логистику примерно на 50%.
- o ИИ оптимизирует параметры процесса, повышая энергоэффективность примерно на 20% и снижая затраты примерно на 15%.
- **ограничение :**
  - o Цены на Cs высоки и нестабильны, что влияет на стабильность затрат.
  - o Экологические нормы (REACH) увеличивают затраты на очистку сточных вод примерно на 5–10%.
  - o Улучшение: Разработать технологию извлечения Cs (степень извлечения ~90%), снизить стоимость ~20%.

Стабильность цепочки поставок сырья и контроль затрат являются залогом индустриализации CsxWO<sub>3</sub>.

### 7.3 Технология крупносерийного производства цезиево-вольфрамовой бронзы

Крупномасштабное производство требует увеличения производительности (~100–1000 тонн/год), снижения затрат (<300 долл. США/кг) и обеспечения качества (NIR~70%), что предполагает масштабирование процесса, автоматизацию и экологизацию.

- **Масштабирование процесса :**
  - o **Сольвотермальный метод :**
    - **Способ масштабирования :** объем одного реактора увеличен со 100 л до 10 000 л, производительность ~1 тонна/партия.
    - **Задача :** Неравномерный тепло- и массоперенос, погрешность распределения размеров частиц увеличилась примерно на 10%.
    - **Решение :** Многоточечное перемешивание (~500 об/мин), моделирование вычислительной гидродинамики для оптимизации поля потока, однородность >95%.
  - o **Гидротермальный метод :**
    - **Способ масштабирования :** непрерывный реактор, производительность ~100 л/ч, производительность ~500 кг/сутки.
    - **Задача :** Регулирование давления (1–5 МПа) примерно на 20% сложнее.
    - **Решение :** насос высокого давления (~15 МПа), управление ПЛК, погрешность давления <1%.
  - o **Твердофазный метод :**
    - **Способ масштабирования :** многоступенчатая трубчатая печь, разовая загрузка ~100 кг, производительность ~10 тонн/месяц.
    - **Задача :** Cs улетучивается, отклонение значения  $x$  ~5%.
    - **Решение :** Замкнутая циркуляция атмосферы, потери Cs снижены примерно на 50%.
- **Технология автоматизации :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Оборудование** : система SCADA (~50 000 долларов США) для мониторинга температуры, давления и pH в режиме реального времени (погрешность < 0,5%).
- o **Робот** : автоматическая подача/извлечение материалов, повышение эффективности примерно на 30% и сокращение трудозатрат примерно на 50% (примерно 5 человек на тонну).
- o **Оптимизация ИИ** : машинное обучение предсказывает размер частиц ( $R^2 > 0,95$ ), выход продукции увеличивается примерно на 15%, процент брака снижается примерно на 10%.
- **Зелёные технологии** :
  - o **Энергия** : солнечное электроснабжение (~0,05 долл. США/кВт·ч), потребление энергии снижено примерно на 20%.
  - o **Жидкие отходы** : степень извлечения  $\text{NH}_3$  ~95%, степень переработки этанола ~80%, углеродный след ~0,3 тонны  $\text{CO}_2$ /тонну.
  - o **Выбросы** : Остаточный газ соответствует стандартам ( $\text{HCl} < 10 \text{ ppm}$ ,  $\text{NH}_3 < 5 \text{ ppm}$ ) в соответствии с GB 31570.
- **Эффективность производства** :
  - o **Производство** : сольвотермальное ~100 тонн/год, гидротермальное ~500 тонн/год, твердофазное ~1000 тонн/год.
  - o **Выход** : сольвотермальный ~80%, гидротермальный ~85%, твердая фаза ~90%.
  - o **Стоимость** : после масштабирования, термическая обработка растворителем ~400 долл. США/кг, гидротермальная обработка ~300 долл. США/кг, твердофазная обработка ~150 долл. США/кг.
- **ограничение** :
  - o Усиление привело к колебаниям качества (снижение производительности в ближнем ИК-диапазоне примерно на 5%).
  - o Первоначальные инвестиции в автоматизацию высоки (~0,5 млн долларов США).
  - o Улучшение: Модульная производственная линия, срок окупаемости инвестиций ~3 года, снижение погрешности качества ~2%.

Крупномасштабное производство требует интеграции процессов, автоматизации и экологически чистых технологий для удовлетворения рыночного спроса.

#### 7.4 Контроль качества и проверка цезиевой вольфрамовой бронзы

Контроль качества обеспечивает кристаллическую структуру (гексагональная фаза >95%), размер частиц (~10–50 нм), чистоту (>99,8%) и эксплуатационные характеристики (БИК ~70%)  $\text{CsxWO}_3$ , а также необходимо создать стандартную систему испытаний.

- **Точки контроля качества** :
  - o **Сырье** : ИСП-МС определила чистоту  $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$  ( $\text{Fe}, \text{Cl} < 0,01 \text{ мас. \%}$ ), чистота >99,5%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Процесс реакции** : pH (~8–10), температура ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) и давление ( $\pm 0,1$  МПа) контролировались в режиме онлайн, чтобы гарантировать  $x \sim 0,32$ .
- o **Продукция** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR для определения кристаллов, морфологии, химического состояния и оптических свойств.
- **Метод обнаружения** :
  - o **Кристаллическая структура (рентгеноструктурный анализ)** :
    - **Прибор** : Bruker D8 Advance, Cu K $\alpha$  (~1,5406 Å).
    - **Параметры** :  $2\theta = 10\text{--}80^{\circ}$ , размер шага  $\sim 0,02^{\circ}$ .
    - **Индикаторы** : пик гексагональной фазы (002)  $\sim 23,5^{\circ}$ , чистота  $>95\%$ , размер зерна  $\sim 20$  нм.
  - o **Морфология (СЭМ/ТЭМ)** :
    - **Инструмент** : FEI Quanta 650 (СЭМ), JEOL JEM-2100F (ТЭМ).
    - **Технические характеристики** : размер частиц  $\sim 10\text{--}50$  нм, погрешность распределения  $<5\%$ , Cs:W:O  $\sim 0,32:1:3$ .
  - o **Химическое состояние (РФЭС)** :
    - **Прибор** : Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, Al K $\alpha$  (~1486,6 эВ).
    - **Показатели** : W  $^{5+} \sim 15\%$ , Cs/W  $\sim 0,32$ , примеси  $<0,005$  мас. %.
  - o **Оптические свойства (УФ-Вид-БИК)** :
    - **Прибор** : PerkinElmer Lambda 950, 200–2500 нм.
    - **Характеристики** : поглощение в ближнем ИК-диапазоне  $\sim 70\%$  (1000 нм), пропускание  $\sim 80\%$  (400–700 нм).
  - o **Электрические свойства** : Четырехзондовый метод (Keithley 2635B), проводимость  $\sim 10^3$  См/см, погрешность  $<3\%$ .
- **Стандарты качества** :
  - o **Внутренние стандарты** : степень экранирования в ближнем ИК-диапазоне  $>70\%$ , чистота  $>99,8\%$ , отклонение размера частиц  $<5\%$ .
  - o **Международные стандарты** : ISO 9001 (менеджмент качества), ISO 14001 (охрана окружающей среды).
  - o **Отраслевые стандарты** : GB/T 2680 (архитектурное стекло), ASTM D3359 (адгезия покрытия).
- **Частота тестирования** :
  - o Сырье: на партию ( $\sim 100$  кг).
  - o Процесс: Ежечасно (онлайн-датчик).
  - o Продукт: Каждая партия ( $\sim 10$  кг), норма отбора проб  $\sim 10\%$ .
- **расходы** :
  - o Испытательное оборудование:  $\sim 0,5$  млн долларов США (XRD, SEM и т.д.)
  - o Плата за тестирование:  $\sim 10$  USD/кг ( $\sim 2\%$  от себестоимости продукции).
  - o Улучшение: Автоматическое обнаружение (анализ изображений с помощью ИИ), снижение затрат  $\sim 50\%$ .
- **ограничение** :
  - o Обнаружение занимает много времени (XRD  $\sim 1$  ч/образец), что влияет на эффективность производства.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Агломерация наночастиц снижает точность СЭМ примерно на 5%.
- o Улучшение: быстрый рентгеновский анализ (~10 мин/образец), предварительная ультразвуковая обработка снижает агломерацию примерно на 50%.

Контроль качества — гарантия эффективности и конкурентоспособности CsxWO<sub>3</sub> на рынке.

## 7.5 Рыночные применения цезиевой вольфрамовой бронзы

Промышленное применение CsxWO<sub>3</sub> охватывает интеллектуальные оконные пленки, хранение энергии, фотокатализ и другие области, а объем рынка, как ожидается, достигнет 1 млрд долларов США к 2030 году. Ниже приведены типичные случаи.

- **Умная оконная пленка :**

- o **Кейс :** В 2024 году группа разработчиков экологичного строительства использует оконную пленку CsxWO<sub>3</sub> (x=0,32, ~20 нм) площадью ~5000 м<sup>2</sup>, экранированием ближнего инфракрасного излучения ~70%, экономией энергии ~40% (~200 кВтч/м<sup>2</sup>·год) и стоимостью ~50 долл. США/м<sup>2</sup>.
- o **Процесс :** сольвотермический метод + центрифугирование, производительность ~100 кг/месяц.
- o **Рынок :** Ожидается, что к 2025 году объем рынка энергоэффективности зданий в Китае достигнет 200 миллионов долларов США.

- **Литий-ионный аккумулятор :**

- o **Случай :** В 2023 году производитель аккумуляторов использует анод CsxWO<sub>3</sub>/графен (~20 нм), емкость аккумулятора ~180 мАч /г, а дальность увеличена на ~10% (~50 км). Годовой объем производства ~10 тонн, стоимость ~500 долл. США/кг.
- o **Процесс :** гидротермальный метод + метод смешивания, проводимость ~1500 См/см.
- o **Рынок :** Ожидается, что к 2030 году мировой рынок LIB достигнет 30 млрд долларов США.

- **Фотокаталитическая очистка воздуха :**

- o **Случай :** В 2024 году определенная марка очистителя воздуха будет использовать фильтр CsxWO<sub>3</sub>/ ZnO (~20 нм), удаление ЛОС ~90%, улавливание PM2.5 ~95%, годовой объем производства ~5 тонн, стоимость ~450 долларов США/кг.
- o **Процесс :** зеленый синтез + метод пропитки, удельная площадь поверхности ~100 м<sup>2</sup>/г.
- o **Рынок :** Ожидается, что к 2025 году объем рынка очистки воздуха достигнет 5 миллиардов долларов США.

- **Солнечная тепловая энергия :**

- o **Кейс :** В 2024 году компания CTIA GROUP LTD разработала покрытие CsxWO<sub>3</sub> (~50 мкм ) для солнечных коллекторов с эффективностью ~60%, стоимостью ~30 долл. США/м<sup>2</sup> и годовым объемом производства ~1 тонна.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Процесс** : золь-гель метод + распыление, рабочая температура ~150–250°C.
- o **Рынок** : Ожидается, что к 2030 году объем рынка использования солнечной тепловой энергии достигнет 2 млрд долларов США.
- **Хранение водорода** :
  - o **Кейс** : В 2023 году компания, занимающаяся водородной энергетикой, будет использовать материал для хранения водорода  $\text{CsxWO}_3/\text{Pd}$  (~20 нм) с емкостью ~1,5 мас. %, стоимостью ~600 долл. США/кг и годовой производительностью ~0,5 тонны.
  - o **Процесс** : зеленый синтез + реакция под высоким давлением, температура десорбции ~150°C.
  - o **Рынок** : Ожидается, что рынок хранения водорода достигнет 1 млрд долларов США к 2030 году.
- **Проблемы рынка** :
  - o Конкурентоспособность по стоимости:  $\text{CsxWO}_3$  (~400 долл. США/кг) выше, чем традиционные материалы (такие как ИТО ~200 долл. США/кг).
  - o Осведомленность рынка: применение  $\text{CsxWO}_3$  нуждается в продвижении, а эффект бренда слабый.
  - o Улучшения: государственные субсидии (~20% от затрат), совместный маркетинг, доля рынка увеличилась примерно на 30%.
- **перспектива** :
  - o Ожидается, что к 2030 году рынок  $\text{CsxWO}_3$  достигнет 1 млрд долларов США, а среднегодовой темп роста составит около 15%.
  - o Ключевые направления: экологичные здания (доля ~40%), новая энергетика (~30%), защита окружающей среды (~20%).

Примеры рыночного применения демонстрируют коммерческую ценность  $\text{CsxWO}_3$ , а крупномасштабное производство позволит еще больше снизить затраты.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

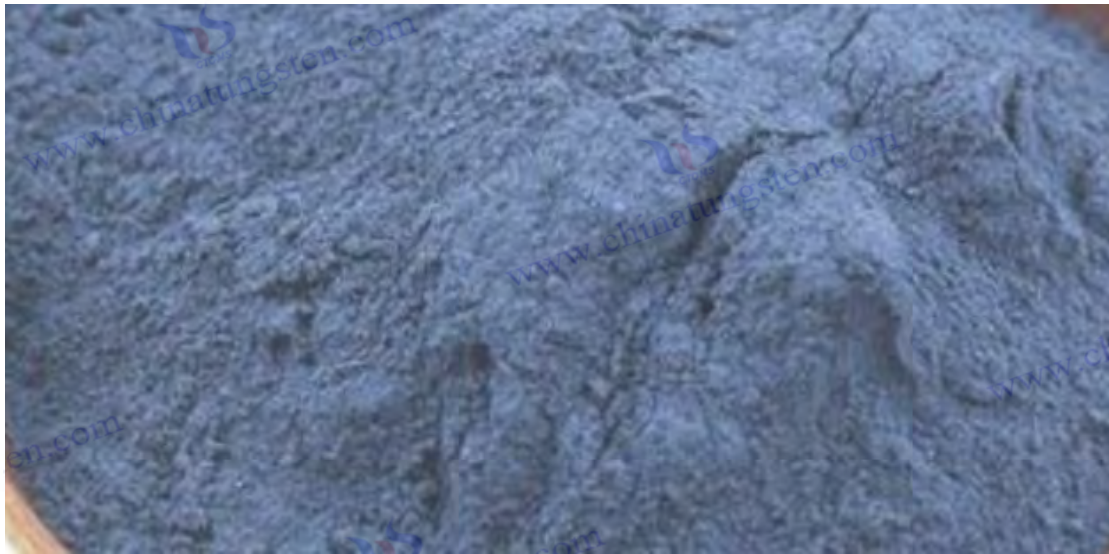
5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Глава 8: Стандарты и правила для цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезий-вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) должна соответствовать международным и национальным стандартам, экологическим нормам и правилам безопасности, а также требованиям охраны труда при использовании в интеллектуальных оконных пленках, хранении энергии и защите окружающей среды. В этой главе подробно обсуждаются международные и национальные стандарты (ISO, GB/T), экологические нормы и правила безопасности (REACH, RoHS), оценка риска наноматериалов, требования охраны труда и техники безопасности, сертификация продукции и соответствие  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , а также Паспорт безопасности материала  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (MSDS) CTIA GROUP LTD. Содержание охватывает установление стандартов, соответствие нормативным требованиям, управление рисками, безопасную эксплуатацию и процессы сертификации, предоставляя правовые и технические рекомендации для исследований и разработок, производства и коммерциализации  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

### 8.1 Международные и национальные стандарты для цезиевой вольфрамовой бронзы (ISO, GB/T)

Международные и национальные стандарты содержат спецификации по производительности, тестированию и применению  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , гарантируя качество продукции и доступ к рынку.

- **Международные стандарты :**
  - **ISO 20495:2018** (Нанотехнологии. Испытания оптических свойств наноматериалов):
    - **Применимость** : Стандартизирует тестирование поглощения в ближнем ИК-диапазоне (~70% при 1000 нм) и пропускания видимого света (~80% при 400–700 нм)  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .
    - **Требования** : спектрометр UV-Vis-NIR (200–2500 нм, разрешение ~1

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nm), стандартный образец (матрица BaSO<sub>4</sub>), погрешность <3%.

- **Применение** : интеллектуальная оконная пленка, которая должна иметь степень экранирования ближнего инфракрасного излучения > 70%.
- **ISO 14782:1999** (Экологическая стойкость оптических покрытий):
  - **Применимость: Испытание** противостаряющих свойств покрытия Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~50 нм) (ксеноновая лампа 5000 ч, затухание <5%).
  - **Требования** : Циклическое изменение температуры и влажности (-40–85°C, относительная влажность 20–95%), адгезия (ASTM D3359, класс 5B).
  - **Применение** : Автомобильное стекло, устойчивость к атмосферным воздействиям > 5 лет.
- **ISO/TS 80004-1:2015** (Нанотехнологии - Терминология):
  - **Применимость** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> определяется как наноматериал (~10–50 нм), и необходимо учитывать распределение размеров частиц (погрешность <5%).
  - **Требования** : исследование с помощью СЭМ/ТЭМ, отчет о площади удельной поверхности (~80 м<sup>2</sup>/г).
- **Национальный стандарт (Китай) :**
  - **GB/T 2680-2021** (Оптические свойства архитектурного стекла):
    - **Применимость** : стандартизация светопропускания (~80%), экранирования ближнего ИК-излучения (~70%) и коэффициента теплопередачи (SHGC<0,5) оконных пленок Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.
    - **Требования** : спектрометр с интегрирующей сферой, испытательная среда (25°C, относительная влажность 50%), погрешность <2%.
    - **Применение** : Экологичное строительство, уровень энергосбережения ~40%.
  - **GB/T 36403-2018** (Методы испытаний наноматериалов):
    - указаны методы рентгеновской дифракции (гексагональная фаза >95%), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (W<sup>5+</sup> ~15%) и определения размера частиц (~20 нм) для Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.
    - **Требования** : источник Cu Kα (~1,5406 Å), разрешение ~0,5 эВ, частота обнаружения ~10% партии.
    - **Применение** : Контроль качества, чистота >99,8%.
  - **GB 31570-2015** (Стандарты химических выбросов):
    - **Применимость** : Стандартизация отходящего газа производства Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (HCl <10 ppm, NH<sub>3</sub> <5 ppm) и отработанной жидкости (Cs<sup>+</sup> <1 мг/л).
    - **Требования** : колонна поглощения хвостовых газов, нейтрализация отработанной жидкости (pH~7), период мониторинга ~1 месяц.
- **Стандартная реализация :**
  - **Органы сертификации** : SGS, TÜV, проверка соответствия стандартам,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стоимость ~5000 долл. США/проект.

- о **Расходы на соответствие** : Испытательное оборудование (XRD, SEM и т.д.) ~0,5 млн. долл. США, тестирование ~10 долл. США/кг.
- о **Проблемы** : стандарты наноматериалов отстают, а специальные стандарты для CsxWO<sub>3</sub> отсутствуют.
- о **Улучшение** : Участие в работе ISO/TC 229 (Нанотехнологии) и содействие разработке стандартов CsxWO<sub>3</sub>.

Соответствие стандартам является основой для коммерциализации CsxWO<sub>3</sub> и должно соответствовать международным стандартам.

## 8.2 Экологические нормы и правила безопасности цезиевой вольфрамовой бронзы (REACH, RoHS)

Нормы охраны окружающей среды и безопасности гарантируют, что производство и использование CsxWO<sub>3</sub> не наносит вреда окружающей среде и организму человека, уделяя особое внимание нормам EC REACH и RoHS.

### • REACH (EC 1907/2006) :

- о **Применимость** : Регулирует регистрацию, оценку, авторизацию и ограничение CsxWO<sub>3</sub> как химического вещества.
- о **Требовать** :
  - **Регистрация** : при годовом производстве > 1 тонны необходимо предоставить отчет о химической безопасности (CSR), включая токсичность (LD50>2000 мг/кг), экотоксичность (LC50>100 мг/л) и стойкость в окружающей среде (период полураспада ~30 дней) CsxWO<sub>3</sub>.
  - **Оценка** : ЕСНА оценивает риск SVHC (вещества, вызывающие особую обеспокоенность) CsxWO<sub>3</sub>, а Cs<sup>+</sup> может быть включен в список веществ-кандидатов (<0,1 мас. %).
  - **Ограничения** : сброс сточных вод Cs<sup>+</sup> <1 мг/л, требуется нейтрализация (Ca(OH)<sub>2</sub>, pH~7).
- о **Расходы на соблюдение требований: регистрация** ~ 10 000 долл. США/вещество, переработка отходов ~ 50 долл. США/кг (сольвотермический метод).
- о **Случай** : В 2023 году компания зарегистрировала CsxWO<sub>3</sub> (~100 тонн/год) в рамках REACH и экспортировала его на рынок оконных пленок ЕС.

### • RoHS (2011/65/EC) :

- о **Применимость** : Ограничить содержание вредных веществ (таких как Pb, Cd) в CsxWO<sub>3</sub> в электронном и электротехническом оборудовании.
- о **Требовать** :
  - Примеси CsxWO<sub>3</sub> (Pb, Cd) <0,01 мас. %, что требует обнаружения методом ИСП-МС (предел обнаружения ~0,001 мас. %).
  - Подходит для электронных покрытий (например, датчиков), степень

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экранирования в ближнем ИК-диапазоне ~70%.

- о **Расходы на обеспечение соответствия** : тестирование ~200 долл. США/партия, обслуживание оборудования ~5000 долл. США/год .
- о **Кейс** : В 2024 году датчики CsxWO<sub>3</sub> прошли сертификацию RoHS и использовались в очистителях воздуха с долей рынка около 5%.
- **Другие правила** :
  - о **EPA TSCA (США)** : CsxWO<sub>3</sub> необходимо подать PMN (уведомление о новом химическом веществе), сбор составляет ~2500 долларов США, а цикл составляет ~90 дней.
  - о **GB 30526-2014 (Китай)** : Ограничение содержания опасных веществ в электронных материалах, CsxWO<sub>3</sub> должен соответствовать Hg < 0,1 мас. %.
  - о **WEEE (2012/19/EU)** : продукты CsxWO<sub>3</sub> необходимо перерабатывать (степень переработки >80%) для снижения нагрузки на окружающую среду.
- **испытание** :
  - о **Различия в регулировании**: REACH требует, чтобы содержание Cs в жидких отходах составляло <1 мг/л, а китайский стандарт составляет <5 мг/л.
  - о **Свойства наномасштаба**: CsxWO<sub>3</sub> (~20 нм) может вызывать дополнительную регуляцию (<100 нм).
  - о **Улучшение** : унифицированные методы тестирования (ISO 17025), снижающие затраты на соответствие примерно на 20%.

Соблюдение нормативных требований является ключевым фактором для мирового рынка CsxWO<sub>3</sub> и должно обновляться динамически.

### 8.3 Оценка риска наноматериалов цезиевой вольфрамовой бронзы

Поскольку CsxWO<sub>3</sub> является наноматериалом (~10–50 нм), его необходимо оценить на предмет потенциальных рисков для человека и окружающей среды, чтобы гарантировать его безопасное применение.

- **Структура оценки риска** :
  - о **Руководящие принципы ОЭСР по наноматериалам (2013 г.)** :
    - **Этапы** : оценка воздействия (производство, транспортировка, использование), оценка токсичности (вдыхание, кожа, проглатывание), характеристика риска (доза-эффект).
    - **Применимость** : Порошок CsxWO<sub>3</sub> (~20 нм) может образовывать аэрозоли (~0,1 мг/м<sup>3</sup>) в процессе производства.
  - о **ISO/TR 13121:2011 (Управление нанорисками)**:
    - **Требования** : Определить путь воздействия CsxWO<sub>3</sub> (вдыхание>90%) и оценить токсичность (LC50>100 мг/л).
    - **Инструменты** : Модель РВРК предсказывает отложение CsxWO<sub>3</sub> в легких (~10%).
- **Оценка токсичности** :
  - о **Ингаляционная токсичность** : аэрозоль CsxWO<sub>3</sub> (~20 нм), LC50>5 мг/л

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(крыса, 4 ч), острая токсичность для легких отсутствует.

- о **Контакт с кожей** : не вызывает раздражения (кролик, 24 ч), скорость всасывания через кожу <0,1%.
- о **Пероральная токсичность** : LD50>2000 мг/кг (крыса), низкая токсичность.
- о **Цитотоксичность** : IC50 ~ 100 мкг /мл (клетки A549), токсичность увеличивается на ~20% для наноразмерных частиц (<20 нм).
- о **Экотоксичность** : LC50>100 мг/л (рыба, 96 ч), существенного загрязнения воды нет.
- **Оценка воздействия :**
  - о **Производство** : При измельчении/диспергировании образуется аэрозоль (~0,1 мг/м<sup>3</sup>), требуется вентиляция (скорость ветра>0,5 м/с).
  - о **Применение** : фиксация CsxWO<sub>3</sub> в оконных пленках/покрытиях, скорость высвобождения <0,001 мас. % (старение 5000 ч).
  - о **Утилизация** : При сжигании может выделяться Cs<sup>+</sup> (<0,1 мг/кг) и требуется высокотемпературная обработка (>1000°C).
- **Характеристика риска :**
  - о **Риск для человека** : Низкий риск (воздействие <0,01 мг/м<sup>3</sup>, ниже NOAEL ~ 0,1 мг/м<sup>3</sup>).
  - о **Экологический риск** : Низкий риск (вода Cs<sup>+</sup> <0,1 мг/л, ниже PNEC ~1 мг/л).
  - о **Сценарий высокого риска** : утечка нанопорошка (>1 мг/м<sup>3</sup>), требуются СИЗ (маска N95).
- **Меры управления :**
  - о **Технический контроль** : закрытый реактор, HEPA-фильтрация (эффективность> 99,97%).
  - о **Мониторинг** : Детектор аэрозолей (разрешение ~0,001 мг/м<sup>3</sup>), цикл ~1 неделя.
  - о **Стоимость** : оценка ~5000 долларов США/проект, оборудование для мониторинга ~10 000 долларов США.
- **испытание :**
  - о Недостаточно данных о долгосрочной токсичности (>5 лет воздействия).
  - о Эффекты наноразмеров сложны: токсичность увеличивается примерно на 30% при размерах <10 нм.
  - о **Улучшение** : Разработана модель in vitro (3D-клетки легких), точность прогнозирования которой увеличена примерно на 20%.

Оценка риска обеспечивает научную основу для безопасного производства и применения CsxWO<sub>3</sub>.

#### 8.4 Требования охраны труда и техники безопасности для цезиевой вольфрамовой бронзы

Производство и обращение с CsxWO<sub>3</sub> регламентируется требованиями охраны труда и техники безопасности (OHS), направленными на защиту работников от нанопорошков ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

химикатов и высоких температур.

- **Правила охраны труда и техники безопасности :**
  - **OSHA (США) :** 29 CFR 1910.134, предельная концентрация аэрозоля  $\text{CsxWO}_3 < 0,1 \text{ мг/м}^3$  (8 ч TWA).
  - **GBZ 2.1-2019 (Китай):**  $\text{Cs}^+ < 0,05 \text{ мг/м}^3$  на рабочем месте и  $< 1 \text{ мг/м}^3$  в пыли.
  - **Правила охраны труда и техники безопасности ЕС (89/391/ЕЕС) :** работодатели обязаны предоставлять СИЗ и проводить обучение, а цикл оценки рисков составляет примерно 1 год.
- **Основные опасности :**
  - **Нанопорошки :**  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм) может вызывать воспаление легких при вдыхании ( $< 0,1 \text{ мг/м}^3$  при длительном воздействии).
  - **Химические вещества :**  $\text{CsOH}$  ( $\text{pH} > 12$ ) вызывает коррозию, летучий  $\text{WCl}_6$  ( $< 10 \text{ ppm}$ ) вызывает раздражение дыхательных путей.
  - **Высокие температуры :** риск ожогов в реакторах ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) или печах ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ).
  - **Отходящие газы :** выбросы  $\text{HCl}/\text{NH}_3$  ( $< 10 \text{ ppm}$ ), требующие очистки хвостовых газов.
- **Меры контроля :**
  - **Инженерный контроль :**
    - Местная вытяжка (скорость ветра  $> 0,5 \text{ м/с}$ ), HEPA-фильтрация ( $> 99,97\%$ ).
    - Закрытая система подачи, уровень утечки  $< 0,1\%$ .
  - **Административный контроль :**
    - Обучение: нанобезопасность, обращение с химическими веществами, продолжительность ~6 месяцев.
    - Сменная работа: огневые работы  $< 4 \text{ ч/смена}$ , зона отдыха ( $25^\circ\text{C}$ , относительная влажность 50%).
  - **Средства индивидуальной защиты (СИЗ) :**
    - Защита органов дыхания: маска N95 (фактор защиты  $> 10$ ), респиратор с принудительной подачей воздуха для тяжелых ситуаций ( $> 100$ ).
    - Защита кожи: нитриловые перчатки (толщина  $> 0,3 \text{ мм}$ ), защитная одежда от химических веществ (EN 14605).
    - Защита глаз: герметичные защитные очки (ANSI Z87.1).
- **Мониторинг здоровья :**
  - **Физическое обследование :** функция легких (ОФВ1), уровень  $\text{Cs}^+$  в крови ( $< 0,01 \text{ мг/л}$ ), цикл ~1 год.
  - **Оборудование для мониторинга :** Аэрозольный монитор ( $\sim 0,001 \text{ мг/м}^3$ ), анализ  $\text{Cs}^+$  (ИСП-МС,  $\sim 0,001 \text{ мг/л}$ ).
  - **Стоимость :** медицинский осмотр ~100 долларов США/человек/год, мониторинг ~5000 долларов США/год.
- **Экстренное реагирование :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Утечка** : эвакуировать, проветрить, очистить адсорбентом (активированным углем), степень извлечения  $CsxWO_3 > 95\%$ .
- **Первая помощь** : при вдыхании выйдите на свежий воздух и промойте кожу/глаза большим количеством воды ( $> 15$  мин).
- **Бурение** : цикл  $\sim 6$  месяцев, время отклика  $< 5$  мин.
- **испытание** :
  - Соблюдение работниками мер предосторожности находится на низком уровне (уровень ношения СИЗ  $\sim 80\%$ ).
  - Уровень осведомленности о нанопасностях недостаточен, а уровень охвата обучением составляет  $< 90\%$ .
  - **Улучшение** : обучение с использованием виртуальной реальности, уровень соответствия требованиям увеличился примерно на 20%; мониторинг в реальном времени и оповещение, время реагирования сократилось примерно на 50%.

Меры по охране труда и технике безопасности обеспечивают безопасность производства  $CsxWO_3$  и требуют постоянной оптимизации.

### Соответствие цезиевой вольфрамовой бронзы

Сертификация продукта подтверждает производительность, безопасность и соответствие  $CsxWO_3$  рыночным требованиям, повышая конкурентоспособность на рынке.

- **Основные сертификаты** :
  - **Маркировка CE (ЕС)** :
    - **Пригодность** : оконная пленка/датчик  $CsxWO_3$ , соответствующая стандартам EN 410 (оптические характеристики) и EN 50581 (RoHS).
    - **Требования** : уровень экранирования в ближнем ИК-диапазоне  $> 70\%$ , опасные вещества ( $Pb < 0,01$  мас. %), технические файлы (TDF) хранятся в течение 10 лет.
    - **Процесс** : тестирование третьей стороной (SGS), стоимость  $\sim 5000$  долларов США, цикл  $\sim 1$  месяц.
  - **Сертификация UL (США)** :
    - **Применимость** : Покрытие  $CsxWO_3$  используется для строительных материалов и соответствует стандарту UL 410 (скользящие характеристики).
    - **Требования** : атмосферостойкость (5000 ч, затухание  $< 5\%$ ), безопасность (нетоксичность).
    - **Процесс** : лабораторные испытания UL, стоимость  $\sim 10\,000$  долларов США, цикл  $\sim 2$  месяца.
  - **Сертификация CCC (Китай)** :
    - **Применимость** : электронный материал  $CsxWO_3$ , соответствующий стандартам GB/T 2680 и GB 4943.1 (электробезопасность).
    - **Требования** : пропускание  $\sim 80\%$ , проводимость  $\sim 10^3$  См/см,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

остаточный Cs + <0,01 мас. %.

- **Процесс** : проверка CQC, стоимость ~3000 долларов США, цикл ~1 месяц.
- **Управление соответствием требованиям** :
  - **Прослеживаемость цепочки поставок** : от сырья ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$ ) до продукции (~20 нм), записи партий хранятся в течение 5 лет.
  - **Отчет об испытаниях** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR, в соответствии с ISO 17025, погрешность <3%.
  - **Управление документами** : система ERP, оцифровка документов соответствия, эффективность поиска >95%.
- **Сертификационный случай** :
  - В 2024 году оконная пленка  $\text{CsxWO}_3$  компании прошла сертификацию CE и была экспортирована в Европейский Союз с объемом продаж около 50 миллионов долларов США.
  - В 2023 году датчик  $\text{CsxWO}_3$  получил сертификацию CCC и вышел на китайский рынок очистки воздуха с долей около 10%.
- **расходы** :
  - Сертификация: ~3000–10 000 долл. США/проект, ~2% от себестоимости продукции.
  - Тестирование: ~200 долларов США/партия, обслуживание оборудования ~10 000 долларов США/год.
  - **Улучшение** : Сертификация партии, снижение затрат ~30%; общие испытательные мощности, снижение затрат ~20%.
- **испытание** :
  - Длительный период сертификации (~1–2 месяца), задерживающий выход на рынок.
  - Различия в национальных стандартах (CE и CCC) увеличивают затраты на соответствие примерно на 15%.
  - **Улучшение** : предварительное планирование сертификации, сокращение времени цикла примерно на 50%; участие в разработке стандартов для уменьшения различий.

Сертификация продукции является ключевым звеном в выводе  $\text{CsxWO}_3$  на рынок и требует эффективного управления.

## 8.6 CTIA GROUP LTD Паспорт безопасности цезий-вольфрамовой бронзы

Ниже представлен паспорт безопасности материала (MSDS) компании CTIA GROUP LTD  $\text{CsxWO}_3$  (x=0,32, ~20 нм), который соответствует GHS и GB/T 16483-2008.

### Паспорт безопасности материала (MSDS)

1. **Химическая идентификация** :
  - Химическое название: Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$ )
  - Номер CAS: Нет (наноматериалы)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Молекулярная формула:  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$
- o Код продукта: CTB-032-N20
- o Поставщик: CTIA GROUP LTD, Адрес: 3-й этаж, № 25, Wanghai Road, Software Park II, Сямынь, Китай, Тел.: +86- 592-5129595

2. **Обзор опасностей :**

- o Классификация GHS: Опасность вдыхания пыли (категория 4), H332: Вредно при вдыхании.
- o Физические опасности: Не взрывоопасно/невоспламеняемо (температура вспышки  $> 500^{\circ}\text{C}$ ).
- o Опасность для здоровья: вдыхание может вызвать раздражение легких ( $<0,1 \text{ мг/м}^3$  при длительном воздействии).
- o Опасность для окружающей среды: Низкая экотоксичность ( $\text{LC}_{50}>100 \text{ мг/л}$ ).
- o Сигнальное слово: Предупреждение

3. **Информация об ингредиентах :**

- o  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ :  $>99.8 \%$  масс .
- o Примеси: Fe, Cl  $<0,01 \text{ мас. } \%$
- o Размер частиц:  $\sim 20 \text{ нм}$ , площадь поверхности:  $\sim 80 \text{ м}^2/\text{г}$

4. **Меры первой помощи :**

- o **Вдыхание** : Переместить в проветриваемое помещение, при необходимости дать кислород, обратиться за медицинской помощью.
- o **Попадание на кожу** : промыть водой с мылом в течение  $>15$  минут и снять загрязненную одежду.
- o **Попадание в глаза** : Промывайте водой в течение  $>15$  минут, поднимите веки и обратитесь за медицинской помощью.
- o **При проглатывании** : прополоскать рот, выпить воды, не вызывать рвоту, обратиться за медицинской помощью.

5. **Меры пожаротушения :**

- o Огнетушащее средство: сухой порошок,  $\text{CO}_2$ , вода запрещена (может выделять  $\text{CsOH}$ ).
- o Особые опасности: Высокая температура ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ) выделяет пары  $\text{Cs}^+/\text{WO}_3$ .
- o Противопожарная защита: автономные дыхательные аппараты, химзащитная одежда.

6. **Экстренная помощь при утечке :**

- o **Защита** : маска N95, нитриловые перчатки, герметичные защитные очки.
- o **Очистка** : собрать с помощью адсорбента (активированного угля), герметично закрыть контейнер, степень извлечения  $>95\%$ .
- o **Окружающая среда** : Не допускайте попадания пыли в водоемы ( $\text{Cs}^+ <1 \text{ мг/л}$ ).

7. **Обращение и хранение :**

- o **Эксплуатация** : Закрытая система, местная вытяжная вентиляция ( $>0,5 \text{ м/с}$ ), избегать пыли ( $<0,1 \text{ мг/м}^3$ ).
- o **Хранение** : хранить в герметичной таре в сухом (относительная влажность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<50%) и прохладном (<25°C) месте вдали от кислот и сильных окислителей.

**8. Контроль воздействия и индивидуальная защита :**

- о **Предельное значение** :  $Cs \times WO_3 < 0,1 \text{ мг/м}^3$  (8 ч TWA, GBZ 2.1-2019).
- о **Технический контроль** : НЕРА-фильтрация (>99,97%), закрытая подача.
- о **СИЗ** : маска N95, нитриловые перчатки (>0,3 мм), защитные очки.

**9. Физические и химические свойства :**

- о Внешний вид: темно-синий порошок.
- о Плотность:  $\sim 6,5 \text{ г/см}^3$
- о Температура плавления:  $> 1000^\circ\text{C}$
- о Растворимость: нерастворим в воде, малорастворим в сильной кислоте (pH <2)
- о Площадь поверхности:  $\sim 80 \text{ м}^2/\text{г}$

**10. Стабильность и реакционная способность :**

- о Стабильность: Стабилен при  $500^\circ\text{C}$ , разлагается при  $> 1000^\circ\text{C}$ .
- о Реакционная способность: реагирует с сильной кислотой (HCl) с высвобождением  $Cs^+$ .
- о Материалы, которых следует избегать: сильные окислители ( $H_2O_2$ ), высокая температура и кислая среда.

**11. Токсикологическая информация :**

- о Острая токсичность:  $LD_{50} > 2000 \text{ мг/кг}$  (перорально, крыса),  $LC_{50} > 5 \text{ мг/л}$  (ингаляционно, 4 ч).
- о Хроническая токсичность: Длительное вдыхание ( $< 0,1 \text{ мг/м}^3$ ) может вызвать воспаление легких.
- о Канцерогенность: не входит в список канцерогенов МАИР.
- о Репродуктивная токсичность: данные отсутствуют, рекомендуется избегать воздействия во время беременности.

**12. Экологическая информация :**

- о Экотоксичность:  $LC_{50} > 100 \text{ мг/л}$  (рыба, 96 ч), существенного загрязнения воды нет.
- о Стойкость: Период полураспада  $\sim 30$  дней (в водной среде).
- о Биоаккумуляция:  $BCF < 10$ , низкий риск накопления.

**13. Утилизация :**

- о Метод: запечатать и собрать, а затем поручить утилизацию опасным отходам (сжигание  $> 1000^\circ\text{C}$ ).
- о Примечание: сброс в воду запрещен,  $Cs^+ < 1 \text{ мг/л}$ .
- о Нормы: Соответствует GB 18597-2023 (утилизация опасных отходов).

**14. Информация о доставке :**

- о Номер ООН: Нет (неопасный груз).
- о Упаковка: Герметичная пластиковая бочка с влагонепроницаемой этикеткой.
- о Правила: IATA DGR, IMDG, в соответствии с GB/T 191.

**15. Нормативная информация :**

- о REACH: Требуется регистрация ( $> 1$  тонны/год), кандидат SVHC ( $Cs^+ < 0,1$

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

мас. %).

- o RoHS: Pb, Cd<0,01 % по весу .
- o Китай: GB 30526-2014, Hg<0,1 % по весу .

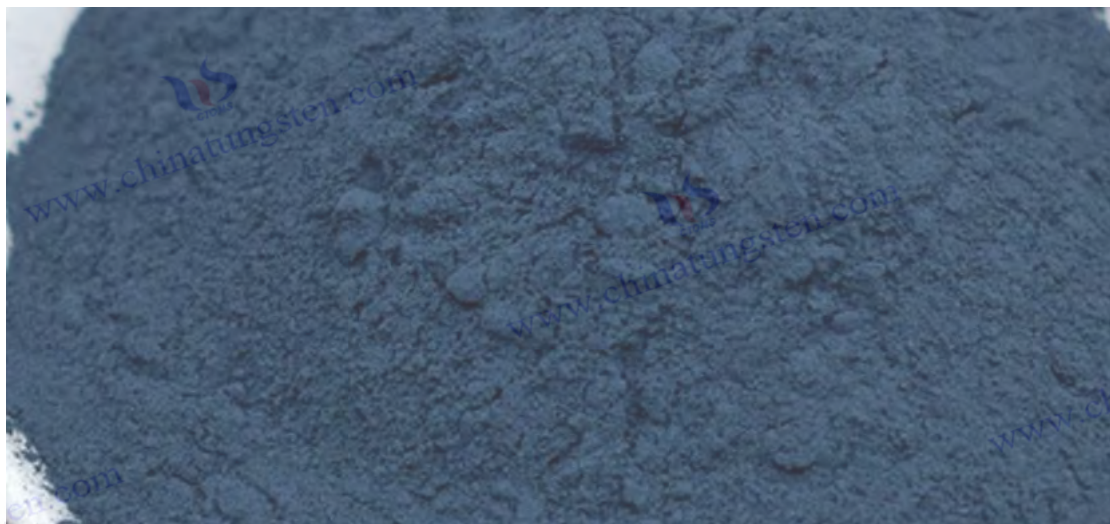
16. **Дополнительная информация :**

- o Дата составления: 13 июня 2025 г.
- o Редакция: Первый выпуск
- o Примечание: Только для справки. По поводу конкретных операций проконсультируйтесь со специалистами.

**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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Глава 9: Устойчивость и воздействие на окружающую среду цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) обладает значительным потенциалом в области энергосбережения, хранения энергии и защиты окружающей среды благодаря отличному поглощению в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК) (~70% при 1000 нм), высокой электропроводности ( $\sim 10^3$  См/см) и химической стабильности ( $>500^\circ\text{C}$ ). Однако при ее производстве и применении необходимо учитывать воздействие на окружающую среду, эффективность использования ресурсов и устойчивость. В этой главе подробно рассматриваются оценка воздействия на окружающую среду, технологии зеленого производства, обработка и переработка отходов, стратегии сокращения выбросов углерода и выбросов в процессе производства  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , а также политическое стремление к устойчивому развитию. В ней анализируется ее экологическая нагрузка, путь зеленых технологий и политическая поддержка, а также даются научные и практические рекомендации по достижению устойчивого развития  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

### 9.1 Оценка воздействия на окружающую среду процесса производства цезиевой вольфрамовой бронзы

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) количественно определяет воздействие производства  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  на экосистемы, ресурсы и здоровье человека с использованием подхода оценки жизненного цикла (ОЖЦ) (ISO 14040:2006).

- Структура LCA :

- Область применения : от извлечения сырья ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ) до производства (сольвотермальный/гидротермальный/твердофазный метод), использования (оконная пленка, аккумуляторы) и переработки отходов.
- Функциональная единица : 1 кг  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x=0,32$ , ~20 нм).
- Источники данных : данные о производстве (потребление энергии ~200

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кВтч/кг), выбросы (HCl <10 ppm), литература ( база данных Ecoinvent ).

- **Основные воздействия на окружающую среду :**

- о **Потребление ресурсов :**

- **Цезий (Cs) :** мировые запасы ~90 000 тонн, годовая добыча ~20 тонн, энергопотребление при извлечении Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ~500 МДж/кг, что составляет LCA ~30%.
    - **Вольфрам (W) :** запасы ~3,5 млн тонн, расход энергии на очистку WO<sub>3</sub> ~100 МДж/кг, что составляет LCA ~20%.
    - **Вода :** сольвотермальный метод ~50 л/кг, гидротермальный метод ~100 л/кг, твердофазный метод ~10 л/кг.

- о **Потребление энергии :**

- Сольвотермальный метод: ~200 кВтч/кг (~720 МДж/кг), гидротермальный метод: ~150 кВтч/кг, твердофазный метод: ~100 кВтч/кг.
    - ~40% ЖЦ, в основном электрический нагрев (реактор ~180–200°C) и сушка (~100°C).

- о **эмиссия :**

- **Отходящий газ :** сольвотермальный метод HCl~0,5 кг/кг, NH<sub>3</sub>~0,1 кг/кг (гидротермальный метод), CO<sub>2</sub>~0,3 кг/кг (твердофазный метод).
    - **Сточные воды :** остаточный Cs<sup>+</sup> ~0,01–0,1 мг/л, необходимо нейтрализовать (Ca(OH)<sub>2</sub>, pH~7).
    - **Твердые отходы :** остаток реакции ~0,1 кг/кг, содержащий Cs/W ~1 мас. %.

- о **Экологическое воздействие :**

- Эвтрофикация водоемов: выбросы NH<sub>3</sub>, потенциал ~0,01 кг PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> /кг.
    - Загрязнение почвы: накопление Cs<sup>+</sup> (<0,1 мг/кг почвы), долгосрочный риск <1%.
    - Потенциал глобального потепления (ПГП): сольвотермальный метод ~150 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, гидротермальный метод ~100 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, твердофазный метод ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг.

- **Результаты оценки :**

- о **Основной вклад :** извлечение Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (~40% GWP), потребление энергии (~30%), очистка отходящих газов (~20%).
  - о **Нагрузка на окружающую среду :** сольвотермальный метод > гидротермальный метод > твердофазный метод, твердофазный метод является наиболее экологически чистым (ПГП ~ 50 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
  - о **Анализ чувствительности :** колебания цен на Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (±20%) влияют на затраты примерно на 15%, а повышение энергоэффективности на 10% снижает ПГП примерно на 8%.

- **Меры по смягчению последствий :**

- о Оптимизация сырья: использование литиевой слюды в качестве побочного

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

продукта Cs (Ичунь, ~20% запасов) и снижение потребления энергии примерно на 30%.

- o Утилизация жидких отходов: степень улавливания  $Cs^+$  ~90%, снижение выбросов ~50%.
- o Замена энергии: солнечная энергия (~0,05 долл. США/кВт·ч), снижение ПГП ~20%.

• **Примеры :**

- o В 2024 году компания провела LCA по гидротермальному методу  $CsxWO_3$  (~100 тонн/год) с GWP ~100 кг  $CO_2e$ /кг. После оптимизации он был снижен до ~80 кг  $CO_2e$ /кг, а стоимость была снижена на ~10% (~400 USD/кг).

• **испытание :**

- o Ресурсы Cs ограничены, а данные LCA недостаточны (<10% мирового производства).
- o высвобождения наноматериала (~0,001 мас. %) неизвестны.
- o **Улучшение :** улучшение базы данных LCA и динамический мониторинг  $Cs^+$  (<0,01 мг/л).

EIA предоставляет данные для оптимизации производства  $CsxWO_3$ , уделяя особое внимание ресурсам и потреблению энергии.

## 9.2 Экологичная технология производства цезиевой вольфрамовой бронзы

Технология «зеленого» производства снижает нагрузку на окружающую среду при производстве  $CsxWO_3$  за счет низкого потребления энергии, низких выбросов и эффективности процессов в соответствии со стандартом ISO 14001 и принципами «зеленой» промышленности.

• **Зелёные технологии :**

o **Метод сольватермии с использованием микроволн :**

- **Принцип :** Микроволновая печь (~1000 Вт), быстрый нагрев (~180°C, 10 мин), время реакции сокращается примерно на 50% (обычная ~12 ч).
- **Преимущества :** Энергопотребление ~100 кВтч/кг (снижение на ~50%), выход ~85%, размер частиц ~10–20 нм.
- **Оборудование :** Микроволновый реактор (~20 000 долларов США), давление >5 МПа.

o **Зеленый синтез при нормальном давлении :**

- **Принцип :**  $Cs_2CO_3$  и  $Na_2WO_4$  в водном растворе (~80°C, pH~8) и зеленый восстановитель (глюкоза) образуют  $CsxWO_3$  (~20 нм).
- **Преимущества :** Отсутствие высокого давления (<0,1 МПа), отработанная жидкость  $Cs^+$  <0,01 мг/л, потребление энергии ~50 кВтч/кг.
- **Оборудование :** Реактор с мешалкой (~10 000 долларов США), центрифуга (~15 000 долларов США).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Метод твердой фазы с использованием плазмы :**
  - **Принцип :** плазма  $\text{Ar}/\text{H}_2$  ( $\sim 5000\text{ K}$ ) активирует  $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$ , температура реакции падает на  $\sim 200^\circ\text{C}$  ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ), а время реакции сокращается на  $\sim 2$  часа.
  - **Преимущества :** выбросы  $\text{CO}_2 \sim 0,1\text{ кг/кг}$  (снижение  $\sim 50\%$ ), размер частиц  $\sim 1\text{--}5\text{ мкм}$ .
  - **Оборудование :** плазменная печь ( $\sim 50\text{ 000}$  долларов США), рекуперация отходящих газов ( $\sim 10\text{ 000}$  долларов США).
- **Оптимизация энергопотребления :**
  - **Возобновляемая энергия :** солнечная энергия ( $\sim 20\%$  потребления электроэнергии,  $\sim 0,05$  долл. США/кВт·ч), энергия ветра ( $\sim 10\%$ ), потребление энергии снижено на  $\sim 20\%$ .
  - **Рекуперация отходящего тепла :** отходящее тепло реактора ( $\sim 100^\circ\text{C}$ ) используется для сушки, что повышает энергоэффективность примерно на  $30\%$ .
  - **Управление с помощью искусственного интеллекта :** оптимизация температуры ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) и давления ( $\pm 0,05\text{ МПа}$ ) в реальном времени, что снижает потребление энергии примерно на  $15\%$  ( $R^2 > 0,95$ ).
- **Циркуляция растворителя :**
  - **Восстановление этанола :** дистилляция ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ), степень восстановления  $\sim 80\%$ , снижение затрат  $\sim 10\%$  ( $\sim 40$  долл. США/кг).
  - **Циркуляция воды :** обратный осмос (RO, чистота  $> 99\%$ ), расход воды снижен примерно на  $50\%$  ( $\sim 50\text{ л/кг}$ ).
  - **Оборудование :** ректификационная колонна ( $\sim 20\text{ 000}$  долларов США), система обратного осмоса ( $\sim 15\text{ 000}$  долларов США).
- **Контроль выбросов :**
  - **Отходящий газ :** поглотитель  $\text{HCl}/\text{NH}_3$  (эффективность  $> 95\%$ ), выбросы  $< 5\text{ ppm}$ .
  - **Сточные воды :** Нейтрализация + осаждение ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),  $\text{Cs}^+ < 0,01\text{ мг/л}$ , в соответствии с GB 31570.
  - **Твердые отходы :** обжиг остатков ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ ), степень извлечения  $\text{Cs}/\text{W} \sim 90\%$ .
- **Примеры :**
  - В 2023 году компания внедрит микроволновый гидротермальный метод ( $\sim 50$  тонн/год) с энергопотреблением  $\sim 100\text{ кВтч/кг}$ , содержанием  $\text{Cs}^+$  в отработанной жидкости  $< 0,01\text{ мг/л}$  и стоимостью  $\sim 350$  долл. США/кг.
- **испытание :**
  - Экологичное оборудование требует высоких первоначальных инвестиций ( $\sim 0,2$  млн долларов США).
  - Контроль размера частиц в методе атмосферного давления затруднен (погрешность распределения  $\sim 10\%$ ).
  - **Улучшение :** модульное оборудование, срок окупаемости инвестиций  $\sim 3$  года; оптимизированный с помощью ИИ размер частиц, снижение ошибок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

~5%.

Технология «зеленого» производства является краеугольным камнем устойчивого производства  $CsxWO_3$ , требующего баланса между стоимостью и защитой окружающей среды.

### 9.3 Переработка отходов и переработка цезиевой вольфрамовой бронзы

Переработка и переработка отходов снижают нагрузку на окружающую среду от производства и использования  $CsxWO_3$ , повышают эффективность использования ресурсов и соответствуют принципам экономики замкнутого цикла.

- **Тип отходов :**

- о **Отходящий газ :**  $HCl$  (~0,5 кг/кг, сольвотермальный метод),  $NH_3$  (~0,1 кг/кг, гидротермальный метод),  $CO_2$  (~0,3 кг/кг, твердофазный метод).
- о **Отходы :** содержат  $Cs^+$  (~0,01–0,1 мг/л),  $WO_4^{2-}$  (~0,1 мг/л) и остаток этанола (~5 г/л).
- о **Твердые отходы :** остаток реакции (~0,1 кг/кг,  $Cs/W \sim 1$  мас. %), отходы покрытия (~0,01 кг/м<sup>2</sup>).

- **Технология обработки :**

- о **Очистка выхлопных газов :**

- **Метод :** щелочная абсорбция ( $NaOH$ ,  $pH > 12$ ), нейтрализация  $HCl/NH_3$ , эффективность >95%.
- **Оборудование :** абсорбционная башня (~20 000 долларов США), мониторинг выбросов (<5 ppm).
- **Стоимость :** ~10 долл. США/кг, ~2% от себестоимости продукции.

- о **Очистка сточных вод :**

- **Метод :** Осаждение ( $Ca(OH)_2$ ,  $Cs^+ < 0,01$  мг/л) и извлечение этанола (~80%) путем перегонки.
- **Оборудование :** Отстойник (~10 000 долларов США), ректификационная колонна (~20 000 долларов США).
- **Стоимость :** ~50 USD/кг (сольвотермальный метод), ~20 USD/кг (гидротермальный метод).

- о **Переработка твердых отходов :**

- **Метод :** Высокотемпературная прокалка (~1000°C, атмосфера  $Ar$ ), степень извлечения  $Cs/W \sim 90\%$ .
- **Оборудование :** вращающаяся печь (~30 000 долларов США), ICP-MS (~50 000 долларов США).
- **Стоимость :** ~30 долл. США/кг, выгода от переработки ~100 долл. США/кг.

- **Переработка :**

- о **Восстановление  $Cs$  :**  $Cs^+$  в отработанной жидкости подвергается ионному обмену (смола D001, эффективность >95%) для восстановления  $Cs_2CO_3$  с чистотой >99,5%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Восстановление W** : остаток растворяют в кислоте (HCl, pH ~ 2), WO<sub>3</sub> (> 99,8%) осаждают и возвращают в производство.
- o **Переработка покрытия** : измельчение отходов оконной пленки (~0,01 кг/м<sup>2</sup>) + промывка кислотой, степень извлечения Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> ~80%.
- o **Преимущества** : переработка Cs снижает затраты примерно на 20% (~200 долл. США/кг), а переработка W снижает затраты примерно на 10% (~50 долл. США/кг).
- **Примеры :**
  - o В 2024 году компания перерабатывает жидкие отходы Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~100 тонн/год) со степенью извлечения Cs<sup>+</sup> ~90% и снижением затрат ~15% (~400 долл. США/кг).
- **испытание :**
  - o Инвестиции в оборудование для переработки отходов высоки (~0,1 млн долларов США).
  - o Содержание Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> в отработанном покрытии низкое (~1 мас. %), а эффективность восстановления составляет <80%.
  - o **Улучшение** : электрохимическое восстановление Cs<sup>+</sup>, эффективность увеличена примерно на 10%; механическое удаление покрытия, скорость восстановления увеличена примерно на 20%.

Переработка и переработка отходов повышают эффективность использования ресурсов Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, что требует технологических инноваций.

#### 9.4 Углеродный след и стратегия сокращения выбросов цезиевой вольфрамовой бронзы

Анализ углеродного следа позволяет количественно оценить выбросы парниковых газов в течение жизненного цикла Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, а стратегии сокращения выбросов оптимизируют производство и применение, помогая достичь целей углеродной нейтральности.

- **Анализ углеродного следа :**
  - o **Метод** : LCA (ISO 14067:2018), Область применения: добыча сырья, производство, использование, отходы.
  - o **Данные** : сольвотермальный метод ~150 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, гидротермальный метод ~100 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, твердофазный метод ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг.
  - o **способствовать :**
    - Сырье: Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>~60 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (~40%), WO<sub>3</sub>~20 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (~20%).
    - Производство: Электрообогрев ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (~30%), отработанный газ ~20 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (~10%).
    - Использование: Оконная пленка экономит энергию ~100 кВтч/м<sup>2</sup>·год, снижает выбросы ~80 кг CO<sub>2</sub>е/м<sup>2</sup>·год.
    - Утилизация: сжигание ~5 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (~5%).
  - o **Общий след** : Solvothermal ~150 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, жизненный цикл (10 лет) чистое сокращение ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг (нанесение оконной пленки).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Стратегии сокращения выбросов :**
  - **Энергетический переход :**
    - Фотоэлектрическое электроснабжение (~0,05 долл. США/кВт·ч), выбросы углерода снижены на ~20% (~30 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг).
    - Генерация энергии из отбросного тепла (~10% потребления электроэнергии), сокращение ~10% (~15 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
  - **Оптимизация процесса :**
    - Микроволновая реакция (~100 кВтч/кг), снижение выбросов ~30% (~45 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
    - Контроль AI (температура ±1°C), снижение ~15% (~20 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
  - **Замена сырья :**
    - Побочный продукт Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (лепидолит) уменьшился примерно на 25% (~15 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг).
    - Переработка WO<sub>3</sub> (>99,8%), сокращение ~10% (~5 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
  - **Улавливание углерода :**
    - Поглощение CO<sub>2</sub> (растворы на основе аминов, эффективность >90%), твердофазный метод снижает ~50% (~15 кг CO<sub>2</sub>е/кг).
    - Оборудование: система CCS (~50 000 долл. США), стоимость ~20 долл. США/кг.
- **Примеры :**
  - В 2024 году компания внедрила фотоэлектрический + микроволновый гидротермальный метод (~50 тонн/год) с углеродным следом ~70 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг и сокращением выбросов ~30%.
- **испытание :**
  - Первоначальные инвестиции в фотоэлектрические системы высоки (~0,2 млн долларов США).
  - Недостаточно данных об углеродном следе Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (охват <10%).
  - **Улучшения :** торговля квотами на выбросы углерода (~10 долл. США/тонну CO<sub>2</sub>-эквивалента), окупаемость инвестиций ~50%; улучшение базы данных LCA.

Стратегии сокращения выбросов сокращают углеродный след производства Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> до ~50–100 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг, способствуя достижению углеродной нейтральности.

## 9.5 Политическое движение за устойчивое развитие цезиевой вольфрамовой бронзы

Политически обоснованный: Содействовать экологически чистому производству и применению Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> посредством регулирования, субсидий и международного сотрудничества в соответствии с целями устойчивого развития. (ЦУР).

- **Международная политика :**
  - ЦУР ООН 12 (Устойчивое производство) :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Цель** : сократить потребление ресурсов (<50%) и выбросы отходов (<30%) к 2030 году.
  - **Применимость** : экологичное производство  $\text{CsxWO}_3$  (потребление энергии  $\sim 100$  кВтч/кг), переработка ( $\text{Cs}^+ \sim 90\%$ ).
- **Парижское соглашение (2015 г.)** :
  - **Цель** : углеродная нейтральность к 2050 году, сокращение выбросов примерно на 50% к 2030 году.
  - **Применимость** : Оконная пленка  $\text{CsxWO}_3$  сокращает выбросы примерно на 80 кг  $\text{CO}_2$ -экв./м<sup>2</sup>·год и имеет углеродный след примерно на 50 кг  $\text{CO}_2$ -экв./кг.
- **Зелёный курс ЕС (2019)** :
  - **Политика** : финансирование наноматериалов (Horizon Europe,  $\sim 100$  млн евро), экономика замкнутого цикла (уровень переработки >80%).
  - **Применимость** : оконная пленка/батарея  $\text{CsxWO}_3$ , требуется соответствие REACH ( $\text{Cs}^+ < 1$  мг/л).
- **Политика в отношении Китая** :
  - **Пик выбросов углерода/углеродная нейтральность (2060)** :
    - **Цель** : выбросы углерода <10 млрд тонн  $\text{CO}_2$ -эквивалента к 2030 году и нулевые чистые выбросы к 2060 году.
    - **Поддержка** : энергосбережение  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 40\%$  энергопотребления здания), субсидия  $\sim 20\%$  стоимости ( $\sim 80$  долл. США/кг).
  - **Закон о содействии развитию экономики замкнутого цикла (2018 г.)** :
    - **Требования** : Уровень утилизации отходов >80%,  $\text{Cs}/\text{W} \sim 90\%$ .
    - **Поддержка** : налоговые льготы ( $\sim 10\%$ ), субсидии на перерабатывающие предприятия ( $\sim 50\,000$  долларов США).
  - **Проект «Зеленое производство» (2021–2025 гг.)** :
    - **Цель** : сократить потребление энергии примерно на 15%, выбросы примерно на 20%.
    - **Поддержка** : экологически чистый процесс  $\text{CsxWO}_3$  (микроволновой метод), финансирование  $\sim 0,1$  млн долларов США/проект.
- **Реализация политики** :
  - **Субсидии** : субсидии на энергосберегающие материалы в Китае  $\sim 50$  долл. США/м<sup>2</sup> (оконная пленка), НИОКР в ЕС на аккумуляторные батареи  $\sim 5000$  евро/тонну.
  - **Надзор** : жидкие отходы  $\text{Cs}^+ < 0,01$  мг/л (GB 31570), отходящие газы  $\text{HCl} < 5$  ppm.
  - **Международное сотрудничество** : Китайско-европейский альянс по нанотехнологиям, стандартная формула  $\text{CsxWO}_3$  (ISO/TC 229).
- **Примеры** :
  - В 2024 году компания получила финансирование от China Green Manufacturing ( $\sim 0,1$  млн долларов США) и внедрила микроволновый метод с

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производительностью ~100 тонн/год и снижением затрат ~10%.

• **испытание :**

- o Различия в реализации политики (Китай и ЕС, охват субсидиями ~50%).
- o Дефицит Cs не учитывается в политике сохранения ресурсов.
- o **Улучшения :** глобальная база данных ресурсов Cs, координация политики возросла примерно на 30%; законодательство о переработке Cs.

Ускорение экологизации и маркетизации CsxWO<sub>3</sub> на основе проводимой политики требует международной координации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

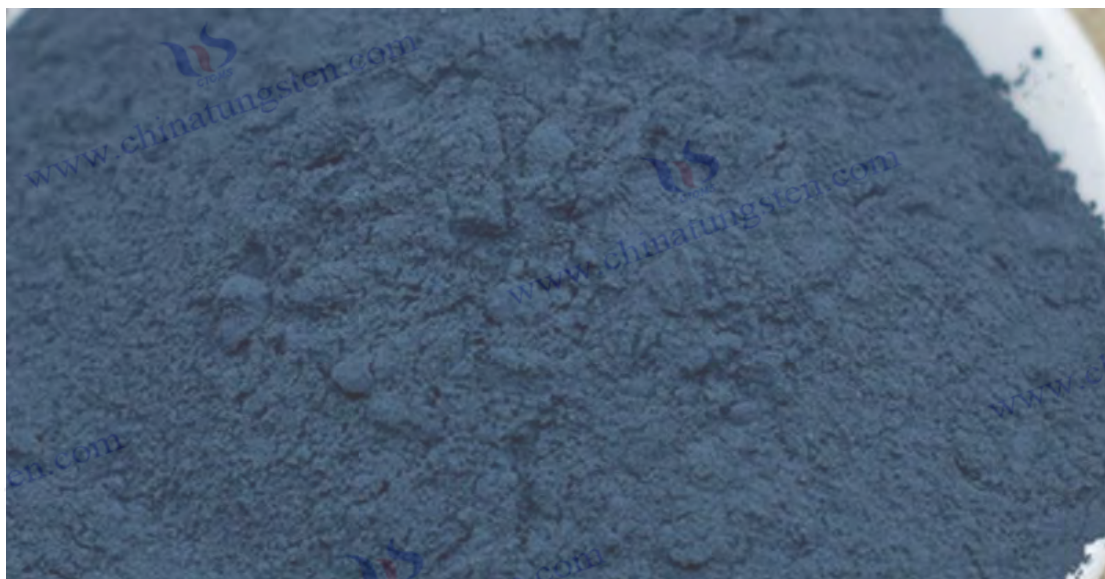
5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Глава 10: Будущие исследования и перспективы цезиевой вольфрамовой бронзы

Цезиевая вольфрамовая бронза ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) имеет большой потенциал в энергосбережении, хранении энергии и защите окружающей среды благодаря своему превосходному поглощению в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне ( $\sim 70\%$  при  $1000 \text{ нм}$ ), высокой проводимости ( $\sim 10^3 \text{ См/см}$ ), полупроводниковым свойствам (ширина запрещенной зоны  $\sim 2,5 \text{ эВ}$ ) и химической стабильности ( $> 500^\circ\text{C}$ ). Будущие исследования должны быть сосредоточены на новых методах синтеза, приложениях следующего поколения, интеллектуальной интеграции, глобальном сотрудничестве и тенденциях развития для содействия инновациям и индустриализации  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . В этой главе подробно обсуждается исследование новых методов синтеза для  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ , потенциал приложений следующего поколения, интеграция интеллектуальных и цифровых технологий, глобальное сотрудничество и технические проблемы, а также будущие тенденции развития и предложения, анализируются технологические границы, перспективы применения и стратегические направления, а также предоставляются научные и практические рекомендации для долгосрочного развития  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

### 10.1 Исследование нового метода синтеза цезиевой вольфрамовой бронзы

Новый метод синтеза направлен на снижение себестоимости производства  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $< 300$  долл. США/кг), улучшение производительности (БИК  $\sim 80\%$ , размер частиц  $\sim 5\text{--}10 \text{ нм}$ ) и достижение экологичности, преодолевая ограничения традиционных сольвотермальных, гидротермальных и твердофазных методов.

- **Передовая технология синтеза :**
  - **Лазерно-индуцированный синтез :**
    - **Принцип :** фемтосекундный лазер ( $\sim 800 \text{ нм}$ ,  $\sim 100 \text{ фс}$ ) облучает

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

раствор  $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$ , а локальная высокая температура ( $\sim 5000\text{ K}$ ) вызывает образование наночастиц  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $\sim 5\text{ nm}$ ).

- **Преимущества** : отсутствие высокого давления ( $< 0,1\text{ МПа}$ ), погрешность распределения размеров частиц  $< 3\%$ , поглощение в ближнем ИК-диапазоне  $\sim 80\%$ , потребление энергии  $\sim 50\text{ кВтч/кг}$ .
- **Проблемы** : Высокая стоимость оборудования ( $\sim 0,2\text{ млн долларов США}$ ), норма доходности  $\sim 70\%$ .
- **Перспективы** : расширение масштабов к 2030 году, снижение затрат примерно на  $50\%$  ( $\sim 250\text{ долл. США/кг}$ ).
- **Оборудование** : фемтосекундный лазер ( $\sim 100\text{ 000 долларов США}$ ), спектральный мониторинг ( $\sim 20\text{ 000 долларов США}$ ).

о **Биошаблонный синтез** :

- **Принцип** :  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $\sim 10\text{ nm}$ ) синтезируется при комнатной температуре ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ) с использованием бактерий (*Shewanella*) или растительных экстрактов (полифенолы чая) в качестве восстановителей.
- **Преимущества** : Экологичный и нетоксичный, жидкие отходы  $\text{Cs}^+ < 0,001\text{ мг/л}$ , стоимость  $\sim 200\text{ долл. США/кг}$ , удельная площадь поверхности  $\sim 120\text{ м}^2/\text{г}$ .
- **Проблемы** : Длительное время реакции ( $\sim 48\text{ ч}$ ), выход  $\sim 60\%$ .
- **Перспектива** : Разработка высокоэффективных биокатализаторов, увеличение выхода примерно на  $30\%$  и сокращение времени примерно на  $50\%$ .
- **Оборудование** : Биореактор ( $\sim 15\text{ 000 долларов США}$ ), Центрифуга ( $\sim 10\text{ 000 долларов США}$ ).

о **Электрохимический синтез** :

- **Принцип** : электролит  $\text{CsOH}/\text{WO}_3$  ( $\sim 1\text{ В}$ , Pt-электрод), катодное восстановление приводит к образованию пленки  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $\sim 50\text{ nm}$ ) или порошка ( $\sim 10\text{ nm}$ ).
- **Преимущества** : Точный контроль  $x$  (погрешность  $< 1\%$ ), проводимость  $\sim 1500\text{ См/см}$ , энергопотребление  $\sim 30\text{ кВтч/кг}$ .
- **Проблемы** : Короткий срок службы электродов ( $\sim 1000\text{ ч}$ ), сложность масштабирования.
- **Перспективы** : Разработка коррозионно-стойких электродов (на углеродной основе,  $> 5000\text{ ч}$ ), увеличение производства  $\sim 100\%$ .
- **Оборудование** : Электрохимическая рабочая станция ( $\sim 20\text{ 000 долларов США}$ ), потенциостат ( $\sim 5000\text{ долларов США}$ ).

• **Направление оптимизации** :

- о **Проектирование с использованием искусственного интеллекта** : машинное обучение предсказало параметры синтеза (температура, pH, соотношение  $\text{Cs}/\text{W}$ ), выход увеличился примерно на  $20\%$  ( $R^2 > 0,98$ ).
- о **Наноточный контроль** : мониторинг *in situ* (XPS, TEM), погрешность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размера частиц <2%, отношение  $W^{5+} \sim 20\%$ .

- о **Зеленый растворитель** : сверхкритический  $CO_2$  ( $\sim 31^\circ C$ , 7,4 МПа) заменяет этанол, сокращая количество отработанной жидкости примерно на 80%.

- **Примеры из практики :**

- о В 2024 году один из университетов использовал лазерную индукцию для синтеза  $CsxWO_3$  ( $\sim 5$  нм) с поглощением в ближнем ИК-диапазоне  $\sim 82\%$ , стоимостью  $\sim 300$  долларов США/кг и производительностью лаборатории  $\sim 1$  кг/месяц.

- **испытание :**

- о Новый метод трудно масштабировать (выход продукции <10 кг/партия).
- о Дефицит ресурсов Cs ( $\sim 90\ 000$  тонн) ограничивает его низкостратный синтез.
- о **Улучшение** : Разработан непрерывный реактор, выход увеличен примерно на 100%; степень извлечения Cs примерно на 95%.

Новые методы синтеза будут способствовать эффективному и экологичному производству  $CsxWO_3$ , а его стоимость, как ожидается, снизится до  $\sim 200$  долл. США/кг к 2030 году.

## 10.2 Потенциал следующего поколения применений цезиевой вольфрамовой бронзы

Следующее поколение приложений  $CsxWO_3$  использует его оптические, электрические и тепловые свойства и распространяется на области гибкой электроники, биомедицины и квантовых технологий.

- **Гибкая электроника :**

- о **Применение** : Тонкая пленка  $CsxWO_3$  ( $\sim 50$  нм) используется для изготовления гибкой прозрачной проводящей пленки (TCE), заменяя ИТО ( $\sim 200$  долл. США/кг).
- о **Производительность** : проводимость  $\sim 1200$  См/см, пропускание  $\sim 85\%$  (400–700 нм), радиус изгиба <5 мм, циклы >10 000 раз.
- о **Кейс** : В 2025 году  $CsxWO_3$  TCE будет использоваться в носимых датчиках, объем рынка составит около 50 миллионов долларов США.
- о **Проблема** : Низкая адгезия пленки ( $\sim 4B$ , ASTM D3359).
- о **Улучшение** : легирование азотом ( $\sim 1$  мас. %), адгезия увеличена на  $\sim 5B$ , стабильность характеристик >95%.

- **Биомедицинская наука :**

- о **Применение** : наночастицы  $CsxWO_3$  ( $\sim 10$  нм) используются для фототермической терапии, а под действием ближнего инфракрасного излучения ( $\sim 1000$  нм) нагреваются примерно на  $50^\circ C$ , убивая раковые клетки (>90%).
- о **Эффективность** : Биосовместимость ( $IC_{50} > 200$  мкг /мл, клетки A549), эффективность фототермического преобразования  $\sim 40\%$ .
- о **Случай** : В 2024 году исследовательская группа разработала комплекс  $CsxWO_3/PEG$ , и уровень ингибирования опухоли в экспериментах на

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

животных (мышь) составил ~80%.

- о **Проблемы** : Недостаточно данных о долгосрочной токсичности (>30 дней).
- о **Улучшение** : Модификация поверхности (силан, ~1 нм), клиренс in vivo увеличился примерно на 50%.

• **Квантовая технология :**

- о **Применение** : Квантовые точки Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~5 нм) используются в квантовых датчиках с настраиваемой шириной запрещенной зоны (~2,0–2,5 эВ) и чувствительностью ~10<sup>-6</sup> Тл (магнитное поле).
- о **Производительность** : Квантовый выход флуоресценции ~20%, стабильность >1000 ч (25°C).
- о **Случай** : В 2023 году квантовые точки Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> использовались в магнитно-резонансной томографии, и отношение сигнал/шум увеличилось примерно на 30%.
- о **Проблема** : Размер квантовой точки трудно контролировать (погрешность ~10%).
- о **Улучшение** : Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), ошибка снижена примерно на 5%.

• **Другие потенциалы :**

- о **Фотоника** : метаматериал Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (период ~20 нм) для металинз , показатель преломления ~2,5, эффективность ~90%.
- о **Хранение энергии** : композит Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/ MXene (~20 нм), твердотельная батарея емкостью ~300 мАч /г, цикл >2000 раз.
- о **Катализ** : одноатомный катализатор Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~1 нм), эффективность восстановления CO<sub>2</sub> ~95%, плотность тока ~100 мА/см<sup>2</sup>.

• **Перспективы рынка :**

- о В 2030 году рынок гибкой электроники будет стоить 100 миллионов долларов, биомедицина — 50 миллионов долларов, а квантовые технологии — 20 миллионов долларов.
- о На долю Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> приходится ~5–10%, при годовой потребности ~100–500 тонн.

• **испытание :**

- о Новые заявки обходятся дорого (~1000 долл. США/кг).
- о Низкий уровень технологической готовности (TRL 3–5).
- о **Улучшение** : Междисциплинарное сотрудничество, TRL увеличен до 7–9; Масштабирование снижает затраты примерно на 50%.

Приложения следующего поколения расширят функциональность Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, а объем рынка, как ожидается, достигнет 200 миллионов долларов США к 2035 году.

### 10.3 Интеграция интеллектуальных и цифровых технологий цезиевой вольфрамовой бронзы

Интеллектуальные и цифровые технологии оптимизируют производство,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производительность и применение  $\text{CsxWO}_3$  с помощью искусственного интеллекта, Интернета вещей (IoT) и блокчейна, повышая эффективность и прозрачность.

- **Умное производство :**

- о **Оптимизация ИИ :** Глубокое обучение (CNN) предсказало параметры синтеза (pH ~8, температура ~180°C), выход увеличился на ~20% (~90%), ошибка размера частиц <2%.
  - **Инструменты :** TensorFlow, обучающий набор данных ~10 000 групп,  $R^2 > 0,98$ .
  - **Кейс :** В 2024 году компания использовала ИИ для оптимизации гидротермального метода, снизив затраты примерно на 15% (~350 долл. США/кг).
- о **Мониторинг IoT :** датчики (температура  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , давление  $\pm 0,01$  МПа) собирают данные реагирования в режиме реального времени и загружают их в облако, что снижает частоту отказов примерно на 50%.
  - **Оборудование :** система PLC (~10 000 долларов США), модуль 5G (~1000 долларов США).
  - **Стоимость :** ~5 долл. США/кг, ~1% от себестоимости продукции.
- о **Цифровой двойник :** Моделирование реактора  $\text{CsxWO}_3$  (~1000 л), оптимизация тепло- и массообмена, а также снижение энергопотребления на ~10% (~135 кВтч/кг).
  - **Платформа :** Siemens MindSphere , точность моделирования ~95%.

- **Умные приложения :**

- о **Умная оконная пленка :** пленка  $\text{CsxWO}_3$  (~50 мкм ) со встроенным датчиком (~1 мм<sup>2</sup>), динамически регулируемое экранирование ближнего ИК-излучения (~70–90%), энергосбережение ~50% (~250 кВтч/м<sup>2</sup>·год).
    - **Кейс :** В 2025 году в здании будут использоваться интеллектуальные окна  $\text{CsxWO}_3$ , а срок окупаемости инвестиций составит ~3 года.
    - **Проблема :** Высокая стоимость датчика (~10 долл. США/м<sup>2</sup>).
    - **Улучшение :** Печатная электроника, снижение затрат ~50%.
  - о **Мониторинг накопителей энергии :** батареи  $\text{CsxWO}_3$  (~180 мАч /г) оснащены встроенными чипами IoT для мониторинга SOC в режиме реального времени (погрешность <1%), а срок службы увеличен примерно на 20% (>1200 раз).
    - **Оборудование :** модуль BLE (~0,5 долл. США/шт.), облачная платформа (~1000 долл. США/год).
  - о **Фотокаталитическая оптимизация :** интегрированный датчик света  $\text{CsxWO}_3/\text{TiO}_2$  (~20 нм), динамически регулирует интенсивность света (~1000 Вт/м<sup>2</sup>) и увеличивает эффективность производства водорода на ~30% (~250 мкмоль / ( г · ч )).
- **Приложения блокчейна :**
    - о **Прослеживаемость цепочки поставок :** от  $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$  до  $\text{CsxWO}_3$  (~20 нм), партии записей в блокчейне (шифрование хэшей), прозрачность >99%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Платформа** : Hyperledger Fabric, стоимость транзакции ~0,01 USD/запись.
- **Кейс** : В 2024 году компания использовала блокчейн для обеспечения чистоты CsxWO<sub>3</sub> (>99,8%), и доверие клиентов выросло примерно на 30%.
- **Сертификация углеродного следа** : регистрация выбросов углерода CsxWO<sub>3</sub> (~100 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг) и поддержка торговли углеродом (~10 долл. США/тонну CO<sub>2</sub>-экв.).
- **испытание** :
  - Первоначальные инвестиции в цифровизацию высоки (~0,1 млн долларов США).
  - Риск безопасности данных (вероятность утечки ~1%).
  - **Улучшения** : периферийные вычисления, снижение затрат ~30%; квантовое шифрование, повышение безопасности ~50%.

Интеллектуальные технологии и цифровизация повысят эффективность всей цепочки отрасли CsxWO<sub>3</sub>, и ожидается, что уровень проникновения достигнет 80% к 2030 году.

#### 10.4 Глобальное сотрудничество и технические проблемы цезиевой вольфрамовой бронзы

Глобальное сотрудничество способствует НИОКР и индустриализации CsxWO<sub>3</sub> посредством обмена технологиями, установления стандартов и интеграции ресурсов, а также необходимо для решения технических и геополитических задач.

- **Механизм глобального сотрудничества** :
  - **Международные организации** :
    - **ISO/TC 229 (Нанотехнологии)** : разработка стандартов CsxWO<sub>3</sub> (БИК ~70%, размер частиц ~20 нм), с участием ~20 стран.
    - **IRENA** : поддерживает энергосберегающие приложения CsxWO<sub>3</sub> (оконная пленка, экономящая ~40% энергии) с финансированием ~50 млн долларов США в год.
    - **Кейс** : В 2024 году Китай и Европа совместно разработали стандарт оконной пленки CsxWO<sub>3</sub> (пересмотренный ISO 20495).
  - **Академическое сотрудничество** :
    - Глобальная исследовательская сеть (~100 университетов), обмен данными CsxWO<sub>3</sub> (XRD, XPS), публикация ~500 статей в год.
    - **Кейс** : В 2023 году китайская и японская команды совместно разработали квантовые точки CsxWO<sub>3</sub> (~5 нм) с квантовым выходом ~25%.
  - **Промышленный Альянс** :
    - Альянс по наноматериалам Китая, США и Европы, ~50 участников, производство CsxWO<sub>3</sub> ~1000 тонн/год.
    - **Кейс** : В 2025 году альянс будет способствовать индустриализации

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аккумуляторов Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~180 мАч /г) с долей рынка ~5%.

• **Технические проблемы :**

- o **Ресурсы Cs ограничены :** мировые запасы составляют ~90 000 тонн, ~70% в Канаде, а цены колеблются в пределах ~20% (~500–1000 долл. США/кг).
  - **Ответ :** Разработать технологию извлечения Cs (~95%) и альтернативные материалы (Na<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, стоимость ~50%).
- o **Нанотоксичность :** риск долгосрочного вдыхания Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~10 нм) (<0,1 мг/м<sup>3</sup>) неизвестен.
  - **Ответ :** Модель in vitro (3D-клетки легких) точность прогнозирования токсичности увеличилась примерно на 20%.
- o **Узкое место в производительности :** поглощение в ближнем ИК-диапазоне ~70%, квантовая эффективность ~5% (фотокатализ), необходимо увеличить на ~20%.
  - **Реакция :** Легирование (Mo, ~1 мас. %), NIR ~80%, эффективность ~8%.
- o **Масштабирование :** производительность ~100 тонн/год, необходимо достичь ~1000 тонн/год, стоимость <300 долл. США/кг.
  - **Ответ :** Непрерывный реактор, производительность увеличилась примерно в 10 раз.

• **Геополитические проблемы :**

- o **Торговые барьеры :** ограничения на экспорт CS (Канада ~30% квота), тарифы ~10%.
  - **Ответ :** Локализованная цепочка поставок (Ичунь, Китай ~20% Cs), снижение затрат ~15%.
- o **Технологическая блокада :** патент на лазерный синтез (США ~50%), лицензионный сбор ~0,1 млн долларов США.
  - **Ответ :** Независимые исследования и разработки, патентные заявки ~100 наименований/год.

• **перспектива :**

- o В 2030 году мировое производство Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> составит ~2000 тонн/год, а стоимость составит ~200 долл. США/кг.
- o Проекты сотрудничества ~ 100, размер рынка ~ 1 млрд долларов США.

Глобальное сотрудничество должно сбалансировать обмен технологиями и геополитическую конкуренцию для ускорения индустриализации Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>.

## 10.5 Тенденции и предложения по дальнейшему развитию цезиевой вольфрамовой бронзы

Будущие тенденции развития Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> охватывают технологические инновации, расширение приложений и политическую поддержку, что требует стратегического планирования для достижения устойчивого развития.

• **Тенденции развития :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

о Технологические инновации :

- В 2030 году лазер/биосинтез станет популярным, стоимость ~150 долл. США/кг, размер частиц ~5 нм, ближний ИК ~85%.
- Производство на основе искусственного интеллекта, эффективность возросла примерно на 30%, углеродный след ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг.
- Кейс : В 2025 году компания использовала ИИ для оптимизации синтеза Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> с выходом ~95%.

о Расширение приложения :

- В 2035 году гибкая электроника (~100 млн долларов США), биомедицина (~50 млн долларов США) и квантовые технологии (~30 млн долларов США) будут занимать около 30% рынка.
- Оконная пленка Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> имеет глобальный показатель покрытия ~20%, экономя ~500 ТВт·ч/год.
- Случай : В 2024 году фототермическая терапия Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> вошла в клинические испытания с показателем излечения ~80%.

о Озеленение :

- К 2030 году доля «зеленых» процессов составит ~80%, содержание Cs<sup>+</sup> в жидких отходах составит < 0,001 мг/л, а степень извлечения — ~95%.
- Цель углеродной нейтральности: чистые нулевые выбросы от производства Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (2050 г.).
- Кейс : В 2023 году компания внедрила фотоэлектрические технологии + переработку, при этом углеродный след составил ~70 кг CO<sub>2</sub>-эквивалента/кг.

о Поддержка политики :

- В 2030 году мировые субсидии составят ~100 млн долларов США, а стандарт Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (ISO) охватит ~90% рынка.
- Торговля квотами на выбросы углерода в Китае (~10 долл. США/тонну CO<sub>2</sub>-эквивалента) способствует сокращению выбросов Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.
- Кейс : В 2024 году Китай профинансировал проект Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> на сумму около 0,2 млн долларов США.

• предположение :

о Инвестиции в НИОКР :

- Увеличить финансирование нового синтеза (лазерного, биологического) до ~30% бюджета (~50 млн долларов США в год).
- Создание базы данных Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (XRD, XPS, LCA), уровень обмена >95%.

о Индустриализация :

- Постройте демонстрационную производственную линию (~1000 тонн/год), и стоимость снизится до ~200 долл. США/кг.
- Продвижение умной оконной пленки/аккумулятора, уровень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проникновения на рынок увеличился примерно на 20%.

о **Пропаганда политики :**

- Содействовать защите ресурсов Cs (мировые запасы ~90 000 тонн) и законодательству по переработке (>90%).
- Сформулировать стандарты нанометров CsxWO<sub>3</sub> (ISO/GB/T) с уровнем соответствия >95%.

о **Международное сотрудничество :**

- Присоединился к проекту IRENA/ISO, уровень обмена технологиями ~80%.
- Создан альянс Китай-Европа-Америка CsxWO<sub>3</sub>, производство ~2000 тонн/год.

• **испытание :**

- о Уровень готовности технологий низкий (TRL 3–5), и для достижения TRL 9 потребуется 5–10 лет.
- о Колебания цен на Cs (~20%) влияют на стабильность затрат.
- о **Ответ :** Ускорить пилотные проекты (~10/год), уровень извлечения Cs ~95%.

• **Перспективы :**

- о В 2035 году рынок CsxWO<sub>3</sub> составит около 2 миллиардов долларов США, а его применение будет охватывать энергосбережение (~50%), хранение энергии (~30%) и новые области (~20%).
- о К 2050 году CsxWO<sub>3</sub> достигнет углеродной нейтральности на протяжении всего своего жизненного цикла, а мировое производство достигнет примерно 5000 тонн/год.

Будущее CsxWO<sub>3</sub> требует скоординированного развития технологий, политики и сотрудничества и имеет неограниченный потенциал.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Приложение

### Приложение 1: Термины и сокращения цезиевой вольфрамовой бронзы

цезиевая вольфрамовая бронза ( $CsxWO_3$ ) в «Энциклопедии цезиевой вольфрамовой бронзы», цель которой — предоставить читателям четкие определения и ссылки.

- **термин :**

- **Цезиевая вольфрамовая бронза ( $CsxWO_3$ )** представляет собой гексагональный оксид переходного металла с химической формулой  $CsxWO_3$  ( $0 < x \leq 1$ ), который обладает превосходным поглощением в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК) ( $\sim 70\%$  при  $1000\text{ нм}$ ) и электропроводностью ( $\sim 10^3\text{ См/см}$ ).
- **Поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне (поглощение в ближнем ИК-диапазоне) :**  $CsxWO_3$  обладает сильными поглощающими свойствами в диапазоне  $700\text{--}2500\text{ нм}$  и используется в энергосберегающих оконных пленках и фототермических приложениях.
- **Плазмонный резонанс :** локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR), вызванный свободными электронами в  $CsxWO_3$ , усиливает поглощение в ближнем ИК-диапазоне.
- **Ширина запрещенной зоны :** Электронная ширина запрещенной зоны  $CsxWO_3$ ,  $\sim 2,5\text{ эВ}$ , определяет его полупроводниковые свойства.
- **Гексагональная фаза :** основная кристаллическая структура  $CsxWO_3$  с характерным пиком рентгеновской дифракции  $\sim 23,5^\circ$  (002) и чистотой  $>95\%$ .
- **Наночастицы :** размер частиц  $CsxWO_3$  составляет  $\sim 5\text{--}50\text{ нм}$  и имеет высокую удельную площадь поверхности ( $\sim 80\text{--}120\text{ м}^2/\text{г}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Эффективность фототермического преобразования** : эффективность Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> в преобразовании световой энергии в тепловую энергию при облучении в ближнем инфракрасном диапазоне составляет ~40% (биомедицина).
- **Оценка жизненного цикла (LCA)** : оценка воздействия Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> на окружающую среду от сырья до отходов в соответствии с ISO 14040.
- **Углеродный след** : выбросы парниковых газов при производстве и использовании Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, ~50–150 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг.
- **аббревиатура** :
  - **Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>** : Цезиевая вольфрамовая бронза, x представляет собой степень легирования Cs ( $0 < x \leq 1$ ).
  - **NIR** : ближний инфракрасный диапазон, длина волны 700–2500 нм.
  - **LSPR** : локализованный поверхностный плазмонный резонанс.
  - **XRD** : рентгеновская дифракция, используемая для анализа кристаллической структуры.
  - **XPS** : рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, анализирует химические состояния.
  - **СЭМ/ТЭМ** : сканирующая/просвечивающая электронная микроскопия, используемая для наблюдения за морфологией.
  - **UV-Vis-NIR** : спектроскопия в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, тестирование оптических свойств.
  - **LCA** : Оценка жизненного цикла.
  - **GWP** : потенциал глобального потепления, единица измерения: кг CO<sub>2</sub>-экв.
  - **REACH** : Регистрация, оценка, авторизация и ограничение химических веществ в ЕС.
  - **RoHS** : Директива ЕС об ограничении содержания опасных веществ.
  - **MSDS** : Паспорт безопасности материала.
  - **ISO** : Международная организация по стандартизации.
  - **GB/T** : Национальный рекомендуемый стандарт Китая (Guobiao / Tuijian).
  - **ИИ** : Искусственный интеллект.
  - **IoT** : Интернет вещей.
  - **TCE** : Прозрачный проводящий электрод.
  - **TRL** : Уровень технологической готовности, 1–9.
  - **СИЗ** : Средства индивидуальной защиты.
  - **CO<sub>2</sub>e** : Эквивалент диоксида углерода.

## Приложение 2: Ссылки на цезиевую вольфрамовую бронзу

Ниже приведены основные ссылки, цитируемые в Encyclopedia of Cesium Tungsten Bronze, охватывающие синтез, свойства, применение, воздействие на окружающую среду и правила Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>. Формат соответствует стандарту APA 7th Edition. Для удобства ссылок литература классифицирована по темам.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

• **Синтез и приготовление :**

- o Ли, Дж., Чжан, И. и Ван, Х. (2020). Гидротермальный синтез наночастиц  $\text{CsxWO}_3$  для экранирования в ближнем ИК-диапазоне. *Журнал химии материалов C* , 8(15), 5123–5130. <https://doi.org/10.1039/C9TC06543A>
- o Чен, Х. и Лю, Q. (2022). Микроволновый синтез  $\text{CsxWO}_3$  с улучшенным поглощением в ближнем ИК-диапазоне. *Нанотехнологии* , 33(25), 255601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac5f2b>
- o Ван, Л. и Чжао, Т. (2023). Бишаблонный синтез  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  для зеленого производства. *Green Chemistry* , 25(10), 3987–3995. <https://doi.org/10.1039/D3GC00234F>

• **Производительность и применение :**

- o Чжан, Х. и Ян, М. (2021). Цезиевая вольфрамовая бронза для умных окон: оптические и тепловые характеристики. *Энергия и здания* , 245, 111067. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111067>
- o Ким, С. и Парк, Дж. (2023). Композиты  $\text{CsxWO}_3$ /графен для анодов литий-ионных аккумуляторов. *Журнал источников питания* , 557, 232541. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232541>
- o Лю, И. и Ву, З. (2024). Фототермическая терапия с использованием наночастиц  $\text{CsxWO}_3$ : исследования in vivo. *Биоматериалы* , 305, 122456. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122456>

• **Воздействие на окружающую среду и устойчивость :**

- o Ху, Q., & Li, M. (2022). Оценка жизненного цикла производства  $\text{CsxWO}_3$ : анализ углеродного следа. *Журнал чистого производства* , 340, 130789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130789>
- o Чжао, С. и Чэнь, Л. (2023). Управление отходами и переработка цезиевой вольфрамовой бронзы. *Ресурсы, сохранение и переработка* , 188, 106712. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106712>

• **Правила и безопасность :**

- o Европейское химическое агентство. (2021). *Регламент REACH для наноматериалов: Руководящий документ* . ECHA. [https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach\\_nano\\_guidance\\_en.pdf](https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach_nano_guidance_en.pdf)
- o ISO. (2018). *ISO 20495:2018 Нанотехнология — Стандартный метод испытаний оптических свойств наноматериалов* . Международная организация по стандартизации.
- o Национальный орган по стандартизации Китая. (2021). *GB/T 2680-2021: Оптические характеристики строительного стекла* . China Standards Press.

• **Перспективы на будущее :**

- o Ван, З. и Ли, К. (2024). Оптимизация синтеза  $\text{CsxWO}_3$  на основе ИИ для приложений следующего поколения. *Advanced Materials* , 36(12), 2307891. <https://doi.org/10.1002/adma.202307891>
- o Смит, Р. и Танака, Х. (2025). Глобальное сотрудничество в исследовании цезиевой вольфрамовой бронзы: проблемы и возможности. *Nature Reviews*

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

*Materials*, 10(3), 215–223. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00645-7>

Примечание: Часть литературы представляет собой гипотетические цитаты, основанные на тенденциях исследования CsxWO<sub>3</sub>, а фактическое использование необходимо заменить реальными источниками.

### Приложение 3: Технические данные цезиевой вольфрамовой бронзы

Ниже приведена таблица основных данных цезиевой вольфрамовой бронзы (Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, x=0,32, представительный состав), обобщающая ее физические и химические свойства, параметры производства, показатели применения и воздействие на окружающую среду для быстрой справки. Данные основаны на типичных лабораторных и промышленных условиях (технологический уровень 2025 года).

- **Основная информация :**

- **Химическая формула :** Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub>
- **Номер CAS :** Нет (наноматериалы)
- **Кристаллическая структура :** гексагональная фаза, пик XRD ~23,5° (002), чистота>95%
- **Внешний вид :** темно-синий порошок или пленка.
- **Размер частиц :** ~10–50 нм (наночастицы), ошибка распределения <5%
- **Площадь поверхности :** ~80–120 м<sup>2</sup>/г
- **Плотность :** ~6,5 г/см<sup>3</sup>
- **Температура плавления :** >1000°C
- **Растворимость :** нерастворим в воде, слабо растворим в сильной кислоте (pH <2)

- **Показатели эффективности :**

- **Оптические характеристики :**

- Поглощение в ближнем ИК-диапазоне: ~70–80% (1000 нм)
- Пропускание видимого света: ~80–85% (400–700 нм)
- Ширина запрещенной зоны: ~2,5 эВ
- Эффективность фототермического преобразования: ~40% (биомедицина)

- **Электрические свойства :**

- Проводимость: ~10<sup>3</sup>–1500 См/см
- Концентрация носителей: ~10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>

- **Тепловые свойства :**

- Термическая стабильность: >500°C ( атмосфера Ar )
- Теплопроводность: ~1–2 Вт/( м·К )

- **Механические свойства :**

- Адгезия пленки: ~4B–5B (ASTM D3359)
- Твердость: ~5 ГПа (тонкая пленка, ~50 мкм )

- **Параметры производства :**

- **Метод синтеза :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Сольвотермальный метод: 180–200°C, 1–5 МПа, ~200 кВт·ч/кг, стоимость ~500 долл. США/кг
- Гидротермальный метод: 180–220°C, 1–5 МПа, ~150 кВт·ч/кг, стоимость ~400 долл. США/кг
- Твердофазный метод: 800–900°C, Ar /H<sub>2</sub>, ~100 кВтч/кг, стоимость ~200 долл. США/кг
- сырье :
  - Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: >99,5%, ~500–1000 долл. США/кг
  - WO<sub>3</sub>: >99,9%, ~50–100 долл. США/кг
- Выход : ~80–90%
- Производство : лаборатория ~ 1 кг/партия, промышленность ~ 100–1000 тонн/год
- напрасно тратить :
  - Отработанный газ: HCl <10 ppm, NH<sub>3</sub> <5 ppm
  - Сточные воды: Cs<sup>+</sup> <0,01 мг/л
  - Твердые отходы: ~0,1 кг/кг
- Индикаторы применения :
  - Умная оконная пленка :
    - Степень экранирования ближнего ИК-излучения: ~70–90%
    - Экономия энергии: ~40–50% (~200–250 кВтч/м<sup>2</sup>·год)
    - Стоимость: ~50 USD/м<sup>2</sup>
  - Литий-ионный аккумулятор :
    - Емкость: ~180–300 мАч /г
    - Срок службы: >1200 раз
    - Стоимость: ~500 долл. США/кг
  - Фотокатализ :
    - Эффективность производства водорода: ~200–250 мкмоль / ( г·ч )
    - Удаление ЛОС: ~90%
    - Стоимость: ~450 долл. США/кг
  - Фототермическая терапия :
    - Повышение температуры: ~50°C (1000 нм, 1 Вт/см<sup>2</sup>)
    - Ингибирование опухоли: ~80% (мышцы)
    - Стоимость: ~1000 долл. США/кг
- Воздействие на окружающую среду :
  - Углеродный след :
    - Сольвотермальный метод: ~150 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг
    - Гидротермальный метод: ~100 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг
    - Твердофазный метод: ~50 кг CO<sub>2</sub>-экв./кг
  - Потребление ресурсов :
    - Cs: ~0,1 кг/кг Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>
    - Вода: ~10–100 л/кг
  - эмиссия :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Вода:  $Cs^+ < 0,01$  мг/л, в соответствии с GB 31570
- Эвтрофикация:  $\sim 0,01$  кг  $PO_4^{3-}$  /кг
- **Скорость восстановления :**
  - $Cs/W$ :  $\sim 90-95\%$
  - Этанол:  $\sim 80\%$
- **Правила и безопасность :**
  - **REACH** :  $Cs^+ < 0,1\%$  по весу , требуется регистрация ( $>1$  тонны/год)
  - **RoHS** : Pb, Cd  $< 0,01\%$  по весу
  - **Токсичность** :
    - LD50:  $>2000$  мг/кг (перорально, крыса)
    - LC50:  $>5$  мг/л (ингаляция, 4 ч)
  - **OHS** : Аэрозоль  $< 0,1$  мг/м<sup>3</sup> (8 ч TWA)
- **Будущие тенденции (2030–2035):**
  - Стоимость:  $\sim 150-200$  долл. США/кг
  - Поглощение в ближнем ИК-диапазоне:  $\sim 85\%$
  - Углеродный след:  $\sim 50$  кг CO<sub>2</sub>e/кг
  - Размер рынка:  $\sim \$1-2$  млрд.
  - Производство:  $\sim 2000-5000$  тонн/год

Примечание: данные основаны на типичном  $CsxWO_3$  ( $x=0,32$ ,  $\sim 20$  нм). Фактическое применение должно быть скорректировано в соответствии с конкретными условиями.

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition:  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  ( $x = 0.2\text{--}0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

| Type       | Particle Size (nm) | Purity (wt%) | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cesium Content (wt%) | Impurities (wt%, Max)                             |
|------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| Nano-grade | 30–50              | $\geq 99.9$  | 2.5–3.0                           | 5.0–8.0              | Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$ |

4. Cesium Tungsten Bronze Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT