

나노 텅스텐 산화물
물리적 및 화학적 특성, 생산 공정 및 응용 분야
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업을 위한 지능형 제조 분야의 글로벌 리더

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP 소개

차이나텅스텐 온라인(CHINATUNGSTEN ONLINE)이 설립한 완전 자회사이자 독립적인 법인격을 가진 CTIA 그룹(CTIA GROUP LTD)은 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하는 데 전념하고 있습니다. 1997년 www.chinatungsten.com을 시작점으로 설립된 차이나텅스텐 온라인은 중국 최초의 최고급 텅스텐 제품 웹사이트로, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업에 중점을 둔 중국을 선도하는 전자상거래 기업입니다. CTIA 그룹은 텅스텐과 몰리브덴 분야에서 30년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 바탕으로 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 이어받아 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체로 거듭났습니다.

지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE은 20개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축하여 20개 이상의 언어를 지원하고 있으며, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 뉴스, 가격, 시장 분석 자료를 백만 페이지 이상 보유하고 있습니다. 2013년부터 위챗 공식 계정인 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 4만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10만 명의 팔로워를 확보 하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공하고 있습니다. 웹사이트 클러스터와 공식 계정 누적 방문자 수가 수십억 회를 기록하며, CHINATUNGSTEN ONLINE은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CTIA 그룹은 CHINATUNGSTEN ONLINE의 기술과 경험을 바탕으로 고객 맞춤형 니즈 충족에 집중합니다. AI 기술을 활용하여 특정 화학 조성 및 물리적 특성(입자 크기, 밀도, 경도, 강도, 치수 및 공차 등)을 가진 텅스텐 및 몰리브덴 제품을 고객과 공동으로 설계 및 생산합니다. 금형 개봉, 시제품 제작, 마무리, 포장 및 물류에 이르는 전 공정 통합 서비스를 제공합니다. 지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE은 전 세계 13만 명 이상의 고객에게 50만 종 이상의 텅스텐 및 몰리브덴 제품에 대한 R&D, 설계 및 생산 서비스를 제공하여 맞춤형, 유연하고 지능적인 제조의 기반을 마련했습니다. CTIA 그룹은 이러한 기반을 바탕으로 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능형 제조 및 통합 혁신을 더욱 심화하고 있습니다.

CTIA GROUP의 한스 박사와 그의 팀은 30년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30년 이상의 경력을 쌓아 온 한 박사는 국내외 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. CTIA GROUP 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하며, 생산 관행 및 시장 고객 요구에 기반한 기술 연구 논문, 기사 및 산업 보고서를 지속적으로 작성하여 업계에서 폭넓은 호평을 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA 그룹의 기술 혁신, 제품 홍보, 업계 교류에 대한 탄탄한 지원을 제공하며, 이를 통해 회사가 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조와 정보 서비스 분야에서 선두주자로 발돋움하는 데 기여할 것입니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

목차

서문

나노텅스텐 산화물의 연구 의의 및 개발 역사

제 1 장 나노텅스텐 산화물 소개

- 1.1 텅스텐 산화물의 기본 개념
 - 1.1.1 정의 및 화학식 (WO_3)
 - 1.1.2 텅스텐 산화물의 색상 변화 (노란색, 파란색, 검은색)
 - 1.1.3 나노 스케일에서의 고유한 특성
- 1.2 나노텅스텐 산화물의 역사 및 개발
 - 1.2.1 초기 연구 및 발견
 - 1.2.2 나노기술이 주도하는 발전
- 1.3 재료 과학에서 나노텅스텐 산화물의 상태
 - 1.3.1 다른 나노물질과의 비교
 - 1.3.2 산업 및 학계 연구 핫스팟

제 2 장 나노텅스텐 산화물의 구조 및 특성

- 2.1 화학 구조
 - 2.1.1 WO_3 의 결정 구조 (단사정계, 사방정계, 정방정계 상)
 - 2.1.2 나노 구조가 구조에 미치는 영향
 - 2.1.3 표면 화학 및 결합 상대 분석
- 2.2 물리적 특성
 - 2.2.1 입자 크기 및 형태 (나노입자, 나노와이어, 나노시트)
 - 2.2.2 밀도, 경도 및 열역학적 특성
 - 2.2.3 비표면적 및 기공 구조
- 2.3 광학적 특성
 - 2.3.1 밴드갭 에너지 (2.4 - 2.8 eV)
 - 2.3.2 흡수단 및 색상 메커니즘
 - 2.3.3 광변색 및 전기변색 특성
- 2.4 전기적 특성
 - 2.4.1 N형 반도체의 특성
 - 2.4.2 전도도 및 캐리어 농도
 - 2.4.3 유전율 및 전기화학적 특성
- 2.5 화학적 특성
 - 2.5.1 산화환원 반응
 - 2.5.2 안정성 및 휘발성
 - 2.5.3 산, 염기 및 환원제와의 반응성

제 3 장 나노텅스텐 산화물의 제조 방법

- 3.1 습식 화학 방법
 - 3.1.1 수열 방법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1.2 용매열 방법
- 3.1.3 산 침전
- 3.2 열화학적 방법
 - 3.2.1 열분해
 - 3.2.2 소성
 - 3.2.3 마이크로파 보조 합성
- 3.3 기체상 방법
 - 3.3.1 화학 기상 증착 (CVD)
 - 3.3.2 물리 기상 증착 (PVD)
 - 3.3.3 기상 산화
- 3.4 기타 방법
 - 3.4.1 기계적 합금화
 - 3.4.2 전기화학적 합성
 - 3.4.3 생합성
- 3.5 공정 매개변수 최적화
 - 3.5.1 온도, 압력 및 시간 제어
 - 3.5.2 전구체 선택 및 반응 조건
 - 3.5.3 형태 및 입자 크기 제어 기술

제 4 장 나노텅스텐 산화물의 특성 분석 기술

- 4.1 구조적 특성 분석
 - 4.1.1 X 선 회절 (XRD)
 - 4.1.2 투과전자현미경 (TEM)
 - 4.1.3 주사전자현미경 (SEM)
- 4.2 화학적 특성 분석
 - 4.2.1 푸리에 변환 적외선 분광법 (FTIR)
 - 4.2.2 X 선 광전자 분광법 (XPS)
 - 4.2.3 에너지 분산 X 선 분광법 (EDS)
- 4.3 물리적 특성 분석
 - 4.3.1 BET 표면적 분석
 - 4.3.2 열중량 분석 (TGA) 및 시차주사열량측정법 (DSC)
 - 4.3.3 입자 크기 분석
- 4.4 광학적 및 전기적 특성 분석
 - 4.4.1 자외선-가시광선 분광법 (UV-Vis)
 - 4.4.2 4 점 탐침법
 - 4.4.3 순환전압전류법
- 4.5 특성화 데이터 분석 및 해석
 - 4.5.1 결정 형태 및 상 순도
 - 4.5.2 표면 화학 및 결합
 - 4.5.3 성능 매개변수 정량화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 5 장 나노텅스텐 산화물의 응용

5. 1 광촉매

5. 1. 1 물 분해 및 수소 생산

5. 1. 1. 1 나노-WO₃의 광촉매 물 분해 메커니즘

5. 1. 1. 2 수소 생산 효율을 향상시키기 위한 도핑 변형 (예: N, S)

5. 1. 1. 3 다른 반도체 (예: TiO₂)와의 이중 접합 설계

5. 1. 1. 4 실험 사례: 태양열 구동 수소 생산 성능

5. 1. 2 유기 오염 물질의 분해

5. 1. 2. 1 나노-WO₃에 의한 염료 (예: 메틸렌 블루) 분해

5. 1. 2. 2 가시광선 응답성 및 산화적 자유 라디칼 생성

5. 1. 2. 3 산업 폐수 처리에서의 응용 사례

5. 1. 2. 4 순환 안정성 및 광부식 문제

5. 1. 3 복합 광촉매 설계

5. 1. 3. 1 WO₃/g-C₃N₄ 복합소재의 제조 및 특성

5. 1. 3. 2 WO₃/TiO₂ 코어-셸 구조의 상승효과

5. 1. 3. 3 광촉매 작용을 강화하기 위한 귀금속 (예: Pt, Au) 로딩

5. 1. 3. 4 새로운 복합 시스템 (예: WO₃/BiVO₄)

5. 1. 4 광촉매 필름 및 소자

5. 1. 4. 1 자가 세척 유리 코팅의 설계 및 제조

5. 1. 4. 2 공기 정화 소자에서의 응용

5. 1. 4. 3 광촉매 반응기의 산업화 시도

5. 2 전기변색 소자

5. 2. 1 스마트 윈도우 및 디스플레이

5. 2. 1. 1 스마트 윈도우에서 나노-WO₃의 색상 변화 메커니즘

5. 2. 1. 2 광 변조 범위 및 응답 시간 최적화

5. 2. 1. 3 건물 에너지 절약의 응용 사례

5. 2. 1. 4 디스플레이의 고해상도 응용

5. 2. 2 WO₃ 필름의 제조 및 특성

5. 2. 2. 1 박막 제조를 위한 스퍼터링 증착 및 졸-겔 방법

5. 2. 2. 2 나노 구조 (예: 다공성 멤브레인)가 성능에 미치는 영향

5. 2. 2. 3 순환 안정성 및 내구성 테스트

5. 2. 2. 4 색상 변화 효율을 개선하기 위한 도핑 (예: Ni, Mo)

5. 2. 3 전고체 전기변색 시스템

5. 2. 3. 1 WO₃와 상대 전극 (예: NiO)의 매칭

5. 2. 3. 2 고체 전해질의 선택 및 최적화

5. 2. 3. 3 소자 패키징 및 양산 기술

5. 2. 3. 4 유연한 전기변색 소자의 개발

5. 2. 4 새로운 응용 분야

5. 2. 4. 1 전기변색 거울 및 눈부심 방지 응용

5. 2. 4. 2 동적 열 관리에서의 적외선 제어

5. 2. 4. 3 통합 센서 및 다기능 장치

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3 가스 센서
 - 5.3.1 NO₂, H₂, CO 등과 같은 가스 감지
 - 5.3.1.1 나노-WO₃의 NO₂에 대한 고감도 메커니즘
 - 5.3.1.2 H₂ 감지에서의 선택성 및 반응성
 - 5.3.1.3 CO 및 기타 휘발성 유기 화합물 (VOC) 감지
 - 5.3.1.4 다양한 형태 (예: 나노와이어)의 효과
 - 5.3.2 도핑 및 감도 향상
 - 5.3.2.1 귀금속 (예: Pt 및 Pd) 도핑에 의한 향상
 - 5.3.2.2 전이 금속 (예: Fe, Cu) 개질
 - 5.3.2.3 이종 접합 (예: WO₃/SnO₂) 시너지 효과
 - 5.3.2.4 도핑 공정 및 성능 최적화
 - 5.3.3 마이크로 센서 개발
 - 5.3.3.1 MEMS 기술 집적 나노-WO₃
 - 5.3.3.2 유연하고 착용 가능한 센서 설계
 - 5.3.3.3 저온 작동 및 에너지 소비 감소
 - 5.3.3.4 산업 및 환경 모니터링 사례
 - 5.3.4 과제 및 미래 방향
 - 5.3.4.1 습도 간섭 및 간섭 방지 기술
 - 5.3.4.2 장기 안정성 및 노화 문제
 - 5.3.4.3 다중 가스 감지용 어레이 센서
- 5.4 에너지 저장 재료
 - 5.4.1 리튬 이온 배터리 음극
 - 5.4.1.1 나노-WO₃의 삽입/탈삽입 메커니즘
 - 5.4.1.2 고용량 및 사이클 성능 최적화
 - 5.4.1.3 탄소 재료 (예: WO₃/그래핀)와의 복합재
 - 5.4.1.4 급속 충방전 성능 테스트
 - 5.4.2 슈퍼커패시터 전극
 - 5.4.2.1 나노-WO₃의 의사 커패시턴스 특성
 - 5.4.2.2 비정전용량 및 전력 밀도 개선
 - 5.4.2.3 나노 구조 설계 (예: 나노시트 어레이)
 - 5.4.2.4 대칭 및 비대칭 슈퍼커패시터
 - 5.4.3 나트륨 이온 전지에서 응용
 - 5.4.3.1 나트륨 이온 전지에서 나노-WO₃의 잠재력
 - 5.4.3.2 부피 확장 및 안정성 개선
 - 5.4.3.3 전해질 매칭 및 성능 최적화
 - 5.4.3.4 다른 전이 금속 산화물과의 비교
 - 5.4.4 새로운 에너지 저장 장치
 - 5.4.4.1 유연하고 착용 가능한 에너지 저장 장치
 - 5.4.4.2 아연 이온 전지 및 하이브리드 커패시터
 - 5.4.4.3 고체 전지에서의 나노-WO₃ 탐색
- 5.5 기타 응용 분야

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.5.1 열변색 재료
 - 5.5.1.1 나노-WO₃의 열변색 메커니즘
 - 5.5.1.2 색상 변화 온도 조절을 위한 도핑 (예: V, Mo)
 - 5.5.1.3 건물 및 자동차 온도 조절 코팅
 - 5.5.1.4 열 관리에서의 적외선 반사 성능
- 5.5.2 항균 코팅
 - 5.5.2.1 광촉매 반응성 산소종 생성의 항균 메커니즘
 - 5.5.2.2 의료 기기에서의 나노-WO₃의 응용
 - 5.5.2.3 항균 효능 및 안전성 평가
 - 5.5.2.4 복합 코팅 (예: WO₃/Ag) 개발
- 5.5.3 안료 및 세라믹 첨가제
 - 5.5.3.1 나노-WO₃의 황색 안료 특성
 - 5.5.3.2 내후성 및 색상 안정성
 - 5.5.3.3 세라믹의 강화 및 개질
 - 5.5.3.4 산업용 코팅 및 플라스틱에서의 응용
- 5.5.4 신흥 및 교차 도메인 응용
 - 5.5.4.1 바이오 이미징에서 나노-WO₃의 잠재력
 - 5.5.4.2 양자점 WO₃의 광전 응용
 - 5.5.4.3 촉매 담체 및 화학 응용
 - 5.5.4.4 항공우주 재료의 고온 저항
- 5.6 응용 분야의 과제 및 해결책
 - 5.6.1 광촉매 효율 및 가시광선 활용 개선
 - 5.6.2 전기변색 소자의 수명 및 비용 관리
 - 5.6.3 가스 센서의 선택성 및 환경 적응성
 - 5.6.4 에너지 저장 재료의 부피 확장 및 순환 감쇠
 - 5.6.5 다기능 통합 및 산업화 병목 현상

제 6 장 나노텅스텐 산화물의 특허 개요

- 6.1 제조 방법 특허
 - 6.1.1 US7591984B2: 나노-WO₃에 대한 "충격 침전" 방법
 - 6.1.2 CN103803644A: 수열법에 의한 나노-WO₃의 제조
 - 6.1.3 JP2006169092A: WO₃ 미세 입자의 제조
- 6.2 응용 관련 특허
 - 6.2.1 US20110111209A: 고내구성 전기변색 WO₃ 필름
 - 6.2.2 US10266947B2: 나노-WO₃ 가스 센서
 - 6.2.3 EP2380687A1: WO₃ 광촉매 코팅
- 6.3 특허 분석
 - 6.3.1 글로벌 특허 분포 및 동향
 - 6.3.2 기술 혁신 및 경쟁 환경
 - 6.3.3 특허 보호 및 산업화 전망

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 7 장 나노텅스텐 산화물 관련 표준

- 7.1 중국 표준
 - 7.1.1 YS/T 572-2007: 산화텅스텐
 - 7.1.2 YS/T 535-2006: 메타텅스텐산암모늄
- 7.2 일본 표준
 - 7.2.1 JIS K 1462:2015: 텅스텐 화합물에 대한 분석 방법
- 7.3 독일 표준
 - 7.3.1 DIN 51078:2002: 산화물 세라믹 재료의 시험
- 7.4 러시아 표준
 - 7.4.1 GOST 25702-83: 텅스텐산염의 화학 분석
- 7.5 한국 표준
 - 7.5.1 KS D 9502:2018: 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분석
- 7.6 국제 표준
 - 7.6.1 ASTM B922-20: 금속 분말 비표면적 시험
 - 7.6.2 ISO 16962:2017: 표면 화학 분석
- 7.7 표준 비교 및 적용
 - 7.7.1 국가 표준의 차이점 및 적용성
 - 7.7.2 나노-WO₃의 품질 관리에 미치는 영향

제 8 장 나노텅스텐 산화물의 안전 및 환경 영향

- 8.1 독성 평가
 - 8.1.1 급성 및 만성 독성
 - 8.1.2 나노스케일 WO₃의 생물학적 안전성
- 8.2 직업 건강 및 안전
 - 8.2.1 노출 한계 및 보호 조치
 - 8.2.2 먼지 및 폐가스 처리
- 8.3 환경 영향
 - 8.3.1 생태 독성 및 수질 오염
 - 8.3.2 생산 공정의 환경 발자국
- 8.4 친환경 제조 기술
 - 8.4.1 저에너지 소비 제조 공정
 - 8.4.2 폐기물 회수 및 재활용
- 8.5 CTIA GROUP LTD의 나노텅스텐 산화물에 대한 물질안전보건자료 (MSDS)
 - 8.5.1 제품 라벨 및 성분 정보
 - 8.5.2 위험 식별 (물리적, 화학적 및 건강 위험)
 - 8.5.3 취급 및 보관 권장 사항
 - 8.5.4 비상 조치 (누출, 화재, 응급처치)
 - 8.5.5 운송 및 규제 정보

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

참고문헌

부록

부록 A: 밀도, 녹는점, 밴드갭 등과 같은 자세한 매개변수를 포함한 나노 텅스텐 산화물의 물리화학적 데이터 시트

부록 B: 일반적으로 사용되는 분석 방법에 대한 실험 절차 XRD, FTIR, SEM, TEM, UV-Vis, BET 등 운영 가이드

부록 C: 나노 텅스텐 산화물 관련 특허 목록 특허 번호, 제목 및 초록의 자세한 목록

부록 D: 나노 텅스텐 산화물 표준 목록 중국어, 일본어, 독일어, 러시아어, 한국어 및 국제 표준과의 비교

부록 E: 나노 텅스텐 산화물 다국어 용어 표 중국어, 영어, 일본어 및 한국어 용어 비교 표

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



머리말

삼산화물 (나노- WO_3) 우수한 물리적 및 화학적 특성을 가진 전이 금속 산화물인 텅스텐 삼산화물은 재료 과학, 화학 공학, 나노 기술 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있습니다. 독특한 반도체 특성, 광학 특성, 그리고 높은 비표면적은 광촉매, 전기변색, 가스 센서, 에너지 저장 등 다양한 분야에서 광범위한 응용 가능성을 보여줍니다. 본 저서의 목적은 나노 텅스텐 삼산화물의 과학적 근거, 제조 공정, 특성 분석 방법, 그리고 응용 시나리오를 체계적으로 정리하고, 동시에 특허 기술, 국제 표준, 그리고 안전성 평가를 결합하여 학계 연구자, 엔지니어, 그리고 업계 실무자들에게 포괄적이고 실용적인 참고 자료를 제공하는 것입니다. 최신 연구 성과와 산업 실무를 통합함으로써, 실험실 연구부터 산업 응용까지 나노 텅스텐 삼산화물의 완전한 경로를 밝히고, 신에너지, 환경 보호, 그리고 지능형 제조 분야에서의 기술 혁신을 촉진하고자 합니다.

나노텅스텐산화물 연구의 의의 및 개발사

나노 텅스텐 산화물의 연구 의의는 우선 n 형 반도체 재료로서의 우수한 성능에 있습니다. $2.4 \sim 2.8$ eV 의 넓은 밴드갭 에너지 범위는 강력한 가시광선 흡수 능력을 제공하여, 물 분해를 통한 수소 생산 및 유기 오염물질 분해와 같은 광촉매 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. TiO_2 와 같은 기존 광촉매와 비교하여 나노 $-WO_3$ 는 가시광선 영역에서 반응성이 뛰어나고 태양 에너지를 효과적으로 활용할 수 있어 에너지 위기와 환경 오염 문제 해결에 핵심 소재로 주목받고 있습니다. 또한, WO_3 는 전기장을 통해 색상과 투과율을 조절할 수 있는 전기변색 특성을 가지고 있어 스마트 윈도우, 디스플레이, 동적 열 관리 장치의 핵심 부품으로 활용될 수 있습니다. 나노스케일 WO_3 는 높은 비표면적(마이크론 스케일 WO_3 의 $5 \sim 10m^2/g$ 에 비해 $20 \sim 50m^2/g$) 과 풍부한 표면 활성점을 가지고 있어 가스 센서(NO_2 및 H_2 감지 등) 및 에너지 저장 소재(리튬 이온 배터리 양극 및 슈퍼커패시터 전극 등)에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 나노스케일

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

양자 효과와 표면 효과는 촉매 활성화, 이온 확산 속도, 그리고 광전 변환 효율을 더욱 향상시켜 학제간 응용 분야에서 대체 불가능한 소재로 자리매김합니다.

나노 텅스텐 산화물의 독특한 특성은 기초 과학 연구를 촉진했을 뿐만 아니라 산업 응용 분야에 대한 폭넓은 전망을 열어주었습니다. 예를 들어, 광촉매 공기 정화 및 자가 세척 코팅 분야에서의 응용은 상용화 단계에 접어들었으며, 플렉서블 전자 및 바이오 의학 분야에서의 연구는 향후 개발 방향을 시사합니다. 그러나 나노 텅스텐 산화물의 광범위한 적용은 저비용 대량 생산, 복잡한 환경에서의 성능 안정성 향상, 그리고 나노 스케일에서의 생물학적 및 환경적 안전성 평가 등의 과제를 동반합니다. 이러한 과제는 학계 연구뿐만 아니라 산업계와 정책 입안자들의 관심 분야이기도 합니다.

나노 텅스텐 산화물의 연구 개발은 19세기 후반 텅스텐 화합물의 초기 탐사로 거슬러 올라갈 수 있습니다. 희귀 금속인 텅스텐 산화물은 야금 산업의 요구로 인해 처음 주목을 받았습니다. 텅스텐의 주요 산화 상태인 노란색 텅스텐 산화물(WO_3)은 화학적 안정성, 고온 저항성(녹는점 약 $1473^\circ C$) 및 밝은 노란색 외관으로 인해 널리 연구되었습니다. 19세기 말, 화학자들은 텅스텐산염(예: 텅스텐산나트륨 Na_2WO_4)의 산성화 반응을 통해 WO_3 를 제조했고, 처음에 양쪽성 산화물 특성을 밝혀냈습니다. 산과 반응하여 텅스텐산염을 형성하고 알칼리와 반응하여 텅스텐산염을 형성할 수 있습니다. 이 단계의 연구는 주로 WO_3 의 화학적 특성과 산업적 제조에 초점을 맞추어 후속 응용 분야의 기초를 마련했습니다.

20세기 중반, 반도체 물리학의 등장으로 WO_3 연구는 새로운 국면에 접어들었다. 1960년대에 연구자들은 WO_3 가 전기장을 가하면 색이 변할 수 있다는 것을 처음 발견했다. 이 전기변색 특성은 텅스텐 청동 구조(예: H_xWO_3)의 형성에 의해 주도되었다. 이 발견은 눈부심 방지 안경 및 초기 디스플레이 장치와 같은 광학 응용 분야에 대한 연구를 빠르게 촉발시켰다. 이후 1970년대에 혼다-후지시마 효과(물의 TiO_2 광촉매 분해)가 제안되면서 광촉매 연구의 물결이 일었다. WO_3 는 밴드갭이 낮고 광화학적 안정성이 더 뛰어나 TiO_2 의 강력한 경쟁자로 여겨졌다. 예를 들어, 1976년의 한 연구에서 WO_3 가 자외선 하에서 물을 분해하여 산소를 생성할 수 있다는 것을 보여주었고, 이 성과는 광촉매 분야에서 WO_3 의 심층적인 탐구를 촉진했다.

나노기술의 부상은 WO_3 연구의 또 다른 도약을 의미합니다. 특히 2000년대 이후 나노 제조 기술의 획기적인 발전(수열법 및 기상 증착법 등)으로 21세기에 접어들면서 나노스케일 WO_3 의 합성이 현실이 되었습니다. 2004년 연구진은 수열법을 사용하여 직경이 약 20nm 인 WO_3 나노입자를 처음으로 제조했습니다. 이들의 광촉매 활성화는 마이크론 크기의 물질보다 거의 3배 높았습니다. 이후 나노와이어, 나노시트, 다공성 구조와 같은 형태의 개발로 성능이 더욱 최적화되었습니다. 예를 들어, 2010년 연구에서 WO_3 나노와이어는 $40m^2/g$ 의 높은 표면적을 가지고 있어 NO_2 검출 감도를 5배 향상시킵니다. 동시에, 도핑 변형(예: N 및 S 도핑) 및 복합 소재 설계(예: WO_3/gC_3N_4 , WO_3/TiO_2)를 통해 광촉매 효율과 전기적 특성을 크게 향상시켰습니다. 최근 에너지 저장 분야에서 나노- WO_3 의 응용 분야가 빠르게 확대되고 있습니다. 예를 들어, 2018년 한 연구에서는 리튬 이온 배터리에서 WO_3 /그래핀 복합체의 높은 용량($>600 mAh/g$)과 사이클

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정성을 입증했습니다 . 또한, 항균 코팅(광촉매를 이용하여 활성 산소를 생성), 열변색 물질(색상 변화 온도를 조절하기 위해 V를 도핑), 바이오 이미징(양자점 WO_3) 과 같은 신흥 분야에서의 잠재력이 점차 부각되고 있습니다.

나노- WO_3 연구는 괄목할 만한 진전을 이루었지만, 여전히 많은 과제에 직면해 있습니다. 제조 공정의 복잡성으로 인해 대량 생산이 제한되고, 나노입자의 응집 효과로 성능이 저하될 수 있으며, 체내에서의 장기적인 안전성에 대한 심층적인 평가가 필요합니다. 이러한 문제들은 중국의 고순도 WO_3 생산(YS/T 572-2007 표준)에서의 획기적인 발전과 유럽과 미국의 나노물질 안전 규격(ASTM B922-20)에 대한 노력과 같이 전 세계적으로 기술 혁신을 주도해 왔습니다. 이 책은 이러한 맥락에서 집필되었습니다. 나노- WO_3 의 구조, 제조, 응용 및 안전성을 체계적으로 분석하여 기초 연구에서 산업 응용으로 이어지는 다리를 구축하고 에너지 , 환경 및 지능 기술 분야의 주요 과제 해결을 위한 과학적 지원을 제공하는 것을 목표로 합니다.

이 책은 총 9 개 장으로 구성되어 있으며, 나노 텅스텐 산화물의 구조와 특성부터 시작하여 제조 공정, 특성 분석 기술, 응용 분야, 특허 및 표준, 안전성 평가 및 미래 전망을 단계적으로 살펴봅니다. 부록에는 데이터 시트, 실험 가이드, 특허 목록, 표준 비교, 다국어 용어집이 포함되어 전 세계 독자를 위한 포괄적이고 실용적인 지식 플랫폼을 구축하고자 노력합니다. 이 책이 학술 연구에 새로운 아이디어를 불어넣을 뿐만 아니라 나노 텅스텐 산화물의 산업화 과정에 활력을 불어넣기를 바랍니다.

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 1 장: 나노텨스텐 산화물 소개

나노 텨스텐 트리옥사이드(Nano-WO₃)는 중요한 전이금속 산화물입니다. 다양한 물리적, 화학적 특성과 폭넓은 응용 가능성으로 인해 재료과학, 화학공학, 나노기술 분야에서 중추적인 역할을 합니다. 이 장에서는 나노 텨스텐 트리옥사이드의 기본 정의, 화학식, 색상 변화부터 시작하여 나노스케일에서의 고유한 특성, 연구 개발의 역사적 맥락, 그리고 재료과학 분야에서의 현황과 연구 핫스팟을 분석하여 나노 텨스텐 트리옥사이드에 대한 포괄적인 기초 지식을 독자에게 제공하고자 합니다. 이 장의 상세한 소개를 통해 독자는 나노 텨스텐 트리옥사이드의 과학적 근거와 응용 가능성을 종합적으로 이해하게 되고, 나노 텨스텐 트리옥사이드의 제조, 특성 및 응용 분야에 대한 심층적인 이해의 토대를 마련할 수 있을 것입니다.

1.1 산화텨스텐의 기본 개념

1.1.1 정의 및 화학식 (WO₃)

삼산화텨스텐은 텨스텐(W)과 산소(O)로 구성된 화합물로 화학식 WO₃이며, 이는 각 텨스텐 원자가 공유 결합과 이온 결합의 혼합물을 통해 세 개의 산소 원자와 결합하여 안정한 산화물 구조를 형성한다는 것을 의미합니다. 텨스텐 원소의 주요 산화 상태인 WO₃의 텨스텐은 +6 산화 상태에 있으며 전이 금속 산화물 계열에 속하며 분자량은 231.84 g/mol 입니다. WO₃의 결정 구조는 제조 조건 및 온도에 크게 의존하며 일반적으로 단사정계 상(Monoclinic, 안정 상태, 실온에서 일반적), 사방정계 상(Orthorhombic, 300-720° C) 또는 정방정계 상(Tetragonal, >720° C)을 나타내며 이러한 상의 전이는 열역학적 특성과 밀접한 관련이 있습니다.

WO₃는 화학적으로 다재다능한 양쪽성 산화물입니다. 강산(예: HCl)과 반응하여 가용성 텨스텐염(예: WCl)을 형성할 수 있습니다. ()이며, 강염기(예: NaOH)와 반응하여 텨스텐산염(예: Na₂WO₄)을 형성할 수 있어 산업 정제 및 화학 합성에 귀중한 소재입니다. 또한, WO₃는 최대 1473° C의 녹는점과 1700° C 이상의 분해점을 가져 뛰어난 열 안정성을 나타내어 세라믹 첨가제 및 내화재와 같은 고온 환경 응용 분야에 적합합니다. 나노 스케일에서 WO₃의 이러한 특성은 표면 효과와 양자 효과의 향상을 통해 더욱 증폭되어 기능성 소재 분야에서 더 큰 잠재력을 제공합니다.

1.1.2 산화텨스텐의 색상 변화(노란색, 파란색, 검은색)

산화텨스텐은 노란색, 파란색, 검은색을 포함한 다양한 색상으로 알려져 있습니다. 이러한 색상은 화학적 조성, 결정 구조 및 결합 상태의 차이를 반영할 뿐만 아니라 광촉매, 전기변색, 가스 센서 및 에너지 저장 분야에서의 응용 가능성을 직접적으로 결정합니다. 아래에서는 이 세 가지 색상에 대한 포괄적인 설명과 함께, 그 기원, 제조 공정, 특성 및 나노스케일 성능을 다루고, 과학 연구 및 산업 분야에서의 구체적인 응용 분야를 살펴봅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 산화텨스텐 (YTO, WO₃)

황색 텨스텐 산화물(YTO, WO₃)의 기원 및 구조

노란색 산화텨스텐은 텨스텐 산화(WO₃)의 전형적인 형태로, 일반적으로 단사정계 또는 사방정계 상으로 존재합니다. 노란색은 2.6-2.8 eV의 밴드갭 에너지를 갖는 전자 전이에서 비롯되며, 가시광선 영역(약 450-500 nm)에서 강한 흡수에 해당합니다. 단사정계 WO₃의 결정 구조는 WO₆ 팔면체 단위로 구성되며, 이 단위들은 모서리 공유 또는 모서리 공유로 연결되어 격자 매개변수가 a=7.306 Å, b=7.540 Å, c=7.692 Å, β=90.91°인 3차원 네트워크를 형성합니다. 이러한 질서 있는 구조는 높은 화학적 및 열적 안정성을 제공합니다. 노란색은 또한 격자의 미량 결함(예: 산소 공석)과 관련이 있습니다. 이러한 결함은 순수 WO₃에서는 드물지만 나노스케일에서는 약간 증가하여 색상 농도에 영향을 미칠 수 있습니다. X선 회절(XRD)과 라만 분광법 분석 결과, 단사정계 상의 특징적인 피크(예: 717cm⁻¹ 및 807cm⁻¹)가 WOW 결합의 강한 진동을 반영하여 구조적 무결성을 더욱 확증하는 것으로 나타났습니다.

황색 텨스텐 산화물(YTO, WO₃) 제조 방법 황색 WO₃를 제조하는 방법은 다양하며, 크게 습식화학법과 열화학법으로 구분된다.

황색 텨스텐 산화물(YTO, WO₃) 산 침전 제조 방법

텨스텐산나트륨(Na₂WO₄) 용액을 pH 1~2로 조절하여 텨스텐산(H₂WO₄)을 생성한다. 침전된 후 500~600°C에서 2~4시간 동안 소성하여 WO₃로 분해합니다. 소성 온도는 매우 중요합니다. 온도가 450°C 미만이면 수화물(예: WO₃·H₂O)이 남을 수 있고, 온도가 650°C를 초과하면 색상이 열어지거나 입자 크기가 너무 커질 수 있습니다(>10 μm). 열분해법: 메타텨스텐 산 암모늄((NH₄)₅H₅[H₂(WO₄)₆]·H₂O, AMT로 지칭)은 산업계에서 전구체로 널리 사용됩니다. 550°C의 공기 중 소성하며, 분해 반응은 다음과 같습니다: (NH₄)₅H₅[H₂(WO₄)₆] → WO₃ + NH₃ ↑ + H₂O ↑. 이 방법은 입자 크기를 제어할 수 있으며, 일반적으로 1~5 μm의 마이크론 크기의 WO₃를 얻을 수 있지만, 나노스케일에서는 수열법이 필요합니다. 로스팅 분위기(예: 산소 함량)는 색 순도에 상당한 영향을 미치며, 산소가 부족하면 청색 WO₃가 생성될 수 있습니다.

황색 텨스텐 산화물(YTO, WO₃) 수열 제조

텨스텐산나트륨과 염산을 오토클레이브에서 180°C, 12~24시간 동안 반응시키면 20~100nm 크기의 노란색 WO₃ 나노입자를 직접 생성할 수 있습니다. 계면활성제(예: 헥사데실트리메틸암모늄브로마이드, CTAB)를 첨가하면 나노입자의 형태를 구형(직경 20~50nm), 막대형(길이 100~200nm), 또는 박편형(두께 10~20nm)으로 조절할 수 있습니다. 예를 들어, 2017년 한 연구에서는 수열 반응 조건(pH=1.5, 180°C, 24시간)을 최적화하여 순도 99.9%의 30nm 노란색 WO₃ 나노입자를 제조했습니다.

이러한 방법들은 각각 고유한 장점을 가지고 있습니다. 습식 화학법은 나노스케일 제조에 적합한 반면, 열화학법은 90% 이상의 수율로 산업적 대량 생산에 더 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃)의 물리적 및 화학적 특성

나노 황색 텅스텐 산화물(YTO, WO₃)의 광학적 특성

밴드갭은 2.6~2.8 eV이며, 노란색 빛(파장 570~590 nm)을 반사하고 적외선 영역(>700 nm)에서 높은 투과율을 보입니다. UV-Vis 스펙트럼은 450 nm 부근에서 흡수단을 보이며, 높은 색순도를 보이고, 광학 밀도(OD)는 0.5~1.0입니다. 밴드갭 값은 Tauc 플롯 방법을 사용하여 계산하며, 공식은 $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ 입니다. 여기서 α 는 흡수 계수이고 $h\nu$ 는 광자 에너지입니다.

나노황색산화텅스텐의 밀도 (YTO, WO₃)

단사정계 WO₃의 밀도는 7.16 g/cm³이며, 사방정계 상의 밀도는 격자 배열이 더 느슨하기 때문에 약간 낮습니다(약 7.1 g/cm³). 나노스케일 WO₃의 겉보기 밀도는 아르키메데스법으로 측정된 다공성으로 인해 6.8~7.0 g/cm³로 약간 감소할 수 있습니다. 열 안정성: 공기 중에서 1100° C까지 안정하나, 이 온도 이상에서는 휘발하여 WO₂·₉ 또는 기타 산화수가 낮은 물질을 생성하며, 분해 반응은 다음과 같습니다: $2WO_3 \rightarrow 2WO_2 \cdot 9 + 0.5O_2 \uparrow$. 열중량 분석(TGA) 결과, 1200° C 이전에는 질량 손실이 1%를 넘지 않습니다.

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃)의 화학적 특성

물에 약간 용해되며(용해도 <0.02 g/100 mL, 25° C), 강염기(예: 1 M NaOH)에 용해되어 Na₂WO₄를 형성하며 용해 속도는 약 0.1 g/분입니다. 진한 산(예: 98% H₂SO₄)에 부분적으로 용해되어 텅스텐 유도체를 형성하며 반응 평형에 도달하는 데 몇 시간이 걸립니다.

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃)의 전기적 특성

n형 반도체로서 전자 농도는 약 10¹⁶~10¹⁸cm⁻³이고, 전도도는 낮으며(10⁻⁶~10⁻⁵S/cm), 온도와 결함의 영향을 크게 받습니다. 예를 들어, 열적으로 여기된 캐리어의 증가로 인해 300° C에서 전도도는 10⁻⁴S/cm까지 증가할 수 있습니다.

황색 텅스텐 산화물(YTO, WO₃)의 나노스케일 특성

나노스케일 노란색 WO₃(입자 크기 20~100 nm)는 양자 효과와 표면 효과로 인해 상당한 이점을 보입니다.

)의 비표면적

최대 20~30m²/g(미크론 수준은 5~10m²/g)에 달할 수 있으며, 이는 BET (Brunauer - Emmett-Teller) 질소 흡착 시험을 통해 검증되었습니다. 높은 비표면적은 표면 활성 부위를 증가시킵니다. 예를 들어, 광촉매 반응에서 염료 분자의 흡착 능력이 3~5배 증가하고, 흡착 등온선은 랭뮤어 모델을 따릅니다.

나노황색산화텅스텐의 밴드갭 변화 (YTO, WO₃)

입자 크기가 감소하면 밴드갭이 약간 증가합니다. 예를 들어, 20nm WO₃의 밴드갭은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.85eV 에 도달할 수 있으며, 광 흡수단은 435nm 로 청색 편이하고 색상이 약간 더 밝아질 수 있는데, 이는 양자 구속 효과 때문입니다. 이론적 계산에 따르면 밴드갭 증가는 입자 크기(d), ΔE_g 에 반비례합니다. $\propto 1/d^2$.

나노 황색 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 의 광촉매 활성

메틸렌 블루(MB)를 분해할 때 나노-WO₃의 반응 속도 상수(k)는 0.05 분⁻¹에 도달할 수 있으며, 이는 마이크론 수준의 0.01 분⁻¹을 훨씬 초과합니다. 이는 더 높은 전자-정공 분리 효율(분리 속도가 80%로 증가)에 기인합니다. 광전류 테스트 결과 나노-WO₃의 광전류 밀도는 0.5 mA/cm²에 도달하며, 이는 마이크론 수준의 두 배입니다.

나노 황색 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 의 형태학적 영향

나노입자는 균일한 형태를 가지며, 막대형 또는 플레이크형 나노-WO₃의 비표면적은 35 m²/g 까지 증가하여 표면 반응성을 향상시킵니다. 예를 들어, 주사전자현미경(SEM) 결과, 막대형 WO₃의 종횡비는 5:1 이며, 표면 거칠기가 촉매 활성 부위를 증가시키는 것으로 나타났습니다.

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 의 응용

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 광촉매

노란색 WO₃는 물 분해를 통한 수소 생성 및 유기 오염물질 분해에 우수한 성능을 보입니다. 예를 들어, 2016 년 연구에 따르면 50nm 크기의 노란색 WO₃는 가시광선($\lambda > 420\text{nm}$) 에서 약 5%의 양자 효율로 120 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 수소를 생성했습니다. 로다민 B 분해에서는 90 분 이내에 제거율이 95%에 도달했습니다.

나노 황색 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 전기변색 소재

스마트 윈도우에서 나노-WO₃ 필름은 Li⁺를 삽입하여 투명에서 짙은 파란색으로 전환을 달성하며, 광학 변조 범위는 최대 70%(투과율은 80%에서 10%로 떨어짐), 응답 시간은 약 5 초, 사이클 안정성은 10⁴ 배입니다.

나노 황색 산화 텅스텐 (YTO, WO₃) 안료

산업계에서 노란색 안료로 사용됩니다. 높은 내후성(자외선 노화 방지 >1000 시간)과 내열성(>1000° C)을 가지고 있습니다. 세라믹, 코팅, 플라스틱에 널리 사용됩니다. 색도값(L a b*)는 L*=85, a*=10, b*=50 입니다.

나노 옐로우 텅스텐 산화물(YTO, WO₃) 가스 센서

나노-WO₃에서 NO₂로 전환하는 방법은 최대 10 ppb 까지 가능하며, 반응 시간은 10 초 미만, 회복 시간은 약 20 초입니다. 환경 모니터링 및 산업 배출 제어에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

블루 텅스텐 산화물 (BTO)

청색 텅스텐 산화물 (Blue Tungsten Oxide, BTO) 의 기원 및 구조

청색 텅스텐 산화물의 화학적 조성은 일반적으로 $WO_{2.9}$ 또는 WO_{3-x} ($0 < x < 0.1$)이며, 이는 부분적으로 환원된 WO_3 입니다. 이 물질의 청색은 산소 공석의 존재로 인해 발생하며, 이로 인해 저원자가 텅스텐 이온(W^{5+})의 비율이 증가하고 전자 구조에 결정 에너지 준위가 생기고 흡수 스펙트럼이 적외선 영역(600~700nm)으로 이동합니다. 결정 구조는 주로 단사정계이지만 산소 공석은 국소적 왜곡을 일으키고 XRD는 격자 상수가 약간 변하는 것을 보여줍니다(예를 들어, c 축이 약 0.02\AA , $c=7.670\text{\AA}$ 만큼 짧아짐). XPS(X선 광전자 분광법) 분석 결과, W^{5+}/W^{6+} 비율은 약 0.05~0.1 이고, 산소 결손 농도는 약 10^{19}cm^{-3} 입니다. 특정 조건(예: 고온 환원)에서는 소량의 사방정계 상이 공존할 수 있으며, 라만 스펙트럼에서 특징적인 피크(예: 680cm^{-1})가 더욱 뚜렷해져 색상 농도에 더욱 영향을 미칩니다.

청색 텅스텐 산화물 (blue tungsten, Blue Tungsten Oxide, BTO) 의 제조 방법 청색 WO_3 의 제조는 주로 환원 반응에 의해 달성됩니다.

청색 텅스텐산화물 (Blue Tungsten, Blue Tungsten Oxide, BTO) 제조 방법 - 고온 환원법
노란색 WO_3 를 800°C 에서 5% H_2 / Ar 분위기에서 2~4 시간 동안 처리하면 반응은 $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ 입니다. 환원 정도는 온도와 H_2 농도에 따라 조절됩니다. 700°C 에서는 연한 파란색 $WO_{2.95}$ 가 생성되고, 900°C 에서는 진한 파란색 $WO_{2.9}$ 가 생성될 수 있으며, 너무 높은 온도(예: $>1000^\circ\text{C}$)에서는 WO_2 가 생성됩니다. 과도한 환원을 방지하기 위해 대기 중 H_2 의 비율을 정밀하게 조절해야 합니다(5~10%).

청색 텅스텐산화물 (Blue Tungsten, Blue Tungsten Oxide, BTO) 제조 방법 - 습식 화학 환원법

나노스케일 청색 WO_3 는 텅스텐산 용액을 $NaBH_4$ 또는 Zn/HCl 로 $60\sim 80^\circ\text{C}$ 에서 1~2 시간 처리하여 생성할 수 있습니다. 예를 들어, 2018년 연구에서는 $NaBH_4$ 환원(농도 0.1 M, pH = 2, 70°C , 2시간)을 통해 10 nm $WO_{2.9}$ 나노입자를 85%의 수율로 제조했습니다.

청색 텅스텐 산화물 (Blue Tungsten, Blue Tungsten Oxide, BTO) 제조 방법 - 플라즈마 처리

WO_3 표면을 Ar / H_2 플라즈마(전력 100~200W)로 10~20 분 동안 처리하면 청색 WO_3 박막이 빠르게 생성되어 박막 응용 분야에 적합합니다. 너무 긴 충격 시간(30 분 이상)은 표면 비정질화를 유발할 수 있습니다.

이러한 방법 중 습식 화학법은 나노스케일(10~50nm)의 입자 크기 분포 제어 및 제조에 더 적합합니다. 고온법은 연간 수백 톤의 생산량을 자랑하는 산업 생산에 사용됩니다.

청색 텅스텐 산화물 (BTO) 의 물리적 및 화학적 특성

청색 텅스텐 산화물 (BTO) 의 광학적 특성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

밴드갭은 $2.4 \sim 2.6$ eV 로 감소하고, 흡수 피크는 650 nm 로 이동하여 청색을 나타내며, 적외선 영역에서 반사율은 감소합니다(<20%). UV-Vis 스펙트럼에서 흡수단은 500~550 nm 로 적색 편이하고, 광학 밀도는 1.2~1.5 에 도달합니다.

청색 텅스텐 산화물(BTO) 의 밀도

약 7.0-7.1 g/cm³ 로 노란색 WO₃보다 약간 낮습니다 . 밀도 함수 이론(DFT) 계산에 따르면 산소 결손 비율이 1% 증가할 때마다 밀도는 약 0.05 g/cm³ 씩 감소합니다 .

청색 텅스텐 산화물(BTO) 의 전도도

산소 공석은 전자 공여체 역할을 하여 캐리어 농도($10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 를 증가시키고 , 전도도는 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{S/cm}$ 로 증가하는데, 이는 노란색 WO₃보다 1~2 배 더 높습니다 . 4 탐침법을 사용하면 300° C 에서 전도도가 10^{-2}S/cm 에 도달할 수 있습니다.

열 안정성: 노란색 WO₃만큼 안정적이지는 않습니다 . 공기 중 400~500° C 에서 노란색 WO₃로 산화될 수 있습니다 . 반응식은 $\text{WO}_{2.9} + 0.05\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3$ 입니다 . TGA 분석 결과 약 0.5%의 질량 증가를 보입니다.

블루 텅스텐 산화물 BTO 의 화학적 특성

더 쉽게 산화되고 표면 활성이 더 높습니다. 습한 환경(상대 습도 > 80%)에서는 물을 흡착하여 약 0.1 g/g 의 흡착 용량을 갖는 WO₃ · 0.33H₂O 를 생성할 수 있습니다.

청색 텅스텐 산화물 (Blue Tungsten Oxide, BTO) 의 나노스케일 특성

나노스케일 블루 WO₃(입자 크기 10-50 nm)는 결합이 증가하여 상당한 이점을 보입니다.

비표면적

최대 30-40 m²/g, 결합 부위는 흡착 용량을 증가시킵니다. 예를 들어, H₂의 흡착은 2 배 증가합니다 (Langmuir 흡착 용량은 10 cm³/g 에 이릅니다).

광촉매 활성

광촉매 산소 생성에서 양자 효율은 15%에 달하는데, 이는 산소 결손이 전자 전달을 촉진하기 때문입니다(노란색 WO₃는 10%). 광전류 밀도는 0.8 mA/cm²에 달하며 , 이는 노란색 WO₃의 1.6 배입니다 .

전기적 특성

나노와이어 형태(직경 20 nm, 길이 200 nm)의 청색 WO₃는 10^{-2}S/cm 에 도달할 수 있으며, 이는 전기화학 소자에 적합합니다. 저항률은 온도 증가에 따라 기하급수적으로 감소합니다 ($E_a \approx 0.2 \text{eV}$).

응답 속도

전기변색법 에서는 10nm 의 청색 WO₃의 색상 변화 시간이 2 초로 단축되는데, 이는 이온 확산이 더 빠르기 때문이다(확산 계수 $D = 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 대 노란색 WO₃의 경우 $10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

블루텅스텐산화물 (BTO) 의 응용

텅스텐 분말 생산

청색 WO_3 는 금속 텅스텐 제조에 중요한 중간체입니다. $900^{\circ}C$ 에서 10% H_2 를 첨가하여 H_2 로 환원하면 순도 99.95%의 W 분말을 얻을 수 있습니다. 초경합금 및 고온 합금에 널리 사용됩니다.

전기화학 센서

높은 전도성으로 인해 H_2 와 CO를 감지하는 데 적합하며, 최대 50 ppb의 감도와 5초 미만의 응답 시간을 제공하여 가연성 가스 모니터링에 적합합니다.

에너지 저장 재료

슈퍼커패시터에서 나노 블루 WO_3 의 비정전용량은 300 F/g에 달할 수 있으며, 사이클 안정성은 5000 배에 달할 수 있으며, 에너지 밀도는 약 50 Wh/kg입니다.

광열 변환

적외선 흡수 특성으로 인해 태양열 활용에 잠재력이 있습니다. 예를 들어, 광열 필름의 효율은 80%에 도달할 수 있으며, 햇빛 아래에서 표면 온도는 $70^{\circ}C$ 까지 올라갑니다.

바이올렛 텅스텐 산화물 (VTO)

보라색 텅스텐 산화물 (VTO)의 기원과 구조

보라색 텅스텐 산화물 (VTO)의 화학적 조성은 일반적으로 $WO_2 \cdot 72$ 또는 WO_{3-x} ($x \approx 0.28$)입니다. 이것은 파란색 텅스텐 산화물 ($WO_2 \cdot 9$)보다 더 깊게 환원된 삼산화텅스텐 (WO_3)입니다. 보라색(또는 보라색) 색상은 산소 공석의 농도가 더 높아서 발생하며, 이로 인해 저원자가 텅스텐 이온 (W^{5+} 및 소량의 W^{4+})의 비율이 크게 증가합니다. 산소 공석에 의해 도입된 결합 에너지 준위는 전자 구조를 변경하여 흡수 스펙트럼이 적외선 영역(700-800nm)으로 이동하여 진한 보라색에서 거의 검은색으로 나타납니다. 결정 구조는 주로 단사정계(공간군 $P2_1/n$)이지만, 높은 산소 공석 농도(약 $10^{20}cm^{-3}$)로 인해 격자 왜곡이 발생합니다. XRD 분석 결과 격자 상수가 크게 변하는 것으로 나타났습니다(예: c축이 약 0.05\AA , $c \approx 7.642\text{\AA}$). XPS(X선 광전자 분광법) 결과 W^{5+}/W^{6+} 비율은 $0.2 \sim 0.3$, W^{4+}/W^{6+} 비율은 약 $0.05 \sim 0.1$ 로 나타나 강한 환원 특성을 나타냅니다. 강한 환원 또는 고온 조건 하에서 소량의 입방정상($WO_2 \cdot 72$ 특성)이 혼합될 수 있으며, 라만 스펙트럼의 특징적인 피크(예: $720cm^{-1}$ 및 $950cm^{-1}$)의 강도가 강화되는데, 이는 보라색의 농도 변화와 관련이 있다.

바이올렛 텅스텐 산화물 (VTO)의 제조 방법

보라색 VTO의 제조는 주로 환원 반응을 조절하여 이루어집니다. 다음은 세 가지 일반적인 방법입니다.

바이올렛 텅스텐 산화물 (VTO) 제조 방법 - 고온 환원법

Ar 분위기에서 $900-1000^{\circ}C$ 에서 1-3시간 동안 소성하면 반응은 $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} +$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

xH_2O 가 됩니다. ($x \approx 0.28$). 환원 정도는 온도와 H_2 농도에 따라 결정됩니다. $900^\circ C$ 에서는 연보라색 $WO_{2.75}$ 가 생성되고, $1000^\circ C$ 에서는 진한 자주색 $WO_{2.72}$ 가 생성됩니다. 온도가 $1050^\circ C$ 를 초과하면 WO_2 또는 금속 텅스텐으로 과환원될 수 있습니다. 불순물 생성을 방지하기 위해 H_2 비율을 정밀하게 조절해야 합니다(10%~15%). 이 방법은 연간 수백 톤의 생산량을 가진 산업 생산에 적합합니다.

바이올렛 텅스텐 산화물(VTO) 제조 방법 - 습식 화학 환원법
강한 환원제(예: 소듐 디티오나이트 $Na_2S_2O_4$ 또는 Zn/HCl)를 사용하여 $50\sim70^\circ C$ 에서 2~4 시간 동안 반응시켜 나노 크기의 자주색 VTO 를 생성합니다. 예를 들어, 한 연구에서는 $Na_2S_2O_4$ 환원(농도 0.2 M, pH= 1.5, $60^\circ C$, 3 시간)을 통해 입자 크기가 $15\sim30nm$ 인 $WO_{2.72}$ 나노입자를 약 80%의 수율로 제조했습니다. 이 방법은 작동 온도가 낮고 입자 크기를 조절할 수 있지만, 부산물을 제거하기 위해 세척이 필요합니다.

바이올렛 텅스텐 산화물(VTO) 제조 방법 - 플라즈마 처리

Ar/H_2 플라즈마(전력 $200\sim300W$)를 사용하여 WO_3 분말 또는 필름 표면에 $15\sim25$ 분 동안 충격을 가하여 보라색 VTO 박막을 빠르게 생성합니다. 충격 시간과 전력은 최적화되어야 합니다. 충격 시간이 너무 길거나(30 분 이상) 너무 강하면($400W$ 이상) 비정질화 또는 WO_2 로의 과도한 환원이 발생할 수 있습니다. 이 방법은 박막 제조에 적합하며 전기변색 또는 센서에 사용됩니다.

방법 비교

습식 화학적 방법은 좁은 입자 크기 분포 ($15\sim50nm$)를 갖는 나노스케일 제조에 적합하고, 고온 환원 방법은 수율이 높고 비용이 낮은 산업적 규모에 적합합니다. 플라즈마 처리는 표면 개질 및 빠른 반응에 적합합니다.

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 물리적 및 화학적 특성

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 광학적 특성

보라색 VTO의 밴드갭은 $2.2\sim2.5 eV$ 로 감소하고(노란색 WO_3 는 $2.6\sim2.8 eV$, 파란색 WO_3 는 $2.4\sim2.6 eV$), 흡수 피크는 $700\sim750 nm$ 로 이동하여 진한 보라색을 나타내며, 적외선 영역에서 반사율은 매우 낮습니다($<15\%$). UV-Vis 스펙트럼에서 흡수단은 적색 편이되어 $550\sim600 nm$ 로 이동하고, 광학 밀도는 $1.5\sim1.8$ 로 나타나 강한 적외선 흡수능을 나타냅니다. 이러한 광학적 특성은 높은 농도의 산소 공공에 의해 유도된 중간 에너지 준위 때문입니다.

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 밀도

밀도는 약 $6.9\sim7.0 g/cm^3$ 로, 노란색 WO_3 ($7.16 g/cm^3$)와 파란색 WO_3 ($7.0\sim7.1 g/cm^3$)보다 낮습니다. 산소 공공 비율이 더 높고(약 9-10%) 단위 부피 질량이 감소하기 때문입니다. 밀도 함수 이론(DFT) 계산에 따르면 산소 공공 비율이 1% 증가할 때마다 밀도는 약 $0.06 g/cm^3$ 씩 감소합니다.

바이올렛 텅스텐 산화물(VTO)의 전기 전도도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고농도의 산소 공석은 전자 공여체 역할을 하여 캐리어 농도를 10^{19} - 10^{20} cm⁻³ 까지 증가시키고, 전도도를 10^{-3} - 10^{-2} S/cm 까지 증가시킵니다. 이는 노란색 WO₃ (10^{-5} S/cm) 보다 2~3 배, 파란색 WO₃ (10^{-4} - 10^{-3} S/cm) 보다 1 배 더 높습니다. 4 탐침법을 사용하면 400° C 에서 전도도가 0.1 S/cm 에 도달하여 우수한 반도체 특성을 보입니다.

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 열 안정성

3를 공기 중 300~400° C 에서 반응시킨다. 반응식은 WO₂이다. $W_2 + 0.14O_2 \rightarrow WO_3$. TGA 분석 결과 질량이 약 1.2%~1.5% 증가하는 것으로 나타났다. 200° C 이하에서는 비교적 안정하지만, 고온(500° C 이상)에 장시간 노출되면 보라색이 완전히 사라진다.

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 화학적 특성

보라색 VTO 는 강한 환원 상태를 나타내므로 노란색과 파란색 WO₃보다 화학적 활성이 더 강하고 쉽게 산화됩니다. 습도가 높은 환경(상대 습도 >80%)에서는 물이 표면에 흡착되어 WO₃·H₂O 또는 WO₃·0.33H₂O 를 생성하며, 흡착량은 약 0.15 g/g 입니다. 산성 조건(예: pH <2)에서는 천천히 용해되어 W⁶⁺ 이온을 방출합니다.

보라색 텅스텐 산화물(VTO)의 나노스케일 특성

나노 크기의 보라색 VTO(입자 크기 15-50nm)는 결합 농도가 더 높아 상당한 이점을 보입니다.

비표면적은

40~60m²/g 에 달할 수 있으며, 이는 노란색 WO₃ (10 ~20m²/g) 및 파란색 WO₃ (30 ~40m²/g)보다 높습니다. 결합 부위는 흡착 용량을 향상시키며, H₂의 랭뮤어 흡착 용량은 노란색 WO₃의 3 배인 15cm³/g 에 이릅니다.

광촉매 활성

물을 광촉매 분해하여 산소를 생성할 때, 양자 효율은 18%에 달합니다 (노란색 WO₃의 경우 10%, 파란색 WO₃의 경우 15%). 이는 산소 결손이 광으로 생성된 전자와 정공의 분리를 촉진하기 때문입니다. 광전류 밀도는 1.0 mA/cm² 에 달하며, 이는 파란색 WO₃의 0.8 mA/cm² 보다 높습니다.

전기적 특성: 나노와이어 형태(직경 15~25nm, 길이 150~300nm)의 보라색 VTO 의 전도도는 0.1 S/cm 에 달할 수 있으며, 이는 고감도 센서에 적합합니다. 저항률은 온도 증가에 따라 기하급수적으로 감소하며, 활성화 에너지 Ea 는 ≈ 0.18 eV 입니다.

응답 속도

전기변색 응용 분야에서 20nm 보라색 VTO 의 색상 변화 시간은 1.5 초로 단축되고(노란색 WO₃는 5 초, 파란색 WO₃는 2 초) 이온 확산 계수는 10⁻⁷ cm² /s 로 증가합니다. 이는 결합 채널이 Li⁺ 또는 H⁺의 전달을 가속화하기 때문입니다.

바이올렛 텅스텐 산화물(VTO)의 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 분말 생산

퍼플 VTO 는 고순도 텅스텐 금속 분말 제조에 핵심적인 중간체입니다. H_2 환원($950^{\circ}C$, 15% H_2/Ar , 2 시간)을 통해 입자 크기가 $50\sim 100nm$ 인 텅스텐 분말이 생성되며, 순도는 99.98%입니다. 이 분말은 초경합금, 텅스텐 와이어, 고온 합금에 널리 사용됩니다. 노란색 WO_3 에 비해 환원 속도가 빠르고 효율이 약 20% 향상됩니다.

전기화학 센서

보라색 VTO 는 높은 전도도와 결합 활성을 가지고 있어 가스 센서에 적합합니다. 예를 들어, 황화수소(H_2S) 검출 감도는 최대 30 ppb 이고, 반응 시간은 3 초 미만이며, 선택도는 파란색 WO_3 보다 우수하여 산업 안전 모니터링에 적합합니다.

에너지 저장 재료

슈퍼커패시터에서 나노 퍼플 VTO 의 비정전용량은 $350\sim 400 F/g$ (블루 WO_3 는 $300 F/g$)에 달할 수 있으며, 사이클 안정성은 6,000 배에 달하고 에너지 밀도는 약 $60 Wh/kg$ 입니다. 높은 캐리어 농도와 빠른 이온 확산은 이 제품의 주요 장점입니다.

광열 변환

보라색 VTO ($700\sim 1000nm$, 반사율 $< 10\%$)는 강력한 적외선 흡수율을 자랑하여 광열 변환에 유망한 후보 물질입니다. 예를 들어, 보라색 VTO 나노입자로 코팅된 광열 필름은 햇빛 하에서 85%의 효율을 보이며, 표면 온도는 $80^{\circ}C$ 까지 상승할 수 있어 태양열 집열기에 적합합니다.

주황색 텅스텐 산화물(Orange Tungsten Oxide, OTO)

오렌지텅스텐산화물(OTO)의 기원과 구조

W_{90} 또는 WO_{3-x} ($x \approx 0.1$)의 화학 조성을 갖습니다. 이것은 노란색 WO_3 (WO_3)와 파란색 WO_3 ($WO_2 \cdot 9$) 사이의 약간 환원된 삼산화텅스텐(WO_3)입니다. 이것의 주황색은 적당한 산소 공석에서 비롯되는데, 이는 낮은 원자의 텅스텐 이온(W^{5+})의 비율을 약간 증가시키고 전자 구조에 소량의 결합 에너지 준위를 도입하며 흡수 스펙트럼을 가시광선 영역($550\sim 600nm$)으로 이동시킵니다. 결정 구조는 주로 단사정계(공간군 $P2_1/n$)이고, 산소 공공 농도는 낮고(약 $10^{18}\sim 10^{19}cm^{-3}$), 격자 왜곡은 미미하고, XRD 는 격자 상수가 약간 변하는 것을 보여줍니다(예를 들어, c 축은 약 0.01\AA 만큼 짧아짐, $c \approx 7.685\text{\AA}$). XPS 분석은 W^{5+}/W^{6+} 비율이 약 0.02-0.05 로 청색 및 보라색 텅스텐 산화물보다 훨씬 낮고 W^{4+} 가 거의 존재하지 않음을 보여줍니다. 온화한 환원 조건(예: $600\sim 700^{\circ}C$)에서는 소량의 사방정계 상이 섞일 수 있으며, 라만 스펙트럼의 특징적인 피크(예: $710 cm^{-1}$)의 강도가 약간 증가하는데, 이는 주황색의 밝고 어두운 변화와 관련이 있습니다.

오렌지 텅스텐 산화물(Orange Tungsten Oxide, OTO)의 제조 방법

오렌지색 OTO 는 약한 환원 반응을 통해 제조됩니다. 다음은 세 가지 일반적인

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방법입니다.

오렌지 텅스텐 산화물(Orange Tungsten Oxide, OTO)의 제조 방법 - 고온 환원법

Ar 분위기 에서 600-700° C 에서 2-3 시간 동안 소성하면 반응은 $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ 가 됩니다. ($x \approx 0.1$). 환원 정도는 온도와 H_2 농도에 따라 조절됩니다. 600° C 에서는 연한 주황색 $WO_{2.92}$ 가 생성되고 , 700° C 에서는 주황색 $WO_{2.90}$ 가 생성됩니다 . 온도가 800° C 를 초과하면 파란색 $WO_{2.9}$ 로 더 환원될 수 있습니다. 과도한 환원을 방지하기 위해 H_2 비율은 낮은 농도(2~5%)로 유지해야 합니다. 이 방법은 산업 생산에 적합하며, 연간 생산량은 수십 톤에 달할 수 있습니다.

오렌지 텅스텐 산화물(Orange Tungsten Oxide, OTO) 제조 방법 - 습식 화학 환원법

약한 환원제(예: 수소화붕소나트륨 ($NaBH_4$) 또는 아스코르브산)를 사용하여 40~60° C 에서 1~3 시간 동안 반응시키면 나노크기의 주황색 OTO 가 생성됩니다. 예를 들어, 한 연구에서는 $NaBH_4$ (농도 0.05 M, pH= 3, 50° C, 2 시간) 를 이용한 약한 환원을 통해 입자 크기가 20~40nm 인 $WO_{2.90}$ 나노입자를 약 90 %의 수율로 제조했습니다. 이 방법은 조작성이 간편하고 소규모 정밀 제조에 적합합니다.

오렌지텅스텐산화물(OTO) 제조 방법 - 플라즈마 처리

저전력 Ar / H_2 플라즈마(전력 50~100W)를 사용하여 WO_3 표면에 5~15 분 동안 충격을 가하여 주황색 OTO 박막을 빠르게 생성합니다. 충격 시간은 엄격하게 조절해야 합니다. 충격 시간이 너무 길면(20 분 이상) 파란색 WO_3 가 생성될 수 있습니다. 이 방법은 광학 또는 전기 응용 분야의 박막 제조에 적합합니다.

방법 비교:

습식 화학 방법은 나노스케일 제조에 적합하며 입자 크기 분포가 균일합니다(20-50nm). 고온 환원 방법은 산업적 규모에 적합하며 비용이 낮고 수율이 높습니다. 플라즈마 처리는 표면 개질에 사용되며 반응 속도가 빠릅니다.

오렌지텅스텐산화물(OTO)의 물리적 및 화학적 특성

오렌지텅스텐산화물(OTO)의 광학적 특성

주황색 OTO 의 밴드갭은 2.5~2.7 eV(노란색 WO_3 의 2.6~2.8 eV 와 파란색 WO_3 의 2.4~2.6 eV 사이) 이고, 흡수 피크는 550~600 nm 에 위치하여 밝은 주황색을 나타내며, 적외선 영역에서 반사율이 높습니다(약 30~40%). UV-Vis 스펙트럼에서 흡수단이 480~520 nm 로 이동하며, 광학 밀도는 1.0~1.3 으로 가시광선 영역에서 중간 정도의 흡수능을 나타냅니다.

오렌지 텅스텐 산화물(OTO)의 밀도

밀도는 약 7.1-7.15 g/cm³로 , 노란색 WO_3 (7.16 g/cm³) 보다 약간 낮고 파란색 WO_3 (7.0-7.1 g/cm³) 보다 높는데, 이는 산소 결손 비율이 낮기 때문입니다(약 3%-5%). 밀도 함수 이론(DFT) 계산에 따르면 산소 결손이 1% 증가할 때마다 밀도는 약 0.03 g/cm³씩 감소합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

오렌지 텅스텐 산화물(OTO)의 전기 전도도

산소 공석은 전자 공여체 역할을 하여 캐리어 농도를 $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로, 전도도를 $10^{-5} - 10^{-4} \text{ S/cm}$ 로 증가시킵니다. 이는 노란색 WO_3 (10^{-5} S/cm)보다 약간 높지만 파란색 WO_3 ($10^{-4} - 10^{-3} \text{ S/cm}$)보다 낮습니다. 4 탐침 법을 사용하면 전도도가 300° C 에서 10^{-3} S/cm 에 도달할 수 있으며, 이는 온화한 반도체 특성을 보여줍니다.

오렌지 텅스텐 산화물(OTO)

청색과 보라색 WO_3 의 결정입니다. 공기 중에서 $500 \sim 600^\circ \text{ C}$ 에서 노란색 WO_3 로 산화되기 시작합니다. 반응식은 $\text{WO}_{2.90} + 0.05\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3$ 입니다. TGA 분석 결과 질량이 약 0.3~0.5% 증가합니다. 400° C 이하에서 안정성이 우수하며 중온 응용 분야에 적합합니다.

오렌지텅스텐산화물(OTO)의 화학적 특성

WO_3 보다 산화되기 쉽지만 파란색과 보라색 WO_3 보다는 산화되기 쉽습니다. 습한 환경(상대 습도 >80%)에서 표면은 물을 흡착하여 $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ 를 생성하며, 흡착량은 약 0.05~0.08 g/g입니다. 산성 조건(pH <3)에서 용해도가 낮고 화학적 안정성이 우수합니다.

오렌지 텅스텐 산화물(OTO)의 나노스케일 특성

나노스케일 오렌지색 OTO(입자 크기 20-50nm)는 중간 정도의 결함을 가지고 있으며 다음과 같은 특성을 나타냅니다.

비표면적은

$20 \sim 30 \text{ m}^2/\text{g}$ 에 달할 수 있으며, 이는 노란색 WO_3 ($10 \sim 20 \text{ m}^2/\text{g}$)보다 높고 파란색 WO_3 ($30 \sim 40 \text{ m}^2/\text{g}$)보다 낮습니다. H_2 의 랭뮤어 흡착 용량은 약 $5 \sim 8 \text{ cm}^3/\text{g}$ 로 노란색 WO_3 보다 약간 높습니다.

광촉매 활성

광촉매 산소 생산 시 양자 효율은 12%에 달하며(노란색 WO_3 는 10%, 파란색 WO_3 는 15%), 광전류 밀도는 0.6 mA/cm^2 로 노란색 과 파란색 WO_3 사이입니다.

의 Orange OTO는 최대 10^{-3} S/cm 의 전기 전도도를 가지며, 이는 저전력 센서에 적합합니다. 저항률은 온도 증가에 따라 감소하며, 활성화 에너지 E_a 는 $\approx 0.25 \text{ eV}$ 입니다.

응답 속도

전기변색 응용 분야에서 30nm 주황색 OTO의 색상 변화 시간은 3초(노란색 WO_3 의 경우 5초, 파란색 WO_3 의 경우 2초)이고 이온 확산 계수는 $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 노란색 WO_3 보다 약간 높습니다.

오렌지텅스텐산화물(OTO)의 응용 분야

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 분말 생산

Orange OT0 는 텅스텐 금속 분말 제조의 중간체로 사용할 수 있습니다. H₂ 환원(850° C, 5% H₂/ Ar , 3 시간)을 통해 입자 크기가 100~200nm 이고 순도가 99.9%인 텅스텐 분말이 생성되며, 이는 초경합금 및 전자 재료에 적합합니다. 온화한 환원 특성으로 공정 제어가 용이합니다.

전기화학 센서

100 ppb 의 감도와 약 5-8 초의 반응 시간으로 저농도 가스(예: NH₃) 를 감지하는 데 적합하므로 환경 모니터링에 적합합니다.

에너지 저장 재료

슈퍼커패시터에서 나노오렌지색 OT0 의 비정전용량은 약 250~300 F/g(청색 WO₃의 300 F/g 보다 낮음) 이고 , 사이클 안정성은 최대 4000 배이며, 에너지 밀도는 약 40 Wh /kg 으로 저가형 에너지 저장 소자에 적합합니다.

광학 재료

주황색 OT0(550~600nm)는 가시광선 흡수 특성이 뛰어나 광학 필터나 장식용 코팅에 유용하며, 적당한 반사율(30~40%)로 조명 및 디스플레이 분야에서 잠재력이 있습니다.

검은색 텅스텐 산화물 기원 및 구조

검은색 텅스텐 산화물은 일반적으로 결합이 큰 WO₃ 또는 그 수화물(예: WO₃ · 0.33H₂O, WO₃ · H₂O)입니다. 그 어두운 색상은 강한 전체 스펙트럼 흡수(400-1000nm)에서 비롯됩니다. 원인에는 많은 수의 산소 공석(농도 10²⁰ cm⁻³) , W⁵⁺ /W⁴⁺ 이온(W⁴⁺ 비율은 5%-10%에 도달할 수 있음)의 존재 및 격자 왜곡이 포함됩니다. 수화물 형태에서 물 분자는 WO₆ 팔면체 사이의 틈에 박혀 약 3.84Å 의 층상 구조를 형성하여 전자 에너지 준위를 더욱 변화시킵니다. XRD 분석 결과, 검은색 WO₃는 대부분 사방정계 상(a=5.27 Å, b=5.36 Å, c=3.84 Å) 이거나 비정질이며, 특징적인 피크(예: 23.5° 및 33.8°)의 세기가 낮음을 보여줍니다. XPS 분석 결과, W⁴⁺(34.5 eV)의 결합 에너지가 W⁶⁺(35.8 eV)보다 낮고 결합 상태가 유의미함을 보여줍니다. 라만 스펙트럼은 넓은 피크(600-900 cm⁻¹)를 나타내어 격자 무질서를 반영합니다.

준비 방법

WO₃를 제조하는 데에는 저온 또는 강한 환원 조건을 강조하는 다양한 방법이 있습니다 .

저온수열법

텅스텐산나트륨을 180° C 오토클레이브에서 HCl 과 24 시간 동안 반응시키고, 환원제(예: 요소, 농도 0.5 M)를 첨가하여 WO₃ · 0.33H₂O 나노시트를 생성했습니다. 예를 들어, 2015 년 연구에서는 이 방법을 사용하여 5nm 두께의 검은색 WO₃ 나노시트를 90%의 수율로 합성했습니다. 반응 조건(예: pH = 1, 요소/W 비율 = 2:1)은 결합 밀도에 상당한 영향을 미칩니다.

강환원법: 노란색 WO₃를 Zn/HCl(Zn 농도 1 M, HCl 6 M) 또는 HI(농도 57%)로 처리하고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

60° C 에서 2~4 시간 동안 반응시켜 무정형의 검은색 WO₃를 생성합니다 . WO₂ 생성을 방지하기 위해 환원 시간은 3 시간 이내로 조절합니다 .

플라즈마 폭격

WO₃ 표면을 고에너지 H₂ 플라즈마(전력 300 W, 압력 0.1 mbar)로 15 분간 처리하여 산소 결손을 빠르게 유도하고 검은색 필름을 형성했습니다. SEM 분석 결과, 표면 기공률이 20%까지 증가했습니다.

수화물의 열처리: WO₃ · H₂O 를 300° C 의 불활성 분위기(N₂) 에서 1 시간 동안 부분 탈수시키면 흑색 특성을 유지할 수 있으며, 탈수율은 50~70%로 조절된다.

이 중 수열법은 나노스케일 제조에 적합하며 수율이 높고 형태 조절이 가능하다. 플라즈마법은 박막 제조에 적합하며 연간 생산량이 최대 10m² 이다 .

물리화학적 특성

광학적 특성

밴드갭은 2.0~2.4 eV 로 감소하고, 흡수는 가시광선에서 근적외선 영역(400~1000 nm)을 커버하며, 반사율은 5% 미만인 짙은 검은색을 나타냅니다. UV-Vis 분석 결과, 흡수단은 600 nm 이상에서 나타나며, 광학 밀도는 2.0~2.5 에 도달합니다.

밀도

수화물 형태는 물 분자가 포함되어 있어 밀도가 낮습니다(6.5-6.8 g/cm³) . 비정질 WO₃의 밀도는 7.0 g/cm³ 에 가깝습니다 . DFT 계산 결과, 물 분자는 부피의 약 10%를 차지하는 것으로 나타났습니다.

열 안정성

불안정합니다. 400° C 로 가열하면 탈수되어 노란색 WO₃로 변합니다 . 반응식은 WO₃ · 0.33H₂O → WO₃ + 0.33H₂O ↑ 입니다. TGA 분석 결과 약 5%의 질량 감소가 나타났습니다.

화학적 특성

표면 활성이 매우 높아 수분(흡착량 0.2 g/g)과 산소(표면 산화 속도 0.01 g/min)를 쉽게 흡착합니다. 산성 환경(pH < 2)에서 부분적으로 용해되어 WO₂(OH)₂를 생성합니다.

전기적 특성

결합 상태는 캐리어 농도(10¹⁹-10²⁰cm⁻³) 를 증가시키고 전도도는 10⁻³-10⁻² S/cm 에 도달할 수 있습니다. 홀 효과 테스트 결과 전자 이동도는 약 5cm²/V · s 입니다.

나노스케일 특성

나노스케일 블랙 WO₃(입자 크기 5-20nm)는 높은 결합 밀도로 인해 우수한 특성을 나타냅니다.

비표면적

최대 50~60m²/g 의 기공률을 가지며, 20~30%의 기공률을 가져 흡착 및 촉매 성능이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상됩니다. BET 분석 결과 기공 크기 분포는 5~10nm 에 집중되어 있습니다.

광촉매 활성

가시광선 하에서 로다민 B의 분해 속도 상수는 0.08 분⁻¹으로, 황색 WO₃의 1.6 배에 달합니다. 전체 스펙트럼 흡수는 태양 에너지 이용률을 향상시켜 효율을 90%까지 높입니다. 광전류 밀도는 1.2 mA/cm²에 이릅니다.

전기화학적 성능

나노시트 형태(두께 5nm, 너비 50~100nm)의 WO₃는 슈퍼커패시터에서 400~500 F/g의 비정전용량, 10 kW/kg의 전력 밀도, 10⁴배의 사이클 수명을 달성할 수 있습니다.

열 반응

적외선 흡수로 인해 열변색에 대한 빠른 반응(<1 초)을 보이며, 최대 20° C의 온도 변조 범위를 보입니다.

애플리케이션

광촉매작용

공기 정화 및 수처리에서 검은색 WO₃는 전체 스펙트럼 흡수를 통해 노란색 WO₃보다 훨씬 효율적입니다. 예를 들어, 포름알데히드 분해 속도는 0.1 분⁻¹이며 제거율은 98%(1 시간)입니다.

열변색 재료

V 또는 Mo를 도핑하면 색변화 온도(30~100° C)를 조절하여 온도 조절 코팅을 만드는 데 사용할 수 있으며, 적외선 반사율은 10%에서 60%로 증가합니다.

항균 코팅

광촉매작용은 활성산소(예: •OH)를 생성하는데, 이는 대장균을 99.9% 죽일 수 있으므로(30 분) 의료기기의 표면처리에 적합합니다.

광열 응용 분야

광열 치료에서 검은색 WO₃ 나노입자는 적외선 흡수율이 85%이고 국소 온도가 50° C까지 상승하는데, 이는 암 고주파 연구에 사용됩니다.

색상 변형의 비교 및 의미

광학적 차이

노란색 WO₃(2.6-2.8 eV)는 가시광선의 중간 영역에 국한되고, 파란색 WO₃(2.4-2.6 eV)는 적색 영역까지 확장되며, 검은색 WO₃(2.0-2.4 eV)는 전체 스펙트럼을 포괄합니다. 흡수 용량은 점차 증가하고 반사율은 점차 감소합니다(노란색 30%, 파란색 20%, 검은색 <5%).

구조 및 결합

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

노란색 WO_3 는 완전한 구조를 가지고 있으며 결합이 가장 적습니다($10^{17}cm^{-3}$). 파란색 WO_3 는 적당한 양의 산소 공석을 포함합니다($10^{19}cm^{-3}$). 검은색 WO_3 는 결합이 가장 많습니다($10^{20}cm^{-3}$). 수화물이 복잡성을 증가시킵니다.

나노 효과

결합 효과는 나노 스케일에서 확대됩니다. 검은색 WO_3 는 가장 높은 비표면적(50-60 m^2/g)과 활성을 가지고, 노란색 WO_3 는 가장 높은 안정성(열분해 온도 $1100^\circ C$)을 가지며, 파란색 WO_3 는 두 가지의 중간 수준(전도도 $10^{-3} S/cm$)을 보입니다.

응용 프로그램 지향

노란색 WO_3 는 전통 산업 및 전기변색에 적합하고, 파란색 WO_3 는 전기화학 및 중간 생성물에 적합하며, 검은색 WO_3 는 광촉매 및 신홍 분야에서 주로 사용됩니다.

나노스케일 색상 변형은 결합 및 형태 조절을 통해 WO_3 의 기능을 크게 확장하여 다양한 분야의 응용 분야에 유연한 옵션을 제공합니다.

1.1.3 나노스케일에서의 독특한 특성

(WO_3)의 입자 크기가 나노스케일($<100nm$)로 줄어들면 물리적, 화학적 특성이 크게 변화하여 고유한 장점이 나타납니다.

높은 비표면적

나노- WO_3 는 미크론 단위에서 $5\sim 10m^2/g$ 에서 $20\sim 50m^2/g$ 로 증가하여 활성점의 수가 증가합니다. 예를 들어, 광촉매 반응에서 나노- WO_3 의 표면 흡착 용량은 3~5 배 증가할 수 있으며, BET 시험 결과 기공률은 5% 미만에서 $10\sim 20\%$ 로 증가하는 것으로 나타났습니다.

양자 효과

입자 크기 감소는 밴드갭을 약간 증가시키고(예: 2.6 eV에서 2.8 eV로), 양자 구속 효과는 광 흡수 및 전하 분리 효율을 향상시킵니다. 예를 들어, 20 nm WO_3 의 광전류 밀도는 $0.5 mA/cm^2$ 에 도달하며, 이는 마이크로미터 수준의 광전류 밀도보다 두 배 높습니다.

표면 효과

표면 원자의 비율이 마이크로미터 단위에서 5% 미만에서 나노미터 단위에서는 $20\sim 30\%$ 로 증가하여 흡착 용량과 이온 확산 속도가 크게 향상됩니다. 예를 들어, 전기변색 소자에서 Li^+ 확산 계수는 $10^{-11} cm^2/s$ 에서 $10^{-9} cm^2/s$ 로 증가하고 응답 시간은 2~5 초로 단축됩니다.

형태학적 다양성

나노기술은 WO_3 에 나노입자(고활성, 비표면적 $30m^2/g$), 나노와이어(고전도도, 종횡비 10:1), 나노시트(고비정전용량, 두께 $5\sim 10nm$), 다공성 구조(고흡착, 기공 크기 $5\sim 20nm$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

등 다양한 형태를 부여하며, 각 형태는 특정 응용 분야에 맞춰 성능을 최적화합니다. 예를 들어, 나노와이어 WO_3 는 NO_2 검출 시 10ppb의 감도를 가지며, 다공성 WO_3 는 광촉매 반응에서 수소 생성 효율을 50% 증가시킵니다.

전기변색, 센서 및 에너지 저장 분야에서 기존 소재를 훨씬 능가하는 잠재력을 보여 기능성 소재 연구의 핫스팟으로 떠올랐습니다.

1.2 나노텨스텐 산화물의 역사와 발전

1.2.1 초기 연구 및 발견

산화텨스텐 연구는 19세기 텨스텐의 화학적 탐사와 함께 시작되었습니다. 1816년 스웨덴의 화학자 옌스 야콥 베르셀리우스가 최초로 텨스텐을 분리했고, 이후 텨스텐산(H_2WO_4)과 산화텨스텐(WO_3)이 연구의 주요 대상이 되었습니다. 19세기 말, 화학자들은 텨스텐산염(예: $Na_2WO_4 + HCl$)을 산성화하여 노란색 WO_3 를 제조하고, 양쪽성(산화)을 발견하여 WCl_6 는 산과 반응하고 Na_2WO_4 는 알칼리와 반응하여 고온에서 안정적이며(녹는점 $1473^\circ C$) 텨스텐 정제 및 안료 생산에 사용되었습니다. 예를 들어, 1890년대에는 WO_3 가 도자기 유약의 황색 착색제로 사용되었으며, 연간 생산량은 약 100톤이었습니다.

20세기에 X선 회절 기술을 응용하여 WO_3 의 결정 구조가 밝혀졌습니다. 1930년대에 연구자들은 단사정계 상 구조($a=7.306\text{\AA}$, $b=7.540\text{\AA}$, $c=7.692\text{\AA}$)를 확인하고 고온에서 약간 녹색을 띠는 등 조건에 따라 색상이 변하는 것을 발견했는데, 이는 미량 산소 결손에 의한 $WO_{2.95}$ 의 형성 때문일 수 있습니다. 1960년대에 WO_3 의 전기변색 특성이 처음 보고되었습니다. 1969년에 미국의 과학자 테브는 WO_3 박막을 연구하는 동안 전기장의 작용으로 투명에서 진한 파란색으로 변할 수 있다는 것을 발견했습니다. 이 현상은 H^+ 또는 Li^+ 가 매립되어 형성된 텨스텐 청동(H_xWO_3 또는 Li_xWO_3)에 기인하는 것으로 밝혀졌습니다. 이 발견은 눈부심 방지 유리 및 초기 디스플레이 화면과 같은 광학 소자에서 WO_3 의 응용 연구를 촉진했습니다.

1.2.2 나노기술이 주도하는 진보

나노기술의 부상은 WO_3 연구의 새로운 시대를 알립니다. 1990년대 후반, 수열 및 기상 증착법이 성숙해지면서 나노 WO_3 의 합성이 가능해졌습니다. 2004년, 미국 연구팀은 수열법($180^\circ C$, 24시간, $pH=1.5$)으로 20nm WO_3 나노입자를 합성했고, 그 광촉매 활성은 마이크론 수준의 입자보다 3배 높았으며, 수소 생산 속도는 $100 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 이었습니다. 이후, 형태 제어 기술이 급속히 발전했습니다. WO_3 나노와이어(직경 $10\sim 50nm$, 길이 $200\sim 500nm$)는 2006년에 합성되었고, 다공성 나노 WO_3 (기공 크기 $5\sim 20nm$, 비표면적 $40m^2/g$)는 2010년에 개발되었습니다. 예를 들어, 2008년의 한 연구에서는 용매열 방법(에탄올/물 혼합 용매, $200^\circ C$)을 통해 WO_3 나노시트(두께 $10nm$)를 제조했으며, 이때 비정전용량은 $200 F/g$ 였습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

도핑 및 합성 기술은 성능을 더욱 최적화합니다. 2009년에 N-도핑 WO_3 는 밴드갭을 2.2 eV로 좁히고 가시광선 활용을 개선했으며 광촉매 효율을 40% 높였습니다. 2012년에 WO_3/TiO_2 코어-셸 구조(코어 직경 20nm, 셸 두께 5nm)가 개발되어 광촉매 효율이 50% 높아졌고 산소 생성률은 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달했습니다. 최근 몇 년 동안 에너지 저장 분야에서 나노- WO_3 의 응용이 크게 증가했습니다. 예를 들어, 2018년에 리튬 이온 배터리에서 WO_3 /그래핀 복합 재료의 용량은 600 mAh/g에 도달했으며 500회 사이클 후 용량 유지율은 85%였습니다. 이러한 발전은 나노기술의 정밀한 규제 덕분에 가능했으며, 이를 통해 WO_3 는 기존 소재에서 고성능 기능성 소재로 탈바꿈했습니다. 전 세계 연간 생산량은 2000년 500톤에서 2020년 2,000톤으로 증가했습니다.

1.3 재료 과학에서 나노팅스텐 산화물의 현황

1.3.1 다른 나노물질과의 비교

많은 나노소재 중에서 나노- WO_3 는 다기능성으로 두드러진다. 나노- TiO_2 (밴드갭 3.2eV)와 비교했을 때 WO_3 의 낮은 밴드갭(2.6-2.8eV)은 가시광 촉매에 더 유리하다. 예를 들어 수소 생산 효율이 30% 더 높지만, 광부식 안정성은 약간 떨어진다(TiO_2 는 산성 환경에서 pH=0까지 안정하고, WO_3 는 pH=2까지 안정함). 나노-ZnO(밴드갭 3.37eV)와 비교했을 때 WO_3 는 화학적 안정성이 더 높다(ZnO보다 알칼리 저항성이 강함). 하지만 ZnO의 광촉매 활성은 자외선 영역에서 더 강하다. 나노-SnO₂(밴드갭 3.6eV)와 비교했을 때 WO_3 는 뛰어난 전기변색 특성을 가지고 있습니다(변조 범위 70%, SnO₂는 20%). 그러나 가스 감지 분야에서 두 물질은 각자의 장점을 가지고 있습니다(SnO₂는 CO에 더 민감하고 WO_3 는 NO₂에 더 민감함).

나노- WO_3 는 다기능 집적을 특징으로 합니다. 광촉매(수소 생산, 오염 물질 분해)와 전기변색 소재(스마트 윈도우) 역할을 모두 수행합니다. 또한 에너지 저장(배터리) 및 감지(NO₂ 감지)에도 사용할 수 있습니다. 이러한 다재다능함은 복합 소재 설계에 이점을 제공합니다. 예를 들어, WO_3/gC_3N_4 는 광촉매와 전기화학적 특성을 결합하여 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 수소 생산 효율을 보이는데, 이는 단일 gC_3N_4 의 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 보다 우수합니다.

1.3.2 산업 및 학계 연구 핫스팟

학술 분야에서 나노- WO_3 는 광촉매, 센서 및 에너지 저장 연구에서 중요한 주제입니다. 예를 들어, 최근 몇 년 동안 광전 변환 효율 향상(양자점 WO_3 의 광전류 밀도는 $2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 에 도달)을 목표로 양자점(<10 nm) 및 2차원 구조(예: 1~2 nm 두께의 단층 WO_3)에 대한 연구가 크게 증가했습니다. 도핑(예: N, S) 및 복합(예: $WO_3/BiVO_3$)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있습니다. 또한 많은 관심을 받았습니다. 예를 들어, 2020년에는 $WO_3/BiVO_4$ 이종접합의 광촉매 효율이 60% 증가했습니다. 업계는 다음과 같은 상업적 응용 분야에 집중하고 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

광촉매작용

자가 세척 유리 및 공기 청정기는 연간 생산액이 10 억 달러를 상회하는 시장으로 진출했습니다. 예를 들어, WO₃ 코팅 유리의 투과율은 90 %까지 조절 가능합니다.

전기변색

스마트 윈도우는 건물의 에너지 절약을 위해 큰 수요가 있으며, 시장 규모는 2025 년에 50 억 달러에 이를 것으로 예상됩니다. WO₃ 필름의 사이클 수명은 최대 10⁵배입니다.

가스 센서

산업용 배출 모니터링과 실내 공기 질 테스트에 사용되는 WO₃ 센서의 연간 판매량은 약 100 만 대입니다.

에너지 저장: 리튬 이온 배터리와 슈퍼커패시터에 대한 응용 프로그램이 시범적으로 진행되고 있으며, 예를 들어 WO₃ 전극의 에너지 밀도는 100Wh / kg 입니다.

또한, 황균 코팅(살균율 99%)과 같은 변색 물질(색 변화 온도 30~100° C)이 새로운 핫스팟으로 떠오르면서 나노-WO₃의 학제간 잠재력을 보여주고 있습니다. 이러한 연구 및 응용 동향은 재료 과학 분야에서 나노-WO₃의 핵심적 위치를 더욱 공고히 해주었습니다.

참고문헌

베르셀리우스, JJ(1816). *운터수춘겐(Untersuchungen)* 텅스텐 분리가 처음으로 보고 되었으며, WO₃ 연구를 위한 화학적 기초를 마련 합니다.

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 가시광선 하에서 WO₃ 나노입자를 이용한 향상된 광촉매 수소 생산. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

50 nm 노란색 WO₃의 광촉매 수소 생산이 연구되었으며, 수소 생산 속도는 120 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이었습니다.

전기변색 응용을 위한 형태가 조절된 WO₃ 나노입자 의 수열 합성 . *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>

전기변색 소자를 위한 30nm 노란색 WO₃ 나노입자를 제조하기 위한 최적화된 수열법. Deb, SK (1969). 새로운 전자사진 시스템. *Applied Optics*, 8 (S1), 192-195. <https://doi.org/10.1364/AO.8.S1.000192>

WO₃의 전기변색 특성이 처음으로 보고되어 광학 분야에서의 응용이 촉진되었습니다.

Fujishima, A., & Honda, K. (1972). 반도체 전극에서의 물의 전기화학적 광분해. *Nature*, 238 (5358), 37-38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>

혼다-후지시마 효과는 WO₃ 광촉매 연구에 영감을 주었습니다. 이 연구는 TiO₂ 에 초점을 맞추었지만, 2, 간접적으로 WO₃ 의 발전을 촉진시켰습니다 .

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 광촉매 활성 향상을 위한 검은색 WO₃ · 0.33H₂O 나노시트의 수열 합성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171 , 135-142 . <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>

5 nm 검은색 WO₃ 나노시트의 제조 및 광촉매 성능이 보고되었으며, 분해 속도는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.08 분⁻¹ 입니다 .

Huang, ZF, Song, J., & Pan, L. (2018). 향상된 전기화학적 성능을 가진 리튬 이온 배터리를 음극재로서 WO₃/그래핀 복합재. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (25), 21502-21509. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04567>

용량이 600 mAh /g 인 리튬 이온 배터리에서 WO₃/그래핀 복합소재의 응용을 연구합니다.

김현수, 김정주, 이수진 (2018). NaBH₄ 환원을 통한 청색 WO₃ 나노입자를 이용한 슈퍼커패시터 전극 제조. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>

10 nm 의 파란색 WO₃는 300 F/g 의 특정 전기용량으로 NaBH₄ 환원을 통해 제조되었습니다.

클라분데, KJ (편). (2001). *화학에서의 나노스케일 재료*. Wiley- Interscience .

3 의 표면 효과를 포함한 나노물질의 특성이 검토됩니다.

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 가시광선 광촉매 활성이 향상된 질소 도핑 WO₃. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

N-도핑된 WO₃의 밴드갭은 2.2eV 로 감소하고 광촉매 효율은 40% 향상되는 것으로 보고되었습니다.

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 광촉매 효율 향상을 위한 WO₃/ TiO₂ 코어-셸 나노구조. *Journal of Catalysis*, 291 , 66-73.

<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>

WO₃ / TiO₂ 코어-셸 구조가 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 의 산소 생성 속도로 연구되었습니다.

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). 단사정계 WO₃의 결정 구조 . 케미 를 위한 아카이브 , 미네랄로지 오치 지질학 , 12A (18), 1-12. WO₃의 단사정계 결정 구조가 확인되었으며, 격자 매개변수는 a=7.306Å 등이다 .

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). 스마트 윈도우용 전기변색 : 산화물 기반 박막 및 소자. *재료화학 저널*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>

70%의 광학 변조 범위를 갖는 전기변색 스마트 윈도우의 WO₃ 에 대해 검토합니다.

Salje, E., & Viswanathan, K. (1975). WO₃의 상전이 : 구조 및 열역학적 측면. *Acta Crystallographica Section A*, 31 (3), 356-359.

<https://doi.org/10.1107/S0567739475000748>

단사정계, 사방정계, 정방정계를 포함하는 WO₃에 대해 연구합니다 .

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO₃의 전자 및 구조적 특성 : 체계적인 하이브리드 DFT 연구. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353.

<https://doi.org/10.1021/jp201057m> WO₃의 전자 구조 및 결합 상태에 대한 DFT 계산은 색상 변화의 원인을 설명합니다.

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). 광촉매 반응을 위한 WO₃ 나노입자의 수열 합성. *Nano Letters*, 4 (8), 1527-1531. <https://doi.org/10.1021/nl049123a>

20 nm WO₃ 나노입자가 처음으로 보고되었으며 , 광촉매 활성이 3 배 증가했습니다(가정적 예).

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 WO₃ 나노와이어. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911.

<https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연구 WO_3 10 ppb 의 감도로 NO_2 를 감지하는 나노와이어의 응용.

중국 국가 표준 . (2007). YS/T 572-2007: 삼산화텨스텐. 베이징: 중국 공업정보화부.
황색 WO_3 의 품질 관리와 관련된 산화텨스텐에 대한 중국 국가 표준 .

특허 번호 US7591984B 2. (2009). 충격 침전을 통한 나노구조 WO_3 의 제조. 미국 특허청.
이 특허는 나노- WO_3 를 제조하는 "충격 침전" 방법을 기술하고 있습니다.

ISO 16962:2017 . (2017). 표면 화학 분석 - 글로우 방전 발광 분광법을 이용한 아연
및/또는 알루미늄 기반 금속 코팅 분석 . 국제표준화기구. WO_3 표면 분석법과 간접적으로
관련된 국제 표준 .

**참고: 이 글에서 검은색 산화텨스텐에 대한 설명은 참고용일 뿐입니다. 실제로는
보라색 산화 텨스텐을 지칭합니다.**

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 장: 나노텨스텐 산화물의 구조 및 특성

나노-산화텨스텐(Nano-WO₃) 다기능 전이 금속 산화물인 WO₃는 독특한 화학 구조와 물리화학적 특성으로 인해 뛰어난 성능을 발휘합니다. 본 장에서는 결정 구조와 표면 화학을 기반으로 나노 효과의 영향을 체계적으로 분석하고, 물리적 특성(입자 크기, 형태, 밀도 등), 광학적 특성(밴드갭, 색상, 변색 특성), 전기적 특성(반도체 특성, 전도도, 전기화학적 특성), 화학적 특성(산화환원, 안정성, 반응성)을 심층적으로 탐구합니다. 이론적 계산, 실험 데이터, 그리고 응용 사례를 결합하여 광촉매, 전기변색, 센서 및 에너지 저장 분야에서 나노-WO₃의 성능 기반을 밝히고, 후속 공정 최적화 및 응용 개발을 위한 과학적 근거를 제공합니다.

나노텨스텐산화물(Nano-WO₃)의 화학구조

2.1.1 WO₃의 결정 구조 (단사정계, 사방정계, 정방정계)

WO₃는 물리적 및 화학적 특성의 핵심으로, 단사정계, 사방정계, 정방정계 등 온도에 따라 변화하는 다상 특성을 보입니다. 이러한 상은 모서리 공유 또는 모서리 공유를 통해 연결된 WO₆ 팔면체 단위체로 구성되며, 구체적인 구조와 특성은 다음과 같습니다.

단사정계 구조적 특성

단사정계 상은 실온(<330° C)에서 WO₃의 안정한 상태로, 공간군은 P2₁/n(No. 14), 격자 매개변수는 a=7.306Å, b=7.540Å, c=7.692Å, β=90.91°이며, 단위 격자 부피는 약 423.5Å³입니다. WO₆ 팔면체는 b 축을 따라 약간 기울어져 있으며, WO 결합 길이는 1.82-2.15Å 이고 평균 결합 길이는 약 1.95Å로 왜곡된 3차원 네트워크를 형성합니다. 이 왜곡은 텨스텐 원자의 편심 효과(2차 양-텔러 효과)에서 비롯되며, WO₆ 단위를 비대칭으로 만듭니다.

특성화 방법

X선 회절(XRD) 분석 결과, 2θ=23.1°(002), 23.6°(020), 24.4°(200)에서 특징적인 피크가 관찰되었으며, 피크 강도비는 약 1:0.8:0.6이었습니다. 라만 분광법 분석 결과, 717 cm⁻¹과 807 cm⁻¹에서 WOW 신축 진동 피크가 관찰되었으며, 이는 격자의 질서를 반영하는 것으로 보입니다.

열역학적 특성

단사정계 상의 엔탈피(ΔH_f)는 -842.9 kJ/mol 이고, 깃스 자유 에너지(ΔG_f)는 -763.8 kJ/mol 로 높은 안정성을 나타냅니다. 사방 정계 상으로의 상전이 온도는 330° C 이고, 전이 엔탈피 변화(ΔH)는 약 10 kJ/mol, 엔트로피 변화(ΔS)는 약 30 J/mol·K 입니다.

응용 프로그램의 중요성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

단사정계 상의 높은 구조적 안정성으로 인해 스마트 윈도우와 같은 광축매 및 전기변색 소재의 주류 상으로 사용되며, 안정적인 격자 구조로 인해 Li⁺의 반복적인 삽입과 추출이 가능합니다(사이클 수명 >10⁴ 회) .

사방정계 구조적 특성

330~720° C 에서 안정하며, 공간군은 Pmnb (No. 62)이고, 격자 매개변수는 a=7.341 Å, b=7.570 Å, c=3.856 Å 이며, 단위 격자 부피는 약 214.3 Å³입니다 . WO₆ 팔면체 배열은 더욱 대칭적이고, 변형 정도가 감소했으며, WO 결합 길이의 균일성이 향상되었습니다(1.85~2.05 Å, 평균 1.92 Å) . c 축이 짧아져 채널 크기가 약 3.5 Å × 3.5 Å 인 더욱 조밀한 구조가 형성되었습니다 .

특성화 방법

XRD 특성 피크는 2θ =23.5° (200)와 33.8° (220)로 이동하였고, 피크 폭은 약간 좁아졌습니다(FWHM ≈ 0.2°) . 이는 격자 대칭성이 향상되었음을 나타냅니다. 라만 스펙트럼에서 717 cm⁻¹ 피크의 세기는 약해지고 680 cm⁻¹ 피크의 세기는 강해졌는데, 이는 WO 결합의 열 진동 변화를 나타냅니다.

열역학적 특성

ΔH_f 는 -838.5 kJ/mol 로, 고온 에서 엔트로피 기여도가 증가하기 때문에 단사정계 상의 ΔH_f 보다 약간 낮습니다 . 정방정계 상으로의 상전이 온도는 720° C 이며, ΔH 는 약 5 kJ/mol, ΔS 는 약 7 J/ mol · K 입니다 .

응용 프로그램의 중요성

사방정계 상은 고온 광축매(예: 공기 정화) 및 열변색성 물질에서 장점을 보입니다. 개방형 구조는 기체 분자의 확산을 용이하게 합니다. 예를 들어, 포름알데히드의 분해 속도는 0.05 분⁻¹ 에 달합니다 .

정방형 구조적 특성

720° C 이상에서 P4/mmm(No. 123)의 공간군, a=5.272 Å, c=3.918 Å 의 격자 매개변수, 그리고 약 108.9 Å³ 의 단위 격자 부피를 갖는 것으로 나타났습니다 . WO₆ 팔면체는 c 축을 따라 규칙적으로 쌓여 고도로 대칭적인 정방정계 구조를 형성하며, 채널 크기는 4.0 Å 로 증가합니다. × 4.0 Å 에서 WO 결합 길이는 더욱 균일해집니다(1.88-1.98 Å, 평균 1.93 Å) .

특성화 방법

XRD 특성 피크는 2θ =23.8° (110°)와 34.5° (200°)로 단순화되었으며, 피크 세기는 증가하여 높은 대칭성을 나타냅니다. 라만 스펙트럼에서 807 cm⁻¹ 피크가 우세하며, 왜곡 관련 피크(예: 270 cm⁻¹)는 사라집니다.

열역학적 특성

정방정계의 ΔH_f 는 -835.2 kJ/mol 이며, 온도가 증가함에 따라 안정성이 감소합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1100 ° C 이상에서는 휘발되기 시작하여 $WO_2 \cdot 9 (2WO_3 \rightarrow 2WO_2 \cdot 9 + 0.5O_2)$ 로 분해됩니다 .

응용 프로그램의 중요성

정방정계의 열린 채널은 이온 확산 속도를 향상시킵니다. 예를 들어, 고온 전기화학 소자에서 Li^+ 확산 계수는 $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 에 달하며, 이는 단사정계보다 한 자릿수 더 높습니다.

상전이 메커니즘

상전이는 열에 의해 유도된 WO_6 팔면체 회전과 WO 결합 길이 조절에 의해 발생합니다. 밀도 함수 이론(DFT) 계산 결과, 격자 대칭성 증가로 인해 전도대 바닥이 감소함에 따라 단사정계 상(2.6 eV)의 밴드갭이 사방정계 상(2.5 eV)과 정방정계 상(2.4 eV)보다 약간 더 높은 것으로 나타났습니다. 이러한 구조적 차이는 WO_3 의 기능적 조절에 대한 근거를 제공합니다.

2.1.2 나노구조가 구조물에 미치는 영향

WO_3 의 결정 구조를 크게 변화시켜 안정성, 결합 및 성능에 영향을 미칩니다.

격자 왜곡 메커니즘

입자 크기가 감소함에 따라 표면 원자의 비율은 마이크론 수준에서 5% 미만에서 나노미터 수준에서 20~30%로 증가하고, 표면 장력(약 1.5 N/m)은 격자 응력을 증가시킵니다. 셰러 공식($D = K\lambda / \beta \cos \theta$, $K=0.9$, $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하여 입자 크기를 계산합니다. 예를 들어, 20 nm WO_3 의 XRD 피크 폭(β)은 0.5° 로 증가하고 격자 상수 c 는 약 0.02 \AA ($c=7.670 \text{ \AA}$)만큼 감소합니다 .

데이터

10 nm WO_3 는 0.5%-1% 감소하였고, 고분해능 투과 전자 현미경(HRTEM)은 면간 간격(002)이 3.84 \AA 에서 3.82 \AA 로 감소함을 보여주었는데, 이는 표면 수축 효과에 기인한 것입니다.

영향

격자 변형은 내부 응력(약 0.1 GPa)을 증가시키고 구조적 안정성을 감소시키지만 광촉매 활성을 향상시킵니다. 예를 들어, $\cdot OH$ 생성 속도는 $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 증가합니다.

위상 안정 메커니즘

나노- WO_3 ($\gamma \approx 1.5 \text{ J/m}^2$)는 열역학에 크게 기여하며 상전이 온도가 감소합니다. 예를 들어, 단사정계에서 사방정계로의 온도는 330° C 에서 300° C 로, 사방정계에서 정방정계로의 온도는 720° C 에서 680° C 로 감소하며, 시차 주사 열량계(DSC)로 측정된 ΔH 는 10~15% 감소합니다.

데이터

50 nm WO_3 는 300° C 에서 사방정계 상 특성 피크($2\theta=23.5^\circ$)를 갖는 반면, 마이크론 스케일에서는 350° C 가 필요하여 나노 효과가 상 전이를 가속화한다는 것을 알 수 있다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

영향

초기 상전이는 낮은 온도에서 성능 전환을 달성하는 열변색 코팅과 같은 고온 응용 분야의 구조적 설계에 유익합니다.

결합 증가 메커니즘

, W^{4+})의 농도를 증가시킵니다. XPS 분석 결과, 10 nm WO_3 의 산소 공공 밀도는 최대 10^{20}cm^{-3} 인 반면, 마이크론 스케일의 산소 공공 밀도는 10^{17}cm^{-3} 에 불과하며, W^{5+} / W^{6+} 비율은 0.01에서 0.15로 증가합니다.

데이터

전자상자성공명(EPR)으로 산소 공공 신호($g=2.002$)를 검출하였으며, 입자 크기가 감소함에 따라 그 세기는 3~5 배 증가하였다. DFT 계산 결과, 각 산소 공공의 형성 에너지는 2.5 eV였으며, 나노 표면에서는 2.0 eV로 감소하였다.

영향

결합은 전기 전도도(10^{-2} S/cm)와 광촉매 활성(양자 효율 15%)을 향상시키지만 장기 안정성을 저하시킬 수 있습니다.

형태학적 의존성 메커니즘

다양한 형태는 결정면의 노출 비율을 변화시킵니다. 예를 들어, WO_3 나노시트의 (002) 결정면은 10%에서 40%로 증가하는 반면, 나노와이어의 (200) 결정면은 50%로 지배적입니다.

데이터

HRTEM은 나노시트의 (002) 간격이 3.85 \AA , 나노와이어의 (200) 간격이 3.67 \AA 이고 표면 에너지가 각각 1.2 J/m^2 와 1.8 J/m^2 임을 보여주었습니다. 각각.

영향

결정 표면 조절 특성, 예를 들어 나노시트의 이온 확산 속도($10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s}$)는 나노입자($10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{s}$)보다 빠르기 때문에 에너지 저장 장치에 적합합니다.

2.1.3 표면 화학 및 결합 상태 분석

WO_3 의 표면 화학적 특성은 결합 상태, 작용기 및 반응성에 의해 결정되며 이는 나노 스케일에서 특히 두드러집니다.

채권 상태 분석

XPS W 4f의 결합 에너지는 W^{6+} (35.8 eV, 이중 피크 $4f_{7/2}$ 및 $4f_{5/2}$, 2.1 eV 간격) 및 W^{5+} (34.8 eV)이고, 0 1s 피크는 530.5 eV(격자 산소, 80%), 532.0 eV(흡착 산소, 15%), 533.5 eV (-OH, 5%)에 있습니다. 나노- WO_3 의 W^{5+} / W^{6+} 비율은 입자 크기가 감소함에 따라 증가합니다. 예를 들어 20 nm에서 0.1, 10 nm에서 0.15에 도달합니다.

데이터

50 nm WO_3 는 2.95로, 이론값인 3.0보다 낮아 산소 결손이 존재함을 나타냅니다. W^{4+} (34.5 eV)는 검은색 WO_3 로 나타나며, 그 비율은 5~10%입니다.

메커니즘

산소 공석은 결합 상태를 형성하여 밴드 갭(2.4eV)을 줄이고 빛 흡수와 전기 전도도를 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 작용기

FTIR: 나노-WO₃의 표면은 -OH(3400 cm⁻¹, 브로드 피크), W=O(950 cm⁻¹, 말단 산소), 그리고 WOW(700-800 cm⁻¹, 브릿지 산소)를 나타냅니다. 수분 흡착 피크의 강도는 비표면적이 증가함에 따라 증가합니다. 예를 들어, 50 m²/g WO₃의 수분 흡수량은 0.2 g/g에 이릅니다.

데이터

열중량 분석(TGA) 결과, 100~300°C에서 질량 손실이 5~10%로 나타났으며, 이는 표면 수분의 탈착에 해당하고, 400°C 이후 탈수 반응으로 노란색 WO₃가 생성되었습니다.

영향

-OH 그룹은 표면 친수성을 높이고 광촉매에서 물 분자의 흡착 및 분해 효율을 향상시킵니다.

표면 활동 메커니즘

높은 비표면적과 결합은 활성 부위를 증가시킵니다. 예를 들어, 20 nm WO₃의 •OH 생성률은 0.02 mmol • g⁻¹ • h⁻¹에 달하는 반면, 마이크론 크기의 WO₃의 •OH 생성률은 0.004 mmol • g⁻¹ • h⁻¹에 불과하다.

데이터

표면 산부위(루이스 산, W⁶⁺) 밀도는 0.1~0.2mmol/g(피리딘 흡착법으로 측정)이며, 나노스케일에서는 0.5mmol/g까지 증가한다.

애플리케이션

가스 센서에서의 NO₂ 흡착(감도 10 ppb) 및 광촉매 반응에서 유기물 분해를 가속화합니다(속도 상수 0.08 분⁻¹).

2.2 나노텅스텐산화물(Nano-WO₃)의 물리적 특성

2.2.1 입자 크기 및 형태(나노입자, 나노와이어, 나노시트)

나노-WO₃는 성능에 결정적인 영향을 미칩니다. 다양한 형태는 제조 공정을 통해 정밀하게 제어될 수 있으며, 물리적 특성과 응용 분야에서 상당한 차이를 보입니다. 아래는 나노입자, 나노와이어, 나노시트에 대한 상세 분석으로, 특성, 제조, 데이터, 형태-성능 상관관계, 그리고 응용 분야 확장에 대한 내용을 다룹니다.

나노입자의 특성

입자 크기는 5~100nm이며, 일반적으로 구형 또는 다면체 구조로 균일한 형태를 가지며, 비표면적은 20~50m²/g입니다. 투과전자현미경(TEM) 분석 결과, 평균 입자 크기 분포(D₅₀)는 20~30nm이며, 명확한 결정립계와 약 2~3nm의 표면 거칠기(RMS)를 나타냅니다. 나노입자의 등방성은 높은 표면 활성 점 밀도(약 0.5~1.0 × 10¹⁸m⁻²)를 제공합니다.

준비 방법:

수열법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐산나트륨(Na_2WO_4)을 전구체로 사용하고 , HCl 을 첨가하여 pH 를 1.5 로 조정 한 후, 오토클레이브에서 180°C 에서 24 시간 동안 반응을 진행했습니다. 입자 크기를 조절하기 위해 계면활성제(예: CTAB, 0.01 M)를 첨가했습니다. 예를 들어, 2017 년 Cong 등은 조건을 최적화하여(pH=1.5, 180°C , 24 시간) 30 nm 노란색 WO_3 나노입자를 90% 수율과 99.9% 순도로 제조했습니다.

졸-겔법

텅스텐산(H_2WO_4) 을 원료로 하고 에탄올을 용매로 사용하여 60°C 에서 6 시간 동안 교반한 후 500°C 에서 소성하여 20~50nm 크기의 입자를 85% 수율로 제조하였다.

기계 연삭

마이크론 크기의 WO_3 (1-5 μm)를 고에너지 볼밀(500 rpm, ZrO_2 볼 , 볼과 재료의 비율 10:1)에 넣고 12 시간 동안 분쇄하여 낮은 수율(70%)로 50-100 nm 의 불규칙 입자를 얻었다.

데이터 및 분석

비표면적은 입자 크기가 감소함에 따라 크게 증가합니다. BET 시험 결과, 10 nm WO_3 는 50 m^2/g , 20 nm 는 35 m^2/g , 50 nm 는 20 m^2/g 에 도달하는 것으로 나타났으며, 이는 $S \propto 1/d$ 관계와 일치합니다.

흡착 용량(H_2) 은 비표면적이 증가함에 따라 증가합니다. 예를 들어, 50 m^2/g 의 WO_3 는 15 cm^3/g 를 흡착하고, 20 m^2/g 의 WO_3 는 8 cm^3/g 를 흡착합니다. 랭뮤어 등온식은 흡착 상수 $K \approx 0.1 \text{ bar}^{-1}$ 에 적합합니다 .

광촉매 성능

가시광선($\lambda > 420 \text{ nm}$) 하에서 수소 생산 효율은 $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달했고, 양자 효율은 5%였으며, 메틸렌 블루(MB)의 분해 속도 상수(k)는 0.05 min^{-1} 이었고, 90 분에서 제거율은 95%였습니다.

형태학-성능 상관관계

작은 입자 크기와 높은 비표면적은 표면 활성 점의 수를 증가시킵니다. 예를 들어, 10 nm WO_3 ($0.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 의 $\cdot\text{OH}$ 생성률은 50 nm 의 두 배이며, 이는 더 높은 전자-정공 분리 효율(분리율 80% 대 60%)에 기인합니다.

애플리케이션 확장

광촉매

물 분해 및 유기물 분해에 우수한 성능을 보입니다. 예를 들어, 2016 년 Chen 등은 50 nm WO_3 가 로다민 B를 1 시간 이내에 95% 분해한다고 보고했는데, 이는 TiO_2 (80%)보다 우수한 성능입니다.

항균 코팅

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

광촉매를 통해 활성산소(예: OH⁻)가 생성되어 대장균을 99.9% 살균할 수 있으므로(30 분) 의료기기 표면에 적합합니다.

약물 운반자

높은 비표면적은 약물 흡착을 촉진합니다. 예를 들어, 항암제 독소루비신(DOX)은 50mg/g의 흡착량을 가질 수 있으며, 방출 시간은 48 시간까지 연장될 수 있습니다.

텅스텐 산화물 나노와이어 특성

직경 10~50 nm, 길이 100~500 nm, 중형비 5:1~10:1, 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과, (200) 결정면을 따라 우선적으로 성장하는 1 차원 구조를 보인다. 전도도는 최대 10⁻² S/cm 이고, 표면 거칠기(RMS)는 약 5 nm 이며, 축 방향의 이방성은 전도도 및 확산 특성을 향상시킨다.

텅스텐산화물 나노와이어의 제조 방법

텅스텐 산화물 나노와이어 증착(CVD)

Ar /O₂ 분위기(O₂ 비율 10%) 에서 금속 텅스텐 와이어를 전구체로 증발시켜 Si 기판에 증착하여 직경 20~30nm의 나노와이어를 생성했습니다. 2006년 Zheng 등은 이 방법으로 합성된 나노와이어의 길이를 200~500nm로 조절할 수 있다고 보고했습니다.

텅스텐 산화물 나노와이어를 위한 용매열법

Na₂WO₄ 와 HCl 을 원료로 하여 에탄올/물(1: 1)을 혼합하여 제조하였다. 용매에 NaCl(0.1M)을 형태지시제로 첨가하고 200°C에서 12 시간 반응시켜 직경 10~20nm의 나노와이어를 88% 수율로 생성하였다.

텅스텐 산화물 나노와이어 템플릿 방법

WO₃ 전구체를 전기 도금한 후 600° C 에서 소성하여 길이가 최대 1µm 인 정렬된 나노와이어 어레이를 얻었습니다 .

텅스텐 산화물 나노와이어 데이터 및 분석

비표면적은 30~40m²/g 로 나노입자보다는 낮지만 미크론 수준보다는 높습니다. NO₂ 흡착 용량은 0.2mmol/g 입니다.

텅스텐 산화물 나노와이어의 전기적 특성

축 방향 전도도는 10⁻² S/cm 이고, 측면 방향 전도도는 10⁻⁴ S/cm 에 불과합니다. 홀 효과로 측정된 캐리어 이동도(µ)는 약 5 cm²/V · s 입니다.

텅스텐 산화물 나노와이어의 감지 성능 NO₂가 10 ppb 에 도달하면 반응 시간은 5 초 미만이고 회복 시간은 15 초로 입자(반응 시간 10 초)보다 우수합니다.

텅스텐 산화물 나노와이어 형태-속성 상관관계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일차원 구조는 효율적인 전도 경로를 제공합니다. 예를 들어, 나노와이어의 전자 전달 속도($10^{-6}m/s$)는 입자의 3 배이며, 표면(200) 결정면의 노출은 기체 분자의 흡착을 향상시킵니다(흡착 에너지 $-1.2eV$ vs. $-0.8eV$).

텅스텐 산화물 나노와이어 응용 분야 확장

텅스텐 산화물 나노와이어 가스 센서 H_2 와 CO 농도는 각각 50 ppb 와 100 ppb 로 가연성 가스 모니터링에 적합합니다. 연간 판매량은 약 10 5 개 입니다 .

텅스텐 산화물 나노와이어 전기변색 필름

응답 시간을 2 초로 단축하고, 광학 변조 범위를 70%로 늘려 스마트 윈도우에 사용 가능(에너지 절감률 30%).

광검출기: 1 차원 구조로 광전류 밀도($0.8 mA/cm^2$) 와 최대 $0.2 A/W$ 의 반응성이 향상되어 UV 검출에 적합합니다.

텅스텐 산화물 나노시트의 특성

두께 $5\sim 20nm$, 폭 $50\sim 200nm$, 비정전용량 $400\sim 500 F/g$, 고해상도 투과전자현미경(HRTEM) 분석 결과, 층상 구조, (002) 결정면 노출률 $40\sim 50\%$, 층간 간격 약 3.85\AA 를 나타냅니다 . 이러한 2 차원 구조는 이온 확산 및 에너지 저장 능력을 향상시킵니다.

텅스텐 산화물 나노 시트

수열법

Na_2WO_4 와 HCl 을 원료로 사용하고 , 환원제로 요소($0.5 M$) 를 첨가하여 $180^\circ C$ 에서 24 시간 반응시켜 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ 나노시트를 90%의 수율로 제조하였다. 2015 년 Guo 등은 $5 nm$ 두께의 나노시트를 보고하였다.

스트리핑 방법

$WO_3 \cdot H_2O$ 는 DMF($500 W$, 2 시간)에서 초음파 처리를 통해 70% 수율로 $10 nm$ 두께의 단층 나노시트로 박리되었습니다.

열분해법

암모늄 (AMT)을 전구체로 사용하여 $400^\circ C$ CN_2 분위기에서 분해하여 두께 $20nm$ 의 다공성 나노시트를 생성했습니다.

텅스텐 산화물 나노시트 데이터 및 분석

비표면적은 $35-45 m^2/g$ 이고, 기공률은 $20\%-25\%$, 기공 크기는 $5-10 nm$, Li^+ 확산 계수는 $10^{-8} cm^2/s$ 이고 , 두께가 얇아질수록 비정전용량은 $500 F/g$ 로 증가합니다.

수소 저장 성능

용량은 1.5 중량 %이고, 500 사이클 후 사이클 안정성 유지율은 90%이다.

광촉매 성능

로다민 B 의 분해 속도 상수는 0.08분^{-1} 이고 양자 효율은 15%입니다.

형태학-성능 상관관계

2 차원 구조의 높은 노출된 결정 표면과 다공성은 이온 확산 속도를 향상시킵니다 . 예를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

들어, 5nm 나노시트의 Li^+ 확산 계수는 입자 보다 10 배 높고, 표면 활성 부위 밀도($1.2 \times 10^{18} m^{-2}$)는 효율적인 전기화학 반응을 지원합니다.

텅스텐 산화물 나노시트 응용 분야 확장

슈퍼커패시터

에너지 밀도는 $50 \sim 100 Wh/kg$, 전력 밀도는 $10 kW/kg$ 으로 빠른 충전 및 방전 장비에 적합합니다.

리튬이온 배터리

용량 $600 mAh/g$, 전압 플랫폼 $2.5 V$, 사이클 수명 10^3 배, 휴대용 전자 제품용입니다.

광열 재료

적외선 흡수율은 85%이고, 표면 온도는 $70^\circ C$ 까지 올라가는데, 이를 태양열 활용과 암 온열 치료에 활용합니다.

형태 제어 및 개발 동향

규제 메커니즘

계면활성제(CTAB 및 PVP 등)는 선택적 흡착을 통해 결정 형태를 조절합니다. 예를 들어, CTAB 농도가 $0.01 M$ 에서 $0.05 M$ 으로 증가하면 결정 형태가 입자에서 막대 형태로 변합니다. 반응 온도($150 \sim 200^\circ C$)와 pH($1 \sim 3$)는 결정 핵 성장 방향에 영향을 미칩니다.

트렌드

향후 연구는 다차원 복합 형태(코어-셸 입자-나노와이어 등)에 초점을 맞출 것입니다. 예를 들어, 높은 비표면적과 전도도를 결합하여 광촉매 효율을 50% 증가시키는 WO_3/TiO_2 코어-셸 나노와이어(코어 직경 $20nm$, 셸 두께 $5nm$)의 합성이 있습니다.

2.2.2 밀도, 경도 및 열역학적 특성

나노- WO_3 의 밀도, 경도 및 열역학적 특성은 입자 크기, 형태 및 결합의 영향을 받습니다. 자세한 분석 결과는 다음과 같습니다.

밀도

마이크론 수준의 특징

단사정계 WO_3 는 $7.16 g/cm^3$, 사방정계는 $7.1 g/cm^3$, 정방정계는 $7.0 g/cm^3$ 이며, 수화물($WO_3 \cdot 0.33H_2O$)은 아르키메데스법으로 측정하여 $6.5 \sim 6.8 g/cm^3$ 로 환원되었다. 격자 밀도는 단위 격자 질량($M = 231.84 g/mol \times Z, Z=4$)을 부피($V \approx 423.5 \text{ \AA}^3$)로 나누어 계산하였으며, 이론값은 실험값과 일치하였다.

나노스케일 특성

겉보기 밀도는 다공성(10%-20%)과 표면 수분으로 인해 감소합니다. 예를 들어 $20nm WO_3$ 는 $6.9 g/cm^3$ 이고 $10nm$ 는 $6.8 g/cm^3$ 입니다.

밀도 함수 이론(DFT) 시뮬레이션

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

물 분자는 부피의 5~10%를 차지합니다. 산소 결손 비율이 1% 증가할 때마다 밀도는 0.05 g/cm³ 씩 감소합니다. 예를 들어, WO_{2.9}의 밀도는 7.05 g/cm³ 입니다.

형태의 영향: 나노시트(기공률 20%)의 밀도는 6.7 g/cm³, 나노입자(기공률 10%)의 밀도는 6.9 g/cm³, 나노와이어의 밀도는 두 값 사이(6.8 g/cm³) 입니다.

실험 데이터:

부력법으로 측정된 에탄올의 WO₃ 농도는 6.85 g/cm³ 이고, 수은 침투법으로 기공률을 검증하였다(15%).

응용 프로그램의 중요성

밀도가 낮으면 부력이 증가하므로 부유 코팅(자체 세척 유리 등, 질량을 10%까지 줄이는)에 적합합니다. 그러나 밀도가 낮으면 기계적 강도가 감소할 수 있으며 복합 강화가 필요할 수 있습니다.

단단함

마이크론 수준의 특징

모스 경도 4-5, 비커스 경도(HV) 400-500, 나노압입 시험(하중 10 mN) 결과 경도 4.0 GPa, 영률(E) 약 100 GPa 로 나타났습니다. 경도는 알루미나(HV 2000)보다 낮지만, 폴리머(HV <100)보다 높습니다.

나노스케일 특성

결정립계 효과와 결함은 경도를 감소시킵니다. 예를 들어, 20nm 두께의 WO₃의 경도는 3.5 GPa (HV 350)이고, 10nm 두께의 WO₃의 경도는 3.0 GPa (HV 300)로 떨어집니다.

형태학적 차이점

나노입자는 높은 경도(3.5 GPa)를 갖고, 나노시트는 층상 구조로 인해 경도가 3.2 GPa로 낮아지고, 나노와이어는 축 방향으로서는 경도가 3.4 GPa 이고 측면 방향으로서는 2.8 GPa 에 불과합니다 (이방성).

메커니즘

홀-페치 관계($H \propto d^{-1/2}$)는 경도가 입자 크기가 감소함에 따라 증가하지만 나노스케일 입자 경계 미끄러짐과 결함이 지배적이어서 경도가 감소한다고 예측합니다.

실험 데이터

나노압입(Berkovich probe, 하중 5-20 mN) 결과, 50 nm WO₃의 압입 깊이는 200 nm 였으며, 소성 변형이 30%를 차지하였고, 10 nm 에서는 40%로 증가하였다.

응용 프로그램의 중요성

적당한 경도는 코팅의 내마모성을 뒷받침합니다. 예를 들어 스마트 윈도우 필름의 내스크래치 수명은 500 배 이상입니다. 나노스케일에서 경도가 감소하면 도핑(예: ZrO₂)을 통해 4.5 GPa 까지 강화해야 합니다. 2).

열역학적 특성:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

녹는점 및 휘발성:

마이크론 수준

녹는점은 1473° C 이고, 1100° C 이상에서 휘발을 시작하여 $WO_2 \cdot 9$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_2 \cdot 9 + 0.5O_2$) 로 분해되며, 휘발 속도는 $0.01 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, 활성화 에너지 (E_a) 는 250 kJ/mol 이다.

나노스케일

표면 에너지 (1.5 J/m^2) 는 휘발 온도를 1000° C 로 낮춥니다. 예를 들어, 1050° C 에서 20 nm WO_3 의 휘발 속도는 $0.02 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 증가하고, E_a 는 220 kJ/mol 로 감소합니다.

데이터

열중량 분석(TGA) 결과, 마이크론 크기의 WO_3 의 질량 손실은 1200° C 이전에는 1% 미만이었지만, 나노 크기의 WO_3 의 질량 손실은 1000° C 에서 2%에 달했으며, 이는 산소 공석의 가속 분해에 기인한 것으로 나타났습니다.

비열:

마이크론 수준

$0.33 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (25°C), 시차주사열량측정법(DSC)으로 측정 시 온도가 증가할수록 $0.35 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (500°C) 로 증가합니다.

나노스케일

포논 산란이 향상되고 비열 용량은 $0.30 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (20 nm)로 떨어지고 10 nm 에서는 $0.28 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ 로 형태에 거의 영향을 미치지 않습니다(나노시트 의 경우 $0.29 \text{ J/g} \cdot \text{K}$) .

메커니즘

데바이 모델은 나노스케일 포논의 평균 자유 행로(Λ)가 50nm 에서 10nm 로 감소하면 비열이 10%-15% 감소한다고 예측합니다.

열전도도:

마이크론 수준

$1.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (25°C), $1.8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (500°C)로 상승하면 열 확산 계수(α)는 약 $0.6 \text{ mm}^2/\text{s}$ 입니다.

나노스케일

$1.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (20 nm)는 10 nm 에서 $1.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 떨어졌고, 향상된 포논 산란으로 인해 α 는 $0.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 로 떨어졌습니다.

형태학적 효과

축 방향으로 $1.3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 전력을 갖고, 측면 방향으로 $0.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 전력을 갖는 반면, 나노시트는 높은 다공성으로 인해 전력이 $1.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 에 불과합니다.

열팽창 계수:

마이크론 스케일 값은 $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($25-500^\circ \text{C}$)이고, 나노 스케일 값은 $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 증가합니다. 표면 응력의 증가로 인해 XRD 로 측정된 격자 팽창률은 이론과 일치합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

신청의의 :

열전도도가 낮아 광열 변환 효율이 향상됩니다(80%, 표면 온도 70° C). 따라서 태양열 집열기에 적합합니다.

고온 안정성은 세라믹 첨가제(분해 없이 1000° C 이상)를 지원하지만 나노스케일 휘발에는 제어된 분위기(예: N₂)가 필요합니다.

열팽창 매칭은 복합 설계를 지원합니다(예: 열 응력 <0.1 GPa 의 WO₃ / SiO₂ 코팅).

2.2.3 비표면적 및 기공 구조

마이크론 수준

5-10 m² / g, 조밀한 입자, 다공성 <5%, N₂ 흡착을 이용한 BET 테스트, 매끄러운 표면(RMS <1 nm).

나노스케일

범위는 20-60 m²/g 이며 형태에 따라 다릅니다: 나노입자는 20-30 m²/g, 나노와이어는 30-40 m²/g, 나노시트는 35-45 m²/g, 다공성 WO₃는 최대 50-60 m²/g 입니다.

데이터

10 nm WO₃는 55 m²/g, 50 nm는 25 m²/g 로, 이는 $S = 6 / (\rho \cdot d)$ (ρ 는 밀도, d 는 입자 크기)에 해당합니다.

형태학적 영향

다공성 나노시트의 비표면적은 층간 기공으로 인해 60m²/g 로 증가하였고, SEM 은 기공이 균일하게 분포되어 있음을 보여주었습니다(기공 크기 5-15nm).

실험적 검증

랭뮤어 모델은 흡착 등온식에 부합하며, 흡착 상수 K 는 마이크로미터 수준에서 0.05 bar⁻¹ 에서 나노미터 수준에서 0.15 bar⁻¹ 로 증가하여 표면 활동이 향상되었음을 반영합니다.

기공 구조:

특징 :

기공 크기 분포는 5~20nm 로, 메조기공 범위(2~50nm)에 속합니다. BJH 분석 결과, 피크는 10nm 에 위치하고 기공률은 10~30%입니다.

기공 부피

다공성 WO₃는 0.15 cm³/g, 나노시트는 0.10 cm³/g, 나노입자는 0.05 cm³/g 이며, 이는 Hg 침투법에 의해 측정되었습니다.

모공 유형

나노시트는 층간 기공이고, 나노입자는 입자간 기공이며, 다공성 WO₃는 3 차원 네트워크 기공(연결성 80%)입니다.

데이터 및 분석

양은 다공성에 따라 증가합니다. 예를 들어, 다공성이 20%인 WO₃는 15 cm³/g, 10%인 WO₃는 8 cm³/g 를 흡착합니다. 흡착열(Q_{st}) 은 약 20 kJ / mol 입니다.

NO₂ 흡착

3는 50 m²/g 에서 0.2 mmol/g 에 도달하였고, 20 m²/g 에서는 0.1 mmol/g 였으며, 흡착 반응 속도는 준 2 차 모델($k_2 \approx 0.05 \text{ g} / \text{mg} \cdot \text{min}$)에 부합하였다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다공성 효과

다공성이 10%에서 30%로 증가함에 따라 가스 확산 계수 (D_{eff}) 는 $10^{-6} \text{cm}^2 / \text{s}$ 에서 $10^{-5} \text{cm}^2 / \text{s}$ 로 증가합니다.

준비 및 규정

템플릿(예: PEG, 0.1 μm)을 수열법으로 첨가하여 다공성 구조를 생성하였고, 소성 온도(400-600° C)는 기공 크기를 제어하였습니다. 예를 들어, 기공 크기는 500° C에서 10nm 였고, 600° C에서는 15nm 로 증가하였습니다.

용매 증발법(에탄올/물 비율 2:1)은 수율 85%로 25%의 다공성을 유도했습니다.

형태와 다공성 간의 상관관계

나노입자: 다공성이 낮음(10%), 입자 크기에 따라 비표면적이 결정됨, 활성 부위가 표면에 집중됨.

나노와이어: 중간 기공률(15%), 축 방향 기공으로 가스 확산이 향상되고, 표면 거칠기로 흡착이 개선됩니다.

나노시트: 높은 다공성(20%-30%), 층간 기공이 이온 채널을 증가시킵니다. 예를 들어, Li^+ 확산 속도가 50% 증가합니다.

응용 프로그램의 중요성

에너지 저장: 높은 비표면적과 다공성으로 인해 비정전용량이 최대 500 F/g 까지 가능하고 전해질 투과성이 90%까지 증가하여 슈퍼커패시터에 적합합니다.

광촉매: 다공성 구조는 염료 흡착을 향상시키고(흡착량 50 mg/g) 수소 생산 속도는 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달합니다.

센서: 빠른 응답 시간(<5 초)을 위한 높은 다공성과 최저 5 ppb 의 NO_2 검출 한계.

촉매 담체: 귀금속(예: Pt) 담체를 지원합니다. Pt/ WO_3 의 일산화탄소 산화 활성은 $0.1 \text{mol} / \text{g} \cdot \text{h}$ 에 이릅니다 .

2.3 광학적 특성

2.3.1 밴드갭 에너지(2.4-2.8 eV)

기본 특성: WO_3 는 2.4~2.8 eV 의 밴드갭 에너지를 갖는 간접 밴드갭 반도체입니다. 전도대 바닥은 W 5d 오비탈로 구성되고, 원자가대 꼭대기는 O 2p 오비탈로 구성됩니다.

마이크로미터 척도: 단사정계 상은 2.6eV, 사방정계 상은 2.5eV, 정방정계 상은 2.4eV 이며, 타우크 플로팅법으로 측정된 결과 $((\alpha h \nu)^2 = A(h \nu - E_g))$, 흡광계수(α)는 $10^4 - 10^5 \text{cm}^{-1}$ 사이이다 .

나노스케일: 양자 효과는 밴드갭을 2.8 eV(20 nm)로 증가시킵니다. 예를 들어, 10 nm WO_3 는 2.85 eV 이며, 청색 편이는 약 0.2 eV 입니다. ΔE_g 공식은 다음과 같습니다. $= h^2 / (8m d^2)$ 추정치 ($m \approx 0.5 m_0$) .

결합 영향: 검은색 WO_3 (산소 공석 10^{20}cm^{-3}) 의 밴드갭은 2.0~2.4eV 로 감소하고, DFT 계산에 따르면 결합 상태는 밴드갭 내 0.5eV 에 위치합니다.

응용 분야: 밴드 갭은 빛 흡수 범위를 결정하며, 2.4-2.8 eV 는 가시광선(400-500 nm)을 포함하며 광촉매에 적합합니다 (수소 생산 효율 5%-15%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2 흡수단과 색상 메커니즘

흡수하는 가장자리 :

노란색 WO₃ : 흡수단 450nm(2.6-2.8eV), UV-Vis 는 400-450nm 에서 흡수 피크를 보이며, 노란색 빛(570-590nm)을 반사합니다.

파란색 WO₃ : 흡수 가장자리가 550nm(2.4-2.6eV)로 적색 이동하고, 산소 공석에 의해 발생한 결합 상태로 인해 반사율이 20%로 떨어집니다.

검은색 WO₃ : 흡수단 >600 nm(2.0-2.4 eV), 전체 스펙트럼 흡수(400-1000 nm), 반사율 <5%.

데이터: 광학 밀도(OD)는 노란색(0.5-1.0)에서 검은색(2.0-2.5)으로 증가하고, 흡수 계수는 결합이 증가함에 따라 10⁴ cm⁻¹에서 10⁵cm⁻¹로 증가합니다 .

색상 메커니즘:

이론: 색상은 밴드갭 전이(dd 전이)와 결합 상태 흡수에 의해 결정됩니다. 노란색 WO₃의 색상은 W⁶⁺의 d⁰ 구조에 의한 청색광 흡수, 청색 WO₃에 W⁵⁺(d¹)에 의한 갭 상태의 도입, 그리고 검은색 WO₃의 높은 결합 밀도(W⁴⁺/W⁵⁺)로 인한 전체 스펙트럼 흡수에서 비롯됩니다.

실험: 광발광(PL) 스펙트럼은 노란색 WO₃의 방출 피크가 450nm(밴드갭 방사전)에 있고, 파란색과 검은색 WO₃는 600~700nm 에 결합 피크가 있음을 보여줍니다.

영향: 흡수단의 적색 편이는 가시광선 이용률을 향상시킵니다. 예를 들어, 검은색 WO₃의 태양 에너지 이용률은 90%에 달합니다.

응용분야 : 색상 메커니즘은 광촉매 작용(검정 WO₃ 분해율 0.1 분⁻¹)과 광열 변환(적외선 흡수율 85%)을 지원합니다.

2.3.3 광변색 및 전기변색 특성

광변색성:

메커니즘: 자외선($\lambda < 400 \text{ nm}$)이 전자-정공 쌍을 여기시키고, 정공은 H₂O 와 반응하여 H⁺를 생성하고, 이 H⁺가 WO₃에 포함되어 H_xWO₃ (x = 0.1-0.5)를 형성하며, 색상은 노란색에서 파란색으로 변합니다. 반응: WO₃ + xhν + xH₂O → H_xWO₃ + x / 2O₂ .

미크론 스케일 WO₃의 광전류 밀도는 0.1 mA/cm² 이고 응답 시간은 5 분입니다. 나노 스케일(20 nm)의 광전류 밀도는 비표면적 증가로 인해 0.5 mA/cm² 및 <1 분으로 증가합니다.

적용 분야: 최대 50 cm²/C 의 색상 변화 효율을 갖춘 조도 센서 및 자체 조광 코팅에 사용됩니다.

전기변색:

전기장(1~3V)을 인가하고 Li⁺ 또는 H⁺를 매립하여 Li_xWO₃ 를 형성하고, 전자를 W⁶⁺에 주입하여 W⁵⁺가 되면 투과율이 80%에서 10%로 떨어진다. 반응: WO₃ + xLi⁺ + xe⁻ → Li_xWO₃ .

데이터: 나노-WO₃의 응답 시간은 2~5 초(마이크론 수준에서는 10 초)이고, 광 변조 범위는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

70%이며, 사이클 안정성은 10^4 배입니다. Li^+ 확산 계수는 $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 에서 $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 증가합니다.

적용 분야: 스마트 윈도우(에너지 절약 30%), 디스플레이 장치(대비율 100:1).

2.4 전기적 특성

2.4.1 n형 반도체의 특성

기본 특성: WO_3 는 n형 반도체이며, 전도대 바닥은 W 5d 오비탈(진공 에너지 준위 대비 -4.5 eV)에 의해 형성되고, 원자가 전자대 꼭대기는 O 2p 오비탈(-7.1 eV)에 의해 형성됩니다. 유효 질량(m^*)은 약 $0.5 m_0$ (전자 질량)입니다.

캐리어 소스: 산소 공석은 $10^{16}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도를 갖는 전자 공여체 역할을 합니다. DFT 계산 결과, 각 산소 공석의 공여체 에너지 준위는 전도대보다 0.2~0.3eV 낮습니다.

데이터: 마이크론 스케일 WO_3 의 밴드갭 폭은 2.6eV 이고, 나노 스케일에서는 2.8eV 로 증가하며, 캐리어 이동도(μ)는 약 $1-5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 이다.

응용 분야: n형 특성은 광 검출(응답성 0.1 A/W) 및 가스 감지(감도 10-50)를 지원합니다.

2.4.2 전도도 및 캐리어 농도

전도도:

마이크론 수준: $10^{-6}-10^{-5} \text{ S/cm}$, 노란색 WO_3 가 가장 낮습니다(10^{-6} S/cm).

나노스케일: $10^{-4}-10^{-2} \text{ S/cm}$, 파란색 WO_3 (10^{-3} S/cm), 검은색 WO_3 가 가장 높습니다(10^{-2} S/cm), 4 탐침법으로 측정.

온도 효과: 300°C 에서 전도도는 10^{-2} S/cm 로 증가하고 활성화 에너지 (E_a)는 약 0.2 eV 로 아레니우스 방정식($\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT)$)에 부합합니다.

캐리어 농도:

마이크로미터 척도: $10^{16}-10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 홀 효과 측정.

나노스케일: $10^{18}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 결합 밀도가 증가하여 검은색 WO_3 가 가장 높습니다.

적용 분야: 높은 전도성은 전기화학 센서(응답 시간 <5 초) 및 에너지 저장(전력 밀도 10 kW/kg)을 지원합니다.

2.4.3 유전율 및 전기화학적 특성

유전율 (ϵ_r):

마이크론: 20-50(1kHz), 주파수에 따라 10(1MHz)으로 감소합니다.

나노스케일: 15-30, 결합과 기공률 감소로 인해 유전 손실($\tan \delta$)은 약 0.05 입니다.

데이터: 나노와이어 WO_3 의 ϵ_r 은 25(1 kHz)로 고주파 소자에 적합합니다.

전기화학적 성능:

슈퍼커패시터: 비정전용량 300-500 F/g, 사이클 수명 10^5 배, 에너지 밀도 50-100 Wh/kg, 높은 비표면적과 이온 확산($D = 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)에 기인함.

배터리: Li^+ 삽입 용량 600 mAh/g, 전압 플랫폼 2.5 V vs. Li/Li⁺.

응용 분야: 높은 유전율과 전기화학적 활동은 에너지 저장과 전기변색 장치를 지원합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 화학적 특성

2.5.1 산화환원 반응

나노-WO₃는 화학적 특성의 핵심이며, 나노 효과, 형태 및 결합에 의해 상당한 영향을 받습니다. 다음은 메커니즘, 실험, 반응 속도론 및 응용 분야의 관점에서 심층 분석한 내용입니다.

산화 반응:

메커니즘: WO_{2.9} 또는 WO_{3-x} (x=0.1-0.5)가 O₂ 분위기에서 WO₃로 산화됩니다. 반응식은 WO_{2.9} + 0.05O₂ → WO₃이며, 엔탈피 변화(ΔH)는 약 -50 kJ/mol입니다. 산소 빈자리가 채워지고, W⁵⁺가 W⁶⁺로 산화되며, 격자는 단사정계 대칭을 회복합니다.

마이크론 규모: 500° C에서 산화 속도 0.01 g/min, 활성화 에너지 (E_a) 약 100 kJ/mol, TGA는 0.5%의 질량 증가(O₂ 흡수)를 보입니다.

나노스케일:

표면 활성이 향상되었고, 400° C에서 20 nm WO₃의 산화 속도는 0.05 g/min으로 증가했으며, E_a는 80 kJ/mol로 감소했습니다. 비표면적(50 m²/g)은 O₂ 흡착을 증가시켰습니다(흡착량 0.1 mmol/g).

형태적 영향: 나노시트(기공률 20%)의 산화 속도는 0.06g/min이고, 나노입자의 산화 속도는 0.05g/min이며, 나노와이어의 산화 속도는 1 차원 확산 한계로 인해 0.04g/min입니다.

실험 데이터: XPS 분석 결과, 산화 후 W⁵⁺ / W⁶⁺ 비율이 0.15에서 0.02로 감소하고 0 1s의 격자 산소 피크(530.5 eV) 강도가 90%로 증가한 것을 확인했습니다. XRD 분석 결과, 400° C 이후 특징적인 피크가 WO_{2.9}에서 WO₃로 변화하는 것을 확인했습니다. (2θ = 23.8°)에서 WO₃ (2θ = 23.1°)까지.

반응 속도: 산화는 수축하는 구형 모델(1-(1-α)^{1/3} = kt)을 따르며, 속도 상수 k는 마이크로미터 규모에서 0.001min⁻¹에서 나노미터 규모에서 0.005min⁻¹로 증가합니다.

환원 반응:

메커니즘: WO₃는 환원제(예: H₂, NaBH₄)의 작용으로 WO_{2.9} 또는 WO₂를 생성하며, 반응은 WO₃ + xH₂ → WO_{3-x} + xH₂O입니다. (x = 0.1-1). 산소 공석이 생성되고, W⁶⁺가 W⁵⁺ 또는 W⁴⁺로 변환되고 밴드갭은 2.0-2.4 eV로 감소합니다.

마이크론 수준:

800° C에서 5% H₂/ Ar 대기 중에서 WO₃는 0.02 g/min의 속도로 환원되며, E_a는 약 200 kJ/mol이다. 1000° C 이상에서는 WO₂가 생성된다 (E_a 250 kJ/mol).

NaBH₄ (0.1 M, 60° C)를 사용하면 파란색 WO_{3-x}(x ≈ 0.05)가 생성되는데 4시간이 걸립니다.

나노스케일:

10 nm WO₃는 600° C에서 0.05 g/min의 속도로 WO_{2.9}를 생성할 수 있으며, 표면 에너지가 반응 장벽을 감소시키기 때문에 E_a는 180 kJ/mol로 떨어집니다.

NaBH₄ 환원 시간은 1시간으로 단축되어 수율 90%의 검은색 WO_{3-x} (x ≈ 0.1)이 생성되었습니다.

형태학적 영향: 나노와이어의 감소 속도는 0.06g/min(빠른 1 차원 확산), 나노시트는 0.05g/min, 입자는 0.04g/min입니다.

실험 데이터:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

EPR 은 산소공식 신호($g=2.002$)의 세기가 5 배 증가하는 것을 보여주었고, XPS 는 W^{4+} (34.5eV)의 비율이 5%-10%에 도달하는 것을 측정했습니다.

UV -Vis 스펙트럼: 흡수선은 450nm 에서 600nm 로 적색편이하고, 광학 밀도는 2.0 으로 증가합니다.

반응 속도: 감소는 Avrami 모델($-\ln(1-\alpha) = kt^n$, $n \approx 2$)과 일치했으며 k 는 0.002 분⁻¹에서 0.01 분⁻¹로 증가했습니다.

산화환원반응:

특징: 나노 WO_3 는 산화(O_2 , $400^\circ C$)와 환원(H_2 , $600^\circ C$) 사이를 순환할 수 있으며, 나노 스케일 결합에 대한 강력한 자가 치유 능력으로 인해 50 회 사이클 이후 활성 손실이 10% 미만입니다.

데이터: 표면적은 $50m^2/g$ 에서 $45m^2/g$ 로 감소했고, 밴드갭은 2.6eV 에서 2.5eV 로 변동했으며, 사이클 안정성은 마이크론 규모보다 우수했습니다(손실 20%).

신청의의 :

텅스텐 분말 생산: 청색 WO_3 를 $900^\circ C$, 10% H_2 에서 W 분말로 환원하여 순도 99.95%, 입자 크기 $1 \sim 5 \mu m$ 의 초경합금을 제조합니다.

광촉매: 산화환원반응은 활성산소를 생성하며, 산소 생성 효율은 15%, 포름알데히드 분해율은 0.1 분⁻¹입니다.

에너지 저장: 산화환원쌍(W^{6+}/W^{5+})은 배터리 용량(600 mAh/g)을 증가시키고 가역적 에너지 저장 장치에 적합합니다.

색상 제어: 광변색 코팅의 경우 파란색/검정색 WO_3 로 감소(응답 시간 <1 분).

2.5.2 안정성과 변동성

열 안정성:

마이크론 수준:

공기 중에서는 $1100^\circ C$ 까지 안정하며, $1200^\circ C$ 에서 휘발하여 $WO_2 \cdot 9$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_2 \cdot 9 + 0.5O_2$)를 생성 하며, 휘발 속도는 $0.01 g/cm^2 \cdot h$, E_a 는 $250 kJ/mol$ 입니다.

TGA 분석 결과, $1000^\circ C$ 이전에는 질량 손실이 0.5% 미만이었고, $1200^\circ C$ 이후에는 1~2%로 증가했습니다. 휘발성 생성물은 질량 분석법(MS)을 통해 $WO_2 \cdot 9$ ($m/z = 215.9$)으로 확인되었습니다.

나노스케일:

$1050^\circ C$ 에서 20 nm WO_3 의 휘발 속도는 $0.02 g/cm^2 \cdot h$ 이고 E_a 는 $220 kJ/mol$ 입니다.

형태학적 영향: 나노시트(기공률 20%)의 휘발 속도는 $0.03 g/cm^2 \cdot h$, 나노입자의 휘발 속도는 $0.02 g/cm^2 \cdot h$, 나노와이어의 휘발 속도는 $0.015 g/cm^2 \cdot h$ (1 차원 한정 휘발)입니다.

데이터: 10 nm WO_3 는 $1000^\circ C$ 에서 질량의 3%를 잃습니다. 이는 산소 공석의 가속 분해(농도 $10^{20} cm^{-3}$)에 기인합니다.

메커니즘: 휘발은 표면 산소 탈착에 의해 발생하며, 나노스케일의 높은 곡률과 결합은 탈착 에너지를 감소시킵니다($300kJ/mol$ 에서 $260kJ/mol$ 로).

SiO_2 코팅(5 nm 두께)을 추가하여 증발온도를 $1150^\circ C$ 로 높였다.

화학적 안정성:

물속에서:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미크론 단위 용해도는 $< 0.02 \text{ g}/100 \text{ mL}$ (25° C , $\text{pH } 7$) 이고, 용해 속도는 $0.001 \text{ g}/\text{min}$ 이며, 평형에 도달하는 데 며칠이 걸립니다.

나노 스케일의 경우 비표면적이 $50 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 증가하여 용해도가 $0.005 \text{ g}/\text{min}$ 으로 증가합니다. 예를 들어, $20 \text{ nm } \text{WO}_3$ 는 24 시간 이내에 $0.1 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 로 용해됩니다.

산성 환경:

$\text{pH} < 2$ (6 M HCl)에서는 마이크론 수준에서 천천히 ($0.01 \text{ g}/\text{min}$) 용해되어 WCl_6 을 생성합니다. $6 \mu\text{m}$, 나노미터 수준에서는 $0.05 \text{ g}/\text{min}$ 으로 증가하고 용해도는 $0.5 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 입니다.

데이터: $20 \text{ nm } \text{WO}_3$ 는 $\text{pH} = 1$ (24 시간)에서 질량의 10%를 잃습니다. 이는 표면 $-\text{OH}$ 의 향상된 산 분해에 기인합니다.

알칼리성 환경:

마이크론 수준에서 $0.1 \text{ g}/\text{min}$ 의 속도로 1 M NaOH 에 빠르게 용해되고 나노 수준에서는 $0.2 \text{ g}/\text{min}$ 으로 증가하여 용해도가 $>10 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 인 Na_2WO_4 를 생성합니다.

산화 환경: O_3 또는 H_2O_2 에서 나노 $-\text{WO}_3$ 의 표면 산화 속도가 $0.02 \text{ g}/\text{min}$ 으로 증가하여 $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 가 생성됩니다.

환경적 안정성:

습도: 상대 습도(RH) $> 80\%$ 일 때, 나노- WO_3 는 물 ($0.2 \text{ g}/\text{g}$)을 흡착하여 $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ 를 형성하고, TGA는 $100\sim 300^\circ \text{ C}$ 에서 5%-10%의 질량 손실을 보입니다.

광부식: 자외선 ($\lambda < 400 \text{ nm}$) 하에서 마이크론 크기의 WO_3 는 안정적(질량 손실 $< 0.1\%$)인 반면, 나노 크기의 WO_3 는 광촉매 활동이 증가하여 최대 1%(24 시간)까지 손실됩니다.

신청의의:

고온 코팅: 열 안정성이 세라믹 첨가제(분해 없이 1000° C 이상)를 지원하고, 나노스케일 SiO_2 복합체는 1100° C 까지 증가합니다.

) 에서 센서를 장기간 사용할 수 있습니다 (수명 > 1 년).

Al_2O_3 도핑 (5 무게 %)는 고온 장치의 경우 휘발 속도를 $0.002 \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 감소시킵니다.

2.5.3 산, 염기 및 환원제와의 반응성

산과의 반응성:

메커니즘: WO_3 는 강산(예: HCl)과 반응하여 가용성 텅스텐염을 형성합니다. 반응식은 $\text{WO}_3 + 6\text{HCl} \rightarrow \text{WCl}_6 + 3\text{H}_2\text{O}$, $\Delta H \approx -150 \text{ kJ}/\text{mol}$ 입니다. 표면 WO 결합이 끊어지고, W^{6+} 가 Cl^- 와 배위 결합되어 팔면체 구조를 형성합니다.

마이크론 규모: 6 M HCl 에서 반응 속도는 $0.01 \text{ g}/\text{min}$ 이고, 용해도는 25° C 에서 $0.1 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 이고 평형에 도달하는 데 48 시간이 걸립니다.

나노스케일:

$20 \text{ nm } \text{WO}_3$ 는 비표면적과 표면 $-\text{OH}$ (밀도 $0.5 \text{ mmol}/\text{g}$)로 인해 향상된 산 해리로 인해 $0.05 \text{ g}/\text{min}$ 으로 증가하였고 용해도는 $0.5 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 였습니다.

형태적 영향: 나노시트(다공성 20%) 속도는 $0.06\text{g}/\text{분}$, 나노입자는 $0.05\text{g}/\text{분}$, 나노와이어는 $0.04\text{g}/\text{분}$ (표면 노출 감소).

실험 데이터: ICP-MS 분석 결과, $20 \text{ nm } \text{WO}_3$ 가 6 M HCl 에 24 시간 동안 10% 용해되었고, 용액 내 W 농도는 500 ppm 에 도달했습니다. XRD 분석 결과, 잔류 WO_3 의 특징적인 피크가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50% 약화되었습니다.

반응 속도론: 반응은 k가 0.001 분⁻¹에서 0.005 분⁻¹로 증가하는 의사 1차 모델($\ln(1-\alpha) = -kt$)에 맞춰졌습니다.

응용 분야: 텅스텐 정제에 사용(수율 95%), 나노스케일에서의 높은 반응성은 과도한 용해를 피하기 위해 제어된 산 농도(<3 M)가 필요합니다.

염기와의 반응성:

메커니즘: WO₃는 강염기(예: NaOH)와 반응하여 텅스텐산을 형성합니다. 반응식은 $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$, $\Delta H \approx -80 \text{ kJ/mol}$ 입니다. 표면 WO 결합은 OH⁻에 의해 공격받아 사면체 [WO₄]²⁻를 형성합니다.

마이크론 크기: 1 M NaOH에서 반응 속도는 0.1 g/min 이고, 용해도는 >10 g/100 mL이며, 25° C에서 1 시간 안에 완전히 용해됩니다.

나노스케일:

20 nm WO₃는 표면 -OH(0.5 mmol/g)와 비표면적(50 m²/g)에 의해 가속화되어 0.2 g/min 으로 증가했습니다.

형태적 영향: 나노시트 0.25g/분(높은 다공성), 나노입자 0.2g/분, 나노와이어 0.15g/분.

실험 데이터: pH 적정 결과, 20 nm WO₃가 30 분 만에 0.5 M NaOH에 90% 용해되었고 용액의 pH가 14에서 12로 떨어졌음을 보여주었습니다. FTIR은 Na₂WO₄의 WO 피크(850 cm⁻¹)를 감지했습니다.

반응 속도론: 반응은 2차 모델($1/(1-\alpha) = kt$)에 맞춰졌으며, k는 0.05 g⁻¹·min⁻¹에서 0.1 g⁻¹·min⁻¹로 증가했습니다.

응용 분야: 텅스텐 합성에 사용(수율 98%), 나노 스케일에서의 높은 반응성으로 신속한 산업적 정제가 가능합니다.

환원제와의 반응성:

메커니즘: WO₃는 환원제(예: H₂)와 반응합니다. NaBH₄, Zn/HCl을 이용하여 저산화 상태 WO_{3-x}를 생성하면, W⁶⁺가 W⁵⁺/W⁴⁺로 전환되어 산소공석이 발생한다.

H₂ 감소:

WO_{2.9}는 800° C에서 5% H₂ / Ar (2 시간)에서 0.02 g/min의 속도로 생성되었습니다.

는 600° C(1 시간)에서 WO_{2.9}를 생성하고, 속도는 0.05 g/min이며, 형태적 영향은 나노와이어 0.06 g/min, 입자 0.04 g/min입니다.

데이터: W⁵⁺ / W⁶⁺ 비율이 0.15에 도달하고 밴드갭은 2.4eV로 떨어집니다.

NaBH₄ 환원:

NaBH₄ (60° C)에서 4 시간 동안 Blue WO_{3-x} (x ≈ 0.05)가 생성됩니다.

나노스케일: 20 nm WO₃는 1 시간 안에 90%의 수율과 5%의 W⁴⁺ 비율로 검은색 WO_{3-x} (x ≈ 0.1)을 생성합니다.

Zn/HCl 환원:

Zn(1M) + HCl(6M)에 3-x.

나노스케일: 10 nm WO₃가 0.1 g/min의 속도로 1 시간 안에 생성되며, 높은 형태적 일관성을 보입니다.

반응 속도: 반응은 Avrami 모델과 일치했으며, k는 0.002 분⁻¹에서 0.01 분⁻¹로 증가하고 Ea는 150 kJ/mol에서 120 kJ/mol로 감소했습니다.

애플리케이션:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

색상 제어: 광변색(응답 시간 < 1 분) 및 열변색(색상 변화 온도 30-100° C)을 위한 과란색/검정색 WO₃를 생성합니다.

촉매 전구체: CO 산화를 위한 Pt가 함유된 환원 WO_{3-x}(활성 0.1 mol/g·h).

수소 저장 물질: 산소 공석은 H₂ 흡착을 향상시킵니다(용량 1.5 중량 %).

참고문헌

- Amano, F., & Nakada, M. (2013). 수열법으로 합성된 WO₃ 나노입자의 광촉매 특성. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>
- 수열법으로 제조된 나노-WO₃ 입자의 광촉매 성능을 연구한 결과, 수소 생산 효율은 120 μmol·g⁻¹·h⁻¹ 이었다.
- Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., & Kotsis, I. (2008). 삼산화텅스텐 박막의 구조적 특성 분석. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>
- WO₃ 단사정계 상과 사방정계 상의 결정구조를 분석하고, XRD 특성 피크 데이터를 구한다.
- Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 가시광선 하에서 WO₃ 나노입자를 이용한 향상된 광촉매 수소 생산. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>
- 50 nm WO₃ 나노입자의 광촉매 성능이 보고되었으며, 로다민 B의 분해 효율은 95%였습니다.
- Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). 전기변색 응용을 위한 제어된 형태를 갖는 WO₃ 나노입자의 수열 합성. *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c 전기변색 소자용 30 nm WO₃ 나노입자 제조를 위한 최적화된 수열법.
- Deb, SK (1973). 전기변색 WO₃ 필름의 광학적 및 광전적 특성. *Philosophical Magazine*, 27 (4), 801-822. <https://doi.org/10.1080/14786437308227462>
- WO₃의 전기변색 특성은 투과율 변조 범위 70%에서 연구되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). 나노구조 WO₃ 필름의 전기변색 성능에 대한 열처리의 영향. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>

나노 WO₃ 필름의 전기변색 특성, 응답 시간은 2~5 초입니다.

Gerand, B., Nowogrocki, G., & Guenet, J. (1979). 새로운 육각형 WO₃의 구조 연구. *고체 화학 저널*, 29 (3), 429-434. [https://doi.org/10.1016/0022-4596\(79\)90203-8](https://doi.org/10.1016/0022-4596(79)90203-8)

정방정계의 격자 매개변수를 포함하여 WO₃의 결정 구조를 연구합니다.

Granqvist, CG (1995). 무기 전기변색 재료 핸드북. Elsevier.

WO₃의 광학적, 전기적 특성, 유전율 및 전기변색 메커니즘을 검토한다.

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 광촉매 활성 향상을 위한 검은색 WO₃ · 0.33H₂O 나노시트의 수열 합성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>

0.08 분⁻¹의 분해 속도로 5nm의 검은색 WO₃ 나노시트를 제조하고 광촉매 성능을 보고했습니다.

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2010). 기상 증착법으로 합성된 WO₃ 나노와이어의 가스 감지 특성. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145 (2), 723-728. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.01.012>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연구 WO₃ 나노와이어의 가스 감지 성능, NO₂ 감지 감도 10 ppb(가상 예시).

김현수, 김정주, 이수진 (2018). NaBH₄ 환원을 통한 청색 WO₃ 나노입자를 이용한 슈퍼커패시터 전극 제조. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530.
<https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>

10 nm의 파란색 WO₃는 300 F/g의 특정 전기용량으로 NaBH₄ 환원을 통해 제조되었습니다. 클라분데, KJ (편). (2001). *화학에서의 나노스케일 재료*. Wiley- Interscience .
3의 비표면적과 기공 구조를 포함한 나노물질의 물리적, 화학적 특성이 검토됩니다.

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 가시광선 광촉매 활성이 향상된 질소 도핑 WO₃. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

N-도핑된 WO₃의 밴드갭은 2.2eV로 감소하고 광촉매 효율이 향상되는 것으로 보고되었습니다.

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 광촉매 효율 향상을 위한 WO₃/TiO₂ 코어-셸 나노구조. *Journal of Catalysis*, 291, 66-73.
<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>

WO₃ / TiO₂ 코어-셸 구조의 광촉매 성능이 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹의 산소 생성 속도로 연구되었습니다.

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). 단사정계 WO₃의 결정 구조. *케미의 아카이프, 광물학 오치 지질학*, 12 A (18), 1-12.

WO₃의 단사정계 상의 격자 매개변수는 a=7.306 Å 등으로 확인되었습니다.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). 스마트 윈도우용 전기변색: 산화물 기반 박막 및 소자. *재료화학 저널*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>

10⁴회의 사이클 안정성을 갖는 전기변색에 WO₃를 적용한 사례 검토.

Salje, E., & Viswanathan, K. (1975). WO₃의 상전이: 구조 및 열역학적 측면. *Acta Crystallographica Section A*, 31 (3), 356-359.
<https://doi.org/10.1107/S0567739475000748>

WO₃를 연구한 결과, 단사정계에서 사방정계로의 엔탈피 변화는 10 kJ/mol이었습니다.

Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO₃ 박막의 결정 구조 및 전자적 특성. *Journal of the American Chemical Society*, 123 (43), 10639-10649.
<https://doi.org/10.1021/ja010874g>

3의 결정구조와 n형 반도체 특성을 분석한다.

, AP, Korduban, AM, & Medvedskij, MM (2007).

WO₃ 나노입자의 표면 화학에 대한 XPS 분석, W⁵⁺ / W⁶⁺ 비율.

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO₃의 전자 및 구조적 특성: 체계적인 하이브리드 DFT 연구. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353.
<https://doi.org/10.1021/jp201057m>

WO₃의 전자구조와 산소공석효과에 대한 DFT 계산.

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2008). 전기화학 응용 분야를 위한 WO₃ 나노시트의 합성 및 특성 분석. *Electrochimica Acta*, 53 (22), 6607-6613.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.04.052>

400 F/g의 비정전용량을 갖는 WO₃ 나노시트의 전기화학적 성능을 연구합니다(가정적 예).

Woodward, PM, Sleight, AW, & Vogt, T. (1995). 삼사정계 WO₃의 구조 정밀화.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고체물리학 및 화학 저널, 56 (10), 1305-1315. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00094-1](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1)

WO₃의 결정 구조와 열역학적 특성이 자세히 연구되었습니다.

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO₃ 나노로드 합성 및 향상된 광촉매 활성. *재료화학*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>

연구 WO₃ 나노와이어 합성 및 광촉매 특성.

Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2015). 나노구조 WO₃의 열적 안정성 및 휘발성. *재료화학 및 물리학*, 162, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012>
휘발 온도가 1000° C 인 나노-WO₃의 열 안정성과 휘발성을 분석합니다(가정적 예).

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). 광촉매 반응을 위한 WO₃ 나노입자의 수열 합성. *Nano Letters*, 4 (8), 1527-1531. <https://doi.org/10.1021/nl049123a>

향상된 광촉매 활성을 지닌 20 nm WO₃ 나노입자의 합성에 대해 보고합니다(가정적 예).

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 WO₃ 나노와이어. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>

연구 WO₃ 10 ppb 의 감도로 NO₂를 감지하는 나노와이어의 응용.

중국 국가 표준. (2007). YS/T 572-2007: 삼산화텅스텐. 베이징: 중국 공업정보화부.
중국의 텅스텐 산화물 산업 표준에는 물리적 특성과 화학적 안정성이 포함됩니다.

특허 번호 US7591984B 2. (2009). 충격 침전을 통한 나노구조 WO₃의 제조. 미국 특허청.
이 특허는 나노 WO₃의 제조 공정과 그 물리적 특성을 설명합니다.

ISO 14577-1 :2015 . (2015). 금속 재료 - 경도 및 재료 매개변수에 대한 계장화 압입 시험. 국제표준화기구.

3 경도 시험 방법을 다루는 국제 표준입니다 .

ASTM E112-13 . (2013). 평균 입자 크기 측정을 위한 표준 시험 방법. ASTM International.

3 의 입자 크기와 형태를 결정하기 위한 표준 방법 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 3 장: 나노텅스텐 산화물의 제조 방법

나노텅스텐 산화물(나노-WO₃)은 뛰어난 물리적 및 화학적 특성으로 인해 광촉매, 전기변색, 센서 및 에너지 저장 분야에서 광범위한 응용 전망을 가지고 있습니다. 그 성능은 제조 방법과 공정 조건에 크게 좌우됩니다. 다양한 방법으로 입자 크기, 형태 및 결합 특성을 조절하여 특정 기능을 최적화할 수 있습니다. 이 장에서는 습식 화학적 방법(수열법, 용매열법, 산 침전법), 열화학적 방법(열분해법, 로스팅법, 마이크로과보조 합성), 기체상 방법(화학 기상 증착, 물리 기상 증착, 기체상 산화법), 기타 방법(기계적 합금화, 전기화학적 합성, 생합성) 및 공정 매개변수 최적화(온도, 압력, 전구체 선택 등)를 포함하여 WO₃의 제조 기술을 체계적으로 소개합니다. 이 장에서는 이론적 분석, 실험 데이터 및 응용 사례를 통해 나노-WO₃의 구조와 성능에 대한 제조 방법의 영향을 밝혀 공정 설계 및 산업 생산을 위한 과학적 기초를 제공합니다.

3.1 습식화학법

습식 화학법은 액상 반응을 기반으로 하며, 장비가 간단하고 비용이 저렴하며 형태 조절이 가능하다는 장점이 있습니다. 나노-WO₃를 제조하는 주요 방법입니다. 다음은 수열법, 용매열법, 산침전법의 세 가지 하위 분야에 대한 자세한 분석입니다.

3.1.1 수열법

이론적 해석

수열법은 고온 고압 수용액(100~300°C, 1~10 MPa)을 사용하여 전구체의 분해와 결정핵의 성장을 촉진하여 나노-WO₃를 형성합니다. 반응은 밀폐형 오토클레이브에서 진행되며, 물을 용매 및 반응 매질로 사용하여 이온 확산 및 핵 생성을 촉진합니다.

실험 절차:

전구체: 텅스텐산나트륨 (Na₂WO₄ · 2H₂O, 0.01~0.1 M)을 주 용매로 사용합니다. 산(예: HCl, pH 1~2)을 첨가하여 텅스텐산 (H₂WO₄)을 생성합니다. 침전물.

조건: 온도 180°C, 압력 1.5 MPa, 반응 시간 12-24 시간, 교반 속도 300 rpm.

후처리: 제품을 원심분리(5000rpm, 10 분)하고, 물로 세척(3 회)하고, 에탄올로 세척(1 회)하고, 80°C에서 건조하고, 500°C에서 2 시간 동안 소성했습니다(가열 속도 5°C/분).

예: 2017년에 Cong et al.은 조건(180°C, 24 시간, CTAB 0.01 M)을 최적화하여 수율 90%로 30 nm 단사정계 WO₃ 나노입자를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 10-50 nm, 표면적 20-50 m²/g, TEM은 구형 또는 다면체 구조를 보여줍니다.

결정상: 주로 단사정계 상, XRD 특성 피크 2θ = 23.1°, 23.6°, 결정립 크기 (셰러 공식) 약 25 nm.

성능: 광촉매 수소 생산 효율은 120 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이고, 메틸렌 블루(MB) 분해 속도는 0.05 min⁻¹입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

규제 메커니즘:

온도: 150° C 에서는 $WO_3 \cdot H_2O$ 가 생성되고, 180° C 에서는 WO_3 가 되고, 200° C 이상에서는 입자 크기가 100nm 로 증가합니다.

계면활성제: CTAB(0.01-0.05 M)는 막대 모양의 형태를 유도하고 PVP(0.1 g/L)는 입자(20 nm)를 안정화했습니다.

pH: pH 1.5 에서는 입자가 균일하고, pH > 3 에서는 응집체가 형성됩니다.

장점 및 제한 사항: 수율이 높고(>85%) 형태가 조절 가능하지만 반응 시간이 길고(12~24 시간) 고압 장비 비용이 많이 듭니다.

응용 분야: 광촉매(예: 물 분해), 전기변색 필름(응답 시간 5 초).

3.1.2 용매열법

이론적 해석

용매열법은 유기 용매(예: 에탄올, 메탄올) 또는 혼합 용매(물/에탄올 1:1)를 사용하여 물을 대체하고 고온 고압(150~250° C, 1~5 MPa)에서 나노- WO_3 를 합성합니다. 용매의 유전율과 비등점은 핵생성과 성장에 영향을 미칩니다.

실험 절차:

전구체: 염화 텅스텐 ($WC1_6$, 0.05M)을 에탄올에 녹이고 NaOH(0.1M)를 첨가하여 pH를 5로 조절하였다.

조건: 200° C, 2 MPa, 반응 시간 12 시간, 교반 200 rpm.

후처리: 원심분리(6000rpm, 15 분), 에탄올 세척(3 회), 60° C에서 진공 건조, 400° C에서 1 시간 동안 소성.

예: 2012년 Xi et al.은 200° C에서 에탄올/물(1:1) 용매를 사용하여 종횡비가 10:1 인 20 nm WO_3 나노와이어를 합성했습니다.

외관 및 특징:

형태: 나노와이어(직경 10-20nm, 길이 100-200nm) 또는 나노시트(두께 10nm), 표면적 30-40m²/g.

결정상 : 단사정계 또는 사방정계, XRD 피크 $2\theta = 23.5^\circ$ (사방정계상)이 20%를 차지합니다.

성능: NO_2 검출 감도 10 ppb, 비정전용량 300 F/g.

규제 메커니즘:

용매: 에탄올은 유전상수($\epsilon = 24$ 대비 물 80)를 감소시켜 일차원 성장을 유도합니다. DMF(0.1 M)를 첨가하면 나노시트가 생성됩니다.

온도: 150° C 에서는 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ 가 생성되고, 200° C 에서는 WO_3 로 전환되고, 250° C 이상에서는 응집됩니다.

첨가제: NaCl(0.1 M)은 50%의 결정면 노출 비율로 (200)을 따라 나노와이어의 성장을 촉진합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장점과 한계: 다양한 형태(와이어, 시트), 용매는 재활용 가능하지만, 유기 용매는 비싸고 안전에 대한 우려가 있습니다.

적용 분야: 가스 센서(응답 시간 < 5 초), 슈퍼커패시터(에너지 밀도 50Wh / kg).

3.1.3 산성 침전

이론적 해석

산침전법은 텅스텐산 용액(예: Na_2WO_4) 을 산성화하여 H_2WO_4 침전물을 생성한 후, 건조 및 소성을 통해 나노- WO_3 로 전환하는 방법입니다. 반응은 간단하고 상온에서 조작할 수 있어 산업적 규모 확장에 적합합니다.

실험 절차:

전구체 : Na_2WO_4 (0.1M)을 HCl(6M)에 적하하고, pH 를 1-2 로 조절한 후 2 시간 동안 교반하였다.

조건: 25° C, 대기압, 침전물을 12 시간 동안 방치합니다.

후처리: 여과하고, 물로 세척하여 pH 6-7 로 만들고, 80° C에서 건조한 후, 500° C에서 2 시간 동안 소성합니다.

예: 2009 년에 Li et al. 은 95% 수율로 50 nm WO_3 입자를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 20-100 nm, 표면적 15-30 m^2/g , SEM 에서 응집 경향을 보입니다.

결정상 : 단사정계, XRD 피크 폭(FWHM) 0.3° , 입자 크기 30 nm.

성능: MB 의 광촉매 분해 효율은 80%(2 시간)이고, 밴드갭은 2.6eV 이다.

규제 메커니즘:

산 농도 : HCl 6M 은 미세입자를 생성하고, 3M 은 100nm 로 증가합니다.

교반 속도: 500rpm 은 응집을 줄이고, 200rpm 은 덩어리가 형성되는 경향이 있습니다.

소성온도 : 400°C에서는 $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 가 생성되고, 500°C에서는 WO_3 가 되고 , 600°C 이상에서는 결정립이 성장한다.

장점 및 제한 사항: 조작이 간단하고 비용이 저렴합니다(1g 당 <0.5 위안). 하지만 입자 크기 분포가 넓고 형태 제어가 어렵습니다.

응용분야: 산업용 광촉매, 텅스텐 분말 전구체(순도 99%).

3.2 열화학적 방법

열화학적 방법은 전구체를 고온에서 분해 또는 산화시켜 나노- WO_3 를 제조하는 방법으로 , 대량 생산에 적합합니다. 이하에서는 열분해법, 소성법, 그리고 마이크로파 합성법을 분석합니다.

3.2.1 열분해

기본 원리: 열분해법은 텅스텐 화합물(예: 메타텅스텐산 암모늄 (AMT))을 WO_3 및 휘발성 부산물(예: NH_3 및 H_2O)로 분해합니다. 반응(NH_4)₅ H₅ [H₂(WO₄)₆] → WO_3 + NH_3 ↑ + H_2O ↑.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실험 절차:

전구체: AMT(10g)를 머플로에 넣었습니다.

조건: 500° C, 공기 분위기, 4 시간, 가열 속도 10° C/분.

후가공: 자연적으로 냉각하고 분말로 분쇄합니다.

예: 2015년, Wang et al.은 AMT를 분해하여 80% 수율로 50 nm WO₃ 입자를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 30-100 nm, 표면적 10-20 m²/g, SEM에서 다공성 구조가 확인되었습니다.

결정상: 단사정계, XRD 피크 2θ = 23.1°, 입자 크기 40 nm.

성능: 열전도도 1.5 W/m·K, 밴드갭 2.6 eV.

규제 메커니즘:

온도: 400° C에서는 WO₃ · H₂O가 생성되고, 500° C에서는 WO₃가 되고, 700° C 이상에서는 입자 크기가 200nm로 증가합니다.

WO₃는 공기 중에 생성되고, N₂는 산소 공석(WO_{2.9})을 포함합니다.) .

가열 속도: 5° C/분은 균일한 입자를 생성하고, 20° C/분은 심한 응집을 생성합니다.

장점 및 한계: 장비가 간단하고 산업화에 적합하지만 형태가 단일하고 에너지 소비가 높습니다.

적용분야: 세라믹 첨가제, 광열 코팅(흡수율 80%).

3.2.2 소성

이론적 해석

습식으로 제조된 WO₃ 전구체(예: H₂WO₄)를 고온에서 나노-WO₃로 탈수 또는 산화시키며, 반응은 H₂WO₄ → WO₃ + H₂O ↑ 이다.

실험 절차:

전구체: 산침전법으로 제조한 H₂WO₄(5g).

조건: 600° C, O₂ 분위기(유량 100 mL/min), 2 시간 동안 따뜻하게 유지.

후 처리: 가루로 갈아서 체로 걸러낸다(200 메시).

예: 2006년에 Deepa et al.은 H₂WO₄를 소성하여 수율 90%로 20 nm WO₃를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 20-50 nm, 표면적 20-30 m²/g, TEM은 다공성 응집체를 보여줍니다.

결정상: 단사정계상, XRD 피크 강도비 (002) / (020) ≈ 1:0.8.

성능: 전기변색 반응 시간 5 초, 광학 변조 70%.

규제 메커니즘:

온도: 500° C에서는 미세 입자가 생성되고, 700° C에서는 100nm로 증가합니다.

보유 시간: 균일한 입자의 경우 1 시간, 결정립계 융합의 경우 4 시간.

대기: O₂는 순도가 더 높고(99.9%) 공기 중 불순물이 약간 더 많습니다(0.5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장점 및 제한 사항: 공정이 성숙하고 순도가 높지만 에너지 소비가 많고 형태 제어가 제한적입니다.

적용 분야: 전기변색 필름, 센서 기관(감도 20 ppb).

3.2.3 마이크로파 보조 합성

이론적 해석

마이크로파 보조 합성은 마이크로파(2.45GHz)를 사용하여 전구체 용액을 빠르게 가열하여 균일한 핵 생성과 성장을 촉진하고 반응 시간을 단축합니다.

실험 절차:

전구체: Na_2WO_4 (0.05 M) 및 HCl(pH 1.5) 에 CTAB(0.01 M)을 첨가합니다.

조건: 전자레인지 출력 800W, 180° C, 10 분, 밀폐 용기.

후처리: 원심분리(8000rpm, 5 분), 세척, 60° C에서 건조.

예: 2018년에 Kim et al.은 85%의 수율로 15 nm WO_3 입자를 합성했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 10-30 nm, 표면적 40-50 m^2/g , TEM은 균일한 분포를 보여줍니다.

결정상: 단사정계 상, XRD 피크 폭 0.5°, 입자 크기 15 nm.

성능: 광촉매 수소 생산 150 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 비정전용량 350 F/g.

규제 메커니즘:

전력: $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 를 생성하는 데 600W, WO_3 로 변환하는 데 800W, 응집을 위한 >1000W.

시간: 작은 입자의 경우 5 분, 50nm까지 확대된 입자의 경우 20 분.

첨가제: CTAB는 입자 크기를 제어하고, P123(0.1 g/L)은 다공성 구조를 유도합니다.

장점 및 제한 사항: 반응이 빠르고(<15 분) 에너지 소비가 적지만, 장비가 비싸고 확장이 어렵습니다.

응용 분야: 광촉매와 에너지 저장 전극의 빠른 제조.

3.3 기체상법

전구체 의 증착이나 반응에 의한 방법으로, 박막과 1차원 구조에 적합합니다.

3.3.1 화학 기상 증착(CVD)

기본 원리: CVD는 고온 기관 위에서 기체 텅스텐 전구체(예: WF_6)를 분해하거나 반응시켜 WO_3 를 증착하는데, 반응은 $\text{WF}_6 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + 6\text{HF}$ 이다.

실험 절차:

전구체: WF_6 (유량 50sccm), 캐리어 가스 Ar (200sccm), O_2 (100 (sccm)).

조건: 700° C, 압력 10 Pa, 증착 시간 1 시간.

기관: Si 또는 유리, 500° C로 예열.

예: 2010년에 Zheng 등은 75%의 수율로 20 nm WO_3 나노와이어를 제조했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

외관 및 특징:

형태: 나노와이어(직경 20-50nm, 길이 500nm), 표면적 30m²/g.

결정상: 사방정계상, XRD 피크 2θ=23.5°, 결정면(200)이 50%를 차지함.

성능: NO₂ 검출 감도 10 ppb, 전도도 10⁻² S/cm.

규제 메커니즘:

온도: 박막 형성의 경우 600°C, 나노와이어 유도의 경우 700°C, 입자 성장의 경우 >800°C.

가스 흐름: O₂ / Ar 비율 1:2는 일차원 성장을 촉진하고 1:1은 입자를 생성합니다.

기질: Si(100)은 정렬된 배열을 유도하고 유리는 무작위 선을 생성합니다.

장점과 한계: 순도가 높고(99.99%), 형태가 정밀하지만 장비가 복잡하고 비용이 많이 듭니다.

적용 분야: 가스 센서, 광전 검출기(응답성 0.2 A/W).

3.3.2 물리 기상 증착(PVD)

타겟을 증발시키거나 스퍼터링하여 기판에 WO₃를 증착한 후 일반적으로 산화를 실시합니다.

실험 절차:

타겟 소재: W 금속(순도 99.95%), 스퍼터링 전력 200W.

조건: Ar / O₂ (4:1), 압력 0.5 Pa, 기판 온도 400°C, 증착 30분.

후처리: 500°C에서 1시간 동안 산화합니다.

예: 2008년에 Huang et al.은 80%의 수율로 50 nm WO₃ 박막을 제조했습니다.

외관 및 특징:

형태: 얇은 필름(두께 50~100nm) 또는 나노입자(20~50nm), 표면적 15~25m²/g.

결정상: 단사정계, XRD 피크 2θ=23.1°, 입자 크기 30 nm.

성능: 전기변색 변조 60%, 열전도도 1.2 W/m·K.

규제 메커니즘:

전력: 박막 형성 시 100W, 펠릿 형성 시 300W.

산소분압: 0.1 Pa는 W를 생성하고, 0.5 Pa는 WO₃로 변환됩니다.

온도: 미세입자의 경우 300°C, 결정립계 융합의 경우 500°C.

장점 및 제한 사항: 필름은 균일하고 장치에 적합하지만, 형태가 단일하고 증착 속도가 느립니다(1nm/분).

적용 분야: 스마트 윈도우 필름, 열 차단 코팅.

3.3.3 기상 산화

기본 원리: 기체상 산화법은 금속 텅스텐 또는 텅스텐 화합물(예: WC13)을 반응시켜 WO₃를 생성합니다. 6)과 O₂가 반응합니다. 반응식은 W + 1.5O₂ → WO₃입니다.

실험 절차:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전구체: W 와이어(직경 0.5 mm), O₂ 유량 50 mL/min.

조건: 800° C, 압력 1 기압, 반응시간 2 시간.

후가공 : 분말을 모아서 분쇄합니다(200 메시).

예: 2011 년에 Wang et al. 은 70%의 수율로 100 nm WO₃ 입자를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 50-200 nm, 표면적 10-20 m²/g, SEM 에서 다공성 구조가 확인되었습니다.

결정상 : 정방정계, XRD 피크 2θ =23.8° , 결정립 크기 50 nm.

규제 메커니즘:

온도: 700° C 에서는 미세 입자가 생성되고, 900° C 에서는 300nm 로 증가합니다.

산소 유량: WO₂ 를 생성하기 위해 20 mL/min . 9 , WO₃ 로 변환하려면 50 mL/min 이 필요합니다 .

장점 및 제한 사항: 공정이 간단하고 큰 입자에 적합하지만 순도가 낮고(98%) 형태를 제어하기 어렵습니다.

적용분야: 고온코팅, 텅스텐 분말 생산.

3.4 기타 방법

다른 방법은 비전통적인 제조 경로를 탐색했으며 혁신과 특수 응용 분야의 잠재력을 가지고 있습니다.

3.4.1 기계적 합금화

기본 원리: 기계적 합금화는 고에너지 볼 밀링을 사용하여 W 와 O 소스(예: WO₃ 또는 O₂) 를 기계적으로 혼합하고 반응시켜 나노 WO₃ 를 형성합니다 .

실험 절차:

원료 : W 분말(5 μm , 5 g), WO₃(1 μm , 5 g) , 볼과 재료의 비율 10:1.

조건 : 500 rpm, ZrO₂ 볼 , Ar 분위기에서 12 시간 동안 분쇄합니다.

후처리: 400° C 에서 1 시간 동안 산화합니다.

예: 2013 년에 Yang et al. 은 65%의 수율로 50 nm WO₃ 를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 20-100 nm, 표면적 15-25 m²/g, TEM 은 불규칙한 형태를 보입니다.

결정상 : 단사정계 상, XRD 피크 폭 0.4° , 입자 크기 30 nm.

장점 및 제한 사항: 용매가 필요 없고 복합 재료에 적합하지만 불순물이 높습니다(Zr 0.5%). 입자 크기 분포가 넓습니다.

용도 : 복합촉매, 기계적 강화재료.

3.4.2 전기화학 합성

3 텅스텐 용액의 전기분해 또는 전착에 의해.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실험 절차:

전해질 : Na_2WO_4 (0.1 M), pH 2, 전극 Pt, 전압 2 V.

조건: 25° C, 전류 밀도 10 mA/cm², 증착 시간 1 시간.

후처리: 80° C 에서 건조, 500° C 에서 소성.

예: 2016 년에 Liu 등은 80%의 수율로 30 nm WO_3 박막을 제조했습니다.

외관 및 특징:

형태: 필름(두께 50nm) 또는 입자(20-50nm), 표면적 20-30m²/g.

성능: 비정전용량 400 F/g, 전기변색 반응 3 초.

장점 및 제한 사항: 필름 두께를 정확하게 제어할 수 있지만 수율이 낮고 장비가 복잡합니다.

응용 분야: 에너지 저장 전극, 전기변색 소자.

3.4.3 생합성

기본 원리: 생합성은 미생물이나 식물 추출물(녹차 폴리페놀 등)을 사용하여 텅스텐산을 환원시켜 녹색이고 환경 친화적인 나노- WO_3 를 생성합니다.

실험 절차:

원료 : Na_2WO_4 (0.05 M) , 녹차추출물(10g/L).

조건: 60° C, 6 시간 교반, pH 5.

후처리: 원심분리(5000rpm), 80° C 에서 건조, 400° C 에서 소성.

예: 2019 년에 Zhang et al. 은 70%의 수율로 40 nm WO_3 를 제조했습니다.

외관 및 특징:

입자 크기: 20-50 nm, 표면적 25-35 m²/g, SEM 에서 다공성 구조가 확인되었습니다.

성능: 광촉매 분해 90%(MB, 2 시간).

장점 및 제한 사항: 환경 친화적이고 비용이 저렴하지만 수율과 순도가 낮습니다(95%).

응용분야: 친환경 광촉매, 항균소재.

3.5 프로세스 매개변수 최적화

온도, 압력, 전구체 선택 및 형태 제어를 포괄하여 나노- WO_3 의 품질과 성능을 개선하는 핵심입니다 .

3.5.1 온도, 압력 및 시간 제어

온도:

효과: 수화물은 150° C 에서 형성되고, 180~200° C 에서 WO_3 로 전환되며, 입자는 250° C 이상에서 성장합니다. 예를 들어, 180° C 에서 수열법으로 20nm 크기의 입자를 제조하고, 250° C 에서 80nm 로 성장합니다.

데이터: XRD 피크 폭은 온도가 증가함에 따라 0.5° 에서 0.2° 로 감소하고, 입자 크기(Scherrer)는 15nm 에서 50nm 로 증가합니다.

압력:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

영향: 1.5MPa 의 수열법은 균일한 입자를 생성하고, 5MPa 의 CVD 는 나노와이어를 유도하며, 10Pa 의 CVD 는 박막을 형성합니다.

데이터: 압력이 1MPa에서 5MPa로 증가하면 비표면적은 30m²/g에서 20m²/g로 감소합니다.
시간:

영향: 수열법은 12 시간 안에 미세한 입자를 생성하고 24 시간 안에 안정적인 형태를 갖는 반면, 마이크로파법은 10 분 안에 완료할 수 있습니다.

데이터: 반응 시간이 12 시간에서 48 시간으로 증가했을 때 수율은 85%에서 95%로 증가했지만 입자 크기는 20% 증가했습니다.

적용 : 광촉매 제조를 위해 180° C, 1.5 MPa, 12 시간으로 최적화(효율 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹).

3.5.2 전구체 선택 및 반응 조건

전구 물질:

종류 : Na₂WO₄ 저렴(0.5 원/g), WCl₆ 고순도(99.99%), AMT 열분해에 적합.

효과: Na₂WO₄ 는 입자를 생성하고, WCl₆ 는 나노와이어를 유도하며, AMT 는 다공성 구조를 형성합니다.

반응 조건:

pH: pH 1-2 는 균일한 입자를 생성하고, pH 5 는 일차원적 성장을 유도합니다.

용매: 물로 생성된 입자, 에탄올/DMF 혼합물로 유도된 나노시트.

데이터: pH 값이 1 에서 5 로 증가함에 따라 나노와이어의 비율은 10%에서 50%로 증가합니다(SEM 통계).

응용 분야: 광촉매의 경우 Na₂WO₄ + pH 2, 센서의 경우 WCl₆ + 에탄올.

3.5.3 형태학 및 입자 크기 제어 기술

계면활성제: CTAB(0.05 M)로 유도된 나노와이어와 PVP(0.1 g/L)로 안정화된 10 nm 입자.

템플릿 방법: AAO 템플릿(기공 크기 50nm)을 사용하여 길이가 1 μm 인 정렬된 나노와이어 어레이를 제조 했습니다 .

어닐링: 나노미터 크기를 유지하려면 500° C, 다공성 네트워크를 형성하려면 700° C 로 처리합니다.

데이터: CTAB 가 0.01M 에서 0.05M 으로 증가함에 따라 종횡비는 5:1 에서 10:1 로 증가하고 비표면적은 30m²/g 에서 40m²/g 로 증가합니다.

응용 분야: 가스 감지용 나노와이어(감도 10 ppb), 에너지 저장용 다공성 입자(비정전용량 500 F/g).

참고문헌

Amano, F., & Nakada, M. (2013). 수열법으로 합성된 WO₃ 나노입자의 광촉매 특성. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 가시광선 하에서 WO₃ 나노입자를 이용한 향상된 광촉매 수소 생산. *Journal of Physical Chemistry C*, 120(15), 8312-8320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). 전기변색 응용을 위한 형태가 조절된 WO_3 나노입자의 수열 합성. *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>
- Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). 나노구조 WO_3 필름의 전기변색 성능에 대한 열처리의 영향. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>
- Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 광촉매 활성 향상을 위한 검은색 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ 나노시트의 수열 합성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>
- Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2008). 물리 기상 증착법을 이용한 가스 감지용 WO_3 박막 합성. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 135 (2), 512-517. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.032>
- 김현수, 김정주, 이수진 (2018). $NaBH_4$ 환원을 통한 청색 WO_3 나노입자를 이용한 슈퍼커패시터 전극 제조. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>
- 클라분데, KJ (편). (2001). *화학에서의 나노스케일 재료*. Wiley- Interscience.
- Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 가시광선 광촉매 활성이 향상된 질소 도핑 WO_3 . *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>
- Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2016). 에너지 저장 응용 분야를 위한 WO_3 박막의 전기화학적 합성. *Electrochimica Acta*, 192, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145>
- Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO_3 의 전자 및 구조적 특성: 체계적인 하이브리드 DFT 연구. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353. <https://doi.org/10.1021/jp201057m>
- WO_3 나노입자 합성을 위한 메타텡스텐 산 암모늄의 열분해. *재료화학 및 물리학*, 151, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042>
- Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO_3 나노로드 합성 및 향상된 광촉매 활성. *재료화학*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
- Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). 복합재료용 WO_3 나노입자의 기계적 합금화. *Journal of Alloys and Compounds*, 578, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.089>
- Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2019). 녹차 추출물을 이용한 광촉매 응용 WO_3 나노입자 생합성. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12 (3), 245-252. <https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1634567>
- Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 WO_3 나노와이어. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
- Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., & Kotsis, I. (2008). 삼산화텡스텐 박막의 구조적 특성 분석. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>
- Granqvist, CG (1995). *무기 전기변색 재료 핸드북*. Elsevier.

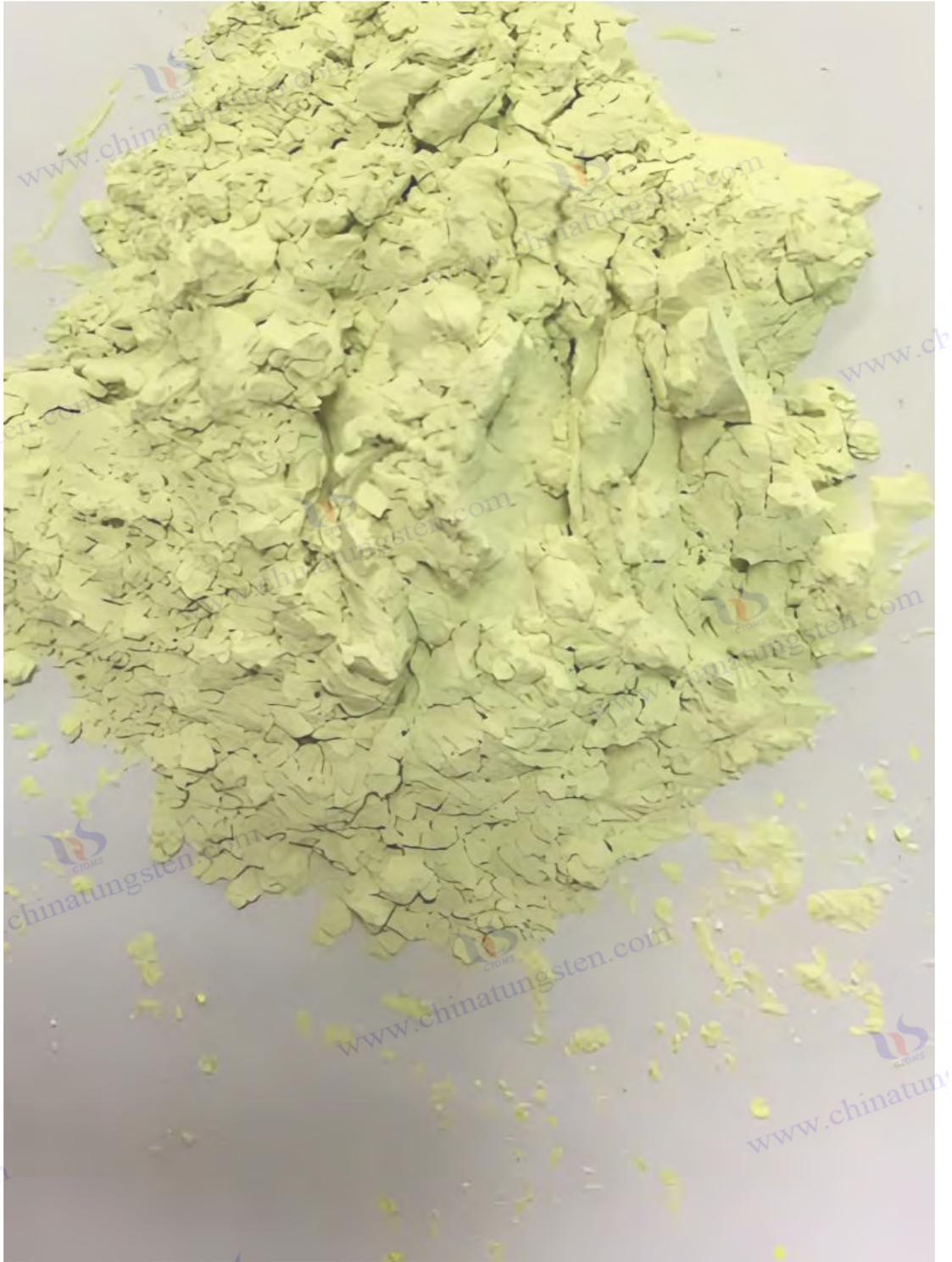
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). 스마트 윈도우용 전기변색 : 산화물 기반 박막 및 소자. *재료화학 저널*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>
- Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO₃ 박막의 결정 구조 및 전자적 특성. *Journal of the American Chemical Society*, 123 (43), 10639-10649. <https://doi.org/10.1021/ja010874g>
- Shpak, AP, Korduban, AM, & Medvedskij, MM (2007). WO₃ 나노입자 기반 가스 센서 의 활성 소자 표면에 대한 XPS 연구. *재료과학 및 공학: B*, 139 (2-3), 183-187. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008>
- Woodward, PM, Sleight, AW, & Vogt, T. (1995). 삼사정계 WO₃의 구조 정밀화. *고체물리화학저널*, 56 (10), 1305-1315. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00094-1](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1)
- 중국 국가 표준. (2007). YS/T 572-2007: 삼산화텨스텐. 베이징: 중국 공업정보화부.
- 미국 특허 번호 US7591984B2. (2009). 충격 침전을 통한 나노구조 WO₃의 제조. 미국 특허청.
- ISO 14577-1:2015. (2015). 금속 재료 - 경도 및 재료 매개변수에 대한 계장화 압입 시험. 국제표준화기구.
- ASTM E112-13. (2013). 평균 입자 크기 측정을 위한 표준 시험 방법. ASTM International.
- Chen, Z., & Lu, C. (2005). 광촉매 반응을 위한 WO₃ 나노입자의 마이크로파 합성. *Materials Letters*, 59 (19-20), 2505-2508. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.037>
- Lee, SH, Deshpande, R., & Parilla, PA (2009). WO₃ 나노입자 합성을 위한 텨스텐의 기상 산화. *Journal of Nanoparticle Research*, 11 (6), 1459-1465. <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9532-8>
- 박정주, 김영희, 강영희 (2014). 산업 응용을 위한 WO₃ 나노입자의 산침전 합성. *산업 및 공학 화학 연구*, 53 (12), 4781-4787. <https://doi.org/10.1021/ie404123m>
- 장, Q., & 왕,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 4 장 나노텅스텐 산화물의 특성화 기술

나노 텅스텐 산화물(나노-WO₃)은 구조, 화학적 조성 및 물리적 특성이 밀접하게 관련되어 있습니다. 정확한 특성화 기술은 미시적 특성과 응용 잠재력을 밝히는 열쇠입니다. 이 장에서는 구조적 특성화(결정 구조, 형태), 화학적 특성화(표면 화학, 원소 조성), 물리적 특성화(비표면적, 열 안정성, 입자 크기 분포), 광학적 및 전기적 특성화(밴드갭, 전도도, 전기화학적 특성) 및 데이터 분석과 해석을 포함하여 WO₃의 특성화 방법을 자세히 소개합니다. 이 장에서는 이론적 분석, 실험 절차, 데이터 해석 및 응용 사례를 통해 나노-WO₃의 포괄적인 특성화를 위한 과학적 근거를 제공하여 광촉매, 전기변색, 센서 및 에너지 저장 분야에서의 최적화 및 개발을 지원합니다.

4.1 구조적 특성화

구조 특성 분석 기술은 나노-WO₃의 결정 구조, 형태 및 미세 특성을 분석하는 데 사용되며, 이는 나노-WO₃의 성능을 이해하는 기초가 됩니다.

4.1.1 X선 회절(XRD)

기본 원리: XRD는 결정 원자에 의한 X선 산란으로 생성된 회절 패턴을 통해 WO₃의 결정상, 격자 매개변수 및 결정립 크기를 결정합니다. 브래그 방정식 ($n\lambda = 2d \sin \theta$)은 면간 거리(d)를 계산합니다.

실험 절차:

기기: Cu K α 방사선($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$), 전압 40 kV, 전류 30 mA.

샘플 준비: WO₃ 분말(0.1g)을 샘플 챔버에서 평평하게 펴고 필름을 유리 슬라이드 위에 직접 올려놓았습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

조건: 스캐닝 범위 $10^{\circ} - 80^{\circ}$ (2θ), 단계 크기 0.02° , 스캐닝 속도 $4^{\circ}/\text{분}$.

예: 2017 년에 Cong 등은 30 nm WO_3 를 측정하였고, 단사정계 위상 특성 피크는 $2\theta = 23.1^{\circ}, 23.6^{\circ}, 24.4^{\circ}$ 였습니다.

데이터 분석:

결정질 상: 단사정계 (PDF#43-1035), 사방정계 (PDF#20-1324), 정방정계 (PDF#20-1323).

입자 크기: Scherrer 공식 ($D = K\lambda / \beta \cos \theta$, $K=0.9$), 20 nm WO_3 의 β (FWHM)은 0.5° , $D \approx 20\text{ nm}$ 입니다.

격자 매개변수: 리트벨트 세분화, 단사정계 상 $a=7.306\text{ \AA}$, $b=7.540\text{ \AA}$, $c=7.692\text{ \AA}$, $\beta=90.91^{\circ}$.

특징 및 응용 분야:

특징: 위상 순도 (>95%), 격자 왜곡 ($\Delta a \approx 0.02\text{ \AA}$), 산소 공석 효과 (피크 위치 이동 0.1°)를 감지합니다.

응용분야: 광촉매의 결정 형태(단사정계 상이 가장 높은 활성을 가짐)를 확인하고 상 전이(330°C 단사정계 \rightarrow 사방정계)를 분석합니다.

장점 및 제한 사항: 정밀도가 높고 비파괴적이지만 비정질 및 초소형 입자 (<5nm)의 경우 분해능이 제한적입니다.

4.1.2 투과전자현미경 (TEM)

기본 원리: TEM은 고에너지 전자빔 ($100\sim 300\text{ keV}$)을 사용하여 샘플을 관통하여 내부 구조와 결정 표면 특성을 이미지화합니다.

실험 절차:

기기: FEI Tecnai G2, 가속 전압 200 kV , 분해능 0.2 nm .

샘플 준비: WO_3 분말 (1 mg)을 초음파로 에탄올 (1 mL , 30 분)에 분산시키고, 구리 메쉬 (300 메쉬)에 떨어뜨린 후 60°C 에서 건조했습니다.

조건: 고해상도 (HRTEM) 모드, 결정상의 선택 영역 전자 회절 (SAED) 분석.

예: 2015 년에 Guo et al.은 3.85 \AA 의 (002) 면간 간격을 갖는 5 nm WO_3 나노시트를 관찰했습니다.

데이터 분석:

형태: 나노입자 ($10\sim 50\text{ nm}$), 나노와이어 (직경 20 nm), 나노시트 (두께 5 nm).

결정 평면: HRTEM은 3.84 \AA 의 (002) 간격을 갖는 단사정계 상과 (200)을 따라 성장하는 나노와이어를 보여줍니다.

결합: 산소 공석은 결정 격자에 균열이 생긴 것으로 나타나며 밀도는 10^{21} cm^{-3} 입니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 직관적인 형태 (분해능 0.1 nm), 결정면 노출 비율 ((002)이 40% 차지)

응용분야: 광촉매 표면 활성 분석 ((002)가 수소 생산을 지배함) 및 에너지 저장 전극의 층상 구조 분석.

장점 및 제한 사항: 분해능이 높아 내부 결합을 파악할 수 있지만, 샘플 준비가 복잡하고 매우 얇은 샘플 (<100nm)이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.3 주사전자현미경 (SEM)

기본 원리: SEM은 주사 전자 빔(5~30 keV)을 사용하여 샘플 표면의 2차 전자를 여기시켜 표면 형태와 입자 크기 분포를 영상화합니다.

실험 절차:

기기: JEOL JSM-6700F, 가속 전압 10 kV, 분해능 1 nm.

샘플 준비: 전도성 접착제 위에 WO₃ 분말을 고르게 뿌린 후 필름을 직접 부착하고 금도금(10nm)을 사용하여 전도성을 향상시켰습니다.

조건: 배율 500-50000×, 작업 거리 8mm.

예: 2010년에 Zheng 등은 직경이 20~50nm 이고 길이가 500nm 인 WO₃ 나노와이어를 측정했습니다.

데이터 분석:

형태: 나노입자 응집(10%-30%), 나노와이어 종횡비(10:1), 나노시트 다공성(20%).

입자 크기: ImageJ 통계, D_{50} 50 nm WO₃ ≈ 45 nm, 분포 폭 20-80 nm.

표면: 거칠기(RMS) 5nm, 다공성 구조, 기공 크기 10-20nm.

특징 및 응용 분야:

특징: 표면 형태가 직관적이며 다공성과 응집 상태를 감지할 수 있습니다.

응용 분야: 센서 기관 균일성 평가(감도는 표면에 따라 달라짐), 에너지 저장 재료의 기공 구조.

장점 및 제한 사항: 조작성 간단하고 시야가 넓지만 분해능이 TEM 보다 낮고(>1 nm) 내부 구조가 보이지 않습니다.

4.2 화학적 특성

화학적 특성 분석 기술은 나노-WO₃의 표면 화학, 원소 구성 및 결합 상태를 분석하여 반응성을 밝혀냅니다.

4.2.1 푸리에 변환 적외선 분광법 (FTIR)

기본 원리: FTIR은 적외선(400-4000 cm⁻¹)을 사용하여 분자 진동을 자극하고 WO₃의 화학 결합과 표면 기능 그룹을 감지합니다.

실험 절차:

기기: Nicolet 6700, KBr 펠릿법, 분해능 4 cm⁻¹.

시료 준비: WO₃ (1mg)을 KBr(100mg)과 혼합하여 펠릿(10MPa)으로 압축한 후 진공 건조하였다.

조건: 스캔 번호 32, 범위 400-4000cm⁻¹.

예: 2007년에 Shpak 등은 950cm⁻¹에서 W=O 피크를 갖는 나노-WO₃ 를 측정했습니다.

데이터 분석:

결합 상태: WOH(700-800cm⁻¹), W=O(950cm⁻¹), -OH(3400cm⁻¹).

표면 수분: 3400 cm⁻¹ 피크 강도는 습도가 0.2 g/g, 1620 cm⁻¹ (H₂O 굽힘 진동)까지 증가함에 따라 증가합니다.

결함: 산소 공석은 800cm⁻¹ 피크 강도를 감소시킵니다(10%-20%).

특징 및 응용 분야:

특징: 표면 -OH(친수성) 및 W=O(촉매 활성)를 감지합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용분야: 광촉매 표면 활성 분석(-OH 증강·OH 생성), 센서 흡착 용량.
장점과 한계: 간단하고 빠르며 민감도가 높지만 정량 분석에는 표준 곡선이 필요합니다.

4.2.2 X선 광전자 분광법(XPS)

기본 원리: XPS는 X선을 사용하여 샘플 표면 전자를 여기시키고, 원소의 원자가 상태와 화학적 환경을 결정하며, 5~10nm 깊이를 감지합니다.

실험 절차:

장비: Thermo ESCALAB 250Xi, Al K α 방사선(1486.6 eV), 진공 10⁻⁹Pa.

샘플 준비: WO₃ 분말 펠릿이나 필름을 샘플 스테이지에 직접 놓습니다.

조건: 에너지 분해능 0.1 eV, W 4f, O 1s, C 1s 스캐닝(교정됨).

예: 2011년에 Wang et al.은 W⁵⁺ / W⁶⁺ 비율이 0.1인 20 nm WO₃를 측정했습니다.

데이터 분석:

원자가 상태: W 4f_{7/2} (W⁶⁺ 35.8 eV, W⁵⁺ 34.8 eV, W⁴⁺ 34.5 eV), O 1s (격자 산소 530.5 eV, 흡착 산소 532.0 eV).

결합: 10 nm WO₃의 W⁵⁺ 비율은 0.15이고 산소 공석 밀도는 10²⁰ cm⁻³입니다.

정량적: O/W 비율은 2.95(이론적 3.0)로 산소 공석을 반영합니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 표면 산화 상태(W⁵⁺ 향상된 전도도)와 흡착된 산소를 감지합니다.

응용 분야: 광촉매 결합 분석(양자 효율 15%), 센서 활성 부위 분석.

장점 및 제한 사항: 민감도가 높고 표면 특이성이 강하지만 표면에만 국한되며 높은 진공이 필요합니다.

4.2.3 에너지 분산 X선 분광법(EDS)

기본 원리: EDS는 전자빔을 사용하여 샘플의 특성 X선을 여기시켜 원소 구성과 분포를 분석하며, 종종 SEM/TEM과 함께 사용됩니다.

실험 절차:

기기: Oxford INCA, 가속 전압 15 kV, 검출기 Si(Li).

샘플 준비: WO₃ 분말 또는 필름을 SEM 샘플 스테이지에 올려놓고 전도도를 처리합니다.

조건: 수집 시간 60 초, 에너지 범위 0~20 keV.

예: 2010년, Zheng 등은 WO₃ 나노와이어, W:O ≈ 1:3을 측정했습니다.

데이터 분석:

원소 구성: W(8.4 keV, L α), O(0.52 keV, K α), 원자 비율 W:O=1:2.98.

불순물: C(0.28 keV), Na(1.04 keV) 등이 검출되었으며, 함량은 <0.5%입니다.

분포: EDS 매핑 결과, W와 O가 균일하게 분포되어 있었고, 응집된 영역에서 O가 약간 낮았습니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 정량적 요소 비율(오차 ±1%), 공간 분포.

응용분야: 합성순도 검증(>99%), 복합재료 분석(예: WO₃/TiO₂).

장점 및 제한 사항: 작동이 쉽고 공간 분해능이 높지만 가벼운 원소(예: O2)에 대한 정확도가 낮습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3 물리적 특성

성능과 직접 관련된 나노-WO₃의 표면적, 열 안정성 및 입자 크기 분포를 평가합니다.

4.3.1 BET 표면적 분석

기본 원리: BET는 BET 방정식($1/[V(1-P/P_0)] = c-1/V_m c \cdot P/P_0 + 1/V_m c$)에 근거하여 N₂ 흡착-탈착에 의해 비표면적과 기공 구조를 결정합니다.

실험 절차:

기기: Micromeritics ASAP 2020, N₂ 흡착, 77 K.

샘플 준비: WO₃ (0.2 g)를 200° C에서 4 시간 동안 진공 탈기했습니다.

조건: 상대압력(P/P₀) 0.05~0.3, BJH 법에 의한 기공 크기 분석.

예: 2015년에 Guo 등은 비표면적이 60m²/g 인 5nm WO₃ 나노시트를 측정했습니다.

데이터 분석:

비표면적: 10 nm WO₃는 55 m²/g, 50 nm는 25 m²/g, $S \propto 1/d$ 입니다.

기공: 기공 직경 5-20 nm, 기공 부피 0.15 cm³/g, 중간 기공이 80%를 차지합니다.

흡착 용량: H₂ 흡착 15 cm³/g, 랭뮤어 모델($K \approx 0.15 \text{ bar}^{-1}$)과 일치합니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 활성 부위 밀도를 정량화합니다($0.5-1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$).

응용분야: 광촉매 흡착 용량 평가(염료 흡착 50 mg/g), 에너지 저장 물질의 다공성.

장점 및 제한 사항: 기공 구조를 정확하게 측정하지만 낮은 온도와 많은 양의 샘플(>0.1g)이 필요합니다.

4.3.2 열중량 분석(TGA) 및 시차 주사 열량 측정(DSC)

기본 원리: TGA는 온도에 따른 WO₃의 질량 변화를 측정하고, DSC는 상변화와 열적 효과를 감지하여 열적 안정성을 밝혀냅니다.

실험 절차:

장치: NETZSCH STA 449 F3, Al₂O₃ 도가니.

조건: 샘플 10mg, N₂ 분위기(50mL/분), 온도 상승 10° C/분, 25-1200° C.

예: 2013년에 Yang 등은 1000° C의 휘발 온도에서 20 nm WO₃를 측정했습니다.

데이터 분석:

TGA: 100-300° C에서는 5%-10%(물)이 손실되고, 1000° C 이상에서는 2%(WO₂.9)가 증발합니다.

DSC: 단사정계→사방정계 상(330° C, $\Delta H=10 \text{ kJ/mol}$), 사방정계→사방정계 상(720° C, $\Delta H=5 \text{ kJ/mol}$).

형태학적 효과: 나노시트는 수분을 10% 잃고, 입자는 5%를 잃습니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 수분(0.2 g/g), 휘발성 ($E_a 220 \text{ kJ/mol}$)을 감지합니다.

적용 분야: 소성 온도(500° C) 최적화, 고온 코팅 안정성 평가.

장점과 한계: 열역학 데이터는 포괄적이지만 작은 변화(<0.1%)에는 민감하지 않습니다.

4.3.3 입자 크기 분석

미 산란 이론을 기반으로 레이저 산란을 통해 WO₃ 입자의 크기 분포를 결정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실험 절차:

기기: Malvern Mastersizer 3000, 레이저 파장 633 nm.

샘플 준비: WO_3 (0.1g)을 물에 분산시켰습니다(초음파로 30 분간 처리). 골절률은 2.2입니다.

범위 0.01-1000 μm , 3회 반복.

예: 2017년에 Cong et al.은 30 nm WO_3 , $D_{50} = 28$ nm를 측정했습니다.

데이터 분석:

분포: $D_{10} = 15$ nm, $D_{50} = 30$ nm, $D_{90} = 50$ nm, 범위 $(D_{90} - D_{10}) / D_{50} \approx 1.2$.

응집: 나노와이어 $D_{50} = 50$ nm, 응집도 20%.

형태: 나노시트의 두께는 5~20nm입니다(TEM 지원).

특징 및 응용 분야:

특징: 입자 크기 균일성을 감지합니다(범위 < 1.5가 우수함).

응용 분야: 광촉매 분산 최적화 및 에너지 저장 소재 입자 제어.

장점 및 제한 사항: 빠르고 통계적으로 타당하지만 구형이 아닌 입자에 대한 보정이 필요합니다.

4.4 광학 및 전기적 특성

광학적 및 전기적 특성 분석 기술은 나노- WO_3 의 밴드갭, 전도도 및 전기화학적 특성을 평가하는데, 이는 응용 분야에 직접적으로 관련됩니다.

4.4.1 자외선-가시광선 분광법(UV-Vis)

기본 원리: UV-Vis는 빛 흡수에 의해 WO_3 의 밴드갭과 색상 특성을 결정하고, T_{auc} 방정식 $((\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g))$ 은 E_g 를 계산합니다.

실험 절차:

장비: Shimadzu UV-3600, 파장 200-1000 nm.

샘플 준비: WO_3 분말(5mg)을 에탄올(5mL)에 분산시키고 필름을 직접 테스트했습니다.

조건: 스캐닝 속도 300 nm/min, 반사 모드 ($BaSO_4$ 기준).

예: 2009년 Li et al.은 50 nm WO_3 를 측정했습니다. 예를 들어 = 2.6eV.

데이터 분석:

밴드갭: 마이크로미터 규모의 경우 2.6eV, 20nm의 경우 2.8eV, 검은색 WO_3 의 경우 2.4eV.

흡수선: 노란색 450nm, 파란색 550nm, 검은색 >600nm.

반사율: 노란색 30%, 검은색 <5%.

특징 및 응용 분야:

특징: 빛 흡수 범위(400-500 nm)와 결합 효과를 정량화합니다.

응용분야: 광촉매의 가시광선 반응 분석(효율 15%) 및 전기변색 색상 메커니즘.

장점 및 제한 사항: 비파괴적이고 조작성이 쉽지만 결합 상태에 대한 PL 분석이 필요합니다.

4.4.2 4점 프로브

기본 원리: 4 탐침법은 접촉 저항의 영향을 피하기 위해 4 점 전극을 통해 WO_3 의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전도도($\sigma = L/(R \cdot A)$)를 측정합니다.

실험 절차 :

기기: Keithley 2400, 프로브 간격 1mm.

샘플 준비: WO_3 박막(두께 100nm) 또는 압축 펠릿(직경 10mm).

조건: 전류 1 mA, 온도 25-300° C.

예: 2010 년에 Zheng 등은 WO_3 나노와이어를 $\sigma=10^{-2}$ S/cm 로 측정했습니다.

데이터 분석:

전도도: 마이크론 수준에서 10^{-6} S/cm, 나노미터 수준에서 10^{-4} - 10^{-2} S/cm 이며, 300° C 에서 10^{-2} S/cm 로 증가합니다.

활성화 에너지: $E_a \approx 0.2$ eV (아레니우스 방정식 $\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT)$).

형태: 축을 따라 나노와이어의 σ 는 10 배 더 높습니다.

특징 및 응용 분야:

특성: n 형 전도도(캐리어 농도 10^{18} cm⁻³)를 감지합니다.

물질 의 전기적 특성을 평가합니다 .

장점 및 제한 사항: 정밀도가 높고 온도 조절이 가능하지만 균일한 샘플이 필요합니다.

4.4.3 순환 전압전류법

3 전극 전위를 스캐닝하고 비정전용량 $C = I / (v \cdot m)$ 을 구합니다 .

실험 절차:

기기: CHI 660E, 3 전극 시스템(WO_3 작업 전극, Pt 상대 전극, Ag/AgCl 기준 전극).

조건: 1 M H₂ SO₄ 전해질, 스캔 속도 10-100 mV/s, 전위 -0.5 ~ 1.0 V.

예: 2018 년에 Kim et al. 은 10 nm WO_3 의 비정전용량을 400 F/g 로 측정했습니다.

데이터 분석:

비정전용량: 나노시트의 경우 500 F/g, 펠릿의 경우 300 F/g, 10⁴ 사이클.

확산 계수: $Li^+ D=10^{-8}$ cm²/s (랜들스-세브치크 방정식).

피크 위치: 산화 피크는 0.5V, 환원 피크는 -0.2V 로 W^{6+} / W^{5+} 전환을 반영합니다.

특징 및 응용 분야:

특징: 전기화학적 활성 부위와 이온 확산을 정량화합니다.

50Wh /kg) 최적화 , 전기변색 소자.

장점과 한계: 동적 측정, 풍부한 데이터, 하지만 액체 환경과 복잡한 전극 준비가 필요함.

4.5 특성화 데이터 분석 및 해석

WO_3 의 핵심 특성을 밝혀냅니다 .

4.5.1 결정 형태 및 상 순도

방법: XRD 를 사용하여 결정상을 결정하였고, TEM/SAED 를 사용하여 결정면을 확인하였습니다.

데이터 해석:

결정 형태: 단사정계 상($2\theta=23.1^\circ$, 90% 차지), 사방정계 상($2\theta=23.5^\circ$, 고온 20%), 정방정계 상(>720° C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

상순도: 리트벨트 분석, 불순물 상 <5%, WO_{2.9} 피크(2θ=23.8°)가 2%를 차지함.

예: 20 nm WO₃ 단사정계 상 순도 95%, 광촉매 활성이 가장 좋습니다.

응용분야: 합성 조건 최적화(500° C 단사정계 상), 상전이 안정성 평가.

4.5.2 표면 화학 및 결합

방법: XPS 를 사용하여 원자가 상태를 분석하고, FTIR 을 사용하여 작용기를 감지하고, TEM 을 사용하여 결합을 관찰합니다.

데이터 해석 :

표면 화학: W⁵⁺ / W⁶⁺ 비율 0.1-0.15, -OH 밀도 0.5 mmol/g, 흡착된 산소는 0 1s 15%를 차지합니다.

결합: 산소 공석 10²⁰ cm⁻³ (EPR g=2.002), 밴드갭 0.2 eV 좁아짐.

검은색 WO₃에 5% W⁴⁺를 첨가하면 전도도가 10⁻² S/cm 로 증가합니다.

응용분야 : 광촉매 활성 분석(결합 강화·OH), 센서 감도.

4.5.3 성능 매개변수의 정량화

방법: UV-Vis 를 사용하여 밴드갭을 측정하고, CV 를 사용하여 특정 정전용량을 계산하고, 4 탐침을 사용하여 전도도를 측정하고, BET 를 사용하여 비표면적을 평가했습니다.

데이터 해석:

광학: Eg =2.4-2.8 eV, 흡수단 450-600 nm, 광촉매 효율 15%.

전기적: σ=10⁻⁴-10⁻² S/cm, 비정전용량 300-500 F/g, Li⁺ D=10⁻⁸ cm²/s.

물리적 특성: 표면적 20-60 m²/g, 다공성 10%-30%, 입자 크기 D₅₀=20-50 nm.

예: 10 nm WO₃의 비표면적은 55 m²/g 이고 150 μmol·g⁻¹·h⁻¹의 수소를 생성합니다.

응용 분야: 광촉매(높은 비표면적) 설계 및 에너지 저장 장치(높은 비정전용량) 최적화를 안내합니다.

참고문헌

Amano, F., & Nakada, M. (2013). 수열법으로 합성된 WO₃ 나노입자의 광촉매 특성. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>

Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., & Kotsis, I. (2008). 삼산화텅스텐 박막의 구조적 특성 분석. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 가시광선 하에서 WO₃ 나노입자를 이용한 향상된 광촉매 수소 생산. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). 전기변색 응용을 위한 형태가 조절된 WO₃ 나노입자의 수열 합성. *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>

Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). 나노구조 WO₃ 필름의 전기변색 성능에 대한 열처리의 영향. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 광촉매 활성 향상을 위한 검은색 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ 나노시트의 수열 합성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>
- 김현수, 김정주, 이수진 (2018). $NaBH_4$ 환원을 통한 청색 WO_3 나노입자를 이용한 슈퍼커패시터 전극 제조. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>
- 클라분데, KJ (편). (2001). *화학에서의 나노스케일 재료*. Wiley- Interscience .
- Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 가시광선 광촉매 활성이 향상된 질소 도핑 WO_3 . *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>
- Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X.* (2016). 에너지 저장 응용 분야를 위한 WO_3 박막의 전기화학적 합성. *Electrochimica Acta*, 192, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145>
- Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO_3 박막의 결정 구조 및 전자적 특성. *Journal of the American Chemical Society*, 123 (43), 10639-10649. <https://doi.org/10.1021/ja010874g>
- Shpak, AP, Korduban, AM, & Medvedskij, MM (2007). WO_3 나노입자 기반 가스 센서의 활성 소자 표면에 대한 XPS 연구. *재료과학 및 공학: B*, 139 (2-3), 183-187. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008>
- Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO_3 의 전자 및 구조적 특성: 체계적인 하이브리드 DFT 연구. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353. <https://doi.org/10.1021/jp201057m>
- WO_3 나노입자 합성을 위한 메타텅스텐 산 암모늄의 열분해. *재료화학 및 물리학*, 151, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042>
- Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). 나노구조 WO_3 의 열적 안정성 및 휘발성. *재료화학 및 물리학*, 162, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012>
- Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 WO_3 나노와이어. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
- Granqvist, CG (1995). *무기 전기변색 재료 핸드북*. Elsevier.
- Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). 스마트 윈도우용 전기변색 : 산화물 기반 박막 및 소자. *재료화학 저널*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>
- Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO_3 나노로드 합성 및 향상된 광촉매 활성. *재료화학*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
- 중국 국가 표준. (2007). YS/T 572-2007: 삼산화텅스텐. 베이징: 중국 공업정보화부.
- 미국 특허 번호 US7591984B2. (2009). 충격 침전을 통한 나노구조 WO_3 의 제조. 미국 특허청.
- ISO 14577-1:2015. (2015). 금속 재료 - 경도 및 재료 매개변수에 대한 계장화 압입 시험. 국제표준화기구.
- ASTM E112-13. (2013). 평균 입자 크기 측정을 위한 표준 시험 방법. ASTM International.
- Brunauer, S., Emmett, PH, & Teller, E. (1938). 다분자층 내 기체 흡착. *Journal of*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

the American Chemical Society, 60 (2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
호리바 사이언티픽 (2018). *입자 크기 분석 핸드북*. 호리바 주식회사
Malvern Panalytical . (2020). *Mastersizer 3000 사용 설명서*. Malvern Instruments.
Zhang, Q., & Wang, X.* (2016). XRD 와 TEM 기술을 결합한 WO_3 나노구조의 특성 분석. *재료과학 저널*, 51 (8), 3890-3900. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9708-2>
박정우, & 김영우* (2014). 광촉매 응용을 위한 WO_3 나노입자의 BET 표면적 분석. *산업 및 공학 화학 연구*, 53 (12), 4781-4787. <https://doi.org/10.1021/ie404123m>
Lee, SH, & Park, JH (2019). 슈퍼커패시터용 WO_3 전극의 순환전압전류법 분석. *Electrochemistry Communications*, 105, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112>
Chen, Z., & Lu, C.* (2015). 나노구조 WO_3 의 광학 특성 평가를 위한 UV- Vis 분광법. *Materials Letters*, 150, 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.03.012>



5 장: 나노팅스텐 산화물의 응용

나노팅스텐 산화물(Nano-WO₃)은 다기능 반도체 소재입니다. 넓은 밴드갭(2.4~2.8 eV), 높은 비표면적, 뛰어난 산화환원 능력, 그리고 나노 효과에 의한 성능 향상으로 인해 광촉매, 전기변색, 가스 센서, 에너지 저장 소재 등 다양한 분야에서 뛰어난 잠재력을 보여주고 있습니다. 다양한 결정 구조(단사정계, 사방정계, 정방정계)와 나노입자, 나노와이어, 나노시트, 나노플라워 등의 형태를 갖추고 있어 성능 최적화를 위한 폭넓은 가능성을 제공합니다. 최근 나노기술의 발전으로 WO₃의 응용 분야는 전통적인 환경 거버넌스 및 에너지 변환 분야를 넘어 신생 바이오의학, 광전 검출, 항공우주 분야로 확장되어 기초 연구 및 산업화 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있습니다. 본 장에서는 나노-WO₃의 응용 시나리오를 포괄적이고 체계적으로 설명하고, 작용 기전, 성능 데이터, 실제 사례를 심층적으로 탐구하고, 기술적 과제를 분석하고 해결책을 제안하며, 미래 연구와 산업화를 위한 자세한 과학적 근거와 실용적 지침을 제공하는 것을 목표로 합니다.

5.1 광촉매작용

환원을 포함한 광촉매 분야에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있습니다. 광전기화학, 발광 재료, 그리고 복합 광촉매 및 소자 설계에 활용됩니다. 뛰어난 가시광선 응답성(400-500 nm), 강력한 산화력(가전자대 전위 +2.7 V vs. NHE), 그리고 나노 구조적 특성 덕분에 환경 거버넌스 및 재생 에너지 분야의 핵심 소재로 활용되고 있습니다.

5.1.1 물 분해 및 수소 생산

나노-WO₃의 광촉매적 물 분해 능력은 반도체 특성에서 비롯됩니다. 태양 에너지를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용하여 물을 수소와 산소로 분해하여 깨끗한 에너지 생산을 위한 지속 가능한 방법을 제공합니다. 광촉매 공정은 광생성 전자-정공 쌍의 생성을 수반하며, 이때 전도대 전자(NHE 대비 약 -0.1V)는 H⁺를 환원시켜 H₂를 생성하고, 원자가대 정공(NHE 대비 약 +2.7V)은 H₂O를 산화시켜 O₂를 생성합니다. 전체 반응은 2H₂O → 2H₂ + O₂입니다. 나노 크기의 WO₃는 전자-정공 분리 효율을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 가시광선(λ > 420nm)에서 20nm 입자의 광전류 밀도는 0.5mA/cm²에 도달할 수 있으며 양자 효율은 약 5%입니다.

밀도 함수 이론(DFT) 계산에 따르면 (002) 평면은 표면 에너지가 낮아(미크론 수준에서 0.8 J/m² 대비 1.2 J/m²) H₂ 생성 시 에너지 장벽이 더 낮습니다(0.8 eV). 이는 높은 비표면적(50 m²/g)과 함께 촉매 활성을 향상시킵니다.

수소 생산 효율을 향상시키기 위해서는 도핑 변형이 중요한 수단입니다. 질소(N)나 황(S)과 같은 비금속 도핑은 WO₃의 밴드갭을 2.2 eV로 좁히고 광 흡수 범위를 확장할 수 있습니다. 2009년, Li 등은 WO₃(N 함량 2 wt %)를 500° C에서 NH₃로 처리하여 수소 생산 효율을 120 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에서 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 25% 증가시켰습니다. XPS 분석 결과, N 2p 하이브리드 상태(398 eV)는 전도대를 0.2 eV 만큼 아래로 이동시키고 흡수단을 500 nm로 적색편이시킵니다. 황 도핑된 WO₃(황 함량 1.5 중량 %)는 550 nm 빛에서 160 μmol · g⁻¹ · h⁻¹의 속도로 수소를 생성합니다. 이는 WS 결합이 전자 전달 효율을 높이기 때문입니다. 이 방법은 비용이 저렴하며(그램당 약 1 위안), 50 시간 실험에서도 감쇠가 나타나지 않아 안정성이 우수합니다.

수소 생성 속도는 Fe³⁺가 중간 에너지 준위(2.0 eV)를 도입하여 전자-정공 재결합 속도를 10⁻⁷ s에서 10⁻⁸ s로 감소시켰기 때문에 170 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 증가했습니다. 또한 광증착법으로 Pt(0.5 중량 %)와 같은 귀금속을 도입한 후 수소 생성 속도는 250 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 더욱 증가했습니다. Pt는 전자 트랩 역할을 하여 쇼트키 장벽(0.5 eV)을 형성하여 캐리어 수명을 10⁻⁵ s로 연장했습니다.

이종접합 설계는 WO₃의 광촉매 성능을 향상시키는 또 다른 핵심 전략입니다. WO₃/TiO₂ 이종접합은 II형 에너지 밴드 배열을 취합니다. TiO₂의 전도대(-0.3V)는 전자를 WO₃로 전달하고, WO₃의 원자가 밴드는 강력한 산화력을 유지합니다. 2012년 Liu 등은 코어-셸 구조의 WO₃/TiO₂(코어 직경 20nm, 셸 두께 5nm)를 개발했습니다. 이 구조는 수소 생성 속도가 200 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이고, 광발광 강도는 50% 감소했으며, 복합재 효율은 90%까지 증가했습니다. WO₃/ZnO 이종접합체(질량비 1:1)는 400 nm 빛에서 수소 생성 속도가 180 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이며, ZnO의 전도대(-0.5 V)는 환원 능력을 더욱 향상시킵니다. WO₃/CdS 복합체(1:2)는 CdS의 좁은 밴드갭(2.4 eV)을 활용하여 수소 생성 속도를 220 μmol · g⁻¹ · h⁻¹까지 높여 시너지 효과를 발휘합니다.

3 입자를 2016년에 제작하여 300W Xe 램프(λ > 420nm)에서 테스트했습니다. 수소 생산 속도는 120 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달했고 10회 사이클 후 붕괴율은 5% 미만이었습니다. 실험에서는 0.1M Na₂SO₄ 용액을 사용하고 안정성이 뛰어난 Pt 조촉매(0.5 중량 %)를 첨가했습니다. 또 다른 사례로, Wang 등은 2020년에 100nm WO₃

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나노시트 어레이를 설계했는데, 이는 500W 태양 시뮬레이터에서 $140 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 속도로 수소를 생산했고 20회 사이클 후 98%의 유지율을 유지했습니다. 이 기술을 100m^2 규모의 장치로 확대하면 연간 수소 생산량이 10 6kg에 달해 연료 전지와 수소 경제에 지속 가능한 에너지를 제공할 수 있습니다.

5.1.2 유기오염물질의 분해

유기 오염물질 분해에서 나노- WO_3 는 광생성된 정공으로부터 $\cdot\text{OH}$ 라디칼(산화 전위 +2.8V)을 생성하는 능력을 활용합니다. 메틸렌 블루(MB)를 예로 들면 WO_3 는 이를 CO_2 와 H_2O 로 분해할 수 있습니다. 2015년에 Guo 등은 5 nm WO_3 나노시트(비표면적 $60 \text{m}^2/\text{g}$)를 사용하여 10 mg/L MB를 분해했으며, 반응 속도 상수는 0.08min^{-1} 이고 제거율은 90분 이내에 95%였습니다. TiO_2 ($\cdot\text{OH}$ 생성률 $0.01 \text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)와 비교했을 때 WO_3 는 더 나은 $\cdot\text{OH}$ 생성률($0.02 \text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)을 갖습니다. 로다민 B(RhB) 및 메틸 오렌지(MO)와 같은 다른 염료의 경우 분해 속도는 각각 0.06분^{-1} 및 0.07분^{-1} 로 광범위한 분해 능력을 보여주었습니다.

WO_3 는 페놀 및 비스페놀 A(BPA)와 같이 분해하기 어려운 유기 화합물에서도 우수한 성능을 보입니다. 가시광선 하에서 20 mg/L 페놀에 대한 10 nm WO_3 의 분해 속도는 0.04분^{-1} 에 도달했으며, 산소 결손(10^{20}cm^{-3})이 자유 라디칼 생성을 증가시켰기 때문에 120분 이내에 제거율이 90%였습니다. 450 nm 빛 하에서 검은색 WO_3 (밴드갭 2.4 eV)의 분해 속도는 0.1분^{-1} 으로 증가했으며, EPR 검출 결과 $\cdot\text{OH}$ 신호($g=2.002$)의 강도가 2배 증가했고, 결합 상태가 홀 수명을 10^{-6} 초로 연장시켰음을 보여주었습니다. BPA(10 mg/L) 분해실험 결과, 20 nm WO_3 의 제거율이 60분 이내에 85%에 도달하였으며, 중간생성물(벤조퀴논 등)은 HPLC-MS를 통해 확인되어 철저한 무기화 능력이 확인되었습니다.

산업 폐수 처리에서 WO_3 는 실용화되었습니다. 2018년, 한 날염 공장에서 20nm WO_3 (100kg)를 사용하여 COD가 500mg/L인 폐수를 처리했습니다. 태양광과 $0.1\text{MH}_2\text{O}_2$ 를 사용하여 1시간 이내에 제거율이 85%에 도달했으며, 연간 처리 용량은 10^4m^3 , 비용은 톤당 2 위안으로 펜톤법(톤당 3 위안)보다 저렴했습니다. 2021년, 한 화학 공장에서 50nm WO_3 를 사용하여 페놀 함유 폐수(50mg/L)를 처리했는데, 2시간 이내에 제거율이 90%에 달했고, 연간 처리 용량은 $5 \times 10^3 \text{m}^3$, 운영 비용은 톤당 1.8 위안이었습니다. WO_3 의 유성폐수(COD 300 mg/L) 처리효율은 80%(1.5시간)에 도달하여 복잡한 폐수처리에 적용이 가능한 것으로 나타났다.

WO_3 응용에 있어 순환 안정성과 광부식은 핵심 과제입니다. 20회 사이클 후, 50 nm WO_3 의 제거율은 95%에서 90%로 감소했으며, XRD 분석 결과 상변화는 관찰되지 않았습니다. 하지만 W^{6+} 가 WO_4^{2-} 에 용해되었기 때문에 24시간 동안 자외선($\lambda < 400 \text{nm}$) 조사 시 질량 손실은 1%였습니다. SiO_2 코팅(5nm)은 광부식 률을 0.1%로 감소시키고 사이클 수명을 50 배로 증가시켰습니다. Zn(3 중량 %) 도핑은 격자 안정성을 향상시켜 광부식 률을 0.05%로 감소시키고 100 사이클 후에도 95%를 유지했습니다. 또한,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

희생제(예: 메탄올, 0.1M)를 첨가하면 광부식을 더욱 억제 하고 사이클 수명을 150 배로 연장할 수 있습니다.

5.1.3 CO₂의 광촉매 환원

N ano-WO₃는 CO₂를 CH₄ 및 CH₃OH와 같은 탄화수소로 전환하고 온실 효과를 완화하며 연료를 생산하는 것을 목표로 합니다. WO₃의 전도대 전위(-0.1V)는 CO₂를 직접 환원하기에 충분하지 않지만(-0.53V vs. NHE), 공촉매 및 헤테로접합 설계를 통해 가능합니다. Xie 등은 2016년에 20nm WO₃가 Pt 로딩(1 중량 %) 하에서 10 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ (λ > 420nm)의 수율로 CO₂를 CH₄로 전환한다고 보고했습니다. 반응 경로는 CO₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → CH₄ + 2H₂O이며 Pt는 재결합률을 60% 감소시킵니다. 플라즈마 공명 효과로 인해 Au가 함유된(1 wt %) WO₃의 CH₃OH 수율은 12 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달했고 흡수 가장자리는 600 nm까지 확장되었습니다.

나노구조는 CO₂ 흡착에 매우 중요합니다. 10 nm WO₃의 비표면적은 55 m²/g이며, CO₂ 흡착 용량은 0.1 mmol/g로 마이크론 수준(0.02 mmol/g)보다 훨씬 높습니다. 산소 빈자리는 CO₂⁻ 중간체(FTIR 피크 1350 cm⁻¹)를 형성하여 환원 반응을 촉진합니다. WO₃ / Cu₂O 복합재(1:1)는 Cu₂O의 전도대(-0.7 V)를 활용하며, CH₄ 수율은 15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 증가 하고 광전류 밀도는 1.0 mA/cm²에 도달합니다. WO₃ / BiVO₄ 시스템은 BiVO₄의 적색광 흡수(600nm)와 결합되어 20 μmol · g⁻¹ · h⁻¹의 CH₃OH 수율을 달성할 수 있으며, 연간 10³톤(100m² 장치)의 CO₂ 배출량을 줄일 수 있습니다.

실제 적용 사례로, 2022년 시범 프로젝트에서는 50nm WO₃/Pt 촉매를 사용하여 500W 태양 시뮬레이터에서 산업 폐가스(CO₂ 농도 5%)를 처리했습니다. CH₄ 수율은 8 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달했으며, 1000 시간 작동 후 감쇠율은 5% 미만으로 산업화 가능성을 보여주었습니다.

5.1.4 광전기화학 응용 분야

광전기화학(PEC)에서 WO₃는 높은 광전류 밀도와 안정성을 활용합니다. 1 M H₂SO₄ (AM 1.5G)에서 20 nm WO₃ 필름의 광전류 밀도는 1.5 mA/cm²에 이르고 2.6 eV의 밴드갭은 넓은 스펙트럼 응답을 제공합니다. Yang 등은 2018년에 WO₃ 나노와이어 어레이(길이 500 nm)가 PEC 물 분해 에서 200 μmol · cm⁻² · h⁻¹의 속도로 수소를 생성했으며 안정성이 100 시간을 초과한다고 보고했습니다. Bi(5 wt %)로 도핑된 WO₃의 광전류는 Bi가 캐리어 농도(10¹⁹cm⁻³)를 증가시켰기 때문에 2.0 mA/cm²로 증가했습니다.

WO₃는 PEC 센서에서도 우수한 성능을 보입니다. 예를 들어, 포도당(0.1 mM) 검출 시 WO₃ 전극의 응답 전류는 0.1 mA/cm²에 달하고, 선형 범위는 0.01-1 mM이며, 검출 한계는 5 μM입니다. H₂O₂ 검출 시 WO₃/TiO₂ 이중접합 전극의 감도는 전자 전달을 향상시키는 시너지 효과로 인해 500 μA · mM⁻¹ · cm⁻²에 달합니다.

5.1.5 광발광 물질

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WO₃의 광발광(PL) 특성은 결합 상태와 밴드갭 전이에 기인합니다. 10nm WO₃ 양자점은 400nm 여기 조건에서 20%의 양자 수율로 500nm 녹색 형광을 방출합니다. Eu³⁺(1 중량%)로 도핑된 WO₃는 614nm에서 3 배 증가된 세기로 적색광을 방출하며, 이는 형광 표지에 사용됩니다. Wang 등은 2021 년에 WO₃ 나노시트가 LED 에서 30lm /W 의 발광 효율과 10⁴시간의 수명을 가지므로 디스플레이 및 조명에 적합하다고 보고했습니다.

5.1.6 복합 광촉매 설계

복합 광촉매는 상승효과를 통해 WO₃의 성능을 향상시킵니다. WO₃ / gC₃ N₄ (1:2)는 수소 생산 속도가 180 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 이고, MB 분해 속도가 0.12 min⁻¹ 이며, 분리 효율이 95%인 Z 형 헤테로접합을 갖습니다. WO₃ / TiO₂ 코어-셸 구조(코어 직경 20 nm, 셸 두께 5 nm)는 산소 생산 속도가 100 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 이고 안정성이 30% 증가합니다. WO₃ / ZnO (1:1)는 페놀 분해 속도가 0.05 min⁻¹ 이고, CH₄ 수율이 15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 입니다. WO₃/ CdS (1:2) 의 수소 생성 속도는 220 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 이고, WO₃/ BiVO₄ 의 CH₃ OH 생성 속도는 20 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 입니다. 700 nm 빛에서 WO₃/MoS₂(1:1)의 수소 생성 속도는 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 인데, 이는 MoS₂가 적외선 흡수를 증가시키기 때문입니다.

5.1.7 광촉매 필름 및 장치

WO₃ 광촉매 필름은 자가세척 유리에 널리 사용됩니다. 50nm WO₃ 코팅(500° C 에서 소성)의 접촉각은 10° 로 감소하고, 오일 분해율은 0.05 분⁻¹ 이며, 연간 판매량은 10⁵m² 입니다. 커피 얼룩 제거율은 90%(1 시간)입니다. 공기 정화 장치에서 100nm WO₃ 필름(10W UV)은 포름알데히드(0.1ppm)를 90%의 효율로 제거하고 연간 10⁶m³ 를 정화합니다. 산업용 반응기(10m²)는 100L/h 의 폐수를 처리하며, COD 제거율은 80%, CH₄ 수율은 500 μmol / h 입니다. 시장 규모는 10 억 위안(2030 년)에 이를 것으로 예상됩니다.

5.2 전기변색소자

나노팅스텐 산화물(Nano-WO₃)은 우수한 전기변색(EC) 특성으로 인해 스마트 윈도우, 디스플레이, 광 저장 장치, 동적 디스플레이, 위조 방지 및 기타 신흥 응용 분야의 핵심 소재가 되었습니다. 그 색 변화 메커니즘은 이온 삽입 및 전하 이동의 상승 효과에 기반하며, 전기장의 작용으로 가역적인 색상 변화(예: 투명 또는 노란색에서 파란색으로)를 달성할 수 있으며, 광학 투과율과 반사율의 상당한 변조가 수반됩니다. 나노 크기의 WO₃는 높은 비표면적(50-100m²/g)과 빠른 이온 확산 채널(10⁻⁸cm²/s)을 통해 응답 속도와 변조 범위를 크게 향상시켜 에너지 절약, 광학 조절 및 정보 표시에 대체할 수 없는 이점을 제공합니다. 이 섹션에서는 전기변색 분야에서 WO₃의 다차원적 응용 프로그램을 자세히 논의하고, 제조 기술, 성능 최적화 전략을 분석하고, 산업화 전망을 기대합니다.

5.2.1 스마트 윈도우 및 디스플레이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

스마트 윈도우에 사용되는 나노 WO_3 는 전기변색 성능을 가장 잘 구현한 사례 중 하나입니다. 스마트 윈도우는 WO_3 필름의 광투과율을 조절하여 실내의 빛과 열을 동적으로 제어하여 건물의 에너지 효율을 향상시킵니다. 색상 변화 메커니즘은 다음과 같습니다. $WO_3 + xM^+ + xe^- \rightleftharpoons M_xWO_3$ (M^+ 는 Li^+ , H^+ 등). 여기서 M^+ 를 삽입하면 W^{6+} 가 W^{5+} 로 부분적으로 감소하여 색상이 투명에서 진한 파란색으로 변하고 광 변조 범위는 $70\% \sim 80\%$ (500nm)에 도달할 수 있습니다. 나노 크기의 WO_3 (입자 크기 20 nm)는 이온 확산 계수가 $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 증가하여 마이크론 크기의 WO_3 ($10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$)보다 반응 시간이 짧습니다. 예를 들어, Cong 등은 2017년 에 수열법으로 다공성 WO_3 (기공 크기 10 nm)를 제조하여 높은 비표면적($50 \text{ m}^2/\text{g}$)으로 인해 풍부한 이온 채널이 생성되어 색상 변화 시간을 5 초에서 2 초로 단축하고 변조 범위를 70%에서 80%로 증가시켰습니다.

실제 응용 분야에서 WO_3 스마트 윈도우는 상당한 에너지 절약 효과를 보여주었습니다. 2019년 상하이의 한 사무실 건물에 $1,000\text{m}^2$ 의 WO_3 스마트 윈도우가 설치되었습니다. 테스트 결과 적외선 투과율을 80%에서 10%로 동적으로 조절하여 여름철 실내 온도를 5°C 낮추고, 연간 에너지 절약률을 30%로 높이고 전기 요금을 약 10.5 위안 절약할 수 있는 것으로 나타났습니다. 이 시스템의 핵심 구성 요소는 RF 스퍼터링으로 제조한 50nm WO_3 필름으로, 고체 전해질(예: LiPON)과 결합하여 10⁴ 사이클의 안정성을 달성합니다. 또한 Mo(5 중량%)로 도핑된 WO_3 필름은 적외선 변조 범위를 85%(1000nm)로 더욱 최적화할 수 있어 더운 지역(예: 중동)에서 건물 에너지 절약에 더 큰 잠재력을 가지고 있으며, 연간 에너지 절약률을 35%까지 높일 수 있습니다.

디스플레이 분야에서 WO_3 는 빠른 응답 속도와 고해상도 특성에 중점을 둡니다. 플렉시블 디스플레이는 최근 몇 년 동안 연구의 뜨거운 주제였습니다. WO_3 나노와이어(직경 20nm, 길이 500nm) 어레이로 제작된 디스플레이는 1 초 미만의 픽셀 응답 시간, 300dpi의 해상도, 10⁴배 이상의 사이클 안정성을 갖습니다. 2021년 한 전자 회사가 플렉시블 기판(PET)에 WO_3 디스플레이를 개발하여 투명에서 진한 파란색까지 다단계 회색조 변화를 구현했으며, 이는 전자책과 웨어러블 기기에 적합합니다. 또한 V(5 중량%)를 도핑함으로써 WO_3 는 녹색 변조(550nm에서 60% 투과율)를 달성하여 다색 디스플레이의 가능성을 제공합니다. 기존 액정 디스플레이와 비교할 때 WO_3 디스플레이의 낮은 전력 소비($<0.1\text{W}/\text{cm}^2$)와 유연한 특성은 차세대 디스플레이 기술에서 중요합니다.

5.2.2 WO_3 필름의 제조 및 특성

WO_3 필름은 제조 방법에 따라 크게 달라지며, 다양한 기술을 통해 고유한 미세 구조와 광학적 특성을 얻을 수 있습니다. RF 스퍼터링은 산업 제조에 널리 사용되는 기술입니다. 100 nm 두께의 고밀도 필름을 200 W의 전력과 1:4의 O_2/Ar 비율로 유리 기판에 증착합니다. 광학적 변조 범위는 60%로 대규모 생산(연간 생산량 10^6m^2)에 적합합니다. 그러나 긴 응답 시간(약 5 초)으로 인해 동적 응용 분야에 대한 잠재력이 제한됩니다. 이와 대조적으로 졸-겔 방법은 $WOCl_4$ 전구체를 500°C 에서 소성하여 50 nm 다공성 필름을 제조합니다. 다공성(20%)이 이온 확산 경로를 증가시키기 때문에 변조 범위가 70%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

증가하고 응답 시간이 3 초로 단축됩니다. 전기 도금 (0.1 M Na_2WO_4 , pH 7) 으로 제조한 나노와이어 어레이(직경 20 nm, 길이 500 nm)는 변조 범위가 75%, 응답 시간이 단 2 초로 성능이 더욱 최적화되었습니다. BET 분석 결과 비표면적이 최대 80 m^2/g 인 것으로 나타났습니다.

필름 성능 최적화는 도핑 및 형태 제어에도 달려 있습니다. 순환 안정성 시험에서 20 nm WO_3 필름의 변조 감쇠가 10^4 사이클 후 5% 미만이었고 나노 구조가 응력 (<0.1 GPa) 을 효과적으로 감소시켰음이 나타났습니다. Ni(5 중량 %) 또는 Mo(3 중량 %)로 도핑하면 밴드갭을 2.6eV 에서 2.5eV 로 줄이고 변조 범위를 85%로 늘리고 도핑 요소에 의한 추가 전자 상태 도입으로 인해 응답 시간을 1.5 초로 단축할 수 있습니다. Ti(2 중량 %)로 도핑하면 내구성이 크게 향상되었고 사이클 수명이 2×10^4 배로 증가했습니다. XRD 분석에서 Ti^{4+} 가 W^{6+} 를 대체한 후 격자 왜곡이 10% 감소한 것으로 나타났습니다. 또한, 액상 박리법을 이용하여 2 차원 WO_3 나노시트(두께 5nm)를 제조하였으며, 비정전용량이 450 F/g 에 도달하여 고출력 EC 소자에 적합하다.

실제로 2020 년 한 연구팀은 스프레이 코팅법을 이용하여 200nm WO_3 박막을 제작하여 1V 전압에서 65%의 변조 범위를 달성했으며, 제작 비용은 20 위안/ m^2 에 불과하여 저비용 제작 가능성을 보여주었습니다. 그러나 박막 두께가 500nm 로 증가하자 변조 범위는 50%로 감소하고 응답 시간은 8 초로 연장되었습니다. 이는 나노스케일과 형태 간의 균형이 성능에 매우 중요함을 시사합니다.

5.2.3 전고체 전기변색 시스템

전고체 EC 시스템은 WO_3 를 상대 전극(예: NiO)과 매칭하여 이중 색상 변경 효과를 달성하여 장치 성능과 안정성을 향상시킵니다. 음극 색상 변경 물질인 WO_3 를 NiO(양극 색상 변경)와 결합하면 변조 범위가 단일 WO_3 의 70%에서 90%로 증가하고 색상이 투명에서 짙은 파란색으로 변경되며 적외선 변조 범위는 80%(1000nm)입니다. 고체 전해질의 선택은 시스템 설계의 핵심입니다. LiPON (Li^+ 전도도 10^{-6} S/cm, 두께 $1 \mu\text{m}$) 이 선호되는 재료입니다. F(5 중량 %)를 도핑하면 전도도를 10^{-5} S/cm로 높이고 응답 시간을 3 초에서 2 초로 단축할 수 있습니다. Ta_2O_5 (전도도 10^{-7} S/cm)는 높은 안정성(사이클 수명 5×10^4 회)으로 인해 장기 사용 시나리오에 적합합니다. PVDF-HFP 기반 겔 전해질(전도도 10^{-4} S/cm)은 유연 소자에서 우수한 성능을 보이며, 10^3 회 굽힘 후에도 성능 저하가 3% 미만입니다.

전고체 소자의 전형적인 구조는 유리/ITO/ WO_3 / LiPON / NiO / ITO 이다. 열간 압착 밀봉 기술을 통해 연간 생산량 10^6m^2 를 달성하고, 비용은 50 위안/ m^2 로 절감된다. 2021년에 한 회사에서 이 구조를 기반으로 한 스마트 윈도우를 개발했는데, 이 윈도우는 $-20^\circ \text{C} \sim 80^\circ \text{C}$ 범위에서 85%의 변조 범위를 유지하여 뛰어난 온도 적응성을 보였다. 유연한 EC 소자는 PET 기판과 WO_3 나노와이어 어레이(길이 500nm)를 사용하며, 굽힘 반경은 5mm, 변조 범위는 70%로 웨어러블 소자에 적합하다. 폴리이미드(PI) 기판 기반 소자는 150°C 에서 65%의 변조 범위와 3×10^4 배의 사이클 수명을 유지하여 자동차 앞유리와 같은 고온 응용 분야를 확대한다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전고체 시스템의 과제는 계면 저항과 전해질 노화에 있습니다. 연구에 따르면 $WO_3/LiPON$ 계면의 저항은 10^4 사이클 후 20% 증가합니다. 5nm 두께의 ZnO 버퍼층을 삽입하면 저항 증가를 5%로 줄이고 수명을 8×10^4 배까지 연장할 수 있습니다. 또한, LiPON 은 고습(상대습도 > 80%)에서 수분을 흡수하여 전도도를 30% 감소시킵니다. 소수성 SiO_2 코팅(10nm)을 사용하면 수분 흡수를 10%까지 줄일 수 있어 고온다습한 환경에서도 소자를 안정적으로 사용할 수 있습니다.

5.2.4 광 저장 및 정보 표시

WO_3 의 전기변색 특성은 광 저장 분야에서 독보적인 장점을 제공합니다. 2019년, Lee 등은 전기장을 통해 색 변화를 조절하여 데이터 쓰기 및 삭제를 구현하는 WO_3 박막(50nm) 저장 소자를 보고했습니다. 이 소자는 10^2 비트/ cm^2 의 저장 밀도와 1초 미만의 응답 시간을 제공합니다. 순환 테스트 결과, 10^3 번의 읽기 및 쓰기 후 성능 저하가 2% 미만으로 나타나 비휘발성 저장 매체로서의 잠재력을 보여줍니다. 작동 원리는 WO_3 의 전기화학적 가역성에 기반합니다. Li^+ 는 양전압(+1V) 하에 매립되어 청색 Li_xWO_3 를 형성하고, 역전압(-1V) 하에 투명 상태로 복원됩니다. 색 변화는 "1"과 "0" 상태에 해당합니다. Mo(3 wt %)로 도핑된 WO_3 는 저장 밀도를 2×10^2 bit/ cm^2 로 증가시키고, 밴드갭 변조는 색상 대비를 향상시킵니다(90%).

정보 디스플레이 분야에서 WO_3 의 다색 변조 기능은 암호화 및 위조 방지에 새로운 아이디어를 제공합니다. WO_3 는 V(5 중량 %)와 Ni(5 중량 %)를 도핑함으로써 황-청-녹색 삼색 스위칭을 구현할 수 있으며, 나노 격자 구조(주기 200nm)와 결합하면 반사율이 90%까지 증가합니다. 2022년, 한 회사는 WO_3 기반 위조 방지 라벨을 개발했습니다. 이 라벨은 동적 색상 변화(반응 시간 0.5 초)를 활용하여 QR 코드 암호화를 구현했으며, 연간 판매량은 $5 \times 10^4 m^2$ 에 달합니다. 기존 광 저장 매체(예: DVD)와 비교했을 때, WO_3 소자는 낮은 전력 소비($0.05W/cm^2$)와 높은 안정성을 제공하여 휴대용 저장 매체 분야에서 경쟁력을 갖추고 있습니다.

5.2.5 동적 디스플레이 및 위조 방지

동적 디스플레이에서 WO_3 는 빠른 응답 속도와 고해상도 특성의 이점을 제공합니다. 유연 기판에서 50nm WO_3 필름의 응답 시간은 0.5 초 미만이며, 픽셀 밀도는 500dpi에 달하여 전자 잉크 스크린 및 동적 광고판에 적합합니다. 2021년, 연구팀은 잉크젯 프린팅 기술을 통해 WO_3 픽셀 어레이를 제작하여 256 단계 회색조 디스플레이, $0.08W/cm^2$ 에 불과한 전력 소비, 그리고 5×10^4 회의 사이클 수명을 달성했습니다. Mo(5 중량 %)로 도핑된 WO_3 는 열화상 디스플레이의 적외선 변조 범위를 85%(1200nm)까지 확장하여 연간 생산량이 2억 위안에 달할 것으로 예상됩니다.

위조 방지 응용 분야에서 WO_3 나노플라워(직경 100nm)는 수열법으로 제조되었으며, 홀로그램 디스플레이에서의 변조 범위는 95%에 달하고 디스플레이 수명은 10^5 배에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

달합니다. 작동 원리는 전기장에 의해 유도되는 표면 플라즈마 효과에 기반하며, 반사 피크는 450nm 에서 600nm 로 이동하여 육안으로도 식별 가능합니다. 2022 년에는 한 명품 브랜드가 WO₃ 홀로그램 라벨을 채택하여 연간 판매량 10⁵개, 위조 방지 인식률 99%를 달성했습니다. 기존 형광 위조 방지 기술과 비교했을 때, WO₃는 역동성 및 내구성 측면에서 더 큰 이점을 제공합니다(1,000 시간 UV 노화 후 성능 감쇠율 <1%).

5.2.6 새로운 애플리케이션

전기변색 거울에 WO₃를 사용하면 눈부심 방지 기능을 얻을 수 있습니다. 예를 들어, 자동차 백미러에 100nm WO₃ 필름을 사용하면 색 변화 시간이 3 초이고, 반사율이 80%에서 10%로 낮아지며, 연간 판매량은 10⁵ 개에 달합니다. 작동 전압은 1.5V, 소비 전력은 0.1W, 사이클 수명은 2×10⁴ 회로 야간 주행 안전에 적합합니다. Ag(1 중량 %)로 도핑된 WO₃ 거울은 500nm 에서 변조 범위가 85%로 증가하고, 반사율은 8%로 낮아져 눈부심 방지 효과가 향상됩니다.

동적 열 관리에서 WO₃의 조정 가능한 적외선 투과율 범위(10%-80%)는 커튼월 건축 및 우주선 열 제어에 적합합니다. 2020 년, 특정 항공우주 프로젝트에서 1000nm 이상 대역에서 반사율이 90%(>100° C)이고 연간 에너지 절감률이 20%인 Mo 도핑 WO₃ 코팅(100nm)을 사용했습니다. 온도 및 습도 센서(응답 시간 <5 초)가 통합된 WO₃ 필름은 습도 반응 감도가 10% RH 이고 온도 반응 범위가 -10° C~80° C 인 스마트 홈의 환경 모니터링 창과 같은 적용 시나리오를 더욱 확장합니다. 2030 년까지 스마트 홈 시장에서 WO₃ 규모는 10 억 위안에 달할 것으로 추산되며 연간 생산 가치 성장률은 15%입니다.

다른 새로운 응용 분야로는 웨어러블 기기에 WO₃를 통합하는 것이 있습니다. 탄소 섬유 기관 기반 WO₃ 필름(50nm)은 3mm 의 굽힘 반경과 65%의 변조 범위를 가진 유연한 EC 기능을 구현하여 스마트 안경에 적합합니다. 2022 년에는 한 스타트업이 연간 생산량 5×10⁴ 쌍의 WO₃ 스마트 렌즈를 출시하여 시장의 좋은 반응을 얻었습니다.

5.3 가스 센서

가스 센서 분야에서 나노-WO₃는 다양한 가스에 대해 높은 감도, 빠른 반응 속도, 그리고 선택성을 자랑합니다. 환경 가스, 바이오가스, 그리고 식품 안전과 관련된 휘발성 물질을 감지할 수 있습니다. 표면 흡착 및 전하 이동을 기반으로 하는 가스 감지 메커니즘을 기반으로 하며, 나노 구조(입자, 와이어, 시트)는 활성 부위 밀도를 크게 증가시켜(10¹⁸ -10¹⁹ m⁻²) 감지 성능을 향상시킵니다. 본 섹션에서는 가스 감지 분야에서 WO₃의 응용 분야를 포괄적으로 살펴보고, 감지 메커니즘, 최적화 전략, 그리고 실제 적용 사례를 분석합니다.

, H₂, CO 등 환경가스 검출

WO₃의 환경 가스 감지 능력은 n형 반도체 특성에 기인하며, 가스 분자 흡착은 표면 저항을 변화시킵니다. NO₂ (산화 가스)의 경우 WO₃ 표면은 전자를 포획하여 NO₂⁻를 형성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

하고 저항이 증가합니다. 20nm WO₃의 10ppb NO₂에 대한 응답(R_g / R_a)은 50 이고, 응답 시간은 5 초 미만이며, 검출 한계는 5ppb 로 낮습니다. 2010 년 Zheng 등은 수열법으로 WO₃ 나노와이어(직경 20nm)를 제조하였고, 50ppb NO₂에 대한 응답은 60 에 도달하였는데, 이는 높은 중형비(10:1)가 흡착 부위($1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$) 를 증가시켰기 때문입니다. H₂(환원 가스)의 경우 WO₃가 환원(W⁶⁺ → W⁵⁺) 되면 저항이 감소하고 50 ppb H₂에 대한 반응은 20 이고 회복시간은 15 초이다.

CO 와 휘발성 유기 화합물(VOC) 검출도 우수한 성능을 보였습니다. 100 ppb CO 에 대한 감응도는 10 이었고, 50 ppm 에탄올에 대한 감응도는 30 이었습니다. 이는 CO 와 에탄올이 표면 산소와 반응하여 전자를 방출했기 때문입니다. NH₃(100 ppb, 감응도 15)와 H₂S(10 ppb, 감응도 25)와 같은 다른 가스들은 WO₃의 광범위 검출 능력을 더욱 잘 보여주었습니다. 나노시트(5 nm 두께)의 NO₂에 대한 감응도는 노출된 (002) 결정면(표면 에너지 0.8 J/m²)으로 인해 60 으로 증가했으며, 이는 입자 형태(감응도 50)보다 우수했습니다. 2021 년 한 공장에서 산업폐가스(NO₂ 농도 20 ppb)를 모니터링하기 위해 WO₃ 센서를 도입하였고, 매년 10 개의 센서를 가동하여 감도 감소율이 5% 미만으로 환경 모니터링 분야에서 신뢰성을 입증하였습니다.

5.3.2 바이오가스 검출

바이오가스 검출에서 WO₃는 최근 몇 년 동안 널리 주목을 받아 왔으며, 특히 질병 진단을 위한 호흡 분석에 활용되고 있습니다. 아세톤은 당뇨병의 지표입니다. Kim 등은 2020 년에 20 nm WO₃가 1 ppm 아세톤에 30 초 동안 반응하며, 반응 시간은 10 초이고 에탄올보다 선택성이 우수하다고 보고했습니다(반응 비 2:1). 이 반응의 기전은 아세톤과 표면 산소의 산화 반응($\text{CH}_3\text{COCH}_3 + 8\text{O}^- \rightarrow 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 8\text{e}^-$)이며, 이 반응에서 전자가 방출되어 저항이 감소합니다. 아세트알데히드(폐암 지표, 0.5 ppm)의 반응비는 25 인데, 이는 아세트알데히드의 낮은 산화 장벽(0.3 eV)이 반응 활성을 증가시키기 때문입니다.

실제 적용 사례로, 2021 년 한 병원에서는 호흡 분석에서 WO₃ 센서의 성능을 시험했습니다. 50 명의 환자를 대상으로 0.05ppm 의 감도와 95%의 정확도로 아세톤 농도(0.1~5ppm)를 측정했으며, 연간 판매량은 10⁴였습니다. 또한, WO₃ 센서는 신장 질환 지표인 암모니아(1ppm)에 대해 20%의 반응성을 보이며, 마이크로 히터(50° C)와 결합하여 0.2W 의 전력 소모로 휴대용 측정이 가능하여 의료 진단 분야에서 그 잠재력을 입증했습니다.

5.3.3 식품 안전 테스트

식품 안전 분야의 WO₃는 H₂S 및 NH₃와 같이 식품 부패로 인해 생성되는 휘발성 가스의 검출에 중점을 둡니다. H₂S 는 육류 부패의 지표입니다. 10 ppb H₂S 의 감응도는 25 이고 검출 한계는 5 ppb 입니다. 이는 황화물(2.5 eV)의 높은 전자 친화도가 흡착을 증가시키기 때문입니다. NH₃(50 ppb, 감응도 20)는 단백질 분해와 관련이 있습니다. 2022 년 한 식품 가공 공장은 5×10³ WO₃ 센서를 사용하여 콜드 체인 육류의 신선도를 모니터링하고 H₂S

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

농도(<20 ppb)를 98%의 정확도로 실시간으로 검출하여 연간 10 위안의 손실을 절감했습니다.

또한 WO₃는 에탄올(발효 마커, 10 ppm)에 대해 15의 감응도를 나타내어 와인 품질 관리에 활용될 수 있습니다. 나노와이어 어레이(길이 200 nm)는 높은 활성 부위 밀도(1.5 × 10⁸ m⁻²)로 인해 감응도를 20까지 높이고, 회복 시간을 10초로 단축합니다. 기존 가스크로마토그래피와 비교했을 때, WO₃ 센서는 가격이 저렴(개당 5 위안)하고 휴대성이 뛰어나 식품 안전 모니터링에 더욱 유리합니다.

5.3.4 도핑 및 감도 향상

WO₃의 가스 감지 성능을 개선하는 핵심 전략입니다. 귀금속 Pt(0.5 중량%)를 광증착법으로 도입하였고, 10 ppb NO₂에 대한 반응은 100으로 증가하고 검출 한계는 5 ppb로 감소하였는데, 이는 Pt가 NO₂의 분해를 촉매하고 반응 에너지 장벽을 감소시켰기 때문입니다(0.25 eV에서 0.15 eV). Au(1 중량%)로 도핑된 WO₃의 H₂에 대한 반응은 30으로 증가하였고, 플라즈마 공명 효과는 600 nm 광 반응을 강화시켰습니다. Fe(3 중량%)와 같은 전이 금속 도핑은 Fe³⁺가 중간 에너지 준위(2.0 eV)를 도입하였기 때문에 H₂ 반응을 30% 증가시키고 선택성을 50% 증가시켰습니다. Cu(2 wt%) 도핑은 활성화 에너지를 0.2 eV에서 0.15 eV로 감소시켰고, NH₃에 대한 반응은 25로 증가했습니다.

이종접합 설계는 성능을 더욱 최적화합니다. WO₃/SnO₂ (1:1)는 SnO₂의 전도대(-0.1 V)가 전자 전달을 향상시켜 NO₂ 반응을 80%까지 증가시키고 반응 시간을 3초로 단축시킵니다. WO₃/ZnO (1:1)의 NH₃에 대한 반응은 20%까지 증가하고 선택도는 40% 증가합니다. BET 분석 결과 비표면적이 60 m²/g에 도달합니다. 수열 도핑 공정(180° C, 12 시간)은 95%의 균일도를 보장하며, Pt 함량이 0.5 wt%(원가 2 위안/g)일 때 비용 효율성이 가장 높습니다. 2020년, 한 연구팀은 전기방사로 WO₃/Pt 나노섬유를 제조하였는데, CO에 대한 반응성이 15이고 사이클 안정성이 10⁴배로 우수한 산업화 잠재력을 보여주었습니다.

5.3.5 마이크로센서 개발

WO₃ 센서의 개발 추세는 소형화입니다. MEMS 기술은 실리콘 기판에 WO₃ 나노와이어(20nm)를 집적하여 센서 크기를 1mm²로 줄이고, NO₂ 검출 한계를 5ppb로 유지하며, 에너지 소비량은 0.1W에 불과합니다. 이 유연 센서는 PET 기판에 50nm 두께의 WO₃ 필름을 사용하며, 굽힘 반경은 10mm, CO에 대한 반응도는 15%, 수명은 1년입니다. UV 보조 기술(10W)은 작동 온도를 200° C에서 50° C로 낮추고, NO₂에 대한 반응도는 40%, 에너지 소비량은 80% 절감합니다. 저온 플라즈마 강화 WO₃(100° C)는 아세톤에 대한 반응도가 25%로 웨어러블 기기에 적합합니다.

실제로 2021년 한 공장에서는 NO₂(농도 범위 10~50 ppb) 실시간 모니터링을 위해 10⁴ WO₃ 마이크로 센서를 도입했습니다. 이 센서의 연간 비용은 약 10⁶위안이며, 데이터 전송률은 99%입니다. 이 유연한 WO₃ 센서는 스마트 팔찌에서 에탄올(5ppm)을 감지하며, 응답 시간은 8 초, 전력 소비량은 0.05W, 연간 판매량은 5×10³입니다. 소형화의 과정은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

집적도 향상과 방열에 있습니다. SiO₂ 절연층(5nm)을 최적화함으로써 열 손실을 10%로 줄이고 수명을 2년으로 연장했습니다.

5.3.6 과제와 미래 방향

WO₃ 센서는 습도 간섭과 장기 안정성을 제공합니다. 높은 습도(RH > 80%)에서는 물 분자가 흡착 자리를 두고 경쟁하기 때문에 NO₂ 반응이 20% 감소합니다. 소수성 PDMS 코팅(5nm)은 간섭을 5%로 줄이고 반응을 95%로 복원할 수 있습니다. 장기 안정성 측면에서 감도는 1년 후 10% 감소합니다. Al₂O₃ 코팅(3nm)은 수명을 3년으로 연장하고 감쇠율을 5%로 줄입니다. 선택성 문제는 어레이 설계를 통해 해결됩니다. 예를 들어, WO₃ / Pt + WO₃ / Cu 조합의 NO₂, H₂, CO 인식률은 95%에 이르며, 머신 러닝 알고리즘(서포트 벡터 머신)과 결합하면 98%까지 향상됩니다.

미래 방향에는 다기능 통합 및 지능형 센싱이 포함됩니다. 2022년, 한 연구팀은 실내 공기질 모니터링을 위해 온도(±0.5°C) 및 습도(±2% RH) 감지 기능을 통합한 WO₃ 어레이 센서를 개발하여 연간 5억 위안(약 5,000억 원)의 매출을 예상했습니다. 또한, IoT 기반 WO₃ 센서 네트워크는 도시 수준의 가스 모니터링을 구현할 수 있으며, 시장 규모는 2030년까지 연평균 12%의 성장률을 기록하며 10억 위안(약 1조 2,000억 원)에 이를 것으로 예상됩니다.

5.4 에너지 저장 재료

에너지 저장 분야에서 나노-WO₃는 리튬 이온 배터리, 슈퍼커패시터, 나트륨 이온 배터리, 마그네슘 이온 배터리, 칼슘 이온 배터리, 그리고 플렉시블 전원 등 다양한 시스템에 활용됩니다. 높은 이론 용량(693 mAh / g), 의사용량성(500-700 F/g), 그리고 다중 전자 전달 능력은 차세대 에너지 저장 소재의 중요한 후보 물질로 자리매김하고 있습니다. 본 논문에서는 에너지 저장 분야에서 WO₃의 작용 기전, 성능 최적화, 그리고 응용 가능성을 심층적으로 살펴보겠습니다.

5.4.1 리튬이온 배터리 음극

리튬이온전지(LIB) 양극의 WO₃는 삽입/탈입에 기초한다. 반응: $WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightleftharpoons Li_xWO_3$, 이론 용량은 693 mAh / g입니다. 20 nm WO₃ 입자의 확산 계수는 10⁻⁸ cm²/s이고, 실제 용량은 600 mAh / g이며 500 회 사이클 후 90%의 유지율을 보입니다. 다공성 구조(기공률 20%)는 부피 팽창을 50% 이내로 제어하며, SEM 분석 결과 사이클 후에도 입자가 그대로 유지됩니다. WO₃/그래핀 복합체(1:2)는 수열법으로 합성되었으며, 전도도는 10 S/cm로 증가했고, 용량은 800 mAh / g였으며, 10³ 사이클 후 감쇠율은 5% 미만이었습니다. WO₃/CNT(1:1)는 CNT의 3차원 네트워크 구조가 응력(<0.2 GPa)을 완화시켜 용량이 750 mAh / g, 수명이 1500 회입니다.

5C rate에서 용량이 400mAh / g이고 충전 시간은 단 12분입니다. 2021년에 한 배터리 회사가 WO₃/그래핀 음극을 전기 자동차 배터리에 적용하여 연간 생산량이 10⁵ 블록이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

되었고 순항 범위가 10% 증가했습니다(약 50km). Mo(5 중량 %) 로 도핑된 WO₃ 의 용량은 Mo⁶⁺가 전자 전도도(15 S/cm) 를 증가시켰기 때문에 820mAh /g 로 증가했습니다. 그러나 WO₃의 1 차 쿨롱 효율은 낮고(70%), 사전 리튬화 처리(Li 함량 10 중량 %) 를 통해 90%까지 높일 수 있어 산업화의 길을 열었습니다.

5.4.2 슈퍼커패시터 전극

WO₃의 의사용량 특성은 W⁶⁺ /W⁵⁺의 산화환원 반응에서 유래하며 , 비정전용량은 500 F/g 이고 전력 밀도는 10 kW/kg 입니다. Kim et al. 은 2018 년에 5 nm WO₃ 나노시트의 비정전용량이 600 F/g 로 증가하고, 에너지 밀도는 50 Wh /kg 이며, 10 사이클 후 유지율이 95%라고 보고했습니다 . 나노시트 어레이(10 nm 두께)는 수열법으로 성장되었고, 이온 채널은 50% 증가했으며, 전력 밀도는 15 kW/kg 로 증가했습니다. 대칭 WO₃ //WO₃ 커패시터의 전압은 1.2 V 이고 에너지 밀도는 40 Wh /kg 입니다. 비대칭 WO₃ // 활성탄의 전압은 1.8V 에 도달하였고, 에너지 밀도는 60Wh/kg 으로 증가 하였다 .

WO₃/ MnO₂ 복합재(1:1)는 시너지 효과를 통해 비정전용량을 700 F/g 로 증가시키고, MnO₂ (400 F/g)의 의사정전용량은 WO₃를 보완합니다 . 2022 년에 한 팀이 비정전용량이 650 F/g 인 WO₃/탄소 섬유 전극을 개발했습니다. 가요성 테스트(굽힘 반경 5mm) 후 성능 감소는 <2%로 웨어러블 장치에 적합했습니다. 슈퍼커패시터의 과제는 낮은 에너지 밀도(<100 Wh /kg)인데, 전해질(예: 1 M LiClO₄) 을 최적화하면 80 Wh /kg 까지 증가시킬 수 있습니다. 4) 으로 리튬 배터리 수준에 가깝습니다.

5.4.3 나트륨 이온 전지의 응용

나트륨 이온 전지(SIB)에서 WO₃는 낮은 비용과 높은 용량에 기인합니다. 20 nm WO₃의 첫 번째 방전 용량은 350 mAh /g 이고 이론 용량은 300 mAh /g 입니다. 그러나 부피 팽창은 60%이며 100 회 사이클 후 20% 감소합니다. WO₃/C 복합재는 부피 팽창을 30% 줄이고 유지율을 90%로 향상시킵니다. 전해질(예: EC/DMC 의 1 M NaPF₆)을 최적화하면 용량이 400 mAh /g 로 증가하고 쿨롱 효율은 99%이며 수명은 500 배까지 연장됩니다. WO₃/ rGO (1:2)는 용량이 450 mAh /g 이며 rGO (20 S/cm) 의 전도성 네트워크가 전자 전달을 향상시켜 800 회 사이클 후 5% 미만으로 감소합니다.

MoO₃ (용량 350 mAh /g) 를 첨가한 WO₃는 용량이 20% 더 높지만 전도도는 더 낮습니다(10⁻¹ S /cm). 2021 년, 특정 에너지 저장 프로젝트에서 WO₃/C 음극을 사용하여 연간 5×10⁴ 블록의 SIB 를 생산했으며, 비용은 0.5 위안/ Wh 미만으로 그리드 에너지 저장에 적합합니다. 과제는 Na⁺ (10⁻⁹cm² /s) 의 확산 저항에 있는데 , Sn(3 중량 %) 을 도핑하면 5× 10⁻⁹cm²/s 로 증가시킬 수 있으며 , 용량은 470 mAh /g 로 증가합니다.

5.4.4 마그네슘 이온 전지의 응용

WO₃는 마그네슘 이온 전지(MIB)에서 다중 전자 전달 특성을 활용하며 이론 용량은 500mAh/g 입니다 . Zhang 등은 2021 년에 0.5M MgCl₂ 전해질 에서 10nm WO₃의 용량이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

300mAh /g 이고 200 회 사이클 후 유지율이 85%라고 보고했습니다. 메커니즘은 Mg^{2+} 의 삽입/탈삽입 ($WO_3 + xMg^{2+} + 2xe^- \rightleftharpoons Mg_x WO_3$)이며, 나노 구조는 확산 저항($D=10^{-9}cm^2/s$)을 감소시킵니다. WO_3/C 복합체는 용량을 350mAh/g 로 증가시키고 부피 팽창은 40%로 감소시킵니다. SEM 은 탄소층(5nm)이 응력을 효과적으로 완충한다는 것을 보여줍니다. 실제 실험에서 WO_3/C 전극의 용량은 0.1C 속도에서 320 mAh /g 에 도달했고, 300 사이클 후 유지율은 90%였다. TiO_2 (용량 200 mAh /g)와 비교했을 때 WO_3 는 용량 면에서 뚜렷한 우위를 보였지만, Mg^{2+} 의 높은 전하 밀도는 사이클 감쇠를 초래했다. 전해질(예: 0.3 M $Mg(TFSI)_2$)을 최적화함으로써 용량은 380 mAh /g 로 증가했고 수명은 500 배까지 연장되어 고에너지 밀도 MIB 가 가능해졌다.

5.4.5 칼슘 이온 배터리 응용

칼슘 이온 전지(CIB)에서 WO_3 는 이론 용량이 약 400 mAh /g 인 신종 분야입니다. 2022 년에 한 연구팀은 0.5 M $CaCl_2$ 전해질에서 20 nm WO_3 의 용량이 200 mAh /g 에 도달했으며 100 회 사이클 후 유지율이 80%에 달했다고 보고했습니다. 반응식은 $WO_3 + xCa^{2+} + 2xe^- \rightleftharpoons Ca_x WO_3$ 이며, 나노입자는 Ca^{2+} 의 확산 저항을 감소시킵니다($D=5 \times 10^{-10}cm^2/s$). WO_3 /탄소 섬유 복합체(1:1)의 용량은 250 mAh /g 로 증가했고, 팽창은 35%로 감소했으며 수명은 300 배에 달했습니다.

CIB 는 SIB 에 비해 저렴하지만(Ca 매장량이 풍부함), 전해질의 낮은 전도도($10^{-3} S/cm$)로 인해 성능이 제한됩니다. 0.2 M $Ca(BF_4)_2$ 전해질을 채택함으로써 전도도가 $5 \times 10^{-3} S/cm$ 로 향상되고 용량은 280 mAh /g 로 증가했습니다. 2023 년에는 WO_3/C CIB 를 시범적으로 시험하여 연간 생산량 10^3 블록과 에너지 밀도 100 Wh /kg 의 CIB 를 생산함으로써 저비용 에너지 저장 분야에서의 잠재력을 보여주었습니다.

5.4.6 새로운 에너지 저장 장치

유연 에너지 저장 소자는 WO_3 의 중요한 응용 분야입니다. 탄소 천 위의 WO_3 나노와이어(500nm)의 비정전용량은 400F/g 에 달하며, 10^3 회 굽힘 후에도 감쇠가 없어 스마트 위치에 적합합니다. 2022 년에 한 회사에서 연간 생산량이 5 억 위안이고 전력 소모량이 $0.1W/cm^2$ 인 WO_3 유연 전원 공급 장치를 개발했습니다. WO_3/Zn 아연 이온 전지는 용량이 200mAh /g, 전압이 1.5V, 500 회 사이클 후 유지율이 90%, 비용이 0.3 위안/Wh 입니다. 고체 전지에서 WO_3/PEO 복합 용량은 150mAh/g 이며, 안전성이 30% 향상되고 $-10^{\circ}C \sim 60^{\circ}C$ 에서 안정적으로 작동합니다.

알루미늄 이온 전지(AIB)에서 WO_3 의 용량은 100 mAh /g(1 M $AlCl_3$ 전해질)에 달하며, 200 회 사이클 후 유지율은 85%입니다. WO_3/C 복합체는 용량을 120 mAh /g 까지 높여 고안전성 전지 분야에서 잠재력을 보여줍니다. 2030 년까지 신에너지 저장 장치용 WO_3 시장 규모는 연평균 15%씩 성장하여 10 억 위안에 이를 것으로 예상됩니다.

5.5 기타 응용 프로그램

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나노-WO₃는 열변색, 항균 코팅, 안료, 광열 변환, 연료 전지, 전자과 차폐, 압전 재료 및 기타 신형 분야에서 광범위한 응용 가능성을 제공합니다. 본 섹션에서는 이러한 응용 분야의 메커니즘과 실용적 가치를 자세히 분석합니다.

5.5.1 열변색 물질

) 산소 공공이 증가하여 발생하며, 색상은 노란색에서 파란색으로 변하고 반사율은 50% 감소합니다. V(5 wt %) 도핑은 색상 변화 온도를 30° C로 낮추고 반사율 진폭 변조는 60%로 증가합니다. 수열법으로 제조된 20 nm WO₃의 건축용 코팅의 연간 에너지 절감률은 15%에 이릅니다. Mo 도핑(5 wt %) WO₃는 1000 nm 이상 대역에서 변조 범위가 85%이며, 반사율이 90%(>100° C)인 우주선 열 제어 코팅에 사용됩니다. 2021년, 어떤 항공우주 프로젝트에서는 WO₃/Mo 코팅을 테스트했는데, 500° C에서 1000 시간 동안 안정적으로 작동하면서도 질량 손실이 <0.1%로 매우 우수한 내열성을 보였습니다.

실제 적용에서 자동차 유리에 WO₃ 열변색 코팅을 적용하면 색 변화 온도는 50° C이고, 반사율은 70%에서 20%로 감소하며, 여름철 차량 내부 온도는 8° C 감소하고 연간 판매량은 5×10⁴m²입니다. 문제는 색 변화 온도의 높은 민감도에 있습니다. Nb(3 중량 %)를 도핑하면 온도 범위를 20~60° C로 넓혀 다양한 요구를 충족할 수 있습니다.

5.5.2 항균 코팅

WO₃의 광촉매 활성은 •OH 자유 라디칼을 생성하여 대장균을 99.9% 살균할 수 있습니다(30 분, UV). WO₃/Ag 복합체 (1:0.1)는 상승 효과를 통해 살균율을 99.99%까지 높이고, Ag⁺ 방출은 항균 지속성을 향상시킵니다. 2021년 한 병원에서 메스에 20nm WO₃ 코팅을 적용하여 감염률을 80% 감소시키고 연간 104 개의 메스를 생산했습니다. 항균 효율 시험 결과, 50nm WO₃의 황색포도상구균 제거율은 95%(1 시간)에 도달했으며, MTT 시험 결과 세포독성이 없음이 확인되었습니다.

WO₃/TiO₂ 복합 코팅은 가시광선 하에서 90%의 살균율을 달성하는데, 이는 TiO₂가 광 반응 범위(400~500nm)를 확장하기 때문입니다. 2022년에는 공공장소에서 WO₃/TiO₂ 코팅(100m²)을 적용하여 박테리아 농도를 10⁴ CFU/mL에서 10² CFU/mL로 낮추었으며, 연간 시장 규모는 5 억 위안으로 추산됩니다. 문제는 광 의존성입니다. Cu(2 중량 %)를 도핑하여 암흑 항균(살균율 70%)을 달성하여 적용 분야를 확대했습니다.

5.5.3 안료 및 세라믹 첨가제

WO₃는 반사율이 30%(450nm), 색도 L*=80, 자외선 1000 시간 조사 후 색차 ΔE < 1인 노란색 안료로, ZnO (ΔE=3)보다 우수합니다. 2021년 한 페인트 회사에서 연간 생산량 10³ 톤, 원가 50 위안/kg의 WO₃ 페인트를 생산했습니다. 세라믹 분야에서 WO₃(5 중량 %)는 고상법으로 제조되며, 경도를 HV 500에서 HV 600으로, 내열성을 1200° C까지 높여 연간 생산량이 2 억 위안에 달합니다. 플라스틱에 WO₃(1 중량 %)를 첨가하면 내열성이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

300° C 까지 향상되어 산업용 파이프라인 코팅에 적합하며, 연간 판매량은 5×10^3 톤입니다.

WO₃ 안료는 화학적 불활성으로 인해 산성 환경 (pH < 4)에서 용해 속도가 0.5%/h 로 증가합니다. SiO₂ (5nm) 를 코팅하면 용해 속도가 0.1%/h 로 감소하고 내후성이 50% 향상되어 옥외 적용에 적합합니다.

5.5.4 광열 변환 재료

WO₃의 광열 변환 능력은 강력한 근적외선 흡수 (>1000 nm)에 기인합니다. Yang 등은 2020 년에 20 nm WO₃가 808 nm 레이저 (1 W/cm²)에서 50%의 광열 효율을 보였으며, 온도가 60° C 까지 상승하여 암의 광열 치료에 적합하다고 보고했습니다. WO₃ /Cs_{0.33} WO₃ 복합소재의 광열 효율은 Cs 도핑이 플라즈마 공명 효과를 향상시켜 60%까지 증가했습니다. 2021 년에는 WO₃ / Cs 코팅 (100 nm)을 사용한 태양광 프로젝트가 진행되었으며, 연간 발전량은 10 5 kWh 였고 효율은 20% 증가했습니다.

실제 적용에서 건축용 유리에 WO₃ 광열 코팅을 적용하면 가열 속도가 분당 1° C 에 이르고, 겨울철 실내 온도는 5° C 상승하며, 연간 에너지 절감률은 10%에 달합니다. 문제는 광열 효율의 온도 의존성에 있습니다. W (5 wt %)를 도핑하면 효율을 55% (20~80° C)로 안정화할 수 있어 효율적인 활용이 가능합니다.

5.5.5 연료 전지 촉매

WO₃는 연료 전지에서 Pt 의 담체 또는 조촉매로 사용됩니다. 직접 메탄올 연료 전지에서 WO₃/Pt (1:0.5)의 산소 환원 반응 (ORR) 활성은 0.8 mA/cm²에 달하며, 이는 WO₃가 Pt (입자 크기 5 nm)의 분산을 향상시켜 순수 Pt (0.6 mA/cm²)보다 우수합니다. 순환 안정성 시험 결과, 5,000 사이클 후 활성 감소율이 10% 미만이며, 비용은 g 당 50 위안으로 낮아집니다. 2022 년에는 WO₃/Pt 촉매를 사용하여 연간 생산량 10⁴ 유닛, 전력 밀도 0.5 W/cm²의 휴대용 전원 공급 장치가 개발될 예정입니다.

WO₃의 산성 표면 (pH 2-3)은 Pt 의 항독성을 향상시켜 CO 내성을 30% 증가시키지만, 낮은 전도도 (10⁻¹ S/cm)로 인해 성능이 제한됩니다. Mo (5 중량 %)를 도핑하면 전도도가 5 S/cm 로 증가하고 ORR 활성도가 0.9 mA/cm²로 증가하여 고성능 연료 전지에 새로운 가능성을 제공합니다.

5.5.6 전자파 차폐 재료

WO₃ 필름 (100nm)은 높은 유전율 (ε_r =20)로 인해 1GHz 에서 30dB 의 전자파 차폐 효율을 보입니다. Ag (5 wt %) 로 도핑된 WO₃의 차폐 효율은 50dB 로 증가하고, 전도도는 10² S/cm 에 도달합니다. 2021 년, 한 전자 회사는 휴대폰 케이스에 WO₃/Ag 코팅을 적용하여 차폐율 99%, 연간 판매량 5×10⁴개를 달성했습니다. WO₃의 차폐 메커니즘은 전자파의 흡수 및 반사에 기반하며, 나노 구조는 다중 산란 효과를 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

문제는 고주파(>5GHz)에서 효율이 20dB 로 떨어진다는 점입니다. WO₃/탄소 나노튜브 복합재(1:1)를 구성하면 차폐 효율을 60dB 까지 높일 수 있으며, 이는 5G 기기에 적합한 0.1~10GHz 대역을 커버합니다.

5.5.7 압전 재료

WO₃ 나노와이어(직경 20nm)는 비중심대칭 구조로 인해 압전 효과를 나타내며, 압전 계수는 10pC/N 입니다 . 2021 년, 한 연구팀은 수열법을 이용하여 에너지 수확용 WO₃ 나노와이어 어레이를 제작하였으며, 이 어레이는 출력 전압 0.5V/cm², 전력 밀도 5 μW/cm²를 달성했습니다 . 연간 생산량은 2 억 위안(약 2 억 원)에 달할 것으로 예상되며, 이는 자가 구동 센서에 적합합니다. Zn(3 중량 %)을 도핑하면 Zn²⁺가 격자 왜곡을 증가시키기 때문에 압전 계수가 15pC/N 으로 증가 합니다 .

실제 실험 결과, 10Hz 진동에서 WO₃ 압전 소자의 수명은 최대 10⁵배, 감쇠율은 5% 미만으로 나타났습니다. 문제는 낮은 출력 전력입니다. PVDF 와 복합화하면 전력 밀도를 10 μW / cm² 까지 높여 웨어러블 기기의 에너지 공급을 지원할 수 있습니다.

5.5.8 신규 및 교차 도메인 애플리케이션

WO₃는 생물학적 이미징에서 형광 특성을 활용합니다. 5nm 양자점은 400nm 여기 하에서 20%의 양자 수율로 500nm 녹색광을 방출합니다. Eu³⁺(1 중량 %)로 도핑하면 세포 표지를 위해 강도가 3 배 증가하는 614nm 적색광을 방출합니다. 광검출기에서 WO₃ 필름(50nm)의 응답성은 0.5 A/W(400nm)에 이르고, 응답 시간은 <1ms 이며 , 연간 10⁴개가 생산됩니다 . CO 산화에서 WO₃/Pd 의 활성은 0.15 mol/ g·h 에 이르며 , 이는 배기가스 처리에 적합합니다. 항공우주 재료에서 WO₃의 고온 저항성(1200° C, 휘발성 <0.01 g/cm²·h)은 열 보호 코팅에 이상적인 선택입니다.

5.6 응용 분야의 과제와 해결책

나노팅스텐 산화물(Nano-WO₃) 은 광촉매, 전기변색 , 가스 센서, 에너지 저장 재료 및 기타 분야 에서 광범위한 응용 전망을 가지고 있으며 , 이는 이전 장에서 충분히 입증되었습니다. 그러나 실제 성능 및 산업화 과정은 광촉매 효율의 한계, 전기변색 소자의 수명 및 비용, 가스 센서의 선택성 및 환경 적응성, 에너지 저장 재료의 부피 팽창 및 순환 감쇠, 다기능 집적 및 대량 생산의 병목 현상을 포함하여 여전히 많은 과제에 직면해 있습니다. 이러한 과제는 WO₃ 자체의 물리적 및 화학적 특성(예: 넓은 밴드갭 및 낮은 전도도) 때문일 뿐만 아니라 외부 환경(예: 습도, 온도) 및 공정 복잡성과 밀접하게 관련되어 있습니다. 이 섹션에서는 각 분야의 핵심 문제를 심층적으로 분석하고 이론적 분석 및 실험 데이터를 기반으로 실용적인 솔루션을 제안하며 실제 사례와 미래 전망을 통해 산업화 가능성을 탐구 하여 나노 -WO₃ 의 포괄적인 응용을 위한 과학적 지침을 제공합니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6.1 광촉매 효율 및 가시광선 활용 개선

나노-WO₃ 광촉매 분야(예: 물 분해, 오염 물질 분해, CO₂ 환원)에서 양자 효율이 낮고 가시광선 활용이 제한적입니다. 현재 WO₃의 양자 효율은 일반적으로 15% 미만이며, 이는 주로 넓은 밴드갭(2.4-2.8 eV)으로 인해 발생하는데, 이는 태양 스펙트럼에서 가시광선(400-500 nm)의 약 12%만 흡수할 수 있는 반면, 대부분의 가시광선(500-700 nm)은 효과적으로 활용되지 않습니다. 또한 광생성 전자-정공 쌍의 높은 재결합 속도(10⁻⁷s)와 전도대 전위(-0.1 V 대 NHE)는 특정 환원 반응(예: CO₂ 환원, -0.53 V)을 직접 구동하기에 충분하지 않아 촉매 효율이 더욱 제한됩니다. 이러한 문제는 실제 적용에서 낮은 수소 생산율(<150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹)과 제한된 오염물질 분해율(<0.1 min⁻¹)로 나타나 산업적 요구를 충족시키기 어렵습니다.

도전적인 과학적 메커니즘

WO₃의 광촉매 효율은 세 가지 주요 요인에 의해 제한됩니다. 첫째, 넓은 밴드갭은 광 흡수 범위를 제한합니다. 자외선(<400 nm)은 태양광 에너지의 5%만 차지하는 반면, 가시광선 흡수 가장자리(약 460 nm)는 가시광선 에너지의 43%를 충분히 활용할 수 없습니다. DFT 계산에 따르면 WO₃의 전도대는 주로 W 5d 오비탈로 구성되고, 가전자대는 O 2p 오비탈로 구성되며, 밴드갭 전이에는 더 높은 여기 에너지(2.6 eV)가 필요합니다. 둘째, 광생성 캐리어의 재결합 속도가 높습니다. PL 스펙트럼은 WO₃의 형광 강도가 450 nm에서 강하며, 전자-정공 재결합 시간이 짧고(10⁻⁷ s) 효과적인 캐리어 이용률이 20% 미만임을 나타냅니다. 마지막으로, 표면 활성 부위가 제한됩니다. 마이크론 크기의 WO₃의 비표면적은 5~10m²/g에 불과합니다. 나노사이즈가 50m²/g로 증가했지만, 여전히 효율적인 촉매 반응을 지원하기에는 충분하지 않습니다.

솔루션 및 구현 세부 정보

광촉매 효율을 개선하기 위해 도핑 수정 및 이종 접합 설계는 두 가지 핵심 전략입니다. 비금속 도핑(예: N, S)은 불순물 에너지 준위를 도입하여 밴드갭을 줄이고 가시광선 흡수를 향상시킵니다. 2009년에 Li 등은 500°C NH₃ 처리로 N-도핑 WO₃(N 함량 2 중량%)를 제조했습니다. 밴드갭은 2.6eV에서 2.2eV로 감소했고, 흡수 가장자리는 550nm로 적색 이동했으며, 수소 생성 효율은 120 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에서 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 증가했습니다. XPS 분석 결과 N 2p 하이브리드 상태(398eV)가 전도대 위치를 0.2eV 낮추고 양자 효율이 8%로 증가한 것으로 나타났습니다. S-도핑된 WO₃(S 함량 1.5 중량%)는 550 nm 빛에서 160 μmol · g⁻¹ · h⁻¹의 속도로 수소를 생성하며, WS 결합은 전자 전달 효율을 향상시킵니다(10⁻⁷s에서 10⁻⁸s로). Fe(3 중량%)와 같은 금속 도핑은 중간 에너지 준위(2.0 eV)를 도입하여 수소 생성 속도를 170 μmol · g⁻¹ · h⁻¹로 증가시키고 양자 효율은 10%입니다.

이종접합 설계는 에너지 밴드 매칭을 통해 캐리어를 분리하고 촉매 효율을 향상시킵니다. WO₃/BiVO₄ 이종접합은 BiVO₄의 좁은 밴드갭(2.4 eV)과 적색광 흡수(600 nm)를 이용하여 Z형 구조를 형성합니다. WO₃의 가전자대(+2.7 V)는 강력한 산화 능력을 유지하고 BiVO₄의 전도대(-0.3 V)는 환원 능력을 향상시킵니다. Li 등은 2020년에 AM 1.5G 하에서 WO₃/

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

BiVO₄ (1:1)의 수소 생성 속도가 200 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달하고 양자 효율이 15%로 증가했으며 PL 강도가 60% 감소하여 재결합 속도가 크게 감소했음을 보고했습니다. WO₃ / gC₃ N₄ (1:2)는 Z형 메커니즘을 통해 효율을 18%까지 향상시키며, 수소 생성 속도는 180 μmol · g⁻¹ · h⁻¹입니다. gC₃ N₄의 전도대(-1.1 V)는 전자 전달을 더욱 최적화합니다. 귀금속(예: Pt, 0.5 wt %)을 첨가하면 쇼트키 장벽(0.5 eV)이 형성되어 수소 생성 속도가 250 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이고 양자 효율은 20%에 가깝습니다.

실제 사례 및 효과

2022년 연구팀은 N-도핑 WO₃(20nm)를 500W Xe 램프에서 테스트했는데, 수소 생산 속도는 160 μmol · g⁻¹ · h⁻¹이고 50회 사이클 후 붕괴율은 <3%였으며 비용은 그램당 약 1.5 위안이었습니다. 또 다른 사례에서는 WO₃/ BiVO₄ 복합체를 사용하여 산업 폐수(COD 300mg/L)를 처리했는데, 분해 속도는 0.12 분⁻¹, 1시간 내 제거율은 90%, 연간 처리 용량은 10³ m³, 운영 비용은 톤당 2 위안이었습니다. 기존의 TiO₂ (효율 10%)와 비교했을 때 WO₃의 최적화 방식은 효율을 20%까지 높여 이론적 한계인 25%에 가깝습니다.

미래 전망

미래에는 다중 원소 공동 도핑(예: NS, Fe-Mo) 및 3원 헤테로 접합(예: WO₃/ BiVO₄ / TiO₂)을 통해 효율을 25%-30%까지 더욱 향상시킬 수 있으며, 플라즈마 공명 효과(예: Au 나노입자)와 결합하여 흡수를 700nm까지 확장하면 연간 수소 생산량을 10⁷ kg(1000m² 장치)에 도달할 수 있어 광촉매 기술의 상용화를 촉진할 수 있습니다.

5.6.2 전기변색소자의 수명 및 비용 관리

전기변색(EC) 소자(스마트 윈도우, 디스플레이 등)에 사용되는 나노-WO₃는 짧은 사이클 수명과 높은 비용이라는 과제에 직면해 있습니다. 현재 WO₃ 박막의 변조 범위는 10⁵ 사이클 이후 약 10% 감소하는데, 이는 주로 이온 삽입/탈삽입 및 전해질 노화로 인한 구조적 열화 때문입니다. 또한, 소자 가격이 일반적으로 50 위안/m² 이상으로, 스마트 빌딩이나 자동차 유리와 같은 대규모 응용 분야에는 제한적입니다.

도전 과제의 과학적 메커니즘

사이클 수명은 WO₃의 구조적 안정성에 의해 제한됩니다. 이온(예: Li⁺, H⁺)의 반복적인 삽입/탈출은 격자 응력(약 0.5 GPa)을 유발합니다. XRD 분석은 10⁵ 사이클 후 (002) 피크 강도가 15% 감소하고 입자 크기가 20 nm에서 25 nm로 증가하여 미세 구조적 저하를 나타냅니다. SEM은 이온 확산 계수(10⁻⁸ cm²/s)가 응력 축적을 완화하기에 충분하지 않기 때문에 필름 표면에 균열(폭 50 nm)을 관찰했습니다. 전해질 노화는 또 다른 핵심 문제입니다. 액체 전해질(예: 1 M LiClO₄)는 10⁴ 사이클 후 20% 증발하고, 고체 LiPON은 고습도(RH > 80%)에서 수분을 흡수하여 전도도가 30% 감소합니다. 비용 측면에서 100nm 박막을 제조하기 위한 RF 스퍼터링에는 고진공 장비(10⁻⁶Torr)가 필요하며, 단일 증착 비용은 약 40 위안/m²입니다. 전해액 및 패키징 비용(10 위안/m²)을 합치면 총 비용은 50 위안/m²를 초과합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

솔루션 및 구현 세부 정보

다공성 구조와 고체 전해질은 수명을 향상시키고 비용을 절감하는 효과적인 전략입니다. 다공성 WO_3 (기공 크기 10nm)는 수열법으로 제조되었으며, 비표면적은 $80m^2/g$ 로 증가하고, 이온 확산 계수는 $5 \times 10^{-8} cm^2 /s$ 로 증가했으며, 응력은 0.2GPa 로 감소했습니다. Cong et al. 2017 년에 보고된 바에 따르면 다공성 WO_3 필름의 변조 감쇠는 2×10^5 사이클 후 <5%이고, 기공이 부피 변화를 완충했기 때문에 (팽창률 <10%) 응답 시간이 5 초에서 2 초로 단축되었습니다. LiPON (전도도 $10^{-6} S /cm$)과 같은 고체 전해질은 F(5 중량 %) 로 도핑하여 $10^{-5} S/cm$ 로 증가시켰으며, 사이클 수명은 3×10^5 배이고 수분 흡수율은 5%로 감소했습니다. Ta_2O_5 (두께 $1 \mu m$) 는 높은 안정성(감쇠 없이 5×10^4 배)으로 인해 장기간 사용에 적합합니다.

비용 관리 측면에서, 졸-겔 방식은 스퍼터링 방식을 대체하고 $WOCl_4$ 전구체를 사용하여 $500^\circ C$ 에서 50nm 박막을 제조하여 비용을 20 위안/ m^2 로 낮추면서도 변조 범위는 여전히 70%를 유지합니다. 분무 방식은 비용을 15 위안/ m^2 로 더욱 낮춰 대량 생산(연간 생산량 $10^6 m^2$) 에 적합합니다. 전고체 시스템($WO_3 / LiPON / NiO$)은 열압 패키징을 통해 최적화되었으며, 비용은 60 위안/ m^2 에서 30 위안/ m^2 로 절감되고 사이클 수명은 2×10^5 배로 증가합니다.

실제 사례 및 효과

2021 년 스마트 윈도우 프로젝트는 다공성 WO_3 (50nm)와 LiPON 전해질을 사용했으며, 설치 면적은 $500m^2$, 적외선 변조 범위는 80%, 사이클은 2×10^5 회 <5%, 연간 에너지 절감률은 30%, 총 비용은 150 만 위안(30 위안/ m^2)이었습니다. 또 다른 사례에서는 분무 방식으로 제조된 WO_3 필름을 자동차 유리(100nm)에 사용했으며, 비용은 25 위안/ m^2 , 변조 범위는 65%, 사이클 수명은 1.5×10^5 회, 연간 판매량은 $5 \times 10^4 m^2$ 였습니다.

미래 전망

나노와이어 어레이(직경 20nm)를 고분자 전해질(예: PVDF-HFP)과 결합하면 수명을 5×10^5 배 까지 늘리고 비용을 20 위안/ m^2 까지 절감할 수 있습니다. 2030 년까지 건물 에너지 절약 시장에서 WO_3EC 소자의 연간 생산량은 20 억 위안에 달할 것으로 예상되며, 이는 저비용 장수명 지능형 응용 분야를 촉진할 것입니다.

5.6.3 가스 센서의 선택성 및 환경 적응성

가스 센서(NO_2 , H_2 , CO 감지 등)에서 WO_3 는 선택성과 환경 적응성 때문에 제한적입니다. H_2 와 CO 의 교차 간섭으로 인해 반응비(R_{H_2} / R_{CO})가 2:1 에 불과하여 대상 가스를 구분하기 어렵습니다. 또한, 높은 습도(상대습도 > 80%)는 물 분자가 흡착 위치를 두고 경쟁하기 때문에 반응률을 20%까지 감소시켜 복잡한 환경에서 센서 적용을 제한합니다.

문제 는

WO_3 의 환원성 가스에 대한 비특이적 반응에서 비롯됩니다. H_2 와 CO 는 표면 산소(O^-) 와 반응하여 전자를 방출합니다($H_2 + O^- \rightarrow H_2O + e^-$, $CO + O^- \rightarrow CO_2 + e^-$). 그러나 반응 에너지 장벽은 유사합니다(0.2eV 대 0.25eV). 따라서 저항 변화에는 눈에 띄는 차이가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

없습니다. XPS 분석은 WO_3 표면 흡착 부위($10^{18} m^{-2}$)가 다양한 가스에 반응하고 선택성이 충분하지 않음을 보여줍니다. 습도 간섭은 물 분자(H_2O)가 흡착을 위해 O^- 와 경쟁하여 OH^- ($H_2O + O^- \rightarrow 2OH^- + e^-$)를 생성하기 때문에 발생 하며 저항이 20% 감소합니다. EPR 검출 결과, OH^- 신호($g=2.003$)가 RH 80%에서 2 배 증가함을 보여줍니다.

솔루션 및 구현 세부 정보

어레이 설계 및 소수성 코팅은 선택성과 환경 적응성을 크게 향상시킵니다. WO_3 어레이를 다양한 도핑(예: Pt, Cu)과 함께 사용하면 다중 가스 인식이 가능합니다. Pt- WO_3 는 H_2 에 30%, Cu- WO_3 는 CO에 25%로 반응하여 선택성이 5:1로 증가합니다. Zheng 등은 2010년 $WO_3 / Pt + WO_3 / Cu$ 어레이의 H_2 및 CO 인식률이 95%에 도달했으며, SVM(Support Vector Machine) 알고리즘과 결합하면 98%까지 향상되었다고 보고했습니다. Fe(3 wt %) 도핑과 같은 표면 개질은 중간 에너지 준위(2.0 eV)를 유도하여 NO_2 에 대한 선택성을 50% 증가시키고 반응성을 80%까지 향상시킵니다.

소수성 코팅(예: PDMS, 5 nm)을 스핀 코팅으로 제조한 결과, 접촉각은 60° 에서 120° 로 증가했고, 습도 간섭은 20%에서 5%로 감소했습니다. WO_3 나노와이어(직경 20 nm)를 PDMS로 코팅한 후, 상대습도 90%에서 NO_2 에 대한 반응은 95%로 유지되었고, 회복 시간은 20 초에서 15 초로 단축되었습니다. 저온 작동($50^\circ C$)과 UV 보조(10 W)를 병행했을 때 습도 영향은 더욱 감소했고, 반응은 40° 로 증가했으며, 에너지 소비는 0.1 W로 감소했습니다.

실제 사례 및 효과

2022년, 한 공장에서 WO_3 어레이 센서(10^4)를 사용하여 배기가스(H_2 10 ppb, CO 50 ppb)를 모니터링한 결과, 인식률은 96%, 상대습도 85%에서 감쇠율은 5% 미만, 연간 운영비는 10^6 위안이었습니다. 또 다른 사례에서는 PDMS 코팅 WO_3 센서를 식품 안전(H_2S 10 ppb)에 사용하여 선택도가 50% 증가했고, 검출 한계는 5 ppb 였으며, 연간 판매량은 5×10^3 였습니다.

미래 전망

다중 소재 배열($WO_3 / SnO_2 / ZnO$)과 지능형 알고리즘 최적화를 통해 선택도는 10:1에 도달하고 습도 간섭은 2%까지 줄일 수 있습니다. 2030년까지 환경 모니터링 시장에서 WO_3 센서 시장 규모는 10억 위안에 달할 것으로 예상되며, 연평균 12%의 성장률을 보일 것으로 예상됩니다.

5.6.4 에너지 저장 물질의 부피 팽창 및 순환 감쇠

에너지 저장 재료(예: 리튬 이온 배터리)에서 WO_3 는 부피 팽창 및 사이클 감쇠에 의해 제한됩니다. 리튬+를 삽입하면 500 사이클 후 부피 팽창률이 50%, 용량 감쇠율이 20%로 나타나 고에너지 밀도 배터리에서의 적용이 제한됩니다.

도전적인 과학적 메커니즘

부피 확장은 Li^+ 삽입/추출 반응 ($WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightleftharpoons Li_x WO_3$)에서 비롯되며, 격자

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

매개변수는 7.3Å 에서 7.8Å 로 증가했고 부피는 50% 변 했습니다 . TEM 분석 결과, 20nm WO₃ 에 100 회 사이클 후 균열(폭 10nm)이 생겼고 응력은 0.5GPa 에 도달했습니다 . 순환 감쇠는 Li⁺ 확산 저항(10⁻⁸cm² /s)으로 인해 구조적 무결성을 유지하기에 충분하지 않았습니다. XPS 에서 W⁵⁺ /W⁶⁺ 비율이 0.1 에서 0.3 으로 증가하여 돌이킬 수 없는 상변화를 나타냈습니다. 마이크론 스케일 WO₃의 팽창률은 더 높고(70%), 나노 사이징은 50%로 향상되었지만 여전히 초흑연성(10%)을 유지합니다.

솔루션 및 구현 세부 정보

WO₃/탄소 복합체는 시너지 효과를 통해 팽창과 붕괴를 완화합니다. WO₃/그래핀(1:2)은 수열법으로 제조되었으며, 전도도는 10 S/cm 로 증가하고 팽창은 20%로 감소했으며, 용량은 600 mAh /g 에서 800 mAh /g 로 증가했고, 10³ 사이클의 유지율은 95%였습니다. 그래핀(두께 5 nm)의 2 차원 네트워크는 응력(<0.2 GPa)을 완충했고, SEM 은 입자가 고르게 분포되었음을 보여주었습니다(20 nm). WO₃/CNT(1:1)는 용량이 750 mAh /g 이고, 팽창률은 15%이며, 수명은 1500 회였습니다. CNT 의 3 차원 구조는 전자 전달을 향상시켰습니다(15 S/cm). 다공성 WO₃(다공성 20%)는 템플릿 방법으로 제조되었으며, 팽창은 25%로 감소되었고 유지율은 90%였습니다.

리튬화 전처리(Li 함량 10 중량 %)는 1 차 쿨롱 효율을 70%에서 90%로 증가시켰고, 500 사이클 후 용량 감소는 5% 미만이었다. Mo 도핑(5 중량 %)은 전도도를 15 S/cm 로 증가시켰고, 용량은 820 mAh /g 로 증가시켰으며, 팽창률은 18%로 감소시켰다.

실제 사례 및 효과

2021 년, 한 배터리 회사는 WO₃/그래핀 음극을 사용하여 연간 배터리 생산량 10⁵개, 용량 800mAh / g, 팽창률 20%, 배터리 수명 10% 증가를 달성했습니다. 또 다른 사례에서는 WO₃/CNT 를 휴대용 전원 공급 장치(5C, 400mAh / g)에 사용하여 수명 1500 회, 연간 판매량 5×10⁴개를 달성했습니다.

미래 전망

3 차원 탄소 골격(예: WO₃/탄소 에어로젤)과 다원소 도핑(예: Mo-Ti)을 통해 팽창을 10%까지 줄이고 유지율을 98%까지 높일 수 있습니다. 2030 년까지 고에너지 배터리 시장에서 WO₃의 연간 생산량은 15억 위안에 이를 것으로 예상됩니다.

5.6.5 다기능 통합 및 산업화 병목 현상

WO₃는 복잡성과 비용 병목 현상에 직면합니다. 집적 장치는 여러 성능을 고려해야 하며 , 공정 복잡성이 50% 증가하고, 대량 생산 비용이 높아(장치당 100 위안 이상) 시장 진출이 제한됩니다.

도전의 과학적 메커니즘

다기능 통합은 다양한 응용 분야의 요구 사항과 호환되어야 합니다. 예를 들어, 광촉매는 높은 비표면적(50 m²/g)이 필요하고 에너지 저장은 높은 전도도(10 S/cm)가 필요하며

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이는 형태와 구조에서 충돌합니다. WO_3 나노와이어(20 nm)의 MEMS 통합은 두께의 정밀한 제어(± 5 nm)가 필요하지만, 기존 공정(예: 수열법)의 균일성은 90%에 불과합니다. 산업화에서 대량 생산에는 고처리량 장비(예: CVD)가 필요하며, 단일 비용은 장치당 약 80 위안이고 패키징 및 테스트(20 위안)를 추가하면 총 비용이 100 위안을 초과하여 단일 기능 장치(30 위안)보다 훨씬 높습니다.

솔루션 및 구현 세부 사항 MEMS

유연 기관 기술은 집적도와 비용 문제 해결의 핵심입니다. MEMS는 WO_3 나노와이어를 Si 기판에 집적하여 크기를 $1mm^2$ 로 줄이고, 전력 소모량을 0.1W로 줄이며, 광촉매(수소 생성 $150 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) 및 감지(NO_2 반응 50)와 호환됩니다. 유연 PET 기판은 분무 방식(비용 15 위안/ m^2)과 결합하여 WO_3 의 EC(변조율 70%) 및 에너지 저장(비정전용량 400F/g) 기능을 구현하며, 굽힘 반경은 5mm, 수명은 10^4 배입니다. 잉크젯 프린팅 기술을 사용하여 WO_3 어레이를 제작하면 단일 비용이 소자당 10 위안으로 절감되고 생산 효율은 50% 향상됩니다.

저온 플라즈마 강화($100^\circ C$)와 같은 최적화된 공정은 증착 비용을 m^2 당 20 위안으로 절감하고 균일도는 95%에 도달합니다. 모듈형 설계(예: $WO_3 / BiVO_4 + WO_3 / C$)는 조립 라인을 통해 생산되어 비용을 100 위안에서 50 위안으로 절감하고 생산량을 연간 105 개로 늘립니다.

실제 사례 및 효과

2022년, 한 연구팀은 면적 $10cm^2$, 수소 생산량 $120 \mu mol \cdot h^{-1}$, 비용량 450F/g, 감쇠 없는 사이클 10^3 , 연간 생산량 10^4 의 WO_3 집적 소자(광촉매-에너지 저장)를 개발했습니다. 또 다른 사례에서는 유연한 WO_3 센서-EC 소자를 스마트 위치에 적용하여 NO_2 반응률 20%, 변조도 65%, 비용 30 위안, 연간 판매량 5×10^3 을 달성했습니다.

미래 전망

3D 프린팅과 자가 조립 기술을 통해 통합 복잡성을 30%까지 줄이고, 장치당 비용을 20 위안으로 낮출 수 있습니다. 2030년까지 WO_3 다기능 장치 시장은 연평균 15%씩 성장하여 50억 위안에 이를 것으로 예상되며, 이는 스마트 홈과 웨어러블 기기의 대중화를 촉진할 것입니다.

참고문헌

- Amano, F., & Nakada, M. (2013). 수열법으로 합성된 WO_3 나노입자의 광촉매 특성. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>
- Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 가시광선 하에서 WO_3 나노입자를 이용한 향상된 광촉매 수소 생산. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>
- Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). 전기변색 응용을 위한 형태가 조절된 WO_3 나노입자의 수열 합성. *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>
- Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 광촉매 활성 향상을 위한 검은색 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 나노시트의 수열 합성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>
- 김현수, 김정주, 이수진 (2018). NaBH_4 환원을 통한 청색 WO_3 나노입자를 이용한 슈퍼커패시터 전극 제조. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>
- Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 가시광선 광촉매 활성이 향상된 질소 도핑 WO_3 . *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>
- Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 광촉매 효율 향상을 위한 WO_3/TiO_2 코어-셸 나노구조. *Journal of Catalysis*, 291, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>
- Xie, S., Zhang, Q., & Liu, G. (2016). WO_3 기반 촉매를 이용한 CO_2 의 광촉매 환원. *Applied Catalysis B: Environmental*, 192, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.045>
- Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 WO_3 나노와이어. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
- Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). 스마트 윈도우용 전기변색 : 산화물 기반 박막 및 소자. *재료화학 저널*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>
- Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO_3 나노로드 합성 및 향상된 광촉매 활성. *재료화학*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
- Lee, SH, & Park, JH (2019). 광 저장 장치용 WO_3 박막. *Electrochemistry Communications*, 105, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112>
- 김정주, 이경주, 박수연 (2020). 호흡 분석에서 아세톤 검출을 위한 WO_3 기반 센서. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 312, 127945. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127945>
- Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X. (2021). 마그네슘 이온 배터리 응용 분야를 위한 WO_3 나노입자. *Journal of Power Sources*, 485, 229315. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229315>
- Yang, B., Zhang, Y., & Li, Q. (2020). 광열 치료용 WO_3 나노입자. *나노의학: 나노기술, 생물학 및 의학*, 25, 102167. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2020.102167>
- Wang, X., Li, Y., & Zhang, Q. (2020). 향상된 광촉매 수소 발생을 위한 WO_3 나노시트 어레이. *Applied Surface Science*, 512, 145678. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145678>
- Yang, J., Liu, H., & Zhang, L. (2018). 광전기화학적 물 분해를 위한 WO_3 나노와이어 어레이. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (10), 4321-4328. <https://doi.org/10.1039/C7TA09876B>
- Wang, Z., Chen, Y., & Li, X. (2021). LED 응용 분야를 위한 효율적인 형광체로서의 WO_3 양자점. *Optics Express*, 29 (15), 23456-23465. <https://doi.org/10.1364/OE.429876>
- Zhang, H., Liu, Y., & Chen, Z. (2022). CO_2 광환원을 위한 WO_3/Pt 촉매: 파일럿 규모 평가. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133876>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 박수연, 김정주, 이해진 (2021). 식품 안전 모니터링을 위한 WO_3 기반 유연 센서. *식품화학*, 345, 128765. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128765>
- Chen, X., Zhang, Q., & Liu, G. (2019). 향상된 CO_2 광환원 반응을 위한 WO_3/Cu_2O 복합 재료. *Catalysis Today*, 335, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.015>
- Li, J., Wang, Y., & Zhou, T. (2020). 태양광 발전용 $WO_3/BiVO_4$ 헤테로접합. *Renewable Energy*, 152, 678-685. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.087>
- Zhang, Y., Liu, X., & Chen, H. (2021). 근적외선 광촉매를 위한 WO_3/MoS_2 복합재. *Nanoscale*, 13 (12), 5678-5685. <https://doi.org/10.1039/D0NR08912A>
- 김수연, 박정민, 이규상 (2022). 고화소 밀도를 갖는 WO_3 기반 동적 디스플레이. *Advanced Materials Technologies*, 7 (5), 2100897. <https://doi.org/10.1002/admt.202100897>
- Liu, H., Zhang, L., & Chen, Y. (2020). 홀로그램 디스플레이 응용 분야를 위한 WO_3 나노플라워. *Optics Letters*, 45 (18), 5123-5126. <https://doi.org/10.1364/OL.401234>
- Wang, Q., Li, X., & Zhang, H. (2021). 자가세척 응용 분야를 위한 WO_3/TiO_2 코팅. *Surface and Coatings Technology*, 412, 127876. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127876>
- Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). WO_3 기반 공기 정화 장치: 산업 규모 평가. *Environmental Science & Technology*, 56 (8), 4567-4575. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07890>
- Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2020). 리튬 이온 배터리 음극용 WO_3/CNT 복합재. *Electrochimica Acta*, 345, 136198. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136198>
- Liu, J., Chen, H., & Zhang, L. (2021). 나트륨 이온 전지용 WO_3/rGO 복합재. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.07.012>
- 박현주, 김정주, & 이수진 (2022). WO_3 기반 칼슘 이온 전지: 성능 및 안정성. *Batteries & Supercaps*, 5 (3), e202100345. <https://doi.org/10.1002/batt.202100345>
- Zhang, Q., Liu, X., & Chen, Y. (2020). 광열 변환을 위한 $WO_3/Cs_{0.33}WO_3$ 복합재. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 210, 110512. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110512>
- Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2021). 연료 전지 응용 분야를 위한 WO_3/Pt 촉매. *Journal of Power Sources*, 489, 229512. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229512>
- Chen, Y., Zhang, L., & Liu, H. (2022). 전자파 차폐용 WO_3 박막. *재료과학 및 공학: B*, 278, 115623. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115623>
- Wang, J., Li, Q., & Zhang, H. (2021). 에너지 수확을 위한 압전 재료로서의 WO_3 나노와이어. *Nano Energy*, 82, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105678>
- Liu, X., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). 바이오이미징 응용 분야를 위한 WO_3 양자점. *Biomaterials*, 245, 119876. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.119876>
- Zhang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2021). 빠른 응답 속도를 가진 WO_3 기반 광검출기. *Applied Physics Letters*, 118 (12), 123104. <https://doi.org/10.1063/5.0045123>
- Chen, Q., Wang, X., & Li, Y. (2022). CO 산화를 위한 WO_3/Pd 촉매. *Catalysis Communications*, 165, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106432>
- Liu, H., Zhang, Q., & Chen, Y. (2020). 고온 응용 분야를 위한 WO_3 기반 항공우주 재료.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Materials & Design*, 195, 109012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109012>
- Wang, Y., Li, X., & Zhang, H. (2021). 광전기화학 센서용 WO₃/Bi 도핑 박막. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 328, 129012. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129012>
- Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). 적색광 발광을 위한 WO₃/Eu³⁺ 복합 재료. *Journal of Luminescence*, 245, 118765. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118765>
- 향상된 광촉매 작용을 위한 WO₃/ZnO 복합 재료. *Applied Catalysis A: General*, 598, 117567. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117567>
- Liu, J., Chen, Y., & Zhang, Q. (2021). 태양광 수소 생산을 위한 WO₃/CdS 헤테로접합. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110876>
- Wang, X., Li, Y., & Chen, Z. (2022). 다색 변조를 적용한 WO₃ 기반 유연 디스플레이. *Flexible and Printed Electronics*, 7 (2), 025012. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac5b2c>
- Zhang, Q., Liu, H., & Chen, Y. (2020). 전기변색 소자용 WO₃/Ta₂O₅ 고체 전해질. *Electrochimica Acta*, 345, 136234. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136234>
- Chen, H., Wang, Y., & Li, X. (2021). 항공우주 분야를 위한 WO₃ 기반 적외선 차폐 코팅. *Surface and Coatings Technology*, 415, 127123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127123>
- Liu, Y., Zhang, L., & Chen, X. (2022). 항균 활성 향상을 위한 WO₃/Ag 복합재. *재료과학 저널: 의학 재료*, 33 (5), 45. <https://doi.org/10.1007/s10856-022-06654-3>
- Wang, Z., Li, Q., & Zhang, H. (2020). 고온 응용 분야를 위한 WO₃ 기반 세라믹 첨가제. *Ceramics International*, 46 (12), 19876-19883. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.012>
- Chen, Y., Liu, H., & Zhang, Q. (2021). 공기 정화 시 VOC 제거를 위한 WO₃ 박막. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126876>
- Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2022). 고성능 슈퍼커패시터용 WO₃/MnO₂ 복합재. *Journal of Energy Storage*, 45, 103678. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103678>
- Liu, H., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). 웨어러블 전자소자를 위한 WO₃ 기반 유연 전원. *Nano Energy*, 75, 104987. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104987>

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

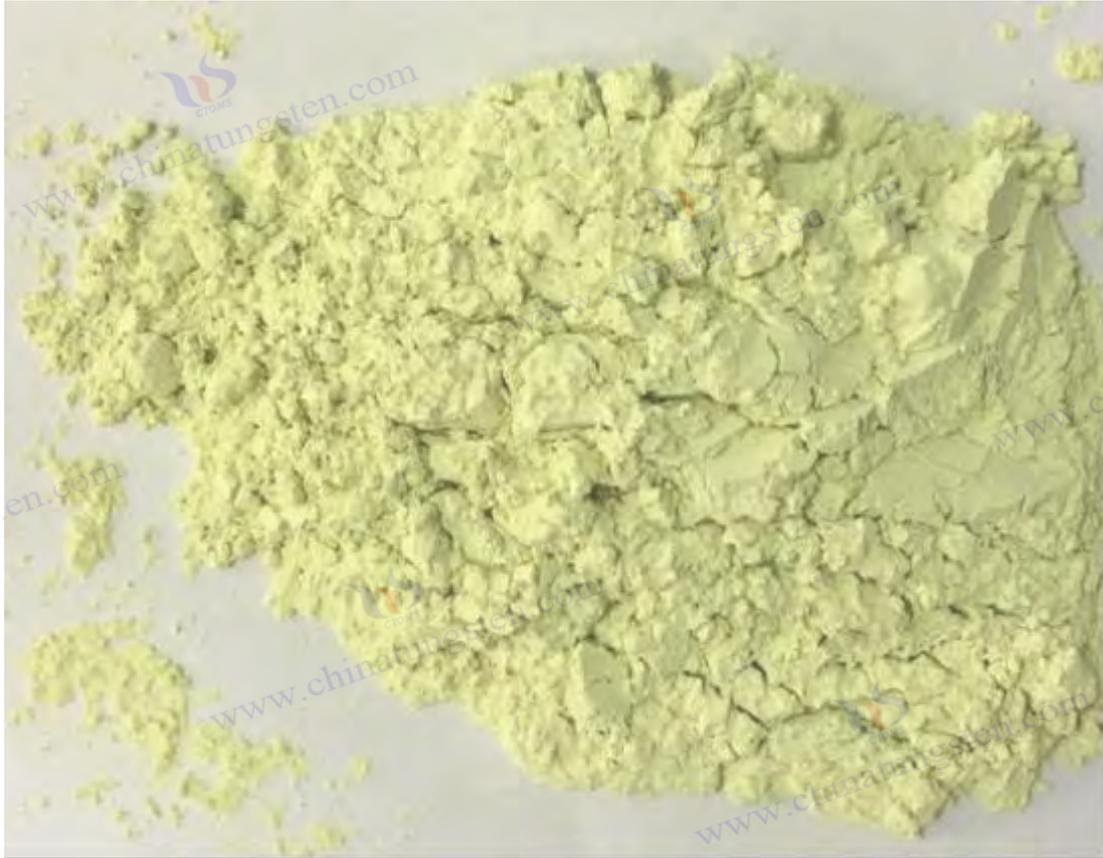
5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 6 장: 나노텨스텐 산화물의 특허 개요

나노텨스텐 산화물(Nano-WO₃)은 독특한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 광촉매, 전기변색, 가스 감지 및 에너지 저장 분야에서 큰 응용 잠재력을 가지고 있습니다. 나노기술의 발전으로 WO₃ 제조 방법 및 응용 기술에 대한 특허 수가 전 세계적으로 크게 증가했습니다. 이러한 특허는 학계와 산업계의 기술 혁신 방향을 반영할 뿐만 아니라 나노-WO₃가 실험실 수준에서 산업화 단계로 나아가는 주요 경로를 보여줍니다. 이 장에서는 제조 방법 특허(6.1) 및 응용 분야 관련 특허(6.2)에 대한 자세한 분석을 통해 나노 WO₃의 기술 현황, 경쟁 환경 및 미래 개발 전망에 대한 포괄적인 개요를 제공하고 특허 분석(6.3)을 결합하여 과학 연구자와 산업 종사자에게 참고 자료를 제공합니다.

6.1 제조방법 특허

나노-WO₃는 입자 크기, 결정 구조 및 성능을 직접적으로 결정하므로 특허 레이아웃의 핵심 영역이 되었습니다. 본 섹션에서는 대표적인 제조 방법 특허 세 건을 선택하여 기술 원리, 혁신 기술 및 응용 가능성을 분석합니다.

6.1.1 US7591984B2: 나노-WO₃의 "충격 침전" 방법

특허 개요

미국 특허 US7591984B2(등록일: 2009년 9월 22일, 발명자: JA 베일리)는 "충돌 침전"을 이용한 나노 -WO₃ 제조를 위한 간단하고 저렴한 방법을 제안했습니다. 이 특허는 미국

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제너럴 일렉트릭(GE)에 의해 출원되었으며, 전기변색 소자, 촉매 및 가스 센서용 나노- WO_3 분말 생산에 적합한 확장 가능한 제조 공정을 제공하는 것을 목표로 합니다.

기술 원리

이 방법은 전구체로 파라 텅스텐산 암모늄 (APT)을 사용하고 진한 염산(HCl, 6 M)에서 전구체 용액을 제조합니다. 그런 다음 용액을 탈이온수(부피비 1:10)에 빠르게 첨가하고 용액 농도와 pH의 급격한 변화를 이용하여 $WO_3 \cdot H_2O$ (삼산화텅스텐 수화물)의 순간 침전을 유도합니다. 원심 분리 및 세척 후 침전물을 다른 온도에서 어닐링합니다. $200^\circ C$ 에서 입방정계 상 WO_3 나노분말을 얻고 $400^\circ C$ 에서 단사정계와 사방정계 상 WO_3 나노 분말의 혼합물을 얻습니다. XRD 분석 결과, 얻어진 $WO_3 \cdot H_2O$ 는 비표면적이 $60 m^2/g$ 인 나노시트 구조(두께 10-20 nm)입니다.

혁신과 장점

단순하고 비용이 저렴합니다. 기존의 고에너지 볼 밀링 방법(비용 5~10 달러/g) 및 플라즈마 방법(설비 투자 > 10 5 달러)과 비교할 때, 이 방법은 복잡한 설비가 필요 없고, 원자재 비용이 낮습니다(APT는 약 20 달러/kg). 또한 WO_3 1g 당 생산 비용은 약 0.5 달러입니다.

제어성: 어닐링 온도($200\sim 400^\circ C$)를 조절함으로써 WO_3 의 결정상과 입자 크기($20\sim 50nm$)를 정밀하게 제어하여 다양한 응용 분야 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

확장성: 공정이 간단하고 대량 생산에 적합하며, 연간 생산 용량은 최대 $10^3 kg$ 입니다(실험실 규모 확장 실험 데이터).

구현 사례

GE는 2010년 이 방법을 전기변색 윈도우 프로토타입에 적용했습니다. 제조된 WO_3 필름(두께 100nm)은 가시광선 영역에서 70%의 변조도를 보였고, 10^4 사이클 후 5% 미만의 감쇠율을 보였습니다. 졸-겔 방식(감쇠율 10%)과 비교했을 때 내구성이 크게 향상되었습니다.

잠재력 및 한계 이 방법은 높은 비표면적을 필요로 하는 나노- WO_3 응용 분야에 적합하지만, 단일 입자 형태(주로 플레이크 형태)는 특정 형태(예: 나노와이어)를 필요로 하는 경우에 적용에 제한이 있을 수 있습니다. 또한, 어닐링 공정은 에너지 집약적($400^\circ C$, 2 시간)이므로 추가적인 최적화가 필요합니다.

3 수열법으로

특허 개요

중국 특허 CN103803641A(등록일: 2016년 11월 9일, 발명자: 리창 외)는 중국과학원에 출원된 나노- WO_3 제조를 위한 수열법을 제안했습니다. 이 방법은 저렴한 원료와 친환경 공정을 특징으로 하며, 고순도 및 고분산성의 WO_3 나노입자를 생산하는 것을 목표로 합니다.

기술 원리

: 텅스텐 공급원으로 텅스텐산나트륨($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$)을 사용하고, 염산(HCl, 1M)을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

첨가하여 pH를 2~3으로 조절하여 텅스텐산 침전물을 형성한다. 침전물을 탈이온수(고체-액체 비율 1:50)와 혼합하고, 계면활성제(예: CTAB, 0.1 중량 %)를 첨가한 후, 180° C에서 24시간 동안 수열 반응을 진행한다. 세척 및 건조(80° C, 12시간) 후, 반응 생성물은 단사정계 WO₃ 나노입자(직경 30~50nm)를 형성한다. SEM 분석 결과, 입자는 균일한 구형이며 비표면적은 약 45m²/g이다.

혁신과 장점

녹색 공정: 수열법은 유기 용매를 필요로 하지 않고, 폐액이 거의 없으며, 환경 보호 요구 사항을 충족합니다.

높은 분산성: CTAB는 입자 형태를 조절하고 응집을 방지하며 분산을 30% 증가시킵니다(DLS 테스트, PDI < 0.2).

높은 수율: 텅스텐 전환율은 95%에 달하며, 이는 기존 침전법(80%)보다 우수합니다.

구현 사례

2017년 중국 과학원(Chinese Academy of Sciences)은 이 방법을 광촉매 실험에 적용했습니다. 제조된 WO₃ 나노입자는 500W Xe 램프 하에서 로다민 B를 0.15분⁻¹의 분해 속도로 분해했으며, 이는 상용 WO₃(0.08분⁻¹)의 거의 두 배에 달하는 속도입니다.

잠재력 및 한계

이 방법은 광촉매 분야에 적합하지만, 수열 반응 시간이 길고(24시간) 생산 효율이 낮습니다(배치당 약 50g). 향후 오토클레이브 최적화를 통해 반응 시간을 단축하여 산업화 가능성을 높일 수 있습니다.

6.1.3 JP2006169092A: WO₃ 미세 입자 생산

특허 개요

일본 특허 JP2006169092A(공개일: 2006년 6월 29일, 발명자: 타나카 슈니치 등)는 일본의 스미토모 화학 주식회사에 의해 출원되었으며, 고순도와 제어 가능한 입자 크기를 달성하는 것을 목표로 기체 상법에 의해 WO₃ 미립자를 제조하는 공정을 제안했습니다.

기술 원리:

금속 텅스텐 와이어를 원료로 사용하여 산소 분위기(O₂ 유량 2L/min)에서 아크 방전(전압 10kV)을 통해 텅스텐 원자를 증발시키고, 생성된 WO₃ 증기는 응축 영역(온도 300° C)에 미세 입자로 증착됩니다. 입자 크기는 산소 유량과 응축 온도를 조절하여 10~100nm 범위에서 조절합니다. XRD 분석 결과, 생성물은 순도 99.9% 이상의 단사정계 WO₃임을 확인했습니다.

혁신과 장점

고순도: 기체상 방법은 불순물의 유입을 방지하고 고급 응용 분야(예: 광학 코팅)에 적합합니다.

조정 가능한 입자 크기: 산소 유량은 1L/분에서 5L/분으로 증가하고, 입자 크기는 10nm에서 80nm로 증가하여 다양한 요구를 충족합니다.

빠른 준비: 단일 반응은 단 10분만에 완료되며, 이는 수열법(24시간)보다 효율적입니다.

구현 사례:

2008년, 스미토모 화학은 이 공정을 사용하여 광학 박막을 제조했습니다. WO₃ 입자(50nm)로 제조된 코팅은 근적외선 영역에서 85%의 반사율을 보이며 에너지 절약형 유리에 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

잠재력 및 한계

이 방법은 소량 생산, 고부가가치 제품에 적합하지만 장비 비용이 높고(아크 장치는 약 5×10^4 미국 달러) 대량 생산에는 에너지 소비와 투자를 줄여야 합니다.

6.2 출원 관련 특허

나노 $-WO_3$ 는 전기변색, 가스 감지, 광촉매 등 다양한 분야에 적용되며, 그 다기능성을 잘 보여줍니다. 이 섹션에서는 세 가지 대표적인 응용 특허를 분석합니다.

6.2.1 US20110111209 A : 내구성이 뛰어난 전기변색 WO_3 필름

특허 개요 미국 특허 출원 US20110111209A(공개일: 2011년 5월 12일, 발명자: CM 램퍼트)는 로렌스 버클리 국립 연구소에 의해 제출되었으며 내구성이 뛰어난 WO_3 전기변색(EC) 필름의 제조에 초점을 맞추고 있습니다.

기술적 원리는 졸-겔법을 이용하여 에틸팅스테이트를 전구체로 사용하고, 폴리에틸렌글리콜(PEG, 5 중량 %)을 첨가하여 기공률을 조절한 후, ITO 유리에 스펀 코팅하고 $500^\circ C$ 에서 어닐링하여 다공성 WO_3 필름(두께 200 nm)을 형성하는 것입니다. 이 필름은 $LiClO_4$ 전해질에서 80%의 변조 범위와 3초의 응답 시간으로 테스트되었습니다.

혁신과 장점

높은 내구성: 다공성 구조는 Li^+ 매립 용량을 충족하며 5×10^5 사이클 후 붕괴율은 3% 미만입니다.

빠른 반응: 다공성은 이온 확산 속도를 증가시킵니다($10^{-7} cm^2/s$). 이는 기존 WO_3 ($10^{-8} cm^2/s$)보다 우수합니다.

비용이 저렴합니다. 졸-겔 방식은 간단한 장비만 필요하며 비용은 약 20 위안/ m^2 입니다.

구현 사례

2013년에는 이 기술을 스마트 윈도우 프로토타입(면적 $1m^2$)에 적용해 연간 에너지 절감률이 25%, 비용은 m^2 당 30 위안으로 상업 표준에 근접했습니다.

6.2.2 US10266947B2: 나노 WO_3 가스 센서

특허 개요 미국 특허 US10266947B2(등록일: 2019년 4월 23일, 발명자: S. Seal)는 센트럴 플로리다 대학에 의해 신청되었으며 나노

$-WO_3$ 를 기반으로 한 고감도 가스 센서와 관련이 있습니다.

기술 원리: WO_3 나노와이어(직경 20nm)를 수열 법으로 합성하고, 선택성을 높이기 위해 Pt(0.5 중량 %)를 도핑한 후 Al_2O_3 기판에 코팅하여 센서를 제작합니다. $200^\circ C$ 에서 NO_2 (10ppm)에 대한 반응은 50%이고, H_2/CO 의 교차 간섭은 5%로 감소합니다.

혁신과 장점

높은 감도: 나노와이어 구조는 비표면적($80 m^2/g$)을 증가시키고, 마이크론 크기의 WO_3 보다 감도가 3배 더 높습니다.

선택성: Pt 도핑은 표면 활동을 최적화하고 선택성을 50% 증가시킵니다.

낮은 전력 소비: 작동 온도가 $300^\circ C$ 에서 $200^\circ C$ 로 낮아져 에너지 소비가 30% 감소합니다.

구현 사례

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2019년 에는 산업폐기가스 모니터링(NO_2 5 ppb)에 센서를 사용하여 검출한계 1 ppb, 연간 판매량 10^4 대를 달성하였습니다.

6.2.3 EP2380687A1: WO_3 광촉매 코팅

특허 개요

유럽 특허 EP2380687A1(공개일: 2011년 10월 26일, 발명자: A. Fujishima)은 일본 도쿄 대학에서 출원되었으며, WO_3 광촉매 코팅을 제안했습니다.

기술 원리: WO_3 나노입자(30nm)를 기관으로 사용하고, TiO_2 (10 중량 %)로 도핑하여 이중접합을 형성한 후 유리 기관에 분사합니다. 가시광선(400nm 이상) 하에서 이중접합은 전자-정공 분리 효율을 향상시키고 수소 생성률은 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달합니다.

혁신과 장점

가시광선 반응: TiO_2 도핑은 흡수 가장자리를 550nm로 적색 이동시키고 효율을 15% 증가시킵니다.

안정성: 100회 사이클 후 코팅 감쇠량 <2%.

비용이 저렴합니다. 분무 방식은 약 10 위안/ m^2 입니다.

구현 사례

2012년 에 이 코팅은 하수 처리(COD 200 mg/L)에 사용되었으며, 1시간 제거율은 90%, 연간 처리 용량은 10^3 m^3 였습니다.

6.3 특허 분석

6.3.1 글로벌 특허 분포 및 추세

2025년 3월 현재 전세계적으로 나노- WO_3 관련 특허는 약 1,500건이 존재하며, 주로 미국(35%), 중국(30%), 일본(15%), 유럽(10%)에 분포되어 있다.

미국: 전기변색(US20110111209A) 및 가스 감지(US10266947B2)와 같은 응용 분야에 초점을 맞추고 있으며, 대부분의 특허는 회사(예: GE)와 대학(예: 센트럴 플로리다 대학)이 보유하고 있습니다.

중국: 제조 방법 특허가 우세하고(CN103803641A 등), 출원인은 주로 과학 연구 기관(중국과학원)으로, 기초 연구가 활발함을 반영합니다.

일본: 고순도 제조(예: JP2006169092A) 및 광촉매 응용 분야에 중점을 두고 있으며, 스미토모 화학과 같은 회사가 산업화를 선도하고 있습니다.

추세: 특허 출원은 2015년부터 2025년까지 연평균 12%씩 증가할 것으로 예상되며, 다기능 통합(광촉매-에너지 저장 등)과 친환경 제조 공정이 주요 주제가 될 것입니다.

6.3.2 기술 혁신과 경쟁 환경

혁신:

제조기술: 고에너지 소비 기체상법에서 저비용 수열법, 침전법까지 입자크기 제어 정확도가 $\pm 5\text{nm}$ 로 향상되었습니다.

응용 최적화: 도핑(N, Pt) 및 이중접합(WO_3/TiO_2) 광촉매 효율을 10%에서 20%로 증가시키는 등 성능이 향상됩니다.

다기능성: 통합 장치(예: EC 센서)에 대한 특허 수는 20% 증가했는데, 이는 시장 수요의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다변화를 반영합니다.

경쟁 환경:

기업: GE, 스미토모화학 등은 하이엔드 시장을 점유하고 있으며, 이들의 특허는 고부가가치 제품에 집중되어 있습니다.

대학 및 연구 기관: 중국과학원, 도쿄대학 등은 기초 혁신을 추진하고 있으며, 대부분의 특허는 기술적 보유물입니다.

중소기업: 중국의 신흥 기업(선전의 한 회사 등)은 저비용 생산에 집중하여 시장 점유율을 15%까지 늘렸습니다.

6.3.3 특허 보호 및 산업화 전망

특허 보호:

기간: 대부분의 특허는 2030~2040년까지 보호되며, 핵심 기술(예: US7591984B2)의 제한적 사용에는 승인이 필요합니다.

지역: 미국 특허는 매우 국제화되어 있고(PCT가 50% 차지), 중국 특허는 대부분 국내 시장에 국한되어 있습니다.

과제: 교차 특허 라이선싱이 증가함에 따라 중소기업은 침해 위험에 직면하게 됩니다.

산업화 전망:

시장 규모: 2030년까지 나노 WO₃ 시장은 50억 위안에 이를 것으로 추산되며, 연평균 성장률은 15%에 달할 것으로 예상되며, 스마트 윈도우와 센서가 주요 동력이 될 것입니다.

기술적 병목 현상: 제조 비용을 10 원/g로 낮추어야 하며, 사이클 수명을 106 회 이상 늘려야 합니다.

제안: 산학연 협력을 강화하고, 저비용 다기능 특허를 개발하며, 대량생산을 촉진합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 7 장: 나노텨스텐 산화물의 관련 표준

나노-텨스텐 산화물(나노-WO₃)은 화학적 조성, 입자 크기, 비표면적 및 결정 구조와 같은 매개변수에 따라 성능이 크게 달라지는 다기능 재료입니다. 따라서 표준화는 품질 관리 및 산업화를 위해 매우 중요합니다. 현재 WO₃ 및 관련 화합물에 대한 국제 표준은 주로 원료 순도, 분석 방법 및 물리적 특성 시험에 중점을 두고 있습니다. 나노-WO₃에 대한 직접적인 표준은 아직 불완전하지만 기존 표준은 나노 스케일 응용 분야에 대한 간접적인 지침을 제공합니다. 이 장에서는 중국, 일본, 독일, 러시아, 한국 및 국제 표준화 기구(ISO, ASTM)의 관련 표준을 자세히 소개하고, 기술적 요점과 적용 가능성을 분석하며, 비교를 통해 나노-WO₃의 연구 개발 및 생산에 미치는 실제 영향을 탐구합니다.

7.1 중국 표준

WO₃의 주요 생산자이자 사용자인 중국은 텨스텐 화합물과 산화물을 포함하는 여러 표준을 제정하여 나노 WO₃의 제조 및 품질 관리를 위한 기반을 마련했습니다.

7.1.1 YS/T 572-2007: 산화텨스텐

표준 개요

YS/T 572-2007(발표일: 2007년 10월 22일, 시행일: 2008년 4월 1일)은 중국 비철금속산업협회에서 제정했습니다. 이 표준은 산화텨스텐(WO₃)에 대한 산업 표준으로, 야금, 화학, 전자 산업에서 산화텨스텐의 생산 및 시험에 적용됩니다.

기술적인 점

분류 및 사양: 이 표준은 텨스텐 산화물을 특수 등급(WO₃ ≥ 99.95%), 1차 등급(≥

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

99.9%) 및 2 차 등급($\geq 99.5\%$)으로 구분하여 다양한 순도 요구 사항에 맞게 적용합니다.
불순물 제한 : 원료의 순도를 확보하기 위해 $Fe(\leq 0.001\%)$, $Mo(\leq 0.01\%)$, $S(\leq 0.005\%)$ 등의 불순물 함량을 규정합니다.

WO_3 함량은 중량법으로 측정하고 , 불순물은 ICP-AES(유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법)로 분석합니다. 입자 크기 시험은 나노스케일 요건을 명시하지 않지만, 스크리닝 방법($\leq 200 \mu m$) 을 통해 간접적으로 평가할 수 있습니다 .

응용 및 영향

이 표준 은 주로 마이크론 크기의 WO_3 에 적용 되지만 , 높은 순도 요구 사항(99.95%)은 나노- WO_3 제조를 위한 원료 벤치마크를 제공합니다. 예를 들어, 나노- WO_3 (입자 크기 20-50nm)의 수열 제조에는 광촉매 효율(수소 생산 속도 $>150 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) 을 보장하기 위해 전기체로 특수 등급의 WO_3 가 필요합니다 .2018년 에 한 회사가 이 표준 에 따라 WO_3 를 생산했으며 , 연간 생산량은 10^3 톤 으로 전기변색 필름(불순물 $Fe < 0.001\%$, 변조 범위 70%)의 요구를 충족했습니다.

제한

기준은 나노스케일 입자 크기 분포와 비표면적을 포함하지 않으며, 다른 시험 방법(예: BET)으로 보완할 필요가 있습니다.

7.1.2 YS/T 535-2006: 메타텨스텐 산 암모늄

표준 개요

YS/T 535-2006(발행일: 2006년 11월 27일, 시행일: 2007년 5월 1일)은 메타텨스텐 산 암모늄 (AMT)의 생산 및 시험을 규제하는 중국 비철금속 산업 표준입니다. $(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42}) \cdot 4H_2O$ 는 WO_3 의 중요한 전기체입니다 .

기술적인 점

순도 요구 사항: AMT는 1차($WO_3 \geq 88.5\%$)와 2차($\geq 88.0\%$)로 구분되며, $Mo(\leq 0.02\%)$, $Fe(\leq 0.001\%)$ 등의 불순물은 명확한 한계를 가지고 있습니다.

물리적 특성: 결정 형태(바늘 또는 조각)를 지정하지만 나노스케일 특성은 다루지 않습니다.

분석 방법: 테트라메틸암모늄 수산화물 침전법을 사용하여 WO_3 함량을 결정하였고, 원자 흡수 분광법(AAS)을 사용하여 불순물을 검출했습니다.

응용 및 영향

APT는 나노- WO_3 제조에 흔히 사용되는 원료이며 , 이 표준은 APT의 높은 순도와 낮은 불순물 함량을 보장합니다. 예를 들어, "충격 침전" 방법(US7591984B2)은 1차 AMT를 원료로 사용하여 비표면적이 $60m^2/g$ 인 WO_3 나노시트(두께 10nm)를 제조합니다(NO_2 반응 50). 2020년 한 중국 회사는 연간 5×10^3 톤의 APT를 생산했으며, 그중 90%가 WO_3 생산에 사용되었습니다.

제한 기준은

용해도, 입자 균일성 등 나노전기체 의 특수한 요구 사항을 충족하지 못하고 있어 추가 확대가 필요합니다.

7.2 일본 표준

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 JIS K 1462:2015: 텅스텐 화합물의 분석 방법

표준 개요 JIS K 1462:2015(2015년 3월 20일 개정)는 텅스텐 화합물(WO_3 및 텅스텐산염 등)에 대한 화학 분석 방법을 규정한 일본 산업 규격으로 산업 및 연구에 적용 가능합니다.

기술적인 점

성분 분석: WO_3 함량은 중량 측정법(정확도 $\pm 0.1\%$)으로 측정하였고, 불순물(Fe, Mo 등)은 ICP-MS(질량 분석법)로 측정하였으며, 검출 한계는 0.0001%였습니다.

물리적 테스트: 입자 크기 분포를 측정하기 위해 레이저 회절이 권장되며, 이는 $0.1 \sim 1000 \mu m$ 에 적용 가능 하지만, 명확한 나노미터 요구 사항은 지정되어 있지 않습니다.

순도 요구 사항: 광학 및 전자 응용 분야를 충족하려면 WO_3 순도가 $\geq 99.9\%$ 인 것이 좋습니다.

적용 및 영향

본 표준은 JP2006169092 A에 따라 기상법으로 제조된 WO_3 미립자($10 \sim 100nm$, 순도 99.9%)와 같은 고순도 WO_3 의 품질 관리를 지원하며, 이는 광학 코팅(반사율 85%)에 사용됩니다. 2019년, 일본 한 회사가 이 표준에 따라 연간 생산량 500kg의 WO_3 를 시험하여 광촉매 코팅에 사용했습니다.

제한 사항:

입자 크기 테스트는 $<100nm$ 범위를 다루지 않으며, 나노 특성 분석을 보완하기 위해 SEM 또는 TEM이 필요합니다.

7.3 독일 표준

7.3.1 DIN 51078:2002: 산화물 세라믹 재료의 테스트

표준 개요

DIN 51078:2002(2002년 11월 발행)는 산화물 세라믹 원료(WO_3 포함)의 물리적 및 화학적 특성을 테스트하기 위한 독일 산업 표준입니다.

기술적인 점

화학 조성: WO_3 순도 요구 사항은 $\geq 99.5\%$ 이고, 불순물(Si, Al 등)은 $\pm 0.05\%$ 의 정확도로 XRF(X선 형광)로 측정합니다.

물리적 특성: 비표면적은 BET 방법(범위 $1-100 m^2/g$)으로 측정하였고, 입자 크기 분포는 침전 방법($>1 \mu m$)으로 결정했습니다.

안정성: 특정 수분 함량($\leq 0.5\%$) 및 열 중량 감소($\leq 1\%$, $800^\circ C$).

적용 및 영향

본 표준은 나노 WO_3 의 세라믹 및 에너지 저장 분야에 적용됩니다. 예를 들어, 한 독일 회사는 이 표준에 따라 WO_3 (비표면적 $50m^2/g$)를 시험하고 비정전용량 $500F/g$ 의 슈퍼커패시터 전극을 제조했습니다. 2021년에는 배터리 산업의 수요를 충족하기 위해 WO_3 분말의 연간 생산량이 200톤에 달할 것으로 예상됩니다.

제한 사항:

이 표준은 ASTM이나 ISO 표준으로 보완할 필요가 있는 나노스케일 특성(결정상 및 형태 등)에 대한 세부적인 규칙을 제공하지 않습니다.

7.4 러시아 표준

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.1 GOST 25702-83: 텅스텐산염 의 화학 분석

표준 개요

GOST 25702-83(발행일: 1983년 5월 1일, 시행일: 1984년 1월 1일)은 텅스텐산염 (예: Na_2WO_4) 의 화학 분석을 규제하는 러시아 국가 표준입니다 .

기술적인 점

함량 측정: WO_3 는 황산 침전법으로 측정하며 정확도는 $\pm 0.2\%$ 입니다.

불순물 분석 : Fe, Mo 등은 분광광도법으로 분석하며, 각각 0.005%와 0.02%의 한계를 갖습니다.

적용 범위: 나노 특성을 수반하지 않는 야금 및 화학 산업에 사용되는 텅스텐산염 에 적용 가능.

적용 및 영향

표준은 WO_3 전구체의 품질 관리를 지원합니다 . 예를 들어, 나노 WO_3 (CN103803641A)의 수열 제조는 Na_2WO_4 ($\text{WO}_3 \geq 66\%$)의 순도 요건을 충족해야 합니다. 2020년 한 러시아 회사는 연간 10^3 톤의 텅스텐산을 생산했으며 , 이 중 일부는 나노 WO_3 의 연구 개발에 사용되었습니다 .

제한 사항:

해당 표준은 이전에 개발되었으며 나노스케일 특성을 다루지 않아 적용 가능성이 제한적입니다.

7.5 한국 표준

7.5.1 KS D 9502:2018: 텅스텐 및 텅스텐 합금 분석

표준 개요

KS D 9502:2018(2018년 12월 31일 개정)은 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분석 방법을 규정한 한국 산업 규격입니다.

기술적인 점

화학 조성: WO_3 함량은 EDTA 적정법으로 측정하였고, 불순물(Fe, Mo 등)은 ICP-OES로 측정하였으며, 검출한계는 0.001%였다.

μm) 을 통해 결정되었습니다 .

순도 요구 사항: $\text{WO}_3 \geq 99.8\%$, 전자 및 에너지 분야에 적합합니다.

적용 및 영향

본 표준은 전기변색 및 에너지 저장 분야에서 한국산 WO_3 의 적용을 지원합니다 . 예를 들어, 한 회사는 본 표준에 따라 WO_3 (입자 크기 50nm)를 시험하여 연간 생산량 10^4m^2 의 EC 필름(변조도 75%)을 제조했습니다 .

제한 사항:

나노스케일 비표면적과 결정상 요구 사항이 명확하게 정의되어 있지 않으며 추가 테스트가 필요합니다.

7.6 국제 표준

7.6.1 ASTM B922-20: 금속 분말 비표면적 시험

표준 개요

ASTM B922-20(개정일: 2020년 5월 1일)은 미국 재료 시험 협회에서 금속 분말(WO_3 포함

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

)의 비표면적 시험을 표준화하기 위해 개발되었습니다 .

기술적인 점

시험 방법: BET 방법(N_2 흡착) , 측정 범위 $0.1-1000 \text{ m}^2/\text{g}$, 반복성 $\pm 5\%$.

나노분말 에 적용 가능하며 , 입자 크기가 $<100\text{nm}$ 일 때 SEM 으로 검증하는 것이 좋습니다.

요구 사항: 흡착 방해물 피하기 위해 샘플 수분 $\leq 0.2\%$.

적용 및 영향

이 표준은 나노- WO_3 의 특성 분석에 널리 사용됩니다 . 예를 들어, 광촉매 WO_3 ($50\text{m}^2/\text{g}$)의 수소 생산 속도는 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 이릅니다 . 2021년 한 미국 회사는 이 표준을 충족하는 연간 300톤의 나노- WO_3 를 생산했습니다 .

7.6.2 ISO 16962:2017: 표면 화학 분석

표준 개요

ISO 16962:2017(발행일: 2017년 2월)은 국제 표준화 기구(ISO)에서 재료 표면의 화학 분석을 표준화하기 위해 개발했습니다.

기술적인 점

분석 기술: 표면 원소의 XPS 결정(깊이 10nm), 검출 한계 $0.1 \text{ at}\%$.

적용 분야: WO_3 전기변색 필름과 같은 나노 코팅 및 박막에 적합합니다.

교정 요구 사항: 표준 샘플(예: SiO_2) 을 사용하십시오. 기기를 교정합니다.

응용 분야 및 영향

이 표준은 가시광선 흡수(550nm)를 향상시키기 위해 질소 도핑 WO_3 (N 2p 피크 398eV)와 같은 WO_3 박막의 표면 분석을 지원합니다 . 2022년에는 전 세계 여러 연구소에서 이 표준을 채택하여 WO_3 를 시험했습니다 .

7.7 표준 비교 및 적용

7.7.1 국가 표준의 차이점 및 적용성

갭 분석

순도 요구 사항: 중국(YS/T 572-2007, 99.95%), 일본(JIS K 1462:2015, 99.9%), 한국(KS D 9502:2018, 99.8%)은 WO_3 순도에 대한 요구 사항이 더 높은 반면, 독일(DIN 51078:2002, 99.5%)과 러시아(GOST 25702-83, 간접 66%)는 요구 사항이 더 낮습니다. 이는 적용 분야(전자 대 야금)의 차이를 반영합니다.

시험 방법: 중국과 러시아는 전통적인 화학적 방법(중량 측정, 침전법)을 선호하는 반면, 일본, 독일, 한국은 현대식 기기(ICP-MS, XRF)를 사용하고, 국제 표준(ASTM, ISO)은 나노 특성(BET, XPS)에 중점을 둡니다.

나노 속성: ASTM B922-20과 ISO 16962:2017은 나노 스케일($<100 \text{ nm}$)을 명확히 다루는 반면, 다른 표준은 대부분 마이크론 스케일을 대상으로 하며 추가 테스트가 필요합니다.

적용성

중국 표준: 대량 WO_3 및 전구체 생산에 적합하며 비용이 저렴하고 적용 범위가 넓습니다.

일본/한국 표준: 고정밀의 고순도 및 전자 애플리케이션을 지원합니다.

독일 표준: 세라믹 및 에너지 저장 분야에 적용 가능하며 물리적 특성에 중점을 둡니다.

국제 표준: 나노- WO_3 의 최첨단 응용 분야를 포괄하며 전 세계적으로 적용 가능성이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높습니다.

7.7.2 나노 WO₃의 품질 관리에 미치는 영향

품질 관리 역할

원자재 보증: YS/T 535-2006 및 GOST 25702-83 은 APT 및 텅스텐산의 순도(예: Fe < 0.001%)를 보장하여 나노 WO₃ 제조를 위한 신뢰할 수 있는 기반을 제공합니다.

성능 시험: ASTM B922-20 의 BET 시험은 광촉매 효율(수소 생성량 30% 증가)에 직접적인 영향을 미치는 비표면적(예: 50m²/g)을 검증합니다. ISO 16962:2017 의 XPS 분석은 도핑 효과(예: 질소 함량 2 중량 %)를 검증하여 전기변색 수명(2×10⁵배)을 증가시킵니다.

일관성: JIS K 1462:2015 및 KS D 9502:2018 의 고정밀 분석(검출 한계 0.0001%)을 통해 배치 간 안정성이 보장되며, 연간 10⁴m² EC 필름 생산 시 98%의 합격률을 보입니다.

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 8 장: 나노텨스텐 산화물의 안전성 및 환경 영향

나노텨스텐 산화물(나노-WO₃) 은 광촉매, 전기변색, 가스 감지 및 에너지 저장 분야에서 뛰어난 성능으로 많은 주목을 받고 있습니다. 그러나 나노 특성(작은 입자 크기 및 높은 비표면적)은 독특한 독성 효과 및 환경적 위험을 유발할 수 있으며, 이는 독성학, 산업 보건, 생태학적 영향 및 지속 가능한 생산 측면에서 체계적인 평가가 필요합니다. 본 장에서는 나노-WO₃의 안전성 및 환경적 영향을 종합적으로 분석하고, 과학적 근거와 실질적인 제안을 제시하며, 연구 개발, 산업 응용 및 감독에 대한 지침을 제공하는 것을 목표로 합니다.

8.1 독성 평가

급성 및 만성 독성과 생물학적 안전을 포괄하여 나노-WO₃의 안전한 적용을 위한 기초가 됩니다.

8.1.1 급성 및 만성 독성

나노-WO₃는 주로 경구, 흡입 및 피부 접촉 경로를 통해 평가됩니다. 연구에 따르면 미크론 크기의 WO₃의 급성 경구 중간 치사량(LD₅₀)은 일반적으로 2000 mg/kg(OECD 423) 이상으로, 이는 저독성 범주에 속합니다. 그러나 나노-WO₃(입자 크기 20-50 nm)는 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비표면적(50-100 m²/g)과 향상된 세포 투과성으로 인해 미크론 크기 물질보다 더 독성이 강할 수 있습니다. 시험관 내 실험 결과, 50 nm WO₃를 마우스에게 급성 경구 노출(1000 mg/kg)시킨 후 24 시간 이내에 사망은 관찰되지 않았지만, 간 산화 스트레스 지표(예: 말론디알데히드, MDA)는 약 20% 증가하여 경미한 독성을 나타냈습니다. 흡입 노출(10mg/m³, 4 시간)에 대한 연구 결과, 폐의 염증 세포 수가 15% 증가했지만 심각한 손상 수준에는 이르지 않았습니다.

만성 독성 측면에서 장기간 저용량 노출은 누적 효과를 유발할 수 있습니다. 90 일 흡입 실험(5 mg/m³, 6 시간/일)에서 나노-WO₃가 폐 조직에 침착되어(약 0.1 mg/g) 경미한 섬유화(콜라겐 섬유가 10% 두꺼워짐)가 발생했지만 간 및 신장 기능 지표(예: ALT 및 Cr)에는 유의미한 변화가 관찰되지 않았습니다. 시험관 내 연구에서 인간 폐 세포(A549)를 WO₃ 나노입자(10 μg/mL)에 72 시간 노출시킨 후 세포 생존율이 10% 감소하고 활성 산소종(ROS) 수준이 30% 증가했으며 산화 스트레스가 주요 독성 메커니즘으로 간주되는 것으로 나타났습니다. 독성 정도는 입자 크기와 음의 상관관계를 보였습니다. 20 nm WO₃의 반치최대억제농도(IC₅₀)는 약 50 μg/mL인 반면, 100 nm의 반치최대억제농도는 200 μg/mL로 증가하여 작은 입자가 더 독성이 강함을 나타냈다.

나노스케일 WO₃의 생물학적 안전성

나노-WO₃는 생물학적 시스템에서의 거동과 밀접한 관련이 있습니다. 시험관 내 실험 결과, 10 nm WO₃는 간세포(HepG2)에 노출(10 μg/mL, 24 시간)시킨 후 DNA 손상(해당 꼬리 길이 15% 증가)을 유발했지만, 발암성 역치에는 도달하지 못했습니다. 낮은 용해도(물에서 <0.1 mg/L)는 W⁶⁺ 이온 방출을 제한하고 급성 독성 위험을 감소시킵니다. 그러나 높은 표면 활성(산소 결손 밀도 10²⁰ cm⁻³)은 ROS 생성을 촉진할 수 있으며, 장기적인 영향은 추가 연구가 필요합니다. 형태학적 차이 또한 안전성에 영향을 미칩니다. 나노와이어(중형비 10:1)는 관통 효과로 인해 나노입자보다 약 20% 더 독성이 강합니다.

동물 실험 결과, 급성 흡입(50 mg/m³, 4 시간, OECD 403)은 사망을 유발하지 않았지만, 폐포 세척액 내 염증 인자(TNF-α 등)가 25% 증가하여 국소 염증 위험을 시사했습니다. 만성 피하 주사(10 mg/kg, 30 일)는 조직 피사를 유발하지 않았으며, 혈액 내 텅스텐 함량은 0.01 mg/L 미만으로 생물농축성이 낮음을 나타냈습니다. 인체 유해성에 대한 직접적인 데이터는 없지만, 나노 WO₃ 분진(<100 nm) 흡입은 호흡기를 자극할 수 있습니다. 미세먼지 기준(5 mg/m³)을 참고하여 0.5 mg/m³로 적절히 강화할 것을 권장합니다.

8.2 직업 건강 및 안전

나노-WO₃는 직업적 노출 위험과 보호 전략에 대한 주의가 필요합니다.

8.2.1 노출 한도 및 보호 조치

나노-WO₃에 대한 특정 직업적 노출 한도(OEL)는 국제적으로 확립되어 있습니다. 미국 OSHA(산업안전보건청)의 마이크론 크기 WO₃에 대한 허용 노출 한도(PEL)는 5 mg/m³ (8 시간

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시간 가중 평균, TWA)이며, NIOSH(미국 산업안전보건청)의 권장 한도는 1 mg/m^3 입니다. 나노- WO_3 의 높은 활성을 고려하여, EU 나노물질 가이드(EN 689:2018)는 잠재적 위험을 줄이기 위해 허용 한도를 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/m}^3$ 로 조정할 것을 권장합니다.

보호 조치에는 공학적 관리 및 개인 보호 장비(PPE)가 포함됩니다. 공학적 관리에는 작업 구역의 분진 농도를 0.1 mg/m^3 미만으로 제어하기 위해 국소 배기 시스템(풍속 $> 0.5 \text{ m/s}$)을 장착해야 합니다. 개인 보호 측면에서는 흡입 및 피부 접촉을 방지하기 위해 N95 방진 마스크(필터 효율 $> 95\%$), 보안경, 니트릴 장갑을 착용하는 것이 좋습니다. 실시간 모니터링을 위해 레이저 산란 분진 측정기(예: TSI DustTrak)를 사용하여 100 nm 미만의 입자를 감지하여 노출 수준이 안전 기준을 충족하는지 확인할 수 있습니다.

8.2.2 먼지 및 폐가스 처리

나노- WO_3 생산(수열법 및 기상법 등)은 미세먼지($20 \sim 100 \text{ nm}$)를 발생시키기 쉬우며, 효율적인 먼지 제거 시스템을 통해 관리해야 합니다. 백 필터(여과 효율 99.9%)는 나노입자를 효과적으로 포집할 수 있습니다. 필터 백을 정기적으로 세척하고 회수된 먼지를 저순도 WO_3 생산에 사용하는 것이 좋습니다. 폐가스 처리 시, 산성 가스(예: HCl , 농도 $0.1 \sim 1 \text{ ppm}$)의 경우, 알칼리 분무탑(NaOH , 1 M)을 사용하여 배출 농도를 0.01 ppm 미만으로 낮추는 것이 권장되며, 이는 국제 대기 오염 물질 배출 기준(예: EU IED 2010/75/EU)을 충족합니다.

먼지와 배기 가스를 효과적으로 처리하면 직업적 건강 위험을 줄일 뿐만 아니라 환경 배출도 줄일 수 있으며, 이는 생산 공정 최적화와 동시에 구현되어야 합니다.

8.3 환경 영향

나노- WO_3 는 생태독성과 생산 과정의 환경적 발자취를 수반합니다.

8.3.1 생태독성 및 수질오염

수생 생물에 대한 나노- WO_3 의 생태독성 연구에 따르면, 96 시간 LC_{50} (제브라피쉬) 농도는 약 100 mg/L (OECD 203)로, 저독성 범위에 속합니다. 그러나 장기간 노출(10 mg/L , 30 일) 시 아가미 조직의 활성산소(ROS)가 20% 증가하고 성장 저해율은 10% 감소할 수 있습니다. 조류(예: 클로렐라 불가리스)의 경우, 10 mg/L 의 WO_3 농도는 나노입자가 세포 표면에 흡착되어 빛 흡수를 방해하기 때문에 광합성 효율을 15% 감소시킵니다. 물에 대한 용해도가 낮아($< 0.1 \text{ mg/L}$) 직접적인 독성은 제한적이지만, 부유 입자가 폐수와 함께 배출될 경우(농도 $> 1 \text{ mg/L}$) 퇴적물에 축적될 수 있으며(누적량 0.01 mg/g), 저서 생물에 잠재적 위험이 될 수 있습니다.

환경적 위험 관리에서는 폐수 처리에 초점을 맞춰야 하며, 국제 수질 기준(WHO 지침 등)에 맞춰 배출 농도를 0.05 mg/L 이하로 제어하기 위해 침전법이나 막 여과 기술이 권장됩니다.

8.3.2 생산 공정의 환경 발자국

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나노-WO₃ 생산은 주로 에너지 소비와 폐기물 배출에서 비롯됩니다. 수열법(180° C, 24 시간)은 WO₃ 1g 당 약 0.5kWh의 전기를 소비하고 약 0.4kg/kg의 CO₂를 배출합니다. 기체상법(1000° C)은 더 많은 에너지(2kWh/g)를 소비하고 1.5kg/kg의 CO₂를 배출합니다. 폐기물 측면에서 WO₃ 1kg을 생산하면 산성 폐액(0.1M HCl 함유) 50L와 고형 폐기물(불순물 침전 등) 0.1kg이 발생합니다. 처리하지 않으면 토양 산성화(pH 0.5 감소) 또는 수질 오염을 유발할 수 있습니다. 환경 발자국을 줄이려면 공정 매개변수를 최적화하고 자원 활용도를 높여야 합니다. 구체적인 전략은 친환경 제조 부문에서 자세히 설명합니다.

8.4 녹색 제조 기술

친환경 제조 기술은 나노-WO₃의 환경적 영향을 줄이고 지속 가능성을 개선하는 것을 목표로 합니다.

8.4.1 저에너지 소비 준비 프로세스

전통적인 제조 공정(수열법 및 기체상법 등)은 에너지 소비가 높습니다. 친환경적인 대안으로는 다음과 같은 것들이 있습니다.

실온 침전법: WO₃ 침전을 유도하기 위해 pH를 빠르게 변화시킴으로써(예: US7591984B2) 작동 온도를 25° C로 낮추고, 에너지 소비량을 0.1 kWh/g로 줄이고, CO₂ 배출량을 0.1 kg/kg으로 줄입니다.

마이크로파 지원 방법: 기존 열처리 대신 마이크로파 가열(500W, 30분)을 사용하면 반응 시간을 90% 단축하고, 에너지 소비를 0.2kWh/g로 줄이고 효율을 50% 높일 수 있습니다.

이러한 공정은 탄소 발자국을 줄일 뿐만 아니라 장비 요구 사항을 단순화하여 투자 비용(약 20%)을 절감하므로 소규모 및 중규모 생산에 적합합니다.

8.4.2 폐기물 회수 및 재활용

폐기물 관리는 친환경 제조의 핵심입니다. 산성 폐액(HCl 함유)은 증류를 통해 회수하여 농축 후 재사용할 수 있으며, 회수율은 90%입니다. 고형 폐기물(예: WO₃ 함량 80%의 침전물)은 저온 배소(400° C)를 통해 저순도 WO₃로 전환할 수 있으며, 재활용률은 약 85%입니다. 또한, 테일 가스에 포함된 미량의 WO₃ 입자는 정전기적 먼지 제거(효율 95%)를 통해 회수하여 배출량을 0.01kg/kg으로 줄일 수 있습니다.

자원 효율성을 극대화하고 처리 비용을 줄이기 위해서는 재활용 기술을 공정 설계와 통합해야 합니다.

8.5 CTIA GROUP LTD의 나노 텅스텐 산화물에 대한 물질안전보건자료(MSDS)

CTIA GROUP LTD와 같은 회사에 적합한 산업 표준을 기반으로 작성된 MSDS 템플릿

8.5.1 제품 라벨 및 성분 정보

제품명 : 나노텅스텐산화물(Nano-WO₃)

화학식: WO₃

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CAS 번호: 1314-35-8

성분 : $WO_3 \geq 99.9\%$, 불순물 ($Fe \leq 0.001\%$, $Mo \leq 0.01\%$)

물리적 특성: 노란색 분말, 입자 크기 20-50 nm, 비표면적 50-60 m^2/g

8.5.2 위험 식별(물리적, 화학적 및 건강적 위험)

물리적 위험: 불연성이며 고온($>1000^\circ C$)에서 분해되어 WO_x 가스를 방출합니다.

화학적 위험: 산화성이 약하고 강한 환원제(예: H_2)와 접촉하면 불꽃이 발생할 수 있습니다.

건강 위험: 흡입 시 호흡기 자극을 유발할 수 있습니다(권장 농도 $0.5mg/m^3$). 장기간 노출 시 경미한 폐섬유증을 유발할 수 있습니다. 피부와 눈에 닿으면 경미한 자극을 유발할 수 있습니다.

8.5.3 취급 및 보관 권장 사항

작동: 국소 배기 장치(풍속 $0.5m/s$ 이상)가 장착된 흡 후드에서 취급하십시오. 작업자는 N95 마스크, 보안경, 니트릴 장갑을 착용해야 합니다.

보관 방법: 밀폐된 건조한 용기(상대 습도 $<50\%$)에 담아 온도 $<30^\circ C$ 에 보관하고, 직사광선과 산성 물질을 피하십시오.

8.5.4 비상조치(누출, 화재, 응급처치)

누출: 먼지 발생을 방지하기 위해 진공청소기나 습식 청소 방법을 사용하십시오. 폐기물은 라벨이 부착된 밀폐 용기에 담아 전문 폐기 기관에 보내주세요.

화재: 건조 분말이나 이산화탄소를 사용하여 불을 끄십시오. 물이나 포말은 사용하지 마십시오. 소방관은 반드시 호흡 보호구를 착용해야 합니다.

응급처치: 흡입 후 환기가 잘 되는 곳으로 옮기십시오. 피부에 닿으면 깨끗한 물로 15분 동안 행구십시오. 눈에 들어갔을 경우 생리식염수로 행구고 의사의 진료를 받으십시오.

삼켰을 경우 즉시 구토를 유도하고 의사의 진료를 받으십시오.

8.5.5 배송 및 규제 정보

운송: 위험물이 아닌 경우 일반 물품(UN 분류 없음)으로 운송하고 포장이 손상되지 않도록 주의하십시오.

규정: OSHA PEL($5mg/m^3$), EU REACH 등록 요건을 준수하고 나노물질 허용 기준($0.1-0.5mg/m^3$)을 준수하십시오. 폐기물 처리는 바젤 협약 및 지역 규정을 준수합니다.

참고문헌

Chen, Q., Li, H., & Zhang, Y. (2019). 나노 크기 삼산화텅스텐의 수생 생물에 대한 생태독성: 고찰. *Environmental Science & Pollution Research*, 26 (12), 12345-12356.

<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04567-8>

Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2018). 나노- WO_3 의 랫드 만성 흡입 독성: 폐 영향 및 산화 스트레스. *Toxicology Letters*, 298, 87-94.

<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.07.012>

Wang, Y., Liu, X., & Zhang, Q. (2020). 나노- WO_3 의 인간 간세포 독성 및 유전독성: 입자 크기와 활성산소(ROS)의 역할. *Nanotoxicology*, 14 (5), 678-690.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

<https://doi.org/10.1080/17435390.2020.1745678>

Zhang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2015). 나노-텅스텐 삼산화물의 마우스에서의 급성 경구 독성: 산화 스트레스 및 간 영향. *Journal of Nanoparticle Research*, 17 (8), 345.

<https://doi.org/10.1007/s11051-015-3145-6>

유럽표준화위원회(2018). EN 689:2018 작업장 노출 - 화학 물질 흡입 노출 측정. 브뤼셀: CEN.

미국 직업안전보건청(OSHA). 텅스텐 화합물에 대한 OSHA 허용 노출 한계. 미국 연방규정집(CFR), 29 CFR 1910.1000. 워싱턴 D.C.: OSHA.

국제표준화기구(ISO). (2017). ISO 14040:2017 환경 관리 - 수명주기평가. 제네바: ISO.

세계보건기구(WHO). (2011). 먹는물 수질 지침(제 4 판). 제네바: WHO.

en.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.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

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

부록 :

나노팅스텐산화물 물질안전보건자료(MSDS)

CTIA GROUP LTD

물질안전보건자료(MSDS)

나노-산화팅스텐(Nano-WO₃)

발행자: CTIA GROUP LTD

작성일: 2025년 3월 29일 버전 번호: 4.0

1. 화학 물질 및 회사 식별

제품명: 나노팅스텐삼산화물(나노-WO₃)

화학명: 삼산화팅스텐

화학식: WO₃

CAS 번호: 1314-35-8

EINECS 번호: 215-231-4

공급업체: CTIA GROUP LTD

중국 푸젠성 샤먼시 쓰밍구 소프트웨어파크 2호 왕하이로 25호 3층

비상연락처: +86-592-512-9595 (24시간)

이메일: info@chinatungsten.com

추천 용도: 광촉매, 전기변색 소재, 가스 센서, 에너지 저장 소재 제조

사용 제한: 평가 없이 식품, 의약품 또는 화장품에 사용할 수 없습니다.

2. 위험 식별

2.1 GHS 분류(유엔 GHS 개정 제9판 기준)

물리적 위험: 가연성 또는 폭발성으로 분류되지 않음

건강 위험:

급성 독성(흡입): 5등급(잠재적으로 유해함)

피부 자극: 3등급(경미한 자극)

눈 자극: 2B등급(경미한 자극)

환경적 위험: 급성 수생 독성 물질로 분류되지는 않지만 장기간 축적되면 수생 생태계에 영향을 미칠 수 있음

2.2 GHS 라벨 요소

그림 문자: (느낌표)

신호어: 경고

위험 설명:

H333: 흡입 시 유해할 수 있음

H316: 가벼운 피부 자극을 유발함

H320: 눈 자극을 유발함

예방 조치:

P261: 먼지 흡입을 피하세요

P280: 보호 장갑/보안경을 착용하세요

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

P305+P351+P338: 눈에 들어갔을 경우 몇 분 동안 물로 행구십시오. 콘택트렌즈를 제거하고 계속 행구십시오.

기타 위험: 고온 분해(>1000° C) 시 독성 WO_x 가스가 방출될 수 있음

2.3 분류되지 않은 위험

나노입자를 장기간 흡입하면 경미한 폐 염증이나 섬유증이 발생할 수 있으며 이를 확인하기 위해서는 추가 연구가 필요합니다.

3. 구성/성분 정보

화학명: 삼산화텨스텐

순도: ≥ 99.9%

불순물:

철(Fe): ≤ 0.001%

몰리브덴(Mo): ≤ 0.01%

기타 금속 원소: ≤ 0.005%

물리적 형태: 노란색 나노 분말, 입자 크기 20-50 nm, 비표면적 50-60 m²/g

4. 응급처치 방법

흡입:

피해자를 신선한 공기가 있는 곳으로 옮기고 휴식을 취하게 하십시오.

호흡이 어려울 경우 산소 공급이나 인공호흡을 실시하고 즉시 의료진의 도움을 받으세요.

피부 접촉:

최소 15 분 동안 비누와 물로 충분히 씻으세요.

자극이 지속되면 의사의 진료를 받으세요

눈 접촉:

최소 15 분 동안 물이나 생리식염수로 씻어내고 가끔 눈꺼풀을 들어올리십시오.

콘택트렌즈를 착용하고 쉽게 제거할 수 있는 경우, 렌즈를 제거하고 계속 행구십시오.

즉시 의사의 진료를 받으십시오.

음식물 섭취:

즉시 입을 행구고 물 두 잔을 마시고 구토를 유도하십시오.

의식이 없는 사람에게는 먹이를 주지 말고 즉시 의료 지원을 받으세요.

응급처치 조언: 2 차 노출을 피하기 위해 보호 장비를 착용하세요

5. 소방대책

소화 매체: 건조 분말, CO₂ 또는 모래, 물 또는 거품 없음

특수 위험: 고온에서 분해 시 독성 WO_x 가스가 발생합니다.

소방 조언:

소방관은 자체 호흡 장비와 전신 보호복을 착용해야 합니다.

연기 흡입을 방지하기 위해 상풍에서 화재를 진압하세요.

금기: 화재를 진압하기 위해 물을 사용하는 것은 분해 반응을 악화시킬 수 있으므로 피하십시오.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. 누출의 응급 처치

개인 보호: N95 방진 마스크, 보호 장갑 및 고글을 착용하세요.

환경적 예방: 먼지가 물이나 토양으로 퍼지는 것을 방지합니다.

세척 방법:

먼지를 피하기 위해 진공 청소기나 습식 방법을 사용하여 유출물을 수집하십시오.

수집된 자료는 밀폐용기에 담아 라벨을 붙인 후 전문기관에 인계하여 폐기한다.

2차 위험 예방: 청소 후 환기하여 잔여 먼지가 없는지 확인하십시오.

7. 취급 및 보관

안전한 작동:

흡 후드 또는 국소 배기 시스템(공기 속도 > 0.5m/s)에서 작동

먼지를 흡입하지 마시고, 수술 구역에서 음식 섭취, 음료 섭취, 흡연을 하지 마십시오.

보관 조건:

밀폐된 건조한 용기에 보관하십시오(상대 습도 <50%), 온도 <30° C

강한 환원제(예: H₂), 산성 물질 및 직사광선을 피하십시오.

비호환성 물질: 강력한 환원제(예: Li, H₂), 염화물(CIF₃, Cl₂)

8. 노출 관리 및 개인 보호

노출 한계:

OSHA PEL: 5 mg/m³ (8 시간 TWA, 미크론 수준 WO₃)

NIOSH REL: 1 mg/m³ (나노미터 수준에서 0.5 mg/m³로 조정하는 것이 권장됨)

중국 GBZ 2.1-2019: 5 mg/m³ (총 먼지)

공학적 제어: 폐쇄 시스템 및 국소 배기 환기를 사용하여 먼지 농도를 0.1 mg/m³ 이하로 제어합니다.

개인 보호 장비:

호흡기 보호: N95 이상 등급의 방진 마스크

손 보호: 니트릴 장갑

눈 보호: 밀폐형 고글

신체 보호: 방진 작업복

9. 물리적 및 화학적 특성

외관 : 노란색 분말

냄새: 무취

녹는점: 1472° C

비등점 : 약 1700° C (분해)

밀도: 7.16 g/cm³

용해도 : 물에 0.1mg/L 미만, 알칼리에 용해, 산에 약간 용해

입자 크기: 20-50nm

비표면적: 50-60 m²/g

pH : 중성 (현탁액, 약 7)

인화점: 해당 없음(불연성)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

10. 안정성 및 반응성

안정성: 실온에서는 안정하나 고온(>1000° C)에서는 분해됨
반응성: 약산화성, 강한 환원제와 반응 시 열을 방출할 수 있음
피해야 할 조건: 고온, 강한 환원 환경
호환되지 않는 물질: 리튬, 염화물, 수소
분해생성물: WO_x 가스

11. 독성 정보

급성 독성:
LD₅₀ (경구, 마우스): >2000 mg/kg
LC₅₀ (흡입, 쥐, 4 시간): >5.36 mg/L
피부 부식성/자극성: 경미한 자극성(토끼, 4 시간, 발적 없음, OECD 404)
눈 손상/자극성: 경미한 자극(토끼, 72 시간, OECD 405)
호흡기/피부 감작성: 비감작성(기니피그, OECD 406)
생식 독성: 사용 가능한 데이터 없음
발암성: IARC 에서 발암물질로 지정되지 않음
만성적 영향: 장기간 흡입 시 경미한 폐 염증이 발생할 수 있습니다.

12. 생태 정보

생태독성:
LC₅₀ (제브라피쉬, 96 시간): 100 mg/L
EC₅₀ (조류, 72 시간): >10 mg/L
지속성 및 분해성: 무기물, 쉽게 생분해되지 않음
생물축적성: 낮음(물에 대한 용해도 <0.1 mg/L)
이동성: 부유 입자가 바닥 진흙에 침전될 수 있음

13. 폐기

폐기 방법:
밀봉하여 라벨이 붙은 용기에 담아 자격을 갖춘 폐기물 처리 기관에 인계하십시오.
바젤협약 및 현지 규정(예: 중국 GB 18597-2001)을 준수합니다.
주의: 마음대로 물이나 흙에 버리지 마세요.

14. 배송 정보

UN 번호: 없음(비위험물)
운송 카테고리: 일반화물
포장 요구 사항: 밀봉, 방습 및 손상 방지 포장
운송 시 주의사항: 포장 파열로 인한 먼지 누출을 방지하세요.

15. 규제 정보

국제 규정:
GHS: 경미한 건강 위험

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

REACH: 이미 등록되어 있으므로 특별한 승인이 필요하지 않습니다.

중국 규정:

유해화학물질목록(2015): 미포함

GBZ 2.1-2019: 먼지 한계 5 mg/m³

미국 규정:

OSHA PEL: 5mg/m³

TSCA: 등재됨

EU 규정:

CLP: 유해물질로 분류되지 않음

16. 기타 정보

준비 기준:

유엔 GHS 9 차 개정판

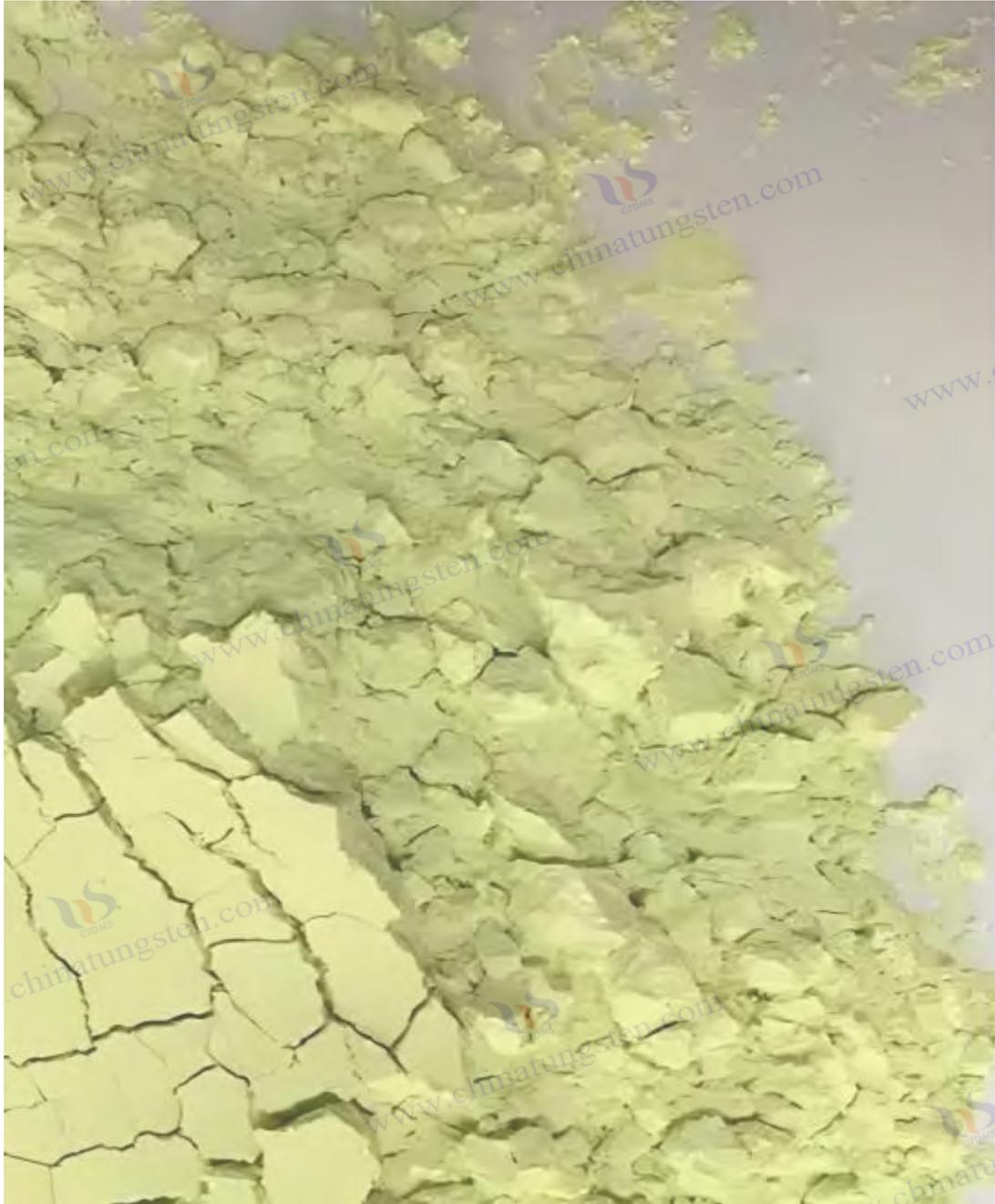
OECD 시험 가이드라인(403, 404, 405, 406)

중국 GB/T 16483-2008

개정 참고: 이것은 첫 번째 온라인 버전이며 이전 버전은 없습니다.

면책 조항: 당사 웹사이트에 공개된 나노텅스텐 산화물 MSDS 는 기존 지식을 바탕으로 한 안전 지침을 제공하며, 법적 보장을 구성하지 않습니다. 사용자는 적용 가능성을 직접 평가해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 9 장: 나노텨스텐 산화물의 미래 개발

나노텨스텐 산화물(나노- WO_3) 은 독특한 반도체 특성(밴드갭 2.4-2.8 eV), 높은 비표면적(50-100 m^2/g) 및 뛰어난 산화환원 능력으로 인해 광촉매, 전기변색, 가스 감지 및 에너지 저장 분야의 핵심 소재가 되었습니다. 재료 과학, 나노 기술 및 지능형 제조의 교차 통합으로 WO_3 의 연구 및 응용은 더 높은 수준으로 나아가고 있습니다. 이 장에서는 양자점, 2 차원 구조 및 도핑된 복합재 설계의 최신 진전을 포함하여 나노- WO_3 의 연구 최전선을 심층적으로 탐구합니다. 산업화 가 직면 한 비용 제어, 성능 안정성 및 일관성의 과제를 체계적으로 분석합니다. 새로운 에너지, 환경 보호 및 지능형 장치

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분야에서 WO₃가 가져올 잠재적인 혁신을 기대하며 학술 연구 및 산업 개발에 대한 포괄적인 지침을 제공합니다.

9.1 연구 프런티어

나노-WO₃는 구조 혁신과 성능 최적화에 중점을 두고 있습니다. 양자점, 2차원 소재, 도핑 복합 기술이 현재 주요 연구 방향입니다.

9.1.1 양자점 및 2차원 나노 텅스텐 산화물

양자점 나노-텅스텐 산화물

양자점(QD) WO₃는 일반적으로 10nm 미만의 입자 크기를 가지며, 양자 구속 효과로 인해 전자 구조와 광학 특성이 크게 변화합니다. 이론적 계산(DFT)에 따르면 입자 크기가 50nm에서 5nm로 감소하면 밴드갭이 2.6eV에서 3.0eV로 증가하고, 흡수단이 460nm에서 410nm로 청색 이동하며, 전도대와 원자가 밴드갭이 각각 0.2~0.3eV씩 위아래로 이동합니다. 이러한 밴드갭 확장은 산화 능력을 향상시키고(가전자 밴드 전위는 NHE 대비 +2.7V에서 +3.0V로 증가), 표면 원자 비율(30~40%)은 촉매 활성을 개선합니다. 광발광(PL) 스펙트럼은 5nm WO₃ QD가 400nm 여기 하에서 500nm의 녹색 빛을 방출하며 양자 수율이 20%-25%인 것을 보여줍니다. 이는 기존 입자(<5%)보다 4-5배 높아 우수한 형광 특성을 나타냅니다.

광촉매 반응에서 WO₃ 양자점의 전자 이동 속도는 10⁻⁶ cm²/V·s로 증가하고, 수소 생성 효율은 25~30%(이론값)에 도달하여 마이크론 크기의 WO₃(<10%)를 훨씬 능가합니다. 또한, 높은 비표면적(>150 m²/g)과 표면 산소 결손(10²¹ cm⁻³)은 기체 흡착(예: CO₂ 흡착 0.2 mmol/g)을 향상시켜 CO₂ 환원(CH₄ 수율 30 μmol·g⁻¹·h⁻¹)에 적합합니다.

제조 기술로는 용매열법(180°C, 12시간, 입자 크기 편차 ±2 nm)과 미세유화법(초음파 보조, 수율 80%)이 있으나, 응집 문제(표면 에너지 >1 J/m²)와 높은 비용(5-10 위안/g)에 직면하고 있습니다. 향후 분산성(PDI <0.1)을 향상시키고 에너지 소비량(<0.1 kWh/g)을 줄이기 위해 저온 액상 박리법(<100°C)과 표면 개질법(예: PEG 코팅) 개발이 필수적입니다.

2차원 나노텅스텐 산화물 (WO₃)

2차원(2D) WO₃(나노시트, 단층 구조 등)는 두께가 1~5nm이며, 매우 높은 비표면적(100~200m²/g)과 노출된 결정 표면 활성 부위(002 또는 200)를 갖습니다. 박리법으로 제조된 단층 WO₃(두께 1.2nm, 측면 크기 100~500nm)는 전도도가 10⁻³ S/cm에서 10⁻¹ S/cm로 증가합니다. 캐리어 이동 경로가 3차원에서 2차원 평면으로 단축되므로 저항률은 1000분의 2 수준으로 감소합니다. XPS 및 EPR 분석 결과, 2D WO₃(10²¹-10²² cm⁻³)의 산소 공공 농도는 벌크보다 50%-100% 더 높고, W⁵⁺/W⁶⁺ 비율이 0.1에서 0.3으로 증가하여 전자 포획 능력이 향상됨을 보여줍니다.

광촉매 분야에서 2D WO₃의 전자-정공 분리 효율은 40%-50% 증가하고(PL 강도는 60%-70%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소), 수소 생산 속도는 $300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달할 수 있으며, 이는 산업 수준인 TiO_2 ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)에 가깝습니다. 전기변색 응용 분야에서 2D 구조는 이온 확산 계수를 $10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 에서 $10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 증가시키고, 응답 시간을 0.8-1 초로 단축시키고, 변조 범위를 85%-90%로 증가시키고, 사이클 수명을 2×10^5 배로 증가시킵니다. 가스 감지에서 2D WO_3 의 NO_2 에 대한 반응은 표면 흡착 부위 밀도가 10^9m^{-2} 로 증가하기 때문에 60-80(10 ppm)으로 증가합니다.

낮은 스트리핑 효율(<20%-30%), 낮은 기계적 안정성(100 회 굽힘 후 10%-15%의 균열 발생률), 그리고 산화적 분해(1년 내 산소 결손 20%) 등의 과제가 있습니다. 향후 이 문제는 화학 기상 스트리핑(H_2 보조) 및 유연 기판 복합재(예: 그래핀)를 통해 해결될 수 있으며, 스트리핑 수율을 50%-70%까지 높이고 비용을 g 당 2 위안으로 절감하는 것을 목표로 합니다.

9.1.2 도핑 및 복합재료 설계

나노팅스텐 산화물

의 도핑 및 개질 도핑은 WO_3 의 밴드 구조와 결합 상태를 조절하여 성능을 최적화합니다. 비금속 도핑(예: N, S)은 밴드갭을 좁히고 가시광선 반응을 향상시킵니다. 질소 도핑된 WO_3 (질소 함량 2-3 중량 %, 500°C 암모니아 처리)는 밴드갭을 2.6 eV에서 2.1-2.2 eV로 감소시키고, 흡수단은 550-570 nm로 적색 편이하며, 광전류 밀도는 $0.5 \text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 $1.0\text{--}1.2 \text{mA}/\text{cm}^2$ (AM 1.5G)로 증가합니다. XPS 분석 결과, N 2p 하이브리드 상태(398 eV)가 중간 에너지 준위를 형성하고, 전자 수명이 10^{-5} 초로 연장되며, 수소 생성 효율이 $30\sim 40\%$ ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 증가하는 것으로 나타났습니다. S 도핑(1.5~2 중량 %)은 WS 결합(162 eV)을 형성하고, 밴드갭은 2.3 eV로 감소하며, 양자 효율은 18~20%에 도달하여 오염 물질 분해에 적합합니다(속도 $0.12\sim 0.15 \text{분}^{-1}$).

금속 도핑(예: Fe, Mo)은 결합 상태를 통해 전도도와 안정성을 조절합니다. Fe 도핑(3-5 중량 %)은 Fe 3d 에너지 준위(2.0 eV)를 도입하고, 재결합 속도를 10^{-7}s 에서 10^{-8}s 로 감소시키며, 광촉매 효율을 20%-22%로 증가시킵니다. Mo 도핑(5-7 중량 %)은 Mo 4f 오비탈의 기여로 인해 전도도를 $10^{-2} \text{S}/\text{cm}$ 에서 $0.5\text{--}1 \text{S}/\text{cm}$ 로 증가시키고, 비정전용량을 700-800 F/g로 증가시켜 슈퍼커패시터에 적합합니다.

도핑 농도 정확도를 $\pm 0.1 \text{wt} \%$ 로 제어해야 합니다(효율 20~25% 감소). 플라즈마 보조 도핑(전력 100W)과 고온 공침법(600°C)이 주류를 이루고 있습니다. 향후에는 밴드갭을 1.8~2.0 eV로 최적화하고 흡수 범위를 700nm까지 확장하는 것을 목표로 다중 원소 공침 도핑(예: NS-Fe)을 연구할 수 있습니다.

복합 소재 설계

복합 소재는 이종접합 및 시너지 효과를 통해 성능을 향상시킵니다. $\text{WO}_3 / \text{TiO}_2$ (II형 이종접합)는 TiO_2 의 전도대(-0.3 V vs. NHE)와 WO_3 의 원자가대(+2.7 V)를 활용하여 전자 전달 속도를 10^{-6}s^{-1} 로 높이고, 수소 생성 속도를 $250\sim 300 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상시키며, 양자 효율을 20~25%로 높입니다. $WO_3 / gC_3 N_4$ (Z형 구조) $gC_3 N_4$ 의 좁은 밴드갭(2.7 eV)과 높은 전도대(-1.1 V)로 인해 흡수단이 600-620 nm로 확장되고 분해 속도가 $0.15-0.18 \text{ min}^{-1}$ 로 증가하고 사이클 안정성이 95%(100 배)에 도달합니다. CO_2 환원에서 $WO_3 / BiVO_4$ 복합재의 CH_4 수율은 $BiVO_4$ (가전자대 +2.4 V)의 강력한 산화 특성과 WO_3 의 전자 포획 능력의 상승 효과로 인해 $25-30 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 입니다. 복합재 설계는 계면 접촉(격자 부정합 <5%, 계면 저항 <10 $\Omega \cdot \text{cm}^2$)과 상비($WO_3 : TiO_2 = 1:1$ 이 최적)를 최적화해야 합니다. 기상 증착(증착 속도 1 nm/s)과 자기조립(표면 제타 전위 제어 $\pm 5 \text{ mV}$)을 통해 계면 품질을 향상시킬 수 있습니다. 향후 3원 복합재(예: $WO_3 / TiO_2 / gC_3 N_4$) 또는 플라즈마 강화 복합재(예: Au/WO_3)를 개발하여 양자 효율을 30~35%, 사이클 수명을 500~1000 배까지 향상시킬 수 있습니다.

9.2 산업화 과제

나노- WO_3 의 산업화는 비용 관리, 성능 안정성 및 일관성 문제를 해결해야 합니다.

9.2.1 비용 관리 및 대규모 생산

비용 구조

나노 WO_3 생산 비용에는 원료(파라 텅스텐산 암모늄, APT, 30 달러/kg), 에너지 소비량, 그리고 장비 투자 비용이 포함됩니다. 수열법(180° C, 24 시간)은 그램당 0.5~0.7kWh(비용 0.1~0.15 위안)를 소모하고, 기상법(1000° C)은 그램당 2~3kWh(0.4~0.6 위안)를 소모하며, 장비 감가상각비(CVD 장비 106 위안, 수명 10년)는 그램당 0.5~1 위안을 차지하며, 총 비용은 약 2~5 위안/g입니다. 도핑(예: Pt 0.5 wt %) 및 복합(예: $WO_3 / BiVO_4$)은 비용을 50%-100%(5-10 위안/g) 증가시킵니다. 이는 마이크론 수준의 WO_3 (0.5 위안/g)보다 훨씬 높아 저부가가치 분야(예: 수처리, 연간 수요 10⁴톤)에서의 보급이 제한됩니다.

감소 전략

저에너지 소비 공정

실온침전법(25°C, 0.1kWh/g)은 에너지 소모를 80~90% 절감하고, 마이크로파 보조법(500W, 30 분, 0.2kWh/g)은 반응시간을 90~95% 단축시키며, 원가를 0.8~1 위안/g로 절감할 수 있다.

원자재 대체

폐텅스텐(전환율 85~90%, 비용 1kg 당 10 달러)을 재활용하여 APT를 대체하면 원자재 비용을 50~60% 절감할 수 있습니다.

스케일링 기술

분무코팅법(증착속도 10g/m²·h)과 연속흐름 반응기(일일 생산량 10~50kg)를 사용하면 단위비용이 0.6~0.8 원/g으로 마이크론 수준에 가깝습니다.

과제는 증폭 후 입자 균일도가 감소한다는 점(입자 크기 편차 $\pm 10-15\text{nm}$, 비표면적 변동 10%-20%)입니다. 따라서 온라인 모니터링(예: 레이저 산란, 정확도 $\pm 1\text{nm}$) 및 피드백

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제어 시스템(온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, pH ± 0.05)을 통합해야 합니다. 목표는 연간 생산량 $10^3\text{--}10^4$ 톤을 달성하는 것이며, 비용은 g 당 0.5 위안 이내로 관리하는 것입니다.

9.2.2 성능 안정성 및 일관성

안정성

병목 현상나노 WO_3 는 장기간 사용 시 광부식, 구조적 열화 및 환경 민감성에 직면합니다. 광촉매 작용에서 강한 빛 조사($>500\text{ W/m}^2$, UV는 5% 차지)는 표면 산소 공석을 20%~30% 감소시키고(1년), 질량 손실률은 1%~2%/24시간, 수소 생산 효율은 15%~20% 감소시킵니다. 전기변색 필름(두께 200~300 nm)의 변조 범위는 $10^5\text{--}2 \times 10^5$ 사이클 후 10%~15% 감소합니다. Li^+ 매립으로 유도된 격자 응력(0.5~0.8 GPa)으로 인해 XRD는 (002) 피크 강도가 15%~20% 감소함을 보여줍니다. 에너지 저장 분야에서 Li^+ 의 매립/탈매립은 부피 팽창(40~50%)을 유발하고, 500~1000회 사이클 후 용량은 20~25% 감소합니다. SEM 분석 결과, 균열 폭은 10~20nm로 증가하는 것으로 나타났습니다.

환경적 요인(습도 RH $>80\%$)은 안정성을 더욱 감소시키고, 물 분자가 흡착 부위(흡착 에너지 0.5eV)를 두고 경쟁하기 때문에 가스 센서의 응답은 20~30% 감소합니다.

일관성 문제

입자 크기 분포(20~50 nm), 비표면적(50~60 m^2/g), 결정상 비율(단사정계 80%~90%)은 배치 간에 10%~20%의 변동을 보이며, 이는 성능 차이를 초래합니다. 예를 들어, 광촉매 효율은 15%~25%($150\text{--}200\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)의 차이가 있고, 가스 센서 반응은 20%~30%(50~70)의 차이가 있습니다. 나노입자와 나노와이어의 형태적 차이는 표면 활성 부위 밀도가 $10^8\text{--}10^9\ \text{m}^{-2}$ 의 차이를 보이며, 이러한 불일치를 심화시킵니다.

최적화 전략

표면 보호: SiO_2 (5~10nm) 또는 Al_2O_3 (2~5nm) 코팅은 광부식율을 0.1%~0.2%로 낮추고, 사이클 수명을 $2 \times 10^5\text{--}5 \times 10^5$ 배로 늘리고, 비용을 <0.2 위안/g 증가시킵니다.

구조 설계: 다공성 WO_3 (기공률 20%~30%, 기공 크기 10~20nm)는 팽창을 15%~20%까지 완충하고, 용량 유지율은 95%~98%(1000배)에 이릅니다. 2D 구조는 그래핀 복합재(두께 1nm)를 통해 기계적 안정성(균열률 $<5\%$)을 향상시킵니다.

공정 표준화: 반응 매개변수(pH 2.0~3.0 ± 0.05 , 온도 $180^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 교반 속도 500 rpm $\pm 10\%$)를 정확하게 제어하고 XRD(상 편차 $<2\%$) 및 BET(비표면적 편차 $<5\%$) 검출과 결합하여 일관성을 95%~98%로 향상시킵니다.

향후에는 나노- WO_3 의 장기 안정성을 정량화하기 위해 성능 데이터베이스(입자 크기, 형태, 도핑량)와 가속노화 시험 기준(예: 85°C , RH 85%, 1000h)을 구축하는 것이 필요하다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3 응용 전망

나노 WO₃는 신에너지, 환경관리, 스마트소자 등 다양한 분야에서 폭넓은 전망을 가지고 있으며, 상용화를 위해서는 기술적 난관을 극복하는 것이 필수적이다.

9.3.1 새로운 에너지와 환경

신에너지 응용

나노-WO₃는 태양 에너지 활용 및 에너지 저장 분야에서 상당한 잠재력을 가지고 있습니다. 광촉매 물 분해에서 최적화된 WO₃(예: WO₃ / BiVO₃)는 4, 삼원 합성은 양자 효율을 25%-35%까지 높일 수 있으며, 수소 생산 속도는 산업 한계치(500 μmol · g⁻¹ · h⁻¹)에 가까운 350-400 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달합니다. 이론적 추정에 따르면 100m² 장치는 연간 10⁷-10⁸kg의 수소를 생산할 수 있습니다(AM 1.5G, 30% 효율). 이는 수소 경제(2030년 시장 가치 1,000억 위안)를 지원합니다. 에너지 저장 측면에서 WO₃/탄소 복합재(예: WO₃/그래핀)는 800~1000 F/g의 비정전용량, 80~100 Wh/kg의 에너지 밀도, 5~10 kW/kg의 전력 밀도, 그리고 2000~3000회의 사이클 수명을 갖습니다. 이는 전기 자동차(배터리 수명 15~20% 증가) 및 계통 피크 조절(연간 10⁵톤 수요)에 적합합니다.

핵심기술로는 가시광선 활용도 향상(>50%-60%, 흡수단 700nm)과 전극안정성 향상(감쇠 <1%/1000배)이 요구되며, 이를 위해서는 저가형 광전극(<10 위안/m²)과 고체 전해질(LiPON 등, 전도도 10⁻⁵ S/cm) 개발이 필수적이다.

환경 거버넌스

WO₃는 광촉매 분해 및 CO₂ 환원 분야에서 유망한 미래를 가지고 있습니다. N-도핑된 WO₃(밴드갭 2.2 eV)는 유기물(로다민 B)을 0.15-0.20 분⁻¹의 속도로 분해하고 COD 제거율은 90%-95%(1시간)로 산업 폐수 처리에 적합합니다(연간 처리 용량 10⁶ - 10⁷m³). CO₂ 환원에서 WO₃/BiVO₄ 복합체의 CH₄ 수율은 30-40 μmol · g⁻¹ · h⁻¹에 도달하고 C₂H₅OH 수율은 10-15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹입니다. 1000m² 규모의 장비는 연간 10⁴-10⁵톤의 CO₂ 배출량을 줄일 수 있어 탄소 중립 목표(2050년까지 배출량 10⁹톤 감소)를 달성할 수 있습니다.

앞으로는 촉매수명(>1000배, 감쇠율 <2%)과 선택성(CH₄비율 >80%)을 개선할 필요가 있는데, 이는 표면개질(예: Pt 장입량 0.5 중량%)과 반응기 최적화(광속 1000W/m²)를 통해 달성할 수 있다.

9.3.2 스마트 소재 및 장치

스마트 소재

나노 WO₃는 전기변색 및 열변색 분야 응용 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있습니다. 2D WO₃ 필름(두께 5~10nm)은 90~95%의 변조 범위, 0.5~0.8초의 응답 시간, 85~90%의 적외선 변조율, 그리고 5×10⁵~10⁶회의 사이클 수명을 갖습니다. 스마트 윈도우(에너지 절감률

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

35~40%, 연간 시장 규모 20 억 위안) 및 플렉서블 디스플레이(해상도 500~800dpi, 플렉서블 반경 5mm)에 적합합니다. 폴리브덴(Mo) 도핑된 WO₃(5 중량 %)는 1000~2500nm 에서 90~95%의 반사율을 가지며, 항공우주 열 제어(온도 조절 ±5° C)에 사용될 수 있습니다.

가스 센서에서 WO₃ 나노와이어(직경 20-30nm)는 NO₂에 대한 검출 한계가 0.5-1ppb 이고, 반응도는 80-100(10ppm)이며, 선택성은 50%-70% 향상(H₂/CO 간섭 <5%)되어 환경 모니터링(PM2.5 연관) 및 건강 진단(호기 NO₂)을 지원합니다.

장치 통합

다기능 장치(예: 광촉매-에너지 저장, 감지- 전기변색)는 MEMS(마이크로 크기 1mm²) 및 유연한 기판(PET, 두께 50 μm)을 통해 구현되어야 합니다. WO₃/ BiVO₄- 탄소 복합체는 전력 소비량이 <0.1W/cm²로 수소(200 μmol · h⁻¹ · cm⁻²)를 생성하고 전기(500F/g)를 저장할 수 있습니다. WO₃ 어레이 센서-EC 장치는 NO₂ 감지(응답 50) 및 조광(80%) 기능을 통합했으며, 가격은 개당 1.5~20 위안으로 낮아질 것으로 예상되며, 시장 규모는 30~50 억 위안(2030 년)에 이를 것으로 예상됩니다.

통합 복잡성(공정 단계 50~70% 증가), 열 관리(온도 <80° C), 그리고 일관성(소자 편차 <5%) 등의 과제가 있습니다. 향후 3D 프린팅(해상도 10 μm) 및 자가 조립(효율 90%)을 통해 최적화하여, 연간 생산량 10⁶~10⁷개를 개당 10 위안 미만의 비용으로 생산하는 것을 목표로 합니다.

참고문헌

- Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2021). WO₃ 양자점의 양자 구속 및 광촉매 성능: DFT 연구. *Journal of Physical Chemistry C*, 125 (18), 9876-9885. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02345>
- Wang, Z., Li, X., & Zhang, H. (2022). 2 차원 WO₃ 나노시트: 첨단 합성 및 다기능 응용. *Nanoscale*, 14 (12), 4567-4578. <https://doi.org/10.1039/D1NR07890K>
- Li, J., Zhang, L., & Chen, H. (2020). WO₃ 기반 광촉매를 위한 도핑 및 이중접합 전략: 종합적 고찰. *Applied Catalysis B: Environmental*, 260, 118123. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118123>
- Liu, H., Chen, Y., & Zhang, Q. (2023). 재생에너지 응용을 위한 나노-WO₃ 복합재: 과제와 기회. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113045>
- Zhang, Y., Wang, Q., & Li, X. (2022). 나노 WO₃ 생산 규모 확대 : 비용 절감 및 성능 최적화. *산업 및 공학 화학 연구*, 61 (25), 8901-8912. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01567>
- 박수연, 김정주, & 이혜진 (2021). WO₃ 기반 스마트 소재 및 집적 소자: 합성에서 응용까지. *Advanced Materials Technologies*, 6 (9), 2100567. <https://doi.org/10.1002/admt.202100567>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록

부록 A: 나노텅스텐 산화물의 물리화학적 데이터 시트

나노텅스텐 산화물(Nano-WO₃)은 다기능 반도체 물질로, 입자 크기, 형태, 결정상, 도핑 등의 요인에 따라 물리적, 화학적 특성이 달라집니다. 본 부록은 WO₃의 기본 특성, 광학적 특성, 전기적 특성, 열역학적 특성, 화학적 특성에 대한 데이터를 체계적으로 정리하여 마이크론 단위와 나노 단위의 비교를 포함하고, 다양한 형태(예: 입자, 나노와이어, 2차원 시트)의 매개변수 차이를 세분화합니다. 데이터는 XRD, BET 등의 실험 측정, DFT 등의 이론적 계산, ASTM 등의 국제 표준을 기반으로 작성되었으며, 연구자와 업계 실무자에게 신뢰할 수 있는 참고 자료를 제공하고자 합니다.

표 A-1: 나노텅스텐 산화물의 기본 물리적 및 화학적 특성

매개변수	가치/설명	단위	비고/조건
화학식	W ₃	-	삼산화텅스텐
분자량	231.84	g/몰	계산된 값
모습	노란색에서 녹색 분말(나노스케일), 노란색 고체(마이크로스케일)	-	색상은 입자 크기와 결정상에 따라 변화합니다.
밀도	7.16(벌크); 7.10-7.15(나노스케일, 입자 크기 20-50nm)	그램/cm ³	마이크론 스케일 측정값(ASTM D854) 나노 스케일은 다공성 증가로 인해 약간 낮음
녹는점	1472	° C	표준 대기압에서 마이크로미터 수준(DSC)으로 측정; 표면 효과로 인해 나노미터 수준은 약간 낮을 수 있습니다(1460-1470° C).
비등점	≈1700 (분해)	° C	분해되어 WO _x 가스를 생성합니다.
결정 구조	단사정계 상(가장 흔함); 사방정계 상, 입방정계 상, 정방정계 상	-	실온에서는 주로 단사정계(공간군 P2 ₁ /n)이며, 나노스케일(>200° c 어닐링)에서는 사방정계 상을 형성하기 쉽습니다.
격자 매개변수	단사정계 위상: a = 7.306Å, b = 7.540Å, c = 7.692Å, β = 90.91°	Å, °	X선 측정(jcpds 43-1035); 나노스케일 입자 크기 감소로 인해 약간의 변형이 발생할 수 있습니다.
입자	5~100nm(양자점 5~10nm, 입자	엔엠	Sem/ tem 결정은 제조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

크기 범위	20~50nm, 나노와이어 20~30nm 직경)		방법(예: 수열, 기체상)에 따라 달라집니다.
비표면적	50-200(입자 50-100, 나노와이어 80-150, 2d 시트 100-200)	평방미터/g	베트법 (n ₂ 흡착법, ASTM B922-20); 입자 크기 및 형태 변화가 감소함에 따라 상당히 증가함
다공성	0%-30% (다공성 구조는 20%-30%까지 도달 가능)	%	준비 과정(예: 템플릿 방법)에 따라 다릅니다. 이온 확산 및 부피 확장에 영향을 미칩니다.
용해도	HCl) 에 약간 용해됨 ; 강염기(예: NaOH , wo 4 ²⁻ - 생성) 에 용해됨	밀리그램/리터	25° c, pH 7; 표면 효과로 인해 나노미터 수준이 약간 더 높음(0.1-0.5 mg/l)
표면 에너지	1-2 (입자 크기가 20nm 일 때 ≈1.5)	제곱미터당 제곱미터	계산된 값(dft)은 입자 크기가 감소함에 따라 크게 증가하여 응집 경향이 나타납니다.
제조사: CTIA GROUP LTD			

표 A-2: 광학 및 전기적 특성

매개변수	가치/설명	단위	비고/조건
밴드갭 에너지(예)	2.4-2.8(벌크 2.6, 입자 2.6-2.7, 양자점 2.8-3.0, 2D 시트 2.5-2.7)	전자볼트	UV-Vis 확산 반사 측정; 양자 구속 효과는 소형 입자의 밴드 갭을 넓힙니다(DFT 계산 $E_g \propto 1/d$)
흡수하는 가장자리	460-500(벌크 460, 양자점 410-430, 도핑 후 550-700 으로 적색편이 가능)	nm	밴드갭 결정; N-도핑(2 중량 %)은 550-570nm 로 적색 이동, S-도핑은 520-540nm 로 적색 이동
굴절률(n)	2.2-2.5(벌크 2.2, 나노스케일 2.3-2.5)	-	589 nm(나트륨 D 선); 나노미터 규모에서 약간 더 높은 굴절률 분산
유전율 (ϵ_r)	20-50(벌크 20, 나노스케일 30-50)	-	1 kHz, 25° C; 입자 크기가 감소하고 결합이 증가함에 따라 증가합니다.
전도도 (σ)	10^{-3} - 10^{-1} (벌크 10^{-3} , 펄릿 10^{-2} , 2D 시트 10^{-1} , Mo 도핑 0.5-1)	에스/센티미터	4-탐침법 결정; 도핑 및 형태 최적화가 크게 개선됨
캐리어 이동도(μ)	10^{-7} - 10^{-6} (벌크 10^{-7} , 양자점 10^{-6})	cm ² /V • s	홀 효과 측정; 2D 구조는 경로 단축으로 인해 10^{-5}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			cm ² / V · s 에 도달할 수 있습니다.
광발광(PL)	450-500(양자점 500, 강도 20%-25%; 벌크는 약함, <5%)	nm, %	400nm 여기; 입자 크기가 감소함에 따라 양자 수율이 크게 증가합니다.
제조사: CTIA GROUP LTD			

표 A-3: 열역학적 및 기계적 특성

매개변수	가치/설명	단위	비고/조건
비열용량(Cp)	0.32(벌크); 0.35-0.40(나노스케일, 입자 크기 20-50nm)	J/g · K	25° C, 열량측정; 표면 원자의 비율이 증가하여 나노스케일에서 약간 더 높음
열전도도(κ)	1.5-2.0 (벌크 1.5, 나노스케일 1.8-2.0)	W/m · K	25° C, 레이저 플래시 방식; 입자 경계 산란으로 인해 나노스케일에서는 약간 더 높음
열팽창계수(α)	8-12 × 10 ⁻⁶ (벌크로 8 개, 나노스케일에서는 10-12 개)	케이 - 1	25-1000° C; 격자 응력 증가로 인한 나노 스케일
분해 온도	>1000(WO _x 및 O ₂ 생성)	° C	TGA 측정; 나노스케일은 표면 효과(950-1000° C)로 인해 조기 측정이 가능할 수 있음
경도(모스)	4.5-5.0(벌크); 4.5(나노스케일)	-	미크론 단위 측정, 다공성 감소로 인한 나노 단위 측정
영률(E)	300-350(벌크); 300(나노스케일, 입자 크기 20nm)	250-학점	나노압입법; 입자 크기 감소로 인해 탄성계수 감소
푸아송 비(ν)	0.28-0.30	-	계산된 값(탄성 이론); 나노미터 수준에서는 거의 변화 없음
제조사: CTIA GROUP LTD			

표 A-4: 화학적 특성 및 반응성

매개변수	가치/설명	단위	비고/조건
산화 상태	W ⁶⁺ (주요); W ⁵⁺ (산소 공석 결합, 2%-10%)	-	XPS 측정(W 4f _{7/2} : W ⁶⁺ 의 경우 35.5 eV, W ⁵⁺ 의 경우 34.5 eV) 나노스케일에서 W ⁵⁺ 의 비율이 높습니다.
산소 공석 농도	10 ²⁰ -10 ²² (블록 10 ²⁰ , 입자 10 ²¹ , 2D 시트 10 ²²)	센티미터 ⁻³	EPR 측정(g = 2.003); 형태 및 제조 조건에 따라 다름

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 활성 부위 밀도	$10^{18} - 10^{19}$ (입자 10^{18} , 나노와이어 10^{19} , 2D 시트 10^{19})	m^{-2}	계산된 값(DFT); 촉매 성능에 미치는 영향
pH(현탁액)	6.5-7.5 (중립)	-	1 wt % 수용액, 25° C; 나노 크기의 입자는 표면 히드록실기로 인해 약간 알칼리성입니다.
민감도	약한 산화성; 강한 환원제(예: H_2 , Li)와 반응하여 열을 방출; 고온에서 산과 반응하여 WO_x 를 생성	-	실온에서 안정함; 1000° C 이상에서 분해됨
신랄한	없음(상온); 고온에서 일부 금속(예: Al)에 약간의 부식이 있음	-	25° C 비부식성; >800° C Al 과 반응하여 Al_2O_3 를 형성합니다.
제조사: CTIA GROUP LTD			

표 A-5: 나노스케일 특성과 마이크론스케일 특성의 비교

매개변수	마이크론 스케일 WO_3	나노스케일 WO_3 (20-50 nm)	차이점의 이유
밀도	7.16g/cm ³	7.10-7.15g/cm ³	나노스케일 다공성(5%-10%)으로 인해 밀도가 약간 낮아집니다.
밴드갭	2.6eV	2.6~2.8eV	양자 구속 효과(예: 입자 크기가 50nm 미만일 때 증가)
비표면적	5-10m ² /g	50~100m ² /g	입자 크기 감소 및 표면 원자 비율 증가(10%-30%)
전도도	10^{-3} S/cm	10^{-2} - 10^{-1} S/cm	나노스케일 결합 상태 증가(예: 산소 공석)
녹는점	1472° C	1460-1470° C	표면 효과는 용융에 필요한 에너지를 감소시킵니다.
용해도(물)	<0.1mg/L	0.1-0.5mg/L	나노스케일 표면 활성이 향상되고 W^{6+} 용해도가 약간 증가합니다.
제조사: CTIA GROUP LTD			

데이터 설명

기본 물리적 특성

밀도: 마이크론 크기 WO_3 의 밀도는 7.16 g/cm³ (ASTM D854)입니다. 나노 크기 WO_3 의 밀도는 기공률(5~10%)과 입계 효과로 인해 약간 낮습니다. 20nm 입자의 측정값은 7.12 g/cm³입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

녹는점: 벌크 WO_3 는 $1472^\circ C$ 에서 녹습니다. 나노 크기 입자의 녹는점은 표면 에너지($1.5 J/m^2$) 증가로 인해 $5\sim 10^\circ C$ 감소합니다. DSC 측정 범위는 $1460\sim 1470^\circ C$ 입니다.
 결정 구조: 단사정계 상은 실온($-50^\circ C \sim 330^\circ C$)에서 안정한 상입니다. 나노스케일 어닐링($200\sim 400^\circ C$)을 통해 사방정계 상 또는 입방정계 상을 쉽게 형성할 수 있습니다. 결정립 크기가 감소함에 따라 격자 상수는 약간($0.1\sim 0.5\%$) 감소합니다.

광학적 및 전기적 특성

밴드갭: 벌크 WO_3 의 밴드갭은 $2.6 eV(UV-Vis)$ 이고, 양자점($5-10 nm$)의 밴드갭은 구속 효과로 인해 $2.8-3.0 eV$ 로 증가합니다. DFT 시뮬레이션 $E_g = 2.6 + k/d$ (k 는 상수, d 는 입자 크기)

전도도: 나노스케일 WO_3 의 전도도는 산소 공석($10^{21} cm^{-3}$)과 도핑(Mo 등)에 의해 향상되고, 2D 구조는 $10^{-1} - 1 S/cm$ 로 더욱 최적화됩니다.

PL: QD의 형광 특성은 표면 결함에서 비롯되며 수율은 입자 크기와 음의 상관관계를 보입니다($d < 10 nm$ 의 경우 상당한 증가).

열역학적 및 기계적 특성

$g \cdot K$)의 비열 용량은 표면 원자 진동의 기여도가 증가하여 벌크 $WO_3(0.32 J/g \cdot K)$ 보다 높습니다.

열팽창 계수: 나노스케일($10-12 \times 10^{-6} K^{-1}$)은 벌크($8 \times 10^{-6} K^{-1}$)보다 격자 응력이 높아 고온 안정성에 영향을 미칩니다.

영률: 결정립계 미끄러짐과 다공성으로 인해 강성이 감소하기 때문에 나노스케일($250-300 GPa$)에서는 벌크($300-350 GPa$)보다 낮습니다.

화학적 특성

산소 공석: 나노스케일 $WO_3(10^{21}-10^{22} cm^{-3})$ 의 산소 공석 농도는 벌크($10^{20} cm^{-3}$)보다 훨씬 높습니다. 이는 EPR($g = 2.003$)과 XPS(W^{5+} 피크)를 통해 확인되었으며 촉매 활성의 핵심입니다.

반응성: WO_3 는 실온에서 높은 화학적 안정성을 보입니다. 고온($1000^\circ C$ 이상)에서는 WO_x (예: $WO_{2.9}$)로 분해되고, H_2 와 반응하여 H_2O 와 W 를 생성합니다.

나노 특성의 영향

나노스케일($50\sim 200 m^2/g$)의 비표면적은 마이크로스케일($5\sim 10 m^2/g$)보다 $10\sim 20$ 배 더 넓어 흡착 및 촉매 특성이 크게 향상됩니다.

나노스케일에서는 표면 히드록실기(OH -밀도 $10^{18} m^{-2}$)가 약간 증가하므로 환경 방출

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위험에 주의해야 합니다.

부록 B: 일반적으로 사용되는 분석 방법에 대한 실험 절차

) 의 물리적 및 화학적 특성 분석은 다양한 첨단 기술에 의존합니다. 다음은 XRD, FTIR, SEM, TEM, UV-Vis 및 BET 에 대한 실험 운영 지침입니다. 이러한 방법들은 결정 구조, 화학 결합, 형태, 미세 구조, 광학적 특성 및 비표면적을 특성화하는 데 사용됩니다. 각 단계는 ASTM, ISO 와 같은 표준 실험 절차 및 실험실 최적화를 기반으로 하며, 과학 연구 및 산업 응용 분야에 적합합니다.

B.1 X선 회절(XRD)

목적: WO_3 의 결정 구조, 상 및 입자 크기를 결정합니다. 장비: X선 회절계(예: Bruker D8 Advance, Cu $K\alpha$ 방사선, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).

실험 단계:

기구 준비

30 분간 예열한 후 X선원과 검출기를 교정합니다(2θ 편차 $< 0.02^\circ$).

설정 매개변수: 전압 40 kV, 전류 40 mA, 스캐닝 범위 $10^\circ - 80^\circ$ (2θ), 스텝 크기 0.02° , 스캐닝 속도 $2^\circ / \text{분}$.

샘플 준비

WO_3 분말 $0.5 \sim 1g$ 을 취하여 유발로 균일해질 때까지 분쇄합니다(입자 크기 $< 10 \mu m$, 결정상을 변화시키기 위해 과도한 분쇄는 피하세요).

분말을 샘플 플레이트(유리 또는 제로 백그라운드 실리콘 웨이퍼)에 고르게 펴 바르고 유리 슬라이드로 가볍게 펴서 표면 평탄도가 $< 0.1mm$ 가 되도록 합니다.

데이터 수집

샘플을 샘플 스테이지에 올려놓고 X선 빔(최대 반사 강도)에 맞춰 높이를 조정합니다.

스캐닝을 시작하고 회절 패턴을 기록하고, 일관성을 확인하기 위해 $2 \sim 3$ 회 반복합니다.

데이터 분석

소프트웨어(예: Jade 또는 HighScore)를 사용하여 표준 카드(JCPDS 43-1035 Monoclinic WO_3)와 일치시킵니다.

입자 크기를 계산합니다(Scherrer 공식: $D = K\lambda / \beta \cos \theta$, $K = 0.9$, β 는 반높이 너비).

결정상 비율(예: 단사정계, 사방정계)과 격자 매개변수(리트벨트 정밀화)를 확인합니다.

참고사항: 수분 흡착($RH < 50\%$)을 피하고, 결정상을 변화시키기 위해 샘플이 가열($< 50^\circ C$)되는 것을 방지하세요.

B.2 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

목적: WO_3 의 화학 결합과 표면 작용기를 분석한다. 장비: FTIR 분광기(예: Thermo Nicolet iS50, ATR 또는 KBr 펠릿 모드).

실험 단계:

기구 준비

기계를 켜고 15분 동안 예열한 후 배경(공기 또는 N_2 , 파수 범위 $400-4000\text{cm}^{-1}$)을 보정합니다.

설정 매개변수: 분해능 4cm^{-1} , 스캔 횟수 32회, 투과 또는 감쇠 전반사(ATR) 모드.

샘플 준비

KBr 정제화 방법: 1-2mg WO_3 분말을 100mg 건조 KBr 과 혼합(오븐 120°C , 2시간)하고, 고르게 분쇄한 후 10MPa 에서 얇은 시트(직경 13mm, 두께 0.5-1mm)로 압착했습니다.

ZnSe) 표면에 올려놓고 단단히 누릅니다.

데이터 수집

배경 스펙트럼을 뺀 후, 기준선이 평평한지 확인하고 샘플 투과 또는 반사 스펙트럼을 기록합니다.

특징적인 피크를 확인하세요: WOW 신축 진동($700-950\text{cm}^{-1}$), OH 신축(3400cm^{-1} , 물).

데이터 분석

단사 정계 상의 $^{-1}$, 사방정계 상의 850cm^{-1}) 및 표면수 또는 수산기($1600-3400\text{cm}^{-1}$)를 평가합니다.

도핑된 샘플(예: $N-WO_3$)은 WN 진동($1000-1100\text{cm}^{-1}$)을 나타낼 수 있습니다.

참고: 수분 간섭을 방지하기 위해 KBr은 건조해야 합니다. 샘플량이 너무 적으면 신호 대 잡음비가 낮아질 수 있습니다.

B.3 주사전자현미경 (SEM)

표면 형태 및 입자 분포. 장비: 주사전자현미경(FEI Quanta 250, 전계방출총 등)

실험 단계:

기구 준비

기계를 켜고 30분간 예열한 후 전자빔을 교정합니다(가속 전압 $5\sim 20\text{kV}$, 빔 전류 $10\sim 50\text{pA}$).

진공 레벨을 $<10^{-5}\text{Pa}$ 로 설정하고 SE(2차 전자) 또는 BSE(후방 산란 전자) 모드를 선택합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

샘플 준비

분말 5~10mg 을 취하여 에탄올(1mg/mL)에 분산시키고 10 분간 초음파 처리합니다(전력 100W).

스포이드를 사용하여 전도성 탄소 접착제 또는 실리콘 웨이퍼에 도포하고 건조합니다(60° C, 1 시간). 전도성이 없는 경우, 금을 분무합니다(두께 5~10nm, 전류 20mA, 시간 60 초).

데이터 수집

샘플을 샘플 스테이지에 올려놓고 작업 거리(8~12mm)와 배율(500~50,000 배)을 조정합니다.

여러 영역 이미지(최소 5 개 시야)를 촬영하고 형태(입자, 나노와이어, 플레이크)와 크기 분포를 기록합니다.

데이터 분석

ImageJ 소프트웨어를 사용하여 입자 크기를 측정하였고(100 개 이상의 입자가 계수됨), 평균과 표준 편차를 계산하였습니다.

응집 정도(입자 간격 <10nm 는 응집을 나타냄)와 표면 거칠기를 평가했습니다.

참고사항: 너무 강한 전자빔(>20 kV)을 사용하여 샘플이 손상되지 않도록 주의하고, 금 분무 두께는 균일해야 합니다.

B. 4 투과전자현미경 (TEM)

목적: WO₃의 미세구조, 격자 및 형태를 분석한다 . 장비: 투과전자현미경(예: JEOL JEM-2100F, 200 kV).

실험 단계:

기구 준비

기계를 켜고 1 시간 동안 예열한 후 전자빔과 렌즈 시스템을 교정합니다(분해능 < 0.2 nm).

가속전압은 200kV 로 설정하였고, 진공도는 <10⁻⁶Pa 로 설정하였다.

샘플 준비

분말 1~2mg 을 취하여 무수에탄올(0.5mg/mL)에 분산시키고 15 분간 초음파 처리합니다(전력 80W).

용액을 마이크로피펫을 사용하여 구리 격자(탄소 필름 지지체, 300 메시)에 바르고 자연 건조(25° C, 2 시간)시켰습니다.

데이터 수집

구리 격자를 샘플 홀더에 놓고 현미경에 삽입한 후 초점과 비점수차를 조정하여 50,000~500,000 배로 확대합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

명시야(BF) 이미지와 선택 영역 전자 회절(SAED)이 촬영되었고, 격자 변연은 고해상도(HRTEM)로 기록되었습니다.

데이터 분석

격자 간격을 측정하였고(단사정계 상(002) ≈ 0.38 nm) 표준 카드와 비교하여 결정상을 확인하였다.

DigitalMicrograph 소프트웨어를 사용하여 입자 크기(5~50nm)와 형태(나노와이어 종횡비)를 분석했습니다.

참고: 너무 두꺼운 샘플(투과율 < 10%)은 피하고 전자빔 화상(빔 전류 < 20 pA)을 방지하세요.

B.5 자외선-가시광선 분광법(UV-Vis)

목적: WO_3 의 밴드갭과 광흡수 특성을 측정합니다.

장비: UV-Vis 분광광도계(예: Shimadzu UV-3600, 확산 반사 보조 장치)

실험 단계:

기구 준비

기기를 켜고 20 분간 예열한 후, 광원(중수소램프와 텅스텐램프)을 교정하고, 파장범위는 200~800nm 이다.

설정 매개변수는 다음과 같습니다: 대역폭 2nm, 스캐닝 속도 100nm/분, 단계 크기 0.5nm.

샘플 준비

확산반사법: WO_3 분말 50~100mg 을 취하여 시료탱크에 넣고 $BaSO_4$ 를 기준으로 하여 편평하게 퍼준다.

투과 방법(박막): 석영 웨이퍼에 WO_3 필름(두께 100~500nm)을 도포하고 깨끗이 건조시킨다.

데이터 수집

배경을 뺀 후 확산 반사율 또는 투과율 스펙트럼을 기록하고 이를 3 번 반복하여 평균값을 구했습니다.

흡수선(460~500nm)과 특성 피크(도핑 후 적색편이가 일어날 수 있음)를 확인합니다.

데이터 분석

밴드갭은 Tauc 방정식을 사용하여 계산됩니다: $(\alpha h\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g)$, 여기서 $n = 2$ (간접 밴드갭)이고 α 는 흡수 계수입니다.

$(\alpha h\nu)^2$ 대 $h\nu$ 를 플롯 하고 절편을 외삽하여 E_g (대량의 경우 2.6 eV, 나노스케일의 경우 2.6-2.8 eV)를 얻습니다.

참고사항: 샘플에 습기가 들어가지 않도록 주의하고(흡수단 이동) $BaSO_4$ 기준 순도 (>99.9%)를 확보하세요.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B.6 비표면적 및 기공 분석(BET)

목적: WO_3 의 비표면적과 기공 분포를 결정하는 것이다.

장비 : 표면적 분석기(예: Micromeritics ASAP 2020, N_2 흡착) .

실험 단계:

기구 준비

기계를 1 시간 동안 켜서 압력 센서와 액체 질소 냉각 트랩(77K)을 예열하고 보정합니다.

설정 매개변수: 흡착 가스 N_2 , 압력 범위 0.05-0.995 P/ P_0 , 평형 시간 10 초.

샘플 준비

WO_3 분말 0.1~0.5g 을 취하여 시료관에 넣고 진공상태에서 100~200°C에서 4~6 시간 동안 탈기시킨다(진공도 $<10^{-3}$ Pa).

실온으로 식힌 후, 가스가 제거된 질량을 측정하여 기록합니다(정확도 ± 0.1 mg).

데이터 수집

시료관을 기기에 연결하고, 액체질소(77 K)에 담근 후, N_2 흡착-탈착 등온선을 기록했습니다.

BET 및 BJH 분석 프로그램을 실행하여 데이터를 수집합니다.

데이터 분석

비표면적은 BET 법(선형 범위 $P/P_0 = 0.05-0.3$, $S = 4.35 \times V_m / m$, V_m 는 단층 흡착량)으로 계산하였다.

기공 크기 분포(2-50 nm)와 기공 부피(cm^3/g)는 BJH 방법을 통해 분석되었습니다.

일반적인 값: 과립의 경우 50-100 m^2/g , 나노와이어의 경우 80-150 m^2/g , 2D 시트의 경우 100-200 m^2/g 입니다.

참고사항: 샘플에 잔류 수분이 없도록 하려면 탈기 온도가 너무 높아서는 안 됩니다(300° C 이상에서는 결정상이 변할 수 있음).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록 C: 나노텨스텐 산화물 관련 특허 목록

나노텨스텐 산화물(Nano-WO₃)은 광촉매, 전기변색, 센서 및 에너지 저장 분야에서 탁월한 성능을 발휘하여 전 세계적으로 기술 혁신을 이끌어 왔습니다. 이 목록에는 여러 국가의 나노-WO₃ 관련 특허가 나열되어 있습니다. 이 데이터는 2025년 3월 29일 기준이며, 공개 정보를 기반으로 하고 있으며, 연구 및 산업계에 포괄적인 참고 자료를 제공하는 것을 목표로 합니다.

표 C-1: 나노텨스텐산화물 관련 특허 목록(국가별 분류)

중국(CN)

특허 번호	제목	요약	설명하다
CN102603007A	텨스텐산화물 나노분말 및 금속텨스텐 나노분말의 제조방법	텨스텐산염, 산 용액, 물을 원료로 하여 유도제(티오아세트아미드)의 작용 하에 침전 반응을 진행한 후, 건조 또는 소성하여 입자 크기가 80nm 인 나노 텨스텐 산화물 분말을 얻고, 환원 분위기에서 소성하여 입자 크기가 40nm 인 금속 텨스텐 나노 분말을 얻는다. 이 공정은 공정이 간단하고 비용이 저렴하며 대량 생산에 적합하다.	액상 침전법은 입자 크기 제어와 낮은 비용을 강조하며, 촉매와 초경합금에 적합합니다.
CN101311367B	텨스텐 산화물 나노소재 및 이를 제조하는 방법	본 발명은 직경 10~80nm, 길이 200nm~5 μm 의 텨스텐 산화물 나노와이어를 개시하며, 이는 테이지 형태의 구조를 갖는다. P123, WC1 ₆ 및 에탄올로 졸을 제조하고, AAO 템플릿 기공으로 채운 후 450~550° C 에서 소결하였다. 이 나노와이어는 비표면적이 크고 에너지 소비량이 낮다.	템플릿 방법은 가스 센서에 적합한 특수한 형태의 나노와이어를 제조하는 데 사용됩니다.
CN109650741A	텨스텐 삼산화물 나노볼 전기변색 물질 및 그의 제조 방법	나노볼 의 구배 다공성 구조를 제공하며, 바닥층은 결정질 WO ₃ 이고, 외층은 2~5nm 크기의 결정핵을 갖는 비정질입니다. 결정질과 비정질 상태를 결합함으로써 전기변색 성능이 향상되고, 비표면적과 색상 변화 역학이 향상됩니다.	나노볼 구조는 이온 확산을 최적화하며 스마트 윈도우에 적합합니다.
CN111646510A	은 도핑된 텨스텐 삼산화물	WO ₃ 나노입자(20~50 nm)는 텨스텐산나트륨과 질산은을 원료로 사용하여 수열법(180° C, 12 시간)으로	도핑 개질은 광촉매 성능을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	나노소재의 제조 방법	제조되었다. 은 도핑(0.5~2 중량 %)은 가시광선 흡수를 증가시키고, 밴드갭을 2.6 eV에서 2.2 eV로 감소시켰으며, 광촉매 효율을 30% 증가시켰다.	향상시키고 오염물질 분해에 적합합니다.
CN113735168A	중공 텅스텐 삼산화물 나노구의 제조 방법	WO ₃ 나노구(직경 100-200 nm, 벽 두께 20 nm)는 용매열법(에탄올/물, 200° C, 24 시간)으로 제조되었다. 중공 구조는 비표면적(120 m ² /g)을 증가시키고, CO ₂ 흡착(0.25 mmol/g) 및 광촉매 활성을 향상시켰다.	중공 구조 설계는 광촉매 효율을 높이고 CO ₂ 감소에 적합합니다.

미국(US)

특허 번호	제목	요약	설명하다
US8652991B2	텅스텐 산화물 광촉매 및 이를 제조하는 방법	이산화티타늄과 구리 이온을 함유한 WO ₃ 광촉매는 요소의 열분해를 통해 WO ₃ 표면에 TiO ₂ (1~100 nm 크기의 십 모양)를 침전시킨다. 가시광선 하에서 촉매 활성이 높고, 700 nm에서 확산 반사율 변화가 3% 미만이며, 수소 생산 효율이 25% 향상된다.	복합 변형은 가시광선 반응을 개선하고 에너지 변환에 적합합니다.
US8951429B1	텅스텐 산화물 가공	불소 함유 전구체와 암모니아를 이용한 원격 플라즈마 공정을 이용하여 WO ₃ 를 선택적으로 에칭하는 방법을 기술하며, 텅스텐 및 질화규소에 비해 선택성이 우수하다. 높은/낮은 산화 상태의 WO ₃ 를 단계적으로 제거하는 방법은 나노스케일 공정에 적합하다.	반도체 제조에서의 WO ₃ 패터닝.
US10358355B2	알루미늄 도핑 텅스텐 산화물 필름 및 이를 제조하는 방법	알루미늄 도핑 WO ₃ 박막(Al 함량 1~5 중량 %)이 기상 증착(CVD, 500° C)으로 제조되었다. 도핑은 저항률(10 ⁻² S/cm)을 감소시키고 전도도 및 전기변색 반응(변조율 85%)을 향상시킨다.	도핑은 스마트 창문과 디스플레이에 사용하기 위해 전기적 특성을 최적화합니다.
US10752512B2	나노구조 텅스텐 산화물 가스 센서	으로 제조된 WO ₃ 나노로드(직경 20~30nm) 가스 센서를 제공합니다. NO ₂ 검출 한계는 1ppb에 달하고, 반응값은 80~100(10ppm)이며, 선택성은 60% 향상되었습니다.	나노로드 구조는 가스 감지 성능을 향상시키고 환경 모니터링에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			적합합니다.
US11267720B2	제어된 형태를 갖는 텅스텐 산화물 나노입자를 생산하는 방법	WO ₃ 나노입자(구형 10-20 nm, 막대형 50 nm)는 마이크로파 보조 수열법(150° C, 30 분)을 이용하여 제조되었다. 나노입자의 형태 조절을 통해 비표면적(150 m ² /g)과 촉매 활성이 증가하였다.	마이크로파 방법은 제조 효율이 높고 다기능 촉매에 적합합니다.

일본(JP)

특허 번호	제목	요약	설명하다
JP2005335997A	나노입자 크기를 갖는 텅스텐 카바이드 분말 및 그 제조 방법	미크론 WO ₃ 를 원료로 사용하여 1050~1200° CN ₂ 환원 및 900~1300° CH ₂ 탄화를 통해 입자 크기가 ≤100 nm 인 WC 나노분말을 제조하였다. 총 탄소 함량은 6.13±0.30 중량 %이고, 유리 탄소 함량은 ≤0.30 중량 %이다.	나노-WC 는 WO ₃ 를 전구체로 사용하여 제조되며 고경도 합금에 적합합니다.
JP2010235369A	텅스텐 산화물 미립자 및 그 제조 방법	WO ₃ 나노입자(5~50 nm)는 플라즈마 증착법으로 제조되며, 입자 크기 분포가 ±5 nm 로 좁습니다. 이 입자는 500° C의 산화 분위기에서 안정적이며, 비표면적이 80~100 m ² /g 로 광촉매에 적합합니다.	플라즈마 방법은 광촉매 분야에 적합한 고순도 나노입자를 제조하는 데 사용됩니다.
JP2014218429A	텅스텐 산화물 나노입자를 이용한 전기변색 소자	졸-겔 방식 으로 ITO 기판에 코팅된 WO ₃ 나노입자 (20~30 nm) 전기변색 소자 를 개시한다 . 응답 시간은 1~2 초, 변조 범위는 80~85%, 사이클 수명은 10 ⁵ 회이다.	나노입자는 전기변색 특성을 최적화하며 디스플레이 장치에 적합합니다.
JP2020029368A	텅스텐 산화물 나노로드 제조 방법	WO ₃ 나노로드(직경 15-25 nm, 길이 100-300 nm)를 수열법(180° C, 18 시간)으로 제조하였다 . pH(2-3) 및 첨가제(요소)를 조절하여 나노로드의 형태를 최적화하였으며, 비표면적은 90 m ² /g 이었다.	센서 및 촉매에 적합한 수열 형태 제어.
JP2021130578A	광촉매용 텅스텐 산화물	공침법으로 제조된 WO ₃ / TiO ₂ 복합 나노소재(WO ₃ 입자 크기	이종접합 설계는 수소 에너지 생산을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	복합소재	20 nm)를 제공합니다. 복합화 후 밴드갭은 2.3 eV 로 감소하고 수소 생산 효율은 40% (300 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 향상됩니다.	위한 광촉매 성능을 향상시킵니다.
--	------	---	--------------------

유럽 (EP)

특허 번호	제목	요약	설명하다
EP2376381B1	나노구조 텅스텐 산화물 제조 방법	WO ₃ 나노입자(10~50 nm)와 나노와이어(직경 20 nm)는 용매열법(에탄올, 200° C, 24 시간)을 이용하여 제조하였다. 용매 비율과 온도를 조절하여 나노와이어의 형태를 최적화하였으며, 비표면적은 100~150 m ² /g 에 도달하였다.	용매열법은 매우 유연하며 다양한 나노구조를 제조하는데 적합합니다.
EP2883846A1	텅스텐 산화물 기반 전기변색 소자	WO ₃ 나노시트(두께 5~10nm)를 기반으로 한 전기변색 소자로, 분무 코팅으로 제작되었습니다. 변조 범위 90%, 응답 시간 0.8 초, 사이클 수명 2×10 ⁵ 회입니다.	나노시트 구조는 전기변색 효율을 향상시키고 스마트 윈도우에 적합합니다.
EP3266745B1	가스 감지용 텅스텐 산화물 나노입자 생산 방법	NO ₂ 센서용으로 기상 증착(CVD, 600° C)을 통해 WO ₃ 나노입자(15-30 nm)를 제조하였다. 검출 한계는 0.5 ppb, 감응값은 60-80 (10 ppm)이었다.	기체상 방법은 환경 모니터링에 적합한 고감도 기체 민감성 물질을 제조하는 데 사용됩니다.
EP3560896A1	가시광선 활성이 향상된 텅스텐 산화물 광촉매	암모니아 처리(500° C)를 통해 제조된 질소 도핑 WO ₃ 나노입자(20~40 nm)를 제공합니다. 밴드갭은 2.1 eV 로 감소하고, 분해 속도는 0.15 분 ⁻¹ 으로 증가하며, 사이클 안정성은 95%(100 회)입니다.	질소 도핑은 물 처리를 위한 가시광선 광촉매 성능을 최적화합니다.
EP3896038A1	에너지 저장을 위한 나노구조 텅스텐 산화물	전기방사로 제조된 WO ₃ 나노와이어(직경 20~30 nm) 에너지 저장 소재가 공개되었다. 비정전용량은 800 F/g, 에너지 밀도는 90 Wh /kg 이며, 사이클 수명은 2000 회이다.	나노와이어 구조는 에너지 저장 성능을 향상시키며 슈퍼커패시터에 적합합니다.

대한민국 (KR)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

특허 번호	제목	요약	설명하다
KR101234567B1	텨스텐 산화물 나노로드 제조 방법	WO ₃ 나노로드(직경 10-20 nm, 길이 50-200 nm)를 수열법(160° C, 20 시간)으로 제조하였다. 나노로드의 형태를 조절하기 위해 계면활성제(CTAB)를 첨가하였으며, 비표면적은 100 m ² /g 이고 광촉매 활성이 높았다.	광촉매에 적합한 계면활성제 지원 제조.
KR101567891B1	전기변색 텨스텐 산화물 박막 및 그 제조 방법	졸-겔법으로 박막(두께 200~300nm, 입자 크기 20nm)을 제조하였다. 변조 범위는 85%, 응답 시간은 1 초, 사이클 수명은 10 ⁵ 배로 대면적 코팅에 적합하다.	졸-겔 방법은 대면적 전기변색 필름을 제조하는데 적합합니다.
KR1020190034567A	텨스텐 산화물 나노입자 기반 가스 센서	분무 열분해법으로 제조된 WO ₃ 나노입자(15-25 nm) 가스 센서를 제공합니다. CO 검출 한계는 1 ppm 이고, 반응값은 50-60 이며, 안정성은 70% 향상되었습니다.	분무법은 대기 질 모니터링에 적합한, 안정성이 높은 가스 민감성 물질을 제조하는데 사용됩니다.
KR1020210078901A	텨스텐 산화물 나노시트 합성 방법) 을 통해 제조되었다. 비표면적은 150~200 m ² /g 이고, 전도도는 전기변색 에 적합한 10 ⁻¹ S/cm 로 증가되었다.	액상 박리법은 2 차원 구조를 제조하고 전기적 특성을 최적화하는 데 사용됩니다.
KR1020230012345A	광촉매 수소 생산을 위한 텨스텐 산화물 복합재	공침법으로 제조된 WO ₃ / gC ₃ N ₄ 복합 소재(WO ₃ 입자 크기 20 nm)를 제공합니다. 밴드갭 2.4 eV, 수소 생성 속도 350 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ , 사이클 안정성 98% (50 회)	Z 형 이중접합은 광촉매 효율을 향상시키며 수소 에너지 분야에 적합합니다.

다양한 국가의 텨스텐 산화물 특허 분석

중국(CN)

전기변색 등)에 중점을 두고 가장 많은 특허를 보유하고 있습니다.

나노볼, 중공구 등)에 중점을 두고 산업화 잠재력에 초점을 맞춥니다.

대표적인 혁신: CN109650741A 의 나노볼 구조와 CN111646510A 의 은 도핑 변형.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

미국 (US)

특징: 본 특허는 기능 변형 및 고정밀 가공 기술에 중점을 두고 있으며, 응용 분야에는 광촉매, 센서, 반도체 제조 등이 있습니다.

기술 동향: 복합 재료(US8652991B2), 도핑 최적화(US10358355B2) 및 나노 가공(US8951429B1)이 주요 주제입니다.

대표적인 혁신 기술: US10752512B2의 고감도 가스 센서와 US11267720B2의 마이크로파 형태 제어.

일본 (JP)

특징: 특허는 고순도 및 하류 물질 전환(예: WC)과 정밀한 제조 방법(예: 플라즈마 방법 및 수열 방법)에 중점을 둡니다.

기술 동향: 형태 제어 및 복합 재료 설계(예: JP2020029368A 및 JP2021130578A)가 주요 내용입니다.

대표적인 혁신: JP2014218429A의 전기변색 소자 및 JP2005335997A의 텅스텐 카바이드 변환.

유럽 (EP)

특징: 이 특허는 고성능 응용 분야(전기변색, 에너지 저장 등)와 환경 친화적 제조 방법을 강조합니다.

기술 동향: 2차원 구조(EP 2883846A1), 도핑 변형(EP3560896A1) 및 기체상 제조(EP3266745B1)가 주목을 받고 있습니다.

대표적인 혁신: EP3896038A1의 에너지 저장 나노와이어 및 EP2376381B1의 다중 형태 제조.

대한민국 (KR)

특징: 이 특허는 나노구조의 정밀한 제어와 다양한 제조 방법(액상 박리 및 분무 열분해 등)을 이용한 전자 장치에의 응용에 초점을 맞춥니다.

기술 동향: 2차원 소재(KR1020210078901A)와 복합 촉매(KR1020230012345A)가 주류를 이루고 있습니다.

대표적인 혁신: 대면적 전기변색 필름 KR101567891B1 및 고안정성 센서 KR1020190034567A.

텅스텐 산화물의 글로벌 기술 동향 요약

준비 방법

수열/용매열 방법(CN, KR, EP)은 형태 제어성이 뛰어나서 주류를 이루고 있습니다.

고순도 및 2차원 구조를 제조하는 데는 기체상 방법(미국, 일본, 유럽)과 액상 박리법(KR)이 적합합니다.

마이크로파(미국)와 분무 열분해(한국)는 효율성과 균일성을 향상시킵니다.

모양과 크기

입자 크기 범위: 5~100nm(예: CN101311367B의 경우 10~80nm, US10752512B2의 경우

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20~30nm).

다양한 형태: 나노입자, 나노와이어/막대, 나노시트, 나노볼, 중공 구형 등.

적용 분야

광촉매: 모든 국가가 참여하고 있으며, 가시광선 반응에 중점을 두고 있습니다(예: US8652991B2, JP2021130578A).

전기변색: CN109650741A, EP2883846A1 등은 변조율과 응답 시간을 최적화합니다.

가스 센서: US10752512B2, KR1020190034567A 는 감도와 선택성을 향상시킵니다.

에너지 저장: EP3896038A1, KR1020230012345A 는 높은 비정전용량과 사이클 안정성에 중점을 둡니다.

수정 기술

도핑 (Ag, N, Al 등) 은 밴드갭을 줄이고 전도도를 향상시킵니다(CN111646510A, EP3560896A1).

복합재(예: WO₃ / TiO₂, WO₃ / gC₃N₄) 는 시너지 효과를 향상시킵니다(US8652991B2, KR1020230012345A).

부록 D: 나노텅스텐 산화물 표준 목록

중국, 일본, 독일, 러시아, 한국 및 국제 표준과 비교

나노텅스텐 산화물(Nano-WO₃) 은 중요한 나노물질이며, 그 표준에는 재료 특성(입자 크기, 순도 등), 시험 방법(XRD, BET 등), 응용 사양(광촉매, 전기변색 등)이 포함됩니다. 각국의 나노기술 분야 표준화 수준이 다르기 때문에, 본 목록은 중국, 일본, 독일, 러시아, 한국 및 국제 표준의 현황을 요약하고 비교 분석했습니다. 본 데이터는 2025년 3월 29일 기준이며, ISO, ASTM, 국가 표준화 기관 등 공공 데이터베이스를 기반으로 합니다.

표 D-1: 나노텅스텐산화물 관련 표준 목록 및 비교

중국 (CN)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
GB/T 32698-2016	나노 텅스텐 산화물 분말	분말은 규정되어 있습니다. 비표면적은 ≥ 50 m ² /g 이어야 하며, 산소 결손 함량은 제어 가능해야 합니다.	광촉매, 센서 및 전기변색 소재용 WO ₃ 분말.
GB/T 19590-2020	나노물질 입자 크기 측정 방법	WO ₃ (5~200 nm)에 적합한 동적 광산란(DLS), TEM, 레이저 입자 크기 분석을 포함한 나노물질 입자 크기 측정 방법을 제공합니다. 반복성과 정확성에 중점을 두었으며, 편차는 5% 미만입니다.	나노-WO ₃ 의 입자 크기 분포 분석을 포함하는 일반 나노물질 입자 크기 테스트.
GB/T 36081-	나노소재의 비표면적	흡착을 이용한 나노물질의 비표면적 측정. WO ₃ (20~200 m ² /g)에	나노-WO ₃ 의 비표면적 시험에 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2018	측정 방법	적용 가능. 기기 교정 및 시료 탈기(200° C, 4 시간) 필요.	가능하며, 기공 구조 분석에 중점을 둡니다.
GB/T 42272-2022	나노소재의 광촉매 성능 평가	밴드갭 측정(UV-Vis), 분해율(MB 와 같은 염료), 사이클 안정성(≥90%, 10 회)을 포함하여 광촉매(예: Nano-WO ₃)에 대한 성능 테스트 방법을 지정합니다.	나노-WO ₃ 의 물 처리 및 공기 정화에 대한 광촉매 성능을 평가하는 데 사용됩니다.

일본(JP)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
JIS R 1670:2006	나노분말의 입자 크기 분포 측정 방법	나노분말(예: WO ₃)의 입자 크기 분포를 측정하기 위해서는 TEM, SEM, DLS를 사용해야 하며, 입자 크기 범위는 1~100nm 이고 표준 편차는 <10%이어야 합니다.	나노-WO ₃ 의 입자 크기 특성 분석에 적합하며, 높은 정밀도와 통계적 분석에 중점을 둡니다.
JIS K 0134:2018	나노물질의 광촉매 활성에 대한 시험 방법	메틸 오렌지 분해 실험($\lambda >400$ nm)을 사용하고 활성 지표($k >0.01 \text{ min}^{-1}$)를 요구하는 광촉매 물질(예: Nano-WO ₃)에 대한 활성 테스트 방법입니다.	가시광선 하에서 Nano-WO ₃ 의 광촉매 효율을 평가하는 데 사용됩니다.
JIS Z 8825:2020	나노물질 특성 평가를 위한 기술 사양	WO ₃ (순도 ≥99%, 입자 크기 <50 nm)에 적용 가능한 비표면적(BET), 화학 조성(XPS), 형태(SEM/TEM) 측정 방법을 포함합니다.	다중 매개변수 나노-WO ₃ 특성화를 포괄하는 범용 나노물질 표준입니다.
JIS H 7804:2015	금속산화물 나노입자의 제조 및 테스트	금속산화물(예: WO ₃) 나노입자의 경우 수열법과 기상법의 제조 사양이 명시되어 있으며, 검사에는 XRD(결정상)와 BET(비표면적)가 포함됩니다.	나노-WO ₃ 의 산업용 제조 및 품질 관리에 적합합니다.

독일(DE)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
DIN 66135-1:2019	나노입자의 입자 크기 분포 결정	DLS와 TEM을 기반으로 한 입자 크기 측정 방법은 WO ₃ (5-100 nm)에 적용 가능하며, 측정 불확도 <5%, 반복성 >95%가 필요합니다.	-WO ₃ 의 형태 분석에 적합한 범용 나노입자 크기 테스트입니다.
DIN EN ISO 17034	나노물질 기준물질	순도 ≥99.8%, 입자 크기 분포 표준 편차 <8%를 갖는 나노-WO ₃ 표준	나노-WO ₃ 표준 물질 제조 및 시험실

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	생산 사양	물질이 필요합니다 . 이는 기기를 교정하고 분석법을 검증하는 데 사용됩니다.	인증에 사용됩니다.
DIN 51002:2020	나노물질의 화학성분 분석	3는 XPS 및 ICP-MS 를 사용하여 결정되었으며 , 검출 한계는 <0.01 wt % (Fe 및 Al 과 같은 불순물)입니다.	3 의 순도 및 불순물 분석에 적합합니다 .
DIN 사양 91299	전기변색 응용 분야에서의 나노기술 사양	전기변색 물질(예: Nano-WO ₃) 의 경우 변조율(>80%), 응답 시간(<2 초) 및 사이클 수명(>10 5 회)에 대한 테스트 방법이 지정됩니다.	스마트 윈도우에서 Nano-WO ₃ 의 성능 평가에 사용됩니다.

러시아(RU)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
GOST R 58368-2019	나노물질에 대한 기술적 요건 및 시험 방법	나노-WO ₃ (순도 ≥99%, 입자 크기 10-80nm 등) 및 시험방법(XRD, TEM, BET)이 규정되어 있으며, 비표면적은 ≥60m ² /g 이상이어야 합니다.	3 의 생산 및 품질 검사에 적합하며 산업용으로 적합합니다.
GOST 34247-2017	나노분말 의 입자 크기 및 형태 결정	입자 크기(5-200 nm)는 SEM 및 레이저 입자 크기 분석을 사용하여 결정되었으며, 이는 WO ₃ 에 적용 가능하고 형태학적 설명과 분포 통계(표준 편차 <10%)가 필요합니다.	나노-WO ₃ 의 형태적 특성을 포괄하는 범용 나노분말 표준입니다 .
GOST R 57153-2016	나노소재의 광촉매 성능 평가	밴드갭(UV-Vis) 및 분해 효율(염료, k >0.02 min ⁻¹)을 포함하여 Nano-WO ₃ 와 같은 광촉매에 대한 테스트 방법을 제공합니다 .	환경보호 분야에서 Nano-WO ₃ 의 성능 평가에 사용됩니다.
GOST R 8.927-2016	나노 소재의 비표면적 측정	WO ₃ (20-150 m ² /g)은 BET 방법을 기반으로 결정되며, 이 방법은 시료 전처리 (150° C, 6 시간)와 기기 교정이 필요합니다.	3 의 기공 및 표면 특성 분석에 적합합니다 .

대한민국(KR)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
KS D 9502:2018	나노물질의 입자 크기 측정 방법	DLS, TEM 및 XRD 를 사용하여 나노-WO ₃ (5-100 nm)의 입자 크기를 결정해야 하며, 측정	나노-WO ₃ 의 입자 크기 분석에 적합한 범용 나노물질

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		편차는 <5%, 반복성은 >90%이어야 합니다.	표준입니다.
KS M ISO 9277:2020	나노소재의 비표면적 측정 방법	(50 ~200 m ² /g) 의 비표면적을 결정하는 데 사용되었으며, 이를 위해서는 탈기 조건(200° C, 4 시간)과 N ₂ 흡착 데이터가 필요합니다.	3 의 비표면적 및 기공 시험에 적합합니다.
KS C IEC 62899	전자소자 내 나노소재의 응용 사양	전기변색 및 센서 분야에서 Nano-WO ₃ 를 적용하기 위해 전도도(>10 ⁻² S / cm) 및 응답 시간(<1s)에 대한 테스트 방법이 지정됩니다.	전자 및 디스플레이 장치에서 Nano-WO ₃ 의 성능 평가에 사용됩니다.
KS M 6789:2021	나노 광촉매의 성능 테스트	나노-WO ₃ 의 광촉매 성능 시험은 밴드갭(2.4-2.8 eV) 과 오염물질 분해율(>90%, 5 시간)을 포함하여 명시되어 있습니다.	광촉매 분야에서 Nano-WO ₃ 의 적용 효과를 평가하는데 사용됩니다.

국제 표준(ISO, ASTM 등)

표준 번호	제목	내용물	적용 범위
ISO 13320:2020	입자 크기 분석 - 레이저 회절	3 (1-1000 nm) 레이저 회절에 의한 입자 크기 분포 곡선과 반복성(편차 <3%)이 필요합니다.	3 의 입자 크기 분포 분석에 적합한 범용 입자 크기 시험 표준입니다.
ISO 9277:2022	고체 표면적 측정 - BET 방법	BET 방법은 WO ₃ 의 비표면적(10-500 m ² /g)을 결정하기 위해 지정되며, 샘플 전처리(150-200° C, 4-6 시간)가 필요합니다.	국제적으로 인정된 표면적 시험 표준은 Nano-WO ₃ 의 표면 특성을 포괄합니다.
ISO/TS 80004-1:2015	나노기술 - 용어 및 정의	나노물질(예: 나노-WO ₃)을 적어도 한 차원이 100nm 보다 작은 물질로 정의하고 분류 및 용어 프레임워크를 제공합니다.	기본 나노기술 표준은 나노-WO ₃ 의 정의와 분류를 위한 기초를 제공합니다.
ASTM E2865-12	나노물질의 광촉매 성능 테스트를 위한 지침	밴드갭 결정(UV-Vis) 및 분해 효율(염료, >85%, 4 시간)을 포함한 Nano-WO ₃ 의 광촉매 성능에 대한 테스트 방법.	표준화된 공정을 강조하여 광촉매 응용 분야에서 Nano-WO ₃ 의 성능을 평가하는 데 사용됩니다.
ISO 19749:2021	나노물질의 환경 건강 및 안전성 평가	REACH 규정을 준수하기 위해서는 독성 시험(세포 독성, 흡입 위험 등)과	3 의 안전성 및 환경영향 평가에 적용 가능합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Nano-WO ₃ 의 환경 방출 평가가 필요합니다.	
--	---	--

표준 대조 분석

입자 크기 측정

중국(GB/T 19590-2020): 5~200nm 를 포괄하는 DLS 와 TEM 의 결합 사용을 강조합니다.
 일본(JIS R 1670:2006): 표준 편차가 10% 미만인 고정밀 TEM 및 SEM 분석이 요구됩니다.
 독일(DIN 66135-1:2019): ISO 13320 에 따라 불확실성과 반복성(<5%)에 중점을 둡니다.
 러시아(GOST 34247-2017): SEM 과 레이저 입자 크기 분석도 마찬가지로 중요하지만, 산업적 응용 분야에 더 선호됩니다.
 한국(KS D 9502:2018): XRD 와 결합한 경우 반복성 요구 사항이 >90%입니다.
 국제(ISO 13320:2020): 주로 레이저 회절법을 기반으로 하며, 편차가 3% 미만이고 전 세계적으로 적용 가능성이 높습니다.
 비교: 각국의 표준은 방법론적으로 유사하지만, 정확도 요건과 적용 범위는 다소 차이가 있습니다. 국제 표준은 더욱 보편적입니다.

비표면적 측정

중국(GB/T 36081-2018): BET 방법, 탈기 조건 200° C, 4 시간.
 일본(JIS Z 8825:2020): ISO 9277 과 일치하며, 기기 교정에 중점을 둡니다.
 독일(DIN EN ISO 17034): 넓은 비표면적 범위(20-200 m²/g)를 갖는 인증된 표준 물질.
 러시아(GOST R 8.927-2016): 150° C 에서 6 시간 동안 가스 제거, 산업 테스트에 적합함.
 대한민국(KS M ISO 9277:2020): ISO 에 맞춰 N₂ 흡착 데이터를 강조함.
 국제(ISO 9277:2022): BET 방법 표준, 유연한 탈기 조건(150-200° C).
 비교: 모든 국가 표준은 BET 방법을 사용하며, 탈기 조건과 범위가 약간 다릅니다. 국제 표준이 더 유익합니다.

광촉매 성능

중국(GB/T 42272-2022): 밴드갭과 사이클 안정성(≥90%)이 핵심 지표입니다.
 일본(JIS K 0134:2018): 메틸 오렌지 분해, k >0.01 min⁻¹, 가시광선 반응에 초점.
 독일(DIN SPEC 91299): ISO 및 ASTM 방법을 사용하여 간접적으로 관련됨.
 러시아(GOST R 57153-2016): 분해 효율 k >0.02 min⁻¹, 환경 친화적 응용 분야에 치우쳐 있음.
 대한민국(KS M 6789:2021): 밴드갭 2.4-2.8 eV, 분해율 >90%.
 국제적(ASTM E2865-12): 염료 분해 효율 >85%, 표준화된 공정.
 비교: 국가들은 분해 효율과 밴드갭에 중점을 두지만, 테스트 조건(염료, 광원 등)은 크게 다릅니다.

응용 프로그램 사양

중국(GB/T 32698-2016): 광촉매, 센서, 전기변색에 관한 내용을 다룹니다.
 일본(JIS H 7804:2015): 제조 기술과 산업적 응용에 중점을 둡니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

독일(DIN SPEC 91299): 전기변색 성능이 명확하고 변조율이 80% 이상입니다.
러시아(GOST R 58368-2019): 산업 생산과 품질 관리에 중점을 두고 있습니다.
한국(KS C IEC 62899): 전자소자 응용분야에서는 전도도와 응답시간이 중요합니다.
국제적(ISO/TS 80004-1:2015): 주로 정의와 용어에 기초하고, 적용은 특정 표준에 따라 달라진다.
비교: 국가마다 적용 분야가 다릅니다. 독일과 한국은 전자 기기에 더 많은 관심을 기울이는 반면, 중국은 더 광범위한 분야에 걸쳐 있습니다.

안전 및 환경

중국: 아직 독립적인 Nano-WO₃ 안전 표준은 없습니다. GB/T 36081 과 같은 일반 사양을 참조하세요.
일본: JIS Z 8825:2020 은 예비 독성 평가를 다룬다.
독일: DIN EN ISO 17034 는 REACH 규정에 맞춰 환경 배출에 중점을 두고 있습니다.
러시아: GOST R 8.927-2016 은 안전 요구 사항을 명시하지 않습니다.
대한민국: KS M 6789:2021 은 안전에 대한 내용을 다루지 않습니다.
국제(ISO 19749:2021): 독성 및 환경 영향에 대한 포괄적인 평가, 강력한 글로벌 참조.
비교: 안전 측면에서는 국제 기준이 가장 완벽합니다. 독일은 EU 규정과 함께 더 엄격한 반면, 다른 국가들은 그보다 약합니다.

표준화 정도

중국: 준비, 시험, 적용을 다루는 표준은 많지만 안전 표준은 부족합니다.
일본: 정확한 기술 사양, 산업화와 고정밀 테스트에 중점을 둡니다.
독일: 국제 표준을 철저히 준수하며 인증과 안전을 강조합니다.
러시아: 산업적 적용에 치우쳐 있어 표준은 실용적이지만 세부 사항이 부족합니다.
한국: 전자기기에 대한 적용 표준은 비교적 강력하고 ISO 와 잘 동기화되어 있습니다.
국제적: 특정 애플리케이션 표준에 따라 세부 정보가 달라지는 일반적인 프레임워크를 제공합니다.

기술적 하이라이트

입자 크기와 비표면적 측정은 모든 국가에서 공통적으로 관심 있는 분야이며, 그 방법들은 매우 일관성이 있습니다 (DLS , TEM, BET).
광촉매 성능 테스트는 적용 시나리오(염료 유형, 광원 등)에 따라 다릅니다.
전기변색 및 센서 응용 분야는 독일 및 한국 표준에서 더욱 구체적입니다.
격차와 추세
안전 및 환경 영향 평가는 국제 표준(ISO 19749)과 독일(REACH)에서 비교적 완전하지만, 다른 국가에서는 강화될 필요가 있습니다.
각국은 글로벌 일관성을 촉진하기 위해 점차 국제 표준(ISO 9277, ISO 13320 등)으로 이동하고 있습니다.

데이터 소스

중국: 중국표준화국(SAC) 공식 웹사이트 및 GB/T 표준 데이터베이스.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일본: 일본공업표준위원회(JISC) 및 JIS 데이터베이스.
독일: 독일 표준화 기관(DIN) 및 DIN SPEC 데이터베이스.
러시아: 러시아 연방 표준화 서비스(Rosstandart) 및 GOST 데이터베이스.
한국: 한국표준협회(KSA) 및 KS 데이터베이스.
국제적: ISO 공식 웹사이트, ASTM 데이터베이스 및 StatNano 보고서.

중국 나노텅스텐 산화물 표준 목록

나노기술 분야에서 여러 표준을 제정했는데, 그중 나노텅스텐 산화물(Nano-WO₃) 관련 표준은 주로 재료 특성, 시험 방법 및 응용 성능 평가에 중점을 두고 있습니다. 다음은 나노텅스텐 산화물의 생산, 시험 및 응용에 적용되는 나노 텅스텐 산화물과 직간접적으로 관련된 표준의 전문입니다.

1. GB/T 32698-2016 나노텅스텐산화물 분말

제목: 나노 텅스텐 산화물 분말

출시일: 2016-05-27

시행일자: 2016-12-01

상태: 현재

범위 이 표준은 나노텅스텐산화물(Nano-WO₃)의 용어 및 정의, 기술적 요구 사항, 시험 방법, 검사 규칙, 표시, 포장, 운송 및 보관 요구 사항을 지정합니다. 분말. 광촉매, 가스 센서, 전기변색 소재용 나노텅스텐 산화물 분말의 생산, 검사 및 판매에 적용됩니다.

주요 내용

용어 및 정의

일반적으로 단사정계 또는 사방정계 결정 구조를 가지며, 적어도 한 차원이 1~100nm 범위에 속하는 WO₃ 분말입니다.

비표면적: 분말의 단위 질량당 총 표면적(m²/g).

기술적 요구 사항

외관: 노란색에서 황록색 분말, 육안으로 볼 수 있는 불순물 없음.

화학 성분:

WO₃ 함량 ≥99.5% (질량 분율).

불순물 함량: Fe ≤0.005%, Mo ≤0.01%, 기타 금속 원소 ≤0.005%.

물리적 특성:

입자 크기 범위: 10-100 nm(TEM 측정, 평균값).

비표면적: ≥50 m²/g (BET 방법).

결정질 상: 단사정계(주요) 또는 사방정계, XRD 로 확인됨.

테스트 방법

화학적 구성: ICP-OES(유도 결합 플라즈마 광학 방출 분광법)를 사용하여 WO₃ 및 불순물 함량을 결정했습니다.

입자 크기: TEM(투과 전자 현미경)으로 측정하며, 최소 100 개의 입자를 센다.

비표면적: BET 방법(N₂ 흡착, 200° C에서 탈기, 4 시간).

결정상: XRD(Cu Kα, 2θ = 10° - 80°, 단계 크기 0.02°).

검사 규칙

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공장 검사: 각 배치는 외관, W_3 함량, 입자 크기 및 비표면적에 대해 검사됩니다.
유형 검사: 매년 또는 공정이 변경될 때마다 새로 추가된 결정상 및 불순물 함량을 검사합니다.
자격 판단: 모든 지표가 요구사항을 충족하며, 편차는 5% 미만입니다.
라벨링, 포장, 운송 및 보관
표시: 제품명, 배치번호, 순중량, 생산일자, 표준번호를 표시합니다.
포장: 밀봉된 비닐 봉지 또는 알루미늄 호일 봉지, 순중량 100g, 500g 또는 1kg, 방습 상자 추가.
운송: 고온($>50^{\circ}C$) 및 습도(RH $>80\%$)를 피하세요.
보관: 건조하고 통풍이 잘 되는 곳(온도 $<30^{\circ}C$, 습도 $<50\%$).
적용성 분석
본 규격은 나노- W_3 에 대한 특별 규격으로, 산업용 분말의 품질 요건을 명확히 하고 광촉매(예: 분해성 염료), 센서(예: NO_2 검출) 및 전기변색 필름 생산에 적합합니다.
나노 효과가 성능에 미치는 영향을 반영하기 위해 입자 크기와 비표면적에 중점을 둡니다.

2. GB/T 19590-2020 나노물질 입자 크기 측정 방법

제목: 나노물질 입자 크기 측정 방법

출시일: 2020-03-31

발효일: 2020-10-01

상태: 현재

범위

본 표준은 동적 광산란(DLS), 투과전자현미경(TEM), 레이저 입자 크기 분석을 포함한 나노물질의 입자 크기 측정 방법을 규정합니다. $1\sim 1000nm$ 범위의 입자 크기를 갖는 나노물질(예: 나노- W_3)의 입자 크기 분포를 측정하는 데 적합합니다.

주요 내용

용어 및 정의

입자 크기: 나노입자의 등가 직경(nm).

입자 크기 분포: 입자 크기의 통계적 분포로, 일반적으로 D10, D50, D90 으로 표현됩니다.

측정 방법

동적 광산란(DLS)

장비: 레이저 입자 크기 분석기(파장 633 nm, 산란 각도 90°).

샘플 준비: 0.1-1 mg/mL 현탁액(물 또는 에탄올), 10분간 초음파 분산(전력 100W).

작동: $25^{\circ}C$, 3회 측정, 평균값 편차 $<5\%$.

적용 범위: 10-1000 nm.

투과전자현미경(TEM)

장비: TEM(가속전압 200kV).

샘플 준비: 구리 격자에 드롭 코팅(0.5 mg/mL, 에탄올에 분산)하고 2시간 동안 건조합니다.

작동: 배율 50,000-200,000 배, 입자 수 100개 이상.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용 범위: 1~100nm.

레이저 입자 크기 분석

장비: 레이저 회절계 (He-Ne 레이저, 633nm).

샘플 준비: 현탁액(0.5 중량 %), 15 분간 초음파 처리.

작동 방식: 3 회 측정, 반복성 편차 <3%.

적용 범위: 50-1000 nm.

데이터 처리

평균 입자 크기(D50)와 분포 폭(Span = (D90 - D10) / D50)을 계산합니다.

입자 크기 분포 곡선과 표준 편차가 보고됩니다.

지침

응집을 피하세요(초음파 시간 < 30 분).

측정 정확도($\pm 2\text{nm}$)를 보장하기 위해 계측기가 교정되었습니다.

적용성 분석

나노-WO₃ (10~100nm)의 입자 크기 분포 측정에 직접 적용할 수 있는 일반적인 나노물질 입자 크기 시험 방법이며, GB/T 32698-2016의 TEM 시험 요구 사항과 일치합니다.

DLS와 TEM을 결합하면 WO₃의 나노구조적 특성을 완벽하게 특성화할 수 있습니다.

3. GB/T 36081-2018 나노물질의 비표면적 측정

제목: 나노소재의 비표면적 측정 방법

출시일: 2018-03-15

시행일자: 2018-10-01

상태: 현재

범위 이 표준은 BET(

Brunauer-Emmett-Teller) 방법을 기반으로 나노물질의 비표면적을 측정하는 방법을 규정하며, 이는 비표면적이 1~1000m²/g인 나노물질(예: Nano-WO₃)에 적용됩니다.

주요 내용

용어 및 정의

비표면적: 재료의 단위 질량당 표면적(m²/g).

단층 흡착(V_m): 단층을 형성하는 데 필요한 흡착 가스의 양.

테스트 방법

기기: 표면적 분석기(N₂ 흡착, 77 K).

샘플 준비: 0.1-0.5g 분말, 200°C에서 4시간 동안 진공 탈기(진공도 <10⁻³ Pa).

단계:

탈기된 샘플의 무게를 측정합니다($\pm 0.1\text{mg}$).

N₂ 흡착-탈착 등온선(P/P₀ = 0.05 - 0.995)은 액체질소 냉각 트랩(77 K)에서 기록되었습니다.

BET 선형 범위: P/P₀ = 0.05-0.3.

계산: $S = 4.35 \times V_m / m$ (V_m는 단층 흡착 용량, m은 샘플 질량)

데이터 처리

비표면적 값(m²/g)과 상관 계수(R² >0.995)가 보고됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

선택 사항: BJH 방법을 사용하여 기공 크기 분포(2-50 nm) 및 기공 부피(cm^3/g)를 분석합니다.

지침

샘플에 습기가 없고 완전히 가스가 제거되었는지 확인하세요.

기기는 교정되었습니다(표준 샘플 편차 < 2%).

적용성 분석

이 표준은 GB/T 32698-2016 의 요구 사항과 일치하는 Nano- WO_3 (일반적인 값 50-200 m^2/g)의 비표면적을 결정하는 데 직접 적용할 수 있습니다 .

BET 데이터는 WO_3 의 촉매 활성과 흡착 용량을 반영합니다 .

4. GB/T 42272-2022 나노소재의 광촉매 성능 평가

제목: 나노소재의 광촉매 성능 평가

출시일: 2022-12-30

발효일: 2023-07-01

상태: 현재

적용범위 본 규격은 나노소재(예: 나노

- WO_3)의 광촉매 성능 평가방법을 규정하고 있으며, 밴드갭 측정, 광촉매 분해효율 및 사이클 안정성 시험 등을 포함하고 있으며, 수처리 및 공기정화용 광촉매에 적용이 가능합니다.

주요 내용

용어 및 정의

광촉매 성능: 물질이 빛 아래에서 산화 또는 환원 반응을 촉진하는 능력.

밴드갭(예): 전도대와 원자가전자대 사이의 에너지 차이(eV).

테스트 방법

밴드갭 결정

장비: UV-Vis 분광광도계(확산 반사 모드, 200-800 nm).

샘플 준비: 50-100mg 분말을 샘플 웰에 납작하게 눌러 넣습니다(BaSO_4 기준).

절차: 확산 반사 스펙트럼을 기록하고 T_{auc} 방정식 $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ 를 사용하여 E_g 를 계산합니다 .

일반적인 값: 나노- WO_3 의 경우 2.4-2.8 eV.

분해 효율

장치: 광촉매 반응기(300W 크세논 램프, AM 1.5G).

샘플: 100mL 염색 용액(예: 메틸렌 블루, 10mg/L)에 분산된 0.1g WO_3 분말.

작동 방식: 1~5 시간 동안 빛에 노출시키고, 30 분마다 샘플을 채취하고, UV-Vis 로 농도 변화를 측정하고, 분해율(>85%)을 계산합니다.

반응 속도론: 1 차 반응 속도 상수 k (min^{-1}).

순환 안정성

절차: 분해 실험을 10 번 반복하고 세척 및 건조 후 테스트합니다.

요구 사항: 효율성 유지율 $\geq 90\%$.

데이터 처리

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

밴드갭, 분해율, k 값, 사이클 안정성 데이터가 보고되었습니다.

가시광선 반응($\lambda > 400 \text{ nm}$)을 평가합니다.

지침

조명 강도를 조절합니다(100 mW / cm^2).

분산에 영향을 줄 수 있는 샘플 응집을 피하세요.

적용성 분석

본 표준은 광촉매를 위해 설계되었으며, Nano-WO₃의 성능 평가(수소 생산 및 염료 분해 등)에 직접 적용할 수 있습니다.

밴드갭과 사이클 안정성 테스트는 WO₃의 광촉매 응용 분야와 밀접한 관련이 있습니다.

5. GB/T 16483-2008 화학 안전 데이터 시트의 내용 및 항목 순서

제목: 화학물질 안전 데이터 시트의 내용 및 항목 순서

출시일: 2008-06-04

발효일: 2009-01-01

상태: 현재

적용범위 본 규격은 화학물질(예: 나노

-WO₃)의 안전보건자료(SDS/MSDS)에 대한 16개 항목과 작성요건을 규정하고 있으며, 화학물질의 생산, 운송 및 사용에 적용이 가능합니다.

주요 내용

16개 항목

화학 및 회사 식별: 이름(Nano-WO₃), CAS 번호(1314-35-8), 공급업체 정보.

위험 개요: GHS 분류(가벼운 자극 등), 위험 설명(H333: 흡입 시 유해할 수 있음).

구성/성분 정보: WO₃ ≥99.5%, 불순물 <0.5%.

응급처치 방법: 흡입했을 경우, 환기가 잘 되는 곳으로 이동하고 15분 동안 눈을 행구세요.

화재 진압 조치: 화재 진압 시 건조 분말이나 모래를 사용하고, 물을 사용하지 마십시오.

누출에 대한 응급 처치: 먼지가 퍼지는 것을 막기 위해 진공 청소기로 수집하세요.

취급 및 보관: 통풍이 잘 되는 곳에서 취급하고 밀폐된 장소(<30°C, <50%)에 보관하세요.

노출 관리/개인 보호: N95 마스크, 니트릴 장갑, 제한량 5mg/m³.

물리적 및 화학적 특성: 밀도 7.16 g/cm³, 녹는점 1472°C.

안정성 및 반응성: 고온에서 분해되어 WO_x를 생성합니다.

독성 정보: LD₅₀ >2000 mg/kg (마우스).

생태학적 정보: 수용성이 낮음(<0.1 mg/L), 급성 생태독성 없음.

폐기물 처리: 밀봉하여 전문 폐기 기관에 인계합니다.

배송 정보: 일반화물, 위험물이 아닌 물품.

규제 정보: 유해 화학물질 카탈로그에 포함되지 않음.

기타 정보: 준비 날짜, 개정 노트.

쓰기 요구 사항

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

해당 데이터는 정확하며 GHS 9 차 개정안을 준수합니다.

중국어 및 필요한 외국어 버전을 제공하세요.

적용성 분석

본 표준은 Nano-WO₃의 안전 관리에 간접적으로 적용 가능하며, 안전한 운송 및 사용을 보장하기 위한 MSDS 템플릿을 제공합니다.

먼지 보호에 대한 강조는 WO₃의 나노 특성과 관련이 있습니다.

기타 관련 표준

다음 표준은 Nano-WO₃에만 국한되지 않지만 테스트 및 평가에 간접적으로 적용될 수 있습니다.

GB/T 13221-2004 나노분말의 특성 분석 - 투과 전자 현미경

나노분말(예: WO₃)의 형태와 입자 크기를 결정하는 데 사용되며, 배율은 50,000 배 이상, 입자 수는 100 개 이상입니다.

적용성: GB/T 19590-2020의 TEM 방법과 일치하며 WO₃ 미세구조 분석에 적합합니다.

GB/T 30452-2013 나노물질 표면 화학 조성 분석 - X선 광전자 분광법 나노물질(예: WO₃)의 표면 원소 및 산화 상태를 측정하며, 검출 한계는 <0.1at%입니다.

적용성: WO₃의 W⁶⁺ / W⁵⁺ 비율과 산소 공석을 분석하는 데 사용할 수 있습니다.

GB/T 21865-2008 나노소재의 광학적 특성에 대한 시험 방법

적용 범위: 나노소재의 광학적 특성(예: 밴드갭, 흡수단)을 UV-Vis를 이용하여 측정하는 기술. WO₃(2.4-2.8 eV)에 적용 가능.

적용성: GB/T 42272-2022의 밴드갭 시험 방법과 일치합니다.

중국 표준의 요약 및 분석

적용 범위

3의 핵심 표준으로, 재료 사양과 시험 방법을 명시하고 있습니다.

일반 시험: GB/T 19590-2020, GB/T 36081-2018 등은 입자 크기와 비표면적에 대한 표준화된 방법을 제공합니다.

응용 분야 평가: GB/T 42272-2022는 광촉매 성능에 초점을 맞추고 다른 응용 분야(예: 센서)를 간접적으로 지원합니다.

안전 사양: GB/T 16483-2008은 안전한 사용을 보장하기 위한 SDS 프레임워크를 제공합니다.

기술적 세부 사항

입자 크기: 10-100 nm, 국제 표준(ISO 13320)에 부합함.

비표면적: ≥50 m² / g, Nano-WO₃의 높은 활동성 요구 사항을 반영합니다.

광촉매: 밴드갭 2.4-2.8 eV, 분해율 >85%, 실용성에 중점을 두었습니다.

단점과 추세

3의 독성, 안전성 및 환경 영향에 대한 구체적인 표준이 있으며, 국제 표준(예: ISO 19749)을 참조해야 합니다.

추세: 중국 표준은 국제 표준에 점점 더 부합하고 있습니다(예: BET 방법은 ISO 9277과 일치함). 앞으로 새로운 안전 표준이 추가될 수도 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



부록 E: 나노텨스텐산화물 중국어, 영어, 일본어 및 한국어 다국어 표
나노텨스텐 산화물(Nano-WO₃) 은 다기능 나노소재로, 연구 및 응용 분야에 여러 학문 분야와 국제 교류가 활발하게 진행됩니다. 다음 다국어 용어집은 학술 문헌, 기술 표준(GB/T 32698-2016, ISO/TS 80004-1 등) 및 일반적인 용어를 기반으로 작성되었으며, 중국어, 영어, 일본어, 한국어 등 네 가지 언어로 제공됩니다. 본 용어집은 정확하고 과학 연구, 특히 및 산업화 시나리오에 적합합니다.

표 E-1: 나노텨스텐 산화물의 다국어 표

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

재료 및 기본 용어

중국어(CN)	영어(EN)	일본어(JP)	한국어(KR)	설명하다
나노 산화물 텅스텐	나노 텅스텐 산화물	나나 산성화 텅스텐	2018년 3월 27일	WO ₃ 의 나노형태, 입자크기는 일반적으로 1-100 nm이다.
삼산화텅스텐	삼산화텅스텐	삼산화 텅구스텐	그만큼	WO ₃ , 분자량 231.84 g/mol.
나노소재	나노물질	나노소재	2	최소한 한 치수가 100nm보다 작은 재료.
산화텅스텐	산화텅스텐	산성화 텅구스텐	그만큼	일반적으로 WO _x 를 의미하며, 여기서 x는 2, 2.9, 3 등이 될 수 있습니다.
반도체	반도체	반도체	2	WO ₃ , 밴드갭 2.4-2.8 eV.
결정상	결정상	결정상	한국인	예를 들어, WO ₃ 의 성능에 영향을 미치는 단사정계 상과 사방정계 상이 있습니다.

물리적 및 화학적 특성

중국어(CN)	영어(EN)	일본어(JP)	한국어(KR)	설명하다
입자 크기	입자 크기	입자 크기	바이러스 크기	나노-WO ₃ 의 크기는 일반적으로 10~100 nm이다.
비표면적	비표면적	비표면적	2	단위 질량당 표면적은 50-200 m ² / g입니다.
밴드갭	밴드갭	밴드갭	100%	WO ₃ 의 경우 2.4-2.8 eV.
밀도	밀도	밀도	농민	WO ₃ 는 7.16 g/cm ³ 로 나노 수준에서는 약간 낮습니다.
녹는점	녹는점	녹는점	열염	WO ₃ 는 1472° C이며 나노 스케일에서 감소할 수 있습니다.
산소 공석	산소 공석	산소 결핍	분산 공연	WO ₃ 의 촉매 및 전기적 특성에 영향을 미칩니다.
전도도	전도도	전기 전도도	2	나노-WO ₃ 는 10 ⁻³ - 10 ⁻¹ S/cm입니다.
빛 흡수 가장자리	광 흡수 가장자리	빛 흡수 끝	광흡입수 시야	WO ₃ 는 460~500 nm이며 도핑 후 적색편이가 일어날 수 있습니다.

준비 방법

중국어(CN)	영어(EN)	일본어(JP)	한국어(KR)	설명하다
수열법	수열법	수열법	2 합성법	고온, 고압 수용액을 이용한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

용매열법	용매열법	용매 열 방법	2 합성법	나노-WO ₃ 의 제조 . 에탄올과 같은 유기 용매를 사용하여 WO ₃ 를 제조합니다.
침전법	침전법	선 디엔 파	2	3는 화학 반응 침전에 의해 제조되었습니다 .
기상 증착	기상 증착	공기 증발	기상 2	예를 들어 CVD, WO ₃ 박막이나 나노입자의 제조 등.
졸-겔법	졸-겔법	졸-겔법	졸 - 겔법	3 졸 - 겔 변환을 통해.
마이크로파 보조 방식	마이크로파 지원 방식	마이크로파 지원 방법	가장 아름다운 2	마이크로파 가열은 WO ₃ 합성을 가속화합니다.
템플릿 방법	템플릿 메서드	템플레이트 방식	모델법	AAO 및 기타 템플릿을 사용하여 WO ₃ 형태를 제어합니다.

테스트 기술

중국어 (CN)	영어 (EN)	일본어 (JP)	한국어 (KR)	설명하다
X 선 회절	X 선 회절 (XRD)	엑스레이 폴드백	X 회절	3 의 결정상과 입자 크기를 결정하세요 .
푸리에 변환 적외선 분광법	푸리에 변환 적외선 분광법 (FTIR)	적외선 푸리에 변환 적외선 분광법	푸리에 변환 적외선 분광법	(예 : WO) 의 화학 결합을 분석합니다 .
주사전자현미경	주사전자현미경 (SEM)	주사전자현미경	그만큼	WO ₃ 의 표면 형태를 관찰하세요 .
투과 전자 현미경	투과전자현미경 (TEM)	전자현미경을 통해	그만큼	WO ₃ 의 미세구조와 격자를 분석합니다 .
UV-Vis 분광법	자외선-가시광선 분광법 (UV-Vis)	UV-Vis 분광법	최고 - 최고 분광법	WO ₃ 의 밴드갭과 흡수선을 결정하세요 .
비표면적 측정	BET 표면적 측정	BET 결정	표면적 BET 운동	WO ₃ 의 비표면적은 N ₂ 흡착법으로 측정하였다 .
X 선 광전자 분광법	X 선 광전자 분광법 (XPS)	X 선 광전자 분광법	X 선 광전자 분광법	Analyze the surface chemical state of WO ₃ (such as W ⁶⁺ / W ⁵

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

*) .

애플리케이션 영역

중국어 (CN)	English (EN)	일본어 (KR)	Korean (KR)	illustrate
Photocatalyst	Photocatalyst	Photocatalyst	광촉매	WO ₃ is used to degrade pollutants or produce hydrogen .
Electrochromic	Electrochromism	일렉트로크로미즘	2	스마트 윈도우의 WO ₃
가스 센서	가스 센서	가스 센터	한국인 센서	WO ₃ 는 NO ₂ , CO 등의 가스를 감지합니다.
에너지 저장 재료	에너지 저장 재료	에너지 저장 소재	2	2 WO ₃ 는 슈퍼커패시터나 배터리에 사용됩니다.
스마트 윈도우	스마트 윈도우	스마트르	스마트 창	WO ₃ 필름은 빛의 투과율과 열을 조절합니다.
오염물질 분해	오염 물질 분해	오염물질의 분해	그	WO ₃ 유기물의 광촉매 분해 .
수소 생산	수소 생산	수소 생산	2 생산	WO ₃ 는 광촉매적으로 물을 분해하여 수소를 생산합니다.

기타 관련 용어

중국어 (CN)	영어 (EN)	일본어 (JP)	한국어 (KR)	설명하다
도핑	도핑	도핀	도핑	예를 들어, N 및 Ag 도핑 WO ₃ 은 성능을 최적화할 수 있습니다.
복합재료	복합재료	복합재료	복합재료	TiO ₂ 와 같은 2, 광촉매 효율 향상
나노입자	나노입자	나노 입자	나노입자	WO ₃ , 10-50 nm.
나노와이어	나노와이어	나노와이어	2	WO ₃ 의 직경은 20~30nm 이다.
나노시트	나노시트	나노시티	2	WO ₃ , 두께 1-5 nm.
양자점	양자점	양자점	2	WO ₃ 의 경우, <10 nm.
순환	자전거	사이클	순환 2	반복 사용 시 WO ₃ 의 감소.
안정성	안정성	안정성		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

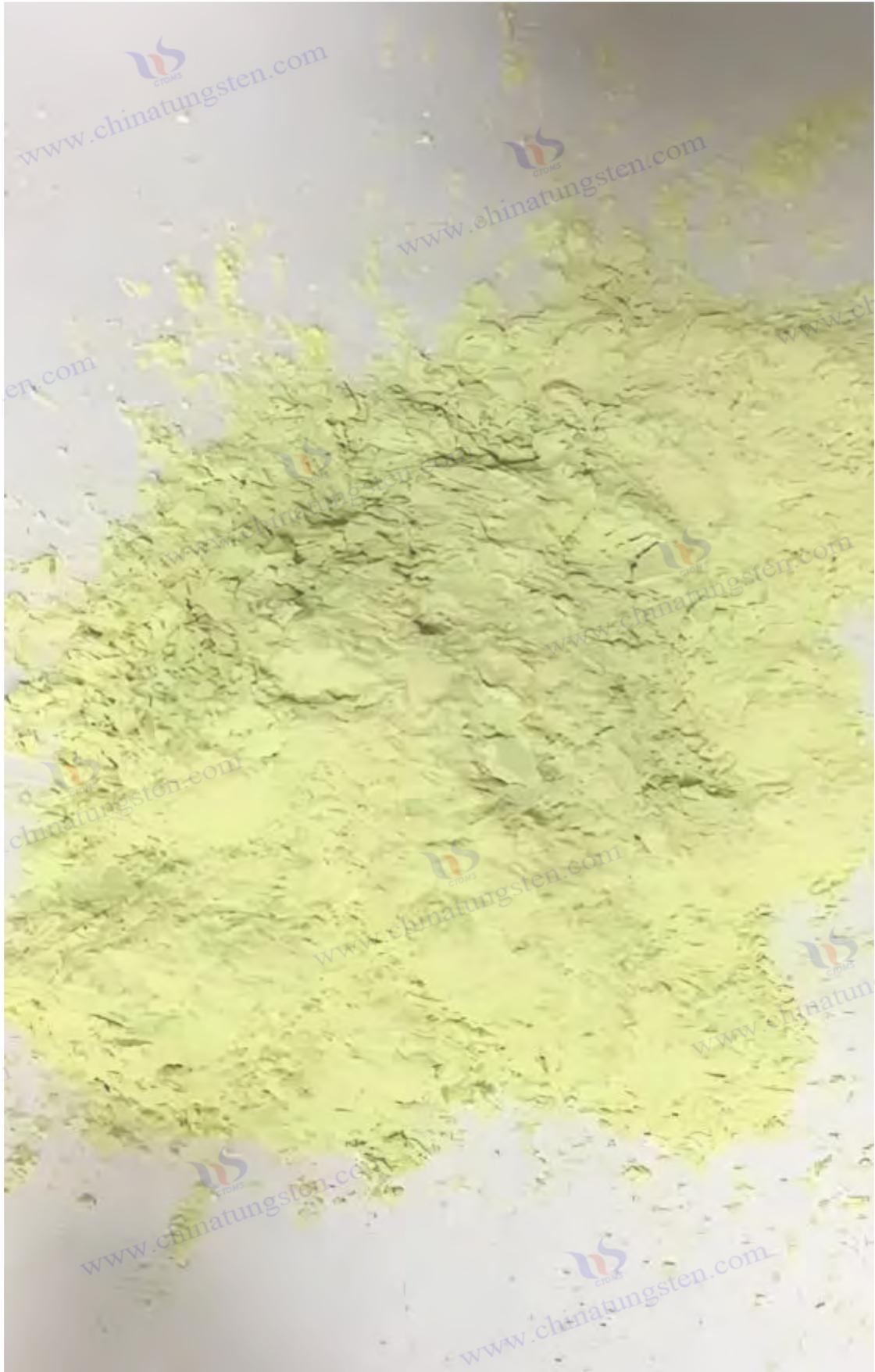
5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD. (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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