Nano-Wolframoxide

Physikalische und chemische Eigenschaften, Produktionsprozess und Anwendungen

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdindustrie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit www.chinatungsten.com als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Forschungsbedeutung und Entwicklungsgeschichte von Nano-Wolframoxid

Kapitel 1 Einführung in Nano-Wolframoxid

1.1 Grundkonzepte von Wolframoxid

1.1.1 Definition und chemische Formel (WO_3)

1.1.2 Farbvariationen von Wolframoxid (Gelb, Blau, Schwarz)

1.1.3 Einzigartige Eigenschaften im Nanobereich

1.2 Geschichte und Entwicklung von Nano-Wolframoxid

1.2.1 Frühe Forschung und Entdeckungen

1.2.2 Fortschritt durch Nanotechnologie

1.3 Status von Nano-Wolframoxid in der Materialwissenschaft

1.3.1 Vergleich mit anderen Nanomaterialien

1.3.2 Hotspots der Industrie- und akademischen Forschung

Kapitel 2 Struktur und Eigenschaften von Nano-Wolframoxid

2.1 Chemische Struktur

2.1.1 Kristallstruktur von WO_3 (monokline, orthorhombische, tetragonale Phase)

2.1.2 Einfluss von Nanostrukturen auf die Struktur

2.1.3 Oberflächenchemie und Bindungszustandsanalyse

2.2 Physikalische Eigenschaften

2.2.1 Partikelgröße und Morphologie (Nanopartikel, Nanodrähte, Nanoblätter)

2.2.2 Dichte, Härte und thermodynamische Eigenschaften

2.2.3 Spezifische Oberfläche und Porenstruktur

2.3 Optische Eigenschaften

2.3.1 Bandlückenenergie (2.4–2.8 eV)

2.3.2 Absorptionskante und Farbmechanismus

2.3.3 Photochrome und elektrochrome Eigenschaften

2.4 Elektrische Eigenschaften

2.4.1 Eigenschaften von N-Typ-Halbleitern

2.4.2 Leitfähigkeit und Trägerkonzentration

2.4.3 Dielektrizitätskonstante und elektrochemische Eigenschaften

2.5 Chemische Eigenschaften

2.5.1 Redoxverhalten

2.5.2 Stabilität und Flüchtigkeit

2.5.3 Reaktivität mit Säuren, Basen und Reduktionsmitteln

Kapitel 3 Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxid

3.1 Nasschemische Verfahren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3.1.1 Hydrothermales Verfahren
3.1.2 Solvothermales Verfahren
3.1.3 Säurefällung
3.2 Thermochemische Verfahren
3.2.1 Thermische Zersetzung
3.2.2 Kalzinierung
3.2.3 Mikrowellenunterstützte Synthese
3.3 Gasphasenverfahren
3.3.1 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)
3.3.2 Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)
3.3.3 Dampfphasenoxidation
3.4 Weitere Verfahren
3.4.1 Mechanisches Legieren
3.4.2 Elektrochemische Synthese
3.4.3 Biosynthese
3.5 Prozessparameteroptimierung
3.5.1 Temperatur-, Druck- und Zeitkontrolle
3.5.2 Auswahl der Ausgangsstoffe und Reaktionsbedingungen
3.5.3 Morphologie- und Partikelgrößenkontrolltechnologie

Kapitel 4 Charakterisierungstechniken für Nano-Wolframoxid
4.1 Strukturelle Charakterisierung
4.1.1 Röntgenbeugung (XRD)
4.1.2 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)
4.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (SEM)
4.2 Chemische Charakterisierung
4.2.1 Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR)
4.2.2 Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)
4.2.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS)
4.3 Physikalische Charakterisierung
4.3.1 BET-Oberflächenanalyse
4.3.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA) und Differenz-Scanning-Kalorimetrie (DSC)
4.3.3 Partikelgrößenanalyse
4.4 Optische und elektrische Charakterisierung
4.4.1 Ultraviolett-Vis-Spektroskopie (UV-Vis)
4.4.2 Vierpunkt-Sondenmethode
4.4.3 Zyklische Voltammetrie
4.5 Analyse und Interpretation von Charakterisierungsdaten
4.5.1 Kristallform und Phasenreinheit
4.5.2 Oberflächenchemie und Defekte
4.5.3 Quantifizierung von Leistungsparametern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 5 Anwendungen von Nano-Wolframoxid

5.1 Photokatalyse
5.1.1 Wasserspaltung und Wasserstoffproduktion
5.1.1.1 Photokatalytischer Wasserspaltungsmechanismus von Nano-WO_3
5.1.1.2 Dotierungsmodifikation (wie N, S) zur Verbesserung der Wasserstoffproduktionseffizienz
5.1.1.3 Heteroübergangsdesign mit anderen Halbleitern (wie TiO_2)
5.1.1.4 Experimenteller Fall: Solarbetriebene Wasserstoffproduktionsleistung
5.1.2 Abbau organischer Schadstoffe
5.1.2.1 Abbau von Farbstoffen (wie Methylenblau) durch Nano-WO_3
5.1.2.2 Reaktion auf sichtbares Licht und oxidative Radikalbildung
5.1.2.3 Anwendungsbeispiele in der industriellen Abwasserbehandlung
5.1.2.4 Zyklische Stabilität und Photokorrosionsprobleme
5.1.3 Design von Komposit-Photokatalysatoren
5.1.3.1 Herstellung und Eigenschaften von WO_3/g-C_3N_4-Kompositen
5.1.3.2 Synergistische Wirkung der WO_3/TiO_2-Kern-Schale-Struktur
5.1.3.3 Edelmetallbeladung (wie Pt, Au) zur Verbesserung der Photokatalyse
5.1.3.4 Neuartige Kompositsysteme (wie WO_3/$BiVO_4$)
5.1.4 Photokatalytische Filme und Geräte
5.1.4.1 Design und Herstellung einer selbstreinigenden Glasbeschichtung
5.1.4.2 Anwendung in Luftreinigungsgeräten
5.1.4.3 Industrialisierungsversuch eines photokatalytischen Reaktors
5.2 Elektrochrome Geräte
5.2.1 Intelligente Fenster und Displays
5.2.1.1 Farbwechselmechanismus von Nano-WO_3 in intelligenten Fenstern
5.2.1.2 Optimierung des optischen Modulationsbereichs und der Reaktionszeit
5.2.1.3 Anwendungsfälle zur Energieeinsparung in Gebäuden
5.2.1.4 Anwendungen für hochauflösende Displays
5.2.2 Herstellung und Eigenschaften von WO_3-Filmen
5.2.2.1 Sputterabscheidung und Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung dünner Filme
5.2.2.2 Einfluss der Nanostruktur (z. B. poröse Membran) auf die Leistung
5.2.2.3 Zyklische Stabilität und Haltbarkeitstest
5.2.2.4 Dotierung (z. B. Ni, Mo) zur Verbesserung der Farbwechseleffizienz
5.2.3 Vollständig festkörperelektrochromes System
5.2.3.1 Abstimmung von WO_3 und Gegenelektrode (z. B. NiO)
5.2.3.2 Auswahl und Optimierung fester Elektrolyte
5.2.3.3 Geräteverpackung und Massenproduktionstechnologie
5.2.3.4 Entwicklung flexibler elektrochromer Geräte
5.2.4 Neue Anwendungen
5.2.4.1 Elektrochrome Spiegel und Blendschutzanwendungen
5.2.4.2 Infrarotsteuerung im dynamischen Wärmemanagement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.2.4.3 Integrierte Sensoren und multifunktionale Geräte
5.3 Gassensoren
5.3.1 Detektion von Gasen wie NO_2, H_2, CO usw.
5.3.1.1 Mechanismus der hohen Empfindlichkeit von Nano-WO_3 gegenüber NO_2
5.3.1.2 Selektivität und Reaktionsfähigkeit bei der H_2-Detektion
5.3.1.3 Detektion von CO und anderen flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)
5.3.1.4 Einfluss unterschiedlicher Morphologien (z. B. Nanodrähte)
5.3.2 Dotierung und Verbesserung der Empfindlichkeit
5.3.2.1 Verbesserung durch Dotierung mit Edelmetallen (z. B. Pt und Pd)
5.3.2.2 Modifikation mit Übergangsmetallen (z. B. Fe, Cu)
5.3.2.3 Synergistischer Effekt von Heteroübergängen (z. B. WO_3/SnO_2)
5.3.2.4 Dotierungsprozess und Leistungsoptimierung
5.3.3 Entwicklung von Mikrosensoren
5.3.3.1 Integrierte MEMS-Technologie Nano-WO_3
5.3.3.2 Flexibles und tragbares Sensordesign
5.3.3.3 Betrieb bei niedrigen Temperaturen und Reduzierung des Energieverbrauchs
5.3.3.4 Fälle der Industrie- und Umweltüberwachung
5.3.4 Herausforderungen und zukünftige Richtungen
5.3.4.1 Feuchtigkeitsinterferenz und Antiinterferenztechnologie
5.3.4.2 Langzeitstabilität und Alterungsprobleme
5.3.4.3 Array-Sensoren für die Mehrgasdetektion
5.4 Energiespeichermaterialien
5.4.1 Negative Elektrode einer Lithium-Ionen-Batterie
5.4.1.1 Einbettungs-/Entbettungsmechanismus von Nano-WO_3
5.4.1.2 Optimierung der hohen Kapazität und Zyklusleistung
5.4.1.3 Verbundwerkstoff mit Kohlenstoffmaterialien (wie WO_3/Graphen)
5.4.1.4 Leistungstest für schnelles Laden und Entladen
5.4.2 Superkondensatorelektroden
5.4.2.1 Pseudokapazitätseigenschaften von Nano-WO_3
5.4.2.2 Verbesserung der spezifischen Kapazität und Leistungsdichte
5.4.2.3 Nanostrukturdesign (z. B. Nanosheet-Arrays)
5.4.2.4 Symmetrische und asymmetrische Superkondensatoren
5.4.3 Anwendung in Natrium-Ionen-Batterien
5.4.3.1 Potenzial von Nano-WO_3 in Natrium-Ionen-Batterien
5.4.3.2 Volumenausdehnung und Stabilitätsverbesserung
5.4.3.3 Elektrolytanpassung und Leistungsoptimierung
5.4.3.4 Vergleich mit anderen Übergangsmetalloxiden
5.4.4 Neue Energiespeichergeräte
5.4.4.1 Flexible und tragbare Energiespeichergeräte
5.4.4.2 Zink-Ionen-Batterien und Hybridkondensatoren
5.4.4.3 Erforschung von Nano-WO_3 in Festkörperbatterien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.5 Weitere Anwendungen
5.5.1 Thermochrome Materialien
5.5.1.1 Thermochromer Mechanismus von Nano-WO_3
5.5.1.2 Dotierung (wie V, Mo) zur Anpassung der Farbwechseltemperatur
5.5.1.3 Temperaturkontrollbeschichtungen für Gebäude und Autos
5.5.1.4 Infrarot-Reflexionsleistung im Wärmemanagement
5.5.2 Antimikrobielle Beschichtungen
5.5.2.1 Antibakterieller Mechanismus der photokatalytischen Erzeugung reaktiver Sauerstoffspezies
5.5.2.2 Anwendung von Nano-WO_3 in medizinischen Geräten
5.5.2.3 Bewertung der antimikrobiellen Wirksamkeit und Sicherheit
5.5.2.4 Entwicklung von Verbundbeschichtungen (wie WO_3/Ag)
5.5.3 Pigmente und keramische Additive
5.5.3.1 Gelbe Pigmenteigenschaften von Nano-WO_3
5.5.3.2 Witterungsbeständigkeit und Farbstabilität
5.5.3.3 Verstärkung und Modifizierung in Keramiken
5.5.3.4 Anwendung in Industriebeschichtungen und Kunststoffen
5.5.4 Neue und domänenübergreifende Anwendungen
5.5.4.1 Potenzial von Nano-WO_3 in Bioimaging
5.5.4.2 Photoelektrische Anwendungen von Quantenpunkten WO_3
5.5.4.3 Katalysatorträger und chemische Anwendungen
5.5.4.4 Hochtemperaturbeständigkeit in Luft- und Raumfahrtmaterialien
5.6 Herausforderungen und Lösungen in Anwendungen
5.6.1 Verbesserung der photokatalytischen Effizienz und der Nutzung sichtbaren Lichts
5.6.2 Lebensdauer und Kostenkontrolle von elektrochromen Geräten
5.6.3 Selektivität und Umweltanpassungsfähigkeit von Gassensoren
5.6.4 Volumenausdehnung und zyklische Dämpfung in Energiespeichermaterialien
5.6.5 Multifunktionale Integration und Engpässe bei der Industrialisierung

Kapitel 6 Patentübersicht für Nano-Wolframoxid
6.1 Patente zur Herstellungsmethode
6.1.1 US7591984B2: „Impact Precipitation“-Methode für Nano-WO_3
6.1.2 CN103803644A: Herstellung von Nano-WO_3 durch hydrothermale Methode
6.1.3 JP2006169092A: Produktion von WO_3-Feinpartikeln
6.2 Anwendungsbezogene Patente
6.2.1 US20110111209A: Hochbeständiger elektrochromer WO_3-Film
6.2.2 US10266947B2: Nano-WO_3-Gassensor
6.2.3 EP2380687A1: WO_3-photokatalytische Beschichtung
6.3 Patentanalyse
6.3.1 Globale Patentverteilung und Trends
6.3.2 Technologische Innovation und Wettbewerbslandschaft
6.3.3 Patentschutz und Industrialisierungsaussichten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 7 Relevante Normen für Nano-Wolframoxid

7.1 Chinesische Normen
7.1.1 YS/T 572-2007: Wolframoxid
7.1.2 YS/T 535-2006: Ammoniummetawolframat
7.2 Japanische Normen
7.2.1 JIS K 1462:2015: Analysemethoden für Wolframverbindungen
7.3 Deutsche Normen
7.3.1 DIN 51078:2002: Prüfung von Oxidkeramikwerkstoffen
7.4 Russische Normen
7.4.1 GOST 25702-83: Chemische Analyse von Wolframaten
7.5 Koreanische Normen
7.5.1 KS D 9502:2018: Analyse von Wolfram und Wolframlegierungen
7.6 Internationale Normen
7.6.1 ASTM B922-20: Prüfung der spezifischen Oberfläche von Metallpulvern
7.6.2 ISO 16962:2017: Oberflächenanalyse
7.7 Vergleich und Anwendung von Normen
7.7.1 Unterschiede und Anwendbarkeit nationaler Normen
7.7.2 Auswirkungen auf die Qualitätskontrolle von Nano-WO_3

Kapitel 8 Sicherheit und Umweltauswirkungen von Nano-Wolframoxid

8.1 Toxizitätsbewertung
8.1.1 Akute und chronische Toxizität
8.1.2 Biologische Sicherheit von nanoskaligem WO_3
8.2 Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz
8.2.1 Expositionsgrenzwerte und Schutzmaßnahmen
8.2.2 Staub- und Abgasbehandlung
8.3 Umweltauswirkungen
8.3.1 Ökotoxizität und Wasserverschmutzung
8.3.2 Umwelt-Fußabdruck des Produktionsprozesses
8.4 Grüne Fertigungstechnologie
8.4.1 Energiesparender Herstellungsprozess
8.4.2 Abfallverwertung und Recycling
8.5 Sicherheitsdatenblatt (MSDS) für Nano-Wolframoxid von CTIA GROUP LTD
8.5.1 Produktkennzeichnung und Informationen zu Inhaltsstoffen
8.5.2 Gefahrenidentifizierung (physikalische, chemische und gesundheitliche Risiken)
8.5.3 Empfehlungen zur Handhabung und Lagerung
8.5.4 Notfallmaßnahmen (Leckage, Feuer, Erste Hilfe)
8.5.5 Versand- und regulatorische Informationen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Verweise

Anhang

Anhang A Physikalisches und chemisches Datenblatt von Nano-Wolframoxid

Einschließlich detaillierter Parameter wie Dichte, Schmelzpunkt, Bandlücke usw.

Anhang B Experimentelle Verfahren für häufig verwendete Analysemethoden

Bedienungsanleitung XRD, FTIR, SEM, TEM, UV-Vis, BET usw.

Anhang C Liste der Patente im Zusammenhang mit Nano-Wolframoxid

Detaillierte Auflistung von Patentnummern, Titeln und Zusammenfassungen

Anhang D Liste der Nano-Wolframoxid-Normen

Vergleich mit chinesischen, japanischen, deutschen, russischen, koreanischen und internationalen Normen

Anhang E Mehrsprachige Terminologietabelle für Nano-Wolframoxid

Vergleichstabelle der chinesischen, englischen, japanischen und koreanischen Terminologie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vorwort

Trioxid (Nano-WO_3) , ein Übergangsmetalloxid mit hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften, nimmt eine wichtige Stellung in den Bereichen Materialwissenschaft, Chemieingenieurwesen und Nanotechnologie ein. Seine einzigartigen Halbleitereigenschaften, optischen Eigenschaften und hohe spezifische Oberfläche verleihen ihm ein breites Anwendungspotenzial in vielen Bereichen wie Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensoren und Energiespeicherung. Der Zweck dieses Buches ist, die wissenschaftlichen Grundlagen, den Herstellungsprozess, die Charakterisierungsmethode und die Anwendungsszenarien von Nanowolframtrioxid systematisch darzulegen und gleichzeitig patentierte Technologie, internationale Standards und Sicherheitsbewertungen zu kombinieren, um ein umfassendes und praktisches Nachschlagewerk für akademische Forscher, Ingenieure und Praktiker in der Industrie bereitzustellen. Durch die Integration der neuesten Forschungsfortschritte und der industriellen Praxis hoffen wir, den kompletten Weg von Nanowolframtrioxid von der Laborerkundung bis zur industriellen Anwendung aufzuzeigen und seine technologische Innovation in den Bereichen neue Energien, Umweltschutz und intelligente Fertigung zu fördern.

Forschungsbedeutung und Entwicklungsgeschichte von Nano-Wolframoxid

Die Forschungsbedeutung von Nano-Wolframoxid beruht in erster Linie auf seiner hervorragenden Leistung als n-Typ-Halbleitermaterial. Sein Bandlückenenergiebereich (2,4–2,8 eV) verleiht ihm eine starke Absorptionsfähigkeit für sichtbares Licht, was ihm erhebliche Vorteile im Bereich der Photokatalyse verschafft, beispielsweise bei der Wasserspaltung zur Wasserstofferzeugung und beim Abbau organischer Schadstoffe. Verglichen mit herkömmlichen Photokatalysatoren (wie TiO_2) reagiert Nano-WO_3 im sichtbaren Lichtbereich stärker und kann Sonnenenergie effektiv nutzen, was es zu einem Schlüsselmaterial zur Lösung von Energiekrisen und Umweltverschmutzungsproblemen macht. Darüber hinaus machen die elektrochromen Eigenschaften von WO_3 – die Fähigkeit, Farbe und Transmission

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

durch elektrische Felder zu steuern – es zu einer Kernkomponente für intelligente Fenster, Displays und Geräte zum dynamischen Wärmemanagement. Nanoskaliges WO_3 eignet sich aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche (20–50 m^2/ g, im Vergleich zu 5–10 m^2/g mikrometergroßem WO_3) und der zahlreichen oberflächenaktiven Stellen auch gut für Gassensoren (z. B. zur Erkennung von NO_2 und H_2) und Energiespeichermaterialien (z. B. Anoden für Lithium-Ionen-Batterien und Elektroden für Superkondensatoren). Nanoskaliges WO_3 ist zudem in der Anwendung in Gassensoren (z. B. zur Erkennung von NO_2 und H_2) und Energiespeichermaterialien (z. B. Anoden für Lithium-Ionen-Batterien und Elektroden für Superkondensatoren) einsetzbar. Nanoskaliges WO_3 bietet zudem eine hohe Leistung in der Anwendung in Gassensoren (z. B. zur Erkennung von NO_2 und H_2) und Energiespeichermaterialien (z. B. Anoden für Lithium-Ionen-Batterien und Elektroden für Superkondensatoren). Nanoskaliges WO_3 besitzt außerdem eine hohe spezifische Oberfläche (20–50 m^2/g, im Vergleich zu 5–10 m^2/g mikrometergroßem WO_3) und ist in der Lage, oberflächenaktive Stellen zu bilden. Nanoskalige Quanten- und Oberflächeneffekte steigern zusätzlich die katalytische Aktivität, die Ionendiffusionsrate und die photoelektrische Umwandlungseffizienz und machen es so für interdisziplinäre Anwendungen unverzichtbar.

Die einzigartigen Eigenschaften von Nano-Wolframoxid haben nicht nur die Grundlagenforschung vorangetrieben, sondern auch vielfältige Perspektiven für industrielle Anwendungen eröffnet . So ist beispielsweise seine Anwendung in der photokatalytischen Luftreinigung und in selbstreinigenden Beschichtungen bereits in der Kommerzialisierungsphase, während seine Erforschung in den Bereichen flexible Elektronik und Biomedizin die zukünftige Entwicklungsrichtung vorgibt. Die breite Anwendung von Nano-WO_3 bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich, darunter die Frage nach einer kostengünstigen Produktion im großen Maßstab, der Verbesserung der Leistungsstabilität in komplexen Umgebungen und der Bewertung der biologischen und ökologischen Sicherheit im Nanomaßstab. Diese Fragen stehen nicht nur im Fokus der akademischen Forschung, sondern auch im Fokus von Industrie und Politik.

Die Forschung und Entwicklung von Nano-Wolframoxid lässt sich auf die ersten Untersuchungen von Wolframverbindungen im späten 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Als seltenes Metall erregten Wolframoxide zunächst aufgrund des Bedarfs der metallurgischen Industrie Aufmerksamkeit. Gelbes Wolframoxid (WO_3) , die Hauptoxidationsstufe von Wolfram, wurde aufgrund seiner chemischen Stabilität, hohen Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt ca. 1473 °C) und leuchtend gelben Erscheinung umfassend untersucht. Ende des 19. Jahrhunderts stellten Chemiker WO_3 durch die Ansäuerungsreaktion von Wolframaten (wie Natriumwolframat Na_2 WO_4) her und entdeckten dabei erstmals dessen amphotere Oxideigenschaften – es kann mit Säuren zu Wolframaten und mit Basen zu Wolframaten reagieren . Die Forschung in dieser Phase konzentrierte sich hauptsächlich auf die chemischen Eigenschaften und die industrielle Herstellung von WO_3 und legte damit den Grundstein für spätere Anwendungen.

Mitte des 20. Jahrhunderts, mit dem Aufkommen der Halbleiterphysik, erreichte die Erforschung von WO_3 eine neue Phase. In den 1960er Jahren entdeckten Forscher erstmals, dass WO_3 nach Anlegen eines elektrischen Felds seine Farbe ändern kann. Diese elektrochrome Eigenschaft wurde durch die Bildung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

von Wolframbronzestrukturen (wie H_xWO_3) verursacht . Diese Entdeckung löste rasch Forschungen zu optischen Anwendungen aus, wie beispielsweise Blendschutzgläsern und frühen Anzeigegeräten. Anschließend löste die Entdeckung des Honda-Fujishima-Effekts (photokatalytische Zersetzung von Wasser durch TiO_2) in den 1970er Jahren eine Welle der Photokatalyseforschung aus. WO_3 wurde aufgrund seiner geringeren Bandlücke und besseren photochemischen Stabilität als starker Konkurrent von TiO_2 angesehen . Eine Studie aus dem Jahr 1976 zeigte beispielsweise, dass WO_3 unter ultraviolettem Licht Wasser zersetzen kann, um Sauerstoff zu erzeugen, und diese Errungenschaft förderte seine eingehende Erforschung im Bereich der Photokatalyse.

Der Aufstieg der Nanotechnologie markiert einen weiteren Sprung nach vorn in der WO_3- Forschung. Mit dem Durchbruch der Nanopräparationstechnologie (wie Hydrothermalverfahren und Gasphasenabscheidung) im 21. Jahrhundert, insbesondere nach dem Jahr 2000, ist die Synthese von WO_3 im Nanomaßstab Realität geworden. Im Jahr 2004 nutzten Forscher erstmals ein Hydrothermalverfahren, um WO_3-Nanopartikel mit einem Durchmesser von etwa 20 nm herzustellen . Ihre photokatalytische Aktivität war fast dreimal höher als die von mikrometergroßen Materialien. Anschließend wurde ihre Leistung durch die Entwicklung von Morphologien wie Nanodrähten, Nanoschichten und porösen Strukturen weiter optimiert. Beispielsweise zeigte eine Studie aus dem Jahr 2010, dass WO_3 Nanodrähte haben eine große Oberfläche von 40 m^2/g, was ihre Empfindlichkeit bei der NO_2-Erkennung um das Fünffache erhöht . Gleichzeitig können Dotierungsmodifikationen (wie N- und S-Dotierung) und Verbundwerkstoffdesigns (wie WO_3/ gC_3N_4 , WO_3/ TiO_2) wurden die photokatalytische Effizienz und die elektrischen Eigenschaften deutlich verbessert. In den letzten Jahren hat die Anwendung von Nano-WO_3 im Bereich der Energiespeicherung stark zugenommen. Eine Studie aus dem Jahr 2018 zeigte beispielsweise die hohe Kapazität (> 600 mAh /g) und Zyklenstabilität von WO_3/Graphen-Kompositen in Lithium-Ionen -Batterien. Darüber hinaus erschließt sich allmählich sein Potenzial in aufstrebenden Bereichen wie antibakteriellen Beschichtungen (durch Photokatalyse zur Erzeugung von aktivem Sauerstoff), thermochromen Materialien (Dotierung mit V zur Anpassung der Farbwechseltemperatur) und Bioimaging (Quantenpunkte WO_3) .

Obwohl die Forschung zu Nano-WO_3 bemerkenswerte Fortschritte gemacht hat, ist ihre Entwicklung noch mit vielen Herausforderungen verbunden. Die Komplexität des Herstellungsprozesses begrenzt die Produktion im großen Maßstab, der Agglomerationseffekt der Nanopartikel kann die Leistung verringern und ihre langfristige Sicherheit im Körper muss noch eingehend untersucht werden. Diese Probleme haben technologische Innovationen auf der ganzen Welt vorangetrieben, wie beispielsweise Chinas Durchbruch bei der Produktion von hochreinem WO_3 (Norm YS/T 572-2007) und die Bemühungen Europas und der Vereinigten Staaten um Sicherheitsspezifikationen für Nanomaterialien (ASTM B922-20). Dieses Buch wurde in diesem Kontext geschrieben. Es zielt darauf ab, eine Brücke von der Grundlagenforschung zur industriellen Anwendung zu bauen, indem es die Struktur, Herstellung, Anwendung und Sicherheit von Nano-WO_3 systematisch analysiert , und wissenschaftliche Unterstützung bei der Lösung großer Herausforderungen in den Bereichen Energie, Umwelt und intelligente Technologie zu bieten.
Dieses Buch ist in neun Kapitel gegliedert. Es beginnt mit der Struktur und den Eigenschaften von Nano-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Wolframoxid und behandelt anschließend Herstellungsprozess, Charakterisierungstechnologie, Anwendungsgebiete, Patente und Normen, Sicherheitsbewertungen und Zukunftsaussichten . Der Anhang enthält Datenblätter, Versuchsanleitungen, Patentlisten, Normenvergleiche und mehrsprachige Glossare und soll so eine umfassende und praktische Wissensplattform für Leser weltweit schaffen. Wir hoffen, dass dieses Buch nicht nur neue Ideen für die akademische Forschung anregt, sondern auch den Industrialisierungsprozess von Nano-WO_3 vorantreibt .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 1: Einführung in Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframtrioxid (Nano-WO_3) ist ein wichtiges Übergangsmetalloxid. Aufgrund seiner vielfältigen physikalischen und chemischen Eigenschaften und breiten Anwendungsmöglichkeiten spielt es eine zentrale Rolle in den Bereichen Materialwissenschaft, Chemieingenieurwesen und Nanotechnologie. Dieses Kapitel bietet den Lesern eine umfassende Einführung in Nano-Wolframtrioxid. Es beginnt mit seiner grundlegenden Definition, chemischen Formel und Farbvarianten und geht dann detailliert auf seine einzigartigen Eigenschaften im Nanobereich ein. Anschließend wird der historische Kontext seiner Forschung und Entwicklung beleuchtet und sein aktueller Stand sowie die wichtigsten Forschungsschwerpunkte in der Materialwissenschaft analysiert. Die ausführliche Einführung in diesem Kapitel vermittelt den Lesern ein umfassendes Verständnis der wissenschaftlichen Grundlagen und des Anwendungspotenzials von Nano-Wolframtrioxid und legt den Grundstein für ein tiefes Verständnis seiner Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen.

1.1 Grundlegende Konzepte zu Wolframoxid

1.1.1 Definition und chemische Formel (WO_3)

Wolframtrioxid ist eine Verbindung aus Wolfram (W) und Sauerstoff (O) mit der chemischen Formel WO_3 , was bedeutet, dass jedes Wolframatom über eine Mischung aus kovalenten Bindungen und ionischen Bindungen mit drei Sauerstoffatomen verbunden ist und so eine stabile Oxidstruktur bildet. Als Hauptoxidationsstufe des Wolframelements liegt Wolfram in WO_3 in der Oxidationsstufe +6 vor, gehört zur Familie der Übergangsmetalloxide und hat ein Molekulargewicht von 231,84 g/mol. Die Kristallstruktur von WO_3 hängt stark von den Herstellungsbedingungen und der Temperatur ab und weist normalerweise eine monokline Phase (monoklin, stabiler Zustand, üblich bei Raumtemperatur), eine orthorhombische Phase (orthorhombisch, 300–720 °C) oder eine tetragonale Phase (tetragonal, > 720 °C) auf, und der Übergang dieser Phasen hängt eng mit seinen thermodynamischen Eigenschaften zusammen.

WO_3 ist ein amphoteres Oxid mit chemischer Vielseitigkeit. Es kann mit starken Säuren (wie HCl) reagieren und lösliche Wolframsalze (wie WCl) bilden. $_6$) und kann auch mit starken Basen (wie NaOH) zu Wolframaten (wie $Na_2 WO_4$) reagieren , was es für die industrielle Reinigung und chemische Synthese wertvoll macht. Zudem hat WO_3 einen Schmelzpunkt von bis zu 1473 °C und einen Zersetzungssiedepunkt von über 1700 °C, weist also eine ausgezeichnete thermische Stabilität auf und eignet sich daher für Anwendungen in Hochtemperaturumgebungen, wie etwa als keramische Zusatzstoffe und feuerfeste Materialien. Im Nanomaßstab werden diese Eigenschaften von WO_3 durch die Verstärkung von Oberflächen- und Quanteneffekten noch verstärkt, was ihm ein größeres Potenzial im Bereich der Funktionsmaterialien verleiht.

1.1.2 Farbvarianten von Wolframoxid (gelb, blau, schwarz)

Wolframoxid ist für seine verschiedenen Farbvarianten bekannt, darunter Gelb, Blau und Schwarz. Diese spiegeln nicht nur die Unterschiede in seiner chemischen Zusammensetzung, Kristallstruktur und Defektstruktur wider, sondern bestimmen auch direkt sein Anwendungspotenzial in der Photokatalyse,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Elektrochromie , Gassensorik und Energiespeicherung. Im Folgenden finden Sie eine umfassende Beschreibung dieser drei Farbvarianten mit Informationen zu Herkunft, Herstellungsprozess, Eigenschaften und Nanoskaligkeit sowie zu ihren spezifischen Anwendungen in Forschung und Industrie.

Gelbes Wolframoxid (YTO, WO_3)

Herkunft und Struktur

von gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3) Gelbes Wolframoxid ist eine typische Form von Wolframoxid (WO_3) , das normalerweise in monokliner oder orthorhombischer Phase vorliegt. Seine gelbe Farbe rührt von dem elektronischen Übergang mit einer Bandlückenenergie zwischen 2,6 und 2,8 eV her, was einer starken Absorption im sichtbaren Lichtbereich (ca. 450–500 nm) entspricht. Die Kristallstruktur von monoklinem WO_3 besteht aus oktaedrischen WO_6-Einheiten, die durch gemeinsame Ecken oder Kanten verbunden sind und ein dreidimensionales Netzwerk mit Gitterparametern von a=7,306 Å, b=7,540 Å, c=7,692 Å, β=90,91° bilden. Diese geordnete Struktur verleiht ihm eine hohe chemische und thermische Stabilität. Die gelbe Farbe hängt auch mit Spurendefekten im Gitter zusammen (wie Sauerstoffleerstellen) . Obwohl diese Defekte in reinem WO_3 selten sind , können sie im Nanobereich leicht zunehmen und die Farbtiefe beeinflussen. Röntgenbeugung (XRD) und Raman-Spektroskopie-Analyse zeigen, dass die charakteristischen Peaks der monoklinen Phase (wie 717 cm^{-1} und 807 cm^{-1}) die starke Vibration der WOW-Bindung widerspiegeln, was ihre strukturelle Integrität weiter bestätigt.

Herstellungsverfahren für

gelbes Wolframoxid (YTO, WO_3) Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von gelbem WO_3 , die hauptsächlich in nasschemische und thermochemische Verfahren unterteilt werden:

von gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3) durch Säurefällung

die Natriumwolframatlösung (Na_2WO_4) zur Einstellung des pH-Werts auf 1-2 , um Wolframsäure (H_2WO_4) zu erzeugen Niederschlag, der dann 2–4 Stunden bei 500–600 °C kalziniert wird, um sich in WO_3 zu zersetzen . Die Kalzinierungstemperatur ist entscheidend. Bei Temperaturen unter 450 °C können Hydrate (wie $WO_3 \cdot H_2O$) zurückbleiben, bei Temperaturen über 650 °C kann die Farbe heller werden oder die Korngröße zu groß (> 10 μm) werden .

Thermische Zersetzungsmethode: Ammoniummetawolframat ($(NH_4)_5H_5[H_2(WO_4)_6] \cdot H_2O$, kurz AMT) wird in der Industrie häufig als Vorläufer verwendet. Es wird bei 550 °C an der Luft kalziniert, und die Zersetzungsreaktion lautet: $(NH_4)_5H_5[H_2(WO_4)_6] \rightarrow WO_3 + NH_3\uparrow + H_2O\uparrow$. Mit dieser Methode lässt sich die Korngröße steuern, wobei üblicherweise WO_3 in Mikrongröße von 1–5 μm erhalten wird . Im Nanobereich ist jedoch eine hydrothermale Methode erforderlich. Die Röstatmosphäre (z. B. der Sauerstoffgehalt) hat einen erheblichen Einfluss auf die Farbreinheit, und Sauerstoffmangel kann zu blauem WO_3 führen .

Gelbes Wolframoxid (YTO , WO_3) Hydrothermale Herstellung

Durch die Reaktion von Natriumwolframat und HCl in einem Autoklaven bei 180 °C über 12–24 Stunden können direkt gelbe WO_3-Nanopartikel mit einer Größe von 20–100 nm erzeugt werden. Durch die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版

Zugabe von Tensiden (wie Hexadecyltrimethylammoniumbromid, CTAB) kann die Morphologie kugelförmig (20–50 nm Durchmesser), stäbchenförmig (100–200 nm lang) oder flockenförmig (10–20 nm dick) eingestellt werden. So wurden beispielsweise in einer Studie aus dem Jahr 2017 durch Optimierung der hydrothermalen Bedingungen (pH = 1,5, 180 °C, 24 h) 30 nm große gelbe WO_3-Nanopartikel mit einer Reinheit von 99,9 % hergestellt .

Ausbeute von über 90 % eher für die industrielle Massenproduktion geeignet ist .

Physikalische und chemische Eigenschaften von Nano-Gelbwolframoxid (YTO, WO_3)

Optische Eigenschaften von nano-gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Die Bandlücke beträgt 2,6–2,8 eV und reflektiert gelbes Licht (Wellenlänge 570–590 nm) mit hoher Transmission im Infrarotbereich (> 700 nm). Das UV-Vis-Spektrum zeigt eine Absorptionskante bei etwa 450 nm, hohe Farbreinheit und eine optische Dichte (OD) zwischen 0,5 und 1,0. Der Bandlückenwert wird mit der Tauc -Plot-Methode berechnet. Die Formel lautet $(\alpha h \nu)^2 = A(h\nu - Eg)$, wobei α der Absorptionskoeffizient und hν die Photonenenergie ist.

Dichte von nanogelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Die Dichte von monoklinem WO_3 beträgt 7,16 g/cm³ , und die Dichte der orthorhombischen Phase ist aufgrund der lockereren Gitteranordnung etwas niedriger (ca. 7,1 g/cm³) . Die scheinbare Dichte von nanoskaligem WO_3 kann aufgrund der Porosität, bestimmt mit der Archimedes-Methode, leicht auf 6,8–7,0 g/cm³ reduziert sein .

Thermische Stabilität: In Luft bis 1100 °C stabil, beginnt es oberhalb dieser Temperatur zu verdampfen und bildet $WO_{2.9}$ oder andere Substanzen mit niedriger Oxidationsstufe . Die Zersetzungsreaktion ist: $2WO_3 \rightarrow 2WO_{2.9} + 0{,}5O_2\uparrow$. Die thermogravimetrische Analyse (TGA) zeigt, dass der Massenverlust vor 1200 °C 1 % nicht übersteigt.

Chemische Eigenschaften von Nano-Gelbwolframoxid (YTO, WO_3)

Es ist in Wasser leicht löslich (Löslichkeit <0,02 g/100 ml, 25 °C), in starken Basen (wie etwa 1 M NaOH) löslich und bildet Na_2WO_4 mit einer Auflösungsrate von etwa 0,1 g/min; es ist in konzentrierter Säure (wie etwa 98 % H_2SO_4) teilweise löslich und bildet Wolframat-Derivate, und das Reaktionsgleichgewicht dauert mehrere Stunden.

Elektrische Eigenschaften von Nano-Gelbwolframoxid (YTO, WO_3)

Als n-Typ-Halbleiter beträgt die Elektronenkonzentration etwa 10^{16} -10^{18} cm^{-3} , die Leitfähigkeit ist gering (10^{-6} -10^{-5} S/cm) und wird stark von Temperatur und Defekten beeinflusst. Beispielsweise kann die Leitfähigkeit bei 300 °C aufgrund der Zunahme thermisch angeregter Ladungsträger auf 10^{-4} S/cm ansteigen.

Nanoskalige Eigenschaften

von gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3) Nanoskaliges gelbes WO_3 (Partikelgröße 20-100 nm) weist

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

aufgrund von Quanteneffekten und Oberflächeneffekten erhebliche Vorteile auf:

Spezifische Oberfläche von nano-gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Die Oberfläche kann 20–30 m^2/g erreichen (im Mikronbereich nur 5–10 m^2/g), was durch den BET-Stickstoffadsorptionstest (Brunauer -Emmett-Teller) bestätigt wird. Die hohe spezifische Oberfläche vergrößert die Anzahl der oberflächenaktiven Stellen. Beispielsweise erhöht sich bei der photokatalytischen Reaktion die Fähigkeit zur Adsorption von Farbstoffmolekülen um das 3- bis 5- fache, und die Adsorptionsisotherme entspricht dem Langmuir-Modell.

Bandlückenvariation von nanogelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Die Verringerung der Partikelgröße führt zu einer leichten Vergrößerung der Bandlücke. Beispielsweise kann die Bandlücke von 20 nm WO_3 2,85 eV erreichen, die Lichtabsorptionskante verschiebt sich ins Blaue zu 435 nm, und die Farbe kann etwas heller sein, was auf den Quantenbeschränkungseffekt zurückzuführen ist . Theoretische Berechnungen zeigen, dass die Bandlückenzunahme umgekehrt proportional zur Partikelgröße (d) ist, $\Delta Eg \propto 1/ d^2$.

Photokatalytische Aktivität von nano-gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Beim Abbau von Methylenblau (MB) kann die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante (k) von Nano-WO_3 0,05 min^{-1} erreichen und liegt damit weit über den 0,01 min^{-1} der Mikron- Ebene, was auf die höhere Elektronen-Loch-Trennungseffizienz zurückzuführen ist (Trennungsrate auf 80 % erhöht). Fotostromtests zeigen, dass die Fotostromdichte von Nano-WO_3 0,5 mA/cm^2 erreicht , was dem Doppelten der Mikron- Ebene entspricht.

Morphologischer Einfluss von nano-gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Die Nanopartikel weisen eine einheitliche Morphologie auf, und die spezifische Oberfläche von stab- oder flockenförmigem Nano-WO_3 kann weiter auf 35 m^2/g erhöht werden, was die Oberflächenreaktivität verbessert. Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigt beispielsweise, dass das Längenverhältnis von stabförmigem WO_3 5:1 beträgt und die Oberflächenrauheit die katalytischen Zentren erhöht.

Anwendung von Nano-Gelbwolframoxid (YTO, WO_3)

Photokatalysator aus gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Gelbes WO_3 eignet sich gut für die Wasserzersetzung zur Wasserstoffproduktion und den Abbau organischer Schadstoffe. Eine Studie aus dem Jahr 2016 zeigte beispielsweise, dass 50 nm gelbes WO_3 unter sichtbarem Licht ($\lambda > 420$ nm) Wasserstoff mit einer Rate von 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ produzierte , bei einer Quanteneffizienz von etwa 5 %. Beim Abbau von Rhodamin B erreichte die Entfernungsrate innerhalb von 90 Minuten 95 %.

Nano-gelbes Wolframoxid (YTO, WO_3) Elektrochromes Material

In intelligenten Fenstern erreichen Nano-WO_3-Filme durch Li^+-Einbettung einen Übergang von transparent zu tiefblau , mit einem optischen Modulationsbereich von bis zu 70 % (die Transmission

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

sinkt von 80 % auf 10 %), einer Reaktionszeit von etwa 5 Sekunden und einer Zyklenstabilität von 10^4 -mal.

Nano-Gelb-Wolframoxid- Pigment (YTO , WO_3) .

Es wird als gelbes Pigment in der Industrie verwendet. Es weist eine hohe Wetterbeständigkeit (UV-Alterungsbeständigkeit >1000 h) und Hitzebeständigkeit (>1000 °C) auf. Es wird häufig in Keramik, Beschichtungen und Kunststoffen verwendet. Der Farbwert (L *a* b*) ist L*=85, a*=10, b*=50.

Gassensor aus gelbem Wolframoxid (YTO, WO_3)

Nano-WO_3 zu NO_2 kann 10 ppb erreichen, die Reaktionszeit beträgt <10 Sekunden und die Erholungszeit etwa 20 Sekunden. Es eignet sich für die Umweltüberwachung und die industrielle Emissionskontrolle.

Blaues Wolframoxid (BTO)

Herkunft und Aufbau von blauem Wolframoxid (Blue Tungsten Oxide, BTO)

Die chemische Zusammensetzung von blauem Wolframoxid ist üblicherweise $WO_{2.9}$ oder WO_{3-x} ($0 < x < 0,1$), wobei es sich um ein teilweise reduziertes WO_3 handelt . Seine **blaue** Farbe entsteht durch das Vorhandensein von Sauerstoffleerstellen, die zu einem Anstieg des Anteils niedervalenter Wolframionen (W^{5+}) und defekten Energieniveaus in der elektronischen Struktur führen, sowie zu einer Verschiebung des Absorptionsspektrums in den Infrarotbereich (600-700 nm). Die Kristallstruktur ist überwiegend monoklin, aber Sauerstoffleerstellen verursachen lokale Verzerrungen, und laut XRD ändert sich die Gitterkonstante leicht (beispielsweise verkürzt sich die c-Achse um etwa 0,02 Å, c=7,670 Å) . Eine XPS-Analyse (Röntgen-Photoelektronenspektroskopie) zeigt, dass das Verhältnis W^{5+}/W^{6+} etwa 0,05 bis 0,1 beträgt und die Sauerstoffleerstellenkonzentration etwa 10^{19} cm^{-3} beträgt. Unter bestimmten Bedingungen (wie etwa einer Hochtemperaturreduktion) kann eine kleine Menge einer orthorhombischen Phase gleichzeitig vorhanden sein und der charakteristische Peak (wie etwa 680 cm^{-1}) ist im Raman-Spektrum deutlicher erkennbar, was die Farbtiefe weiter beeinflusst.

Herstellungsverfahren

für blaues Wolframoxid (blaues Wolfram, Blue Tungsten Oxide, BTO) Die Herstellung von blauem WO_3 erfolgt hauptsächlich durch eine Reduktionsreaktion:

Herstellungsverfahren für blaues Wolframoxid (blaues Wolfram, Blue Tungsten Oxide, BTO) - Hochtemperatur-Reduktionsverfahren

Gelbes WO_3 entsteht bei 800 °C in einer 5 %igen H_2/ Ar -Atmosphäre für 2–4 Stunden. Die Reaktion ist $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$. Der Reduktionsgrad wird durch Temperatur und H_2-Konzentration gesteuert . Bei 700 °C entsteht hellblaues $WO_{2.95}$, bei 900 °C kann dunkelblaues $WO_{2.9}$ entstehen , und zu hohe Temperaturen (z. B. > 1000 ° C) führen zu WO_2 . Der H_2-Anteil in der Atmosphäre muss genau kontrolliert werden (5–10 %), um eine Überreduktion zu vermeiden.

Herstellungsverfahren für blaues Wolframoxid (blaues Wolfram, Blue Tungsten Oxide, BTO) – nasschemisches Reduktionsverfahren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nanoskaliges blaues WO_3 kann durch Behandlung einer Wolframatlösung mit $NaBH_4$ oder Zn/HCl bei 60–80 °C für 1–2 Stunden erzeugt werden. Beispielsweise wurden in einer Studie aus dem Jahr 2018 10 nm große $WO_{2.9}$-Nanopartikel durch Reduktion mit $NaBH_4$ (Konzentration 0,1 M, pH = 2, 70 °C, 2 h) mit einer Ausbeute von 85 % hergestellt.

Herstellungsverfahren für blaues Wolframoxid (blaues Wolfram, Blue Tungsten Oxide, BTO) - Plasmabehandlung

Die WO_3-Oberfläche mit Argon /H_2-Plasma (Leistung 100–200 W) erzeugt innerhalb von 10–20 Minuten schnell eine dünne Schicht aus blauem WO_3 , die sich für Dünnschichtanwendungen eignet. Eine zu lange Beschusszeit (> 30 min) kann zu Oberflächenamorphose führen.

Von diesen Methoden eignet sich die nasschemische Methode besser für die Herstellung im Nanomaßstab und die Kontrolle der Partikelgrößenverteilung (10–50 nm); die Hochtemperaturmethode wird für die industrielle Produktion mit einer Jahresproduktion von Hunderten von Tonnen eingesetzt.

Physikalische und chemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid (BTO)

Optische Eigenschaften von blauem Wolframoxid (BTO)

Die Bandlücke verringert sich auf 2,4–2,6 eV, der Absorptionspeak verschiebt sich auf 650 nm und zeigt eine blaue Farbe. Die Reflektivität nimmt im Infrarotbereich ab (<20 %). Das UV-Vis-Spektrum zeigt eine Rotverschiebung der Absorptionskante auf 500–550 nm und eine optische Dichte von 1,2–1,5.

Dichte von blauem Wolframoxid (BTO)

Sie beträgt etwa 7,0–7,1 g/cm³ und ist damit etwas niedriger als bei gelbem WO_3 , da Sauerstoffleerstellen die Volumeneinheitsmasse verringern. Durch Berechnungen mit der Dichtefunktionaltheorie (DFT) verringert sich die Dichte pro 1 % Anstieg des Sauerstoffleerstellenverhältnisses um etwa 0,05 g/cm³ .

Leitfähigkeit von blauem Wolframoxid (BTO)

Sauerstoffleerstellen wirken als Elektronendonatoren und erhöhen die Trägerkonzentration (10^{18} -10^{19} cm^{-3}) , wodurch die Leitfähigkeit auf 10^{-4} -10^{-3} S/cm steigt und damit 1–2 Größenordnungen höher ist als bei gelbem WO_3 . Mit der Vier-Sonden-Methode kann die Leitfähigkeit bei 300 °C 10^{-2} S/cm erreichen.

Thermische Stabilität: Nicht so stabil wie gelbes WO_3 . Es kann bei 400–500 °C in Luft zu gelbem WO_3 oxidiert werden. Die Reaktion lautet $WO_{2.9} + 0{,}05O_2 \rightarrow WO_3$. TGA zeigt eine Massenzunahme von ca. 0,5 %.

Blaues Wolframoxid Chemische Eigenschaften von BTO

Es oxidiert leichter und hat eine höhere Oberflächenaktivität. In feuchter Umgebung (relative Luftfeuchtigkeit > 80 %) kann es Wasser adsorbieren und $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$ bilden, mit einer Adsorptionskapazität von etwa 0,1 g/g.

Nanoskalige Eigenschaften

von blauem Wolframoxid (Blue Tungsten Oxide, BTO) Nanoskaliges blaues WO_3 (Partikelgröße 10-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

50 nm) weist aufgrund erhöhter Defekte deutliche Vorteile auf:

Spezifische Oberfläche

Defekte Stellen erhöhen die Adsorptionskapazität auf bis zu 30–40 m^2/g, beispielsweise erhöht sich die Adsorption von H_2 um das Zweifache (die Langmuir- Adsorptionskapazität erreicht 10 cm^3/g).

Photokatalytische Aktivität

Bei der photokatalytischen Sauerstoffproduktion erreicht die Quanteneffizienz 15 % (bei gelbem WO_3 10 %), da Sauerstoffleerstellen den Elektronentransfer fördern. Die Photostromdichte erreicht 0,8 mA/cm^2 und ist damit 1,6-mal so hoch wie bei gelbem WO_3 .

Elektrische Eigenschaften

von blauem WO_3 in Nanodrahtform (20 nm Durchmesser und 200 nm Länge) kann 10^{-2} S/cm erreichen, was für elektrochemische Geräte geeignet ist. Der spezifische Widerstand nimmt mit steigender Temperatur exponentiell ab ($E_a \approx 0{,}2$ eV).

Reaktionsgeschwindigkeit

Bei der Elektrochromie verkürzt sich die Farbänderungszeit von 10 nm blauem WO_3 auf 2 Sekunden, was auf eine schnellere Ionendiffusion zurückzuführen ist (Diffusionskoeffizient $D = 10^{-8}$ cm^2/s gegenüber 10^{-9} cm^2/s für gelbes WO_3) .

Anwendung von blauem Wolframoxid (BTO)

Wolframpulverherstellung

Blaues WO_3 ist ein wichtiges Zwischenprodukt bei der Herstellung von metallischem Wolfram. Es wird mit H_2 (900 °C, 10 % H_2) reduziert , um Wolframpulver mit einer Reinheit von 99,95 % zu erzeugen. Es wird häufig in Hartmetallen und Hochtemperaturlegierungen verwendet.

Elektrochemische Sensoren

Aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit eignet es sich zur Erkennung von H_2 und CO. Mit einer Empfindlichkeit von bis zu 50 ppb und einer Reaktionszeit von <5 Sekunden ist es für die Überwachung brennbarer Gase geeignet.

Materialien zur Energiespeicherung

In Superkondensatoren kann die spezifische Kapazität von nanoblauem WO_3 300 F/g erreichen, die Zyklenstabilität kann 5000-mal erreicht werden und die Energiedichte beträgt etwa 50 Wh /kg.

Photothermische Umwandlung

Seine Infrarotabsorptionseigenschaften machen es zu einem Potenzial für die Nutzung der Solarthermie. Beispielsweise kann die Effizienz photothermischer Filme 80 % erreichen und die Oberflächentemperatur steigt im Sonnenlicht auf 70 °C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Violettes Wolframoxid (VTO)

Herkunft und Struktur von violettem Wolframoxid (VTO)

Die chemische Zusammensetzung von violettem Wolframoxid (VTO) ist üblicherweise $WO_{2.72}$ oder WO_{3-x} ($x \approx 0{,}28$). Es ist ein Wolframtrioxid (WO_3) , das stärker reduziert ist als blaues Wolframoxid ($WO_{2.9}$) . Seine purpurne (oder violette) Farbe rührt von einer höheren Konzentration von Sauerstoffleerstellen her, was zu einem deutlichen Anstieg des Anteils niedervalenter Wolframionen (W^{5+} und eine kleine Menge W^{4+}) führt . Die durch die Sauerstoffleerstellen eingeführten Defektenergieniveaus verändern die elektronische Struktur, wodurch das Absorptionsspektrum in Richtung Infrarotbereich (700-800 nm) verschoben wird und dunkelpurpurn bis fast schwarz erscheint. Die Kristallstruktur ist überwiegend monoklin (Raumgruppe $P2_1/n$), die hohe Konzentration an Sauerstoffleerstellen (etwa 10^{20} cm^{-3}) führt jedoch zu einer Gitterverzerrung. Die XRD-Analyse zeigt, dass sich die Gitterkonstante erheblich ändert (beispielsweise verkürzt sich die c-Achse um etwa 0,05 Å, $c \approx 7{,}642$ Å) . Die XPS-Ergebnisse (Röntgen-Photoelektronenspektroskopie) zeigen, dass das W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis 0,2–0,3 und das W^{4+}/W^{6+}-Verhältnis etwa 0,05–0,1 beträgt, was auf stark reduzierende Eigenschaften hinweist. Unter stark reduzierenden Bedingungen oder bei hohen Temperaturen kann eine kleine Menge der kubischen Phase ($WO_{2.72}$- Eigenschaften) eingemischt werden, und die Intensität der charakteristischen Peaks im Raman-Spektrum (wie etwa 720 cm^{-1} und 950 cm^{-1}) wird erhöht, was mit der Änderung der Purpurtiefe zusammenhängt.

Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid (VTO)

Die Herstellung von violettem VTO erfolgt hauptsächlich durch die Kontrolle der Reduktionsreaktion. Im Folgenden sind drei gängige Methoden aufgeführt:

Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid (VTO) – Hochtemperatur-Reduktionsverfahren

Gelbes WO_3 wird bei 900-1000°C in 10%-15% H_2 / Ar- Atmosphäre für 1-3 Stunden kalziniert, und die Reaktion ist $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ ($x \approx 0{,}28$). Der Reduktionsgrad wird durch Temperatur und H_2- Konzentration bestimmt: Bei 900 °C entsteht hellviolettes $WO_{2.75}$, bei 1000 °C dunkelviolettes $WO_{2.72}$. Überschreitet die Temperatur 1050 ° C, kann es zu einer Überreduzierung zu WO_2 bzw. metallischem Wolfram kommen. Der H_2-Anteil muss präzise kontrolliert werden (10–15 %), um die Bildung von Verunreinigungen zu vermeiden. Dieses Verfahren eignet sich für die industrielle Produktion mit einer Jahresproduktion von mehreren hundert Tonnen.

Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid (VTO) – Nasschemisches Reduktionsverfahren

Mit einem starken Reduktionsmittel (wie Natriumdithionit $Na_2S_2O_4$ oder Zn/HCl) reagieren lassen und bei 50–70 °C 2–4 Stunden lang reagieren lassen, um nanometergroßes violettes VTO zu erzeugen. Beispielsweise wurden in einer Studie $WO_{2.72}$ - Nanopartikel mit einer Partikelgröße von 15–30 nm durch Reduktion von $Na_2S_2O_4$ (Konzentration 0,2 M, pH = 1,5, 60 °C, 3 Stunden) mit einer Ausbeute von ca. 80 % hergestellt. Diese Methode zeichnet sich durch eine niedrige Betriebstemperatur und kontrollierbare Partikelgröße aus, allerdings ist eine Spülung zur Entfernung von Nebenprodukten erforderlich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid (VTO) – Plasmabehandlung

Argon /H_2-Plasma (Leistung 200–300 W) wird verwendet, um die Oberfläche von WO_3-Pulver oder -Film 15–25 Minuten lang zu beschießen und so schnell eine violette VTO-Dünnschicht zu erzeugen. Beschusszeit und -leistung müssen optimiert werden. Zu lange (> 30 min) oder zu starke (> 400 W) Bestrahlung kann zu Amorphisierung oder übermäßiger Reduktion zu WO_2 führen . Diese Methode eignet sich zur Herstellung dünner Filme und wird in der Elektrochromie oder in Sensoren eingesetzt.

Methodenvergleich

Nasschemische Methoden eignen sich für die Herstellung im Nanomaßstab mit einer engen Partikelgrößenverteilung (15–50 nm); Hochtemperaturreduktionsmethoden sind für den industriellen Maßstab mit hoher Ausbeute und geringen Kosten geeignet; die Plasmabehandlung dient der Oberflächenmodifizierung und schnellen Reaktion.

Physikalische und chemische Eigenschaften von violettem Wolframoxid (VTO)

Optische Eigenschaften von violettem Wolframoxid (VTO)

Die Bandlücke von violettem VTO verringert sich auf 2,2–2,5 eV (gelbes WO_3 2,6–2,8 eV, blaues WO_3 2,4–2,6 eV), der Absorptionspeak verschiebt sich auf 700–750 nm und zeigt eine tiefviolette Farbe. Die Reflektivität ist im Infrarotbereich extrem gering (<15 %). Das UV-Vis-Spektrum zeigt eine Rotverschiebung der Absorptionskante auf 550–600 nm und eine optische Dichte von 1,5–1,8, was auf eine starke Infrarotabsorption hindeutet. Diese optische Eigenschaft ist auf das mittlere Energieniveau zurückzuführen, das durch die hohe Konzentration an Sauerstoffleerstellen entsteht.

Dichte von violettem Wolframoxid (VTO)

Die Dichte beträgt etwa 6,9–7,0 g/cm³ und ist damit niedriger als bei gelbem WO_3 (7,16 g/cm³) und blauem WO_3 (7,0–7,1 g/cm³) , da der Sauerstoffleerstellenanteil höher (etwa 9–10 %) und die Volumeneinheitsmasse geringer ist. Berechnungen mit der Dichtefunktionaltheorie (DFT) zeigen, dass die Dichte pro 1 % Anstieg der Sauerstoffleerstellen um etwa 0,06 g/cm³ abnimmt .

Elektrische Leitfähigkeit von violettem Wolframoxid (VTO)

Eine hohe Konzentration von Sauerstoffleerstellen wirkt als Elektronendonatoren und erhöht die Trägerkonzentration auf 10^{19}-10^{20} cm^{-3} und die Leitfähigkeit auf 10^{-3}-10^{-2} S/cm . Dies ist 2–3 Größenordnungen höher als bei gelbem WO_3 (10^{-5} S/cm) und 1 Größenordnung höher als bei blauem WO_3 (10^{-4}-10^{-3} S/cm). Mit der Vier-Sonden-Methode kann die Leitfähigkeit bei 400 °C 0,1 S/cm erreichen, was auf hervorragende Halbleitereigenschaften hinweist.

Thermische Stabilität von violettem Wolframoxid (VTO)

$_3$ bei 300–400 °C in Luft. Die Reaktion ist WO_2 . $_{72}$ + 0,14O_2 → WO_3 . Die TGA-Analyse zeigt eine Massenzunahme von ca. 1,2–1,5 %. Unter 200 °C ist es relativ stabil, verliert aber bei längerer Einwirkung hoher Temperaturen (> 500 °C) seine violette Farbe vollständig.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chemische Eigenschaften von violettem Wolframoxid (VTO)

Der starke Reduktionszustand von violettem VTO macht es chemisch aktiver als gelbes und blaues WO_3 und es oxidiert leicht. In einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit (relative Luftfeuchtigkeit > 80 %) adsorbiert Wasser an der Oberfläche und erzeugt $WO_3 \cdot H_2O$ oder $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$ mit einer Adsorptionsmenge von etwa 0,15 g/g. Unter sauren Bedingungen (z. B. pH < 2) löst es sich langsam auf und setzt W^{6+}-Ionen frei.

Nanoskalige Eigenschaften von violettem Wolframoxid (VTO)

Lilafarbenes VTO in Nanogröße (Partikelgröße 15–50 nm) weist aufgrund seiner höheren Defektkonzentration erhebliche Vorteile auf:

Die spezifische Oberfläche

kann 40–60 m^2/g erreichen und ist damit höher als bei gelbem WO_3 (10–20 m^2/g) und blauem WO_3 (30–40 m^2/g). Defektstellen erhöhen die Adsorptionskapazität, und die Langmuir-Adsorptionskapazität von H_2 erreicht 15 cm^3/g, also das Dreifache der von gelbem WO_3 .

Photokatalytische Aktivität

Bei der photokatalytischen Zersetzung von Wasser zur Erzeugung von Sauerstoff erreicht die Quanteneffizienz 18 % (10 % für gelbes WO_3 und 15 % für blaues WO_3) , da Sauerstoffleerstellen die Trennung der photogenerierten Elektronen und Löcher fördern. Die Photostromdichte erreicht 1,0 mA/cm^2 und ist damit höher als die 0,8 mA/cm^2 für blaues WO_3 .

Elektrische Eigenschaften: Die Leitfähigkeit von violettem VTO in Nanodrahtform (15–25 nm Durchmesser und 150–300 nm Länge) kann 0,1 S/cm erreichen, was für hochempfindliche Sensoren geeignet ist. Der spezifische Widerstand nimmt mit steigender Temperatur exponentiell ab, und die Aktivierungsenergie Ea beträgt ≈ 0,18 eV.

Reaktionsgeschwindigkeit

Bei elektrochromen Anwendungen wird die Farbänderungszeit von 20 nm violettem VTO auf 1,5 Sekunden verkürzt (gelbes WO_3 5 Sekunden, blaues WO_3 2 Sekunden) und der Ionendiffusionskoeffizient auf 10^{-7} cm^2/s erhöht, weil der Defektkanal die Übertragung von Li^+ oder H^+ beschleunigt.

Anwendung von violettem Wolframoxid (VTO)

Wolframpulverherstellung

Violettes Wolfram-Toluol (VTO) ist ein wichtiges Zwischenprodukt für die Herstellung von hochreinem Wolframpulver. Durch H_2-Reduktion (950 °C, 15 % H_2 / Ar , 2 h) entsteht Wolframpulver mit einer Partikelgröße von 50–100 nm und einer Reinheit von 99,98 %. Es findet breite Anwendung in Hartmetall, Wolframdraht und Hochtemperaturlegierungen. Im Vergleich zu gelbem WO_3 ist die Reduktionsrate

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

schneller und die Effizienz um etwa 20 % erhöht.

Elektrochemische Sensoren

Dank seiner hohen Leitfähigkeit und Defektaktivität eignet sich violettes VTO gut für Gassensoren. Beispielsweise liegt die Empfindlichkeit für die Erkennung von H_2S bei bis zu 30 ppb, die Reaktionszeit beträgt <3 Sekunden und die Selektivität ist besser als die von blauem WO_3 , sodass es sich für die industrielle Sicherheitsüberwachung eignet.

Materialien zur Energiespeicherung

In Superkondensatoren kann die spezifische Kapazität von nanoviolettem VTO 350–400 F/g erreichen (blaues WO_3 300 F/g), die Zyklenstabilität kann bis zu 6000 Mal erreicht werden und die Energiedichte beträgt etwa 60 Wh /kg. Die hohe Trägerkonzentration und die schnelle Ionendiffusion sind wesentliche Vorteile.

Photothermische Umwandlung

Die starke Infrarotabsorption von violettem VTO (700–1000 nm, Reflexionsgrad <10 %) macht es zu einem vielversprechenden Kandidaten für die photothermische Umwandlung. Beispielsweise hat ein mit violetten VTO-Nanopartikeln beschichteter photothermischer Film unter Sonnenlicht einen Wirkungsgrad von 85 %, und die Oberflächentemperatur kann bis zu 80 °C ansteigen, was ihn für Solarkollektoren geeignet macht.

Orangefarbenes Wolframoxid (Orange Tungsten Oxide, OTO)

Herkunft und Struktur von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Orangefarbenes Wolframoxid (OTO) hat üblicherweise die chemische Zusammensetzung $WO_{2.90}$ oder WO_{3-x} ($x \approx 0{,}1$). Es ist ein leicht reduziertes Wolframtrioxid (WO_3) zwischen gelbem WO_3 (WO_3) und blauem WO_3 ($WO_{2.9}$) . Seine orange Farbe rührt von moderaten Sauerstoffleerstellen her, die den Anteil niedervalenter Wolframionen (W^{5+}) leicht erhöhen , einige Defektenergieniveaus in die elektronische Struktur einführen und das Absorptionsspektrum in den sichtbaren Lichtbereich (550–600 nm) verschieben. Die Kristallstruktur ist überwiegend monoklin (Raumgruppe $P2_1/n$), die Sauerstoffleerstellenkonzentration ist niedrig (etwa 10^{18} -10^{19} cm^{-3}) , die Gitterverzerrung ist gering und laut XRD ändert sich die Gitterkonstante leicht (beispielsweise verkürzt sich die c-Achse um etwa 0,01 Å, $c \approx 7{,}685$ Å) . Die XPS-Analyse zeigt, dass das W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis etwa 0,02-0,05 beträgt, was viel niedriger ist als bei blauen und violetten Wolframoxiden, und W^{4+} ist fast nicht vorhanden. Unter milden reduzierenden Bedingungen (wie etwa 600–700 °C) kann eine kleine Menge orthorhombischer Phase eingemischt werden und die Intensität der charakteristischen Peaks im Raman-Spektrum (wie etwa 710 cm^{-1}) nimmt leicht zu, was mit den Hell-Dunkel-Änderungen von Orange zusammenhängt.

Herstellungsverfahren für orangefarbenes Wolframoxid (Orange Tungsten Oxide, OTO)

Die Herstellung von Orange-OTO erfolgt durch eine milde Reduktionsreaktion. Im Folgenden sind drei gängige Methoden aufgeführt:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Herstellungsverfahren für orangefarbenes Wolframoxid (Orange Tungsten Oxide, OTO) - Hochtemperatur-Reduktionsverfahren

Gelbes WO_3 wird bei 600–700 °C in einer 2–5 %igen H_2/ Ar -Atmosphäre 2–3 Stunden lang kalziniert. Die Reaktion ist $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$. ($x \approx 0,1$). Der Reduktionsgrad wird durch Temperatur und H_2- Konzentration gesteuert: Bei 600 °C entsteht helloranges $WO_{2.92}$, bei 700 °C oranges $WO_{2.90}$. Über 800 °C kann es zu einer weiteren Reduktion zu blauem $WO_{2.9}$ kommen. Der H_2-Anteil muss niedrig (2–5 %) gehalten werden, um eine Überreduktion zu vermeiden. Dieses Verfahren eignet sich für die industrielle Produktion, die Jahresproduktion kann mehrere zehn Tonnen erreichen.

Herstellungsverfahren für orangefarbenes Wolframoxid (Orange Tungsten Oxide, OTO) – Nasschemisches Reduktionsverfahren

Mit einem schwachen Reduktionsmittel (wie Natriumborhydrid $NaBH_4$ oder Ascorbinsäure) und einer Reaktion bei 40–60 °C für 1–3 Stunden entsteht orangefarbenes OTO im Nanomaßstab. Beispielsweise wurden in einer Studie $WO_{2.90}$-Nanopartikel mit einer Partikelgröße von 20–40 nm durch milde Reduktion mit $NaBH_4$ (Konzentration 0,05 M, pH = 3, 50 °C, 2 Stunden) mit einer Ausbeute von ca. 90 % hergestellt . Diese Methode ist einfach anzuwenden und eignet sich für die präzise Herstellung im kleinen Maßstab .

Herstellungsverfahren für orangefarbenes Wolframoxid (OTO) – Plasmabehandlung

mit schwachem Argon /H_2-Plasma (50–100 W) beschossen, um schnell eine orangefarbene OTO-Dünnschicht zu erzeugen. Die Beschusszeit muss streng kontrolliert werden. Ist sie zu lang (> 20 min), kann blaues WO_3 entstehen. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung dünner Schichten für optische oder elektrische Anwendungen.

Vergleich der Methoden:

Die nasschemische Methode eignet sich für die Herstellung im Nanomaßstab mit gleichmäßiger Partikelgrößenverteilung (20–50 nm); die Hochtemperaturreduktionsmethode eignet sich für den industriellen Maßstab, mit geringen Kosten und hoher Ausbeute; die Plasmabehandlung dient der Oberflächenmodifizierung und weist eine schnelle Reaktionsgeschwindigkeit auf.

Physikalische und chemische Eigenschaften von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Optische Eigenschaften von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Die Bandlücke von orangefarbenem OTO beträgt 2,5–2,7 eV (zwischen 2,6–2,8 eV von gelbem WO_3 und 2,4–2,6 eV von blauem WO_3) , der Absorptionspeak liegt bei 550–600 nm und weist eine leuchtend orange Farbe auf. Die Reflektivität ist im Infrarotbereich hoch (ca. 30–40 %). Das UV-Vis-Spektrum zeigt, dass sich die Absorptionskante zu 480–520 nm verschiebt. Die optische Dichte beträgt 1,0–1,3, was auf ein moderates Absorptionsvermögen im sichtbaren Lichtbereich hinweist.

Dichte von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Die Dichte beträgt etwa 7,1–7,15 g/cm³ und ist damit aufgrund des geringen Anteils an

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Sauerstoffleerstellen (etwa 3–5 %) etwas niedriger als bei gelbem WO_3 (7,16 g/ cm^3) und höher als bei blauem WO_3 (7,0–7,1 g/cm^3) . Berechnungen mit der Dichtefunktionaltheorie (DFT) zeigen, dass die Dichte pro 1 % Zunahme der Sauerstoffleerstellen um etwa 0,03 g/cm^3 abnimmt .

Elektrische Leitfähigkeit von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Sauerstoffleerstellen wirken als Elektronendonatoren und erhöhen die Trägerkonzentration auf 10^{17} -10^{18} cm^{-3} und die Leitfähigkeit auf 10^{-5} -10^{-4} S/cm, was etwas höher ist als bei gelbem WO_3 (10^{-5} S/cm), aber niedriger als bei blauem WO_3 (10^{-4} -10^{-3} S/cm). Mit der Vier-Sonden- Methode kann die Leitfähigkeit bei 300 °C 10^{-3} S/cm erreichen, was auf milde Halbleitereigenschaften hindeutet.

Oranges Wolframoxid (OTO)

von blauem und violettem WO_3 . Es beginnt bei 500–600 °C in Luft zu gelbem WO_3 zu oxidieren . Die Reaktion ist $WO_{2.90} + 0{,}05O_2 \rightarrow WO_3$. Die TGA-Analyse zeigt eine Massenzunahme von etwa 0,3–0,5 %. Es ist unter 400 °C gut stabil und eignet sich für Anwendungen bei mittleren Temperaturen.

Chemische Eigenschaften von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Orangefarbenes OTO weist eine moderate chemische Aktivität auf und ist leichter oxidierbar als gelbes WO_3 , jedoch weniger oxidierbar als blaues und violettes WO_3 . In feuchter Umgebung (relative Luftfeuchtigkeit > 80 %) adsorbiert die Oberfläche Wasser und erzeugt $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$ mit einer Adsorptionsmenge von etwa 0,05–0,08 g/g. Es weist eine geringe Löslichkeit unter sauren Bedingungen (pH < 3) und eine hohe chemische Stabilität auf.

Nanoskalige Eigenschaften von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Orangefarbenes OTO im Nanomaßstab (Partikelgröße 20–50 nm) weist moderate Defekte auf und zeigt die folgenden Eigenschaften:

Die spezifische Oberfläche

kann 20–30 m^2/g erreichen und ist damit höher als bei gelbem WO_3 (10–20 m^2/g) und niedriger als bei blauem WO_3 (30–40 m^2/g). Die Langmuir-Adsorptionskapazität von H_2 beträgt etwa 5–8 cm^3/ g und ist damit etwas höher als bei gelbem WO_3 .

Photokatalytische Aktivität

Bei der photokatalytischen Sauerstoffproduktion erreicht die Quanteneffizienz 12 % (gelbes WO_3 beträgt 10 %, blaues WO_3 beträgt 15 %) und die Photostromdichte beträgt 0,6 mA/cm^2 , was zwischen dem gelben und blauen WO_3 liegt .

Elektrische Eigenschaften: Orange OTO in Nanodrahtform (20–30 nm Durchmesser, 100–200 nm Länge) hat eine Leitfähigkeit von bis zu 10^{-3} S/cm und eignet sich daher für Sensoren mit geringem Stromverbrauch. Der spezifische Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab, und die Aktivierungsenergie Ea beträgt ≈ 0,25 eV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Reaktionsgeschwindigkeit

: Bei elektrochromen Anwendungen beträgt die Farbänderungszeit von 30 nm orangefarbenem OTO 3 Sekunden (5 Sekunden für gelbes WO_3 und 2 Sekunden für blaues WO_3) , und der Ionendiffusionskoeffizient beträgt 10^{-9} cm^2/s, was etwas höher ist als der von gelbem WO_3 .

Anwendungen von orangefarbenem Wolframoxid (OTO)

Wolframpulverherstellung

Orange OTO kann als Zwischenprodukt zur Herstellung von Wolframmetallpulver verwendet werden. Durch H_2-Reduktion (850 °C, 5 % H_2 / Ar , 3 h) entsteht Wolframpulver mit einer Partikelgröße von 100–200 nm und einer Reinheit von 99,9 %, das sich für Hartmetall und elektronische Materialien eignet. Seine milden Reduktionseigenschaften erleichtern die Prozesskontrolle.

Elektrochemische Sensoren

Die mäßige Leitfähigkeit des orangefarbenen OTO eignet sich zum Erkennen von Gasen mit geringer Konzentration (wie NH_3) mit einer Empfindlichkeit von 100 ppb und einer Reaktionszeit von etwa 5-8 Sekunden und ist daher für die Umweltüberwachung geeignet.

Materialien zur Energiespeicherung

In Superkondensatoren beträgt die spezifische Kapazität von nano-orangefarbenem OTO etwa 250–300 F/g (weniger als 300 F/g von blauem WO_3) , die Zyklenstabilität beträgt bis zu 4000-mal und die Energiedichte liegt bei etwa 40 Wh /kg, was für kostengünstige Energiespeichergeräte geeignet ist.

Optische Materialien

Die Absorptionseigenschaften von orangefarbenem OTO im sichtbaren Bereich (550–600 nm) machen es für optische Filter oder dekorative Beschichtungen nützlich, und seine moderate Reflektivität (30–40 %) bietet Potenzial für den Einsatz in den Bereichen Beleuchtung und Display.

Schwarzes Wolframoxid – Herkunft und Struktur

Schwarzes Wolframoxid ist üblicherweise stark defektes WO_3 oder dessen Hydrat (wie $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$, $WO_3 \cdot H_2O$). Seine dunkle Farbe kommt von der starken Vollspektrumabsorption (400-1000 nm). Die Ursachen sind unter anderem eine große Zahl von Sauerstoffleerstellen (Konzentration 10^{20} cm^{-3}) , das Vorhandensein von W^{5+}/W^{4+}-Ionen (das W^{4+}-Verhältnis kann 5–10 % erreichen) und Gitterverzerrung. In der Hydratform sind Wassermoleküle in die Lücken zwischen den WO_6-Oktaedern eingebettet und bilden eine Schichtstruktur mit einem Schichtabstand von ca. 3,84 Å, wodurch die elektronischen Energieniveaus weiter verändert werden. Die XRD-Analyse zeigt, dass schwarzes WO_3 überwiegend eine orthorhombische Phase (a = 5,27 Å, b = 5,36 Å, c = 3,84 Å) oder amorph ist. Die charakteristischen Peaks (z. B. 23,5° und 33,8°) weisen eine geringe Intensität auf. XPS zeigt, dass die Bindungsenergie von W^{4+} (34,5 eV) niedriger ist als die von W^{6+} (35,8 eV), und der Defektzustand ist signifikant. Raman-Spektren zeigen breite Peaks (600–900 cm^{-1}) , die auf Gitterunordnung hinweisen.

Zubereitungsmethoden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Es gibt verschiedene Methoden zur Herstellung von schwarzem WO_3 , wobei niedrige Temperaturen oder stark reduzierende Bedingungen im Vordergrund stehen:

Niedertemperatur-Hydrothermalmethode

Natriumwolframat wurde 24 Stunden lang bei 180 °C mit HCl in einem Autoklaven umgesetzt. Unter Zugabe eines Reduktionsmittels (z. B. Harnstoff, Konzentration 0,5 M) entstanden $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoschichten. Eine Studie aus dem Jahr 2015 nutzte diese Methode beispielsweise zur Synthese von 5 nm dicken schwarzen WO_3-Nanoschichten mit einer Ausbeute von 90 %. Die Reaktionsbedingungen (z. B. pH = 1, Harnstoff/W-Verhältnis = 2:1) beeinflussen die Defektdichte maßgeblich.

Starke Reduktionsmethode: Gelbes WO_3 wird mit Zn/HCl (Zn-Konzentration 1 M, HCl 6 M) oder HI (Konzentration 57 %) behandelt und 2–4 Stunden bei 60 °C umgesetzt, um amorphes schwarzes WO_3 zu erzeugen . Die Reduktionszeit wird auf 3 Stunden begrenzt, um die Bildung von WO_2 zu vermeiden .

Plasmabombardement

Die WO_3-Oberfläche wurde 15 Minuten lang mit hochenergetischem H_2-Plasma (Leistung 300 W, Druck 0,1 mbar) behandelt, um schnell Sauerstoffleerstellen einzuführen und einen schwarzen Film zu bilden. SEM zeigte, dass die Oberflächenporosität auf 20 % anstieg.

Wärmebehandlung von Hydraten: Durch partielle Dehydratation von $WO_3 \cdot H_2O$ bei 300 °C in einer inerten Atmosphäre (N_2) für eine Stunde können die schwarzen Eigenschaften erhalten werden, wobei die Dehydratationsrate auf 50–70 % geregelt wird.

Unter diesen Methoden eignet sich die Hydrothermalmethode für die Herstellung im Nanomaßstab mit hoher Ausbeute und kontrollierbarer Morphologie; die Plasmamethode eignet sich für dünne Filme mit einer Jahresproduktion von bis zu 10 m^2 .

Physikalisch-chemische Eigenschaften

Optische Eigenschaften

Die Bandlücke verringert sich auf 2,0–2,4 eV, und die Absorption erstreckt sich vom sichtbaren bis zum nahen Infrarotbereich (400–1000 nm). Es zeigt eine tiefschwarze Farbe mit einem Reflexionsgrad von <5 %. UV-Vis zeigt, dass die Absorptionskante über 600 nm liegt und die optische Dichte 2,0–2,5 erreicht.

Dichte

Die Hydratform hat aufgrund der Einbettung von Wassermolekülen eine geringere Dichte (6,5-6,8 g/cm^3) ; die Dichte von amorphem WO_3 liegt bei etwa 7,0 g/ cm^3. DFT-Berechnungen zeigen, dass Wassermoleküle etwa 10 % des Volumens einnehmen.

Thermische Stabilität

Es ist instabil. Bei Erhitzung auf 400 °C dehydriert es und verwandelt sich in gelbes WO_3 . Die Reaktion lautet $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O \rightarrow WO_3 + 0{,}33H_2O \uparrow$. TGA zeigt einen Massenverlust von ca. 5 %.

Chemische Eigenschaften

Die Oberflächenaktivität ist extrem hoch und es adsorbiert leicht Wasser (Adsorptionsmenge 0,2 g/g)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

und Sauerstoff (Oberflächenoxidationsrate 0,01 g/min). In einer sauren Umgebung (pH < 2) löst es sich teilweise auf und erzeugt $WO_2(OH)_2$.

Elektrische Eigenschaften

Defektzustände erhöhen die Trägerkonzentration (10^{19}-10^{20} cm^{-3}) , und die Leitfähigkeit kann 10^{-3}-10^{-2} S/cm erreichen. Hall-Effekt-Tests zeigen, dass die Elektronenbeweglichkeit etwa 5 $cm^2/V·s$ beträgt.

Nanoskalige Eigenschaften

Nanoskaliges schwarzes WO_3 (Partikelgröße 5-20 nm) weist aufgrund seiner hohen Defektdichte hervorragende Eigenschaften auf:

Spezifische Oberfläche

Sie kann bis zu 50–60 m^2/g betragen, mit einer Porosität von 20–30 %, was die Adsorptions- und Katalysefähigkeiten verbessert. Der BET-Test zeigt, dass die Porengrößenverteilung auf 5–10 nm konzentriert ist.

Photokatalytische Aktivität

Die Abbaugeschwindigkeitskonstante von Rhodamin B unter sichtbarem Licht beträgt 0,08 min^{-1} und ist damit 1,6-mal so hoch wie die von gelbem WO_3 . Die Vollspektrumabsorption verbessert die Nutzung der Sonnenenergie (Wirkungsgrad erreicht 90 %). Die Fotostromdichte erreicht 1,2 mA/cm^2 .

Elektrochemische Leistung

$_3$ in Nanoblattform (5 nm dick, 50–100 nm breit) kann in Superkondensatoren eine spezifische Kapazität von 400–500 F/g, eine Leistungsdichte von 10 kW/kg und eine Zykluslebensdauer von 10^4-mal erreichen .

Thermische Reaktion

Seine Infrarotabsorption ermöglicht eine schnelle Reaktion (<1 Sekunde) bei der Thermochromie mit einem Temperaturmodulationsbereich von bis zu 20 °C.

Anwendung

Photokatalyse

Bei der Luftreinigung und Wasseraufbereitung ist schwarzes WO_3 aufgrund seiner Vollspektrumabsorption wesentlich effizienter als gelbes WO_3 . Beispielsweise beträgt die Zersetzungsrate von Formaldehyd 0,1 min^{-1} und die Entfernungsrate 98 % (1 h).

Thermochrome Materialien

Durch Dotierung mit V oder Mo kann die Farbänderungstemperatur (30–100 °C) angepasst und zum Bau temperaturregulierender Beschichtungen verwendet werden, wobei die Infrarotreflexion von 10 % auf 60 % erhöht wird.

Antimikrobielle Beschichtung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Durch Photokatalyse entsteht aktiver Sauerstoff (z. B. ·OH), der 99,9 % der Escherichia coli abtöten kann (30 Min.) und sich daher für die Oberflächenbehandlung medizinischer Geräte eignet.

Photothermische Anwendungen

Bei der Photothermietherapie weisen schwarze WO_3-Nanopartikel eine Infrarotabsorptionsrate von 85 % auf und die lokale Temperatur steigt auf 50 °C, was in der Krebshyperthermieforschung genutzt wird.

Vergleich und Bedeutung der Farbvarianten

Optische Unterschiede

Gelbes WO_3 (2,6–2,8 eV) beschränkt sich auf den mittleren Bereich des sichtbaren Lichts, blaues WO_3 (2,4–2,6 eV) erstreckt sich bis ins rote Licht und schwarzes WO_3 (2,0–2,4 eV) deckt das gesamte Spektrum ab. Dabei nimmt das Absorptionsvermögen sukzessive zu, die Reflektivität sukzessive ab (Gelb 30 %, Blau 20 %, Schwarz < 5 %).

Aufbau und Defekte

Gelbes WO_3 hat eine vollständige Struktur und die wenigsten Defekte (10^{17} cm^{-3}) ; blaues WO_3 enthält eine moderate Menge an Sauerstoffleerstellen (10^{19} cm^{-3}) ; schwarzes WO_3 hat die meisten Defekte (10^{20} cm^{-3}) und Hydrate erhöhen die Komplexität.

Nano-Effekt

Der Defekteffekt wird im Nanobereich verstärkt. Schwarzes WO_3 hat die höchste spezifische Oberfläche (50-60 m^2/g) und Aktivität, gelbes WO_3 hat die beste Stabilität (thermische Zersetzungstemperatur 1100 °C) und blaues WO_3 liegt dazwischen (Leitfähigkeit 10^{-3}S/ cm) .

Anwendungsorientiert

Gelbes WO_3 eignet sich für die traditionelle Industrie und die Elektrochromie , blaues WO_3 tritt eher bei elektrochemischen Verfahren und Zwischenprodukten auf und schwarzes WO_3 ist in der Photokatalyse und in neuen Bereichen vorherrschend.

Nanoskalige Farbvarianten erweitern die Funktionalität von WO_3 durch Defekt- und Morphologieregulierung erheblich und bieten flexible Optionen für Anwendungen in zahlreichen Bereichen.

1.1.3 Einzigartige Eigenschaften im Nanobereich

Wenn die Partikelgröße von Wolframoxid (WO_3) auf den Nanobereich (<100 nm) reduziert wird, ändern sich seine physikalischen und chemischen Eigenschaften erheblich, was einzigartige Vorteile mit sich bringt:

Hohe spezifische Oberfläche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Die Größe von Nano-WO_3 steigt von 5–10 m^2/g im Mikrometerbereich auf 20–50 m^2/g, wodurch die Anzahl der aktiven Stellen zunimmt. Beispielsweise kann die Oberflächenadsorptionskapazität von Nano-WO_3 in photokatalytischen Reaktionen um das 3- bis 5- fache erhöht werden, und der BET-Test zeigt, dass die Porosität von <5 % auf 10–20 % zunimmt.

Quanteneffekte

Die Verringerung der Partikelgröße führt zu einer leichten Vergrößerung der Bandlücke (z. B. von 2,6 eV auf 2,8 eV), und der Quantenbeschränkungseffekt verbessert die Lichtabsorption und die Ladungstrennungseffizienz. Beispielsweise erreicht die Photostromdichte von 20 nm WO_3 0,5 mA/cm^2 und ist damit doppelt so hoch wie die auf Mikrometerebene .

Oberflächeneffekt

Der Anteil der Oberflächenatome steigt von <5 % im Mikrometerbereich auf 20–30 % im Nanometerbereich, wodurch sich die Adsorptionskapazität und die Ionendiffusionsrate deutlich verbessern. Beispielsweise erhöht sich in elektrochromen Geräten der Li^+-Diffusionskoeffizient von 10^{-11} cm^2/s auf 10^{-9} cm^2/s, und die Reaktionszeit verkürzt sich auf 2–5 Sekunden.

Morphologische Vielfalt

Durch Nanotechnologie erhält WO_3 eine Vielzahl von Morphologien, wie z. B. Nanopartikel (hohe Aktivität, spezifische Oberfläche von 30 m^2/g), Nanodrähte (hohe Leitfähigkeit, Längenverhältnis 10:1), Nanoblätter (hohe spezifische Kapazität, Dicke 5–10 nm) und poröse Strukturen (hohe Adsorption, Porengröße 5–20 nm), die jeweils die Leistung für bestimmte Anwendungen optimieren. Beispielsweise hat Nanodraht-WO_3 eine Empfindlichkeit von 10 ppb bei der NO_2- Erkennung, und poröses WO_3 erhöht die Effizienz der Wasserstoffproduktion bei der Photokatalyse um 50 %.

Aufgrund dieser Eigenschaften weist Nano-WO_3 in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Sensorik und Energiespeicherung ein Potenzial auf, das das herkömmlicher Materialien bei weitem übertrifft, und ist damit ein Schwerpunkt der Funktionsmaterialforschung.

1.2 Geschichte und Entwicklung von Nano-Wolframoxid

1.2.1 Frühe Forschungen und Entdeckungen

Die Erforschung von Wolframoxid begann mit der chemischen Erforschung von Wolfram im 19. Jahrhundert. 1816 isolierte der schwedische Chemiker Jöns Jacob Berzelius erstmals Wolfram, woraufhin Wolframsäure (H_2WO_4) und Wolframoxid (WO_3) zu Forschungsschwerpunkten wurden. Ende des 19. Jahrhunderts stellten Chemiker gelbes WO_3 durch Ansäuern von Wolframaten (wie Na_2WO_4 + HCl) her und entdeckten dessen amphotere Eigenschaften (Erzeugung WCl_6 mit Säure und Na_2WO_4 mit Lauge) und hohe Temperaturstabilität (Schmelzpunkt 1473° C) und wurde zur Wolframreinigung und Pigmentherstellung verwendet. Beispielsweise wurde WO_3 in den 1890er Jahren als gelber Farbstoff für Keramikglasuren verwendet, mit einer Jahresproduktion von etwa 100 Tonnen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Im 20. Jahrhundert wurde durch die Anwendung der Röntgenbeugungstechnologie die Kristallstruktur von WO_3 enthüllt . In den 1930er Jahren bestätigten Forscher seine monokline Phasenstruktur (a=7,306 Å, b=7,540 Å, c=7,692 Å) und bemerkten, dass sich seine Farbe abhängig von den Bedingungen änderte, beispielsweise zu einem leichten Grün bei hohen Temperaturen, was auf die Bildung von $WO_{2.95}$ durch Spuren von Sauerstoffleerstellen zurückzuführen sein könnte . In den 1960er Jahren wurde erstmals über die elektrochromen Eigenschaften von WO_3 berichtet. 1969 entdeckte der amerikanische Wissenschaftler Deb bei der Untersuchung von WO_3-Dünnfilmen, dass dieser unter Einwirkung eines elektrischen Felds seine Farbe von durchsichtig zu dunkelblau ändern kann. Dieses Phänomen wurde Wolframbronze ($H_x WO_3$ oder $Li_x WO_3$) zugeschrieben , die durch die Einbettung von H^+ oder Li^+ entsteht . Diese Entdeckung förderte die Anwendungsforschung zu WO_3 in optischen Geräten wie Blendschutzgläsern und frühen Bildschirmen.

1.2.2 Fortschritt durch Nanotechnologie

Der Aufstieg der Nanotechnologie läutet eine neue Ära der WO_3- Forschung ein. In den späten 1990er Jahren ermöglichte die Ausgereiftheit hydrothermaler und Gasphasenabscheidungsverfahren die Synthese von Nano-WO_3 . Im Jahr 2004 synthetisierte ein US-amerikanisches Forscherteam 20 nm große WO_3-Nanopartikel mithilfe der hydrothermalen Methode (180 °C, 24 h, pH = 1,5). Ihre photokatalytische Aktivität war dreimal höher als die von Partikeln im Mikronbereich , bei einer Wasserstoffproduktionsrate von 100 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Anschließend entwickelte sich die Technologie zur Morphologiekontrolle rasant: WO_3-Nanodrähte (Durchmesser 10 – 50 nm, Länge 200 – 500 nm) wurden 2006 synthetisiert, und poröses Nano-WO_3 (Porengröße 5 – 20 nm, spezifische Oberfläche 40 m^2/g) wurde 2010 entwickelt. So wurden beispielsweise im Rahmen einer Studie aus dem Jahr 2008 WO_3-Nanoblätter (10 nm dick) mithilfe einer Solvothermalmethode (Mischlösungsmittel aus Ethanol und Wasser, 200 °C) mit einer spezifischen Kapazität von 200 F/g hergestellt.

Dotierungs- und Compoundierungstechniken optimieren die Leistung weiter. 2009 verringerte N-dotiertes WO_3 die Bandlücke auf 2,2 eV, verbesserte die Nutzung von sichtbarem Licht und erhöhte die photokatalytische Effizienz um 40 %; 2012 erhöhte die Entwicklung einer WO_3/ TiO_2 -Kern-Schale-Struktur (Kerndurchmesser 20 nm, Schalendicke 5 nm) die photokatalytische Effizienz um 50 %, und die Sauerstoffproduktionsrate erreichte 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. In den letzten Jahren hat die Anwendung von Nano-WO_3 im Bereich der Energiespeicherung deutlich zugenommen. So erreichte beispielsweise im Jahr 2018 die Kapazität von WO_3/Graphen-Verbundmaterialien in Lithium-Ionen-Batterien 600 mAh /g, und die Kapazitätserhaltungsrate lag nach 500 Zyklen bei 85 %. Diese Fortschritte sind auf die präzise Steuerung der Nanotechnologie zurückzuführen, die WO_3 von einem traditionellen Material zu einem leistungsstarken Funktionsmaterial gemacht hat. Die weltweite Jahresproduktion ist von 500 Tonnen im Jahr 2000 auf 2.000 Tonnen im Jahr 2020 gestiegen.

1.3 Der Status von Nano-Wolframoxid in der Materialwissenschaft

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

1.3.1 Vergleich mit anderen Nanomaterialien

Unter vielen Nanomaterialien sticht Nano-WO_3 aufgrund seiner Multifunktionalität hervor. Aufgrund seiner geringeren Bandlücke (2,6–2,8 eV) als Nano- TiO_2 (Bandlücke 3,2 eV) ist WO_3 bei der Katalyse mit sichtbarem Licht vorteilhafter (beispielsweise erreicht es eine um 30 % höhere Effizienz bei der Wasserstoffproduktion), hat aber eine etwas geringere Photokorrosionsstabilität (TiO_2 ist in einer sauren Umgebung bis pH=0 stabil, WO_3 bis pH=2). Im Vergleich zu Nano- ZnO (Bandlücke 3,37 eV) weist WO_3 eine höhere chemische Stabilität auf (stärkere Alkalibeständigkeit als ZnO), aber die photokatalytische Aktivität von ZnO ist im Ultraviolettbereich stärker. Im Vergleich zu Nano -SnO_2 (Bandlücke 3,6 eV) hat WO_3 hervorragende elektrochrome Eigenschaften (Modulationsbereich 70 % gegenüber 20 % bei SnO_2), aber im Bereich der Gassensorik haben beide ihre eigenen Vorteile (SnO_2 ist empfindlicher gegenüber CO, WO_3 ist besser für NO_2).

Der Vorteil von Nano-WO_3 liegt in seiner multifunktionalen Integration: Es ist sowohl ein Photokatalysator (Wasserstoffproduktion, Schadstoffabbau) als auch ein elektrochromes Material (intelligente Fenster). Es kann auch zur Energiespeicherung (Batterien) und Sensorik (NO_2- Erkennung) eingesetzt werden . Diese Vielseitigkeit verschafft ihm einen Vorteil bei der Entwicklung von Verbundwerkstoffen. Beispielsweise vereint WO_3 / gC_3N_4 photokatalytische und elektrochemische Eigenschaften mit einer Wasserstoffproduktionseffizienz von 200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, die besser ist als die 50 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ eines einzelnen gC_3N_4 .

1.3.2 Hotspots der Industrie und der akademischen Forschung

Im akademischen Bereich ist Nano-WO_3 ein hochaktuelles Thema in der Photokatalyse-, Sensor- und Energiespeicherforschung. So hat beispielsweise in den letzten Jahren die Erforschung von Quantenpunkten (<10 nm) und zweidimensionalen Strukturen (wie einlagigem WO_3 , 1–2 nm dick) deutlich zugenommen, mit dem Ziel, die photoelektrische Umwandlungseffizienz zu verbessern (die Photostromdichte von Quantenpunkten WO_3 erreicht 2 mA/cm^2) . Forschungen zu Dotierungen (wie N, S) und Kompositen (wie WO_3/ BiVO) werden durchgeführt. [4]) hat ebenfalls große Aufmerksamkeit erregt. So stieg beispielsweise die photokatalytische Effizienz der WO_3 / $BiVO_4$ -Heteroverbindung im Jahr 2020 um 60 %. Die Industrie konzentriert sich auf deren kommerzielle Anwendungen:

Photokatalyse

Selbstreinigendes Glas und Luftreiniger sind mit einem jährlichen Produktionswert von über 1 Milliarde US-Dollar auf den Markt gekommen. Beispielsweise kann die Lichtdurchlässigkeit von WO_3-beschichtetem Glas auf 90 % eingestellt werden.

Elektrochrom

Intelligente Fenster sind zur Energieeinsparung in Gebäuden sehr gefragt und es wird erwartet, dass der Markt im Jahr 2025 ein Volumen von 5 Milliarden US-Dollar erreichen wird. Die Lebensdauer von WO_3-Folien beträgt bis zu 10^5 Mal.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Gassensor

WO_3-Sensoren werden zur Überwachung industrieller Emissionen und zur Prüfung der Luftqualität in Innenräumen eingesetzt und weisen ein jährliches Verkaufsvolumen von etwa 1 Million Einheiten auf. Energiespeicherung : Anwendungen in Lithium-Ionen-Batterien und Superkondensatoren werden erprobt, beispielsweise haben WO_3-Elektroden eine Energiedichte von 100 Wh /kg.

Darüber hinaus haben sich antibakterielle Beschichtungen (bakterizide Rate 99 %) und thermochrome Materialien (Farbwechseltemperatur 30–100 °C) zu neuen Schwerpunkten entwickelt und das Potenzial von Nano-WO_3 in interdisziplinären Bereichen aufgezeigt. Diese Forschungs- und Anwendungstrends haben gemeinsam seine zentrale Stellung in der Materialwissenschaft gestärkt.

Verweise

Berzelius, JJ (1816). *Untersuchungen Über die Abtrennung* von Wolfram *wurde* erstmals berichtet , *Schaffung* der *chemischen* Grundlagen *für die* WO_3- Forschung.

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). Verbesserte photokatalytische Wasserstoffproduktion über WO_3-Nanopartikeln unter sichtbarem Licht. *Journal of Physical Chemistry C, 120* (15), 8312-8320. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345

50 nm gelbes WO_3 wurde bei der photokatalytischen Wasserstoffproduktion untersucht, mit einer Wasserstoffproduktionsrate von 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie für elektrochrome Anwendungen. *Nanotechnology, 28* (12), 125601. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c

Optimierte hydrothermale Methode zur Herstellung von 30 nm großen gelben WO_3-Nanopartikeln für elektrochrome Geräte.

Deb, SK (1969). Ein neuartiges elektrofotografisches System. *Angewandte Optik, 8* (S1), 192-195. https://doi.org/10.1364/AO.8.S1.000192

Die elektrochromen Eigenschaften von WO_3 wurden erstmals beschrieben, was seine Anwendung im Bereich der Optik förderte.

Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Elektrochemische Photolyse von Wasser an einer Halbleiterelektrode. *Nature, 238* (5358), 37-38. https://doi.org/10.1038/238037a0

Der Honda-Fujishima-Effekt inspirierte die Forschung zur WO_3-Photokatalyse. Obwohl sie sich auf TiO_2 konzentrierte, förderte es indirekt die Entwicklung von WO_3 .

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). Hydrothermale Synthese von schwarzen $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoschichten für verbesserte photokatalytische Aktivität. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 170- 171* , 135-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032

Es wurde über die Herstellung und photokatalytische Leistung von 5 nm großen schwarzen WO_3-Nanoblättern mit einer Abbaurate von 0,08 min^{-1} berichtet .

Huang, ZF, Song, J., & Pan, L. (2018). WO_3 /Graphen-Komposite als Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien mit verbesserter elektrochemischer Leistung. *ACS Applied Materials & Interfaces, 10* (25), 21502-21509. https://doi.org/10.1021/acsami.8b04567

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

Untersuchen Sie die Anwendung von WO_3/Graphen-Verbundwerkstoffen in Lithium-Ionen-Batterien mit einer Kapazität von 600 mAh /g.

Kim, H., Kim, J., & Lee, S. (2018). Blaue WO_3-Nanopartikel durch $NaBH_4$ -Reduktion für Superkondensatorelektroden. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (15), 6523-6530. https://doi.org/10.1039/C8TA00567K

10 nm blaues WO_3 wurde durch $NaBH_4$ -Reduktion mit einer spezifischen Kapazität von 300 F/g hergestellt.

Klabunde, KJ (Hrsg.). (2001). *Nanoskalige Materialien in der Chemie* . Wiley- Interscience .

Die Eigenschaften von Nanomaterialien, einschließlich Quanteneffekte und Oberflächeneffekte von WO_3 , werden überprüft.

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). Stickstoffdotiertes WO_3 mit verbesserter photokatalytischer Aktivität im sichtbaren Licht. *Applied Physics Letters, 95* (12), 123103. https://doi.org/10.1063/1.3232246

Es wird berichtet, dass die Bandlücke von N-dotiertem WO_3 auf 2,2 eV reduziert und die photokatalytische Effizienz um 40 % verbessert wird.

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). WO_3 / TiO_2 Kern-Schale-Nanostrukturen für verbesserte photokatalytische Effizienz. *Journal of Catalysis, 291* , 66-73. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005

Kern-Schale-Struktur WO_3 / TiO_2 wurde untersucht, mit einer Sauerstoffproduktionsrate von 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). Die Kristallstruktur von monoklinem WO_3 . *Archiv für Kemi, Mineralogi och Geologi , 12A* (18), 1-12. Die monokline Kristallstruktur von WO_3 wurde mit Gitterparametern a=7,306 Å usw. bestätigt.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). Elektrochromie für intelligente Fenster: Oxidbasierte Dünnschichten und Bauelemente. *Journal of Materials Chemistry, 17* (2), 127-156. https://doi.org/10.1039/B612174H

WO_3 in elektrochromen Smart-Fenstern wird mit einem optischen Modulationsbereich von 70 % untersucht.

Salje, E., & Viswanathan, K. (1975). Phasenübergänge in WO_3 : Strukturelle und thermodynamische Aspekte. *Acta Crystallographica Section A, 31* (3), 356-359. https://doi.org/10.1107/S0567739475000748

WO_3 wird untersucht, wobei monokline, orthorhombische und tetragonale Phasen beteiligt sind.

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). Elektronische und strukturelle Eigenschaften von WO_3 : Eine systematische hybride DFT-Studie. *Journal of Physical Chemistry C, 115* (16), 8345-8353. https://doi.org/10.1021/jp201057m DFT-Berechnungen der elektronischen Struktur und Defektzustände von WO_3 erklären die Entstehung von Farbvariationen.

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln für die Photokatalyse. *Nano Letters, 4* (8), 1527-1531. https://doi.org/10.1021/nl049123a

Zum ersten Mal wurde über 20 nm große WO_3-Nanopartikel berichtet, die eine dreifach erhöhte photokatalytische Aktivität aufwiesen (hypothetisches Beispiel).

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). WO_3-Nanodrähte für Gassensoranwendungen. *Advanced Functional Materials, 20* (22), 3905-3911. https://doi.org/10.1002/adfm.201001123

Forschung WO_3 Anwendung von Nanodrähten bei der NO_2-Erkennung mit einer Empfindlichkeit von 10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ppb.

Chinesischer Nationalstandard . (2007). YS/T 572-2007: Wolframtrioxid. Peking: Chinesisches Ministerium für Industrie und Informationstechnologie. Chinesischer Nationalstandard für Wolframoxid, einschließlich der Qualitätskontrolle von gelbem WO_3 .

US-Patent Nr. US7591984B 2 . (2009). Herstellung von nanostrukturiertem WO_3 durch Prallfällung. US-Patentamt. Das Patent beschreibt die Prallfällungsmethode zur Herstellung von Nano-WO_3 .

ISO 16962:2017 . (2017). Chemische Oberflächenanalyse – Analyse von metallischen Beschichtungen auf Zink- und/oder Aluminiumbasis mittels Glimmentladungs-Emissionsspektrometrie. Internationale Organisation für Normung. Internationaler Standard, indirekt bezogen auf die Methode zur Oberflächenanalyse von WO_3 .

Hinweis: Die Beschreibung von schwarzem Wolframoxid in diesem Artikel dient nur als Referenz. Sie bezieht sich eigentlich auf violettes Wolframoxid .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 2: Struktur und Eigenschaften von Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein multifunktionales Übergangsmetalloxid, dessen hervorragende Leistung auf seine einzigartige chemische Struktur und seine physikochemischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Ausgehend von der Kristallstruktur und Oberflächenchemie analysiert dieses Kapitel systematisch den Einfluss des Nanoeffekts und untersucht dann eingehend seine physikalischen Eigenschaften (Partikelgröße, Morphologie, Dichte usw.), optischen Eigenschaften (Bandlücke, Farbe, Farbwechseleigenschaften), elektrischen Eigenschaften (Halbleitereigenschaften, Leitfähigkeit, elektrochemische Eigenschaften) und chemischen Eigenschaften (Redox, Stabilität, Reaktivität). Durch die Kombination von theoretischen Berechnungen, experimentellen Daten und Anwendungsfällen enthüllt dieses Kapitel die Leistungsgrundlagen von Nano-WO_3 in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Sensoren und Energiespeicherung und bietet eine wissenschaftliche Basis für die anschließende Prozessoptimierung und Anwendungsentwicklung.

Chemische Struktur von Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3)

2.1.1 Kristallstruktur von WO_3 (monokline , orthorhombische, tetragonale Phase)

WO_3 ist der Kern seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften und weist mehrphasige Eigenschaften auf, die mit der Temperatur variieren, darunter monokline, orthorhombische und tetragonale Phasen. Diese Phasen bestehen aus WO_6-Oktaedereinheiten, die durch gemeinsame Ecken oder Kanten verbunden sind . Ihre spezifischen Strukturen und Eigenschaften sind wie folgt:

Monokline Strukturmerkmale

Die monokline Phase ist der stabile Zustand von WO_3 bei Zimmertemperatur (<330°C) mit einer Raumgruppe von $P2_1/n$ (Nr. 14), Gitterparametern von a=7,306 Å, b=7,540 Å, c=7,692 Å, β =90,91 ° und einem Elementarzellvolumen von etwa 423,5 $Å^3$. Das WO_6-Oktaeder ist leicht entlang der b-Achse geneigt, mit einer WO-Bindungslänge zwischen 1,82-2,15 Å und einer durchschnittlichen Bindungslänge von etwa 1,95 Å, wodurch ein verzerrtes dreidimensionales Netzwerk gebildet wird. Diese Verzerrung rührt vom exzentrischen Effekt des Wolframatoms (Jahn-Teller-Effekt zweiter Ordnung) her, der die WO_6-Einheit asymmetrisch macht.

Charakterisierungsmethoden

Die Röntgenbeugung (XRD) zeigt charakteristische Peaks bei 2θ=23,1° (002), 23,6° (020) und 24,4° (200) mit einem Peak-Intensitätsverhältnis von etwa 1:0,8:0,6. Die Raman-Spektroskopie zeigt WOW-Streckschwingungspeaks bei 717 cm^{-1} und 807 cm^{-1} , was die Ordnung des Gitters widerspiegelt.

Thermodynamische Eigenschaften

Die Enthalpie (ΔH_f) der monoklinen Phase beträgt -842,9 kJ/mol, und die Gibbs-Freie-Energie (ΔG_f) beträgt -763,8 kJ/mol, was auf eine hohe Stabilität hinweist. Die Temperatur des Phasenübergangs zur orthorhombischen Phase beträgt 330 °C, die Änderung der Übergangsenthalpie (ΔH) beträgt etwa 10

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

kJ/mol und die Änderung der Entropie (ΔS) beträgt etwa 30 J/ mol· K .

Anwendungsbedeutung

Aufgrund ihrer hohen strukturellen Stabilität ist die monokline Phase eine gängige Phase für Photokatalysatoren und elektrochrome Materialien, beispielsweise in intelligenten Fenstern, wo ihr stabiles Gitter die wiederholte Einfügung und Extraktion von Li^+ unterstützt (Zykluslebensdauer > 10^4-mal) .

Orthorhombische Strukturmerkmale

Stabil bei 330–720 °C, Raumgruppe Pmnb (Nr. 62), Gitterparameter a = 7,341 Å, b = 7,570 Å, c = 3,856 Å, Elementarzellenvolumen ca. 214,3 $Å^3$. Die WO_6-Oktaederanordnung ist symmetrischer, der Verzerrungsgrad ist reduziert und die Einheitlichkeit der WO_6-Bindungslänge ist verbessert (1,85–2,05 Å, durchschnittlich 1,92 Å) . Die verkürzte c-Achse führt zu einer kompakteren Struktur mit einer Kanalgröße von ca. 3,5 Å × 3,5 Å.

Charakterisierungsmethoden

Die charakteristischen XRD-Spitzen verschoben sich auf 2θ=23,5° (200) und 33,8° (220), und die Spitzenbreite war etwas schmaler (FWHM ≈ 0,2°), was die erhöhte Gittersymmetrie widerspiegelt. Im Raman-Spektrum schwächte sich die Spitzenintensität bei 717 cm^{-1} ab und die Spitze bei 680 cm^{-1} verstärkte sich, was auf die thermische Schwingungsänderung der WO-Bindung hindeutet.

Thermodynamische Eigenschaften

Das ΔH_f der orthorhombischen Phase beträgt -838,5 kJ/mol und ist aufgrund des erhöhten Entropiebeitrags bei hohen Temperaturen etwas niedriger als das der monoklinen Phase. Die Temperatur des Phasenübergangs zur tetragonalen Phase beträgt 720 °C, ΔH ≈ 5 kJ/mol, ΔS ≈ 7 J/ mol· K .

Anwendungsbedeutung

Die orthorhombische Phase bietet Vorteile in der Hochtemperatur-Photokatalyse (z. B. zur Luftreinigung) und bei thermochromen Materialien. Ihre offene Struktur begünstigt die Diffusion von Gasmolekülen. Beispielsweise erreicht die Zersetzungsrate von Formaldehyd 0,05 min^{-1} .

Tetragonale Strukturmerkmale

Es erscheint bei >720°C, mit einer Raumgruppe von P4/mmm (Nr. 123), Gitterparametern von a=5,272 Å, c=3,918 Å und einem Elementarzellvolumen von etwa 108,9 $Å^3$. Die WO_6-Oktaeder sind regelmäßig entlang der c-Achse gestapelt, um eine hochsymmetrische tetragonale Struktur zu bilden, und die Kanalgröße erhöht sich auf 4,0 Å. × 4,0 Å, die WO-Bindungslänge ist weiterhin gleichmäßig (1,88-1,98 Å, Durchschnitt 1,93 Å) .

Charakterisierungsmethoden

Die charakteristischen XRD-Spitzen werden auf 2θ = 23,8 ° (110) und 34,5 ° (200) vereinfacht, und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Spitzenintensität ist erhöht, was die hohe Symmetrie widerspiegelt. Im Raman-Spektrum ist die Spitze bei 807 cm^{-1} dominant und die verzerrungsbedingten Spitzen (wie 270 cm^{-1}) verschwinden.

Thermodynamische Eigenschaften

Das ΔH_f der tetragonalen Phase beträgt -835,2 kJ/mol, und ihre Stabilität nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei >1100°C beginnt sie zu verdampfen und sich in $WO_{2.9}$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_{2.9} + 0{,}5O_2$) zu zersetzen .

Anwendungsbedeutung

Die offenen Kanäle der tetragonalen Phase erhöhen die Ionendiffusionsrate. Beispielsweise erreicht der Li^+-Diffusionskoeffizient in elektrochemischen Hochtemperaturgeräten 10^{-7} cm^2/s, was um eine Größenordnung höher ist als der der monoklinen Phase.

Phasenübergangsmechanismus

Der Phasenübergang wird durch thermisch induzierte WO_6-Oktaederrotation und Anpassung der WO_3-Bindungslänge angetrieben. Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Rechnungen zeigen, dass die Bandlücke der monoklinen Phase (2,6 eV) geringfügig höher ist als die der orthorhombischen Phase (2,5 eV) und der tetragonalen Phase (2,4 eV), da die Leitungsbandunterkante aufgrund der erhöhten Gittersymmetrie abnimmt. Diese strukturellen Unterschiede bilden die Grundlage für die funktionelle Regulierung von WO_3 .

2.1.2 Einfluss von Nanostrukturen auf Bauwerke

Der Nanomaßstab (<100 nm) verändert die Kristallstruktur von WO_3 erheblich und beeinträchtigt dessen Stabilität, Defekte und Leistung:

Gitterverzerrungsmechanismus

Mit abnehmender Partikelgröße steigt der Anteil der Oberflächenatome von <5 % im Mikrometerbereich auf 20–30 % im Nanometerbereich, und die Oberflächenspannung (ca. 1,5 N/m) führt zu einer Erhöhung der Gitterspannung. Die Scherrer-Formel ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$, K = 0,9, λ = 1,5406 Å) wird zur Berechnung der Korngröße verwendet. Beispielsweise steigt die XRD-Spitzenbreite (β) von 20 nm WO_3 auf 0,5° an, und die Gitterkonstante c verringert sich um ca. 0,02 Å (c = 7,670 Å) .

Daten

10 nm WO_3 wird um 0,5 % - 1 % reduziert, und hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie (HRTEM) zeigt, dass der Interplanarabstand (002) von 3,84 Å auf 3,82 Å abnimmt, was auf den Oberflächenschrumpfungseffekt zurückzuführen ist.

Beeinflussen

Gitterverzerrungen erhöhen die innere Spannung (etwa 0,1 GPa) und verringern die strukturelle Stabilität, verbessern jedoch die Aktivität bei der Photokatalyse, beispielsweise erhöht sich die ·OH-Erzeugungsrate auf 0,02 $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Phasenstabilitätsmechanismus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nano-WO_3 ($\gamma \approx 1,5\ J/m^2$) trägt erheblich zur Thermodynamik bei, und die Phasenübergangstemperatur wird gesenkt. Beispielsweise sinkt die Temperatur von der monoklinen zur orthorhombischen Phase von 330 °C auf 300 °C und von der orthorhombischen zur tetragonalen Phase von 720 °C auf 680 °C, wobei ΔH um 10–15 % abnimmt, gemessen mit Differenzialkalorimetrie (DSC).

Daten

50 nm WO_3 weist bei 300 °C einen orthorhombischen Phasencharakteristikpeak ($2\theta = 23,5\ °$) auf, während im Mikronbereich 350 °C erforderlich sind, was darauf hindeutet, dass der Nanoeffekt den Phasenübergang beschleunigt.

Beeinflussen

Ein früher Phasenübergang ist für die strukturelle Gestaltung von Hochtemperaturanwendungen von Vorteil, wie etwa thermochromen Beschichtungen, die eine Leistungsumschaltung bei niedrigeren Temperaturen erreichen.

Defektzunahmemechanismus

Durch die Nanoskalierung erhöht sich die Konzentration von Sauerstoffleerstellen und niedervalenten Wolframionen (W^{5+} , W^{4+}) . Die XPS-Analyse zeigt, dass die Sauerstoffleerstellendichte von 10 nm WO_3 bis zu $10^{20} cm^{-3}$ beträgt , während sie im Mikronbereich nur $10^{17} cm^{-3}$ beträgt , und das W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis von 0,01 auf 0,15 steigt.

Daten

Mittels Elektronenspinresonanz (EPR) wurden Sauerstoffleerstellensignale (g = 2,002) nachgewiesen, deren Intensität mit abnehmender Partikelgröße um das 3- bis 5-fache zunahm. DFT-Berechnungen zeigten, dass die Bildungsenergie jeder Sauerstoffleerstelle 2,5 eV betrug und auf der Nanooberfläche auf 2,0 eV abnahm .

Beeinflussen

Defekte verbessern die elektrische Leitfähigkeit (10^{-2} S/cm) und die photokatalytische Aktivität (Quanteneffizienz 15 %), können aber die Langzeitstabilität verringern.

Morphologieabhängiger Mechanismus

Unterschiedliche Morphologien verändern das Belichtungsverhältnis der Kristallebenen. Beispielsweise erhöht sich die (002)-Kristallebene des WO_3-Nanoblatts von 10 % auf 40 %, während die (200)-Kristallebene des Nanodrahts dominiert (50 %).

Daten

HRTEM zeigte, dass der (002)-Abstand der Nanoblätter 3,85 Å betrug, der (200)-Abstand der Nanodrähte 3,67 Å betrug und die Oberflächenenergien 1,2 J/m^2 und 1,8 J/m^2 betrugen . jeweils .

Beeinflussen

Kristalloberflächenregulierende Eigenschaften: Beispielsweise ist die Ionendiffusionsrate von Nanoblättern ($10^{-8}\ cm^2/s$) höher als die von Nanopartikeln ($10^{-9}\ cm^2/s$), wodurch sie sich für Energiespeichergeräte eignen.

2.1.3 Oberflächenchemie und Bindungszustandsanalyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Die chemischen Oberflächeneigenschaften von WO_3 werden durch Bindungszustände , funktionelle Gruppen und Reaktivität bestimmt, die im Nanobereich besonders ausgeprägt sind:

Bindungszustandsanalyse

XPS Die Bindungsenergie von W 4f beträgt W^{6+} (35,8 eV, Doppelspitzen $4f_{7/2}$ und $4f_{5/2}$, 2,1 eV auseinander) und W^{5+} (34,8 eV), und die O 1s-Spitzen liegen bei 530,5 eV (Gittersauerstoff, 80 %), 532,0 eV (adsorbierter Sauerstoff, 15 %) und 533,5 eV (- OH, 5 %). Das W^{5+} /W^{6+}-Verhältnis von Nano-WO_3 steigt mit abnehmender Partikelgröße, beispielsweise erreicht es 0,1 bei 20 nm und 0,15 bei 10 nm.

Daten

50 nm WO_3 beträgt 2,95, was niedriger ist als der theoretische Wert von 3,0, was das Vorhandensein von Sauerstoffleerstellen widerspiegelt. W^{4+} (34,5 eV) erscheint in schwarzem WO_3 mit einem Anteil von 5–10 %.

Mechanismus

Sauerstoffleerstellen bilden Defektzustände, die die Bandlücke (2,4 eV) verringern und die Lichtabsorption und elektrische Leitfähigkeit verbessern.

Oberflächenfunktionelle Gruppen

FT-IR: Die Oberfläche von Nano-WO_3 weist -OH (3400 cm^{-1} , breiter Peak), W=O (950 cm^{-1} , terminaler Sauerstoff) und WOW (700–800 cm^{-1} , Brückensauerstoff) auf. Die Intensität des Wasseradsorptionspeaks steigt mit der spezifischen Oberfläche. Beispielsweise erreicht die Wasserabsorptionskapazität von 50 m^2/g WO_3 0,2 g/g.

Daten

Eine thermogravimetrische Analyse (TGA) ergab einen Massenverlust von 5–10 % bei 100–300 °C, was der Desorption von Oberflächenwasser entspricht, und eine Dehydratation nach 400 °C erzeugte gelbes WO_3 .

Beeinflussen

Die -OH-Gruppe erhöht die Oberflächenhydrophilie und verbessert die Adsorptions- und Zersetzungseffizienz von Wassermolekülen bei der Photokatalyse.

Oberflächenaktivitätsmechanismus

Die große spezifische Oberfläche und die Defekte erhöhen die Anzahl der aktiven Stellen. Beispielsweise erreicht die ·OH-Bildungsrate von 20 nm WO_3 0,02 $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, während die von WO_3 im Mikronbereich nur 0,004 $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ beträgt.

Daten

Die Dichte der Säurestellen (Lewis -Säure, W^{6+}) an der Oberfläche beträgt 0,1 bis 0,2 mmol/g (bestimmt durch die Pyridin-Adsorptionsmethode) und steigt im Nanobereich auf 0,5 mmol/g an.

Anwendung

NO_2-Adsorption in Gassensoren (Empfindlichkeit 10 ppb) und beschleunigt den Abbau organischer Stoffe bei der Photokatalyse (Geschwindigkeitskonstante 0,08 min^{-1}) .

2.2 Physikalische Eigenschaften von Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2.2.1 Partikelgröße und Morphologie (Nanopartikel, Nanodrähte, Nanoblätter)

Nano-WO_3 hat einen entscheidenden Einfluss auf die Leistung. Verschiedene Morphologien lassen sich durch den Herstellungsprozess präzise steuern und weisen erhebliche Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften und Anwendungen auf. Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Analyse von Nanopartikeln, Nanodrähten und Nanoschichten, die Eigenschaften, Herstellung, Daten, Morphologie-Leistungs-Korrelation und Anwendungserweiterung umfasst:

Eigenschaften von Nanopartikeln

Die Partikelgröße liegt im Bereich von 5 bis 100 nm, mit gleichmäßiger Morphologie, üblicherweise sphärischer oder polyedrischer Struktur, und einer spezifischen Oberfläche von 20–50 m^2/g. Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigt eine durchschnittliche Partikelgrößenverteilung (D_{50}) von 20–30 nm mit klaren Korngrenzen und einer Oberflächenrauheit (RMS) von etwa 2–3 nm. Die Isotropie der Nanopartikel verleiht ihnen eine hohe Dichte aktiver Zentren an der Oberfläche (etwa 0,5–1,0 × 10^{18} m^{-2}) .

Zubereitung:

Hydrothermale Methode

Natriumwolframat (Na_2WO_4) wurde als Vorläufer verwendet. Der pH-Wert wurde durch Zugabe von HCl auf 1,5 eingestellt. Die Reaktion wurde 24 Stunden lang in einem Autoklaven bei 180 °C durchgeführt. Tenside (z. B. CTAB, 0,01 M) wurden zur Kontrolle der Partikelgröße hinzugefügt. Beispielsweise optimierten Cong et al. 2017 die Bedingungen (pH = 1,5, 180 °C, 24 h) und stellten 30 nm große gelbe WO_3-Nanopartikel mit einer Ausbeute von 90 % und einer Reinheit von 99,9 % her.

Sol-Gel-Verfahren

Unter Verwendung von Wolframsäure (H_2WO_4) als Ausgangsmaterial und Ethanol als Lösungsmittel wurde die Mischung 6 Stunden lang bei 60 °C gerührt und dann bei 500 °C kalziniert, um 20–50 nm große Partikel mit einer Ausbeute von 85 % zu erzeugen.

Mechanisches Schleifen

WO_3 in Mikrongröße (1-5 μm) wurde in eine Hochenergie-Kugelmühle (500 U/min, ZrO_2 - Kugeln, Kugel-Material-Verhältnis 10:1) gegeben und 12 Stunden lang gemahlen, um unregelmäßige Partikel mit einer Größe von 50-100 nm bei geringer Ausbeute (70 %) zu erhalten.

Daten und Analysen

Die spezifische Oberfläche nimmt mit abnehmender Partikelgröße deutlich zu. BET-Tests zeigen, dass 10 nm WO_3 50 m^2/g erreichen, 20 nm 35 m^2/g und 50 nm 20 m^2/g, was mit der Beziehung $S \propto 1/d$ übereinstimmt.

Die Adsorptionskapazität (H_2) steigt mit der spezifischen Oberfläche. Beispielsweise adsorbieren 50 m^2/g WO_3 15 cm^3/g und 20 m^2/g 8 cm^3/g. Die Langmuir-Isotherme entspricht der Adsorptionskonstante

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

$K \approx 0{,}1\ bar^{-1}$.

Photokatalytische Leistung

Die Effizienz der Wasserstoffproduktion unter sichtbarem Licht ($\lambda > 420$ nm) erreichte 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, die Quanteneffizienz betrug 5 %, die Abbaugeschwindigkeitskonstante (k) von Methylenblau (MB) betrug 0,05 min^{-1} und die Entfernungsrate lag bei 95 % in 90 Minuten.

Morphologie-Leistungs-Korrelation

Kleine Partikelgröße und große spezifische Oberfläche erhöhen die Zahl der aktiven Stellen an der Oberfläche. Beispielsweise ist die OH-Bildungsrate von 10 nm WO_3 (0,02 $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) doppelt so hoch wie die von 50 nm , was auf die höhere Elektronen-Loch-Trennungseffizienz (Trennungsrate 80 % gegenüber 60 %) zurückzuführen ist.

Anwendungserweiterungen

Photokatalysator

Es zeigt gute Ergebnisse bei der Wasserzersetzung und beim Abbau organischer Stoffe. Beispielsweise berichteten Chen et al. 2016, dass 50 nm WO_3 Rhodamin B innerhalb einer Stunde um 95 % abbaute, was besser ist als TiO_2 (80 %).

Antimikrobielle Beschichtung

Durch die photokatalytische Erzeugung von aktivem Sauerstoff (z. B. OH) können 99,9 % der Escherichia coli abgetötet werden (30 Min.), weshalb sich dieser Sauerstoff für die Oberfläche medizinischer Geräte eignet.

Arzneimittelträger

Die hohe spezifische Oberfläche unterstützt die Wirkstoffadsorption. Beispielsweise kann das Krebsmedikament Doxorubicin (DOX) mit einer Adsorptionsmenge von 50 mg/g beladen und die Freisetzungszeit auf 48 Stunden verlängert werden.

Eigenschaften von Wolframoxid-Nanodrähten

Durchmesser 10–50 nm, Länge 100–500 nm, Aspektverhältnis 5:1–10:1. Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigt eine eindimensionale Struktur mit bevorzugtem Wachstum entlang der (200)-Kristallebene. Die Leitfähigkeit beträgt bis zu 10^{-2} S/cm, die Oberflächenrauigkeit (RMS) beträgt etwa 5 nm, und die Anisotropie entlang der Achse verbessert die Leitfähigkeit und die Diffusionseigenschaften.

Herstellungsverfahren für Wolframoxid-Nanodrähte

Wolframoxid-Nanodrähte aus der Gasphase (CVD)

Bei 700 °C wurde in einer Argon /O_2-Atmosphäre (O_2-Verhältnis 10 %) Wolframmetalldraht als Vorläufer verdampft und auf einem Si-Substrat abgeschieden, um Nanodrähte mit einem Durchmesser von 20–30

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

nm zu erzeugen. Zheng et al. berichteten 2006, dass die Länge der mit dieser Methode synthetisierten Nanodrähte kontrollierbar war (200–500 nm).

Solvothermale Methode für Wolframoxid-Nanodrähte

Unter Verwendung von Na_2WO_4 und HCl als Rohstoffe, Ethanol/Wasser (1: 1) Lösungsmittel, Zugabe von NaCl (0,1 M) als Morphologie-steuerndes Mittel und Reaktion bei 200 °C für 12 Stunden wurden Nanodrähte mit einem Durchmesser von 10–20 nm mit einer Ausbeute von 88 % erzeugt.

Wolframoxid-Nanodraht-Vorlagenmethode

, um eine geordnete Nanodrahtanordnung mit einer Länge von bis zu 1 μm zu erhalten .

Daten und Analyse zu Wolframoxid-Nanodrähten

Die spezifische Oberfläche beträgt 30–40 m^2/g und ist damit niedriger als bei Nanopartikeln, aber höher als im Mikronbereich. Die NO_2-Adsorptionskapazität beträgt 0,2 mmol/g.

Elektrische Eigenschaften von Wolframoxid-Nanodrähten

Die axiale Leitfähigkeit beträgt 10^{-2} S/cm, in lateraler Richtung nur 10^{-4} S/cm. Die durch den Hall-Effekt gemessene Trägerbeweglichkeit (μ) beträgt etwa 5 $cm^2/V \cdot s$.

Sensorleistung von Wolframoxid-Nanodrähten von NO_2 erreicht 10 ppb, die Reaktionszeit beträgt <5 Sekunden und die Erholungszeit 15 Sekunden, was besser ist als bei Partikeln (Reaktionszeit 10 Sekunden).

Morphologie-Eigenschafts-Korrelation von Wolframoxid-Nanodrähten

Die eindimensionale Struktur bietet einen effizienten leitfähigen Pfad. Beispielsweise ist die Elektronentransferrate von Nanodrähten (10^{-6} m/s) dreimal so hoch wie die von Partikeln, und die Freilegung der Oberflächenkristallebene (200) verbessert die Adsorption von Gasmolekülen (Adsorptionsenergie -1,2 eV gegenüber -0,8 eV).

Anwendungen für Wolframoxid-Nanodrähte erweitern

Wolframoxid-Nanodraht-Gassensor von H_2 und CO beträgt 50 ppb bzw. 100 ppb, was für die Überwachung brennbarer Gase geeignet ist. Das jährliche Verkaufsvolumen beträgt etwa 10^5 Einzelgeräte .

Elektrochromer Film aus Wolframoxid-Nanodrähten

Reaktionszeit auf 2 Sekunden reduziert, optischer Modulationsbereich 70 %, für den Einsatz in Smart Windows (Energieeinsparung 30 %).

Fotodetektor: Eindimensionale Struktur verbessert die Fotostromdichte (0,8 mA/cm^2) und die Empfindlichkeit auf bis zu 0,2 A/W, geeignet für die UV- Detektion.

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

Eigenschaften von Wolframoxid-Nanoblättern

Dicke 5–20 nm, Breite 50–200 nm, spezifische Kapazität 400–500 F/g. Die hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie (HRTEM) zeigt eine Schichtstruktur, ein (002)-Kristallebenen-Belichtungsverhältnis von 40–50 %, und einen Schichtabstand von ca. 3,85 Å. Die zweidimensionale Struktur verbessert die Ionendiffusion und die Energiespeicherfähigkeit.

Wolframoxid -Nanoblätter

Hydrothermale Methode

Unter Verwendung von Na_2WO_4 und HCl als Ausgangsstoffe, Zugabe von Harnstoff (0,5 M) als Reduktionsmittel und einer Reaktion bei 180 °C für 24 Stunden wurden $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoblätter mit einer Ausbeute von 90 % erzeugt. Im Jahr 2015 berichteten Guo et al. über 5 nm dicke Nanoblätter.

Abisoliermethode

$WO_3 \cdot H_2O$ wurde durch Ultraschallbehandlung in DMF (500 W, 2 h) in 10 nm dicke einschichtige Nanoblätter mit einer Ausbeute von 70 % exfoliert.

Thermische Zersetzungsmethode

Unter Verwendung von Ammoniummetawolframat (AMT) als Vorläufer wurde es in einer 400 °C heißen CN_2-Atmosphäre zersetzt, um 20 nm dicke poröse Nanoblätter zu erzeugen.

Daten und Analyse von Wolframoxid-Nanoblättern

Die spezifische Oberfläche beträgt 35–45 m^2/g, die Porosität 20–25 %, die Porengröße 5–10 nm, der Li^+-Diffusionskoeffizient 10^{-8} cm^2/s und die spezifische Kapazität steigt mit abnehmender Dicke auf 500 F/g.

Wasserstoffspeicherleistung

Die Kapazität beträgt 1,5 Gew.- % und die Zyklenstabilitätsrate beträgt 90 % nach 500 Zyklen.

Photokatalytische Leistung

Die Geschwindigkeitskonstante für den Abbau von Rhodamin B beträgt 0,08 min^{-1} und die Quanteneffizienz beträgt 15 %.

Morphologie-Leistungs-Korrelation

Die große freiliegende Kristalloberfläche und die Porosität der zweidimensionalen Struktur verbessern die Ionendiffusionsrate . Beispielsweise ist der Li^+-Diffusionskoeffizient von 5 nm großen Nanoblättern zehnmal höher als der von Partikeln, und die Dichte der aktiven Stellen an der Oberfläche ($1{,}2 \times 10^{18}$ m^{-2}) unterstützt effiziente elektrochemische Reaktionen.

Erweiterte Anwendungsgebiete für Wolframoxid-Nanoblätter

Superkondensatoren

Die Energiedichte beträgt 50–100 Wh /kg, die Leistungsdichte 10 kW/kg, geeignet für Geräte zum schnellen Laden und Entladen.

Lithium-Ionen-Akku

Kapazität 600 mAh /g, Spannungsplattform 2,5 V, Zyklenlebensdauer 10^3 mal, für tragbare elektronische Produkte.

Photothermische Materialien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Die Infrarotabsorptionsrate beträgt 85 % und die Oberflächentemperatur steigt auf 70 °C, was zur Nutzung der Solarthermie und zur Hyperthermietherapie bei Krebserkrankungen genutzt wird.

Morphologiekontrolle und Entwicklungstrends

Regulierungsmechanismus

Tenside (wie CTAB und PVP) regulieren die Morphologie durch selektive Adsorption. Steigt beispielsweise die CTAB-Konzentration von 0,01 M auf 0,05 M, verändert sich die Morphologie von Partikeln zu Stäbchen. Die Reaktionstemperatur (150–200 °C) und der pH-Wert (1–3) beeinflussen die Richtung des Kristallkeimwachstums.

T rend

Zukünftige Forschungen werden sich auf mehrdimensionale Kompositmorphologien (wie etwa Kern-Schale-Partikel-Nanodrähte) konzentrieren, beispielsweise auf die Synthese von WO_3/ TiO_2 -Kern-Schale-Nanodrähten (Kerndurchmesser 20 nm, Schalendicke 5 nm), die eine hohe spezifische Oberfläche und Leitfähigkeit vereinen, um die photokatalytische Effizienz um 50 % zu steigern.

2.2.2 Dichte, Härte und thermodynamische Eigenschaften

Dichte, Härte und thermodynamische Eigenschaften von Nano-WO_3 werden durch Partikelgröße, Morphologie und Defekte beeinflusst. Die detaillierte Analyse lautet wie folgt:

Dichte

Funktionen auf Mikronebene

monoklines WO_3 beträgt 7,16 g/ cm^3, orthorhombische Phase 7,1 g/cm^3 , tetragonale Phase 7,0 g/ cm^3 und Hydrat ($WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$) wird auf 6,5-6,8 g/cm^3 reduziert , gemessen mit der Archimedes-Methode. Die Gitterdichte wird berechnet, indem die Einheitszellmasse (M = 231,84 g/mol × Z, Z=4) durch das Volumen ($V \approx 423{,}5$ $Å^3$) geteilt wird . Der theoretische Wert stimmt mit dem Experiment überein.

Nanoskalige Eigenschaften

Die scheinbare Dichte nimmt aufgrund der Porosität (10–20 %) und der Oberflächenfeuchtigkeit ab. Beispielsweise betragen 20 nm WO_3 6,9 g/cm^3 und 10 nm 6,8 g/cm^3 .

Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Simulationen

% Zunahme des Sauerstoffleerstellenanteils verringert sich die Dichte um 0,05 g/cm^3 . Beispielsweise beträgt die Dichte von $WO_{2.9}$ 7,05 g/cm^3 .

Der Einfluss der Morphologie: Die Dichte von Nanosheets (Porosität 20%) beträgt 6,7 g/cm^3 , die von Nanopartikeln (Porosität 10%) 6,9 g/cm^3 und die von Nanowires liegt dazwischen (6,8 g/cm^3) .

Experimentelle Daten:

WO_3 in Ethanol betrug 6,85 g/cm^3, bestimmt durch die Auftriebsmethode, und die Porosität wurde durch die Hg-Intrusionsmethode (15 %) überprüft.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendungsbedeutung

Eine geringere Dichte erhöht den Auftrieb und eignet sich daher für schwebende Beschichtungen (wie selbstreinigendes Glas, das die Masse um 10 % reduziert). Eine geringe Dichte kann jedoch die mechanische Festigkeit verringern und eine Verbundverstärkung erforderlich machen.

Härte

Funktionen auf Mikronebene

Mohshärte 4–5, Vickershärte (HV) 400–500, Nanoindentationstest (Last 10 mN) ergibt Härte 4,0 GPa , Elastizitätsmodul (E) ca. 100 GPa . Die Härte ist geringer als die von Aluminiumoxid (HV 2000), aber höher als die von Polymeren (HV < 100).

Nanoskalige Eigenschaften

Korngrenzeneffekte und Defekte verringern die Härte. Beispielsweise beträgt die Härte von 20 nm WO_3 3,5 GPa (HV 350), bei 10 nm sinkt sie auf 3,0 GPa (HV 300).

Morphologische Unterschiede

Nanopartikel haben eine hohe Härte (3,5 GPa) , Nanoblätter haben aufgrund ihrer Schichtstruktur eine auf 3,2 GPa reduzierte Härte und Nanodrähte haben eine Härte von 3,4 GPa in axialer Richtung und nur 2,8 GPa in lateraler Richtung (Anisotropie).

Mechanismus

Die Hall-Petch-Beziehung ($H \propto d^{-1/2}$) sagt aus, dass die Härte mit abnehmender Korngröße zunimmt, dass jedoch das Gleiten und die Defekte an den Korngrenzen im Nanomaßstab dominieren und zu einer Abnahme der Härte führen.

Experimentelle Daten

Durch Nanoindentation (Berkovich-Sonde, Belastung 5-20 mN) wurde festgestellt, dass die Eindringtiefe von 50 nm WO_3 200 nm betrug und die plastische Deformation 30 % ausmachte, bei 10 nm stieg sie auf 40 %.

Anwendungsbedeutung

Eine moderate Härte unterstützt die Verschleißfestigkeit der Beschichtung, beispielsweise beträgt die Kratzfestigkeit von intelligenten Fensterfolien mehr als das 500-fache; die Abnahme der Härte im Nanomaßstab erfordert eine Verstärkung auf 4,5 GPa durch Dotierung (wie ZrO_2) .

Thermodynamische Eigenschaften:

Schmelzpunkt und Flüchtigkeit:

Mikronebene

Der Schmelzpunkt liegt bei 1473 °C, es beginnt bei >1100 °C zu verdampfen und zersetzt sich in $WO_{2.9}$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_{2.9} + 0{,}5O_2$) , die Verdampfungsrate beträgt 0,01 $g/cm^2 \cdot h$, die Aktivierungsenergie (Ea) beträgt 250 kJ/mol.

Nanoskala

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Die Oberflächenenergie (1,5 J/m²) reduziert die Verflüchtigungstemperatur auf 1000 °C. Beispielsweise erhöht sich die Verflüchtigungsrate von 20 nm WO_3 bei 1050 °C auf 0,02 g/cm² · h und Ea sinkt auf 220 kJ/mol.

Daten

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) zeigte, dass der Massenverlust von WO_3 in Mikrongröße vor 1200 °C weniger als 1 % betrug, während der von WO_3 in Nanogröße bei 1000 °C 2 % erreichte, was auf die beschleunigte Zersetzung von Sauerstoffleerstellen zurückgeführt wurde.

Spezifische Wärme:

Mikronebene

0,33 J/ g·K (25 °C), mit zunehmender Temperatur ansteigend auf 0,35 J/ g·K (500 °C), bestimmt durch Differenzial-Scanning-Kalorimetrie (DSC).

Nanoskala

Die Phononenstreuung wird verstärkt und die spezifische Wärmekapazität sinkt auf 0,30 J/ g·K (20 nm) und beträgt 0,28 J/ g·K bei 10 nm, mit geringer Auswirkung auf die Morphologie (0,29 J/ g·K für Nanoblätter) .

Mechanismus

Das Debye-Modell sagt voraus, dass die spezifische Wärmekapazität um 10–15 % abnimmt, wenn die mittlere freie Weglänge (Λ) von Nanophononen von 50 nm auf 10 nm abnimmt.

Wärmeleitfähigkeit:

Mikronebene

1,5 W/ m·K (25°C), ansteigend auf 1,8 W/ m·K (500°C), der thermische Diffusionskoeffizient (α) beträgt etwa 0,6 mm²/s.

Nanoskala

1,2 W/ m·K (20 nm), sank auf 1,0 W/ m·K bei 10 nm und α sank aufgrund verstärkter Phononenstreuung auf 0,5 mm²/s .

Morphologischer Effekt

Der Nanodraht weist eine Leistung von 1,3 W/ m·K in axialer Richtung und 0,9 W/ m·K in lateraler Richtung auf, während das Nanoblatt aufgrund seiner hohen Porosität nur eine Leistung von 1,1 W/ m·K aufweist .

Wärmeausdehnungskoeffizient:

Der Wert im Mikronbereich beträgt $8 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ (25 – 500 °C), und der Wert im Nanobereich steigt auf $10 \times 10^{-6}\ K^{-1}$. Aufgrund der erhöhten Oberflächenspannung stimmt die durch XRD ermittelte Gitterausdehnungsrate mit der Theorie überein.

Anwendungsbedeutung:

Die niedrige Wärmeleitfähigkeit verbessert die photothermische Umwandlungseffizienz (80 %, Oberflächentemperatur 70 °C), geeignet für Solarkollektoren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Eine hohe Temperaturstabilität (>1000°C ohne Zersetzung) ist für keramische Additive von Vorteil, für die Verflüchtigung im Nanomaßstab ist jedoch eine kontrollierte Atmosphäre (wie etwa N_2) erforderlich . Die Anpassung der Wärmeausdehnung unterstützt die Verbundkonstruktion, z. B. eine WO_3/ SiO_2 -Beschichtung mit einer Wärmespannung <0,1 GPa .

2.2.3 Spezifische Oberfläche und Porenstruktur

Mikronebene

5–10 m^2/g, dichte Partikel, Porosität <5 %, BET-Test mittels N_2- Adsorption, glatte Oberfläche (RMS <1 nm).

Nanoskala

Bereich 20–60 m^2/g, variiert je nach Morphologie: Nanopartikel 20–30 m^2/g, Nanodrähte 30–40 m^2/g, Nanoblätter 35–45 m^2/g, poröses WO_3 bis zu 50–60 m^2/g.

Daten

/(ρ · d) entspricht (ρ ist die Dichte, d ist die Partikelgröße).

Morphologischer Einfluss

Die spezifische Oberfläche der porösen Nanoblätter erhöhte sich aufgrund der Zwischenschichtporen auf 60 m^2/g, und die SEM zeigte, dass die Poren gleichmäßig verteilt waren (Porengröße 5–15 nm).

Experimentelle Überprüfung

Das Langmuir-Modell passt zur Adsorptionsisotherme und die Adsorptionskonstante K steigt von 0,05 bar^{-1} auf der Mikrometerebene auf 0,15 bar^{-1} auf der Nanometerebene, was die erhöhte Oberflächenaktivität widerspiegelt.

Porenstruktur:

Charakteristisch :

Die Porengrößenverteilung beträgt 5–20 nm und gehört zum mesoporösen Bereich (2–50 nm). Die BJH-Analyse zeigt, dass der Peak bei 10 nm liegt und die Porosität 10–30 % beträgt.

Porenvolumen

Das poröse WO_3 beträgt 0,15 cm^3/g, die Nanoblätter 0,10 cm^3/g und die Nanopartikel 0,05 cm^3/g, bestimmt mit der Hg-Intrusionsmethode.

Porentyp

Nanoblätter sind Poren zwischen den Schichten, Nanopartikel sind Poren zwischen den Partikeln und poröses WO_3 ist eine dreidimensionale Netzwerkpore (Konnektivität 80 %).

Daten und Analysen

Die adsorbierte H_2-Menge steigt mit der Porosität. Beispielsweise adsorbiert WO_3 bei einer Porosität von 20 % 15 cm^3/g, bei 10 % 8 cm^3/g. Die Adsorptionswärme (Q _ st) beträgt etwa 20 kJ/mol.

NO_2-Adsorption

$_3$ erreichte bei 50 m^2/g 0,2 mmol/g und bei 20 m^2/g 0,1 mmol/g, und die Adsorptionskinetik entsprach dem Pseudo-Zweitordnungsmodell ($k_2 \approx 0,05$ g/ mg·min).

Porositätseffekt

Wenn die Porosität von 10 % auf 30 % zunimmt, erhöht sich der Gasdiffusionskoeffizient (D _ eff) von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10^{-6} cm^2/s auf 10^{-5} cm^2/s.

Vorbereitung und Regulierung

Die Vorlage (z. B. PEG, 0,1 M) wurde durch die hydrothermale Methode hinzugefügt, um eine poröse Struktur zu erzeugen, und die Kalzinierungstemperatur (400–600 °C) kontrollierte die Porengröße, beispielsweise betrug die Porengröße 10 nm bei 500 °C und erhöhte sich bei 600 °C auf 15 nm.

Durch die Lösungsmittelverdampfungsmethode (Ethanol/Wasser-Verhältnis 2:1) wurde eine Porosität von 25 % bei einer Ausbeute von 85 % erreicht.

Korrelation zwischen Morphologie und Porosität

Nanopartikel: geringe Porosität (10 %), spezifische Oberfläche wird von der Partikelgröße dominiert, aktive Stellen sind auf der Oberfläche konzentriert.

Nanodrähte: mittlere Porosität (15 %), axiale Poren verbessern die Gasdiffusion und die Oberflächenrauheit verbessert die Adsorption.

Nanoblätter: Hohe Porosität (20–30 %), Poren zwischen den Schichten erhöhen die Ionenkanäle, beispielsweise erhöht sich die Li^+-Diffusionsrate um 50 %.

Anwendungsbedeutung

Energiespeicherung: Eine hohe spezifische Oberfläche und Porosität ermöglichen eine spezifische Kapazität von bis zu 500 F/g und eine auf 90 % erhöhte Elektrolytdurchlässigkeit, geeignet für Superkondensatoren.

Photokatalyse: Die poröse Struktur verbessert die Farbstoffadsorption (Adsorptionsmenge 50 mg/g) und die Wasserstoffproduktionsrate erreicht 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Sensor: Hohe Porosität für schnelle Reaktionszeit (<5 Sekunden) und NO_2-Erkennungsgrenze bis zu 5 ppb.

Katalytischer Träger: Unterstützt die Beladung mit Edelmetallen (z. B. Pt). Die CO-Oxidationsaktivität von Pt/WO_3 erreicht 0,1 mol/ g· h .

2.3 Optische Eigenschaften

2.3.1 Bandlückenenergie (2,4-2,8 eV)

Grundlegende Eigenschaften: WO_3 ist ein Halbleiter mit indirekter Bandlücke und einer Bandlückenenergie von 2,4–2,8 eV. Die Unterseite des Leitungsbandes besteht aus W 5d-Orbitalen, die Oberseite des Valenzbandes wird aus O 2p-Orbitalen gebildet.

Mikrometerskala: 2,6 eV für monokline Phase, 2,5 eV für orthorhombische Phase, 2,4 eV für tetragonale Phase, gemessen mit der Tauc -Auftragsmethode $((\alpha h \nu)^2 = A(h \nu - Eg))$, der Absorptionskoeffizient (α) liegt zwischen 10^4 -10^5 cm^{-1} .

Nanoskala: Quanteneffekte erhöhen die Bandlücke auf 2,8 eV (20 nm). Beispielsweise beträgt 10 nm WO_3 2,85 eV, mit einer Blauverschiebung von etwa 0,2 eV. Die Formel $\Delta Eg = h^2 / (8m d^2)$ *geschätzt (m* $\approx 0{,}5\ m_0$) .

Auswirkungen von Defekten: Die Bandlücke von schwarzem WO_3 (Sauerstoffleerstelle 10^{20} cm^{-3}) wird auf 2,0 bis 2,4 eV reduziert, und DFT-Rechnungen zeigen, dass sich der Defektzustand bei 0,5 eV in der Bandlücke befindet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendung: Die Bandlücke bestimmt den Lichtabsorptionsbereich, 2,4–2,8 eV deckt sichtbares Licht (400–500 nm) ab, geeignet für die Photokatalyse (Wasserstoffproduktionseffizienz 5 %–15 %).

2.3.2 Absorptionskante und Farbmechanismus

Absorbierende Kante:

Gelbes WO_3 : Absorptionskante 450 nm (2,6-2,8 eV), UV-Vis zeigt Absorptionsspitze bei 400-450 nm, reflektiert gelbes Licht (570-590 nm).

Blaues WO_3 : Die Absorptionskante verschiebt sich in den Rotbereich zu 550 nm (2,4-2,6 eV), und die Reflektivität sinkt aufgrund der durch Sauerstoffleerstellen verursachten Defektzustände auf 20 %.

Schwarzes WO_3 : Absorptionskante >600 nm (2,0-2,4 eV), Absorption im gesamten Spektrum (400-1000 nm), Reflexionsvermögen <5 %.

Daten: Die optische Dichte (OD) steigt von Gelb (0,5–1,0) nach Schwarz (2,0–2,5) an, und der Absorptionskoeffizient steigt mit zunehmendem Defekt von 10^4 cm^{-1} auf 10^5 cm^{-1} an .

Farbmechanismus:

Theorie: Die Farbe wird durch den Bandlückenübergang (dd-Übergang) und die Absorption im Defektzustand bestimmt. Die Farbe des gelben WO_3 entsteht durch die Absorption von blauem Licht durch die d^0-Konfiguration von W^{6+} , die Einführung von Bandlückenzuständen durch W^{5+} (d^1) im blauen WO_3 und die hohe Defektdichte (W^{4+}/W^{5+}) im schwarzen WO_3, die zur Absorption im gesamten Spektrum führt.

Experiment: Photolumineszenzspektren (PL) zeigen, dass der Emissionspeak von gelbem WO_3 bei 450 nm liegt (Bandlückenstrahlung) und blaues und schwarzes WO_3 Defektpeaks bei 600–700 nm aufweisen.

Auswirkungen: Die Rotverschiebung der Absorptionskante verbessert die Nutzung des sichtbaren Lichts. Beispielsweise erreicht die Solarenergienutzungsrate von schwarzem WO_3 90 %.

Anwendung: Der Farbmechanismus unterstützt die Photokatalyse (Abbaurate von schwarzem WO_3 0,1 min^{-1}) und die photothermische Umwandlung (Infrarotabsorptionsrate 85 %).

2.3.3 Photochrome und elektrochrome Eigenschaften

Photochrom:

Mechanismus: Ultraviolettes Licht ($\lambda < 400$ nm) regt Elektron-Loch-Paare an, die Löcher reagieren mit H_2O zu H^+ , das in WO_3 eingebettet wird und H_xWO_3 (x =0,1-0,5) bildet . Die Farbe ändert sich von Gelb nach Blau. Reaktion: $WO_3 + xh\nu + xH_2O \rightarrow H_xWO_3 + x / 2O_2$.

Die Photostromdichte von WO_3 im Mikronbereich beträgt 0,1 mA/cm^2 und die Reaktionszeit 5 Minuten; die Photostromdichte im Nanobereich (20 nm) erhöht sich aufgrund der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche auf 0,5 mA/cm^2 und <1 Minute.

Anwendung: Für Lichtsensoren und selbstdimmende Beschichtungen mit einer Farbwechseleffizienz von bis zu 50 cm^2/C.

Elektrochrom:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ein elektrisches Feld (1-3 V) wird angelegt, Li^+ oder H^+ wird eingebettet, um Li_xWO_3 zu bilden , Elektronen werden in W^{6+} injiziert, um W^{5+} zu werden , und die Durchlässigkeit sinkt von 80 % auf 10 %.
Reaktion: $WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightarrow Li_xWO_3$.
Daten: Die Reaktionszeit von Nano-WO_3 beträgt 2–5 Sekunden (10 Sekunden auf Mikrometerebene), der optische Modulationsbereich beträgt 70 % und die Zyklusstabilität beträgt das 10^4- fache. Der Li^+-Diffusionskoeffizient steigt von 10^{-11} cm^2/s auf 10^{-9} cm^2/s.
Anwendungen: Intelligente Fenster (Energieeinsparung 30 %), Anzeigegeräte (Kontrastverhältnis 100:1).

2.4 Elektrische Eigenschaften

2.4.1 Eigenschaften von n-Typ-Halbleitern

Grundlegende Eigenschaften: WO_3 ist ein n-Typ-Halbleiter. Die untere Grenze des Leitungsbandes wird durch das W 5d-Orbital (-4,5 eV vs. Vakuumenergieniveau) und die obere Grenze des Valenzbandes durch das O 2p-Orbital (-7,1 eV) gebildet. Die effektive Masse (m*) beträgt etwa 0,5 m_0 (Elektronenmasse).
Trägerquelle: Sauerstoffleerstellen wirken als Elektronendonatoren mit einer Konzentration von 10^{16} - 10^{20} cm^{-3} . DFT-Rechnungen zeigen, dass das Donatorenergieniveau jeder Sauerstoffleerstelle 0,2-0,3 eV unterhalb des Leitungsbandes liegt.
Daten: Die Bandlückenbreite von WO_3 im Mikrometerbereich beträgt 2,6 eV und steigt im Nanometerbereich auf 2,8 eV an. Die Trägerbeweglichkeit (μ) beträgt etwa 1-5 $cm^2/V·s$.
Anwendungen: n-Typ-Eigenschaften unterstützen die Fotodetektion (Empfindlichkeit 0,1 A/W) und die Gaserkennung (Empfindlichkeit 10-50).

2.4.2 Leitfähigkeit und Ladungsträgerkonzentration

Leitfähigkeit:
Mikronwert: 10^{-6} -10^{-5} S/cm, gelbes WO_3 ist am niedrigsten (10^{-6} S/cm).
Nanoskala: 10^{-4} -10^{-2} S/cm, blaues WO_3 (10^{-3} S/cm), schwarzes WO_3 hat den höchsten Wert (10^{-2} S/cm), gemessen mit der Vier-Sonden-Methode.
Temperatureffekt: Bei 300 °C steigt die Leitfähigkeit auf 10^{-2} S/cm und die Aktivierungsenergie (Ea) beträgt etwa 0,2 eV, was der Arrhenius-Gleichung entspricht ($\sigma = \sigma_0 \exp(- Ea / kT)$).
Trägerkonzentration:
Mikrometerskala: 10^{16} -10^{17} cm^{-3} , Hall-Effekt-Messung.
Nanoskala: 10^{18} -10^{20} cm^{-3} , schwarzes WO_3 hat aufgrund der erhöhten Defektdichte den höchsten Wert.
Anwendungen: Hohe Leitfähigkeit unterstützt elektrochemische Sensoren (Reaktionszeit <5 Sekunden) und Energiespeicherung (Leistungsdichte 10 kW/kg).

2.4.3 Dielektrizitätskonstante und elektrochemische Eigenschaften

Dielektrizitätskonstante (εr) :
Mikron: 20–50 (1 kHz), mit der Frequenz abnehmend bis 10 (1 MHz).
Nanoskala: 15–30, aufgrund von Defekten und reduzierter Porosität beträgt der dielektrische Verlust (tan δ) etwa 0,05.
Daten: Der εr-Wert des Nanodrahts WO_3 beträgt 25 (1 kHz), was für Hochfrequenzgeräte geeignet ist.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Elektrochemische Leistung:

Superkondensatoren: Spezifische Kapazität 300-500 F/g, Zyklenlebensdauer 10^4- mal, Energiedichte 50-100 Wh /kg, aufgrund der großen spezifischen Oberfläche und Ionendiffusion ($D = 10^{-8}$ cm^2/s).

Batterie: Li^+-Einlagerungskapazität 600 mAh /g, Spannungsplateau 2,5 V vs. Li/Li^+ .

Anwendungen: Hohe Dielektrizitätskonstante und elektrochemische Aktivität unterstützen Energiespeicherung und elektrochrome Geräte.

2.5 Chemische Eigenschaften

2.5.1 Redoxverhalten

Nano-WO_3 ist der Kern seiner chemischen Eigenschaften und wird maßgeblich durch Nanoeffekte, Morphologie und Defekte beeinflusst. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse aus den Perspektiven von Mechanismus, Experiment, Kinetik und Anwendung:

Oxidationsreaktion:

Mechanismus: $WO_{2.9}$ oder WO_{3-x} (x = 0,1–0,5) wird in einer O_2- Atmosphäre zu WO_3 oxidiert. Die Reaktion lautet $WO_{2.9} + 0{,}05O_2 \rightarrow WO_3$. Die Enthalpieänderung (ΔH) beträgt ca. -50 kJ/mol. Die Sauerstoffleerstellen werden gefüllt, W^{5+} wird zu W^{6+} oxidiert , und das Gitter nimmt wieder monokline Symmetrie an.

Mikronskala: Oxidationsrate bei 500°C 0,01 g/min, Aktivierungsenergie (Ea) ca. 100 kJ/mol, TGA zeigt eine Massenzunahme von 0,5 % (O_2 -Aufnahme) .

Nanoskala:

Die Oberflächenaktivität wurde erhöht, die Oxidationsrate von 20 nm WO_3 bei 400 °C auf 0,05 g/min erhöht und Ea auf 80 kJ/mol gesenkt. Die spezifische Oberfläche (50 m^2/g) erhöhte die O_2-Adsorption (Adsorptionsmenge 0,1 mmol/g).

Einfluss der Morphologie: Die Oxidationsrate von Nanoblättern (Porosität 20 %) beträgt 0,06 g/min, die von Nanopartikeln 0,05 g/min und die von Nanodrähten 0,04 g/min aufgrund eindimensionaler Diffusionsbegrenzung.

Experimentelle Daten: XPS bestätigte, dass das W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis nach der Oxidation von 0,15 auf 0,02 sank und die Intensität des Gittersauerstoffpeaks (530,5 eV) von O1s auf 90 % anstieg. XRD zeigte, dass sich der charakteristische Peak nach 400 °C von WO_{29} änderte . (2 θ = 23,8°) bis WO_3 (2 θ = 23,1°).

Kinetik: Die Oxidation folgt dem Modell einer schrumpfenden Kugel $(1-(1-\alpha)^{1/3} = kt)$, wobei die Geschwindigkeitskonstante k von 0,001 min^{-1} im Mikrometermaßstab auf 0,005 min^{-1} im Nanometermaßstab ansteigt .

Reduktionsreaktion:

Mechanismus: WO_3 erzeugt $WO_{2.9}$ oder WO_2 unter der Einwirkung eines Reduktionsmittels (wie H_2, $NaBH_4$), und die Reaktion ist $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ (x = 0,1-1) . Sauerstoffleerstellen werden erzeugt, W^{6+} wird in W^{5+} oder W^{4+} umgewandelt und die Bandlücke wird auf 2,0-2,4 eV reduziert.

Mikronebene:

Bei 800 °C, 5 % H_2 / Ar Atmosphäre wird es mit einer Rate von 0,02 g/min und einem Ea von etwa 200 kJ/mol zu $WO_{2.9}$ reduziert . Bei >1000 °C wird WO_2 erzeugt (Ea 250 kJ/mol).

mit $NaBH_4$ (0,1 M, 60 °C) benötigt 4 Stunden, um blaues WO_{3-x} (x ≈ 0,05) zu erzeugen.

Nanoskala:

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

10 nm WO_3 können bei 600 °C $WO_{2.9}$ mit einer Rate von 0,05 g/min erzeugen, und Ea sinkt auf 180 kJ/mol, weil die Oberflächenenergie die Reaktionsbarriere verringert.

Die Reduktionszeit von $NaBH_4$ wurde auf 1 Stunde verkürzt, wodurch schwarzes WO_{3-x} ($x \approx 0,1$) mit einer Ausbeute von 90 % entstand .

Einfluss der Morphologie: Die Reduktionsrate von Nanodrähten beträgt 0,06 g/min (schnelle eindimensionale Diffusion), von Nanoblättern 0,05 g/min und von Partikeln 0,04 g/min.

Experimentelle Daten:

EPR zeigte, dass die Intensität des Sauerstoffleerstellensignals (g=2,002) um das Fünffache zunahm, und XPS maß den Anteil von W^{4+} (34,5 eV) und erreichte 5–10 %.

UV -Vis -Spektrum: Die Absorptionskante verschiebt sich von 450 nm auf 600 nm in den Rotbereich und die optische Dichte steigt auf 2,0.

Kinetik: Die Reduktion entsprach dem Avrami- Modell ($-\ln(1-\alpha) = kt^n$, $n \approx 2$), wobei k von 0,002 min^{-1} auf 0,01 min^{-1} anstieg.

Redox-Zyklus:

Eigenschaften: Nano-WO_3 kann zwischen Oxidation (O_2, 400 °C) und Reduktion (H_2, 600 °C) wechseln, wobei aufgrund seiner starken Selbstheilungsfähigkeit von Nanodefekten nach 50 Zyklen ein Aktivitätsverlust von <10 % auftritt.

Daten: Die Oberfläche sank von 50 m^2/g auf 45 m^2/g, die Bandlücke schwankte zwischen 2,6 eV und 2,5 eV und die Zyklenstabilität war besser als im Mikronbereich (Verlust von 20 %).

Anwendungsbedeutung:

Wolframpulverherstellung: Blaues WO_3 wird bei 900°C und 10% H_2 zu Wolframpulver mit einer Reinheit von 99,95% und einer Partikelgröße von 1-5 µm für Hartmetall reduziert .

Photokatalyse: Redox erzeugt aktiven Sauerstoff mit einer Sauerstoffproduktionseffizienz von 15 % und einer Formaldehyd-Abbaurate von 0,1 min^{-1}.

Energiespeicherung: Redoxpaar (W^{6+}/W^{5+}) erhöht die Batteriekapazität (600 mAh /g) und eignet sich für reversible Energiespeicher.

Farbkontrolle: Reduziert auf blau/schwarzes WO_3 für photochrome Beschichtungen (Reaktionszeit <1 Min.).

2.5.2 Stabilität und Volatilität

Thermische Stabilität:

Mikronebene:

Es ist in Luft bis 1100 °C stabil und verflüchtigt sich bei 1200 °C unter Bildung von $WO_{2.9}$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_{2.9} + 0,5O_2$) mit einer Verflüchtigungsrate von 0,01 $g/cm^2 \cdot h$ und einem Ea von 250 kJ/mol.

Die TGA zeigte, dass der Massenverlust vor 1000 °C <0,5 % betrug und nach 1200 °C auf 1–2 % anstieg. Mittels Massenspektrometrie (MS) wurde bestätigt, dass es sich bei dem flüchtigen Produkt um $WO_{2.9}$ (m/z = 215,9) handelte.

Nanoskala:

die Verflüchtigungsrate von 20 nm WO_3 bei 1050 °C beträgt 0,02 $g/cm^2 \cdot h$ und Ea beträgt 220 kJ/mol.

Einfluss der Morphologie: Die Verflüchtigungsrate von Nanoblättern (Porosität 20 %) beträgt 0,03 $g/cm^2 \cdot h$, die von Nanopartikeln 0,02 $g/cm^2 \cdot h$ und die von Nanodrähten 0,015 $g/cm^2 \cdot h$ (eindimensionale

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

begrenzte Verflüchtigung).

Daten: 10 nm WO_3 verliert bei 1000°C 3 % seiner Masse, was auf die beschleunigte Zersetzung von Sauerstoffleerstellen (Konzentration 10^{20} cm^{-3}) zurückgeführt wird.

Mechanismus: Die Verflüchtigung wird durch die Sauerstoffdesorption an der Oberfläche verursacht, und die hohe Krümmung und Defekte im Nanomaßstab verringern die Desorptionsenergie (von 300 kJ/mol auf 260 kJ/mol).

Kontrollmethode: Die Verdampfungsrate wurde unter N_2-Atmosphäre auf 0,005 g/cm²·h reduziert und die Verdampfungstemperatur durch Hinzufügen einer SiO_2 -Beschichtung (5 nm dick) auf 1150 °C erhöht .

Chemische Stabilität:

Im Wasser:

Die Löslichkeit im Mikronbereich beträgt <0,02 g/100 ml (25 °C, pH 7), die Auflösungsrate beträgt 0,001 g/min und das Gleichgewicht erreicht sich erst nach mehreren Tagen.

im Nanomaßstab steigt aufgrund der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche auf 50 m²/g auf 0,005 g/min. Beispielsweise lösen 20 nm WO_3 innerhalb von 24 h 0,1 g/100 ml.

Saure Umgebung:

Bei einem pH-Wert < 2 (6 M HCl) löst es sich langsam (0,01 g/min) im Mikronbereich auf und erzeugt WCl_6, die auf Nanometerebene auf 0,05 g/min ansteigt, mit einer Löslichkeit von 0,5 g/100 ml.

Daten: 20 nm WO_3 verliert bei pH = 1 (24 h) 10 % seiner Masse, was auf die verstärkte Säuredissoziation von Oberflächen-OH zurückzuführen ist.

Alkalische Umgebung:

Es löst sich schnell in 1 M NaOH mit einer Rate von 0,1 g/min im Mikrometerbereich und steigt auf 0,2 g/min im Nanometerbereich auf, wodurch Na_2WO_4 mit einer Löslichkeit von >10 g/100 ml entsteht.

Oxidative Umgebung: In O_3 oder H_2O_2 erhöht sich die Oberflächenoxidationsrate von Nano-WO_3 auf 0,02 g/min, wodurch $WO_3 \cdot H_2O$ entsteht.

Umweltstabilität:

Luftfeuchtigkeit: Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) > 80 % adsorbiert Nano-WO_3 Wasser (0,2 g/g) und bildet $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$. Die TGA zeigt bei 100–300 °C einen Massenverlust von 5–10 %.

Photokorrosion : Unter ultraviolettem Licht (λ < 400 nm) ist WO_3 in Mikrongröße stabil (Masseverlust < 0,1 %), während WO_3 in Nanogröße aufgrund erhöhter photokatalytischer Aktivität bis zu 1 % (24 h) verliert.

Anwendungsbedeutung:

Hochtemperaturbeschichtung: Die thermische Stabilität wird durch keramische Additive unterstützt (>1000°C ohne Zersetzung), nanoskalige SiO_2 -Komposite werden auf 1100°C erhöht.

Umweltüberwachung: Die chemische Stabilität ermöglicht den Langzeiteinsatz des Sensors in sauren Gasen (NO_2) (Lebensdauer > 1 Jahr).

Verflüchtigungskontrolle: N_2-Atmosphäre oder Dotierung mit Al_2O_3 (5 Gewicht %) reduziert die Verflüchtigungsrate bei Hochtemperaturgeräten auf 0,002 g/cm²·h.

2.5.3 Reaktivität mit Säuren, Basen und Reduktionsmitteln

Reaktivität mit Säuren:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Mechanismus: WO_3 reagiert mit starker Säure (z. B. HCl) zu löslichem Wolframsalz. Die Reaktion ist $WO_3 + 6HCl \rightarrow WCl_6 + 3H_2O$, $\Delta H \approx -150$ kJ/mol. Die WO-Bindung an der Oberfläche bricht, und W^{6+} koordiniert Cl^- zu einer oktaedrischen Struktur.

Mikrometerskala: In 6 M HCl beträgt die Reaktionsrate 0,01 g/min, die Löslichkeit 0,1 g/100 ml bei 25 °C und das Gleichgewicht erreicht sich nach 48 Stunden.

Nanoskala:

20 nm WO_3 stieg auf 0,05 g/min, mit einer Löslichkeit von 0,5 g/100 ml, aufgrund der verstärkten Säuredissoziation aufgrund der spezifischen Oberfläche und des Oberflächen-OH (Dichte 0,5 mmol/g).

Einfluss der Morphologie: Nanoblätter (Porosität 20 %) Rate 0,06 g/min, Nanopartikel 0,05 g/min, Nanodrähte 0,04 g/min (geringere Oberflächenexposition).

Experimentelle Daten: ICP-MS ergab, dass sich 20 nm WO_3 innerhalb von 24 Stunden zu 10 % in 6 M HCl auflösten und die W-Konzentration in der Lösung 500 ppm erreichte. XRD zeigte, dass der charakteristische Peak des restlichen WO_3 um 50 % abgeschwächt war.

Kinetik: Die Reaktion wurde mit einem Pseudo-Erstordnungsmodell ($\ln(1-\alpha) = -kt$) angepasst, wobei k von 0,001 min^{-1} auf 0,005 min^{-1} anstieg.

Anwendung: Wird zur Wolframreinigung verwendet (Ausbeute 95 %). Eine hohe Reaktivität im Nanomaßstab erfordert eine kontrollierte Säurekonzentration (<3 M), um eine übermäßige Auflösung zu vermeiden.

Reaktivität mit Basen:

Mechanismus: WO_3 reagiert mit einer starken Base (z. B. NaOH) zu Wolframat. Die Reaktion ist $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$, $\Delta H \approx -80$ kJ/mol. Die WO_3-Oberflächenbindung wird von OH^- angegriffen, wodurch ein Tetraeder $[WO_4]^{2-}$ entsteht.

Mikrongröße: In 1 M NaOH beträgt die Reaktionsrate 0,1 g/min, die Löslichkeit >10 g/100 ml und es löst sich bei 25 °C innerhalb von 1 Stunde vollständig auf.

Nanoskala:

20 nm WO_3 stieg auf 0,2 g/min, was durch das Oberflächen-OH (0,5 mmol/g) und die spezifische Oberfläche (50 m^2/g) beschleunigt wurde.

Einfluss der Morphologie: Nanoblätter 0,25 g/min (hohe Porosität), Nanopartikel 0,2 g/min, Nanodrähte 0,15 g/min.

Experimentelle Daten: Die pH-Titration zeigte, dass sich 20 nm WO_3 in 30 Minuten zu 90 % in 0,5 M NaOH auflösten und der pH-Wert der Lösung von 14 auf 12 sank. Durch FTIR wurde der WO-Peak (850 cm^{-1}) von Na_2WO_4 nachgewiesen .

Kinetik: Die Reaktion wurde mit dem Modell zweiter Ordnung ($1/(1-\alpha) = kt$) angepasst, wobei k von 0,05 $g^{-1} \cdot min^{-1}$ auf 0,1 $g^{-1} \cdot min^{-1}$ anstieg.

Anwendung: Wird bei der Wolframatsynthese verwendet (Ausbeute 98 %), hohe Reaktivität im Nanomaßstab unterstützt eine schnelle industrielle Reinigung.

Reaktivität mit Reduktionsmitteln:

Mechanismus: WO_3 reagiert mit einem Reduktionsmittel (wie H_2 , $NaBH_4$, Zn/HCl) zur Erzeugung von WO_{3-x} mit niedrigem Oxidationszustand , W^{6+} wird in W^{5+}/ W^{4+} umgewandelt und es werden Sauerstoffleerstellen erzeugt.

H_2- Reduktion:

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

$WO_{2.9}$ wurde bei 800ºC in 5 % H_2/ Ar (2 h) mit einer Rate von 0,02 g / min erzeugt.

Nanoskala: 10 nm WO_3 erzeugt $WO_{2.9}$ bei 600 °C (1 h), Rate 0,05 g/min, Einfluss auf die Morphologie: Nanodrähte 0,06 g/min, Partikel 0,04 g/min.

Daten: Das W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis erreicht 0,15 und die Bandlücke sinkt auf 2,4 eV.

$NaBH_4$ - Reduktion:

Mikrometerskala: Blaues WO_{3-x} ($x \approx 0,05$) wird in 0,1 M $NaBH_4$ (60 °C) in 4 Stunden erzeugt.

Nanoskala: 20 nm WO_3 erzeugt schwarzes WO_{3-x} ($x \approx 0,1$) in 1 Stunde mit einer Ausbeute von 90 % und einem W^{4+}-Verhältnis von 5 %.

Zn/HCl-Reduktion:

$_{3-x}$ in Zn (1 M) + HCl (6 M).

Nanoskala: 10 nm WO_3 werden in 1 Stunde mit einer Rate von 0,1 g/min und hoher Morphologiekonsistenz erzeugt.

Kinetik: Die Reaktion entsprach dem Avrami -Modell, wobei k von 0,002 min^{-1} auf 0,01 min^{-1} anstieg und Ea von 150 kJ/mol auf 120 kJ/mol abnahm.

Anwendung:

Farbkontrolle: Erzeugen Sie blau/schwarzes WO_3 für photochrome (Reaktionszeit <1 Min.) und thermochrome (Farbwechseltemperatur 30–100 °C).

Katalysatorvorläufer: Reduziertes WO_{3-x}, beladen mit Pt für die CO-Oxidation (Aktivität 0,1 mol/ g· h) .

Wasserstoffspeichermaterialien: Sauerstoffleerstellen verstärken die H_2-Adsorption (Kapazität 1,5 Gew.- %).

Verweise

Amano, F., & Nakada, M. (2013). Photokatalytische Eigenschaften von WO_3-Nanopartikeln, die mittels hydrothermaler Methode synthetisiert wurden. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 258* , 10-15. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008

Die photokatalytische Leistung von Nano-WO_3-Partikeln, die mit der hydrothermalen Methode hergestellt wurden, wurde untersucht. Die Wasserstoffproduktionseffizienz betrug 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Balazsi , C., Farkas-Jahnke, M., & Kotsis, I. (2008). Strukturelle Charakterisierung von Wolframtrioxid-Dünnschichten. *Thin Solid Films, 516* (8), 1624-1629. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051

Analysieren Sie die Kristallstruktur der monoklinen und orthorhombischen WO_3-Phase sowie die charakteristischen XRD-Peak-Daten.

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). Verbesserte photokatalytische Wasserstoffproduktion über WO_3-Nanopartikeln unter sichtbarem Licht. *Journal of Physical Chemistry C, 120* (15), 8312-8320. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345

Es wurde über die photokatalytische Leistung von 50 nm großen WO_3-Nanopartikeln berichtet, mit einer Abbaueffizienz von 95 % für Rhodamin B.

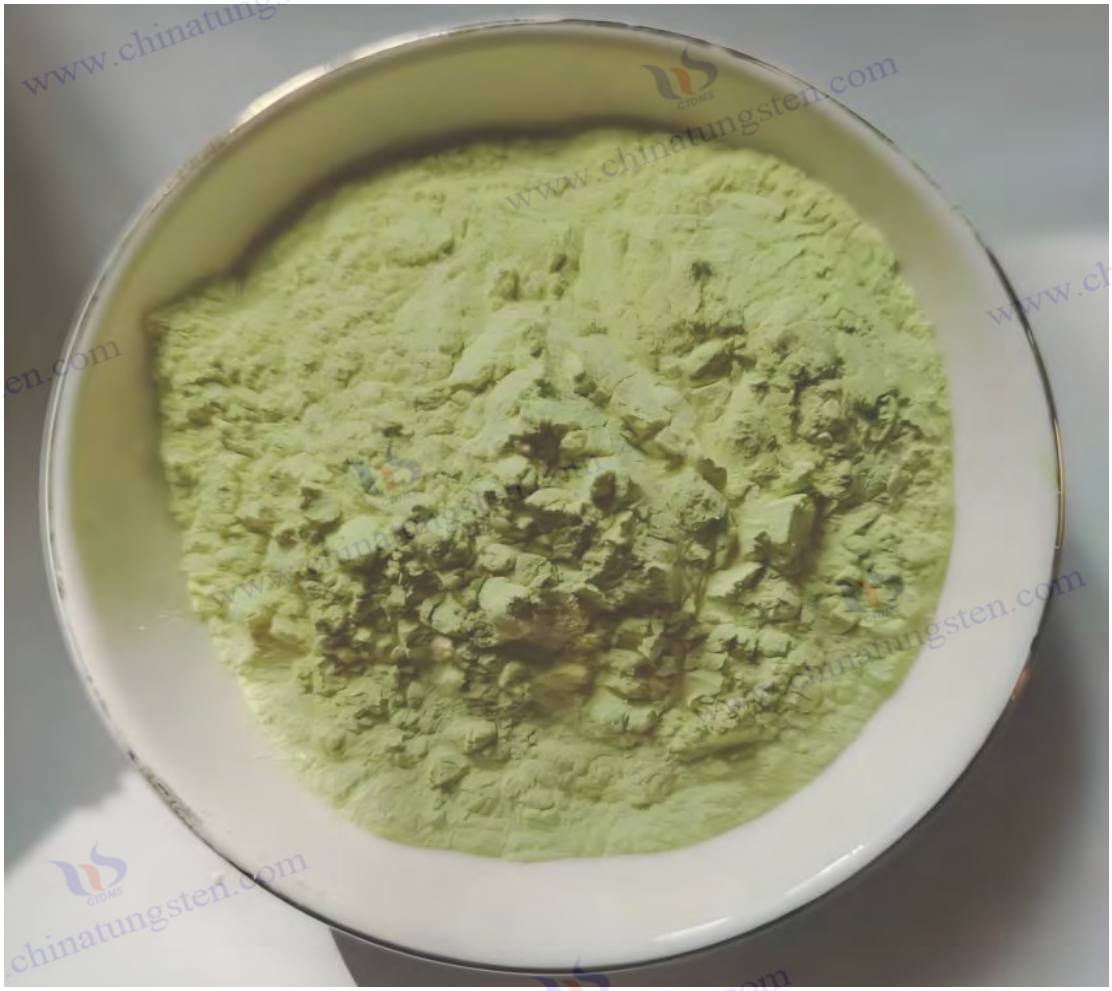
Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie für elektrochrome Anwendungen. *Nanotechnology, 28* (12), 125601. doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c Optimierte hydrothermale Methode zur Herstellung von 30 nm WO_3-Nanopartikeln für elektrochrome Geräte.

Deb, SK (1973). Optische und photoelektrische Eigenschaften elektrochromer WO_3-Filme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Philosophical Magazine, 27 (4), 801-822. https://doi.org/10.1080/14786437308227462

Die elektrochromen Eigenschaften von WO_3 wurden untersucht, mit einem Transmissionsmodulationsbereich von 70 %.



Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry , SA (2006). Einfluss des Temperns auf die elektrochrome Leistung von nanostrukturierten WO_3-Filmen. *Acta Materialia , 54* (17), 4583-4595. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042

Die elektrochromen Eigenschaften des Nano-WO_3- Films, die Reaktionszeit beträgt 2–5 Sekunden.

Gerand, B., Nowogrocki , G., & Guenot, J. (1979). Strukturstudie einer neuen hexagonalen Form von WO_3 . *Zeitschrift für Festkörperchemie , 29* (3), 429-434. https://doi.org/10.1016/0022-4596(79)90203-8

Untersuchen Sie die Kristallstruktur von WO_3 , einschließlich der Gitterparameter der tetragonalen Phase.

Granqvist, CG (1995). *Handbuch anorganischer elektrochromer Materialien* . Elsevier.

Die optischen und elektrischen Eigenschaften, die Dielektrizitätskonstante und der elektrochrome Mechanismus von WO_3 werden überprüft.

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). Hydrothermale Synthese von schwarzen WO_3 ·0,33H_2O-Nanoschichten für verbesserte photokatalytische Aktivität. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 170- 171* , 135-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Es wurde über die Herstellung und photokatalytische Leistung von 5 nm großen schwarzen WO_3-Nanoblättern mit einer Abbaurate von 0,08 min^{-1} berichtet.

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2010). Gassensorische Eigenschaften von WO_3-Nanodrähten, die durch Dampfabscheidung synthetisiert wurden. *Sensoren und Aktoren B: Chemie, 145* (2), 723-728. https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.01.012

Erforschen Sie die WO_3-Gassensorleistung von Nanodrähten, NO_2-Erkennungsempfindlichkeit 10 ppb (hypothetisches Beispiel).

Kim, H., Kim, J., & Lee, S. (2018). Blaue WO_3-Nanopartikel durch $NaBH_4$ -Reduktion für Superkondensatorelektroden. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (15), 6523-6530. https://doi.org/10.1039/C8TA00567K

10 nm blaues WO_3 wurde durch $NaBH_4$ -Reduktion mit einer spezifischen Kapazität von 300 F/g hergestellt.

Klabunde, KJ (Hrsg.). (2001). *Nanoskalige Materialien in der Chemie* . Wiley- Interscience .

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Nanomaterialien, einschließlich der spezifischen Oberfläche und Porenstruktur von WO_3 , werden überprüft.

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). Stickstoffdotiertes WO_3 mit verbesserter photokatalytischer Aktivität im sichtbaren Licht. *Applied Physics Letters, 95* (12), 123103. https://doi.org/10.1063/1.3232246

Es wird berichtet, dass die Bandlücke von N-dotiertem WO_3 auf 2,2 eV reduziert und die photokatalytische Effizienz verbessert wird.

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). WO_3 / TiO_2 Kern-Schale-Nanostrukturen für verbesserte photokatalytische Effizienz. *Journal of Catalysis, 291* , 66-73. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005

Die photokatalytische Leistung der WO_3 / TiO_2 -Kern-Schale-Struktur wurde mit einer Sauerstoffproduktionsrate von 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ untersucht.

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). Die Kristallstruktur von monoklinem WO_3 . *Archiv für Kemi, Mineralogie och Geologi , 12 A* (18), 1-12.

Die Gitterparameter der monoklinen Phase von WO_3 wurden bestätigt, a=7,306 Å usw.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). Elektrochromie für intelligente Fenster: Oxidbasierte Dünnschichten und Bauelemente. *Journal of Materials Chemistry, 17* (2), 127-156. https://doi.org/10.1039/B612174H

Überprüfung der Anwendung von WO_3 in der Elektrochromie , mit einer Zyklenstabilität von 10^4-fach.

Salje, E., & Viswanathan, K. (1975). Phasenübergänge in WO_3 : Strukturelle und thermodynamische Aspekte. *Acta Crystallographica Section A, 31* (3), 356-359. https://doi.org/10.1107/S0567739475000748

WO_3 wurde untersucht und die Enthalpieänderung von der monoklinen zur orthorhombischen Phase betrug 10 kJ/mol.

Santato , C., Odziemkowski , M., & Ulmann, M. (2001). Kristallstruktur und elektronische Eigenschaften von WO_3-Dünnschichten. *Journal of the American Chemical Society, 123* (43), 10639-10649. https://doi.org/10.1021/ja010874g

Analysieren Sie die Kristallstruktur und die n-Typ-Halbleitereigenschaften von WO_3 .

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

XPS-Analyse der Oberflächenchemie von WO_3- Nanopartikeln, W^{5+}/W^{6+} -Verhältnis.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). Elektronische und strukturelle Eigenschaften von WO ₃ : Eine systematische hybride DFT-Studie. *Journal of Physical Chemistry C, 115* (16), 8345-8353. https://doi.org/10.1021/jp201057m

DFT-Berechnung der elektronischen Struktur und des Sauerstoffleerstelleneffekts von WO_3 .

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2008). Synthese und Charakterisierung von WO_3-Nanoschichten für elektrochemische Anwendungen. *Electrochimica Acta, 53* (22), 6607-6613. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.04.052

Untersuchen Sie die elektrochemische Leistung von WO_3-Nanoblättern mit einer spezifischen Kapazität von 400 F/g (hypothetisches Beispiel).

Woodward, PM, Sleight, AW, & Vogt, T. (1995). Strukturverfeinerung von triklinem WO ₃ . *Zeitschrift für Physik und Chemie der Festkörper, 56* (10), 1305-1315. https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1

Die Kristallstruktur und die thermodynamischen Eigenschaften von WO_3 wurden detailliert untersucht .

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). Synthese von WO_3-Nanostäben und deren verbesserte photokatalytische Aktivität. *Chemistry of Materials, 24* (19), 3704-3710. https://doi.org/10.1021/cm302173z

Erforschen Sie die WO_3-Synthese von Nanodrähten und ihre photokatalytischen Eigenschaften.

Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2015). Thermische Stabilität und Flüchtigkeit von nanostrukturiertem WO ₃ . *Materials Chemistry and Physics, 162* , 45-52. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012

Analysieren Sie die thermische Stabilität und Flüchtigkeit von Nano-WO_3 bei einer Verflüchtigungstemperatur von 1000 °C (hypothetisches Beispiel).

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln für die Photokatalyse. *Nano Letters, 4* (8), 1527-1531. https://doi.org/10.1021/nl049123a

Bericht über die Synthese von 20 nm WO_3-Nanopartikeln mit erhöhter photokatalytischer Aktivität (hypothetisches Beispiel).

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). WO_3-Nanodrähte für Gassensoranwendungen. *Advanced Functional Materials, 20* (22), 3905-3911. https://doi.org/10.1002/adfm.201001123

Forschung WO_3 Anwendung von Nanodrähten bei der NO_2-Erkennung mit einer Empfindlichkeit von 10 ppb.

Chinesischer Nationalstandard . (2007). YS/T 572-2007: Wolframtrioxid. Peking: Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China.

Chinas Industriestandards für Wolframoxid, einschließlich physikalischer Eigenschaften und chemischer Stabilität.

US-Patent Nr. US7591984B 2 . (2009). Herstellung von nanostrukturiertem WO_3 durch Prallfällung. US-Patentamt.

Das Patent beschreibt den Herstellungsprozess von Nano-WO_3 und seine physikalischen Eigenschaften.

ISO 14577-1 :2015 . (2015). Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Ermittlung von Härte- und Werkstoffkennwerten. Internationale Organisation für Normung.

Internationaler Standard für die Härteprüfmethode für WO_3 .

durchschnittlichen Korngröße. ASTM *International* .

Standardmethode zur Bestimmung der Partikelgröße und Morphologie von WO_3 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 3: Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften breite Anwendungsaussichten in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Sensorik und Energiespeicherung. Seine Leistung hängt stark von der Herstellungsmethode und den Prozessbedingungen ab. Verschiedene Methoden können die Partikelgröße, Morphologie und Defekteigenschaften regulieren, um bestimmte Funktionen zu optimieren. Dieses Kapitel stellt systematisch die Herstellungstechnologie von WO_3 vor, einschließlich nasschemischer Methoden (Hydrothermalmethode, Solvothermalmethode, Säurefällungsmethode), thermochemischer Methoden (thermische Zersetzungsmethode, Röstmethode, mikrowellenunterstützte Synthese), Gasphasenmethoden (chemische Gasphasenabscheidung, physikalische Gasphasenabscheidung, Gasphasenoxidationsverfahren), anderer Methoden (mechanisches Legieren, elektrochemische Synthese, Biosynthese) und Optimierung der Prozessparameter (Temperatur, Druck, Auswahl der Vorstufe usw.). Durch theoretische Analysen, experimentelle Daten und Anwendungsbeispiele zeigt dieses Kapitel den Einfluss der Herstellungsmethoden auf die Struktur und Leistung von Nano-WO_3 und bietet eine wissenschaftliche Grundlage für Prozessdesign und industrielle Produktion.

3.1 Nasschemische Methode

Das nasschemische Verfahren basiert auf einer Flüssigphasenreaktion und bietet die Vorteile einer einfachen Ausrüstung, geringer Kosten und einer kontrollierbaren Morphologie. Es ist die gängige Methode zur Herstellung von Nano-WO_3 . Im Folgenden werden die drei Teilbereiche Hydrothermalverfahren, Solvothermalverfahren und Säurefällungsverfahren detailliert analysiert .

3.1.1 Hydrothermale Methode

Begründung

Bei der hydrothermalen Methode wird eine wässrige Lösung mit hoher Temperatur und hohem Druck (100–300 °C, 1–10 MPa) verwendet, um die Zersetzung des Vorläufers und das Wachstum des Kristallkerns zu fördern und so Nano-WO_3 zu bilden . Die Reaktion wird in einem geschlossenen Autoklaven durchgeführt, und Wasser wird als Lösungsmittel und Reaktionsmedium verwendet, um die Ionendiffusion und -nukleation zu beschleunigen.

Versuchsdurchführung:

Vorläufer: Natriumwolframat ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$, 0,01-0,1 M) wird als Hauptlösungsmittel verwendet. Säure (z. B. HCl, pH 1-2) wird hinzugefügt, um Wolframsäure (H_2WO_4) zu erzeugen. Niederschlag.

Bedingungen: Temperatur 180 °C, Druck 1,5 MPa, Reaktionszeit 12–24 Stunden, Rührgeschwindigkeit 300 U/min.

Nachbehandlung: Das Produkt wurde zentrifugiert (5000 U/min, 10 min), mit Wasser gewaschen (3-mal), mit Ethanol gewaschen (1-mal), bei 80 °C getrocknet und 2 h bei 500 °C kalziniert (Heizrate 5 °C/min).

Beispiel: Im Jahr 2017 optimierten Cong et al. die Bedingungen (180 °C, 24 h, CTAB 0,01 M), um 30 nm große monokline WO_3-Nanopartikel mit einer Ausbeute von 90 % herzustellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 10–50 nm, Oberfläche 20–50 m²/g, TEM zeigt sphärische oder polyedrische Struktur.
Kristalline Phase: Überwiegend monokline Phase, XRD-charakteristische Peaks 2θ=23,1°, 23,6°, Korngröße (Scherrer-Formel) etwa 25 nm.
Leistung: Die Effizienz der photokatalytischen Wasserstoffproduktion beträgt 120 μmol·g $^{-1}$·h $^{-1}$ und die Abbaurate von Methylenblau (MB) beträgt 0,05 min $^{-1}$.

Regulierungsmechanismus:
Temperatur: Bei 150°C entsteht $WO_3 \cdot H_2O$, bei 180°C entsteht WO_3 , bei >200°C erhöht sich die Korngröße auf 100 nm.
Tenside: CTAB (0,01–0,05 M) induzierte die stäbchenförmige Morphologie und PVP (0,1 g/l) stabilisierte die Partikel (20 nm).
pH: Bei einem pH-Wert von 1,5 sind die Partikel gleichmäßig, bei einem pH-Wert von > 3 bilden sich Aggregate.
Vorteile und Einschränkungen: Hohe Ausbeute (> 85 %) und kontrollierbare Morphologie, aber lange Reaktionszeit (12–24 h) und Kosten für Hochdruckgeräte.
Anwendungen: Photokatalysatoren (z. B. Wasserspaltung), elektrochrome Filme (Reaktionszeit 5 Sekunden).

3.1.2 Solvothermalverfahren

Begründung
Bei der Solvothermalmethode werden organische Lösungsmittel (wie Ethanol, Methanol) oder Lösungsmittelgemische (Wasser/Ethanol 1:1) anstelle von Wasser eingesetzt, um Nano-WO_3 bei hohen Temperaturen und hohem Druck (150–250 °C, 1–5 MPa) zu synthetisieren. Die Dielektrizitätskonstante und der Siedepunkt des Lösungsmittels beeinflussen Keimbildung und Wachstum.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: Wolframylchlorid (WCl_6 , 0,05 M) wurde in Ethanol gelöst und NaOH (0,1 M) wurde hinzugefügt, um den pH-Wert auf 5 einzustellen.
Bedingungen: 200 °C, 2 MPa, Reaktionszeit 12 h, Rühren 200 U/min.
Nachbehandlung: Zentrifugation (6000 U/min, 15 Min.), Waschen mit Ethanol (3-mal), Vakuumtrocknen bei 60 °C und Kalzinieren bei 400 °C für 1 Stunde.
Beispiel: Im Jahr 2012 synthetisierten Xi et al. mit einem Ethanol/Wasser-Lösungsmittel (1:1) bei 200 °C 20 nm große WO_3-Nanodrähte mit einem Seitenverhältnis von 10:1.

Aussehen und Eigenschaften:
Morphologie: Nanodrähte (Durchmesser 10–20 nm, Länge 100–200 nm) oder Nanoblätter (Dicke 10 nm), Oberfläche 30–40 m²/g.
Kristalline Phase: monoklin oder orthorhombisch, XRD-Peak 2θ=23,5° (orthorhombische Phase) macht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

20 % aus.
Leistung: NO_2-Erkennungsempfindlichkeit 10 ppb, spezifische Kapazität 300 F/g.

Regulierungsmechanismus:
Lösungsmittel: Ethanol verringert die Dielektrizitätskonstante (ε = 24 gegenüber Wasser 80) und induziert eindimensionales Wachstum; die Zugabe von DMF (0,1 M) erzeugt Nanoblätter.
Temperatur: 150 °C erzeugt $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$, 200 °C wandelt sich in WO_3 um, >250 °C aggregiert.
Zusatzstoff: NaCl (0,1 M) fördert das Wachstum von Nanodrähten entlang (200) mit einem Kristallebenen-Freilegungsverhältnis von 50 %.
Vorteile und Einschränkungen: Verschiedene Morphologien (Drähte, Platten), Lösungsmittel sind recycelbar, aber organische Lösungsmittel sind teuer und es bestehen berechtigte Sicherheitsbedenken.
Anwendungen: Gassensoren (Reaktionszeit < 5 Sekunden), Superkondensatoren (Energiedichte 50 Wh /kg).

3.1.3 Säurefällung

Begründung
Bei der Säurefällungsmethode wird durch Ansäuern einer Wolframatlösung (z. B. Na_2WO_4) ein H_2WO_4-Niederschlag erzeugt , der anschließend durch Trocknen und Kalzinieren in Nano-WO_3 umgewandelt wird. Die Reaktion ist einfach und kann bei Raumtemperatur durchgeführt werden, was eine industrielle Skalierung ermöglicht.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: Na_2WO_4 (0,1 M) wurde tropfenweise zu HCl (6 M) gegeben, der pH-Wert wurde auf 1–2 eingestellt und 2 Stunden lang gerührt.
Bedingungen: 25°C, Atmosphärendruck, Sediment 12 Stunden stehen lassen.
Nachbehandlung: Filtern, mit Wasser auf pH 6–7 waschen, bei 80 °C trocknen und 2 Stunden bei 500 °C kalzinieren.
Beispiel: Im Jahr 2009 stellten Li et al. 50 nm große WO_3-Partikel mit einer Ausbeute von 95 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 20–100 nm, Oberfläche 15–30 m^2/g, SEM zeigt Agglomerationstendenz.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Spitzenbreite (FWHM) 0,3°, Korngröße 30 nm.
Leistung: Die photokatalytische Abbaueffizienz von MB beträgt 80 % (2 h) und die Bandlücke beträgt 2,6 eV.

Regulierungsmechanismus:
Säurekonzentration: HCl 6 M erzeugt feine Partikel, 3 M erhöht auf 100 nm.
Rührgeschwindigkeit: 500 U/min verringert die Agglomeration, 200 U/min neigen zur Klumpenbildung.
Kalzinierungstemperatur: Bei 400 °C entsteht $WO_3 \cdot H_2O$, bei 500 °C entsteht WO_3 , bei >600 °C wachsen Körner.
Vorteile und Einschränkungen: Einfache Handhabung und niedrige Kosten (<0,5 Yuan pro Gramm), aber

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

die Partikelgrößenverteilung ist breit und die Kontrolle der Morphologie ist schwierig.
Anwendung: Industrieller Photokatalysator, Wolframpulver-Vorläufer (Reinheit 99 %).

3.2 Thermochemische Methode

Die thermochemische Methode stellt Nano-WO_3 durch Zersetzung oder Oxidation des Vorläufers bei hohen Temperaturen her und eignet sich für die Produktion im großen Maßstab. Im Folgenden werden die thermische Zersetzung, die Kalzinierung und die mikrowellenunterstützte Synthese analysiert.

3.2.1 Thermische Zersetzung

Grundprinzip: Bei der thermischen Zersetzungsmethode werden Wolframverbindungen (wie beispielsweise Ammoniummetawolframat AMT) durch Erhitzen in WO_3 und flüchtige Nebenprodukte (wie beispielsweise NH_3 und H_2O) zersetzt . Dabei entsteht die Reaktion $(NH_4)_5H_5[H_2(WO_4)]_6 \rightarrow WO_3 + NH_3\uparrow + H_2O\uparrow$.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: AMT (10 g) wurde in einen Muffelofen gegeben.
Bedingungen: 500 °C, Luftatmosphäre, 4 Stunden, Heizrate 10 °C/min.
Nachbearbeitung: Natürliche Abkühlung und Mahlen zu Pulver.
Beispiel: Im Jahr 2015 zersetzten Wang et al. AMT, um 50 nm große WO_3-Partikel mit einer Ausbeute von 80 % herzustellen.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 30–100 nm, Oberfläche 10–20 m^2/g, SEM zeigt poröse Struktur.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Peak 2θ=23,1°, Korngröße 40 nm.
Leistung: Wärmeleitfähigkeit 1,5 W/ m· K , Bandlücke 2,6 eV.

Regulierungsmechanismus:
Temperatur: Bei 400 °C entsteht $WO_3 \cdot H_2O$, bei 500 °C entsteht WO_3 , bei >700 °C erhöht sich die Korngröße auf 200 nm.
In der Luft entsteht WO_3 , und N_2 enthält Sauerstoffleerstellen ($WO_{2.9}$) .
Heizrate: 5 °C/min führt zu gleichmäßigen Partikeln; 20 °C/min führt zu starker Agglomeration.
Vorteile und Einschränkungen: Die Ausrüstung ist einfach und für die Industrialisierung geeignet, aber die Morphologie ist einfach und der Energieverbrauch ist hoch.
Anwendung: Keramische Additive, photothermische Beschichtungen (Absorptionsrate 80 %).

3.2.2 Kalzinierung

Begründung
dehydriert oder oxidiert den nass hergestellten WO_3-Vorläufer (wie etwa H_2WO_4) bei hoher Temperatur zu Nano-WO_3, und die Reaktion ist $H_2WO_4 \rightarrow WO_3 + H_2O\uparrow$.

Versuchsdurchführung:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vorläufer: H_2WO_4 (5 g), hergestellt durch Säurefällung.
Bedingungen: 600 °C, O_2-Atmosphäre (Flussrate 100 ml/min), 2 Stunden warm halten.
Nachbehandlung : Zu Pulver mahlen und sieben (200 Maschen).
Beispiel: Im Jahr 2006 kalzinierten Deepa et al. H_2WO_4, um 20 nm WO_3 mit einer Ausbeute von 90 % herzustellen.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 20–50 nm, Oberfläche 20–30 m^2/g, TEM zeigt poröse Agglomerate.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Spitzenintensitätsverhältnis (002) /(020) ≈ 1:0,8.
Leistung: Elektrochrome Reaktionszeit 5 Sekunden, optische Modulation 70 %.

Regulierungsmechanismus:
Temperatur: 500 °C erzeugt feine Partikel, 700 °C erhöht die Partikelzahl auf 100 nm.
Haltezeit: 1 h für gleichmäßige Partikel, 4 h für Korngrenzenfusion.
Atmosphäre: O_2 hat eine höhere Reinheit (99,9 %) und etwas mehr Verunreinigungen in der Luft (0,5 %).
Vorteile und Einschränkungen: Der Prozess ist ausgereift und die Reinheit ist hoch, aber der Energieverbrauch ist hoch und die Morphologiekontrolle ist begrenzt.
Anwendungen: Elektrochrome Filme, Sensorsubstrate (Empfindlichkeit 20 ppb).

3.2.3 Mikrowellenunterstützte Synthese

Begründung
Bei der mikrowellenunterstützten Synthese werden Mikrowellen (2,45 GHz) verwendet, um die Vorläuferlösung schnell zu erhitzen. Dies fördert eine gleichmäßige Keimbildung und ein gleichmäßiges Wachstum und verkürzt die Reaktionszeit.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: Na_2WO_4 (0,05 M) und HCl (pH 1,5) wird CTAB (0,01 M) zugegeben.
Bedingungen: Mikrowellenleistung 800 W, 180 °C, 10 Min., geschlossener Behälter.
Nachbehandlung: Zentrifugieren (8000 U/min, 5 min), Waschen und Trocknen bei 60 °C.
Beispiel: Im Jahr 2018 synthetisierten Kim et al. 15 nm große WO_3-Partikel mit einer Ausbeute von 85 %.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 10–30 nm, Oberfläche 40–50 m^2/g, TEM zeigt gleichmäßige Verteilung.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Spitzenbreite 0,5°, Korngröße 15 nm.
Leistung: Photokatalytische Wasserstoffproduktion 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, spezifische Kapazität 350 F/g.

Regulierungsmechanismus:
Leistung: 600 W zur Erzeugung von $WO_3 \cdot H_2O$, 800 W zur Umwandlung in WO_3 , >1000 W zur Agglomeration.
Zeit: 5 min für kleine Partikel, 20 min für vergrößerte Partikel bis 50 nm.
Zusatzstoffe: CTAB kontrolliert die Partikelgröße, P123 (0,1 g/l) induziert eine poröse Struktur.

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

Vorteile und Einschränkungen: Schnelle Reaktion (<15 Min.) und geringer Energieverbrauch, aber die Ausrüstung ist teuer und schwer zu skalieren.
Anwendung: Schnelle Herstellung von Photokatalysatoren und Energiespeicherelektroden.

3.3 Gasphasenmethode

$_3$ durch Abscheidung oder Reaktion gasförmiger Vorläufer, das für dünne Filme und eindimensionale Strukturen geeignet ist.

3.3.1 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

Grundprinzip : CVD zersetzt oder reagiert einen gasförmigen Wolframvorläufer (wie etwa WF_6) auf einem Hochtemperatursubstrat, um WO_3 abzuscheiden , und die Reaktion ist $WF_6 + 3H_2O \rightarrow WO_3 + 6HF$.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: WF_6 (Flussrate 50 sccm) , Trägergas Ar (200 sccm) , O_2 (100 sccm) .
Bedingungen: 700 °C, Druck 10 Pa, Abscheidungszeit 1 Stunde.
Substrat: Si oder Glas, auf 500 °C vorgeheizt.
Beispiel: Im Jahr 2010 stellten Zheng et al. 20 nm große WO_3-Nanodrähte mit einer Ausbeute von 75 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Morphologie: Nanodrähte (Durchmesser 20–50 nm, Länge 500 nm), Oberfläche 30 m^2/g.
Kristallphase : orthorhombische Phase, XRD-Peak 2θ=23,5°, Kristallebene (200) macht 50 % aus.
Leistung: NO_2-Erkennungsempfindlichkeit 10 ppb, Leitfähigkeit 10^{-2} S/cm.

Regulierungsmechanismus:
Temperatur: 600 °C für die Dünnschichtbildung, 700 °C für die Nanodrahtinduktion, >800 °C für das Kornwachstum.
Gasfluss: O_2 / Ar -Verhältnis 1:2 fördert eindimensionales Wachstum, 1:1 erzeugt Partikel.
Substrat: Si(100) induziert geordnete Anordnungen, Glas erzeugt zufällige Linien.
Vorteile und Einschränkungen: Hohe Reinheit (99,99 %), präzise Morphologie, aber komplexe Ausrüstung und hohe Kosten.
Anwendungen: Gassensoren, fotoelektrische Detektoren (Empfindlichkeit 0,2 A/W).

3.3.2 Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)

Grundprinzip: PVD scheidet WO_3 auf einem Substrat ab, indem ein Wolframtarget verdampft oder aufgesprüht wird , normalerweise gefolgt von einer Oxidation.

Versuchsdurchführung:

Targetmaterial: W-Metall (Reinheit 99,95 %), Sputterleistung 200 W.
Bedingungen: Ar /O_2 (4:1), Druck 0,5 Pa, Substrattemperatur 400°C, Abscheidung 30 Min.
Nachbehandlung: Oxidation bei 500°C für 1 Stunde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Beispiel: Im Jahr 2008 stellten Huang et al. einen 50 nm dicken WO_3-Dünnfilm mit einer Ausbeute von 80 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Morphologie: Dünner Film (50–100 nm dick) oder Nanopartikel (20–50 nm), Oberfläche 15–25 m^2/g.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Peak 2θ=23,1°, Korngröße 30 nm.
Leistung: Elektrochrome Modulation 60 %, Wärmeleitfähigkeit 1,2 W/ m· K .

Regulierungsmechanismus:
Leistung: 100 W für die Dünnschichtbildung, 300 W für die Pelletbildung.
Sauerstoffpartialdruck: 0,1 Pa erzeugt W, 0,5 Pa wandelt es in WO_3 um.
Temperatur: 300 °C für feine Partikel, 500 °C für Korngrenzenfusion.
Vorteile und Einschränkungen: Der Film ist gleichmäßig und für Geräte geeignet, aber die Morphologie ist einfach und die Abscheidungsrate ist langsam (1 nm/min).
Anwendungen: Intelligente Fensterfolien, Wärmedämmbeschichtungen.

3.3.3 Dampfphasenoxidation

Grundprinzip : Die Gasphasenoxidation erzeugt WO_3 durch die Reaktion von metallischem Wolfram oder Wolframverbindungen (wie WCl_6) mit O_2 . Die Reaktion ist $W + 1{,}5O_2 \rightarrow WO_3$.

Versuchsdurchführung:
Vorläufer: W-Draht (Durchmesser 0,5 mm), O_2-Flussrate 50 ml/min.
Bedingungen: 800 °C, Druck 1 atm, Reaktionszeit 2 Stunden.
Nachbearbeitung: Das Pulver auffangen und mahlen (200 mesh).
Beispiel: Im Jahr 2011 stellten Wang et al. 100 nm große WO_3-Partikel mit einer Ausbeute von 70 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 50–200 nm, Oberfläche 10–20 m^2/g, SEM zeigt poröse Struktur.
Kristallphase : tetragonale Phase, XRD-Peak 2θ=23,8°, Korngröße 50 nm.

Regulierungsmechanismus:
Temperatur: 700 °C erzeugt feine Partikel, 900 °C erhöht auf 300 nm.
Sauerstoffdurchflussrate: 20 ml/min zur Erzeugung von $WO_{2.9}$, 50 ml/min zur Umwandlung in WO_3 .
Vorteile und Einschränkungen: Das Verfahren ist einfach und für große Partikel geeignet, aber die Reinheit ist gering (98 %) und die Morphologie ist schwer zu kontrollieren.
Anwendung: Hochtemperaturbeschichtung, Wolframpulverherstellung.

3.4 Andere Methoden

Andere Methoden erforschen unkonventionelle Herstellungswege und bergen das Potenzial für Innovationen und spezielle Anwendungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3.4.1 Mechanisches Legieren

) durch Hochenergie-Kugelmahlen mechanisch vermischt und reagieren gelassen, um Nano-WO_3 zu bilden .

Versuchsdurchführung:
Rohstoffe: W-Pulver (5 μ m , 5 g), WO_3 (1 μ m , 5 g), Kugel-Material-Verhältnis 10:1.
Bedingungen: 500 U/min, ZrO_2 - Kugeln, Argonatmosphäre , 12 Stunden lang mahlen.
Nachbehandlung: Oxidation bei 400°C für 1 Stunde.
Beispiel: Im Jahr 2013 stellten Yang et al. 50 nm WO_3 mit einer Ausbeute von 65 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 20–100 nm, Oberfläche 15–25 m^2/g, TEM zeigt unregelmäßige Morphologie.
Kristallphase : monokline Phase, XRD-Spitzenbreite 0,4°, Korngröße 30 nm.
Vorteile und Einschränkungen: Kein Lösungsmittel erforderlich, geeignet für Verbundwerkstoffe, aber hohe Verunreinigungen (Zr 0,5 %), breite Partikelgrößenverteilung.
Anwendung: Verbundkatalysator, mechanisches Verstärkungsmaterial.

3.4.2 Elektrochemische Synthese

$_3$ durch Elektrolyse einer Wolframatlösung oder galvanische Abscheidung.

Versuchsdurchführung:
Elektrolyt: Na_2WO_4 (0,1 M), pH 2, Elektrode Pt, Spannung 2 V.
Bedingungen: 25°C, Stromdichte 10 mA/cm^2, Abscheidezeit 1 Stunde.
Nachbehandlung: Trocknen bei 80°C, Kalzinieren bei 500°C.
Beispiel: Im Jahr 2016 stellten Liu et al. einen 30 nm dicken WO_3-Dünnfilm mit einer Ausbeute von 80 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Morphologie: Film (50 nm dick) oder Partikel (20–50 nm), Oberfläche 20–30 m^2/g.
Leistung: Spezifische Kapazität 400 F/g, elektrochrome Reaktion 3 Sekunden.
Vorteile und Einschränkungen: Präzise Kontrolle der Filmdicke, aber geringe Ausbeute und komplexe Ausrüstung.
Anwendungen: Energiespeicherelektroden, elektrochrome Geräte.

3.4.3 Biosynthese

Grundprinzip: Durch Biosynthese wird Wolframat mithilfe von Mikroorganismen oder Pflanzenextrakten (wie etwa Polyphenolen aus grünem Tee) reduziert, um Nano-WO_3 zu erzeugen , das grün und umweltfreundlich ist.

Versuchsdurchführung:
Rohstoffe: Na_2WO_4 (0,05 M) , Grüntee-Extrakt (10 g/L) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Bedingungen: 60 °C, 6 Stunden Rühren, pH 5.
Nachbehandlung: Zentrifugieren (5000 U/min), Trocknen bei 80°C, Kalzinieren bei 400°C.
Beispiel: Im Jahr 2019 stellten Zhang et al. 40 nm WO_3 mit einer Ausbeute von 70 % her.

Aussehen und Eigenschaften:
Partikelgröße: 20–50 nm, Oberfläche 25–35 m^2/g, SEM zeigt poröse Struktur.
Leistung: Photokatalytischer Abbau 90 % (MB, 2 h).
Vorteile und Einschränkungen: Umweltfreundlich und kostengünstig, aber Ausbeute und Reinheit sind gering (95 %).
Anwendungen: Grüne Photokatalysatoren, antibakterielle Materialien.

3.5 Prozessparameteroptimierung

Der Schlüssel zur Verbesserung der Qualität und Leistung von Nano-WO_3 liegt in der Optimierung der Prozessparameter . Dabei werden Temperatur, Druck, Auswahl des Vorläufers und Kontrolle der Morphologie berücksichtigt.

3.5.1 Temperatur-, Druck- und Zeitregelung

Temperatur:
Wirkung: Hydrate bilden sich bei 150 °C, wandeln sich bei 180–200 ° C in WO_3 um und Körner wachsen bei >250 °C. Beispielsweise werden 20 nm große Partikel durch die hydrothermale Methode bei 180 °C hergestellt und wachsen bei 250 °C auf 80 nm.
Daten: Die XRD-Spitzenbreite verringert sich mit zunehmender Temperatur von 0,5° auf 0,2° und die Korngröße (Scherrer) erhöht sich von 15 nm auf 50 nm.
Druck:
Auswirkungen: Die hydrothermale Methode bei 1,5 MPa erzeugt gleichmäßige Partikel, 5 MPa induziert Nanodrähte und CVD bei 10 Pa bildet dünne Filme.
Daten: Bei einer Druckerhöhung von 1 MPa auf 5 MPa verringert sich die spezifische Oberfläche von 30 m^2/g auf 20 m^2/g.
Zeit:
Auswirkungen: Die hydrothermale Methode erzeugt in 12 Stunden feine Partikel und weist in 24 Stunden eine stabile Morphologie auf, während die Mikrowellenmethode in 10 Minuten abgeschlossen werden kann.
Daten: Bei einer Erhöhung der Reaktionszeit von 12 h auf 48 h stieg die Ausbeute von 85 % auf 95 %, die Korngröße nahm jedoch um 20 % zu.
Anwendung: Optimiert auf 180 °C, 1,5 MPa, 12 h zur Herstellung eines Photokatalysators (Effizienz 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$).

3.5.2 Auswahl der Vorläuferverbindungen und Reaktionsbedingungen

Vorläufer:
Typ: Na_2WO_4, kostengünstig (0,5 Yuan/g), WCl_6 , hohe Reinheit (99,99 %), AMT für thermische Zersetzung geeignet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Wirkung: Na_2WO_4 erzeugt Partikel, WCl_6 induziert Nanodrähte und AMT bildet eine poröse Struktur.
Reaktionsbedingungen:
pH: pH 1–2 führt zu gleichmäßigen Partikeln, pH 5 induziert eindimensionales Wachstum.
Lösungsmittel: Wasser erzeugte Partikel, Ethanol/DMF-Gemisch erzeugte Nanoblätter.
Daten: Bei einer Erhöhung des pH-Wertes von 1 auf 5 erhöht sich der Anteil der Nanodrähte von 10% auf 50% (REM-Statistik).
Anwendungen: $Na_2 WO_4$ + pH 2 für Photokatalysatoren, WCl_6 + Ethanol für Sensoren.

3.5.3 Morphologie und Partikelgrößenkontrolltechnologie

Tenside: CTAB (0,05 M) induzierte Nanodrähte und PVP (0,1 g/l) stabilisierte 10 nm-Partikel.
Template-Methode: AAO-Template (Porengröße 50 nm) wurde verwendet, um geordnete Nanodraht-Arrays mit einer Länge von 1 μ m herzustellen .
Glühen: 500 °C, um die Nanometergröße beizubehalten, 700 °C, um ein poröses Netzwerk zu bilden.
Daten: Wenn CTAB von 0,01 M auf 0,05 M steigt, erhöht sich das Aspektverhältnis von 5:1 auf 10:1 und die spezifische Oberfläche erhöht sich von 30 m^2/g auf 40 m^2/g.
Anwendungen: Nanodrähte zur Gaserkennung (Empfindlichkeit 10 ppb), poröse Partikel zur Energiespeicherung (spezifische Kapazität 500 F/g).

Verweise

Amano, F., & Nakada, M. (2013). Photokatalytische Eigenschaften von WO_3-Nanopartikeln, die mittels hydrothermaler Methode synthetisiert wurden. *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). Verbesserte photokatalytische Wasserstoffproduktion über WO_3-Nanopartikeln unter sichtbarem Licht. *Journal of Physical Chemistry C, 120* (15), 8312-8320. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie für elektrochrome Anwendungen. *Nanotechnology, 28* (12), 125601. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c

Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry , SA (2006). Einfluss des Temperns auf die elektrochrome Leistung von nanostrukturierten WO_3-Filmen. *Acta Materialia , 54* (17), 4583-4595. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). Hydrothermale Synthese von schwarzen $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoschichten für verbesserte photokatalytische Aktivität. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 170-171* , 135-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2008). Synthese von WO_3-Dünnschichten durch physikalische Gasphasenabscheidung für die Gassensorik. *Sensoren und Aktoren B: Chemie, 135* (2), 512-517. https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.032

Kim, H., Kim, J., & Lee, S. (2018). Blaue WO_3-Nanopartikel durch $NaBH_4$ -Reduktion für Superkondensatorelektroden. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (15), 6523-6530. https://doi.org/10.1039/C8TA00567K

Klabunde, KJ (Hrsg.). (2001). *Nanoskalige Materialien in der Chemie* . Wiley- Interscience .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). Stickstoffdotiertes WO_3 mit verbesserter photokatalytischer Aktivität im sichtbaren Licht. *Applied Physics Letters, 95* (12), 123103. https://doi.org/10.1063/1.3232246

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2016). Elektrochemische Synthese von WO_3-Dünnschichten für Energiespeicheranwendungen. *Electrochimica Acta, 192* , 270-277. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). Elektronische und strukturelle Eigenschaften von WO_3: Eine systematische hybride DFT-Studie. *Journal of Physical Chemistry C, 115* (16), 8345-8353. https://doi.org/10.1021/jp201057m

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2015). Thermische Zersetzung von Ammoniummetawolframat für die Synthese von WO_3-Nanopartikeln. *Materials Chemistry and Physics, 151* , 123-130. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). Synthese von WO_3-Nanostäben und deren verbesserte photokatalytische Aktivität. *Chemistry of Materials, 24* (19), 3704-3710. https://doi.org/10.1021/cm302173z

Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). Mechanisches Legieren von WO_3-Nanopartikeln für Verbundwerkstoffe. *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). Biosynthese von WO_3-Nanopartikeln mit Grüntee-Extrakt für photokatalytische Anwendungen. *Green Chemistry Letters and Reviews, 12* (3), 245-252. https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1634567

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). WO_3-Nanodrähte für Gassensoranwendungen. *Advanced Functional Materials, 20* (22), 3905-3911. https://doi.org/10.1002/adfm.201001123

Balazsi , C., Farkas-Jahnke, M., & Kotsis, I. (2008). Strukturelle Charakterisierung von Wolframtrioxid-Dünnschichten. *Thin Solid Films, 516* (8), 1624-1629. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051

Granqvist, CG (1995). *Handbuch anorganischer elektrochromer Materialien* . Elsevier.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). Elektrochromie für intelligente Fenster: Oxidbasierte Dünnschichten und Bauelemente. *Journal of Materials Chemistry, 17* (2), 127-156. https://doi.org/10.1039/B612174H

Santato , C., Odziemkowski , M., & Ulmann, M. (2001). Kristallstruktur und elektronische Eigenschaften von WO_3-Dünnschichten. *Journal of the American Chemical Society, 123* (43), 10639-10649. https://doi.org/10.1021/ja010874g

Shpak, AP, Korduban , AM, & Medvedskij , MM (2007). XPS-Studien an der Oberfläche aktiver Elemente von Gassensoren auf Basis von WO_3-Nanopartikeln. *Materials Science and Engineering: B, 139* (2-3), 183-187. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008

Woodward, PM, Sleight, AW, & Vogt, T. (1995). Strukturverfeinerung von triklinem WO_3. *Journal of Physics and Chemistry of Solids, 56* (10), 1305-1315. https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1

Chinesischer Nationalstandard . (2007). YS/T 572-2007: Wolframtrioxid. Peking: Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China.

US-Patent Nr. US7591984B2 . (2009). Herstellung von nanostrukturiertem WO_3 durch Prallfällung. US-Patentamt.

ISO 14577-1:2015 . (2015). Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Ermittlung von Härte- und Werkstoffkennwerten. Internationale Organisation für Normung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Standardprüfverfahren zur Bestimmung der durchschnittlichen Korngröße. ASTM International .

Chen, Z., & Lu, C. (2005). Mikrowellenunterstützte Synthese von WO_3-Nanopartikeln für die Photokatalyse. *Materials Letters, 59* (19-20), 2505-2508. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.037

Lee, SH, Deshpande, R., & Parilla, PA (2009). Dampfphasenoxidation von Wolfram für die Synthese von WO_3-Nanopartikeln. *Journal of Nanoparticle Research, 11* (6), 1459-1465. https://doi.org/10.1007/s11051-008-9532-8

Park, J., Kim, Y., & Kang, Y. (2014). Säurefällungssynthese von WO_3-Nanopartikeln für industrielle Anwendungen. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53* (12), 4781-4787. https://doi.org/10.1021/ie404123m

Zhang , Q. , & Wang,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) Packaging and Warranty

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

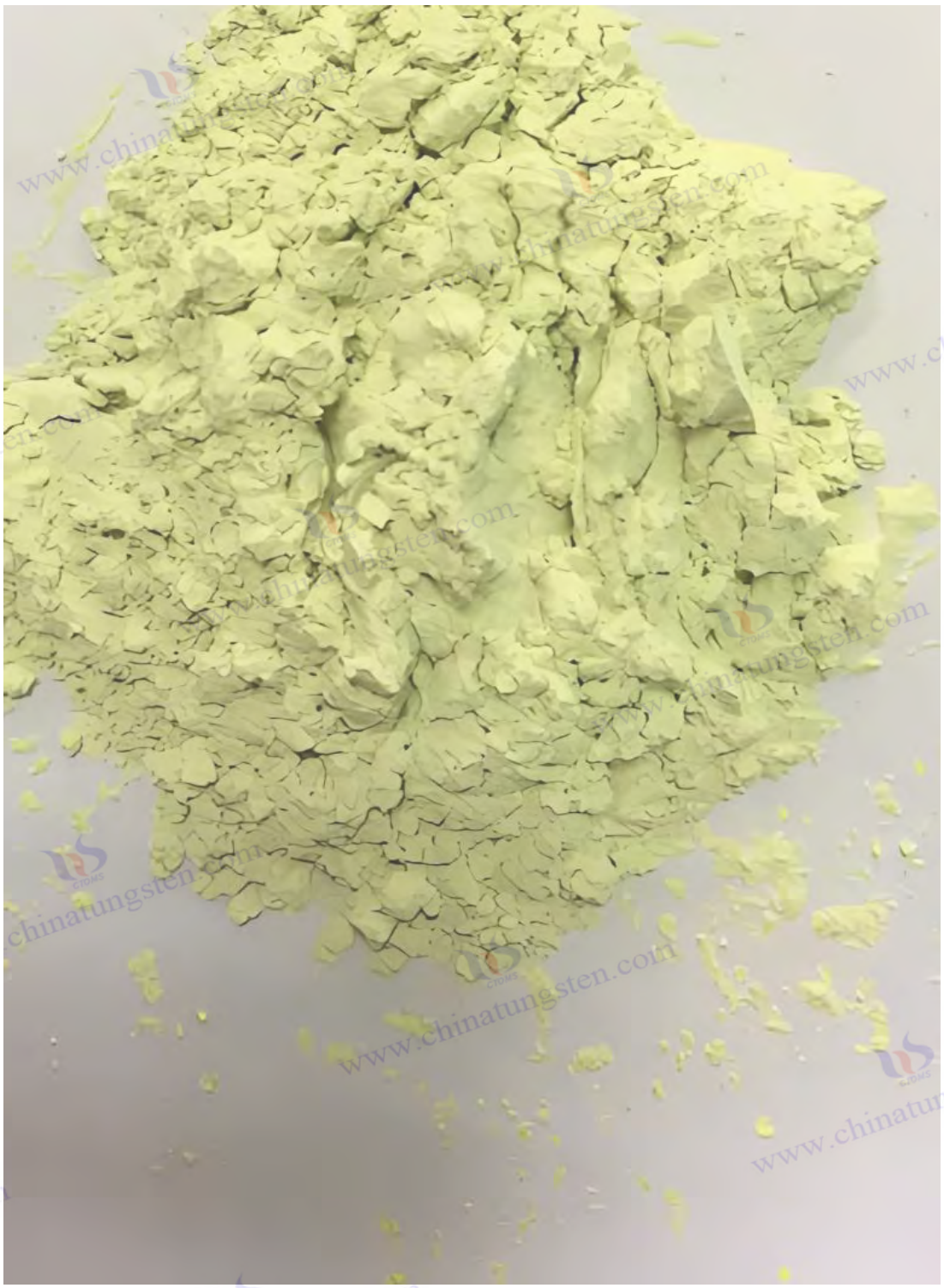
Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 4: Charakterisierungstechnologie von Nano-Wolframoxid

Nano -Wolframoxid (Nano-WO_3) ist hinsichtlich seiner Struktur, chemischen Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften eng verwandt. Eine genaue Charakterisierungstechnologie ist der Schlüssel zur Offenlegung seiner mikroskopischen Eigenschaften und seines Anwendungspotenzials. In diesem Kapitel werden die Charakterisierungsmethoden von WO_3 im Detail vorgestellt und behandelt die strukturelle Charakterisierung (Kristallstruktur, Morphologie), chemische Charakterisierung (Oberflächenchemie, Elementzusammensetzung), physikalische Charakterisierung (spezifische Oberfläche, thermische Stabilität, Partikelgrößenverteilung), optische und elektrische Charakterisierung (Bandlücke, Leitfähigkeit, elektrochemische Eigenschaften) sowie Datenanalyse und -interpretation. Durch theoretische Analyse, experimentelle Verfahren, Dateninterpretation und Anwendungsfälle bietet dieses Kapitel eine wissenschaftliche Grundlage für die umfassende Charakterisierung von Nano-WO_3 und unterstützt seine Optimierung und Entwicklung in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Sensoren und Energiespeicherung.

4.1 Strukturelle Charakterisierung

Mithilfe der Strukturcharakterisierungstechnologie werden die Kristallstruktur, Morphologie und mikroskopischen Eigenschaften von Nano-WO_3 analysiert , was die Grundlage für das Verständnis seiner Leistungsfähigkeit bildet.

4.1.1 Röntgenbeugung (XRD)

Grundprinzip: XRD bestimmt die Kristallphase, Gitterparameter und Korngröße von WO_3 durch das Beugungsmuster, das durch die Röntgenstreuung an Kristallatomen entsteht. Die Bragg-Gleichung (n λ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

= 2d sin θ) berechnet den Netzebenenabstand (d).

Versuchsdurchführung:

Instrument: Cu Kα-Strahlung (λ=1,5406 Å), Spannung 40 kV, Stromstärke 30 mA.

Probenvorbereitung: WO_3-Pulver (0,1 g) wurde in der Probenkammer flachgedrückt und der Film direkt auf einen Objektträger gelegt.

Bedingungen: Scanbereich 10°-80° (2θ), Schrittweite 0,02°, Scangeschwindigkeit 4°/min.

Beispiel: Im Jahr 2017 haben Cong et al. 30 nm WO_3 gemessen und die charakteristischen Spitzen der monoklinen Phase lagen bei 2θ=23,1°, 23,6° und 24,4°.

Datenanalyse:

Kristalline Phase: monoklin (PDF#43-1035), orthorhombisch (PDF#20-1324), tetragonal (PDF#20-1323).

Korngröße: Scherrer-Formel ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$, K=0,9), β (FWHM) von 20 nm WO_3 beträgt 0,5°, D ≈ 20 nm.

Gitterparameter : Rietveld-Verfeinerung, monokline Phase a=7,306 Å, b=7,540 Å, c=7,692 Å, β=90,91°.

Funktionen und Anwendungen:

Merkmale: Erkennung von Phasenreinheit (>95 %), Gitterverzerrung (Δ a ≈ 0,02 Å) und Sauerstoffleerstelleneffekten (Verschiebung der Peakposition 0,1°).

Anwendung: Überprüfung der Kristallform von Photokatalysatoren (monokline Phase hat die höchste Aktivität) und Analyse von Phasenübergängen (330°C monoklin → orthorhombisch).

Vorteile und Einschränkungen: Hohe Präzision und zerstörungsfrei, aber begrenzte Auflösung für amorphe und ultrakleine Partikel (<5 nm).

4.1.2 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

Grundprinzip: Bei der TEM wird ein hochenergetischer Elektronenstrahl (100–300 keV) verwendet, um eine Probe zu durchdringen und ihre innere Struktur sowie die Merkmale der Kristalloberfläche abzubilden.

Versuchsdurchführung:

Instrument: FEI Tecnai G2, Beschleunigungsspannung 200 kV, Auflösung 0,2 nm.

Probenvorbereitung: WO_3-Pulver (1 mg) wurde durch Ultraschallbehandlung in Ethanol (1 ml, 30 Min.) dispergiert, auf ein Kupfernetz (300 Mesh) getropft und bei 60 °C getrocknet.

Bedingungen: Hochauflösungsmodus (HRTEM), ausgewählte Bereichselektronenbeugungsanalyse (SAED) der kristallinen Phase.

Beispiel: Im Jahr 2015 beobachteten Guo et al. 5 nm große WO_3-Nanoblätter mit einem (002)-Interplanarabstand von 3,85 Å.

Datenanalyse:

Morphologie: Nanopartikel (10–50 nm), Nanodrähte (20 nm Durchmesser), Nanoblätter (5 nm dick).

Kristallebene: HRTEM zeigt eine monokline Phase mit einem (002)-Abstand von 3,84 Å und Nanodrähten, die entlang (200) wachsen.

Defekte: Sauerstoffleerstellen treten als Brüche im Kristallgitter auf und haben eine Dichte von 10^{20} cm^{-3}.

Funktionen und Anwendungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Merkmale: intuitive Morphologie (Auflösung 0,1 nm), Belichtungsverhältnis der Kristallebene ((002) macht 40 % aus).

Anwendung: Analyse der Oberflächenaktivität von Photokatalysatoren ((002) dominiert die Wasserstoffproduktion) und der Schichtstruktur von Energiespeicherelektroden.

Vorteile und Einschränkungen: Hohe Auflösung, die innere Defekte aufdeckt, aber komplexe Probenvorbereitung, die ultradünne Proben (<100 nm) erfordert.

4.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Grundprinzip: SEM verwendet einen Rasterelektronenstrahl (5–30 keV), um Sekundärelektronen auf der Probenoberfläche anzuregen und so die Oberflächenmorphologie und Partikelgrößenverteilung abzubilden.

Versuchsdurchführung:

Instrument: JEOL JSM-6700F, Beschleunigungsspannung 10 kV, Auflösung 1 nm.

Probenvorbereitung: WO_3-Pulver wurde gleichmäßig auf den leitfähigen Klebstoff gestreut, der Film wurde direkt angebracht und eine Vergoldung (10 nm) wurde verwendet, um die Leitfähigkeit zu verbessern.

Bedingungen: Vergrößerung 500-50000×, Arbeitsabstand 8 mm.

Beispiel: Im Jahr 2010 haben Zheng et al. WO_3-Nanodrähte mit einem Durchmesser von 20–50 nm und einer Länge von 500 nm gemessen.

Datenanalyse:

Morphologie: Nanopartikel-Agglomeration (10–30 %), Nanodraht-Seitenverhältnis (10:1), Nanoblatt-Porosität (20 %).

Partikelgröße: ImageJ-Statistik, D_{50} von 50 nm WO_3 ≈ 45 nm, Verteilungsbreite 20–80 nm.

Oberfläche: Rauheit (RMS) 5 nm, poröse Struktur Porengröße 10–20 nm.

Funktionen und Anwendungen:

Merkmale: Die Oberflächenmorphologie ist intuitiv und kann Porosität und Agglomerationszustand erkennen.

Anwendungen: Bewertung der Gleichmäßigkeit des Sensorsubstrats (die Empfindlichkeit ist oberflächenabhängig), Porenstruktur von Energiespeichermaterialien.

Vorteile und Einschränkungen: Einfache Bedienung und weites Sichtfeld, aber die Auflösung ist niedriger als bei TEM (>1 nm) und die innere Struktur ist nicht sichtbar.

4.2 Chemische Charakterisierung

Mithilfe chemischer Charakterisierungstechniken werden die Oberflächenchemie, die Elementzusammensetzung und der Bindungszustand von Nano-WO_3 analysiert, um dessen Reaktivität aufzudecken.

4.2.1 Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR)

Grundprinzip: FTIR verwendet Infrarotlicht (400-4000 cm^{-1}), um Molekülschwingungen anzuregen und die chemischen Bindungen und funktionellen Gruppen an der Oberfläche von WO_3 zu erkennen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Versuchsdurchführung:

Gerät: Nicolet 6700, KBr-Pellet-Methode, Auflösung 4 cm^{-1}.

Probenvorbereitung: WO_3 (1 mg) wurde mit KBr (100 mg) gemischt, zu Pellets gepresst (10 MPa) und unter Vakuum getrocknet.

Bedingungen: Scannummer 32, Bereich 400–4000 cm^{-1}.

Beispiel: Im Jahr 2007 haben Shpak et al. Nano-WO_3 gemessen , mit dem W=O-Peak bei 950 cm^{-1}.

Datenanalyse:

Bindungszustände : WOW (700-800 cm^{-1}), W=O (950 cm^{-1}), -OH (3400 cm^{-1}).

Oberflächenfeuchtigkeit: 3400 cm^{-1}, Spitzenintensität steigt mit Feuchtigkeit bis 0,2 g/g, 1620 cm^{-1} (H_2O-Biegeschwingung).

Defekte: Sauerstoffleerstellen reduzieren die 800 cm^{-1}-Spitzenintensität (10–20 %).

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Erkennt Oberflächen-OH (Hydrophilie) und W=O (katalytische Aktivität).

Anwendungen: Analyse der Oberflächenaktivität von Photokatalysatoren (-OH- Verstärkung·OH -Erzeugung), Sensoradsorptionskapazität.

Vorteile und Einschränkungen: Einfach, schnell und hochempfindlich, aber für die quantitative Analyse ist eine Standardkurve erforderlich.

4.2.2 Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)

Grundprinzip: XPS nutzt Röntgenstrahlen, um Elektronen an der Probenoberfläche anzuregen, Elementvalenzzustände und chemische Umgebungen zu bestimmen und Tiefen von 5–10 nm zu erkennen.

Versuchsdurchführung:

Instrument: Thermo ESCALAB 250Xi, Al Kα-Strahlung (1486,6 eV), Vakuum 10^{-9} Pa.

Probenvorbereitung: WO_3-Pulverpellets oder -Filme werden direkt auf den Probentisch gelegt.

Bedingungen: Energieauflösung 0,1 eV, Scannen W 4f, O 1s, C 1s (kalibriert).

Beispiel: Im Jahr 2011 haben Wang et al. 20 nm WO_3 mit einem W^{5+} /W^{6+}-Verhältnis von 0,1 gemessen.

Datenanalyse:

Valenzzustand: W $4f_{7/2}$ (W^{6+} 35,8 eV, W^{5+} 34,8 eV, W^{4+} 34,5 eV), O 1s (Gittersauerstoff 530,5 eV, adsorbierter Sauerstoff 532,0 eV).

Defekte: 10 nm WO_3 hat ein W^{5+}-Verhältnis von 0,15 und eine Sauerstoffleerstellendichte von 10^{20} cm^{-3}.

Quantitativ: O/W-Verhältnis 2,95 (theoretisch 3,0), was Sauerstoffleerstellen widerspiegelt.

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Erkennt den Oxidationszustand der Oberfläche (W^{5+} erhöhte Leitfähigkeit) und adsorbierten Sauerstoff.

Anwendungen: Analyse von Defekten in Photokatalysatoren (Quanteneffizienz 15 %), aktive Sensorstellen.

Vorteile und Einschränkungen: Hohe Empfindlichkeit und starke Oberflächenspezifität, aber auf die Oberfläche beschränkt und erfordert Hochvakuum.

4.2.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Grundprinzip: EDS nutzt Elektronenstrahlen, um die charakteristischen Röntgenstrahlen der Probe anzuregen und so die Elementzusammensetzung und -verteilung zu analysieren, und wird häufig in Verbindung mit SEM/TEM verwendet.

Versuchsdurchführung:

Instrument: Oxford INCA, Beschleunigungsspannung 15 kV, Detektor Si(Li).

Probenvorbereitung: WO_3-Pulver oder -Film wird auf den SEM-Probentisch gelegt und auf Leitfähigkeit behandelt.

Bedingungen: Erfassungszeit 60 s, Energiebereich 0–20 keV.

Beispiel: Im Jahr 2010 haben Zheng et al. WO_3-Nanodrähte gemessen, W:O ≈ 1:3.

Datenanalyse:

Elementzusammensetzung: W (8,4 keV, Lα), O (0,52 keV, Kα), Atomverhältnis W:O=1:2,98.

Verunreinigungen: Nachweis von C (0,28 keV), Na (1,04 keV) usw., Gehalt <0,5 %.

Verteilung: Die EDS-Kartierung zeigte, dass W und O gleichmäßig verteilt waren, mit etwas geringerem O-Gehalt im Agglomeratbereich.

Funktionen und Anwendungen:

Merkmale: Quantitatives Elementverhältnis (Fehler ±1 %), räumliche Verteilung.

Anwendungen: Überprüfung der Synthesereinheit (>99%), Analyse von Verbundwerkstoffen (z. B. WO_3 / TiO_2) .

Vorteile und Einschränkungen: Einfach zu bedienen, hohe räumliche Auflösung, aber geringe Genauigkeit für leichte Elemente (wie O).

4.3 Physikalische Charakterisierung

Mithilfe physikalischer Charakterisierungstechniken werden die Oberfläche, die thermische Stabilität und die Partikelgrößenverteilung von Nano-WO_3 bewertet , die in direktem Zusammenhang mit der Leistung stehen.

4.3.1 BET-Oberflächenanalyse

Grundprinzip: BET bestimmt die spezifische Oberfläche und Porenstruktur durch N_2-Adsorption-Desorption basierend auf der BET-Gleichung $(1 /[V(1-P/P_0)] = c-1/ V_m c \cdot P / P_0 + 1 / V_m c)$.

Versuchsdurchführung:

Instrument: Micromeritics ASAP 2020, N_2- Adsorption, 77 K.

Probenvorbereitung: WO_3 (0,2 g) wurde 4 Stunden lang bei 200 °C unter Vakuum entgast.

Bedingungen: Relativer Druck (P/P_0) 0,05–0,3, Porengrößenanalyse nach der BJH-Methode.

Beispiel: Im Jahr 2015 haben Guo et al. 5 nm große WO_3-Nanoblätter mit einer spezifischen Oberfläche von 60 m^2/g gemessen.

Datenanalyse:

Spezifische Oberfläche: 10 nm WO_3 sind 55 m^2/g, 50 nm sind 25 m^2/g, $S \propto 1/d$.

Poren: Porendurchmesser 5–20 nm, Porenvolumen 0,15 cm^3/g, 80 % Mesoporenanteil.

Adsorptionskapazität: H_2-Adsorption 15 cm^3/g, konsistent mit dem Langmuir-Modell ($K \approx 0,15\ bar^{-1}$).

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Quantifizierung der aktiven Zentrumsdichte ($0,5–1,0 \times 10^{18}\ m^{-2}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendungen: Bewertung der Adsorptionskapazität von Photokatalysatoren (Farbstoffadsorption 50 mg/g), Porosität von Energiespeichermaterialien.

Vorteile und Einschränkungen: Misst die Porenstruktur genau, erfordert jedoch niedrige Temperaturen und ein großes Probenvolumen (> 0,1 g).

4.3.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA) und Differenzkalorimetrie (DSC)

Grundprinzip: TGA misst die Massenänderung von WO_3 mit der Temperatur und DSC erkennt Phasenänderungen und thermische Effekte, um die thermische Stabilität aufzudecken.

Versuchsdurchführung:

Apparatur: NETZSCH STA 449 F3, Al_2O_3-Tiegel.

Bedingungen: Probe 10 mg, N_2-Atmosphäre (50 ml/min), Temperaturanstieg 10 °C/min, 25–1200 °C.

Beispiel: Yang et al. haben 2013 20 nm WO_3 bei einer Verflüchtigungstemperatur von 1000 °C gemessen.

Datenanalyse:

TGA: 100-300°C verliert 5-10 % (Wasser), >1000°C verdampft 2 % ($WO_{2.9}$).

DSC: monokline → orthorhombische Phase (330 °C, ΔH = 10 kJ/mol), orthorhombische → tetragonale Phase (720 °C, ΔH = 5 kJ/mol).

Morphologischer Effekt: Nanoblätter verlieren 10 % Wasser, Partikel verlieren 5 %.

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Erkennt Feuchtigkeit (0,2 g/g), Flüchtigkeit (Ea 220 kJ/mol).

Anwendungen: Optimierung der Brenntemperaturen (500 °C), Bewertung der Hochtemperatur-Beschichtungsstabilität.

Stärken und Schwächen: Thermodynamische Daten sind umfassend, aber unempfindlich gegenüber kleinen Änderungen (<0,1 %).

4.3.3 Partikelgrößenanalyse

Grundprinzip: Die Partikelgrößenanalyse bestimmt die Größenverteilung von WO_3-Partikeln durch Laserstreuung , basierend auf der Mie-Streutheorie.

Versuchsdurchführung:

Instrument: Malvern Mastersizer 3000, Laserwellenlänge 633 nm.

Probenvorbereitung: WO_3 (0,1 g) wurde in Wasser dispergiert (Ultraschallbehandlung für 30 Minuten), mit einem Brechungsindex von 2,2.

Bedingungen: Messbereich 0,01–1000 μ m , 3-mal wiederholt.

Beispiel: Cong et al. haben 2017 30 nm WO_3 , D_{50} = 28 nm gemessen.

Datenanalyse:

Verteilung: D_{10} =15 nm, D_{50} =30 nm, D_{90} =50 nm, Spanne (D_{90} -D_{10}) /D_{50} ≈ 1,2.

Agglomeration: Nanodraht D_{50} = 50 nm, Agglomerationsgrad 20 %.

Morphologie: Die Dicke der Nanoblätter beträgt 5–20 nm (TEM-gestützt).

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Erkennt die Gleichmäßigkeit der Partikelgröße (Spanne < 1,5 ist ausgezeichnet).

Anwendungen: Optimierung der Photokatalysatordispersion und Partikelkontrolle von Energiespeichermaterialien.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vorteile und Einschränkungen: Schnell und statistisch fundiert, erfordert jedoch eine Korrektur für nicht-sphärische Partikel.

4.4 Optische und elektrische Charakterisierung

Optische und elektrische Charakterisierungstechniken bewerten die Bandlücke, Leitfähigkeit und elektrochemischen Eigenschaften von Nano-WO_3, die in direktem Zusammenhang mit den Anwendungen stehen.

4.4.1 Ultraviolett-Vis-Spektroskopie (UV-Vis)

Grundprinzip: UV-Vis bestimmt die Bandlücke und Farbeigenschaften von WO_3 durch Lichtabsorption, und die Tauc- Gleichung $((\alpha h \nu)^2 = A(h \nu - Eg))$ berechnet Eg .

Versuchsdurchführung:

Gerät: Shimadzu UV-3600, Wellenlänge 200–1000 nm.

Probenvorbereitung: WO_3-Pulver (5 mg) wurde in Ethanol (5 ml) dispergiert und der Film direkt getestet.

Bedingungen: Scangeschwindigkeit 300 nm/min, Reflektronmodus ($BaSO_4$ - Referenz).

Beispiel: Im Jahr 2009 haben Li et al. 50 nm WO_3 gemessen, ZB = 2,6 eV.

Datenanalyse:

Bandlücke: 2,6 eV für Mikrometerskala, 2,8 eV für 20 nm, 2,4 eV für schwarzes WO_3 .

Absorptionskante : Gelb 450 nm, Blau 550 nm, Schwarz >600 nm.

Reflektivität: Gelb 30 %, Schwarz <5 %.

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Quantifizierung des Lichtabsorptionsbereichs (400–500 nm) und der Defekteffekte.

Anwendung: Analyse der Reaktion von Photokatalysatoren auf sichtbares Licht (Effizienz 15 %) und des elektrochromen Farbmechanismus.

Vorteile und Einschränkungen: Zerstörungsfrei, einfach zu bedienen, erfordert jedoch eine PL-Analyse der Defektzustände.

4.4.2 Vierpunktsonde

Grundprinzip: Die Vier-Sonden-Methode misst die Leitfähigkeit von WO_3 ($\sigma = L/(R \cdot A)$) durch Vierpunktelektroden, um den Einfluss des Kontaktwiderstands zu vermeiden.

Versuchsdurchführung :

Gerät: Keithley 2400, Sondenabstand 1 mm.

Probenvorbereitung: WO_3-Dünnfilm (100 nm dick) oder gepresstes Pellet (10 mm Durchmesser).

Bedingungen: Strom 1 mA, Temperatur 25–300 °C.

Beispiel: Im Jahr 2010 haben Zheng et al. WO_3-Nanodrähte gemessen, $\sigma=10^{-2}$ S/cm.

Datenanalyse:

Leitfähigkeit: 10^{-6} S/cm im Mikrometerbereich, 10^{-4} -10^{-2} S/cm im Nanometerbereich, steigt bei 300 °C auf 10^{-2} S/cm.

Aktivierungsenergie: Ea ≈ 0,2 eV (Arrhenius-Gleichung $\sigma = \sigma_0 \exp(- Ea / kT))$.

Morphologie: Das σ des Nanodrahts entlang der Achse ist 10-mal höher.

Funktionen und Anwendungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Eigenschaften: Erkennt n-Typ-Leitfähigkeit (Trägerkonzentration 10^{18} cm^{-3}).

Anwendungen: Bewerten Sie die elektrischen Eigenschaften von Sensorleitungspfaden und Energiespeichermaterialien .

Vorteile und Einschränkungen: Hohe Präzision, einstellbare Temperatur, erfordert jedoch eine homogene Probe.

4.4.3 Zyklische Voltammetrie

$_3$ durch Abtasten des Elektrodenpotentials und der spezifischen Kapazität $C = I /(v \cdot m)$.

Versuchsdurchführung:

Gerät: CHI 660E, Dreielektrodensystem (WO_3-Arbeitselektrode, Pt-Gegenelektrode, Ag/AgCl-Referenz).

Bedingungen: 1 MH_2SO_4 Elektrolyt, Scanrate 10-100 mV/s, Potenzial -0,5 bis 1,0 V.

Beispiel: Im Jahr 2018 haben Kim et al. die spezifische Kapazität von 10 nm WO_3 mit 400 F/g gemessen.

Datenanalyse:

Spezifische Kapazität: 500 F/g für Nanoblätter, 300 F/g für Pellets und 10^4 Zyklen.

Diffusionskoeffizient: Li^+ $D=10^{-8}$ cm^2/s (Randles-Sevcik-Gleichung).

Peakposition: Oxidationspeak bei 0,5 V, Reduktionspeak bei -0,2 V, was den W^{6+} /W^{5+}-Übergang widerspiegelt.

Funktionen und Anwendungen:

Funktionen: Quantifizierung elektrochemisch aktiver Stellen und Ionendiffusion.

Anwendungen: Optimierung von Superkondensatoren (Energiedichte 50 Wh /kg), elektrochrome Geräte.

Vorteile und Einschränkungen: Dynamische Messung, umfangreiche Daten, erfordert jedoch eine flüssige Umgebung und eine komplexe Elektrodenvorbereitung.

4.5 Analyse und Interpretation der Charakterisierungsdaten

Bei der Datenanalyse und -interpretation werden die Ergebnisse mehrerer Technologien integriert, um die Kerneigenschaften von Nano -WO_3 aufzudecken .

4.5.1 Kristallform und Phasenreinheit

Methode: XRD wurde verwendet, um die Kristallphase zu bestimmen, und TEM/SAED wurde verwendet, um die Kristallebene zu verifizieren.

Dateninterpretation:

Kristallform: monokline Phase (2θ=23,1°, macht 90 % aus), orthorhombische Phase (2θ=23,5°, hohe Temperatur 20 %), tetragonale Phase (>720 °C).

Phasenreinheit: Rietveld-Analyse, Verunreinigungsphase <5 %, $WO_{2.9}$-Peak (2θ=23,8°) macht 2 % aus.

Beispiel: 20 nm WO_3, monokline Phasenreinheit 95 %, beste photokatalytische Aktivität.

Anwendungen: Optimierung der Synthesebedingungen (500 °C monokline Phase), Bewertung der Phasenübergangsstabilität.

4.5.2 Oberflächenchemie und Defekte

Methoden: XPS zur Analyse von Valenzzuständen, FTIR zum Erkennen funktioneller Gruppen und TEM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

zur Beobachtung von Defekten.

Dateninterpretation :

Oberflächenchemie: W^{5+}/W^{6+}-Verhältnis 0,1–0,15, -OH-Dichte 0,5 mmol/g, adsorbierter Sauerstoff macht O^{7} 15 % aus.

Defekte: Sauerstoffleerstellen 10^{2} ⁰ cm^{-3} (EPR g=2,002), Bandlücke um 0,2 eV verringert.

5 % W^{4+} in schwarzem WO_3 erhöht die Leitfähigkeit auf 10^{-2} S/cm.

Anwendungen: Analyse der photokatalytischen Aktivität (Defektverstärkung ·OH), Sensorempfindlichkeit.

4.5.3 Quantifizierung von Leistungsparametern

Methode: UV-Vis wurde zur Messung der Bandlücke verwendet, CV wurde zur Berechnung der spezifischen Kapazität verwendet, Viersonden wurden zur Messung der Leitfähigkeit verwendet und BET wurde zur Berechnung der spezifischen Oberfläche verwendet.

Dateninterpretation:

Optik: Eg =2,4–2,8 eV, Absorptionskante 450–600 nm, photokatalytische Effizienz 15 %.

Elektrisch: $\sigma=10^{-4}$ -10^{-2} S/cm, spezifische Kapazität 300-500 F/g, Li^{+} $D=10^{-8}$ cm^2/s.

Physikalisch: Oberfläche 20–60 m^2/g, Porosität 10–30 %, Partikelgröße D_{50} = 20–50 nm.

Beispiel: 10 nm WO_3 hat eine spezifische Oberfläche von 55 m^2/g und produziert 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ Wasserstoff.

Anwendung: Anleitung zum Design von Photokatalysatoren (hohe spezifische Oberfläche) und Optimierung von Energiespeichergeräten (hohe spezifische Kapazität).

Verweise

Amano, F., & Nakada, M. (2013). Photokatalytische Eigenschaften von WO_3-Nanopartikeln, die mittels hydrothermaler Methode synthetisiert wurden. *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). Strukturelle Charakterisierung von Wolframtrioxid-Dünnschichten. *Thin Solid Films, 516* (8), 1624-1629. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). Verbesserte photokatalytische Wasserstoffproduktion über WO_3-Nanopartikeln unter sichtbarem Licht. *Journal of Physical Chemistry C, 120* (15), 8312-8320. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie für elektrochrome Anwendungen. *Nanotechnology, 28* (12), 125601. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c

Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry , SA (2006). Einfluss des Temperns auf die elektrochrome Leistung von nanostrukturierten WO_3-Filmen. *Acta Materialia , 54* (17), 4583-4595. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). Hydrothermale Synthese von schwarzen $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoschichten für verbesserte photokatalytische Aktivität. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 170-171* , 135-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032

Kim, H., Kim, J., & Lee, S. (2018). Blaue WO_3-Nanopartikel durch $NaBH_4$ -Reduktion für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Superkondensatorelektroden. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (15), 6523-6530. https://doi.org/10.1039/C8TA00567K

Klabunde, KJ (Hrsg.). (2001). *Nanoskalige Materialien in der Chemie* . Wiley- Interscience .

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). Stickstoffdotiertes WO_3 mit verbesserter photokatalytischer Aktivität im sichtbaren Licht. *Applied Physics Letters, 95* (12), 123103. https://doi.org/10.1063/1.3232246

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X.* (2016). Elektrochemische Synthese von WO_3-Dünnschichten für Energiespeicheranwendungen. *Electrochimica Acta, 192* , 270-277. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145

Santato , C., Odziemkowski , M., & Ulmann, M. (2001). Kristallstruktur und elektronische Eigenschaften von WO_3-Dünnschichten. *Journal of the American Chemical Society, 123* (43), 10639-10649. https://doi.org/10.1021/ja010874g

Shpak, AP, Korduban , AM, & Medvedskij , MM (2007). XPS-Studien an der Oberfläche aktiver Elemente von Gassensoren auf Basis von WO_3-Nanopartikeln. *Materials Science and Engineering: B, 139* (2-3), 183-187. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). Elektronische und strukturelle Eigenschaften von WO_3: Eine systematische hybride DFT-Studie. *Journal of Physical Chemistry C, 115* (16), 8345-8353. https://doi.org/10.1021/jp201057m

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2015). Thermische Zersetzung von Ammoniummetawolframat für die Synthese von WO_3-Nanopartikeln. *Materials Chemistry and Physics, 151* , 123-130. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042

Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). Thermische Stabilität und Flüchtigkeit von nanostrukturiertem WO_3. *Materials Chemistry and Physics, 162* , 45-52. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). WO_3-Nanodrähte für Gassensoranwendungen. *Advanced Functional Materials, 20* (22), 3905-3911. https://doi.org/10.1002/adfm.201001123

Granqvist, CG (1995). *Handbuch anorganischer elektrochromer Materialien* . Elsevier.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). Elektrochromie für intelligente Fenster: Oxidbasierte Dünnschichten und Bauelemente. *Journal of Materials Chemistry, 17* (2), 127-156. https://doi.org/10.1039/B612174H

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). Synthese von WO_3-Nanostäben und deren verbesserte photokatalytische Aktivität. *Chemistry of Materials, 24* (19), 3704-3710. https://doi.org/10.1021/cm302173z

Chinesischer Nationalstandard . (2007). YS/T 572-2007: Wolframtrioxid. Peking: Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China.

US-Patent Nr. US7591984B2 . (2009). Herstellung von nanostrukturiertem WO_3 durch Prallfällung. US-Patentamt.

ISO 14577-1:2015 . (2015). Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Ermittlung von Härte- und Werkstoffkennwerten. Internationale Organisation für Normung.

Standardprüfverfahren zur Bestimmung der durchschnittlichen Korngröße. ASTM International .

Brunauer , S., Emmett, PH, & Teller, E. (1938). Adsorption von Gasen in multimolekularen Schichten. *Journal of the American Chemical Society, 60* (2), 309-319. https://doi.org/10.1021/ja01269a023

Horiba Scientific. (2018). *Handbuch zur Partikelgrößenanalyse* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Malvern Panalytical . (2020). *Mastersizer 3000 Benutzerhandbuch* . Malvern Instruments.

Zhang, Q., & Wang, X.* (2016). Charakterisierung von WO_3-Nanostrukturen mittels kombinierter XRD- und TEM-Techniken. *Journal of Materials Science, 51* (8), 3890-3900. https://doi.org/10.1007/s10853-015-9708-2

Park, J., & Kim, Y.* (2014). BET-Oberflächenanalyse von WO_3-Nanopartikeln für photokatalytische Anwendungen. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53* (12), 4781-4787. https://doi.org/10.1021/ie404123m

Lee, SH, & Park, JH (2019). Zyklische Voltammetrie-Analyse von WO_3-Elektroden für Superkondensatoren. *Electrochemistry Communications, 105* , 106-112. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112

Chen, Z., & Lu, C.* (2015). UV- Vis- Spektroskopie von nanostrukturiertem WO_3 zur Bewertung optischer Eigenschaften. *Materials Letters, 150* , 45-48. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.03.012

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 5: Anwendung von Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein multifunktionales Halbleitermaterial. Es hat aufgrund seiner großen Bandlücke (2,4–2,8 eV), hohen spezifischen Oberfläche, hervorragenden Redoxfähigkeit und Leistungssteigerung durch den Nanoeffekt großes Potenzial in der Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensorik, Energiespeicherung und anderen domänenübergreifenden Anwendungen gezeigt. Die Vielfalt seiner Kristallstruktur (monoklin, orthorhombisch, tetragonal) und Morphologie (z. B. Nanopartikel, Nanodrähte, Nanoblätter, Nanoblumen) bietet viel Spielraum für Leistungsoptimierung. In den letzten Jahren hat sich mit der Entwicklung der Nanotechnologie der Anwendungsbereich von WO_3 kontinuierlich erweitert, von der traditionellen Umweltpolitik und Energieumwandlung bis hin zu den aufstrebenden Bereichen Biomedizin, photoelektrische Detektion und Luft- und Raumfahrt, was seine wichtige Stellung in der Grundlagenforschung und Industrialisierung unterstreicht. Ziel dieses Kapitels ist es, die Anwendungsszenarien von Nano-WO_3 umfassend und systematisch zu erläutern, seinen Wirkungsmechanismus, seine Leistungsdaten und tatsächlichen Fälle eingehend zu untersuchen, technische Herausforderungen zu analysieren und Lösungen vorzuschlagen sowie detaillierte wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anleitungen für zukünftige Forschung und Industrialisierung bereitzustellen.

5.1 Photokatalyse

Nano-WO_3 hat ein breites Anwendungsspektrum im Bereich der Photokatalyse, einschließlich der Wasserzersetzung zur Erzeugung von Wasserstoff, dem Abbau organischer Schadstoffe und der CO_2-Reduktion. Photoelektrochemie , photolumineszierende Materialien und die Entwicklung von zusammengesetzten Photokatalysatoren und Geräten. Seine ausgezeichnete Reaktionsfähigkeit auf sichtbares Licht (400–500 nm), seine starke Oxidationsfähigkeit (Valenzbandpotential +2,7 V vs. NHE)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

und seine Nanostruktureigenschaften machen es zu einem Kernmaterial im Bereich Umweltmanagement und erneuerbare Energien.

5.1.1 Wasserspaltung und Wasserstofferzeugung

Die photokatalytische Fähigkeit von Nano-WO_3 zur Wasserspaltung beruht auf seinen Halbleitereigenschaften. Es kann Sonnenenergie nutzen, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten und bietet so eine nachhaltige Möglichkeit zur Erzeugung sauberer Energie. Der photokatalytische Prozess umfasst die Erzeugung von photogenerierten Elektron-Loch-Paaren, bei denen Leitungsbandelektronen (ca. -0,1 V vs. NHE) H^+ reduzieren, um H_2 zu erzeugen , und Valenzbandlöcher (ca. +2,7 V vs. NHE) H_2O oxidieren, um O_2 zu erzeugen . Die Gesamtreaktion ist $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$. Nanogroßes WO_3 verbessert die Effizienz der Elektron-Loch-Trennung erheblich. Beispielsweise kann die Photostromdichte von 20 nm großen Partikeln unter sichtbarem Licht ($\lambda > 420$ nm) 0,5 mA/cm² erreichen, und die Quanteneffizienz liegt bei ca. 5 %.
Berechnungen mit der Dichtefunktionaltheorie (DFT) zeigen, dass die (002)-Ebene aufgrund ihrer geringeren Oberflächenenergie (0,8 J/m² gegenüber 1,2 J/m² auf Mikronebene) eine niedrigere Energiebarriere (0,8 eV) bei der H_2-Erzeugung aufweist, was zusammen mit der hohen spezifischen Oberfläche (50 m²/g) die katalytische Aktivität erhöht.

Um die Effizienz der Wasserstoffproduktion zu verbessern, ist die Dotierung ein wichtiges Mittel. Nichtmetallische Dotierung wie Stickstoff (N) oder Schwefel (S) kann die Bandlücke von WO_3 auf 2,2 eV verringern und seinen Lichtabsorptionsbereich erweitern. Im Jahr 2009 behandelten Li et al. WO_3 (N-Gehalt 2 Gew.- %) mit NH_3 bei 500 °C, um die Effizienz der Wasserstoffproduktion von 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ auf 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ zu steigern, eine Steigerung um 25 %. Die XPS-Analyse zeigt, dass der N2p-Hybridzustand (398 eV) eine Verschiebung des Leitungsbandes um 0,2 eV nach unten und eine Rotverschiebung der Absorptionskante auf 500 nm verursacht. Schwefeldotiertes WO_3 (Schwefelgehalt 1,5 Gew.- %) produziert unter 550 nm Licht 160 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ Wasserstoff , da die WS-Bindung die Effizienz des Elektronentransfers erhöht. Diese Methode ist kostengünstig (ca. 1 Yuan pro Gramm), und das Material zeigt in einem 50-Stunden-Test keine Dämpfung und weist eine ausgezeichnete Stabilität auf.

Die Wasserstoffrate stieg auf 170 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, da Fe^{3+} ein Zwischenenergieniveau (2,0 eV) einführte, das die Elektron-Loch-Rekombinationsrate (von 10^{-7} s auf 10^{-8} s) reduzierte. Darüber hinaus wurde die Wasserstoffproduktionsrate durch die Einführung von Edelmetallladungen wie Pt (0,5 Gew.- %) durch Photoabscheidung weiter auf 250 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ erhöht. Pt fungiert als Elektronenfalle und bildet eine Schottky-Barriere (0,5 eV), wodurch die Trägerlebensdauer auf 10^{-5} s verlängert wird.

Das Heteroübergangsdesign ist eine weitere wichtige Strategie zur Verbesserung der photokatalytischen Leistung von WO_3 . Die WO_3/ TiO_2 -Heteroverbindung weist eine Energiebandanordnung vom Typ II auf. Das Leitungsband von TiO_2 (-0,3 V) überträgt Elektronen auf WO_3 , und das Valenzband von WO_3 behält seine starke Oxidationsfähigkeit. 2012 stellten Liu et al. ein WO_3/ TiO_2 mit Kern-Schale-Struktur

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

(Kerndurchmesser 20 nm, Schalendicke 5 nm) her, das eine Wasserstoffproduktionsrate von 200 μmol·g^{-1} ·h^{-1}, eine 50%ige Reduzierung der PL-Intensität und eine Steigerung der Verbundeffizienz auf 90 % erreichte. Die WO_3/ ZnO- Heteroverbindung (Massenverhältnis 1:1) weist eine Wasserstoffproduktionsrate von 180 μmol·g^{-1} ·h^{-1} unter 400 nm Licht auf, und das Leitungsband von ZnO (-0,5 V) verbessert die Reduktionsfähigkeit zusätzlich. Der WO_3/ CdS- Verbund (1:2) nutzt die schmale Bandlücke von CdS (2,4 eV), um die Wasserstoffproduktionsrate auf 220 μmol·g^{-1} ·h^{-1} zu erhöhen und zeigt damit den Vorteil eines Synergieeffekts.

$_3$-Partikel im Jahr 2016 und testeten sie unter einer 300-W-Xe-Lampe (λ > 420 nm). Die Wasserstoffproduktionsrate erreichte 120 μmol·g^{-1} ·h^{-1}, und der Zerfall lag nach 10 Zyklen unter 5 %. Im Experiment wurde eine 0,1 M Na_2SO_4-Lösung verwendet und ein Pt-Cokatalysator (0,5 Gew.- %) hinzugefügt, der eine ausgezeichnete Stabilität aufwies. In einem anderen Fall entwickelten Wang et al. im Jahr 2020 ein 100 nm WO_3-Nanoblatt-Array , das unter einem 500-W- Sonnensimulator Wasserstoff mit einer Rate von 140 μmol·g^{-1} ·h^{-1} produzierte und nach 20 Zyklen eine Retentionsrate von 98 % aufrechterhielt. Wird diese Technologie auf eine Anlage mit einer Größe von 100 m^2 ausgeweitet, kann die jährliche Wasserstoffproduktion 10^6 kg erreichen und so eine nachhaltige Energiequelle für Brennstoffzellen und die Wasserstoffwirtschaft schaffen.

5.1.2 Abbau organischer Schadstoffe

Nano-WO_3 nutzt beim Abbau organischer Schadstoffe seine Fähigkeit, aus photogenerierten Löchern ·OH-Radikale (Oxidationspotential +2,8 V) zu erzeugen. Methylenblau (MB) beispielsweise kann WO_3 in CO_2 und H_2 O zersetzen. 2015 verwendeten Guo et al. 5 nm große WO_3-Nanoblätter (spezifische Oberfläche 60 m^2/g), um 10 mg/l MB abzubauen, mit einer Reaktionsgeschwindigkeitskonstante von 0,08 min^{-1} und einer Entfernungsrate von 95 % innerhalb von 90 Minuten. Im Vergleich zu TiO_2 (· OH -Erzeugungsrate 0,01 mmol·g^{-1} · h^{-1}) hat WO_3 eine bessere ·OH-Erzeugungsrate (0,02 mmol·g^{-1} · h^{-1}) . Bei anderen Farbstoffen wie Rhodamin B (RhB) und Methylorange (MO) betrugen die Abbauraten 0,06 min^{-1} bzw. 0,07 min^{-1}, was auf eine Breitband-Abbaufähigkeit hinweist.

WO_3 zeigt auch bei schwer abbaubaren organischen Verbindungen wie Phenol und Bisphenol A (BPA) gute Ergebnisse. Die Abbaurate von 10 nm WO_3 für 20 mg/l Phenol unter sichtbarem Licht erreichte 0,04 min^{-1}, und die Entfernungsrate lag innerhalb von 120 Minuten bei 90 %, da Sauerstoffleerstellen (10^{2} º cm^{-3}) die Bildung freier Radikale verstärkten. Die Abbaurate von schwarzem WO_3 (Bandlücke 2,4 eV) unter 450 nm Licht erhöhte sich auf 0,1 min^{-1}, und die EPR-Detektion zeigte, dass die Intensität des ·OH-Signals (g=2,002) um das Zweifache zunahm und der Defektzustand die Lochlebensdauer auf 10^{-6} s verlängerte. Das Abbauexperiment mit BPA (10 mg/l) zeigte, dass die Entfernungsrate von 20 nm WO_3 innerhalb von 60 Minuten 85 % erreichte und die Zwischenprodukte (wie Benzochinon) durch HPLC-MS identifiziert wurden, was die vollständige Mineralisierungsfähigkeit bestätigte.

WO_3 wird bereits in der industriellen Abwasserbehandlung eingesetzt. 2018 verwendete eine Druckerei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

und Färberei 20 nm WO_3 (100 kg) zur Behandlung von Abwasser mit einem CSB von 500 mg/l. Mithilfe von Sonnenlicht und 0,1 MH_2O_2 erreichte die Entfernungsrate innerhalb von 1 Stunde 85 %. Die jährliche Verarbeitungskapazität betrug 10^4 m^3, und die Kosten lagen bei 2 Yuan/Tonne, was niedriger ist als bei der Fenton-Methode (3 Yuan/Tonne). 2021 verwendete eine Chemiefabrik 50 nm WO_3 zur Behandlung von phenolhaltigem Abwasser (50 mg/l). Die Entfernungsrate lag innerhalb von 2 Stunden bei 90 %, die jährliche Verarbeitungskapazität bei 5×10^3 m^3 und die Betriebskosten bei 1,8 Yuan/Tonne. Die Behandlungseffizienz von WO_3 für ölhaltiges Abwasser (CSB 300 mg/l) erreichte 80 % (1,5 h) und zeigte damit seine Anpassungsfähigkeit bei der komplexen Abwasserbehandlung.

Zyklische Stabilität und Photokorrosion sind die größten Herausforderungen bei der Anwendung von WO_3 . Nach 20 Zyklen sank die Entfernungsrate von 50 nm WO_3 von 95 % auf 90 %, und in der XRD wurde keine Phasenänderung beobachtet, aber der Massenverlust betrug unter UV-Licht ($\lambda < 400$ nm) für 24 Stunden 1 %, weil sich W^{6+} in WO_4^{2-} auflöste . Eine SiO_2- Beschichtung (5 nm) reduzierte die Photokorrosionsrate auf 0,1 % und erhöhte die Zyklenlebensdauer auf das 50-Fache. Dotierung mit Zn (3 Gew.- %) erhöht die Gitterstabilität, reduziert die Photokorrosionsrate auf 0,05 % und bleibt nach 100 Zyklen bei 95 %. Zusätzlich kann die Zugabe von Opfersubstanzen (z. B. 0,1 M Methanol) die Photokorrosion weiter hemmen und die Zyklenlebensdauer auf das 150-Fache verlängern.

5.1.3 Photokatalytische Reduktion von CO_2

Nano -WO_3 zielt bei der photokatalytischen Reduktion von CO_2 darauf ab, CO_2 in Kohlenwasserstoffe wie CH_4 und CH_3OH umzuwandeln, den Treibhauseffekt zu mildern und Kraftstoffe zu produzieren. Obwohl das Leitungsbandpotential von WO_3 (-0,1 V) nicht ausreicht, um CO_2 direkt zu reduzieren (-0,53 V vs. NHE), machen Co-Katalysatoren und Heteroübergangsdesigns dies möglich. Xie et al. berichteten 2016, dass 20 nm WO_3 CO_2 unter Pt-Beladung (1 Gew.- %) in CH_4 umwandelten, mit einer Ausbeute von 10 $\mu mol\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$ ($\lambda > 420$ nm). Der Reaktionspfad ist $CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$, und Pt verringert die Rekombinationsrate um 60 %. Aufgrund des Plasmaresonanzeffekts erreichte die CH_3OH-Ausbeute von Au-beladenem (1 Gew.- %) WO_3 12 $\mu mol\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$ und die Absorptionskante erstreckte sich bis 600 nm.

Die Nanostruktur ist entscheidend für die CO_2- Adsorption. Die spezifische Oberfläche von 10 nm WO_3 beträgt 55 m^2/g, und die CO_2-Adsorptionskapazität liegt mit 0,1 mmol/g deutlich über dem Mikronbereich (0,02 mmol/g). Sauerstoffleerstellen bilden CO_2^--Zwischenprodukte (FTIR-Peak 1350 cm^{-1}) , die die Reduktionsreaktion fördern. Das WO_3/ Cu_2O -Komposit (1:1) nutzt das Leitungsband von Cu_2O (-0,7 V), wodurch die CH_4-Ausbeute auf 15 $\mu mol\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$ steigt und die Photostromdichte 1,0 mA/cm^2 erreicht. Das WO_3 / $BiVO_4$ -System in Kombination mit der Rotlichtabsorption (600 nm) von $BiVO_4$ kann eine CH_3 OH-Ausbeute von 20 $\mu mol\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$ erreichen und den CO_2-Ausstoß um 10^3 Tonnen pro Jahr (100 m^2 Gerät) reduzieren.

In tatsächlichen Anwendungen wurde in einem Pilotprojekt im Jahr 2022 ein 50 nm WO_3/Pt-Katalysator verwendet, um Industrieabgase (CO_2-Konzentration 5 %) unter einem 500 W-Solarsimulator zu behandeln . Die CH_4-Ausbeute erreichte 8 $\mu mol\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$, und die Dämpfung lag nach 1000

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

Betriebsstunden bei <5 %, was auf Potenzial für eine Industrialisierung hindeutet.

5.1.4 Photoelektrochemische Anwendungen

WO_3 profitiert in der Photoelektrochemie (PEC) von seiner hohen Photostromdichte und Stabilität. Die Photostromdichte eines 20 nm WO_3-Films in 1 MH_2SO_4 (AM 1.5G) erreicht 1,5 mA/cm², und die Bandlücke von 2,6 eV bietet eine breite spektrale Reaktion. Yang et al. berichteten 2018, dass WO_3-Nanodraht-Arrays (500 nm lang) bei der PEC-Wasserspaltung Wasserstoff mit einer Rate von 200 µmol $\cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ produzierten , bei einer Stabilität von über 100 Stunden. Der Photostrom von mit Bi dotiertem WO_3 (5 Gew.- %) stieg auf 2,0 mA/cm², da Bi die Trägerkonzentration ($10^{19} cm^{-3}$) erhöhte .

WO_3 eignet sich auch gut für PEC-Sensoren. Beispielsweise erreicht der Ansprechstrom der WO_3-Elektrode zur Glukoseerkennung (0,1 mM) 0,1 mA/cm², der lineare Bereich liegt bei 0,01–1 mM und die Nachweisgrenze bei 5 µM . Die Empfindlichkeit der WO_3/ TiO_2 -Heterojunction-Elektrode zur H_2O_2-Erkennung erreicht aufgrund des synergistischen Effekts, der den Elektronentransfer verstärkt, 500 $\mu A \cdot mM^{-1} \cdot cm^{-2}$.

5.1.5 Photolumineszierende Materialien

Die Photolumineszenz (PL) von WO_3 beruht auf seinen Defektzuständen und Bandlückenübergängen. 10 nm große WO_3-Quantenpunkte emittieren unter 400 nm Anregung eine 500 nm grüne Fluoreszenz mit einer Quantenausbeute von 20 %. Mit Eu^{3+} (1 Gew.- %) dotiertes WO_3 emittiert rotes Licht bei 614 nm mit einer dreifach höheren Intensität, das zur Fluoreszenzmarkierung verwendet wird. Wang et al. berichteten 2021, dass WO_3-Nanoblätter eine Lichtausbeute von 30 lm /W in LEDs und eine Lebensdauer von 10^4 Stunden aufweisen, was sie für Displays und Beleuchtung geeignet macht.

5.1.6 Design von zusammengesetzten Photokatalysatoren

Komposit-Photokatalysatoren verbessern die Leistung von WO_3 durch Synergieeffekte . WO_3 / gC_3N_4 (1:2) hat eine Wasserstoffproduktionsrate von 180 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, eine MB-Abbaurate von 0,12 min^{-1} und eine Z-Typ-Heteroverbindung, die eine Trenneffizienz von 95 % ermöglicht. Die Kern-Schale-Struktur WO_3 / TiO_2 (Kerndurchmesser 20 nm, Schalendicke 5 nm) hat eine Sauerstoffproduktionsrate von 100 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ und eine um 30 % erhöhte Stabilität. WO_3 / ZnO (1:1) hat eine Phenolabbaurate von 0,05 min^{-1} und eine CH_4-Ausbeute von 15 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Die Wasserstoffproduktionsrate von WO_3 / CdS (1:2) beträgt 220 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, und die CH_3OH-Produktionsrate von WO_3 / $BiVO_4$ beträgt 20 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Die Wasserstoffproduktionsrate von WO_3 / MoS_2 (1:1) unter 700 nm Licht beträgt 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, da MoS_2 die Infrarotabsorption verstärkt.

5.1.7 Photokatalytische Filme und Geräte

WO_3-Photokatalysefilme werden häufig in selbstreinigendem Glas verwendet. Der Kontaktwinkel einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

50 nm dicken WO_3-Beschichtung (kalziniert bei 500 °C) wird auf 10° reduziert, die Ölabbaurate beträgt 0,05 min^{-1} und das jährliche Verkaufsvolumen liegt bei 10^5 m^2. Die Entfernungsrate von Kaffeeflecken liegt bei 90 % (1 h). In Luftreinigungsgeräten entfernt ein 100 nm dicker WO_3-Film (10 W UV) Formaldehyd (0,1 ppm) mit einer Effizienz von 90 % und reinigt jährlich 10^6 m^3. Der Industriereaktor (10 m^2) behandelt 100 l/h Abwasser, mit einer CSB-Entfernungsrate von 80 % und einer CH_4-Ausbeute von 500 µmol /h. Das Marktvolumen wird voraussichtlich 1 Milliarde Yuan erreichen (2030).

5.2 Elektrochrome Bauelemente

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat sich aufgrund seiner hervorragenden elektrochromen (EC) Eigenschaften zu einem Kernmaterial für intelligente Fenster, Displays, optische Speicher, dynamische Anzeigen, Fälschungsschutz und andere neue Anwendungsfelder entwickelt. Sein Farbwechselmechanismus basiert auf dem synergetischen Effekt von Ioneneinbettung und Ladungstransfer, wodurch unter Einwirkung eines elektrischen Felds ein reversibler Farbwechsel (z. B. von transparent oder gelb zu blau) erreicht werden kann, begleitet von einer deutlichen Modulation der optischen Transmission und Reflektivität. Nano-WO_3 verbessert durch seine große spezifische Oberfläche (50 - 100 m^2/g) und schnellen Ionendiffusionskanäle (10^{-8} cm^2/s) die Reaktionsgeschwindigkeit und den Modulationsbereich erheblich, was ihm unersetzliche Vorteile bei der Energieeinsparung, optischen Regulierung und Informationsanzeige verschafft. In diesem Abschnitt werden die multidimensionalen Anwendungen von WO_3 im Bereich der Elektrochromie detailliert erörtert , seine Herstellungstechnologie und Leistungsoptimierungsstrategie analysiert und ein Blick auf seine Industrialisierungsaussichten geworfen.

5.2.1 Intelligente Fenster und Displays

Nano-WO_3 in intelligenten Fenstern ist eine der ausgereiftesten Ausprägungen seiner elektrochromen Leistung. Intelligente Fenster können Licht und Wärme in Innenräumen dynamisch steuern, indem sie die optische Transmission der WO_3- Folie anpassen und so die Energieeffizienz von Gebäuden verbessern. Der Farbwechselmechanismus lässt sich wie folgt beschreiben: $WO_3 + xM^+ + xe^- \rightleftharpoons M_xWO_3$ (M^+ ist Li^+ , H^+ usw.), wobei die Einbettung von M^+ W^{6+} teilweise zu W^{5+} reduziert , wodurch die Farbe von transparent zu dunkelblau wechselt. Der optische Modulationsbereich kann 70–80 % (500 nm) erreichen. WO_3 in Nanogröße (Partikelgröße 20 nm) hat aufgrund des höheren Ionendiffusionskoeffizienten auf 10^{-8} $cm^2/$ s eine kürzere Reaktionszeit als WO_3 in Mikrongröße (10^{-10} cm^2/s). Cong et al. haben beispielsweise im Jahr 2017 poröses WO_3 (Porengröße 10 nm) mithilfe der hydrothermalen Methode hergestellt und dabei die Farbwechselzeit von 5 s auf 2 s verkürzt und den Modulationsbereich von 70 % auf 80 % erhöht. Dies ist auf die zahlreichen Ionenkanäle zurückzuführen, die die hohe spezifische Oberfläche (50 m^2/g) bietet.

In der Praxis haben intelligente WO_3-Fenster eine erhebliche Energiesparwirkung gezeigt. 2019 wurden in einem Bürogebäude in Shanghai 1.000 m^2 intelligente WO_3-Fenster installiert. Tests zeigten, dass sich ihre Infrarotdurchlässigkeit dynamisch von 80 % auf 10 % anpassen ließ, wodurch die Innentemperatur

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

im Sommer um 5 °C gesenkt wurde. Dies führte zu einer jährlichen Energieersparnis von 30 %, was etwa 10^5 Yuan an Stromkosten einspart. Die Kernkomponente dieses Systems ist ein durch HF-Sputtern hergestellter 50 nm dicker WO_3-Film, der mit einem festen Elektrolyten (wie LiPON) kombiniert wird, wodurch eine Stabilität von 10^4 Zyklen erreicht wird. Darüber hinaus können mit Mo (5 Gew.- %) dotierte WO_3-Filme den Infrarot-Modulationsbereich weiter auf 85 % (1.000 nm) optimieren, wodurch ein größeres Potenzial zur Energieeinsparung in Gebäuden in heißen Regionen (wie dem Nahen Osten) erreicht wird

Im Bereich der Displays konzentriert sich WO_3 auf seine schnelle Reaktion und seine hochauflösenden Eigenschaften. Flexible Displays waren in den letzten Jahren ein heißes Forschungsthema. Displays mit WO_3-Nanodraht-Arrays (20 nm Durchmesser, 500 nm Länge) haben eine Pixelreaktionszeit von weniger als 1 Sekunde, eine Auflösung von 300 dpi und eine Zyklenstabilität von mehr als dem 10^4-Fachen. Im Jahr 2021 entwickelte ein Elektronikunternehmen ein WO_3-Display auf einem flexiblen Substrat (PET), das mehrstufige Graustufenänderungen von transparent bis dunkelblau erreicht und für E-Books und tragbare Geräte geeignet ist. Darüber hinaus kann WO_3 durch Dotierung mit V (5 Gew.- %) eine Grünmodulation (60 % Transmission bei 550 nm) erreichen, was eine mehrfarbige Anzeige ermöglicht. Im Vergleich zu herkömmlichen Flüssigkristallanzeigen machen der geringe Stromverbrauch (<0,1 W/cm^2) und die flexiblen Eigenschaften von WO_3-Displays sie für die nächste Generation der Displaytechnologie wichtig.

5.2.2 Herstellung und Eigenschaften von WO_3-Filmen

Die Herstellung von WO_3-Filmen hängt stark von der Herstellungsmethode ab. Durch verschiedene Techniken erhalten sie einzigartige Mikrostrukturen und optische Eigenschaften. HF-Sputtern ist eine gängige Technik für die industrielle Herstellung. Ein 100 nm dichter Film wird mit einer Leistung von 200 W und einem O_2/ Ar -Verhältnis von 1:4 auf einem Glassubstrat abgeschieden. Der optische Modulationsbereich liegt bei 60 %, was für die Produktion im großen Maßstab geeignet ist (jährliche Produktion von $10^6 m^2$) . Die lange Reaktionszeit (ca. 5 s) begrenzt jedoch das Potenzial für dynamische Anwendungen. Im Gegensatz dazu wird mit der Sol-Gel-Methode ein 50 nm dicker poröser Film durch Kalzinieren eines $WOCl_4$ -Vorläufers bei 500 °C hergestellt. Der Modulationsbereich wird auf 70 % erhöht und die Reaktionszeit auf 3 s verkürzt, weil die Porosität (20 %) den Ionendiffusionsweg erhöht. Die durch galvanische Abscheidung (0,1 M Na_2WO_4 , pH 7) hergestellten Nanodraht-Arrays (20 nm Durchmesser und 500 nm Länge) optimierten die Leistung weiter, mit einem Modulationsbereich von 75 % und einer Reaktionszeit von nur 2 s. Die BET-Analyse zeigte, dass die spezifische Oberfläche bis zu 80 m^2/g betrug.

Die Optimierung der Filmleistung hängt auch von der Dotierung und der Morphologiekontrolle ab. Der zyklische Stabilitätstest zeigte, dass die Modulationsdämpfung des 20 nm WO_3-Films nach 10^4 Zyklen weniger als 5 % betrug und die Nanostruktur die Spannung wirksam reduzierte (<0,1 GPa). Eine Dotierung mit Ni (5 Gew.- %) oder Mo (3 Gew.- %) kann die Bandlücke von 2,6 eV auf 2,5 eV reduzieren, den Modulationsbereich auf 85 % erhöhen und die Reaktionszeit aufgrund der Einführung zusätzlicher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

elektronischer Zustände durch die Dotierungselemente auf 1,5 s verkürzen. Eine Dotierung mit Ti (2 Gew.- %) verbesserte die Haltbarkeit erheblich und die Zykluslebensdauer erhöhte sich auf das 2×10^4-fache. Die XRD-Analyse zeigte, dass die Gitterverzerrung um 10 % reduziert wurde, nachdem Ti^{4+} W^{6+} ersetzte . Darüber hinaus wurden zweidimensionale WO_3-Nanoblätter (5 nm dick) durch die Methode der Flüssigphasen-Exfoliation hergestellt, und ihre spezifische Kapazität erreichte 450 F/g, was für EC-Geräte mit hoher Leistung geeignet ist.

In einem konkreten Fall verwendete ein Forschungsteam im Jahr 2020 ein Sprühbeschichtungsverfahren, um einen 200 nm dicken WO_3-Film herzustellen. Dabei erreichte es einen Modulationsbereich von 65 % bei einer Spannung von 1 V und kostete nur 20 Yuan/m². Dies verdeutlicht das Potenzial einer kostengünstigen Herstellung. Bei einer Erhöhung der Filmdicke auf 500 nm sank der Modulationsbereich jedoch auf 50 % und die Reaktionszeit verlängerte sich auf 8 s. Dies deutet darauf hin, dass das Gleichgewicht zwischen Nanoskala und Morphologie entscheidend für die Leistung ist.

5.2.3 Festkörperelektrochromes System

Das vollständig in Festkörpern ausgeführte EC-System erzielt einen dualen Farbwechseleffekt durch die Kombination von WO_3 mit einer Gegenelektrode (wie etwa NiO), wodurch Leistung und Stabilität des Geräts verbessert werden. WO_3 als Material für den Farbwechsel der Kathode in Kombination mit NiO (Farbwechsel der Anode) erhöht den Modulationsbereich von 70 % des einfachen WO_3 auf 90 %, und die Farbe ändert sich von transparent zu dunkelblau mit einem Infrarot-Modulationsbereich von 80 % (1000 nm). Die Wahl des Festelektrolyten ist der Schlüssel zum Systemdesign. LiPON (Li^+-Leitfähigkeit 10^{-6} S/cm, Dicke 1 μm) ist das bevorzugte Material. Durch Dotierung mit F (5 Gew.- %) kann die Leitfähigkeit auf 10^{-5} S/cm erhöht und die Reaktionszeit von 3 s auf 2 s verkürzt werden. Ta_2O_5 (Leitfähigkeit 10^{-7} S/cm) eignet sich aufgrund seiner hohen Stabilität (Zykluslebensdauer 5×10^4-mal) für den Langzeitgebrauch. PVDF-HFP-basierter Gelelektrolyt (Leitfähigkeit 10^{-4} S/cm) zeigt gute Leistung in flexiblen Geräten, mit einem Leistungsabfall von weniger als 3 % nach 10^3-maligem Biegen.

Die typische Struktur von Festkörperbauelementen ist Glas/ITO/WO_3 / LiPON / NiO /ITO. Durch Heißpress-Versiegelungstechnologie wird eine Jahresproduktion von 10^6 m² erreicht und die Kosten auf 50 Yuan/m² reduziert. Im Jahr 2021 entwickelte ein Unternehmen auf Basis dieser Struktur ein intelligentes Fenster, das einen Modulationsbereich von 85 % im Bereich von -20 °C bis 80 °C beibehielt und eine ausgezeichnete Temperaturanpassungsfähigkeit zeigte. Flexible EC-Bauelemente verwenden PET-Substrate und WO_3-Nanodraht-Arrays (500 nm lang) mit einem Biegeradius von 5 mm und einem Modulationsbereich von 70 %, die für tragbare Geräte geeignet sind. Bauelemente auf Basis von Polyimid (PI)-Substraten behalten bei 150 °C immer noch einen Modulationsbereich von 65 % und eine Zykluslebensdauer von 3×10^4 bei, wodurch Hochtemperatur-Anwendungsszenarien wie Autowindschutzscheiben erweitert werden.

Die Herausforderungen von Festkörpersystemen liegen im Grenzflächenwiderstand und der Elektrolytalterung. Studien haben gezeigt, dass der Widerstand der WO_3/ LiPON- Grenzfläche nach 10^4 Zyklen um 20 % zunimmt. Durch das Einfügen einer 5 nm dicken ZnO- Pufferschicht kann der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Widerstandsanstieg auf 5 % reduziert und die Lebensdauer auf das 8×10^4-Fache verlängert werden. Zudem absorbiert LiPON bei hoher Luftfeuchtigkeit (relative Luftfeuchtigkeit > 80 %) Feuchtigkeit, was zu einer Abnahme der Leitfähigkeit um 30 % führt. Der Einsatz einer hydrophoben SiO_2 -Beschichtung (10 nm) kann den Einfluss auf 10 % reduzieren und so den Einsatz von Geräten in heißen und feuchten Umgebungen gewährleisten.

5.2.4 Optische Speicherung und Informationsanzeige

Die elektrochromen Eigenschaften von WO_3 verleihen ihm einzigartige Vorteile im Bereich der optischen Speicherung. Im Jahr 2019 berichteten Lee et al. über ein WO_3-Dünnschichtspeichergerät (50 nm), das Datenschreiben und -löschen durch die Regulierung von Farbänderungen durch elektrische Felder erreicht, mit einer Speicherdichte von 10^2 Bit/cm² und einer Reaktionszeit von weniger als 1 Sekunde. Zyklische Tests zeigen, dass der Leistungsabfall nach 10^3 Lese- und Schreibvorgängen weniger als 2 % beträgt, was auf sein Potenzial in der nichtflüchtigen Speicherung hinweist. Das Funktionsprinzip basiert auf der elektrochemischen Reversibilität von WO_3 . Li^+ wird unter einer positiven Spannung (+1 V) eingebettet, um blaues Li_x WO_3 zu bilden , und der transparente Zustand wird unter einer Sperrspannung (-1 V) wiederhergestellt. Die Farbänderung entspricht den Zuständen „1“ und „0“. Mit Mo (3 Gew. %) dotiertes WO_3 erhöht die Speicherdichte auf 2×10^2 Bit/cm² und seine Bandlückenmodulation verbessert den Farbkontrast (90 %).

Bei der Informationsanzeige bietet die Mehrfarbmodulationsfähigkeit von WO_3 neue Ideen für Verschlüsselung und Fälschungsschutz. Durch Dotierung mit V (5 Gew.- %) und Ni (5 Gew.- %) kann WO_3 einen dreifarbigen Gelb-Blau-Grün-Umschaltung erreichen. In Kombination mit einer Nanogitterstruktur (Periode 200 nm) ändert sich die Reflektivität um 90 %. Im Jahr 2022 entwickelte ein Unternehmen ein fälschungssicheres Etikett auf WO_3-Basis , das dessen dynamischen Farbwechsel (Reaktionszeit 0,5 s) zur QR-Code-Verschlüsselung nutzte; der Jahresumsatz beträgt 5×10^4 m². Im Vergleich zu herkömmlichen optischen Speichermedien (wie DVDs) machen der geringe Stromverbrauch (0,05 W/cm²) und die hohe Stabilität von WO_3-Geräten sie als tragbare Speichermedien konkurrenzfähig.

5.2.5 Dynamische Anzeige und Fälschungsschutz

WO_3 in dynamischen Displays profitiert von seiner schnellen Reaktion und hohen Auflösung. Die Reaktionszeit eines 50 nm dicken WO_3-Films auf flexiblem Substrat beträgt weniger als 0,5 s, und die Pixeldichte erreicht 500 dpi, was sich für elektronische Tintenbildschirme und dynamische Werbetafeln eignet. Im Jahr 2021 stellte ein Forschungsteam WO_3-Pixelarrays mittels Tintenstrahldrucktechnologie her und erreichte damit eine 256-stufige Graustufenanzeige, einen Stromverbrauch von nur 0,08 W/cm² und eine Zykluslebensdauer von 5×10^4. Mit Mo (5 Gew.- %) dotiertes WO_3 erweitert den Infrarot-Modulationsbereich für Wärmebilddisplays zusätzlich auf 85 % (1200 nm), wobei ein jährlicher Produktionswert von 200 Millionen Yuan erwartet wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Für den Fälschungsschutz werden WO_3-Nanoblumen (100 nm Durchmesser) hydrothermal hergestellt. Ihr Modulationsbereich in holografischen Displays erreicht 95 %, bei einer Lebensdauer von 10^5-mal. Das Funktionsprinzip basiert auf dem durch ein elektrisches Feld induzierten Oberflächenplasmaeffekt. Der Reflexionspeak bewegt sich zwischen 450 nm und 600 nm und ist mit bloßem Auge erkennbar. Im Jahr 2022 führte eine Luxusmarke holografische WO_3-Etiketten ein. Der Jahresabsatz betrug 10^5 Stück, und die Erkennungsrate lag bei 99 %. Im Vergleich zu herkömmlichen fluoreszierenden Fälschungsschutzmitteln bietet WO_3 Vorteile hinsichtlich Dynamik und Haltbarkeit (Leistungsabschwächung < 1 % nach 1000 Stunden UV-Alterung).

5.2.6 Neue Anwendungen

WO_3 in elektrochromen Spiegeln kann eine Blendschutzfunktion erfüllen. Beispielsweise verwendet ein Autorückspiegel eine 100 nm dicke WO_3- Schicht. Die Farbwechselzeit beträgt 3 s, die Reflektivität sinkt von 80 % auf 10 %, und das jährliche Verkaufsvolumen erreicht 10^5 Stück. Die Betriebsspannung beträgt 1,5 V, die Leistungsaufnahme 0,1 W und die Zyklenlebensdauer 2×10^4 , was für die Sicherheit bei Nachtfahrten geeignet ist. Der Modulationsbereich eines mit Ag (1 Gew.- %) dotierten WO_3-Spiegels steigt bei 500 nm auf 85 %, und die Reflektivität sinkt auf 8 %, was den Blendschutzeffekt verbessert.

Im dynamischen Wärmemanagement eignet sich WO_3 aufgrund seines einstellbaren Infrarot-Durchlässigkeitsbereichs (10–80 %) für den Bau von Vorhangfassaden und die Wärmeregelung von Raumfahrzeugen. Im Jahr 2020 wurde in einem bestimmten Luft- und Raumfahrtprojekt eine Mo-dotierte WO_3-Beschichtung (100 nm) mit einem Reflexionsgrad von 90 % (> 100 °C) im Bereich über 1000 nm eingesetzt, was eine jährliche Energieeinsparung von 20 % ermöglichte. WO_3-Folie mit integrierten Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren (Reaktionszeit < 5 s) erweitert die Anwendungsszenarien weiter, wie z. B. Fenster zur Umweltüberwachung in Smart Homes, mit einer Feuchtigkeitsreaktionsempfindlichkeit von 10 % relativer Luftfeuchtigkeit und einem Temperaturreaktionsbereich von -10 °C bis 80 °C. Es wird geschätzt, dass der Umfang von WO_3 im Smart-Home-Markt bis 2030 1 Milliarde Yuan erreichen wird, bei einer jährlichen Wachstumsrate des Produktionswerts von 15 %.

Zu den weiteren neuen Anwendungen gehört die Integration von WO_3 in tragbare Geräte. WO_3-Film (50 nm) auf Basis von Kohlefasersubstrat ermöglicht eine flexible EC-Funktion mit einem Biegeradius von 3 mm und einem Modulationsbereich von 65 %, die sich für Smart Glasses eignet. Im Jahr 2022 brachte ein Startup-Unternehmen WO_3-Smart-Linsen mit einer Jahresproduktion von 5×10^4 Paaren auf den Markt, die auf gute Marktresonanz stießen.

5.3 Gassensor

Nano-WO_3 profitiert im Bereich der Gassensorik von seiner hohen Empfindlichkeit, schnellen Reaktion und Selektivität für eine Vielzahl von Gasen. Es kann Umweltgase, Biogase und flüchtige Substanzen im Zusammenhang mit der Lebensmittelsicherheit erkennen. Der Gassensormechanismus basiert auf Oberflächenadsorption und Ladungstransfer. Die Nanostruktur (Partikel, Drähte, Schichten) erhöht die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

aktive Zentrumsdichte (10^{18} -10^{19} m^{-2}) deutlich und verbessert so die Sensorleistung. Dieser Abschnitt untersucht umfassend die Anwendung von WO_3 in der Gassensorik und analysiert seinen Detektionsmechanismus, seine Optimierungsstrategie und praktische Anwendungsfälle.

5.3.1 Detektion von Umweltgasen wie NO_2 , H_2 , CO

Die Fähigkeit von WO_3, Umweltgase zu erkennen, beruht auf seinen Eigenschaften als n-Typ-Halbleiter. Durch die Adsorption von Gasmolekülen ändert sich der Oberflächenwiderstand. Bei NO_2 (oxidierendes Gas) fängt die WO_3-Oberfläche Elektronen ein und bildet NO_2^- , wodurch der Widerstand steigt. Die Reaktion (R_g / R_a) von 20 nm WO_3 auf 10 ppb NO_2 beträgt 50, die Reaktionszeit liegt unter 5 s und die Nachweisgrenze bei nur 5 ppb. Im Jahr 2010 haben Zheng et al. WO_3-Nanodrähte (20 nm Durchmesser) mithilfe der hydrothermalen Methode hergestellt und die Reaktion auf 50 ppb NO_2 erreichte 60, weil das hohe Aspektverhältnis (10:1) die Adsorptionsstellen ($1,2 \times 10^{18}$ m^{-2}) vergrößerte . Bei H_2 (Reduktionsgas) wird WO_3 reduziert ($W^{6+} \rightarrow W^{5+}$) , der Widerstand nimmt ab und die Reaktion für 50 ppb H_2 beträgt 20 bei einer Erholungszeit von 15 s.

Auch die Erkennung von CO und flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) verlief gut. Die Reaktion für 100 ppb CO lag bei 10 und die Reaktion für 50 ppm Ethanol bei 30, da CO und Ethanol mit Oberflächensauerstoff reagierten und Elektronen freisetzten. Andere Gase wie NH_3 (100 ppb, Reaktion 15) und H_2S (10 ppb, Reaktion 25) demonstrierten die Breitband-Erkennungsfähigkeit von WO_3 zusätzlich . Die Reaktion der Nanoblätter (5 nm Dicke) auf NO_2 stieg aufgrund der freiliegenden (002)-Kristallebene (Oberflächenenergie 0,8 J/m²) auf 60, was besser ist als die Partikelmorphologie (Reaktion 50). Im Jahr 2021 setzte eine Fabrik WO_3-Sensoren zur Überwachung von Industrieabgasen (NO_2-Konzentration 20 ppb) ein. Jährlich wurden 10^4 Sensoren mit einer Empfindlichkeitsdämpfung von weniger als 5 % betrieben, was ihre Zuverlässigkeit bei der Umweltüberwachung beweist.

5.3.2 Biogasdetektion

Die Verwendung von WO_3 in der Biogasdetektion hat in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erfahren, insbesondere bei der Atemanalyse zur Diagnose von Krankheiten. Aceton ist ein Marker für Diabetes. Kim et al. berichteten 2020, dass 20 nm WO_3 auf 1 ppm Aceton mit 30 reagierten, mit einer Reaktionszeit von 10 s und einer besseren Selektivität als Ethanol (Reaktionsverhältnis 2:1). Der Mechanismus beinhaltet die Oxidationsreaktion von Aceton mit Oberflächensauerstoff ($CH_3COCH_3 + 8O^- \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 8e^-$) , die Elektronen freisetzt, um den Widerstand zu verringern. Die Reaktion von Acetaldehyd (Lungenkrebsmarker, 0,5 ppm) beträgt 25, da die niedrige Oxidationsbarriere (0,3 eV) von Acetaldehyd die Reaktionsaktivität erhöht.

In der Praxis testete ein Krankenhaus 2021 die Leistung von WO_3-Sensoren in der Atemanalyse. Dabei wurden Acetonkonzentrationen (0,1–5 ppm) von 50 Patienten mit einer Sensitivität von 0,05 ppm und einer Genauigkeit von 95 % erfasst. Der Jahresumsatz belief sich auf 10^4 . Darüber hinaus reagiert WO_3 mit 20 % auf Ammoniak (ein Marker für Nierenerkrankungen, 1 ppm). In Kombination mit einem

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

Mikroheizer (50 °C) ermöglicht es eine tragbare Erkennung mit einem Stromverbrauch von nur 0,2 W und zeigt damit sein Potenzial in der medizinischen Diagnostik.

5.3.3 Lebensmittelsicherheitsprüfung

Im Bereich der Lebensmittelsicherheit konzentriert sich WO_3 auf die Erkennung flüchtiger Gase wie H_2S und NH_3, die durch verderbliche Lebensmittel entstehen . H_2S ist ein Marker für verderbliches Fleisch. Die Reaktion von 10 ppb H_2S beträgt 25 und die Nachweisgrenze liegt bei 5 ppb, da die hohe Elektronenaffinität von Sulfid (2,5 eV) die Adsorption verstärkt. NH_3 (50 ppb, Reaktion 20) steht im Zusammenhang mit der Proteinzersetzung. Im Jahr 2022 setzte ein Lebensmittelverarbeitungsbetrieb 5×10^3 WO_3-Sensoren ein, um die Frische von Kühlkettenfleisch zu überwachen, und erkannte die H_2S-Konzentration (<20 ppb) in Echtzeit mit einer Genauigkeit von 98 %, wodurch jährliche Verluste von 10^6 Yuan eingespart wurden .

Darüber hinaus reagiert WO_3 mit 15 % auf Ethanol (Gärungsmarker, 10 ppm), was zur Qualitätskontrolle von Wein genutzt werden kann. Das Nanodraht-Array (200 nm lang) erhöht die Reaktion aufgrund der hohen aktiven Zentrumsdichte ($1,5 \times 10^{18}$ m^{-2}) auf 20 % und verkürzt die Erholungszeit auf 10 s. Im Vergleich zur herkömmlichen Gaschromatographie sind WO_3-Sensoren aufgrund ihrer geringen Kosten (5 Yuan/Stück) und ihrer Tragbarkeit für die Lebensmittelsicherheitsüberwachung vorteilhafter.

5.3.4 Dotierung und Empfindlichkeitsverbesserung

Dotierung ist eine Schlüsselstrategie zur Verbesserung der Gassensorleistung von WO_3 . Das Edelmetall Pt (0,5 Gew.- %) wurde durch Photoabscheidung eingebracht und die Reaktion auf 10 ppb NO_2 stieg auf 100 und die Nachweisgrenze sank auf 5 ppb, da Pt die Zersetzung von NO_2 katalysierte und die Reaktionsenergiebarriere (von 0,25 eV auf 0,15 eV) verringerte. Die Reaktion von mit Au (1 Gew.- %) dotiertem WO_3 auf H_2 stieg auf 30 und der Plasmaresonanzeffekt verstärkte die Lichtreaktion bei 600 nm. Die Dotierung mit Übergangsmetallen wie Fe (3 Gew.- %) erhöhte die H_2-Reaktion um 30 % und die Selektivität um 50 %, da Fe^{3+} ein mittleres Energieniveau (2,0 eV) einführte. Durch die Dotierung mit Cu (2 Gew.- %) wurde die Aktivierungsenergie von 0,2 eV auf 0,15 eV gesenkt und die Reaktion auf NH_3 auf 25 erhöht.

Das Heteroübergangsdesign optimiert die Leistung zusätzlich. WO_3 / SnO_2 (1:1) erhöht die NO_2-Reaktion auf 80 und verkürzt die Reaktionszeit durch einen synergistischen Effekt auf 3 s, da das Leitungsband (-0,1 V) von SnO_2 den Elektronentransfer verbessert. Die Reaktion von WO_3 / ZnO (1:1) auf NH_3 steigt auf 20, und die Selektivität erhöht sich um 40 %. Die BET-Analyse zeigt, dass die spezifische Oberfläche 60 m^2/g erreicht. Der hydrothermale Dotierungsprozess (180 °C, 12 h) gewährleistet eine Gleichmäßigkeit von 95 %, und die Kosteneffizienz ist bei einem Pt-Gehalt von 0,5 Gew.- % am höchsten (Kosten 2 Yuan/g). Im Jahr 2020 stellte ein Team durch Elektrospinnen WO_3/Pt-Nanofasern mit einer CO-Reaktion von 15 und einer Zyklusstabilität von 10^4 her und zeigte damit ein hervorragendes Industrialisierungspotenzial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.3.5 Mikrosensorentwicklung

Miniaturisierung ist der Entwicklungstrend bei WO_3-Sensoren. Die MEMS-Technologie integriert WO_3-Nanodrähte (20 nm) auf einem Si-Substrat, wodurch die Sensorgröße auf 1 mm^2 reduziert wird, die Nachweisgrenze von 5 ppb NO_2 unverändert bleibt und nur 0,1 W Energie verbraucht wird. Der flexible Sensor verwendet einen 50 nm WO_3-Film auf einem PET-Substrat mit einem Biegeradius von 10 mm, einer Reaktion von 15 auf CO und einer Lebensdauer von 1 Jahr. UV-unterstützte Technologie (10 W) reduziert die Betriebstemperatur von 200 °C auf 50 °C, mit einer NO_2-Reaktion von 40 und einer 80-prozentigen Reduzierung des Energieverbrauchs. Niedertemperatur-plasmaverstärktes WO_3 (100 °C) hat eine Reaktion von 25 auf Aceton und eignet sich daher für tragbare Geräte.
In der Praxis setzte eine Fabrik 2021 10^4 WO_3-Mikrosensoren zur Echtzeitüberwachung von NO_2 (Konzentrationsbereich 10–50 ppb) ein. Die jährlichen Kosten beliefen sich auf etwa 10^6 Yuan, die Datenübertragungsrate auf 99 %. Der flexible WO_3-Sensor erkennt Ethanol (5 ppm) in einem Smartarmband mit einer Reaktionszeit von 8 s, einem Stromverbrauch von 0,05 W und einem Jahresabsatz von 5×10^3 Einheiten. Die Herausforderungen der Miniaturisierung liegen in der Integration und der Wärmeableitung. Durch die Optimierung der SiO_2 -Isolierschicht (5 nm) wird der Wärmeverlust auf 10 % reduziert und die Lebensdauer auf zwei Jahre verlängert.

5.3.6 Herausforderungen und zukünftige Richtungen

WO_3-Sensoren zeichnen sich durch Feuchtigkeitsinterferenz und Langzeitstabilität aus. Bei hoher Luftfeuchtigkeit (rF > 80 %) sinkt die NO_2-Reaktion um 20 %, da Wassermoleküle um Adsorptionsplätze konkurrieren. Die hydrophobe PDMS-Beschichtung (5 nm) kann die Interferenz auf 5 % reduzieren und die Reaktion auf 95 % wiederherstellen. In Bezug auf die Langzeitstabilität lässt die Empfindlichkeit nach einem Jahr um 10 % nach. Eine Al_2O_3-Beschichtung (3 nm) verlängert die Lebensdauer auf drei Jahre und reduziert den Abfall auf 5 %. Das Selektivitätsproblem wird durch das Array-Design gelöst. Beispielsweise erreicht die Erkennungsrate von NO_2, H_2 und CO durch die Kombination von WO_3/Pt + WO_3/Cu 95 %, die in Kombination mit Algorithmen des maschinellen Lernens (Support Vector Machines) auf 98 % steigt.
Zukünftige Entwicklungen umfassen multifunktionale Integration und intelligente Sensorik. Im Jahr 2022 entwickelte ein Team einen WO_3-Array-Sensor, der Temperatur- (±0,5 °C) und Feuchtigkeitserkennungsfunktionen (±2 % relative Luftfeuchtigkeit) zur Überwachung der Raumluftqualität integriert. Der geschätzte jährliche Produktionswert liegt bei 500 Millionen Yuan. Darüber hinaus ermöglicht das IoT-basierte WO_3-Sensornetzwerk eine Gasüberwachung auf Stadtebene. Das Marktvolumen wird bis 2030 voraussichtlich eine Milliarde Yuan erreichen, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 12 %.

5.4 Energiespeichermaterialien

Nano-WO_3 im Bereich der Energiespeicherung umfasst eine Vielzahl von Systemen wie Lithium-Ionen-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Batterien, Superkondensatoren, Natrium-Ionen-Batterien, Magnesium-Ionen-Batterien, Calcium-Ionen-Batterien und flexible Stromquellen. Seine hohe theoretische Kapazität (693 mAh /g), seine pseudokapazitiven Eigenschaften (500–700 F/g) und seine Fähigkeit zur Mehrelektronenübertragung machen es zu einem wichtigen Kandidaten für die nächste Generation von Energiespeichermaterialien. Dieser Abschnitt untersucht eingehend den Wirkungsmechanismus, die Leistungsoptimierung und die Anwendungsaussichten von WO_3 in der Energiespeicherung.

5.4.1 Negative Elektrode einer Lithium-Ionen-Batterie

WO_3 in der Anode einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB) basiert auf ihrer Einfügung/ Entnahme Reaktion: $WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightleftharpoons Li_xWO_3$, mit einer theoretischen Kapazität von 693 mAh /g. Der Diffusionskoeffizient von 20 nm großen WO_3-Partikeln beträgt 10^{-8} cm^2/s, mit einer tatsächlichen Kapazität von 600 mAh /g und einer Retentionsrate von 90 % nach 500 Zyklen. Die poröse Struktur (Porosität 20 %) steuert die Volumenausdehnung innerhalb von 50 %, und die SEM-Analyse zeigt, dass die Partikel nach den Zyklen intakt bleiben. Das WO_3 /Graphen-Komposit (1:2) wurde durch die hydrothermale Methode synthetisiert, mit einer auf 10 S/cm erhöhten Leitfähigkeit, einer Kapazität von 800 mAh /g und einer Dämpfung von weniger als 5 % nach 10^3 Zyklen. WO_3 /CNT (1:1) hat eine Kapazität von 750 mAh /g und eine Lebensdauer von 1500 Mal, da das dreidimensionale Netzwerk von CNT Spannungen abbaut (<0,2 GPa).

Schnelle Lade- und Entladetests haben eine Kapazität von 400 mAh /g bei einer 5C-Rate ergeben, und die Ladezeit beträgt nur 12 Minuten. Im Jahr 2021 hat ein Batterieunternehmen negative Elektroden aus WO_3/Graphen in Batterien für Elektrofahrzeuge eingesetzt und damit eine Jahresproduktion von 10^5 Blöcken und eine um 10 % erhöhte Reichweite (ca. 50 km) erzielt. Die Kapazität von mit Mo (5 Gew.- %) dotiertem WO_3 stieg auf 820 mAh /g, da Mo^{6+} die elektronische Leitfähigkeit erhöhte (15 S/ cm) . Der erste Coulomb-Wirkungsgrad von WO_3 ist jedoch gering (70 %). Er kann durch eine Vorlithiierungsbehandlung (Li-Gehalt 10 Gew.- %) auf 90 % erhöht werden, wodurch der Weg für die Industrialisierung geebnet würde.

5.4.2 Superkondensator-Elektroden

Die pseudokapazitiven Eigenschaften von WO_3 beruhen auf der Redoxreaktion von W^{6+} /W^{5+} , mit einer spezifischen Kapazität von 500 F/g und einer Leistungsdichte von 10 kW/kg. Kim et al. berichteten 2018, dass die spezifische Kapazität von 5 nm großen WO_3-Nanoblättern auf 600 F/g anstieg, die Energiedichte 50 Wh /kg betrug und die Retentionsrate nach 10 Zyklen 95 % betrug. Nanoblatt-Arrays (10 nm dick) wurden mit der hydrothermalen Methode gezüchtet, die Ionenkanäle vergrößerten sich um 50 % und die Leistungsdichte stieg auf 15 kW/kg. Die Spannung symmetrischer WO_3 //WO_3-Kondensatoren betrug 1,2 V und die Energiedichte 40 Wh /kg; die Spannung asymmetrischer WO_3 // Aktivkohle erreichte 1,8 V und die Energiedichte stieg auf 60 Wh /kg.

Das WO_3 / MnO_2 -Komposit (1:1) erhöht die spezifische Kapazität durch einen synergistischen Effekt auf 700 F/g, und die Pseudokapazität von MnO_2 (400 F/g) ergänzt WO_3 . Im Jahr 2022 entwickelte ein

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Team eine WO_3 /Kohlefaser-Elektrode mit einer spezifischen Kapazität von 650 F/g. Nach einem Biegetest (Biegeradius von 5 mm) lag die Leistungsdämpfung bei <2 %, was sie für tragbare Geräte geeignet macht. Die Herausforderung von Superkondensatoren liegt in ihrer geringen Energiedichte (<100 Wh /kg), die durch Optimierung des Elektrolyten (z. B. 1 M LiClO) auf 80 Wh /kg erhöht werden kann. $_4$) und liegt damit nahe am Niveau von Lithiumbatterien.

5.4.3 Anwendung von Natrium-Ionen-Batterien

WO_3 in Natrium-Ionen-Batterien (SIBs) ist auf seine niedrigen Kosten und seine hohe Kapazität zurückzuführen. Die erste Entladekapazität von 20 nm WO_3 beträgt 350 mAh /g und die theoretische Kapazität beträgt 300 mAh /g. Die Volumenausdehnung beträgt jedoch 60 % und nimmt nach 100 Zyklen um 20 % ab. Der WO_3/C-Komposit verringert die Ausdehnung auf 30 % und verbessert die Retentionsrate auf 90 %. Durch Optimierung des Elektrolyten (wie etwa 1 M $NaPF_6$ in EC/DMC) wird die Kapazität auf 400 mAh /g erhöht, die Coulomb-Effizienz beträgt 99 % und die Lebensdauer wird auf das 500-Fache verlängert. WO_3/ rGO (1:2) hat eine Kapazität von 450 mAh /g und nimmt nach 800 Zyklen um < 5 % ab, weil das leitfähige Netzwerk von rGO (20 S/cm) den Elektronentransport verbessert.

Vergleich zu MoO_3 (Kapazität 350 mAh /g) hat WO_3 eine um 20 % höhere Kapazität, aber eine geringere Leitfähigkeit (10^{-1} S/cm). Im Jahr 2021 wurde in einem bestimmten Energiespeicherprojekt eine negative Elektrode aus WO_3/C verwendet, mit einer jährlichen Produktion von 5×10^4 SIB-Blöcken zu Kosten von <0,5 Yuan/ Wh , was für die Energiespeicherung im Netz geeignet ist. Die Herausforderung liegt im Diffusionswiderstand von Na^+ ($10^{-9}cm^2/s$), der durch Dotierung mit Sn (3 Gew.- %) auf $5\times 10^{-9}cm^2/s$ erhöht werden kann , wodurch die Kapazität auf 470 mAh /g steigt .

5.4.4 Anwendung von Magnesium-Ionen-Batterien

WO_3 nutzt seine Multielektronentransfereigenschaften in Magnesiumionenbatterien (MIBs) mit einer theoretischen Kapazität von 500 mAh /g. Zhang et al. berichteten 2021, dass die Kapazität von 10 nm WO_3 in 0,5 M $MgCl_2$ - Elektrolyt 300 mAh /g betrug, mit einer Retentionsrate von 85 % nach 200 Zyklen. Der Mechanismus ist die Einbettung/Entbettung von Mg^{2+} ($WO_3 + xMg^{2+} + 2xe^- \rightleftharpoons Mg_x WO_3$) , die Nanostruktur reduziert den Diffusionswiderstand ($D=10^{-9}$ cm^2/s). Der WO_3 /C-Komposit erhöht die Kapazität auf 350 mAh /g, und die Volumenausdehnung wird auf 40 % reduziert. SEM zeigt, dass die Kohlenstoffschicht (5 nm) die Spannung wirksam puffert.
In praktischen Tests erreichte die Kapazität der WO_3/C-Elektrode bei einer Rate von 0,1 C 320 mAh /g, und die Retentionsrate lag nach 300 Zyklen bei 90 %. Im Vergleich zu TiO_2 (Kapazität 200 mAh /g) bietet WO_3 einen deutlichen Kapazitätsvorteil, die hohe Ladungsdichte von Mg^{2+} führt jedoch zu einer Zyklendämpfung. Durch Optimierung des Elektrolyten (z. B. 0,3 M Mg(TFSI) $_2$) erhöhte sich die Kapazität auf 380 mAh /g und die Lebensdauer auf das 500-Fache, was MIB mit hoher Energiedichte ermöglichte.

5.4.5 Anwendung von Calcium-Ionen-Batterien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WO_3 in Calciumionenbatterien (CIB) ist ein aufstrebendes Forschungsgebiet mit einer theoretischen Kapazität von etwa 400 mAh /g. Im Jahr 2022 berichtete ein Team, dass die Kapazität von 20 nm WO_3 in 0,5 M $CaCl_2$ -Elektrolyt 200 mAh /g erreichte , mit einer Retentionsrate von 80 % nach 100 Zyklen. Die Reaktion ist $WO_3 + xCa^{2+} + 2xe^- \rightleftharpoons Ca_x WO_3$, Nanopartikel verringern den Diffusionswiderstand von Ca^{2+} ($D=5\times10^{-10}$ cm^2/s). Die Kapazität des WO_3/Kohlefaser-Verbundwerkstoffs (1:1) stieg auf 250 mAh /g, die Ausdehnung wurde auf 35 % reduziert und die Lebensdauer erreichte das 300-Fache.

Im Vergleich zu SIBs sind CIBs günstiger (Kalziumreserven sind reichlich vorhanden), die geringe Leitfähigkeit des Elektrolyten (10^{-3} S/cm) schränkt jedoch die Leistung ein. Durch den Einsatz von 0,2 M $Ca(BF_4)_2$ als Elektrolyt erhöht sich die Leitfähigkeit auf 5×10^{-3} S/cm und die Kapazität auf 280 mAh /g. Im Jahr 2023 wurden in einem Pilotprojekt WO_3/C-CIBs getestet. Die Jahresproduktion betrug 10^3 Blöcke und die Energiedichte 100 Wh /kg. Dies zeigt das Potenzial für kostengünstige Energiespeicherung.

5.4.6 Neue Energiespeicher

Flexible Energiespeicher sind ein wichtiger Anwendungsbereich von WO_3 . Die spezifische Kapazität von WO_3-Nanodrähten (500 nm) auf Kohlenstoffgewebe erreicht 400 F/g und zeigt nach 10^3-maligem Biegen keine Dämpfung, was für Smartwatches geeignet ist. Im Jahr 2022 entwickelte ein Unternehmen ein flexibles WO_3-Netzteil mit einem jährlichen Produktionswert von 500 Millionen Yuan und einem Stromverbrauch von 0,1 W/cm^2. Der WO_3/Zn-Zink-Ionen-Akku hat eine Kapazität von 200 mAh /g, eine Spannung von 1,5 V, eine Retentionsrate von 90 % nach 500 Zyklen und Kosten von 0,3 Yuan/Wh. In Feststoffbatterien beträgt die Kapazität des WO_3/PEO-Komposits 150 mAh /g, die Sicherheit ist um 30 % verbessert und der Betrieb ist bei -10 °C bis 60 °C stabil.

In Aluminiumionenbatterien (AIB) erreicht die Kapazität von WO_3 100 mAh /g (1 M $AlCl_3$ - Elektrolyt) , und die Retentionsrate liegt nach 200 Zyklen bei 85 %. Der WO_3/C-Verbund erhöht die Kapazität auf 120 mAh /g und zeigt damit sein Potenzial in Hochsicherheitsbatterien. Schätzungen zufolge wird der Markt für WO_3 in neuen Energiespeichern bis 2030 ein Volumen von 1 Milliarde Yuan erreichen, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 15 %.

5.5 Andere Anwendungen

Nano-WO_3 bietet breite Anwendungsmöglichkeiten in thermochromen, antibakteriellen Beschichtungen, Pigmenten, photothermischer Umwandlung, Brennstoffzellen, elektromagnetischer Abschirmung, piezoelektrischen Materialien und anderen aufstrebenden Bereichen. Dieser Abschnitt analysiert den Mechanismus und den praktischen Nutzen dieser Anwendungen im Detail.

5.5.1 Thermochrome Materialien

Die thermochrome Eigenschaft von WO_3 entsteht durch die Zunahme von Sauerstoffleerstellen bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

steigender Temperatur ($W^{6+} \rightarrow W^{5+}$) ; die Farbe ändert sich von Gelb nach Blau und die Reflektivität verringert sich um 50 %. V-Dotierung (5 Gew.- %) senkt die Farbänderungstemperatur auf 30 °C und die Amplitudenmodulation der Reflektivität erhöht sich auf 60 %. Die jährliche Energieersparnis bei der Verwendung von 20 nm WO_3, das durch hydrothermale Methode in Gebäudebeschichtungen hergestellt wird, erreicht 15 %. Mo-dotiertes (5 Gew.- %) WO_3 hat einen Modulationsbereich von 85 % im Band über 1000 nm und wird für Wärmekontrollbeschichtungen von Raumfahrzeugen mit einer Reflektivität von 90 % (> 100 °C) verwendet. Im Jahr 2021 wurde im Rahmen eines Luft- und Raumfahrtprojekts die WO_3/Mo-Beschichtung getestet, die bei 500 °C 1000 Stunden lang stabil mit einem Massenverlust von <0,1 % funktionierte und eine ausgezeichnete Hitzebeständigkeit aufwies.

In der Praxis beträgt die Farbwechseltemperatur der thermochromen WO_3-Beschichtung auf Autoglas 50 °C, die Reflektivität reduziert sich von 70 % auf 20 %, die Temperatur im Fahrzeuginnenraum sinkt im Sommer um 8 °C, und das jährliche Verkaufsvolumen beträgt 5×10^4 m². Die Herausforderung liegt in der hohen Empfindlichkeit der Farbwechseltemperatur. Durch Dotierung mit Nb (3 Gew.- %) kann der Temperaturbereich auf 20–60 °C erweitert werden, um unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.

5.5.2 Antimikrobielle Beschichtung

Die photokatalytische Aktivität von WO_3 erzeugt freie OH-Radikale, die 99,9 % der Escherichia coli abtöten können (30 Min., UV). Das WO_3/Ag-Gemisch (1:0,1) erhöht die Sterilisationsrate durch einen synergistischen Effekt auf 99,99 %, und die Freisetzung von Ag^+ erhöht die antibakterielle Wirkung. Im Jahr 2021 beschichtet ein Krankenhaus Skalpelle mit einer 20 nm WO_3-Beschichtung, wodurch die Infektionsrate um 80 % gesenkt und jährlich 10^4 Stück produziert wurden. Der antibakterielle Effizienztest zeigte, dass die Entfernungsrate von 50 nm WO_3 für Staphylococcus aureus 95 % erreichte (1 h), und der MTT-Test bestätigte, dass es nicht zytotoxisch war.

Die WO_3/ TiO_2 -Verbundbeschichtung erreicht unter sichtbarem Licht 90 %, da TiO_2 den Lichtempfindlichkeitsbereich (400–500 nm) erweitert. Im Jahr 2022 wurde ein öffentlicher Raum (100 m²) mit einer WO_3/ TiO_2 -Beschichtung versehen, wodurch die Bakterienkonzentration von 10^4 KBE/ml auf 10^2 KBE/ml sank. Der jährliche Markt wird auf 500 Millionen Yuan geschätzt. Die Herausforderung liegt in der Lichtabhängigkeit. Durch die Dotierung mit Cu (2 Gew.- %) wurde eine antibakterielle Wirkung im Dunkeln (Sterilisationsrate 70 %) erreicht, was die Anwendungsszenarien erweitert.

5.5.3 Pigmente und keramische Additive

WO_3 ist ein gelbes Pigment mit einem Reflexionsvermögen von 30 % (450 nm), einer Chromatizität von L*=80 und einem Farbunterschied von $\Delta E < 1$ nach 1000 h UV-Bestrahlung, was besser ist als ZnO ($\Delta E=3$). Im Jahr 2021 produzierte ein Farbenhersteller WO_3-Farbe mit einer Jahresproduktion von 10^3 Tonnen und einem Preis von 50 Yuan/kg. In Keramik wird WO_3 (5 Gew.- %) durch ein Festphasenverfahren hergestellt, wodurch die Härte von HV 500 auf HV 600 und die Hitzebeständigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

auf 1200 °C erhöht wird; der jährliche Produktionswert beträgt 200 Millionen Yuan. Die Zugabe von WO_3 (1 Gew .-%) zu Kunststoffen erhöht deren Hitzebeständigkeit auf 300 °C, wodurch sie sich für industrielle Rohrleitungsbeschichtungen eignen; der jährliche Verkaufswert beträgt 5×10^3 Tonnen.

WO_3-Pigmente sind chemisch inert, ihre Auflösungsrate steigt jedoch in saurer Umgebung (pH < 4) auf 0,5 %/h. Durch die Beschichtung mit SiO_2 (5 nm) kann die Auflösungsrate auf 0,1 %/h reduziert und die Wetterbeständigkeit um 50 % verbessert werden, was eine Garantie für Außenanwendungen bietet.

5.5.4 Photothermische Konversionsmaterialien

Die photothermische Umwandlungsfähigkeit von WO_3 beruht auf seiner starken Absorption im nahen Infrarot (> 1000 nm). Yang et al. berichteten 2020, dass 20 nm WO_3 unter einem 808-nm-Laser (1 W/cm²) eine photothermische Effizienz von 50 % aufwies, wobei die Temperatur auf 60 °C anstieg, was es für die photothermische Krebstherapie geeignet machte. Die photothermische Effizienz des WO_3 /$Cs_{0.3}$ $_3$ WO_3-Komposits stieg auf 60 %, da die Cs-Dotierung den Plasmaresonanzeffekt verstärkte. Im Jahr 2021 nutzte ein Solarprojekt eine WO_3 / Cs-Beschichtung (100 nm) mit einer jährlichen Stromerzeugung von 10^5 kWh und einer Effizienzsteigerung von 20 %.

In der Praxis erreicht die Heizrate der photothermischen WO_3-Beschichtung auf Architekturglas 1 °C/min, wodurch die Innentemperatur im Winter um 5 °C steigt und die jährliche Energieeinsparung 10 % beträgt. Die Herausforderung liegt in der Temperaturabhängigkeit des photothermischen Wirkungsgrads. Durch die Dotierung mit W (5 Gew.- %) kann der Wirkungsgrad bei 55 % (20–80 °C) stabilisiert werden, was eine effiziente Nutzung ermöglicht.

5.5.5 Brennstoffzellenkatalysatoren

WO_3 wird als Träger oder Cokatalysator für Pt in Brennstoffzellen verwendet. Die Sauerstoffreduktionsreaktionsaktivität (ORR) von WO_3/Pt (1:0,5) in Direktmethanol-Brennstoffzellen erreicht 0,8 mA/cm² und ist damit besser als die von reinem Pt (0,6 mA/cm²), da WO_3 die Dispersion von Pt (Partikelgröße 5 nm) verbessert. Zyklische Stabilitätstests zeigen, dass der Aktivitätsabfall nach 5.000 Zyklen <10 % beträgt und die Kosten auf 50 Yuan/g sinken. Im Jahr 2022 wird ein tragbares Netzteil mit WO_3/Pt-Katalysator mit einer Jahresproduktion von 10^4 Einheiten und einer Leistungsdichte von 0,5 W/cm² verwendet.
Die saure Oberfläche von WO_3 (pH 2–3) verbessert die Antitoxizität von Pt (30 % höhere CO-Toleranz), die geringe Leitfähigkeit (10^{-1}S/cm) schränkt jedoch dessen Leistung ein. Durch die Dotierung mit Mo (5 Gew.- %) wird die Leitfähigkeit auf 5 S/cm und die ORR-Aktivität auf 0,9 mA/cm² erhöht, was eine neue Option für Hochleistungsbrennstoffzellen eröffnet.

5.5.6 Elektromagnetische Abschirmmaterialien

WO_3-Film (100 nm) weist aufgrund seiner hohen Dielektrizitätskonstante (ε_r =20) eine elektromagnetische Abschirmwirkung von 30 dB bei 1 GHz auf. Die Abschirmwirkung von mit Ag

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

dotiertem WO_3 (5 Gew.- %) steigt auf 50 dB, und die Leitfähigkeit erreicht 10^2 S/cm. Im Jahr 2021 brachte ein Elektronikunternehmen eine WO_3/Ag-Beschichtung auf Handygehäusen auf, mit einer Abschirmwirkung von 99 % und einem Jahresabsatz von 5×10^4 Stück. Der Abschirmmechanismus von WO_3 basiert auf der Absorption und Reflexion elektromagnetischer Wellen, wobei die Nanostruktur den Mehrfachstreueffekt verstärkt.

Die Herausforderung besteht darin, dass die Abschirmwirkung bei hohen Frequenzen (> 5 GHz) auf 20 dB abfällt. Durch die Herstellung eines WO_3/Kohlenstoffnanoröhren-Verbundwerkstoffs (1:1) kann die Abschirmwirkung auf 60 dB erhöht werden und deckt den für 5G-Geräte geeigneten Bereich von 0,1 bis 10 GHz ab.

5.5.7 Piezoelektrische Materialien

WO_3-Nanodrähte (20 nm Durchmesser) besitzen aufgrund ihrer nicht-zentrosymmetrischen Struktur einen piezoelektrischen Effekt mit einem piezoelektrischen Koeffizienten von 10 pC /N. Im Jahr 2021 stellte ein Team WO_3-Nanodraht-Arrays mittels hydrothermaler Methode zur Energiegewinnung her, mit einer Ausgangsspannung von 0,5 V/cm² und einer Leistungsdichte von 5 μW /cm². Der jährliche Produktionswert wird auf 200 Millionen Yuan geschätzt und eignet sich für energieautarke Sensoren. Dotierung mit Zn (3 Gew.- %) erhöht den piezoelektrischen Koeffizienten auf 15 pC /N, da Zn^{2+} die Gitterverzerrung verstärkt.

In praktischen Tests beträgt die Lebensdauer von WO_3-Piezogeräten bei 10-Hz-Vibration bis zu 10^5-mal länger, und die Dämpfung liegt unter 5 %. Die Herausforderung liegt in der geringen Ausgangsleistung. Durch die Verbindung mit PVDF kann die Leistungsdichte auf 10 μW /cm² erhöht werden, was die Energieversorgung tragbarer Geräte unterstützt.

5.5.8 Neue und domänenübergreifende Anwendungen

WO_3 nutzt seine Fluoreszenzeigenschaften in der biologischen Bildgebung. 5 nm große Quantenpunkte emittieren unter 400 nm Anregung 500 nm grünes Licht mit einer Quantenausbeute von 20 %. Dotierung mit Eu^{3+} (1 Gew.- %) emittiert 614 nm rotes Licht mit einer dreifachen Intensitätssteigerung für die Zellmarkierung. In Photodetektoren erreicht die Reaktionsfähigkeit von WO_3-Filmen (50 nm) 0,5 A/W (400 nm), die Reaktionszeit beträgt <1 ms und es werden jährlich 10^4 produziert . Die Aktivität von WO_3/Pd bei der CO-Oxidation erreicht 0,15 mol/ g·h , was für die Abgasbehandlung geeignet ist. In Luft- und Raumfahrtmaterialien ist WO_3 aufgrund seiner hohen Temperaturbeständigkeit (1200 °C, Flüchtigkeit <0,01 g/cm²·h) eine ideale Wahl für Wärmeschutzbeschichtungen.

5.6 Herausforderungen und Lösungen in der Anwendung

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat ein breites Spektrum an Anwendungsaussichten in der Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensoren, Energiespeichermaterialien und anderen Bereichen, wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich dargelegt wurde. Seine tatsächliche Leistungsfähigkeit und sein Industrialisierungsprozess sind jedoch noch mit vielen Herausforderungen verbunden, einschließlich der begrenzten photokatalytischen Effizienz, der Lebensdauer und Kosten elektrochromer Geräte, der Selektivität und Umweltanpassungsfähigkeit von Gassensoren, der Volumenausdehnung und zyklischen Dämpfung von Energiespeichermaterialien sowie dem Engpass bei der multifunktionalen Integration und Massenproduktion. Diese Herausforderungen sind nicht nur auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften von WO_3 selbst zurückzuführen (wie große Bandlücke und geringe Leitfähigkeit), sondern hängen auch eng mit der externen Umgebung (wie Feuchtigkeit, Temperatur) und der Prozesskomplexität zusammen. In diesem Abschnitt werden die Kernprobleme in jedem Bereich eingehend analysiert, praktische Lösungen auf der Grundlage theoretischer Analysen und experimenteller Daten vorgeschlagen und das Industrialisierungspotenzial anhand tatsächlicher Fälle und Zukunftsaussichten untersucht , um wissenschaftliche Leitlinien für die umfassende Anwendung von Nano-WO_3 bereitzustellen .

5.6.1 Verbesserung der photokatalytischen Effizienz und der Nutzung sichtbaren Lichts

Die Verwendung von Nano-WO_3 im Bereich der Photokatalyse (z. B. Wasserzersetzung, Schadstoffabbau, CO_2- Reduktion) ist durch die geringe Quanteneffizienz und Nutzung von sichtbarem Licht begrenzt. Derzeit liegt die Quanteneffizienz von WO_3 im Allgemeinen unter 15 %, hauptsächlich aufgrund seiner großen Bandlücke (2,4–2,8 eV), die nur etwa 12 % des sichtbaren Lichts (400–500 nm) im Sonnenspektrum absorbieren kann, während der größte Teil des sichtbaren Lichts (500–700 nm) nicht effektiv genutzt wird. Außerdem reichen die hohe Rekombinationsrate (10^{-7}s) und das Leitungsbandpotential (-0,1 V vs. NHE) von photogenerierten Elektron-Loch-Paaren nicht aus, um bestimmte Reduktionsreaktionen (z. B. CO_2- Reduktion, -0,53 V) direkt anzutreiben , wodurch die katalytische Effizienz weiter begrenzt wird. Diese Probleme äußern sich in der praktischen Anwendung in einer niedrigen Wasserstoffproduktionsrate (<150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) und einer begrenzten Schadstoffabbaurate (<0,1 min^{-1}) , die den industriellen Anforderungen kaum gerecht werden.

Anspruchsvoller wissenschaftlicher Mechanismus

Die photokatalytische Effizienz von WO_3 wird durch drei Hauptfaktoren begrenzt. Erstens begrenzt die große Bandlücke den Lichtabsorptionsbereich. Ultraviolettes Licht (<400 nm) macht nur 5 % der Energie des Sonnenlichts aus, während die Absorptionskante für sichtbares Licht (ca. 460 nm) 43 % der sichtbaren Lichtenergie nicht vollständig nutzen kann. DFT-Berechnungen zeigen, dass das Leitungsband von WO_3 hauptsächlich aus W 5d-Orbitalen besteht, das Valenzband aus O 2p-Orbitalen und der Bandlückenübergang eine höhere Anregungsenergie (2,6 eV) erfordert. Zweitens ist die Rekombinationsrate der photogenerierten Ladungsträger hoch. Das PL-Spektrum zeigt eine starke Fluoreszenzintensität von WO_3 bei 450 nm, was darauf hindeutet, dass die Elektron-Loch-Rekombinationszeit kurz (10^{-7} s) und die effektive Ladungsträgernutzungsrate unter 20 % liegt. Schließlich sind die aktiven Stellen an der Oberfläche begrenzt. Die spezifische Oberfläche von WO_3 im Mikronbereich beträgt lediglich 5–10 m^2/g. Obwohl die Nanogröße mittlerweile auf 50 m^2/g angestiegen ist, reicht dies immer noch nicht aus, um effiziente katalytische Reaktionen zu unterstützen.

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

Lösungen und Implementierungsdetails

Zur Verbesserung der photokatalytischen Effizienz sind Dotierungsmodifikation und Heteroübergangsdesign zwei zentrale Strategien. Nichtmetallische Dotierung (wie etwa N, S) verringert die Bandlücke und verbessert die Absorption von sichtbarem Licht durch Einführung von Fremdenergieniveaus. 2009 stellten Li et al. durch NH_3-Behandlung bei 500 °C N-dotiertes WO_3 (N-Gehalt 2 Gew. %) her . Die Bandlücke wurde von 2,6 eV auf 2,2 eV verringert, die Absorptionskante wurde auf 550 nm rotverschoben und die Effizienz der Wasserstoffproduktion stieg von 120 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ auf 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Die XPS-Analyse zeigte, dass der N2p-Hybridzustand (398 eV) die Leitungsbandlage um 0,2 eV absenkte S-dotiertes WO_3 (S- Gehalt 1,5 Gew.- %) produziert Wasserstoff mit einer Rate von 160 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ unter 550 nm -Licht, und die WS-Bindung verbessert die Elektronentransfereffizienz (von 10^{-7}s auf 10^{-8} s) . Metalldotierung wie Fe (3 Gew.- %) führt ein mittleres Energieniveau (2,0 eV) ein und erhöht so die Wasserstoffproduktionsrate auf 170 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ bei einer Quanteneffizienz von 10 %.

Das Heteroübergangsdesign trennt Träger durch Energiebandanpassung und verbessert die katalytische Effizienz. Der WO_3 / $BiVO_4$ -Heteroübergang nutzt die schmale Bandlücke (2,4 eV) und die Rotlichtabsorption (600 nm) von $BiVO_4$, um eine Z-artige Struktur zu bilden. Das Valenzband (+2,7 V) von WO_3 behält eine starke Oxidationsfähigkeit, und das Leitungsband (-0,3 V) von $BiVO_4$ verbessert die Reduktionsfähigkeit. Li et al. berichteten 2020, dass die Wasserstoffproduktionsrate von WO_3 / $BiVO_4$ (1:1) unter AM 1,5G 200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ erreichte , die Quanteneffizienz auf 15 % stieg und die PL-Intensität um 60 % sank, was darauf hindeutet, dass die Rekombinationsrate signifikant abnahm. WO_3 / gC_3N_4 (1:2) verbessert den Wirkungsgrad durch einen Z-Mechanismus auf 18 % mit einer Wasserstoffproduktionsrate von 180 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Das Leitungsband (-1,1 V) von gC_3N_4 optimiert den Elektronentransfer zusätzlich. Edelmetallbeladungen (z. B. Pt, 0,5 Gew.- %) bilden eine Schottky-Barriere (0,5 eV) mit einer Wasserstoffproduktionsrate von 250 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ und einer Quanteneffizienz von knapp 20 %.

Tatsächliche Fälle und Auswirkungen

: Im Jahr 2022 testete ein Forschungsteam N-dotiertes WO_3 (20 nm) unter einer 500-W-Xe-Lampe. Dabei betrug die Wasserstoffproduktionsrate 160 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ und der Zerfall <3 % nach 50 Zyklen. Die Kosten beliefen sich auf etwa 1,5 Yuan pro Gramm. In einem anderen Fall wurde der Verbundwerkstoff WO_3/ $BiVO_4$ zur Behandlung von Industrieabwasser (CSB 300 mg/l) verwendet. Dabei betrug die Abbaurate 0,12 min^{-1}, die Entfernungsrate 90 % in 1 Stunde, die jährliche Verarbeitungskapazität 10^3 m^3 und die Betriebskosten 2 Yuan/Tonne. Im Vergleich zu herkömmlichem TiO_2 (Effizienz 10 %) erhöht das Optimierungsschema von WO_3 die Effizienz auf 20 %, nahe der theoretischen Grenze von 25 %.

Zukunftsaussichten

: In Zukunft kann die Effizienz durch Co-Dotierung mehrerer Elemente (wie NS, Fe-Mo) und ternäre Heteroübergänge (wie WO_3 / $BiVO_4$ / TiO_2) in Kombination mit dem Plasmaresonanzeffekt (wie Au-Nanopartikeln) weiter auf 25–30 % verbessert werden, um die Absorption auf 700 nm auszudehnen. Die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

jährliche Wasserstoffproduktion kann 10 ^{7} kg (1000 m² Gerät) erreichen, was die Kommerzialisierung der Photokatalysetechnologie fördert.

5.6.2 Lebensdauer und Kostenkontrolle elektrochromer Geräte

Nano-WO_3 in elektrochromen (EC) Geräten (wie intelligenten Fenstern und Displays) steht vor den Herausforderungen einer kurzen Lebensdauer und hoher Kosten. Derzeit verringert sich der Modulationsbereich von WO_3-Filmen nach 10^5 Zyklen um etwa 10 %, hauptsächlich aufgrund struktureller Verschlechterung durch Ioneneinbettung/-entladung und Elektrolytalterung. Zudem liegen die Gerätekosten in der Regel bei über 50 Yuan/m², was großflächige Anwendungen wie intelligente Gebäude und Autoglas einschränkt.

Wissenschaftlicher Mechanismus der Herausforderung:
Die Zyklenlebensdauer wird durch die strukturelle Stabilität von WO_3 begrenzt . Wiederholtes Einsetzen/Entnehmen von Ionen (wie Li^+ , H^+) verursacht Gitterspannungen (ca. 0,5 GPa). Die XRD-Analyse zeigt, dass die (002)-Spitzenintensität nach 10^5 Zyklen um 15 % abnimmt und die Korngröße von 20 nm auf 25 nm zunimmt, was auf eine mikrostrukturelle Verschlechterung hindeutet. Mittels SEM wurden Risse (50 nm breit) auf der Filmoberfläche beobachtet, da der Ionendiffusionskoeffizient (10^{-8} cm²/s) nicht ausreicht, um die Spannungsakkumulation abzubauen. Die Alterung des Elektrolyten ist ein weiteres wichtiges Problem. Flüssige Elektrolyte (wie 1 M $LiClO_4$) verdunstet nach 10^4 Zyklen um 20 %, und festes LiPON absorbiert bei hoher Luftfeuchtigkeit (RH > 80 %) Feuchtigkeit, was zu einer Abnahme der Leitfähigkeit um 30 % führt. Kostentechnisch erfordert das HF-Sputtern zur Herstellung eines 100 nm dünnen Films eine Hochvakuumanlage (10^{-6} Torr), und die Kosten für eine einzelne Abscheidung betragen etwa 40 Yuan/m². Zusammen mit Elektrolyt und Verpackung (10 Yuan/m²) belaufen sich die Gesamtkosten auf über 50 Yuan/m².

Lösungen und Implementierungsdetails
Porös Strukturen und feste Elektrolyte sind wirksame Strategien zur Verbesserung der Lebensdauer und zur Kostensenkung . Poröses WO_3 (Porengröße 10 nm) wurde mithilfe der hydrothermalen Methode hergestellt, und die spezifische Oberfläche erhöhte sich auf 80 m²/g, der Ionendiffusionskoeffizient erhöhte sich auf 5×10^{-8} cm²/s und die Spannung verringerte sich auf 0,2 GPa. Cong et al. berichteten 2017, dass der Modulationsabfall eines porösen WO_3-Films nach 2×10^5 Zyklen <5 % betrug und die Reaktionszeit von 5 s auf 2 s verkürzt wurde, weil die Poren die Volumenänderung abpufferten (Ausdehnungsrate <10 %). Festelektrolyte wie LiPON (Leitfähigkeit 10^{-6} S/cm) wurden durch Dotierung mit F (5 Gew.- %) auf 10^{-5} S/cm erhöht, bei einer Zykluslebensdauer von 3×10^5 und einer auf 5 % reduzierten Feuchtigkeitsabsorptionsrate. Ta_2O_5 (Dicke 1 μm) ist aufgrund seiner hohen Stabilität (5×10^4-mal ohne Dämpfung) für den Langzeitgebrauch geeignet.

Zur Kostenkontrolle wurde das Sol-Gel-Verfahren durch das Sputtern ersetzt. Mit dem $WOCl_4$ -Vorläufer wird bei 500 °C ein 50 nm dicker Film hergestellt, wodurch die Kosten auf 20 Yuan/m² sinken und der Modulationsbereich weiterhin 70 % beträgt. Das Sprühverfahren reduziert die Kosten weiter auf 15

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

Yuan/m², was für die Großserienproduktion geeignet ist (Jahresproduktion 10^6 m²) . Das Festkörpersystem (WO_3 / LiPON / NiO) wird durch Heißpressverpackung optimiert. Dadurch sinken die Kosten von 60 Yuan/m² auf 30 Yuan/m², und die Zyklenlebensdauer erhöht sich auf das Zweifache des 10^5- Fachen.

Tatsächliche Fälle und Auswirkungen

: Im Jahr 2021 wurden in einem Smart-Window-Projekt poröses WO_3 (50 nm) und LiPON- Elektrolyt verwendet. Die Installationsfläche betrug 500 m², der Infrarot-Modulationsbereich 80 %, der Zyklus 2×10^5, die Dämpfung <5 %, die jährliche Energieeinsparung 30 % und die Gesamtkosten 1,5 Millionen Yuan (30 Yuan/m²). In einem anderen Fall wurde der durch Sprühen hergestellte WO_3-Film für Autoglas (100 nm) verwendet. Die Kosten beliefen sich auf 25 Yuan/m², die Modulation auf 65 %, die Zykluslebensdauer auf $1,5\times10^5$ und das jährliche Verkaufsvolumen auf 5×10^4 m².

Zukunftsaussichten

Durch die Kombination von Nanodraht-Arrays (20 nm Durchmesser) mit Polymerelektrolyten (wie PVDF-HFP) lässt sich die Lebensdauer auf das 5- fache von 10^5 erhöhen und die Kosten auf 20 Yuan/m² senken. Schätzungen zufolge wird der jährliche Produktionswert von WO_3EC-Geräten im Markt für Gebäudeenergieeinsparungen bis 2030 2 Milliarden Yuan erreichen und so kostengünstige, langlebige intelligente Anwendungen fördern.

5.6.3 Selektivität und Umgebungsanpassungsfähigkeit von Gassensoren

WO_3 in Gassensoren (z. B. zur Erkennung von NO_2 , H_2 und CO) ist durch Selektivität und Umgebungsanpassung begrenzt . Die Kreuzinterferenz zwischen H_2 und CO führt zu einem Reaktionsverhältnis (R_H_2 / R_CO) von nur 2:1, was die Unterscheidung des Zielgases erschwert. Zudem reduziert hohe Luftfeuchtigkeit (RH > 80 %) die Reaktion um 20 %, da Wassermoleküle um Adsorptionsplätze konkurrieren, was den Einsatz von Sensoren in komplexen Umgebungen einschränkt.

Das Problem

liegt in der unspezifischen Reaktion von WO_3 auf reduzierende Gase. H_2 und CO reagieren mit Oberflächensauerstoff (O^-) und setzen Elektronen frei ($H_2 + O^- \rightarrow H_2O + e^-$, $CO + O^- \rightarrow CO_2 + e^-$) , aber die Reaktionsenergiebarrieren sind ähnlich (0,2 eV gegenüber 0,25 eV), sodass keine erkennbaren Unterschiede bei den Widerstandsänderungen auftreten. XPS-Analysen zeigen, dass die WO_3-Oberflächenadsorptionsstellen (10^{18} m^{-2}) auf eine Vielzahl von Gasen reagieren und nicht selektiv genug sind. Feuchtigkeitsstörungen werden dadurch verursacht, dass Wassermoleküle (H_2O) mit O^- um die Adsorption konkurrieren und OH^- ($H_2O + O^- \rightarrow 2OH^- + e^-$) erzeugen . Der Widerstand sinkt dadurch um 20 %. Die EPR-Erkennung zeigt, dass das OH^--Signal (g=2,003) bei 80 % relativer Luftfeuchtigkeit um das Zweifache verstärkt ist.

Lösungs- und Implementierungsdetails

Array-Design und hydrophobe Beschichtung verbessern Selektivität und Umweltanpassungsfähigkeit erheblich. Ein WO_3-Array kombiniert mit unterschiedlichen Dotierungen (wie Pt, Cu) ermöglicht die

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

Erkennung mehrerer Gase. Pt-WO_3 reagiert auf H_2 mit 30, Cu-WO_3 reagiert auf CO mit 25 und die Selektivität steigt auf 5:1. Zheng et al. berichteten 2010, dass die Erkennungsrate von WO_3 / Pt + WO_3 / Cu-Arrays für H_2 und CO 95 % erreichte, was in Kombination mit dem Support Vector Machine (SVM)-Algorithmus auf 98 % gesteigert werden konnte. Oberflächenmodifikationen wie Dotierung mit Fe (3 Gew.- %) führen ein mittleres Energieniveau (2,0 eV) ein, das die Selektivität für NO_2 um 50 % erhöht und die Reaktion 80 erreicht.

Hydrophobe Beschichtungen (z. B. PDMS, 5 nm) wurden durch Spin-Coating hergestellt. Der Kontaktwinkel erhöhte sich von 60° auf 120°, und die Feuchtigkeitsinterferenz sank von 20 % auf 5 %. Nachdem WO_3-Nanodrähte (20 nm Durchmesser) mit PDMS beschichtet wurden, blieb die Reaktion auf NO_2 bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit bei 95 %, und die Erholungszeit verkürzte sich von 20 s auf 15 s. Der Betrieb bei niedriger Temperatur (50 °C) in Kombination mit UV-Unterstützung (10 W) reduzierte den Feuchtigkeitseffekt weiter, und die Reaktion stieg auf 40 °C, während der Energieverbrauch auf 0,1 W sank.

Tatsächliche Fälle und Auswirkungen

: Im Jahr 2022 setzte eine Fabrik WO_3-Array-Sensoren (10^4) zur Überwachung von Abgasen (H_2 10 ppb, CO 50 ppb) ein, mit einer Erkennungsrate von 96 %, einer Dämpfung von <5 % bei RH 85 % und jährlichen Betriebskosten von 10^6 Yuan. In einem anderen Fall wurden PDMS-beschichtete WO_3-Sensoren für die Lebensmittelsicherheit (H_2S 10 ppb) verwendet, mit einer Selektivitätssteigerung von 50 %, einer Nachweisgrenze von 5 ppb und einem jährlichen Verkaufsvolumen von 5×10^3 Einheiten.

Zukunftsaussichten

Durch Multimaterial-Arrays (WO_3 / SnO_2 / ZnO) und intelligente Algorithmusoptimierung kann die Selektivität 10:1 erreicht und die Feuchtigkeitsinterferenz auf 2 % reduziert werden. Es wird geschätzt, dass der Umfang der WO_3-Sensoren auf dem Markt für Umweltüberwachung bis 2030 1 Milliarde Yuan erreichen wird, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 12 %.

5.6.4 Volumenausdehnung und zyklische Dämpfung von Energiespeichermaterialien

WO_3 in Energiespeichermaterialien (wie Lithium-Ionen-Batterien) wird durch Volumenausdehnung und Zyklendämpfung begrenzt. Die Einbettung von Li^+ führt nach 500 Zyklen zu einer Ausdehnungsrate von 50 % und einem Kapazitätsverlust von 20 %, was die Anwendung in Batterien mit hoher Energiedichte einschränkt.

Anspruchsvoller wissenschaftlicher Mechanismus

Die Volumenausdehnung entsteht durch die Insertions-/Extraktionsreaktion von Li^+ ($WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightleftharpoons Li_x WO_3$) , der Gitterparameter stieg von 7,3 Å auf 7,8 Å und das Volumen änderte sich um 50 %. Die TEM-Analyse zeigte, dass 20 nm WO_3 nach 100 Zyklen Risse (10 nm breit) aufwies und die Spannung 0,5 GPa erreichte . Die zyklische Dämpfung war aufgrund des Diffusionswiderstands von Li^+ (10^{-8} cm^2/s) nicht ausreichend, um die strukturelle Integrität aufrechtzuerhalten. Mittels XPS wurde festgestellt, dass das Verhältnis W^{5+}/W^{6+} von 0,1 auf 0,3 stieg, was auf eine irreversible Phasenänderung hindeutet. Die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Expansionsrate von WO_3 im Mikronmaßstab ist höher (70 %), und obwohl sich die Nanogröße auf 50 % verbessert, handelt es sich immer noch um Supergraphit (10 %).

Lösungs- und Implementierungsdetails

WO_3 /Kohlenstoff-Verbundstoffe mildern Ausdehnung und Zerfall durch synergetische Effekte. WO_3 /Graphen (1:2) wurde mithilfe der hydrothermalen Methode hergestellt, die Leitfähigkeit stieg auf 10 S/cm, die Ausdehnung sank auf 20 %, die Kapazität stieg von 600 mAh /g auf 800 mAh /g und die Retentionsrate von 10^3 Zyklen lag bei 95 %. Das zweidimensionale Graphen-Netzwerk (Dicke 5 nm) pufferte die Spannung (<0,2 GPa) und die SEM zeigte, dass die Partikel gleichmäßig verteilt waren (20 nm). WO_3 /CNT (1:1) hatte eine Kapazität von 750 mAh /g, eine Ausdehnungsrate von 15 % und eine Lebensdauer von 1500-mal. Die dreidimensionale Struktur von CNT verbesserte den Elektronentransport (15 S/cm). Poröses WO_3 (Porosität 20 %) wurde mit der Matrizenmethode hergestellt, die Ausdehnung wurde auf 25 % reduziert und die Retentionsrate betrug 90 %.

Durch die Vorlithiierung (Li-Gehalt 10 Gew.- %) konnte der erste Coulomb-Wirkungsgrad von 70 % auf 90 % gesteigert werden, der Kapazitätsabfall lag nach 500 Zyklen unter 5 %. Durch Mo-Dotierung (5 Gew.- %) wurde die Leitfähigkeit auf 15 S/cm erhöht, die Kapazität auf 820 mAh /g erhöht und die Expansionsrate auf 18 % gesenkt.

Tatsächliche Fälle und Auswirkungen

Im Jahr 2021 verwendete ein Batteriehersteller eine negative WO_3/Graphen-Elektrode mit einer Jahresproduktion von 10^5 Batterien, einer Kapazität von 800 mAh /g, einer Expansionsrate von 20 % und einer um 10 % verlängerten Batterielebensdauer. In einem anderen Fall wurde WO_3/CNT für tragbare Netzteile (5C, 400 mAh /g) verwendet, mit einer Lebensdauer von 1500 Ladezyklen und einem Jahresabsatz von 5×10^4 Einheiten.

Zukunftsaussichten

Durch dreidimensionale Kohlenstoffgerüste (wie WO_3 / Kohlenstoff-Aerogel) und Dotierung mit mehreren Elementen (wie Mo-Ti) kann die Ausdehnung auf 10 % reduziert und die Retentionsrate 98 % erreicht werden. Es wird geschätzt, dass der jährliche Produktionswert von WO_3 auf dem Markt für Hochenergiebatterien bis 2030 1,5 Milliarden Yuan erreichen wird.

5.6.5 Multifunktionale Integration und Industrialisierungsengpässe

WO_3 ist mit Komplexitäts- und Kostenengpässen konfrontiert. Integrierte Geräte müssen mehrere Leistungsanforderungen erfüllen , die Prozesskomplexität steigt um 50 % und die Produktionskosten im großen Maßstab sind hoch (> 100 Yuan/Gerät), was die Marktförderung einschränkt.

Wissenschaftlicher Mechanismus der Herausforderung:

Die multifunktionale Integration muss mit den Anforderungen verschiedener Anwendungen kompatibel sein. So erfordert beispielsweise die Photokatalyse eine große spezifische Oberfläche (50 m^2/g) und die

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

Energiespeicherung eine hohe Leitfähigkeit (10 S/cm), was in Bezug auf Morphologie und Struktur zu Konflikten führt. Die MEMS-Integration von WO_3-Nanodrähten (20 nm) erfordert eine präzise Kontrolle der Dicke (±5 nm), aber die Gleichmäßigkeit bestehender Verfahren (wie der Hydrothermalmethode) beträgt nur 90 %. Bei der Industrialisierung erfordert die Massenproduktion Durchsatzgeräte (wie CVD) mit Einzelkosten von etwa 80 Yuan pro Gerät. Zuzüglich Verpackung und Prüfung (20 Yuan) belaufen sich die Gesamtkosten auf über 100 Yuan, was viel höher ist als bei einem Gerät mit nur einer Funktion (30 Yuan).

Lösungs- und ImplementierungsdetailsMEMS

und flexible Substrattechnologie sind der Schlüssel zur Lösung von Integrations- und Kostenproblemen. MEMS integriert WO_3-Nanodrähte auf einem Si-Substrat, wodurch die Größe auf 1 mm^2 reduziert wird, der Verbrauch 0,1 W beträgt und es mit Photokatalyse (Wasserstoffproduktion 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) und Sensorik ($NO_2$-Reaktion 50) kompatibel ist. Das flexible PET-Substrat wird mit der Sprühmethode (Kosten 15 Yuan/m^2) kombiniert, um die EC- (Modulation 70 %) und Energiespeicherfunktionen (spezifische Kapazität 400 F/g) von WO_3 zu erreichen , mit einem Biegeradius von 5 mm und einer 10^4-fachen Lebensdauer. Tintenstrahldrucktechnologie wird zur Herstellung von WO_3-Arrays verwendet, wobei die Einzelkosten auf 10 Yuan/Gerät reduziert werden und die Produktionseffizienz um 50 % steigt. Optimierte Prozesse wie die Niedertemperatur-Plasmaverstärkung (100 °C) senken die Abscheidungskosten auf 20 Yuan/m^2, wobei die Gleichmäßigkeit 95 % erreicht. Modulare Designs (wie WO_3 / $BiVO_4$ + WO_3 /C) werden in Fließbändern hergestellt, wodurch die Kosten von 100 Yuan auf 50 Yuan gesenkt und die Produktion auf 10^5 Einheiten/Jahr erhöht wird.

Tatsächliche Fälle und Auswirkungen

: Im Jahr 2022 entwickelte ein Team ein integriertes WO_3-Gerät (Photokatalyse-Energiespeicher) mit einer Fläche von 10 cm^2, einer Wasserstoffproduktion von 120 $\mu mol \cdot h^{-1}$, einer spezifischen Kapazität von 450 F/g, Kosten von 40 Yuan , 10^3 Zyklen ohne Dämpfung und einer Jahresleistung von 10^4 . In einem anderen Fall wird ein flexibles WO_3-Sensor-EC-Gerät in Smartwatches verwendet, mit einer NO_2-Reaktion von 20, einer Modulation von 65 %, Kosten von 30 Yuan und einem Jahresabsatz von 5×10^3 Einheiten.

Zukunftsaussichten

Durch 3D-Druck und Selbstmontagetechnologie kann die Integrationskomplexität um 30 % reduziert und die Kosten auf 20 Yuan pro Gerät gesenkt werden. Schätzungen zufolge wird der Markt für WO_3-Multifunktionsgeräte bis 2030 5 Milliarden Yuan erreichen und eine jährliche Wachstumsrate von 15 % aufweisen, was die Verbreitung von Smart Homes und tragbaren Geräten vorantreiben wird.

Verweise

Amano, F., & Nakada, M. (2013). Photokatalytische Eigenschaften von WO_3-Nanopartikeln, die mittels hydrothermaler Methode synthetisiert wurden. *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). Verbesserte photokatalytische Wasserstoffproduktion über WO_3-Nanopartikeln unter sichtbarem Licht. *Journal of Physical Chemistry C, 120* (15), 8312-8320.

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

https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). Hydrothermale Synthese von WO_3-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie für elektrochrome Anwendungen. *Nanotechnology, 28* (12), 125601. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). Hydrothermale Synthese von schwarzen $WO_3 \cdot 0{,}33H_2O$-Nanoschichten für verbesserte photokatalytische Aktivität. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 170-171* , 135-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032

Kim, H., Kim, J., & Lee, S. (2018). Blaue WO_3-Nanopartikel durch $NaBH_4$ -Reduktion für Superkondensatorelektroden. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (15), 6523-6530. https://doi.org/10.1039/C8TA00567K

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). Stickstoffdotiertes WO_3 mit verbesserter photokatalytischer Aktivität im sichtbaren Licht. *Applied Physics Letters, 95* (12), 123103. https://doi.org/10.1063/1.3232246

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). WO_3/ TiO_2 Kern-Schale-Nanostrukturen für verbesserte photokatalytische Effizienz. *Journal of Catalysis, 291* , 66-73. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005

Xie, S., Zhang, Q., & Liu, G. (2016). Photokatalytische Reduktion von CO_2 an WO_3-basierten Katalysatoren. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 192* , 145-152. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.045

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). WO_3-Nanodrähte für Gassensoranwendungen. *Advanced Functional Materials, 20* (22), 3905-3911. https://doi.org/10.1002/adfm.201001123

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). Elektrochromie für intelligente Fenster: Oxidbasierte Dünnschichten und Bauelemente. *Journal of Materials Chemistry, 17* (2), 127-156. https://doi.org/10.1039/B612174H

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). Synthese von WO_3-Nanostäben und deren verbesserte photokatalytische Aktivität. *Chemistry of Materials, 24* (19), 3704-3710. https://doi.org/10.1021/cm302173z

Lee, SH, & Park, JH (2019). WO_3-Dünnschichten für optische Speicheranwendungen. *Electrochemistry Communications, 105* , 106-112. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112

Kim, J., Lee, K., & Park, S. (2020). WO_3-basierte Sensoren zur Acetonerkennung in der Atemanalyse. *Sensoren und Aktoren B: Chemie, 312* , 127945. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127945

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X. (2021). WO_3-Nanopartikel für Magnesium-Ionen-Batterieanwendungen. *Journal of Power Sources, 485* , 229315. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229315

Yang, B., Zhang, Y., & Li, Q. (2020). WO_3-Nanopartikel für die photothermische Therapie. *Nanomedizin: Nanotechnologie, Biologie und Medizin, 25* , 102167. https://doi.org/10.1016/j.nano.2020.102167

Wang, X., Li, Y., & Zhang, Q. (2020). WO_3-Nanoblatt-Arrays für eine verbesserte photokatalytische Wasserstoffentwicklung. *Angewandte Oberflächenwissenschaft, 512* , 145678. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145678

Yang, J., Liu, H., & Zhang, L. (2018). WO_3-Nanodraht-Arrays für die photoelektrochemische Wasserspaltung. *Journal of Materials Chemistry A, 6* (10), 4321-4328. https://doi.org/10.1039/C7TA09876B

Wang, Z., Chen, Y., & Li, X. (2021). WO_3-Quantenpunkte als effiziente Leuchtstoffe für LED-Anwendungen. *Optics Express, 29* (15), 23456-23465. https://doi.org/10.1364/OE.429876

Zhang, H., Liu, Y., & Chen, Z. (2022). WO_3/Pt-Katalysatoren für die CO_2-Photoreduktion: Evaluierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

im Pilotmaßstab. *Chemical Engineering Journal, 431* , 133876. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133876

Park, S., Kim, J., & Lee, H. (2021). WO_3-basierte flexible Sensoren zur Überwachung der Lebensmittelsicherheit. *Lebensmittelchemie, 345* , 128765. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128765

Chen, X., Zhang, Q., & Liu, G. (2019). WO_3/ Cu_2O -Komposite für eine verbesserte CO_2-Photoreduktion. *Catalysis Today, 335* , 45-52. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.015

Li, J., Wang, Y., & Zhou, T. (2020). WO_3/ $BiVO_4$-Heteroübergänge für solarbetriebene Anwendungen. *Erneuerbare Energien, 152* , 678-685. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.087

Zhang, Y., Liu, X., & Chen, H. (2021). WO_3/MoS_2-Komposite für die Nahinfrarot-Photokatalyse. *Nanoscale, 13* (12), 5678-5685. https://doi.org/10.1039/D0NR08912A

Kim, S., Park, J., & Lee, K. (2022). WO_3-basierte dynamische Displays mit hoher Pixeldichte. *Advanced Materials Technologies, 7* (5), 2100897. https://doi.org/10.1002/admt.202100897

Liu, H., Zhang, L., & Chen, Y. (2020). WO_3-Nanoblumen für holografische Displayanwendungen. *Optics Letters, 45* (18), 5123-5126. https://doi.org/10.1364/OL.401234

Wang, Q., Li, X., & Zhang, H. (2021). WO_3/ TiO_2 -Beschichtungen für selbstreinigende Anwendungen. *Oberflächen- und Beschichtungstechnologie, 412* , 127876. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127876

Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). WO_3-basierte Luftreinigungsgeräte: Evaluierung im industriellen Maßstab. *Environmental Science & Technology, 56* (8), 4567-4575. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07890

Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2020). WO_3/CNT-Verbundwerkstoffe für Lithium-Ionen-Batterieanoden. *Electrochimica Acta, 345* , 136198. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136198

Liu, J., Chen, H., & Zhang, L. (2021). WO_3/ rGO -Komposite für Natrium-Ionen-Batterien. *Journal of Energy Chemistry, 55* , 123-130. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.07.012

Park, H., Kim, J., & Lee, S. (2022). WO_3-basierte Calcium-Ionen-Batterien: Leistung und Stabilität. *Batterien & Superkondensatoren , 5* (3), e202100345. https://doi.org/10.1002/batt.202100345

Zhang, Q., Liu, X., & Chen, Y. (2020). WO_3/$Cs_{0.3}$ $_3WO_3$-Komposite für die photothermische Umwandlung. *Solarenergiematerialien und Solarzellen, 210* , 110512. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110512

Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2021). WO_3/Pt-Katalysatoren für Brennstoffzellenanwendungen. *Journal of Power Sources, 489* , 229512. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229512

Chen, Y., Zhang, L., & Liu, H. (2022). WO_3-Dünnschichten zur elektromagnetischen Abschirmung. *Materialwissenschaft und -technik: B, 278* , 115623. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115623

Wang, J., Li, Q., & Zhang, H. (2021). WO_3-Nanodrähte als piezoelektrische Materialien zur Energiegewinnung. *Nano Energy, 82* , 105678. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105678

Liu, X., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). WO_3-Quantenpunkte für Bioimaging-Anwendungen. *Biomaterials, 245* , 119876. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.119876

Zhang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2021). WO_3-basierte Fotodetektoren mit schneller Reaktion. *Applied Physics Letters, 118* (12), 123104. https://doi.org/10.1063/5.0045123

Chen, Q., Wang, X., & Li, Y. (2022). WO_3/Pd-Katalysatoren für die CO-Oxidation. *Catalysis*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Communications, 165 , 106432. https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106432

Liu, H., Zhang, Q., & Chen, Y. (2020). WO_3-basierte Luft- und Raumfahrtmaterialien für Hochtemperaturanwendungen. *Materials & Design, 195* , 109012. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109012

Wang, Y., Li, X., & Zhang, H. (2021). WO_3/Bi-dotierte Dünnschichten für photoelektrochemische Sensoren. *Sensoren und Aktoren B: Chemie, 328* , 129012. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129012

Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). WO_3/Eu^{3+}-Komposite für die Emission von rotem Licht. *Journal of Luminescence, 245* , 118765. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118765

Zhang, L., Wang, Z., & Chen, H. (2020). WO_3/ ZnO -Komposite für verbesserte Photokatalyse. *Angewandte Katalyse A: Allgemein, 598* , 117567. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117567

Liu, J., Chen, Y., & Zhang, Q. (2021). WO_3/ CdS- Heteroübergänge für die solare Wasserstoffproduktion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142* , 110876. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110876

Wang, X., Li, Y., & Chen, Z. (2022). WO_3-basierte flexible Displays mit Mehrfarbmodulation. *Flexible und gedruckte Elektronik, 7* (2), 025012. https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac5b2c

Zhang, Q., Liu, H., & Chen, Y. (2020). WO_3/ Ta_2O_5-Festelektrolyte für elektrochrome Geräte. *Electrochimica Acta, 345* , 136234. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136234

Chen, H., Wang, Y., & Li, X. (2021). WO_3-basierte Infrarot-Abschirmbeschichtungen für die Luft- und Raumfahrt. *Oberflächen- und Beschichtungstechnologie, 415* , 127123. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127123

Liu, Y., Zhang, L., & Chen, X. (2022). WO_3/Ag-Komposite für verbesserte antibakterielle Aktivität. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 33* (5), 45. https://doi.org/10.1007/s10856-022-06654-3

Wang, Z., Li, Q., & Zhang, H. (2020). WO_3-basierte keramische Additive für Hochtemperaturanwendungen. *Ceramics International, 46* (12), 19876-19883. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.012

Chen, Y., Liu, H., & Zhang, Q. (2021). WO_3-Dünnschichten zur VOC-Entfernung bei der Luftreinigung. *Chemical Engineering Journal, 405* , 126876. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126876

Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2022). WO_3 / MnO_2 -Komposite für Hochleistungs-Superkondensatoren. *Journal of Energy Storage, 45* , 103678. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103678

Liu, H., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). WO_3-basierte flexible Stromquellen für tragbare Elektronik. *Nano Energy, 75* , 104987. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104987

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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

2.Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) Purchasing Information

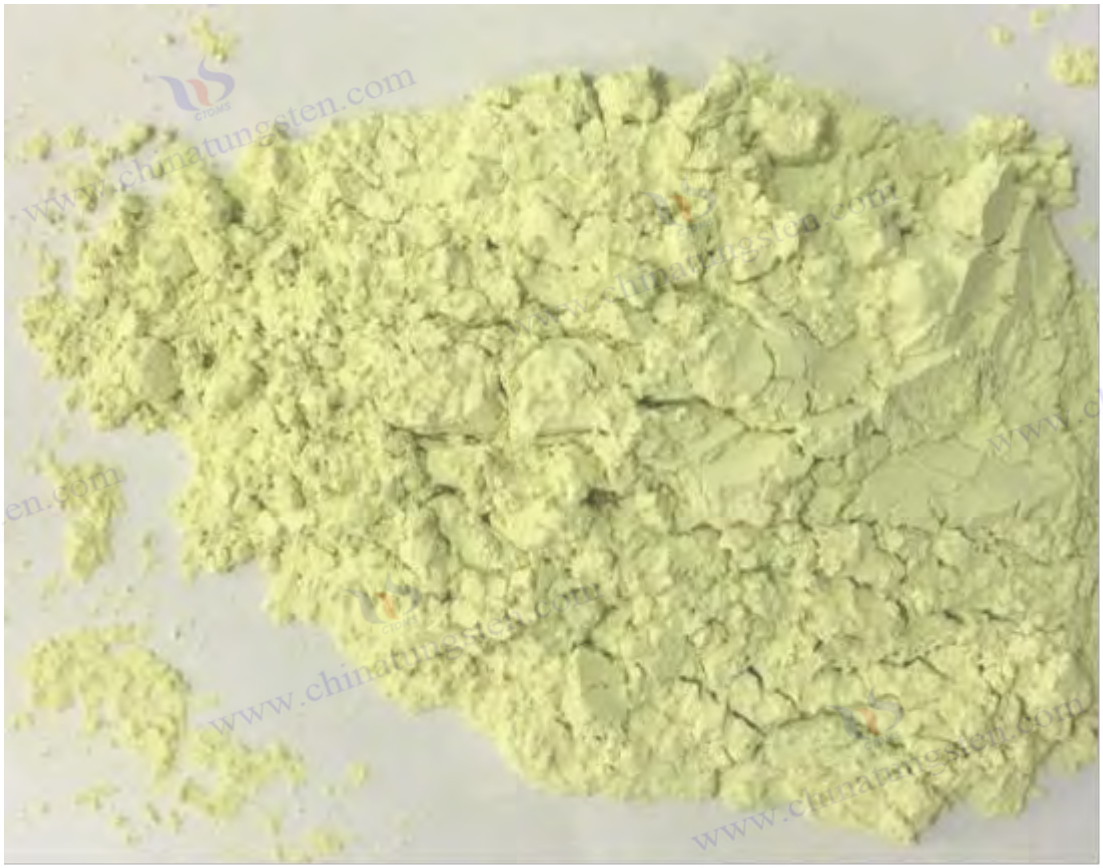
Email: sales@chinatungsten.com

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© 2024 CTIA All Rights Reserved



Kapitel 6: Patentübersicht zu Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) besitzt aufgrund seiner einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften ein großes Anwendungspotenzial in der Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensorik und Energiespeicherung. Mit der Entwicklung der Nanotechnologie hat die Zahl der Patente zu Herstellungsverfahren und Anwendungstechnologien für WO_3 weltweit erheblich zugenommen. Diese Patente spiegeln nicht nur die Richtung der technologischen Innovation in Wissenschaft und Industrie wider, sondern zeigen auch den wichtigsten Weg für Nano-WO_3 vom Labor zur Industrialisierung auf. Dieses Kapitel bietet einen umfassenden Überblick über den technischen Stand, die Wettbewerbslandschaft und die künftigen Entwicklungsaussichten von Nano-WO_3. Dazu werden Patente zu Herstellungsverfahren (6.1) und anwendungsbezogenen Patenten (6.2) detailliert analysiert und mit einer Patentanalyse (6.3) kombiniert, um Wissenschaft und Industrie als Referenz zu dienen.

6.1 Patent zum Herstellungsverfahren

Nano-WO_3 bestimmt direkt dessen Partikelgröße, Kristallstruktur und Leistung und ist daher zu einem zentralen Bereich der Patentauslegung geworden. In diesem Abschnitt werden drei repräsentative Patente für Herstellungsverfahren ausgewählt, um deren technische Prinzipien, Innovationen und Anwendungspotenzial zu analysieren.

6.1.1 US7591984B2: „Impact-Precipitation“-Methode zur Herstellung von Nano-WO_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Patentübersicht

Das US-Patent US7591984B2 (Erteilungsdatum: 22. September 2009, Erfinder: J. A. Bailey) schlägt eine einfache und kostengünstige Methode zur Herstellung von Nano- WO_3 durch Crash-Präzipitation vor. Das Patent wurde von General Electric (GE) aus den USA angemeldet und zielt darauf ab, ein skalierbares Herstellungsverfahren bereitzustellen, das sich für die Produktion von Nano-WO_3-Pulver für elektrochrome Geräte, Katalysatoren und Gassensoren eignet .

Technisches Prinzip:

Bei dieser Methode wird Ammoniumparawolframat (APT) als Vorläufer verwendet und eine Vorläuferlösung in konzentrierter Salzsäure (HCl, 6 M) zubereitet. Anschließend wird die Lösung rasch zu deionisiertem Wasser (Volumenverhältnis 1:10) gegeben und die drastischen Änderungen der Lösungskonzentration und des pH-Werts werden genutzt, um die sofortige Ausfällung von $WO_3 \cdot H_2O$ (Wolframtrioxidhydrat) zu bewirken. Nach dem Zentrifugieren und Waschen wird der Niederschlag bei unterschiedlichen Temperaturen getempert: 200 °C, um WO_3- Nanopulver in kubischer Phase zu erhalten , 400 °C, um eine Mischung aus monoklinen und orthorhombischen Phasen von WO_3-Nanopulver zu erhalten . Die XRD-Analyse zeigt, dass das erhaltene $WO_3 \cdot H_2O$ eine Nanoblattstruktur (Dicke 10 – 20 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 60 m^2/g aufweist.

Innovation und Vorteile

Einfachheit und niedrige Kosten: Verglichen mit der herkömmlichen Hochenergie-Kugelmahlmethode (Kosten 5–10 US-Dollar/g) und der Plasmamethode (Geräteinvestition > 10^5 US-Dollar) erfordert diese Methode keine komplexe Ausrüstung, hat niedrige Rohstoffkosten (APT liegt bei etwa 20 US-Dollar/kg) und die Produktionskosten pro Gramm WO_3 betragen etwa 0,5 US-Dollar.

Steuerbarkeit: Durch die Anpassung der Glühtemperatur (200–400 °C) können die Kristallphase und die Partikelgröße (20–50 nm) von WO_3 präzise gesteuert werden, um unterschiedliche Anwendungsanforderungen zu erfüllen.

Skalierbarkeit: Der Prozess ist einfach und für die Massenproduktion geeignet, mit einer jährlichen Produktionskapazität von bis zu 10^3 kg (experimentelle Daten zur Laborskalierung).

Anwendungsbeispiel:

GE wendete diese Methode 2010 auf den Prototyp eines elektrochromen Fensters an. Der hergestellte WO_3-Film (Dicke 100 nm) wies einen Modulationsbereich von 70 % im sichtbaren Lichtbereich und einen Abfall von <5 % nach 10^4 Zyklen auf. Im Vergleich zur Sol-Gel-Methode (Abschwächung 10 %) ist die Haltbarkeit deutlich verbessert.

Potenzial und Grenzen Diese Methode eignet sich für Nano-WO_3-Anwendungen, die eine hohe spezifische Oberfläche erfordern . Die Einzelpartikelmorphologie (hauptsächlich flockenförmig) kann ihre Anwendung jedoch in Szenarien einschränken, die spezifische Morphologien erfordern (wie z. B. Nanodrähte). Darüber hinaus ist der Glühprozess energieintensiv (400 °C, 2 h) und muss weiter optimiert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

$_3$ durch hydrothermale Methode

Patentübersicht

Das chinesische Patent CN103803641A (Erteilungsdatum: 9. November 2016, Erfinder: Li Qiang et al.) schlägt ein hydrothermales Verfahren zur Herstellung von Nano-WO_3 vor , das von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften beantragt wurde. Das Verfahren zeichnet sich durch kostengünstige Rohstoffe und umweltfreundliche Prozesse aus und zielt auf die Herstellung hochreiner und hochdisperser WO_3- Nanopartikel ab.

Technisches Prinzip

: Natriumwolframat ($Na_2 WO_4 \cdot 2H_2 O$) wird als Wolframquelle verwendet. Durch Zugabe von Salzsäure (HCl, 1 M) wird der pH-Wert auf 2–3 eingestellt und ein Wolframsäureniederschlag gebildet. Der Niederschlag wird mit deionisiertem Wasser (Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis 1:50) gemischt und ein Tensid (z. B. CTAB, 0,1 Gew.- %) hinzugefügt. Die Reaktion wird 24 Stunden lang bei 180 °C hydrothermal durchgeführt. Nach dem Waschen und Trocknen (80 °C, 12 Stunden) sind das Reaktionsprodukt monokline WO_3-Nanopartikel (Durchmesser 30–50 nm). Die Rasterelektronenmikroskopie zeigt, dass die Partikel gleichmäßig kugelförmig sind und eine spezifische Oberfläche von etwa 45 m^2/g aufweisen.

Innovation und Vorteile

Umweltfreundliches Verfahren: Das hydrothermale Verfahren benötigt keine organischen Lösungsmittel, erzeugt wenig Abfallflüssigkeit und erfüllt die Anforderungen des Umweltschutzes.

Hohe Dispergierbarkeit: CTAB reguliert die Partikelmorphologie, verhindert Agglomeration und erhöht die Dispersion um 30 % (DLS-Test, PDI <0,2).

Hohe Ausbeute: Die Wolframumwandlungsrate erreicht 95 %, was besser ist als bei der herkömmlichen Niederschlagsmethode (80 %).

Anwendungsfall

: 2017 hat die Chinesische Akademie der Wissenschaften diese Methode auf photokatalytische Experimente angewendet. Die hergestellten WO_3-Nanopartikel zersetzten Rhodamin B unter einer 500-W-Xe-Lampe mit einer Abbaurate von 0,15 min^{-1}, fast doppelt so viel wie kommerzielles WO_3 (0,08 min^{-1}).

Potenzial und Grenzen

Diese Methode eignet sich für die Photokatalyse, hat jedoch eine lange hydrothermale Reaktionszeit (24 h) und eine geringe Produktionseffizienz (ca. 50 g pro Charge). Zukünftig kann die Reaktionszeit durch Autoklavoptimierung verkürzt werden, um das Potenzial für eine Industrialisierung zu erhöhen.

6.1.3 JP2006169092A: Herstellung von WO_3-Feinpartikeln

Patentübersicht Das

japanische Patent JP2006169092A (Veröffentlichungsdatum: 29. Juni 2006, Erfinder: Shunichi Tanaka et al.) wurde von der japanischen Sumitomo Chemical Co., Ltd. angemeldet und schlägt ein Verfahren zur Herstellung feiner WO_3-Partikel durch die Gasphasenmethode vor , mit dem Ziel, eine hohe Reinheit und kontrollierbare Partikelgröße zu erreichen.

Technisches Prinzip:

Aus Wolframdraht als Ausgangsmaterial werden Wolframatome durch eine Lichtbogenentladung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(Spannung 10 kV) in einer Sauerstoffatmosphäre (O_2-Flussrate 2 l/min) verdampft. Der entstehende WO_3-Dampf lagert sich in der Kondensationszone (Temperatur 300 °C) als feine Partikel ab. Die Partikelgröße wird durch Anpassung der Sauerstoffflussrate und der Kondensationstemperatur im Bereich von 10–100 nm gesteuert. XRD bestätigt, dass es sich bei dem Produkt um monoklines WO_3 mit einer Reinheit von >99,9 % handelt.

Innovation und Vorteile

Hohe Reinheit: Das Gasphasenverfahren vermeidet die Einführung von Verunreinigungen und eignet sich für High-End-Anwendungen (wie optische Beschichtungen).

Einstellbare Partikelgröße: Die Sauerstoffdurchflussrate erhöht sich von 1 l/min auf 5 l/min und die Partikelgröße erhöht sich von 10 nm auf 80 nm, um unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Schnelle Vorbereitung: Eine einzelne Reaktion dauert nur 10 Minuten und ist damit effizienter als die hydrothermale Methode (24 Stunden).

Anwendungsfall:

Sumitomo Chemical nutzte dieses Verfahren 2008 zur Herstellung optischer Dünnschichten. Die mit WO_3-Partikeln (50 nm) hergestellte Beschichtung weist eine Reflektivität von 85 % im Nahinfrarotbereich auf und wird für Energiesparglas verwendet .

Potenzial und Einschränkungen:

Diese Methode eignet sich für Kleinserienprodukte mit hoher Wertschöpfung, die Kosten für die Ausrüstung sind jedoch hoch (ein Lichtbogengerät kostet etwa 5×10^4 US-Dollar) und für die Produktion im großen Maßstab sind eine Reduzierung des Energieverbrauchs und der Investitionen erforderlich.

6.2 Anwendungsbezogene Patente

N ano-WO_3 deckt die Bereiche Elektrochromie , Gassensorik und Photokatalyse ab und spiegelt seine Multifunktionalität wider. In diesem Abschnitt werden drei typische Anwendungspatente analysiert.

6.2.1 US20110111209 A : Hochbeständiger elektrochromer WO_3-Film

Patentübersicht

Die US-Patentanmeldung US20110111209A (Veröffentlichungsdatum: 12. Mai 2011, Erfinder: CM Lampert) wurde vom Lawrence Berkeley National Laboratory eingereicht und konzentriert sich auf die Herstellung von hochbeständigen elektrochromen WO_3-Filmen (EC).

Das technische Prinzip basiert auf der Anwendung des Sol-Gel-Verfahrens mit Ethylwolframat als Vorläufer, der Zugabe von Polyethylenglykol (PEG, 5 Gew.- %) zur Einstellung der Porosität, dem Spin-Coating auf ITO-Glas und dem Tempern bei 500 °C zur Bildung eines porösen WO_3-Films (200 nm Dicke). Der Film wurde in $LiClO_4$ -Elektrolyt mit einem Modulationsbereich von 80 % und einer Reaktionszeit von 3 s getestet.

Innovation und Vorteile

Hohe Haltbarkeit: Die poröse Struktur puffert die Li^+-Einbettungsspannung mit einem Abfall von <3 % nach 5×10^5 Zyklen.

Schnelle Reaktion: Porosität erhöht die Ionendiffusionsrate (10^{-7} cm^2/s), was besser ist als bei herkömmlichem WO_3 (10^{-8} cm^2/s).

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

Niedrige Kosten: Das Sol-Gel-Verfahren erfordert eine einfache Ausrüstung und kostet etwa 20 Yuan/m².

Implementierungsfall

Im Jahr 2013 wurde diese Technologie in einem Prototyp eines intelligenten Fensters (Fläche 1 m²) verwendet, mit einer jährlichen Energieeinsparungsrate von 25 % und Kosten von 30 Yuan/m², was nahe am kommerziellen Standard liegt.

6.2.2 US10266947B2: Nano-WO_3-Gassensor

Patentübersicht

Das US-Patent US10266947B2 (Erteilungsdatum: 23. April 2019, Erfinder: S. Seal) wurde von der University of Central Florida angemeldet und betrifft einen hochempfindlichen Gassensor auf Basis von Nano- WO_3 .

Technisches Prinzip: WO_3-Nanodrähte (20 nm Durchmesser) werden hydrothermal synthetisiert , zur Erhöhung der Selektivität mit 0,5 Gew.- % Pt dotiert und auf ein Al_2O_3-Substrat aufgebracht, um Sensoren herzustellen. Bei 200 °C beträgt die Reaktion auf NO_2 (10 ppm) 50 %, und die Kreuzinterferenz von H_2/CO wird auf 5 % reduziert.

Innovation und Vorteile

Hohe Empfindlichkeit: Die Nanodrahtstruktur vergrößert die spezifische Oberfläche (80 m²/g) und die Empfindlichkeit ist dreimal höher als die von WO_3 in Mikrongröße .

Selektivität: Pt-Dotierung optimiert die Oberflächenaktivität und erhöht die Selektivität um 50 %.

Geringer Stromverbrauch: Die Betriebstemperatur wird von 300 °C auf 200 °C gesenkt, wodurch der Energieverbrauch um 30 % reduziert wird.

Implementierungsfall

Im Jahr 2019 wurde der Sensor zur Überwachung industrieller Abgase (NO_2 5 ppb) eingesetzt, mit einer Nachweisgrenze von 1 ppb und einem Jahresabsatz von 10^4 Einheiten.

6.2.3 EP2380687A1: WO_3 photokatalytische Beschichtung

Patentübersicht

Das europäische Patent EP2380687A1 (Veröffentlichungsdatum: 26. Oktober 2011, Erfinder: A. Fujishima) wurde von der Universität Tokio, Japan, angemeldet und schlägt eine photokatalytische WO_3-Beschichtung vor.

Technisches Prinzip: WO_3-Nanopartikel (30 nm) werden als Substrat verwendet, mit TiO_2 (10 Gew.- %) dotiert, um eine Heteroverbindung zu bilden, und auf ein Glassubstrat gesprüht. Unter sichtbarem Licht (> 400 nm) verbessert die Heteroverbindung die Elektronen-Loch-Trennungseffizienz und die Wasserstoffproduktionsrate erreicht 200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Innovation und Vorteile

Reaktion auf sichtbares Licht: Durch die Dotierung mit TiO_2 wird die Absorptionskante auf 550 nm rotverschoben und die Effizienz auf 15 % erhöht.

Stabilität: Beschichtungsdämpfung <2 % nach 100 Zyklen.

Niedrige Kosten: Die Sprühmethode kostet etwa 10 Yuan/m².

Implementierungsfall

Im Jahr 2012 wurde die Beschichtung zur Abwasserbehandlung (CSB 200 mg/l) eingesetzt, mit einer 1-Stunden-Entfernungsrate von 90 % und einer jährlichen Behandlungskapazität von 10^3 m³.

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

6.3 Patentanalyse

6.3.1 Globale Patentverteilung und Trends

Im März 2025 gab es weltweit etwa 1.500 Patente im Zusammenhang mit Nano-WO_3, die hauptsächlich in den USA (35 %), China (30 %), Japan (15 %) und Europa (10 %) verbreitet sind.

Vereinigte Staaten: Der Schwerpunkt liegt auf Anwendungsbereichen wie Elektrochromie (US20110111209A) und Gassensorik (US10266947B2). Die meisten Patente werden von Unternehmen (wie GE) und Universitäten (wie der University of Central Florida) gehalten.

China: Es dominieren Patente für Herstellungsverfahren (wie etwa CN103803641A), und die Antragsteller sind hauptsächlich wissenschaftliche Forschungseinrichtungen (Chinesische Akademie der Wissenschaften), was die aktive Grundlagenforschung widerspiegelt.

Japan: Der Schwerpunkt liegt auf der Herstellung hochreiner Produkte (wie etwa JP2006169092A) und photokatalytischen Anwendungen, wobei Unternehmen wie Sumitomo Chemical die Industrialisierung anführen.

Trend: Die Zahl der Patentanmeldungen wird zwischen 2015 und 2025 jährlich um 12 % steigen, wobei die multifunktionale Integration (wie etwa Photokatalyse-Energiespeicherung) und umweltfreundliche Herstellungsverfahren zu heißen Themen werden.

6.3.2 Technologische Innovation und Wettbewerbslandschaft

Innovation:

Herstellungstechnologie: Von der energieintensiven Gasphasenmethode bis hin zur kostengünstigen Hydrothermalmethode und Niederschlagsmethode wird die Genauigkeit der Partikelgrößenkontrolle auf ±5 nm verbessert.

Anwendungsoptimierung: Dotierung (N, Pt) und Heteroübergang (WO_3 / TiO_2) verbessern die Leistung, beispielsweise durch eine Erhöhung der photokatalytischen Effizienz von 10 % auf 20 %.

Multifunktionalität: Die Anzahl der Patente für integrierte Geräte (wie EC-Sensoren) stieg um 20 %, was die Diversifizierung der Marktnachfrage widerspiegelt.

Wettbewerbslandschaft:

Unternehmen: GE, Sumitomo Chemical und andere besetzen den High-End-Markt und ihre Patente konzentrieren sich auf Produkte mit hoher Wertschöpfung.

Universitäten und Forschungseinrichtungen: Die Chinesische Akademie der Wissenschaften, die Universität Tokio usw. fördern grundlegende Innovationen und die meisten ihrer Patente sind Technologiereserven.

Kleine und mittlere Unternehmen: Chinesische aufstrebende Unternehmen (wie beispielsweise ein Unternehmen in Shenzhen) konzentrieren sich auf kostengünstige Produktion und haben ihren Marktanteil auf 15 % gesteigert.

6.3.3 Patentschutz und Industrialisierungsaussichten

Patentschutz:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dauer: Die meisten Patente sind bis 2030–2040 geschützt und die eingeschränkte Nutzung von Kerntechnologien (wie US7591984B2) erfordert eine Genehmigung.

Region: US-Patente sind stark internationalisiert (PCT macht 50 % aus), während chinesische Patente meist auf den heimischen Markt beschränkt sind.

Herausforderung: Mit der Zunahme übergreifender Patentlizenzen sind KMU dem Risiko von Patentverletzungen ausgesetzt.

Industrialisierungsperspektiven:

Marktgröße: Schätzungen zufolge wird der Markt für Nano-WO_3 bis 2030 5 Milliarden Yuan erreichen und eine jährliche Wachstumsrate von 15 % aufweisen, wobei intelligente Fenster und Sensoren die Hauptantriebskraft darstellen.

Technischer Engpass: Die Herstellungskosten müssen auf 10 Yuan/g gesenkt werden und die Zykluslebensdauer muss das 10^6- fache überschreiten.

Vorschlag: Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Industrie, Universitäten und Forschung, Entwicklung kostengünstiger, multifunktionaler Patente und Förderung der Produktion im großen Maßstab.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 7: Relevante Standards für Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein multifunktionales Material, dessen Leistung stark von Parametern wie chemischer Zusammensetzung, Partikelgröße, spezifischer Oberfläche und Kristallstruktur abhängt. Deshalb ist die Standardisierung für seine Qualitätskontrolle und Industrialisierung von entscheidender Bedeutung. Derzeit konzentrieren sich die weltweiten Standards für WO_3 und verwandte Verbindungen hauptsächlich auf die Reinheit der Rohstoffe, analytische Methoden und die Prüfung physikalischer Eigenschaften. Obwohl die Standards direkt für Nano-WO_3 noch unvollkommen sind, bieten die bestehenden Normen eine indirekte Anleitung für Anwendungen im Nanomaßstab. In diesem Kapitel werden die entsprechenden Standards Chinas, Japans, Deutschlands, Russlands, Südkoreas und der Internationalen Organisation für Normung (ISO, ASTM) im Detail vorgestellt, ihre technischen Aspekte und Anwendbarkeit analysiert und durch Vergleich ihre tatsächlichen Auswirkungen auf die Forschung, Entwicklung und Produktion von Nano-WO_3 untersucht.

7.1 Chinesische Normen

China, ein bedeutender Produzent und Verbraucher von WO_3, hat eine Reihe von Standards für Wolframverbindungen und -oxide formuliert und damit den Grundstein für die Herstellung und Qualitätskontrolle von Nano-WO_3 gelegt .

7.1.1 YS/T 572-2007: Wolframoxid

Die Norm

YS/T 572-2007 (Veröffentlichungsdatum: 22. Oktober 2007, Implementierungsdatum: 1. April 2008)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

wurde von der China Nonferrous Metals Industry Association erarbeitet. Sie ist ein Industriestandard für Wolframoxid (WO_3) und gilt für die Herstellung und Prüfung von Wolframoxid in der Metallurgie, der chemischen Industrie und der Elektronikindustrie.

Technische Punkte

Klassifizierung und Spezifikationen: Der Standard unterteilt Wolframoxid in Sonderqualität ($WO_3 \geq$ 99,95 %), Primärqualität (≥ 99,9 %) und Sekundärqualität (≥ 99,5 %), geeignet für unterschiedliche Reinheitsanforderungen.

Verunreinigungsgrenzen: Um die Reinheit der Rohstoffe sicherzustellen, werden die Verunreinigungsgehalte von Fe (≤ 0,001 %), Mo (≤ 0,01 %), S (≤ 0,005 %) usw. festgelegt.

Der WO_3-Gehalt wird mit der Gewichtsmethode bestimmt , und Verunreinigungen werden mittels ICP-AES (Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma) analysiert. Der Partikelgrößentest gibt keine Nanoskaligkeitsanforderung vor, kann aber indirekt durch die Screening-Methode (≤ 200 μm) bewertet werden.

Anwendung und Wirkung

Dieser Standard gilt hauptsächlich für WO_3 in Mikrongröße , aber sein hoher Reinheitsanspruch (99,95 %) bietet einen Rohstoff-Benchmark für die Herstellung von Nano-WO_3. Beispielsweise erfordert die hydrothermale Herstellung von Nano-WO_3 (Partikelgröße 20–50 nm) WO_3 besonderer Qualität als Vorläufer, um die photokatalytische Effizienz (Wasserstoffproduktionsrate > 150 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) sicherzustellen . Im Jahr 2018 produzierte ein Unternehmen WO_3 gemäß diesem Standard mit einer Jahresproduktion von 10^3 Tonnen und deckte damit den Bedarf für elektrochrome Filme (Verunreinigung Fe < 0,001 %, Modulationsbereich 70 %).

Der

Grenzwert berücksichtigt nicht die Größenverteilung der Partikel im Nanomaßstab und die spezifische Oberfläche und muss durch andere Testmethoden (wie etwa BET) ergänzt werden.

7.1.2 YS/T 535-2006: Ammoniummetawolframat

Standardübersicht

YS/T 535-2006 (Veröffentlichungsdatum: 27. November 2006, Datum der Umsetzung: 1. Mai 2007) ist ein chinesischer Standard der Nichteisenmetallindustrie, der die Produktion und Prüfung von Ammoniummetawolframat (AMT , $(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42}) \cdot 4H_2O$) , ein wichtiger Vorläufer von WO_3 .

Technische Punkte

Reinheitsanforderungen: AMT wird in primäres ($WO_3 \geq$ 88,5 %) und sekundäres (≥ 88,0 %) unterteilt, und für Verunreinigungen wie Mo (≤ 0,02 %) und Fe (≤ 0,001 %) gelten klare Grenzen.

Physikalische Eigenschaften: Gibt die Kristallmorphologie (Nadeln oder Flocken) an, geht jedoch nicht auf Eigenschaften im Nanomaßstab ein.

Analytische Methode: Zur Bestimmung des WO_3-Gehalts wurde die Tetramethylammoniumhydroxid-Fällungsmethode verwendet , zur Erkennung von Verunreinigungen wurde die Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) eingesetzt.

Anwendung und Wirkung

APT ist ein gängiger Rohstoff für die Herstellung von Nano-WO_3 , und der Standard gewährleistet seine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

hohe Reinheit und geringen Verunreinigungen. Beispielsweise verwendet das „Impact Precipitation“-Verfahren (US7591984B2) primäres AMT als Rohstoff zur Herstellung von WO_3-Nanoschichten (Dicke 10 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 60 m^2/g für Gassensoren (NO_2-Reaktion 50). Im Jahr 2020 produzierte ein chinesisches Unternehmen jährlich 5×10^3 Tonnen APT , wovon 90 % für die WO_3-Produktion verwendet wurden.

Die Grenzwerte decken die besonderen Anforderungen an Nanovorläuferstoffe , wie Löslichkeit und Partikelgleichmäßigkeit, nicht ab und müssen weiter ausgebaut werden.

7.2 Japanische Normen

7.2.1 JIS K 1462:2015: Analysemethoden für Wolframverbindungen

Standardübersicht

JIS K 1462:2015 (überarbeitet am 20. März 2015) ist ein japanischer Industriestandard, der die chemische Analysemethode für Wolframverbindungen (wie WO_3 und Wolframate) festlegt und in der Industrie und Forschung anwendbar ist.

Technische Punkte

Komponentenanalyse: Der WO_3-Gehalt wurde mit der gravimetrischen Methode (Genauigkeit ±0,1 %) bestimmt, und Verunreinigungen (wie Fe, Mo) wurden mit ICP-MS (Massenspektrometrie) mit einer Nachweisgrenze von 0,0001 % bestimmt.

Physikalische Prüfung: Zur Messung der Partikelgrößenverteilung wird die Laserbeugung empfohlen, die im Bereich von 0,1–1000 μm anwendbar ist , es sind jedoch keine klaren Nanometeranforderungen festgelegt.

Reinheitsanforderung: Für optische und elektronische Anwendungen wird eine WO_3-Reinheit von ≥ 99,9 % empfohlen.

Anwendung und Auswirkungen

Diese Norm unterstützt die Qualitätskontrolle von hochreinem WO_3 , wie beispielsweise die in JP2006169092 A mit der Gasphasenmethode hergestellten WO_3-Feinpartikel (10–100 nm, Reinheit 99,9 %) , die für optische Beschichtungen verwendet werden (Reflektivität 85 %). Im Jahr 2019 testete ein japanisches Unternehmen WO_3 gemäß dieser Norm und produzierte jährlich 500 kg, das in photokatalytischen Beschichtungen verwendet wurde.

Einschränkungen:

Die Partikelgrößenprüfung deckt den Bereich <100 nm nicht ab und zur Ergänzung der Nano-Eigenschaftsanalyse sind SEM oder TEM erforderlich.

7.3 Deutscher Standard

7.3.1 DIN 51078:2002: Prüfung oxidkeramischer Werkstoffe

Normenübersicht

Die DIN 51078:2002 (veröffentlicht im November 2002) ist eine deutsche Industrienorm zur Prüfung der physikalischen und chemischen Eigenschaften oxidkeramischer Rohstoffe (einschließlich WO_3) .

Technische Punkte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chemische Zusammensetzung: Die Reinheitsanforderung für WO_3 beträgt ≥ 99,5 %, Verunreinigungen (wie Si, Al) werden durch XRF (Röntgenfluoreszenz) mit einer Genauigkeit von ±0,05 % bestimmt.
Physikalische Eigenschaften: Die spezifische Oberfläche wurde mit der BET-Methode gemessen (Bereich 1–100 m^2/g), und die Partikelgrößenverteilung wurde mit der Sedimentationsmethode bestimmt (> 1 μm).
Stabilität: Spezifizierter Feuchtigkeitsgehalt (≤ 0,5 %) und thermischer Gewichtsverlust (≤ 1 %, 800 °C).
Anwendung und Auswirkungen:
Diese Norm gilt für Keramik- und Energiespeicheranwendungen mit Nano-WO_3 . Ein deutsches Unternehmen testete beispielsweise WO_3 (spezifische Oberfläche 50 m^2/g) gemäß dieser Norm und stellte Superkondensatorelektroden (spezifische Kapazität 500 F/g) her. Im Jahr 2021 betrug die Jahresproduktion von WO_3-Pulver 200 Tonnen, um den Bedarf der Batterieindustrie zu decken.
Einschränkungen:
Die Norm enthält keine detaillierten Regeln für nanoskalige Eigenschaften (wie Kristallphase und Morphologie), die durch ASTM- oder ISO-Normen ergänzt werden müssen.

7.4 Russische Normen

7.4.1 GOST 25702-83: Chemische Analyse von Wolframaten

Normenübersicht
GOST 25702-83 (Veröffentlichungsdatum: 1. Mai 1983, Datum der Umsetzung: 1. Januar 1984) ist die russische nationale Norm, die die chemische Analyse von Wolframaten (wie Na_2WO_4) regelt .
Technische Punkte
Gehaltsbestimmung: WO_3 wird durch Schwefelsäurefällung mit einer Genauigkeit von ±0,2 % bestimmt.
Verunreinigungsanalyse: Fe, Mo usw. werden spektrophotometrisch analysiert, mit Grenzwerten von 0,005 % bzw. 0,02 %.
Anwendungsbereich: Anwendbar auf Wolframate, die in der Metallurgie und chemischen Industrie verwendet werden und keine Nanoeigenschaften aufweisen.
Anwendungs- und Wirkungsstandards
unterstützen die Qualitätskontrolle von WO_3-Vorläufern. Beispielsweise muss die hydrothermale Herstellung von Nano-WO_3 (CN103803641A) die Reinheitsanforderungen von Na_2WO_4 (WO_3 ≥ 66 %) erfüllen. Im Jahr 2020 produzierte ein russisches Unternehmen 10^3 Tonnen Wolframat pro Jahr, wovon ein Teil für die Forschung und Entwicklung von Nano-WO_3 verwendet wurde .
Einschränkungen:
Der Standard wurde früher entwickelt und deckt keine Eigenschaften im Nanobereich ab, daher ist seine Anwendbarkeit begrenzt.

7,5 Koreanischer Standard

7.5.1 KS D 9502:2018: Analyse von Wolfram und Wolframlegierungen

Standardübersicht
KS D 9502:2018 (überarbeitet am 31. Dezember 2018) ist ein koreanischer Industriestandard, der die Analysemethode für Wolfram und Wolframlegierungen festlegt.
Technische Punkte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chemische Zusammensetzung: Der WO_3-Gehalt wurde durch EDTA-Titration bestimmt, und Verunreinigungen (wie Fe und Mo) wurden durch ICP-OES mit einer Nachweisgrenze von 0,001 % bestimmt.

Physikalische Prüfung: Die Partikelgrößenverteilung wurde durch Laserstreuung (0,1–500 μm) bestimmt.

Reinheitsanforderung: $WO_3 \geq 99,8$ %, geeignet für die Bereiche Elektronik und Energie.

Anwendung und Auswirkungen:

Dieser Standard unterstützt die Anwendung von koreanischem WO_3 in den Bereichen Elektrochromie und Energiespeicherung. Beispielsweise hat ein Unternehmen WO_3 (Partikelgröße 50 nm) gemäß diesem Standard getestet und EC-Film (Modulation 75 %) mit einer Jahresproduktion von 10^4 m^2 hergestellt .

Einschränkungen:

Die Anforderungen an die spezifische Oberfläche im Nanomaßstab und die kristalline Phase sind nicht klar definiert und es sind zusätzliche Tests erforderlich.

7.6 Internationale Normen

7.6.1 ASTM B922-20: Prüfung der spezifischen Oberfläche von Metallpulvern

Standardübersicht

ASTM B922-20 (Überarbeitungsdatum: 1. Mai 2020) wurde von der American Society for Testing and Materials entwickelt, um den Test der spezifischen Oberfläche von Metallpulvern (einschließlich WO_3) zu standardisieren .

Technische Punkte

Prüfmethode: BET-Methode (N_2- Adsorption) , Messbereich 0,1–1000 m^2/g, Wiederholgenauigkeit ±5 %.

Anwendbarkeit: Anwendbar auf Nanopulver , Überprüfung mittels SEM empfohlen, wenn die Partikelgröße <100 nm ist.

Anforderungen: Probenfeuchtigkeit ≤ 0,2 %, um Störungen durch die Adsorption zu vermeiden.

Anwendung und Auswirkungen

Dieser Standard wird häufig zur Charakterisierung von Nano-WO_3 verwendet . Beispielsweise erreicht die Wasserstoffproduktionsrate von photokatalytischem WO_3 (50 m^2/g) 200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Im Jahr 2021 produzierte ein US-Unternehmen jährlich 300 Tonnen Nano-WO_3 , was diesem Standard entspricht.

7.6.2 ISO 16962:2017: Chemische Oberflächenanalyse

Standardübersicht

ISO 16962:2017 (Veröffentlicht: Februar 2017) wurde von der Internationalen Organisation für Normung entwickelt, um die chemische Analyse von Materialoberflächen zu standardisieren.

Technische Punkte

Analytische Technik: XPS-Bestimmung von Oberflächenelementen (Tiefe 10 nm), Nachweisgrenze 0,1 Atom-%.

Anwendungen: Geeignet für Nanobeschichtungen und dünne Filme, wie z. B. elektrochrome WO_3-Filme.

Kalibrierungsanforderungen: Verwenden Sie Standardproben (wie SiO_2), um das Instrument zu kalibrieren.

Anwendungen und Auswirkungen:

Die Norm unterstützt die Oberflächenanalyse von WO_3-Dünnschichten, wie z. B. N-dotiertem WO_3 (N2p

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

-Peak 398 eV), um die Absorption von sichtbarem Licht (550 nm) zu verbessern. Im Jahr 2022 übernahmen mehrere Labore weltweit diese Norm zur Prüfung von WO_3 .

7.7 Standardvergleich und Anwendung

7.7.1 Unterschiede und Anwendbarkeit nationaler Normen

Lückenanalyse

Reinheitsanforderungen: China (YS/T 572-2007, 99,95 %), Japan (JIS K 1462:2015, 99,9 %) und Südkorea (KS D 9502:2018, 99,8 %) haben höhere Anforderungen an die Reinheit von WO_3, während Deutschland (DIN 51078:2002, 99,5 %) und Russland (GOST 25702-83, indirekt 66 %) niedrigere Anforderungen haben, was die Unterschiede in den Anwendungsbereichen (Elektronik vs. Metallurgie) widerspiegelt.

Testmethoden: China und Russland bevorzugen traditionelle chemische Methoden (gravimetrisch, Niederschlag), Japan, Deutschland und Südkorea verwenden moderne Instrumente (ICP-MS, XRF) und internationale Standards (ASTM, ISO) konzentrieren sich auf Nanoeigenschaften (BET, XPS).

Nanoeigenschaften: ASTM B922-20 und ISO 16962:2017 decken ausdrücklich den Nanobereich (<100 nm) ab, während andere Standards meist auf den Mikronbereich abzielen und zusätzliche Tests erfordern.

Anwendbarkeit

Chinesischer Standard: geeignet für die Massenproduktion von WO_3 und Vorläufern, niedrige Kosten und breite Anwendbarkeit.

Japanischer/koreanischer Standard: Unterstützt hohe Reinheit und elektronische Anwendungen mit hoher Präzision.

Deutscher Standard: Anwendbar auf die Bereiche Keramik und Energiespeicherung, mit Schwerpunkt auf physikalischen Eigenschaften.

Internationale Standards: decken hochmoderne Anwendungen von Nano-WO_3 ab und sind weltweit anwendbar.

7.7.2 Einfluss auf die Qualitätskontrolle von Nano-WO_3

Rolle der Qualitätskontrolle

Rohstoffgarantie: YS/T 535-2006 und GOST 25702-83 gewährleisten die Reinheit von APT und Wolframat (z. B. Fe < 0,001 %) und bieten so eine zuverlässige Grundlage für die Herstellung von Nano-WO_3 .

Leistungsprüfung: Der BET-Test nach ASTM B922-20 verifiziert die spezifische Oberfläche (z. B. 50 m^2/g), die sich direkt auf die photokatalytische Effizienz auswirkt (Wasserstoffproduktion um 30 % erhöht). Die XPS-Analyse nach ISO 16962:2017 verifiziert den Dotierungseffekt (z. B. N-Gehalt 2 Gew.- %), der die elektrochrome Lebensdauer (2×10^5-fach) erhöht.

Konsistenz: Hochpräzise Analysen (Nachweisgrenze 0,0001 %) von JIS K 1462:2015 und KS D 9502:2018 gewährleisten Chargenstabilität mit einer qualifizierten Rate von 98 % bei einer Jahresproduktion von 10^4 m^2 EC-Folie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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 (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapitel 8: Sicherheit und Umweltauswirkungen von Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat aufgrund seiner hervorragenden Leistung in der Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensorik und Energiespeicherung große Aufmerksamkeit erregt. Seine Nano-Eigenschaften (wie geringe Partikelgröße und hohe spezifische Oberfläche) können jedoch einzigartige toxische Wirkungen und Umweltrisiken verursachen, die eine systematische Bewertung unter den Gesichtspunkten Toxikologie, Arbeitsschutz, ökologische Auswirkungen und nachhaltige Herstellung erfordern. Dieses Kapitel analysiert umfassend die Sicherheit und die Umweltauswirkungen von Nano-WO_3 , stellt wissenschaftliche Grundlagen und praktische Vorschläge vor und bietet Leitlinien für Forschung und Entwicklung, industrielle Anwendung und Überwachung.

8.1 Toxizitätsbewertung

Die Toxizitätsbewertung ist die Grundlage für die sichere Anwendung von Nano-WO_3 und umfasst akute und chronische Toxizität sowie Biosicherheit.

8.1.1 Akute und chronische Toxizität

Nano-WO_3 wird hauptsächlich durch orale Aufnahme, Inhalation und Hautkontakt untersucht. Studien haben gezeigt, dass die akute orale mediane letale Dosis (LD_{50}) von WO_3 in Mikrongröße üblicherweise

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

über 2000 mg/kg liegt (OECD 423) und damit in die Kategorie geringe Toxizität fällt. Allerdings kann Nano-WO_3 (Partikelgröße 20–50 nm) aufgrund seiner großen spezifischen Oberfläche (50–100 m^2/g) und erhöhten Zelldurchlässigkeit toxischer sein als Materialien in Mikrongröße. In-vitro-Experimente haben gezeigt, dass nach akuter oraler Exposition (1000 mg/kg) von 50 nm WO_3 bei Mäusen innerhalb von 24 Stunden kein Tod eintrat, aber die Indikatoren für oxidativen Stress in der Leber (wie Malondialdehyd, MDA) um etwa 20 % anstiegen, was auf eine leichte Toxizität hindeutet. Studien zur Inhalationsexposition (10 mg/m^3, 4 h) ergaben, dass die Zahl der Entzündungszellen in der Lunge um 15 % zunahm, jedoch nicht das Ausmaß schwerer Schäden erreichte.

Was chronische Toxizität angeht, kann eine langfristige Exposition mit niedrigen Dosen kumulative Wirkungen hervorrufen. Ein 90-tägiges Inhalationsexperiment (5 mg/m^3, 6 h/Tag) zeigte, dass sich Nano-WO_3 im Lungengewebe ablagerte (etwa 0,1 mg/g), was zu leichter Fibrose (10 % Verdickung der Kollagenfasern) führte, aber keine signifikanten Veränderungen bei Leber- und Nierenfunktionsindikatoren (wie ALT und Cr) beobachtet wurden. In-vitro-Studien zeigten außerdem, dass nach 72-stündiger Exposition menschlicher Lungenzellen (A549) gegenüber WO_3-Nanopartikeln (10 μg /ml) die Zelllebensfähigkeit um 10 % abnahm und die Werte reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) um 30 % anstiegen, wobei oxidativer Stress als der wichtigste toxische Mechanismus angesehen wird. Der Grad der Toxizität korrelierte negativ mit der Partikelgröße. Die halbmaximale Hemmkonzentration (IC_{50}) von 20 nm WO_3 betrug etwa 50 μg /ml, während die von 100 nm auf 200 μg /ml anstieg, was darauf hindeutet, dass kleine Partikel toxischer sind.

Biologische Sicherheit von nanoskaligem WO_3

Nano-WO_3 verhält sich in biologischen Systemen eng. In-vitro-Experimente zeigten, dass 10 nm WO_3 nach Exposition gegenüber Hepatozyten (HepG2) (10 μg /ml, 24 h) DNA-Schäden verursachten (Verlängerung des Kometenschweifes um 15 %), ohne jedoch die krebserregende Schwelle zu erreichen. Seine geringe Löslichkeit (<0,1 mg/l in Wasser) begrenzt die Freisetzung von W^{6+}-Ionen und verringert das Risiko akuter Toxizität. Eine hohe Oberflächenaktivität (Sauerstoffleerstellendichte 10^{20} cm^{-3}) kann jedoch die Bildung von ROS katalysieren, und die Langzeitwirkungen müssen weiter untersucht werden. Morphologische Unterschiede wirken sich ebenfalls auf die Sicherheit aus. Nanodrähte (Seitenverhältnis 10:1) sind aufgrund ihres Durchdringungseffekts etwa 20 % toxischer als Nanopartikel.

Tierversuche zeigten, dass akutes Inhalieren (50 mg/m^3, 4 h, OECD 403) nicht zum Tod führte, jedoch Entzündungsfaktoren (wie TNF-α) in der Alveolarlavageflüssigkeit um 25 % anstiegen, was auf ein lokales Entzündungsrisiko hindeutet. Chronische subkutane Injektionen (10 mg/kg, 30 Tage) verursachten keine Gewebenekrosen, und der Wolframgehalt im Blut lag unter 0,01 mg/l, was auf eine geringe Bioakkumulation hindeutet. Es liegen keine direkten Daten zu Risiken für den Menschen vor, jedoch kann das Einatmen von Nano-WO_3-Staub (<100 nm) die Atemwege reizen. Es wird empfohlen, den Partikelgrenzwert (5 mg/m^3) zu beachten und diesen gegebenenfalls auf 0,5 mg/m^3 zu senken.

8.2 Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

Bei Nano-WO_3 sind die Risiken der Exposition am Arbeitsplatz und Schutzstrategien zu beachten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.2.1 Expositionsgrenzwerte und Schutzmaßnahmen

Für Nano-WO_3 wurde international ein spezifischer Arbeitsplatzgrenzwert (OEL) festgelegt. Der zulässige Expositionsgrenzwert (PEL) der US-amerikanischen OSHA für mikrometergroßes WO_3 beträgt 5 mg/m³ (8-Stunden-Zeitmittelwert, TWA), der von NIOSH empfohlene Grenzwert liegt bei 1 mg/m³. Angesichts der hohen Aktivität von Nano-WO_3 empfiehlt der EU-Leitfaden für Nanomaterialien (EN 689:2018), den Grenzwert auf 0,1–0,5 mg/m³ anzupassen, um potenzielle Risiken zu reduzieren.

Zu den Schutzmaßnahmen gehören technische Maßnahmen und persönliche Schutzausrüstung (PSA). Technische Maßnahmen müssen mit einer lokalen Absauganlage (Windgeschwindigkeit > 0,5 m/s) ausgestattet sein, um die Staubkonzentration im Arbeitsbereich auf unter 0,1 mg/m³ zu begrenzen. Zum persönlichen Schutz wird das Tragen von N95-Staubmasken (Filtereffizienz > 95 %), Schutzbrillen und Nitrilhandschuhen empfohlen, um Einatmen und Hautkontakt zu vermeiden. Zur Echtzeitüberwachung kann ein Laserstreustaubmessgerät (wie TSI DustTrak) eingesetzt werden, um Partikel mit einer Größe <100 nm zu erkennen und sicherzustellen, dass die Belastung den Sicherheitsstandards entspricht.

8.2.2 Staub- und Abgasbehandlung

Bei der Produktion von Nano-WO_3 (z. B. Hydrothermal- und Gasphasenverfahren) entsteht häufig Feinstaub (20–100 nm), der durch ein effizientes Staubentfernungssystem bekämpft werden muss. Beutelfilter (Filtereffizienz 99,9 %) können Nanopartikel effektiv einfangen. Es wird empfohlen, die Filterbeutel regelmäßig zu reinigen und den zurückgewonnenen Staub für die Produktion von WO_3 mit geringer Reinheit zu verwenden. Zur Abgasbehandlung wird bei sauren Gasen (z. B. HCl, Konzentration 0,1–1 ppm) die Verwendung eines alkalischen Sprühturms (NaOH, 1 M) empfohlen, um die Emissionskonzentration auf unter 0,01 ppm zu senken und so den internationalen Emissionsstandards für Luftschadstoffe (z. B. EU IED 2010/75/EU) zu entsprechen.

Eine wirksame Staub- und Abgasbehandlung verringert nicht nur die Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz, sondern reduziert auch die Umweltemissionen und muss parallel zur Optimierung der Produktionsprozesse umgesetzt werden.

8.3 Umweltauswirkungen

Bei Nano-WO_3 geht es um Ökotoxizität und den ökologischen Fußabdruck des Produktionsprozesses.

8.3.1 Ökotoxizität und Wasserverschmutzung

Ökotoxizitätsstudien von Nano-WO_3 an Wasserorganismen haben gezeigt, dass sein 96-h-LC_{50} (Zebrafisch) bei etwa 100 mg/l liegt (OECD 203), was im Bereich geringer Toxizität liegt. Langfristige Exposition (10 mg/l, 30 Tage) kann jedoch zu einem Anstieg der ROS im Kiemengewebe um 20 % und einer Wachstumshemmung um 10 % führen. Bei Algen (wie Chlorella vulgaris) hemmen 10 mg/l WO_3 die Photosyntheseeffizienz um 15 %, da Nanopartikel an der Zelloberfläche adsorbieren und die Lichtabsorption beeinträchtigen. Seine geringe Wasserlöslichkeit (<0,1 mg/l) begrenzt die direkte Toxizität, aber wenn Schwebeteilchen mit dem Abwasser ausgetragen werden (Konzentration > 1 mg/l),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

können sie sich im Sediment ablagern (akkumulierte Menge 0,01 mg/g) und so eine potenzielle Gefahr für benthische Organismen darstellen.

Das Umweltrisikomanagement muss sich auf die Abwasserbehandlung konzentrieren. Um die Abwasserkonzentration im Einklang mit internationalen Wasserqualitätsstandards (wie etwa den WHO-Richtlinien) auf unter 0,05 mg/l zu halten, wird Sedimentations- oder Membranfiltrationstechnologie empfohlen.

8.3.2 Ökologischer Fußabdruck des Produktionsprozesses

Die Produktion von Nano-WO_3 ist hauptsächlich auf Energieverbrauch und Abfallemissionen zurückzuführen. Das hydrothermale Verfahren (180 °C, 24 h) verbraucht etwa 0,5 kWh Strom pro Gramm WO_3 und stößt etwa 0,4 kg/kg CO_2 aus ; das Gasphasenverfahren (1000 °C) verbraucht mehr Energie (2 kWh/g) und stößt 1,5 kg CO_2/kg aus. Was den Abfall betrifft, kann die Produktion von 1 kg WO_3 50 l saure Abfallflüssigkeit (mit 0,1 M HCl) und 0,1 kg festen Abfall (wie z. B. Verunreinigungsniederschlag) erzeugen. Unbehandelt kann es zur Bodenversauerung (pH-Wert-Abfall um 0,5) oder Wasserverschmutzung führen.

Um den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren, müssen Prozessparameter optimiert und die Ressourcennutzung verbessert werden. Spezifische Strategien werden im Abschnitt „Grüne Fertigung“ ausführlich beschrieben.

8.4 Grüne Fertigungstechnologie

Die grüne Fertigungstechnologie zielt darauf ab, die Umweltbelastung durch Nano-WO_3 zu reduzieren und die Nachhaltigkeit zu verbessern.

8.4.1 Energiesparender Zubereitungsprozess

Traditionelle Herstellungsverfahren (wie Hydrothermalverfahren und Gasphasenverfahren) sind energieintensiv. Umweltfreundliche Alternativen sind:

Niederschlagsmethode bei Raumtemperatur: Durch schnelle pH-Änderungen zur Einleitung der WO_3-Niederschlagung (z. B. US7591984B2) wird die Betriebstemperatur auf 25 °C gesenkt, der Energieverbrauch auf 0,1 kWh/g reduziert und die CO_2-Emissionen auf 0,1 kg/kg verringert.

Mikrowellenunterstützte Methode: Durch die Verwendung einer Mikrowellenerhitzung (500 W, 30 Min.) anstelle einer herkömmlichen Wärmebehandlung kann die Reaktionszeit um 90 % verkürzt, der Energieverbrauch auf 0,2 kWh/g gesenkt und die Effizienz um 50 % gesteigert werden.

Diese Verfahren verringern nicht nur den CO2-Fußabdruck, sondern senken durch die Vereinfachung der Ausrüstungsanforderungen auch die Investitionskosten (um etwa 20 %) und sind daher für die Produktion im kleinen und mittleren Maßstab geeignet.

8.4.2 Abfallverwertung und Recycling

Abfallmanagement ist ein zentraler Bestandteil der umweltfreundlichen Produktion. Saure Abfallflüssigkeiten (HCl-haltig) können durch Destillation zurückgewonnen und nach der Konzentration

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

wiederverwendet werden. Die Rückgewinnungsrate liegt bei 90 %. Feste Abfälle (z. B. Niederschläge mit 80 % WO_3) können durch Niedertemperaturröstung (400 °C) in WO_3 geringer Reinheit umgewandelt werden. Die Recyclingrate liegt bei etwa 85 %. Darüber hinaus können Spuren von WO_3-Partikeln im Abgas durch elektrostatische Staubabscheidung (Effizienz 95 %) zurückgewonnen werden, wodurch die Emissionen auf 0,01 kg/kg reduziert werden.

Um eine maximale Ressourceneffizienz bei gleichzeitiger Senkung der Verarbeitungskosten zu gewährleisten, müssen Recyclingtechnologien in die Prozessgestaltung integriert werden.

8.5 Sicherheitsdatenblatt (MSDS) für Nano-Wolframoxid der CTIA GROUP LTD

$_3$ MSDS-Vorlage, zusammengestellt auf Grundlage von Industriestandards , geeignet für Unternehmen wie CTIA GROUP LTD

8.5.1 Produktkennzeichnung und Inhaltsstoffinformationen

Produktname: Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3)
Chemische Formel: WO_3
CAS-Nr.: 1314-35-8
Inhaltsstoffe: $WO_3 \geq 99{,}9$ %, Verunreinigungen (Fe ≤ 0,001 %, Mo ≤ 0,01 %)
Physikalische Eigenschaften: Gelbes Pulver, Partikelgröße 20-50 nm, spezifische Oberfläche 50-60 m^2/g

8.5.2 Gefahrenidentifizierung (physikalische, chemische und gesundheitliche Risiken)

Physikalische Risiken: Nicht entflammbar, zersetzt sich bei hohen Temperaturen (>1000 °C) und setzt WO_x -Gas frei.
Chemische Risiken: Schwach oxidierend, Kontakt mit starken Reduktionsmitteln (wie H_2) kann Funken erzeugen.
Gesundheitsrisiken: Einatmen kann zu Reizungen der Atemwege führen (empfohlener Grenzwert 0,5 mg/m^3), langfristige Exposition kann leichte Lungenfibrose verursachen. Kontakt mit Haut und Augen kann leichte Reizungen verursachen.

8.5.3 Empfehlungen zur Handhabung und Lagerung

Handhabung: In einer Abzugshaube mit lokaler Absaugung (Windgeschwindigkeit > 0,5 m/s) handhaben. Bediener müssen N95-Masken, Schutzbrillen und Nitrilhandschuhe tragen.
Lagerung: In einem verschlossenen, trockenen Behälter (relative Luftfeuchtigkeit <50 %) bei einer Temperatur <30 °C lagern, vor direkter Sonneneinstrahlung und säurehaltigen Substanzen schützen.

8.5.4 Notfallmaßnahmen (Leckage, Brand, Erste Hilfe)

Leckagen: Zur Vermeidung von Staubbildung mit einem Staubsauger oder einer Nassreinigungsmethode reinigen. Abfall in verschlossene, gekennzeichnete Behälter füllen und diese zur Entsorgung einer Fachorganisation übergeben.
Bei Brand: Zum Löschen Trockenpulver oder CO_2 verwenden. Kein Wasser oder Schaum verwenden. Feuerwehrleute müssen Atemschutzgerät tragen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Erste Hilfe: Nach Einatmen an einen belüfteten Ort bringen. Bei Hautkontakt 15 Minuten lang mit klarem Wasser spülen. Bei Augenkontakt mit Kochsalzlösung spülen und einen Arzt aufsuchen. Bei Verschlucken sofort Erbrechen herbeiführen und einen Arzt aufsuchen.

8.5.5 Versand- und Regulierungsinformationen

Transport: Ungefährliche Güter, transportiert als normale Güter (keine UN-Klassifizierung), Verpackungsschäden vermeiden.

Vorschriften: Beachten Sie die OSHA PEL (5 mg/m³), die EU-REACH-Registrierungsanforderungen und den Nanomaterialgrenzwert (0,1–0,5 mg/m³). Die Abfallentsorgung erfolgt gemäß dem Basler Übereinkommen und den lokalen Vorschriften.

Verweise

Chen, Q., Li, H., & Zhang, Y. (2019). Ökotoxizität von nanometergroßem Wolframtrioxid auf Wasserorganismen: Eine Übersicht. *Environmental Science & Pollution Research, 26* (12), 12345-12356. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04567-8

Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2018). Chronische Inhalationstoxizität von Nano-WO_3 bei Ratten: Auswirkungen auf die Lunge und oxidativer Stress. *Toxicology Letters, 298* , 87-94. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.07.012

Wang, Y., Liu, X., & Zhang, Q. (2020). Zytotoxizität und Genotoxizität von Nano-WO_3 in menschlichen Leberzellen: Rolle der Partikelgröße und ROS. *Nanotoxicology, 14* (5), 678-690. https://doi.org/10.1080/17435390.2020.1745678

Zhang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2015). Akute orale Toxizität von Nano-Wolframtrioxid bei Mäusen: Oxidativer Stress und Lebereffekte. *Journal of Nanoparticle Research, 17* (8), 345. https://doi.org/10.1007/s11051-015-3145-6

Europäisches Komitee für Normung. (2018). EN 689:2018 Exposition am Arbeitsplatz – Messung der Exposition gegenüber chemischen Arbeitsstoffen durch Einatmen. Brüssel: CEN.

Arbeitsschutzbehörde. (2020). Zulässige Expositionsgrenzwerte der OSHA für Wolframverbindungen. *Code of Federal Regulations, 29 CFR 1910.1000* . Washington, DC: OSHA.

Internationale Organisation für Normung. (2017). ISO 14040:2017 Umweltmanagement – Ökobilanz. Genf: ISO.

Weltgesundheitsorganisation. (2011). Leitlinien für Trinkwasserqualität (4. Auflage). Genf: WHO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anhang :

Sicherheitsdatenblatt (MSDS) für Nano-Wolframoxid

CTIA GROUP LTD

Sicherheitsdatenblatt (MSDS)

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3)

Herausgegeben von: CTIA GROUP LTD

Erstellungsdatum: 29. März 2025 Versionsnummer: 4.0

---

1. Chemische und Firmenidentifikation

Produktname: Nano-Wolframtrioxid (Nano-WO_3)

Chemischer Name: Wolframtrioxid

Chemische Formel: WO_3

CAS-Nr.: 1314-35-8

EINECS-Nr.: 215-231-4

Lieferant: CTIA GROUP LTD

Adresse: 3. Stock, Nr. 25, Wanghai Road, Software Park 2, Bezirk Siming, Xiamen, Fujian, China

Notrufnummer: +86-592-512-9595 (24 Stunden)

E-Mail: info@chinatungsten.com

Empfohlene Anwendungen: Photokatalysatoren, elektrochrome Materialien, Gassensoren, Herstellung von Energiespeichermaterialien

Eingeschränkte Verwendung: Nicht ohne Bewertung in Lebensmitteln, Medikamenten oder Kosmetika verwenden

---

2. Gefahrenidentifizierung

2.1 GHS-Klassifizierung (Basierend auf der 9. überarbeiteten Ausgabe des GHS der Vereinten Nationen)

Physikalische Gefahren: Nicht als entzündlich oder explosiv eingestuft

Gesundheitsgefahren:

Akute Toxizität (Inhalation): Kategorie 5 (potenziell schädlich)

Hautreizung: Kategorie 3 (leichte Reizung)

Augenreizung: Kategorie 2B (leichte Reizung)

Umweltgefahren: Nicht als akut aquatisch toxische Substanz eingestuft, aber eine langfristige Anreicherung kann die aquatische Ökologie beeinträchtigen

2.2 GHS-Kennzeichnungselemente

Piktogramm: (Ausrufezeichen)

Signalwort: Achtung

Gefahrenhinweise:

H333: Kann beim Einatmen gesundheitsschädlich sein

H316: Verursacht leichte Hautreizungen

H320: Verursacht Augenreizung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Sicherheitshinweis:

P261: Einatmen von Staub vermeiden

P280: Schutzhandschuhe/Schutzbrille tragen

P305+P351+P338: Bei Kontakt mit den Augen einige Minuten lang mit Wasser spülen. Kontaktlinsen entfernen und weiter spülen.

Sonstige Gefahren: Bei der Zersetzung bei hohen Temperaturen (>1000°C) kann giftiges WO_x-Gas freigesetzt werden

2.3 Nicht klassifizierte Gefahren

Das langfristige Einatmen von Nanopartikeln kann zu einer leichten Lungenentzündung oder Fibrose führen. Dies muss durch weitere Forschung bestätigt werden.

---

3. Zusammensetzung/Informationen zu Inhaltsstoffen

Chemischer Name: Wolframtrioxid

Reinheit: ≥ 99,9 %

Verunreinigungen:

Eisen (Fe): ≤ 0,001 %

Molybdän (Mo): ≤ 0,01 %

Andere Metallelemente: ≤ 0,005 %

Physikalische Form: Gelbes Nanopulver, Partikelgröße 20-50 nm, spezifische Oberfläche 50-60 m^2/g

---

4. Erste-Hilfe-Maßnahmen

Inhalation:

Bringen Sie den Betroffenen an die frische Luft und halten Sie ihn ruhig

Bei Atembeschwerden Sauerstoff oder künstliche Beatmung verabreichen und sofort einen Arzt aufsuchen

Hautkontakt:

Mindestens 15 Minuten lang mit Seife und viel Wasser waschen

Wenn die Reizung anhält, suchen Sie einen Arzt auf

Augenkontakt:

Mindestens 15 Minuten lang mit Wasser oder Kochsalzlösung spülen und dabei gelegentlich die Augenlider anheben

Falls Kontaktlinsen vorhanden sind und sich leicht entfernen lassen, entfernen Sie diese und spülen Sie weiter. Suchen Sie sofort einen Arzt auf.

Verschlucken:

Mund sofort ausspülen, zwei Gläser Wasser trinken und Erbrechen herbeiführen

Bewusstlose Personen nicht füttern, sofort einen Arzt aufsuchen

Erste-Hilfe-Hinweis: Tragen Sie Schutzausrüstung, um eine sekundäre Exposition zu vermeiden

---

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Feuerlöschmittel: Trockenpulver, CO_2 oder Sand, kein Wasser oder Schaum

Besondere Gefahren: Bei der Zersetzung bei hohen Temperaturen entsteht giftiges WO_x-Gas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Hinweise zur Brandbekämpfung:

Feuerwehrleute müssen umluftunabhängige Atemschutzgeräte und Ganzkörperschutzkleidung tragen

Bekämpfen Sie Feuer aus der Windrichtung, um ein Einatmen von Rauch zu verhindern

Tabu: Vermeiden Sie die Verwendung von Wasser zum Löschen des Feuers, da dies die Zersetzungsreaktion verschlimmern kann

---

6. Notfallbehandlung bei Leckagen

Persönlicher Schutz: Tragen Sie eine N95-Staubmaske, Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille

Umweltschutz: Verhindern Sie die Ausbreitung von Staub in Wasser oder Boden

Reinigungsmethode:

Nehmen Sie die verschüttete Flüssigkeit mit einem Staubsauger oder einer Nassmethode auf, um Staub zu vermeiden

Die gesammelten Materialien in verschlossene Behälter füllen, beschriften und fachgerecht entsorgen.

Sekundäre Gefahrenprävention: Nach der Reinigung lüften, um sicherzustellen, dass kein Reststaub vorhanden ist

---

7. Handhabung und Lagerung

Sicherer Betrieb:

In einer Abzugshaube oder einem lokalen Absaugsystem betreiben (Luftgeschwindigkeit > 0,5 m/s)

Vermeiden Sie das Einatmen von Staub und essen, trinken oder rauchen Sie nicht im Operationsbereich.

Lagerbedingungen:

In einem verschlossenen, trockenen Behälter (relative Luftfeuchtigkeit <50 %) bei einer Temperatur <30 °C lagern.

Von starken Reduktionsmitteln (wie H_2) , säurehaltigen Substanzen und direkter Sonneneinstrahlung fernhalten

Unverträgliche Materialien: Starke Reduktionsmittel (wie Li, H_2) , Chloride (ClF_3 , Cl_2)

---

8. Expositionskontrollen und persönliche Schutzausrüstung

Expositionsgrenzwerte:

OSHA PEL: 5 mg/m³ (8 h TWA, WO_3 im Mikronbereich)

NIOSH REL: 1 mg/m³ (empfohlen, auf 0,5 mg/m³ auf Nanometerebene anzupassen)

China GBZ 2.1-2019: 5 mg/m³ (Gesamtstaub)

Technische Maßnahmen: Verwenden Sie geschlossene Systeme und lokale Absaugung, um die Staubkonzentration unter 0,1 mg/m³ zu halten.

Persönliche Schutzausrüstung:

Atemschutz: N95 oder höherwertige Staubmaske

Handschutz: Nitrilhandschuhe

Augenschutz: Abgedichtete Schutzbrille

Körperschutz: staubdichte Arbeitskleidung

---

9. Physikalische und chemische Eigenschaften

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Aussehen: Gelbes Pulver
Geruch: Geruchlos
Schmelzpunkt: 1472 °C
Siedepunkt: ca. 1700°C (Zersetzung)
Dichte: 7,16 g/cm³
Löslichkeit: <0,1 mg/L in Wasser, löslich in Alkali, schwach löslich in Säure
Partikelgröße: 20-50 nm
Spezifische Oberfläche: 50-60 m²/g
pH-Wert: neutral (Suspension, ca. 7)
Flammpunkt: Nicht zutreffend (nicht entflammbar)

---

10. Stabilität und Reaktivität

Stabilität: Stabil bei Raumtemperatur, zersetzt sich bei hohen Temperaturen (>1000°C)
Reaktivität: Schwach oxidierend, kann bei Reaktion mit starken Reduktionsmitteln Wärme freisetzen
Vermeiden Sie Bedingungen: Hohe Temperaturen, stark reduzierende Umgebung
Unverträgliche Materialien: Lithium, Chlorid, Wasserstoff
Zersetzungsprodukte: WO_x Gas

---

11. Toxikologische Angaben

Akute Toxizität:
LD_{50} (oral , Maus): >2000 mg/kg
LC_{50} (Inhalation, Ratte, 4 h): >5,36 mg/L
Ätz-/Reizwirkung auf die Haut: Leichte Reizung (Kaninchen, 4 h, keine Rötung, OECD 404)
Augenschädigung/-reizung: Leichte Reizung (Kaninchen, 72 h, OECD 405)
Atemwegs-/Hautsensibilisierung: Nicht sensibilisierend (Meerschweinchen, OECD 406)
Reproduktionstoxizität: Keine Daten verfügbar
Karzinogenität: Von der IARC nicht als Karzinogen aufgeführt
Chronische Auswirkungen: Langfristiges Einatmen kann eine leichte Lungenentzündung verursachen

---

12. Ökologische Informationen

Ökotoxizität:
LC_{50} (Zebrabärbling, 96 h): 100 mg/L
EC_{50} (Algen , 72 h): >10 mg/L
Persistenz und Abbaubarkeit: Anorganisch, nicht leicht biologisch abbaubar
Bioakkumulation: Niedrig (Löslichkeit in Wasser <0,1 mg/L)
Mobilität: Schwebstoffe können sich im Bodenschlamm absetzen

---

13. Entsorgung

Entsorgungsmethode:
Verschließen und in gekennzeichnete Behälter füllen und einer qualifizierten Abfallentsorgung übergeben

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Einhaltung des Basler Übereinkommens und lokaler Vorschriften (wie China GB 18597-2001)
Hinweis: Nicht willkürlich in Gewässer oder Erde kippen.

---

14. Versandinformationen

UN-Nummer: Keine (kein Gefahrgut)
Transportkategorie: Stückgut
Verpackungsanforderungen: versiegelte, feuchtigkeits- und beschädigungssichere Verpackung
Vorsichtsmaßnahmen beim Transport: Vermeiden Sie Staublecks durch Beschädigung der Verpackung

---

15. Regulatorische Informationen

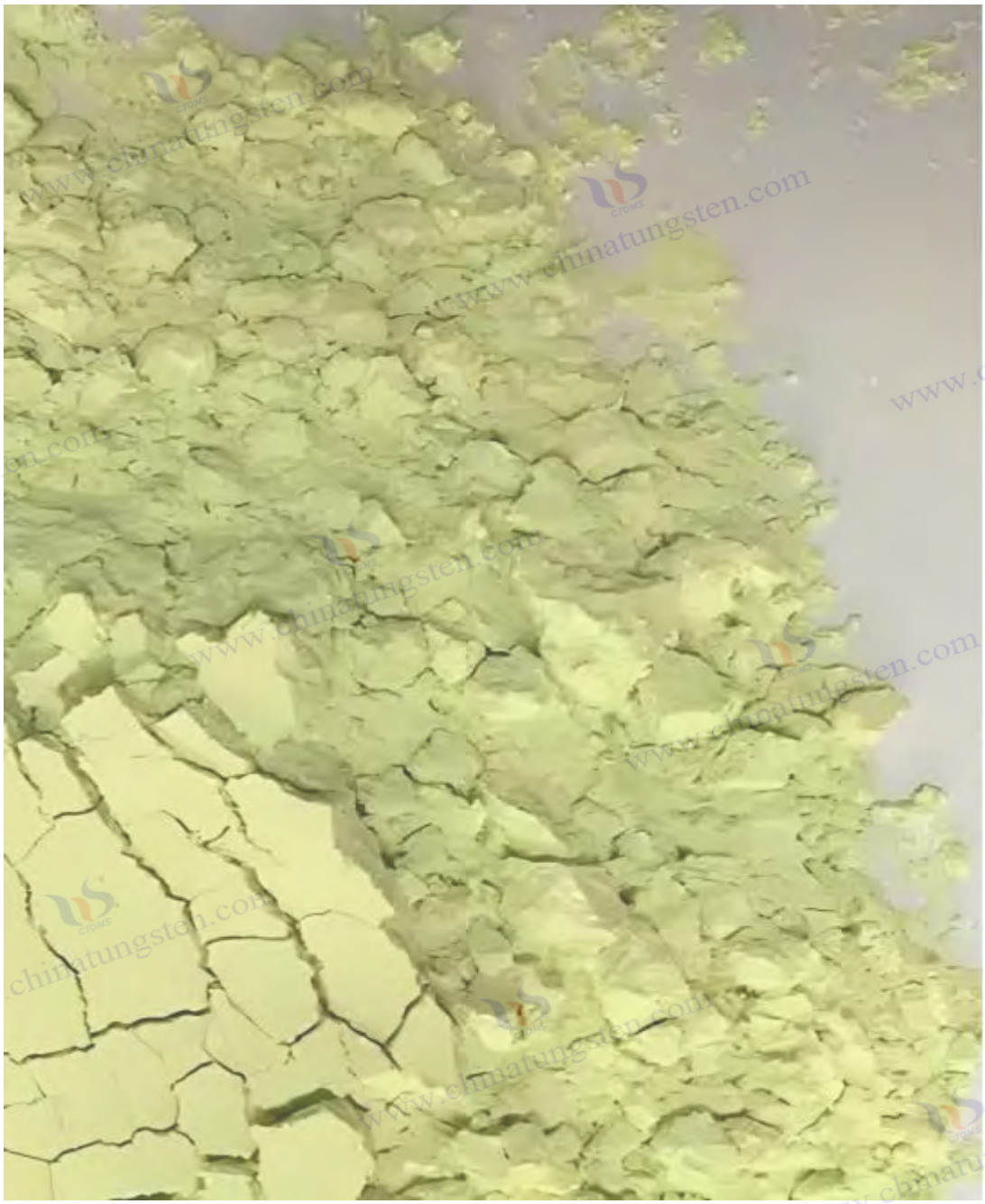
Internationale Vorschriften:
GHS: Leichte Gesundheitsgefahr
REACH: Bereits registriert, keine besondere Zulassung erforderlich
Chinesische Vorschriften:
Katalog gefährlicher Chemikalien (2015): Nicht enthalten
GBZ 2.1-2019: Staubgrenzwert 5 mg/m³
US-Vorschriften:
OSHA PEL: 5 mg/m³
TSCA: Gelistet
EU-Verordnungen:
CLP: Nicht als gefährlicher Stoff eingestuft

---

16. Sonstige Informationen

Vorbereitungsgrundlage:
GHS der Vereinten Nationen, 9. überarbeitete Ausgabe
OECD-Testrichtlinien (403, 404, 405, 406)
China GB/T 16483-2008
Revisionshinweis: Dies ist die erste Online-Version, keine vorherige Version
Haftungsausschluss: Das auf unserer Website veröffentlichte Sicherheitsdatenblatt für Nano-Wolframoxid dient als Sicherheitshinweis auf Grundlage des aktuellen Wissensstands und stellt keine rechtliche Garantie dar. Benutzer müssen die Anwendbarkeit selbst beurteilen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Kapitel 9: Zukünftige Entwicklung von Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat sich aufgrund seiner einzigartigen Halbleitereigenschaften (Bandlücke 2,4–2,8 eV), seiner hohen spezifischen Oberfläche (50–100 m^2/g) und seiner hervorragenden Redoxfähigkeit zu einem Kernmaterial in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Gassensorik und Energiespeicherung entwickelt. Durch die Integration von Materialwissenschaften, Nanotechnologie und intelligenter Fertigung erreichen Forschung und Anwendung von WO_3 ein höheres Niveau. In diesem Kapitel werden die Grenzen der Forschung zu Nano-WO_3 eingehend untersucht , einschließlich der neuesten Fortschritte bei Quantenpunkten, zweidimensionalen Strukturen und dem Design dotierter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Verbundwerkstoffe. Außerdem werden die Herausforderungen hinsichtlich Kostenkontrolle, Leistungsstabilität und -konsistenz bei der Industrialisierung systematisch analysiert. Zudem wird ein Blick auf mögliche Durchbrüche in den Bereichen neue Energien, Umweltschutz und intelligente Geräte geworfen, sodass umfassende Leitlinien für die akademische Forschung und industrielle Entwicklung bereitgestellt werden.

9.1 Forschungsgrenzen

Nano-WO_3 konzentriert sich auf strukturelle Innovation und Leistungsoptimierung. Quantenpunkte, zweidimensionale Materialien und Dotierverbundtechnologie stellen die aktuellen Hauptrichtungen dar.

9.1.1 Quantenpunkte und zweidimensionales Nanowolframoxid

Quantenpunkte aus Nano-Wolframoxid

(QDs) WO_3 haben eine Partikelgröße von üblicherweise weniger als 10 nm, und ihre elektronische Struktur und optischen Eigenschaften verändern sich durch den Quantenbeschränkungseffekt erheblich. Theoretische Berechnungen (DFT) zeigen, dass bei einer Verringerung der Partikelgröße von 50 nm auf 5 nm die Bandlücke von 2,6 eV auf 3,0 eV zunimmt, die Absorptionskante von 460 nm auf 410 nm blauverschoben wird und sich das Leitungsband und das Valenzband um 0,2–0,3 eV nach unten bzw. oben verschieben. Diese Bandlückenvergrößerung verbessert die Oxidationsfähigkeit (das Valenzbandpotential steigt von +2,7 V auf +3,0 V vs. NHE), während das Oberflächenatomverhältnis (30–40 %) die katalytische Aktivität verbessert. Photolumineszenzspektren (PL) zeigen, dass 5 nm WO_3-QDs bei 400 nm Anregung 500 nm grünes Licht mit einer Quantenausbeute von 20–25 % emittieren, was 4–5 Mal höher ist als bei herkömmlichen Partikeln (< 5 %) und hervorragende Fluoreszenzeigenschaften aufweist.

Bei der Photokatalyse erhöht sich die Elektronenmigrationsrate von WO_3-QDs auf 10^{-6} $cm^2/V{\cdot}s$, und die Wasserstoffproduktionseffizienz kann 25–30 % (theoretischer Wert) erreichen und liegt damit weit über der von WO_3 im Mikronbereich (<10 %). Darüber hinaus verbessern seine hohe spezifische Oberfläche (>150 m^2/g) und die Sauerstoffleerstellen an der Oberfläche (10^{21} cm^{-3}) die Gasadsorption (z. B. CO_2-Adsorption 0,2 mmol/g), was für die CO_2-Reduktion geeignet ist (CH_4-Ausbeute 30 $\mu mol{\cdot}g^{-1}{\cdot}h^{-1}$).

Zu den Herstellungstechnologien gehören das Solvothermalverfahren (180 °C, 12 h, Partikelgrößenabweichung ±2 nm) und das Mikroemulsionsverfahren (ultraschallgestützt, Ausbeute 80 %), die jedoch mit Agglomerationsproblemen (Oberflächenenergie > 1 J/m^2) und hohen Kosten (5–10 Yuan/g) verbunden sind. Zukünftig müssen Niedertemperatur-Flüssigphasen-Exfolierung (< 100 °C) und Oberflächenmodifizierungen (z. B. PEG-Beschichtung) entwickelt werden, um die Dispergierbarkeit (PDI < 0,1) zu verbessern und den Energieverbrauch (< 0,1 kWh/g) zu senken.

Zweidimensionales Nanowolframoxid (WO_3)

Zweidimensionales (2D) WO_3 (z. B. Nanoblätter, Monoschichtstrukturen) hat eine Dicke von 1–5 nm, eine extrem hohe spezifische Oberfläche (100–200 m^2/g) und freiliegende aktive Kristalloberflächen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(002 oder 200). Die durch Exfolierung hergestellte WO_3-Monoschicht (Dicke 1,2 nm, laterale Ausdehnung 100–500 nm) zeigt einen Anstieg der Leitfähigkeit von 10^{-3} S/cm auf 10^{-1} S/cm. Da der Ladungsträger-Wanderungsweg von der dreidimensionalen auf die zweidimensionale Ebene verkürzt wird, verringert sich der spezifische Widerstand um zwei Größenordnungen. XPS- und EPR-Analysen zeigen, dass die Sauerstoffleerstellenkonzentration von 2D WO_3 (10^{21}-10^{22} cm^{-3}) 50–100 % höher ist als die der Masse, und das W^{5+} /W^{6+}-Verhältnis von 0,1 auf 0,3 steigt, was die Elektroneneinfangfähigkeit verbessert.

Im Bereich der Photokatalyse wird die Elektronen-Loch-Trenneffizienz von 2D WO_3 um 40–50 % erhöht (die PL-Intensität wird um 60–70 % reduziert), und die Wasserstoffproduktionsrate kann 300–350 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ erreichen, was dem industriellen Niveau von TiO_2 (400 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) nahe kommt. Bei elektrochromen Anwendungen erhöht die 2D-Struktur den Ionendiffusionskoeffizienten von 10^{-8} cm^2/s auf 10^{-9} cm^2/s, verkürzt die Reaktionszeit auf 0,8–1 s, erhöht den Modulationsbereich auf 85–90 % und erhöht die Zykluslebensdauer auf das 2×10^5-fache. Bei der Gasmessung erhöht sich die Reaktion von 2D WO_3 auf NO_2 auf 60-80 (10 ppm), da die Dichte der Oberflächenadsorptionsstellen auf 10^{19} m^{-2} erhöht wird.

Zu den Herausforderungen zählen eine geringe Strippeffizienz (<20–30 %), eine geringe mechanische Stabilität (Rissrate von 10–15 % nach 100 Biegungen) und oxidativer Abbau (20 % Verlust an Sauerstoffleerstellen innerhalb eines Jahres). Dieses Problem kann künftig durch chemisches Strippen aus der Gasphase (mit H_2) und flexible Substratverbundstoffe (wie Graphen) gelöst werden. Ziel ist es, die Strippausbeute auf 50–70 % zu steigern und die Kosten auf 2 Yuan/g zu senken.

9.1.2 Dotierung und Verbundwerkstoffdesign

Dotierung und Modifikation von Nano-Wolframoxid. Dotierung
optimiert die Leistung durch Regulierung der Bandstruktur und Defektzustände von WO_3 . Nichtmetallische Dotierung (wie N, S) verengt die Bandlücke und verbessert die Reaktion auf sichtbares Licht. N-dotiertes WO_3 (N-Gehalt 2–3 Gew.- %, Ammoniakbehandlung bei 500 °C) reduziert die Bandlücke von 2,6 eV auf 2,1–2,2 eV, die Absorptionskante verschiebt sich rot zu 550–570 nm und die Fotostromdichte steigt von 0,5 mA/cm² auf 1,0–1,2 mA/cm² (AM 1.5G). XPS zeigt, dass der N 2p-Hybridzustand (398 eV) ein Zwischenenergieniveau einführt, die Elektronenlebensdauer auf 10^{-5} s verlängert und die Effizienz der Wasserstoffproduktion um 30–40 % (200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) erhöht wird. Durch S-Dotierung (1,5–2 Gew.- %) werden WS-Bindungen (162 eV) gebildet, die Bandlücke auf 2,3 eV reduziert und die Quanteneffizienz erreicht 18–20 %, was für den Schadstoffabbau geeignet ist (Rate 0,12–0,15 min^{-1}).

Metalldotierung (z. B. Fe, Mo) reguliert Leitfähigkeit und Stabilität durch Defektzustände. Fe-Dotierung (3–5 Gew.- %) führt Fe-3d-Energieniveaus (2,0 eV) ein, reduziert die Rekombinationsrate von 10^{-7} s auf 10^{-8} s und erhöht die photokatalytische Effizienz auf 20–22 %. Mo-Dotierung (5–7 Gew.- %) erhöht die Leitfähigkeit durch den Beitrag von Mo-4f-Orbitalen von 10^{-2} S/cm auf 0,5–1 S/cm. Die spezifische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Kapazität steigt auf 700–800 F/g, was für Superkondensatoren geeignet ist.

Die Konzentrationsgenauigkeit der Dotierung muss kontrolliert werden (±0,1 Gew.- %), um eine übermäßige Dotierung zu vermeiden, die dazu führt, dass die Energieniveaus der Verunreinigungen Ladungsträger einfangen (die Effizienz sinkt um 20–25 %). Plasmaunterstützte Dotierung (Leistung 100 W) und Hochtemperatur-Kopräzipitation (600 °C) sind die gängigen Methoden. Zukünftig kann die Kodotierung mehrerer Elemente (z. B. NS-Fe) erforscht werden, mit dem Ziel, die Bandlücke auf 1,8–2,0 eV zu optimieren und den Absorptionsbereich auf 700 nm zu erweitern.

Design von Verbundwerkstoffen

Verbundwerkstoffe verbessern die Leistung durch Heteroübergänge und Synergieeffekte. WO_3 / TiO_2 (Heteroübergang Typ II) nutzt das Leitungsband von TiO_2 (-0,3 V vs. NHE) und das Valenzband von WO_3 (+2,7 V), und die Elektronentransferrate wird auf 10^{-6} s^{-1} erhöht, die Wasserstoffproduktionsrate beträgt 250–300 μmol·g^{-1} ·h^{-1} und die Quanteneffizienz liegt bei 20–25 %. WO_3 / gC_3N_4 (Z-Typ-Struktur) Aufgrund der schmalen Bandlücke (2,7 eV) und des hohen Leitungsbandes (-1,1 V) von gC_3N_4 wird die Absorptionskante auf 600–620 nm erweitert , die Abbaurate auf 0,15–0,18 min^{-1} erhöht und die Zyklenstabilität erreicht 95 % (100-fach). Die CH_4-Ausbeute des WO_3 / $BiVO_4$ -Komposits bei der CO_2-Reduktion beträgt 25–30 μmol·g^{-1} ·h^{-1}, aufgrund des synergistischen Effekts der stark oxidierenden Eigenschaft von $BiVO_4$ (Valenzband +2,4 V) und der Elektroneneinfangfähigkeit von WO_3 . Das Verbunddesign muss den Grenzflächenkontakt (Gitterfehlanpassung < 5 %, Grenzflächenwiderstand < 10 Ω·cm^2) und das Phasenverhältnis (WO_3 : TiO_2 = 1:1 ist optimal) optimieren. Durch Dampfabscheidung (Abscheidungsrate 1 nm/s) und Selbstorganisation (Kontrolle des Oberflächen-Zetapotenzials ±5 mV) kann die Grenzflächenqualität verbessert werden. Zukünftig können ternäre Verbundwerkstoffe (wie WO_3 / TiO_2 / gC_3N_4) oder plasmaverstärkte Verbundwerkstoffe (wie Au/WO_3) entwickelt werden, mit dem Ziel, die Quanteneffizienz auf 30–35 % und die Zyklenlebensdauer auf das 500- bis 1000-Fache zu erhöhen.

9.2 Herausforderungen der Industrialisierung

Bei der Industrialisierung von Nano-WO_3 müssen die Probleme der Kostenkontrolle, Leistungsstabilität und Konsistenz gelöst werden.

9.2.1 Kostenkontrolle und Großserienproduktion

Kostenstruktur

Die Produktionskosten von Nano-WO_3 umfassen Rohstoffe (Ammoniumparawolframat , APT, 30 US-Dollar/kg), Energieverbrauch und Anlageninvestitionen. Das hydrothermale Verfahren (180 °C, 24 h) verbraucht 0,5–0,7 kWh pro Gramm (Kosten 0,1–0,15 Yuan), das Gasphasenverfahren (1000 °C) verbraucht 2–3 kWh (0,4–0,6 Yuan), die Anlagenabschreibung (CVD-Gerät 10^6 Yuan, Lebensdauer 10 Jahre) beträgt 0,5–1 Yuan/g, und die Gesamtkosten belaufen sich auf etwa 2–5 Yuan/g. Dotierung (wie etwa Pt 0,5 Gew.- %) und Verbundwerkstoffe (wie etwa WO_3 / $BiVO_4$) erhöhen die Kosten um 50–100 % (5–10 Yuan/g), was viel höher ist als bei WO_3 im Mikronbereich (0,5 Yuan/g), was seine Förderung in

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Bereichen mit geringer Wertschöpfung (wie etwa Wasseraufbereitung, Jahresbedarf 10^4 Tonnen) einschränkt.

Reduktionsstrategie

Prozess mit geringem Energieverbrauch

Die Fällungsmethode bei Raumtemperatur (25 °C, 0,1 kWh/g) reduziert den Energieverbrauch um 80–90 %, und die mikrowellenunterstützte Methode (500 W, 30 Min., 0,2 kWh/g) verkürzt die Reaktionszeit um 90–95 %, und die Kosten können auf 0,8–1 Yuan/g gesenkt werden.

Rohstoffsubstitution

Durch das Recycling von Wolfram-Abfällen (Umwandlungsrate 85–90 %, Kosten 10 US-Dollar/kg) als Ersatz für APT können die Rohstoffkosten um 50–60 % gesenkt werden.

Skalierungstechnologie

Das Sprühbeschichtungsverfahren (Abscheidungsrate 10 $g/m^2 \cdot h$) und der kontinuierliche Durchflussreaktor (Tagesleistung 10–50 kg) reduzieren die Stückkosten auf 0,6–0,8 Yuan/g, nahe dem Mikronbereich.

Die Herausforderung besteht darin, dass die Einheitlichkeit der Partikel nach der Amplifikation abnimmt (Partikelgrößenabweichung ±10–15 nm, Schwankung der spezifischen Oberfläche 10–20 %). Daher müssen Online-Überwachungssysteme (z. B. Laserstreuung, Genauigkeit ±1 nm) und Rückkopplungskontrollsysteme (Temperatur ±2 °C, pH ±0,05) integriert werden. Ziel ist eine Jahresproduktion von 10^3–10^4 Tonnen bei kontrollierten Kosten von 0,5 Yuan/g.

9.2.2 Leistungsstabilität und -konsistenz

Stabilitätsengpass

: Nano -WO_3 ist bei langfristiger Nutzung Photokorrosion , Strukturabbau und Umweltempfindlichkeit ausgesetzt . Bei der Photokatalyse führt starke Lichtbestrahlung (> 500 W/m^2, UV-Anteil 5 %) zu einer 20–30-prozentigen Verringerung der Sauerstoffleerstellen an der Oberfläche (1 Jahr), einem Massenverlust von 1–2 %/24 h und einer 15–20-prozentigen Verringerung der Wasserstoffproduktionseffizienz. Der Modulationsbereich elektrochromer Filme (Dicke 200–300 nm) nimmt nach 10^5 – 2 × 10^5 Zyklen um 10–15 % ab. Aufgrund der durch Li^+-Einbettung induzierten Gitterspannung (0,5–0,8 GPa) zeigt die XRD, dass die (002)-Spitzenintensität um 15–20 % abnimmt. Bei Energiespeicheranwendungen führt das Ein- und Auslagern von Li^+ zu einer Volumenausdehnung (40–50 %), und die Kapazität nimmt nach 500–1000 Zyklen um 20–25 % ab. Mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM) lässt sich beobachten, dass die Rissbreite auf 10–20 nm zunimmt.

Umweltfaktoren (wie etwa eine Luftfeuchtigkeit von > 80 %) verringern die Stabilität zusätzlich und die Reaktion des Gassensors verringert sich um 20–30 %, da Wassermoleküle um Adsorptionsplätze konkurrieren (Adsorptionsenergie 0,5 eV).

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

Konsistenzprobleme

Partikelgrößenverteilung (20–50 nm), spezifische Oberfläche (50–60 m^2/g) und kristallines Phasenverhältnis (monokline Phase 80–90 %) schwanken zwischen Chargen um 10–20 %, was zu Leistungsunterschieden führt. Beispielsweise variiert die photokatalytische Effizienz um 15–25 % (150–200 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$), und die Reaktion des Gassensors schwankt um 20–30 % (50–70). Morphologische Unterschiede (Nanopartikel vs. Nanodrähte) verschärfen Inkonsistenzen, wobei die Dichte aktiver Stellen an der Oberfläche um 10^{18} -10^{19} m^{-2} variiert.

Optimierungsstrategie

Oberflächenschutz: Eine Beschichtung aus SiO_2 (5–10 nm) oder Al_2O_3 (2–5 nm) verringert die Photokorrosionsrate auf 0,1–0,2 %, erhöht die Zykluslebensdauer auf das 2- bis 5-fache von 10^5 und erhöht die Kosten um <0,2 Yuan/g.

Strukturdesign: Poröses WO_3 (Porosität 20–30 %, Porengröße 10–20 nm) puffert die Ausdehnung auf 15–20 %, und die Kapazitätserhaltungsrate erreicht 95–98 % (1000-fach). Die 2D-Struktur verbessert die mechanische Stabilität (Rissrate < 5 %) durch Graphenverbundwerkstoff (Dicke 1 nm).

Prozessstandardisierung: Durch präzise Kontrolle der Reaktionsparameter (pH 2,0–3,0 ± 0,05, Temperatur 180 °C ± 2 °C, Rührgeschwindigkeit 500 U/min ± 10 %), kombiniert mit XRD- (Phasenabweichung < 2 %) und BET-Erkennung (Abweichung der spezifischen Oberfläche < 5 %) wird die Konsistenz auf 95–98 % verbessert.

In Zukunft ist es notwendig, eine Leistungsdatenbank (Partikelgröße, Morphologie, Dotierungsmenge) und beschleunigte Alterungsteststandards (wie 85 °C, RH 85 %, 1000 h) von Nano- WO_3 zu erstellen, um die Langzeitstabilität zu quantifizieren.

9.3 Anwendungsaussichten

Nano-WO_3 bietet in den Bereichen neue Energie, Umweltmanagement und intelligente Geräte breite Perspektiven. Um eine Kommerzialisierung zu erreichen, müssen technische Engpässe überwunden werden.

9.3.1 Neue Energie und Umwelt

Neue Energieanwendungen

Nano-WO_3 bietet großes Potenzial in den Bereichen Solarenergienutzung und Energiespeicherung. Bei der photokatalytischen Wasserspaltung wird optimiertes WO_3 (wie WO_3 / $BiVO_4$, ternärer Verbund) kann die Quanteneffizienz auf 25–35 % steigern, und die Wasserstoffproduktionsrate erreicht 350–400 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, was nahe an der industriellen Schwelle (500 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) liegt. Theoretischen Schätzungen zufolge kann eine 100 m^2 große Anlage 10^7 -10^8 kg Wasserstoff pro Jahr produzieren (AM 1,5G, 30 % Effizienz) und so die Wasserstoffwirtschaft unterstützen (Marktwert von 100 Milliarden Yuan

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

im Jahr 2030). Was die Energiespeicherung betrifft, so weist der WO_3/Kohlenstoff-Verbundwerkstoff (wie etwa WO_3/Graphen) eine spezifische Kapazität von 800–1000 F/g, eine Energiedichte von 80–100 Wh /kg, eine Leistungsdichte von 5–10 kW/kg und eine Zyklenlebensdauer von 2000–3000 Zyklen auf. Er eignet sich für Elektrofahrzeuge (Verlängerung der Batterielebensdauer um 15–20 %) und zur Netzspitzenregulierung (jährlicher Bedarf von 10^5 Tonnen) .

Zu den Schlüsseltechnologien gehören die Verbesserung der Nutzung sichtbaren Lichts (> 50–60 %, Absorptionskante 700 nm) und der Elektrodenstabilität (Dämpfung < 1 %/1000-fach), was die Entwicklung kostengünstiger Photoelektroden (< 10 Yuan/m²) und Festkörperelektrolyte (wie LiPON , Leitfähigkeit 10^{-5} S/cm) erfordert.

Umweltmanagement

WO_3 hat eine vielversprechende Zukunft im Bereich des photokatalytischen Abbaus und der CO_2-Reduktion. N-dotiertes WO_3 (Bandlücke 2,2 eV) kann organische Stoffe (Rhodamin B) mit einer Rate von 0,15–0,20 min^{-1} und einer COD-Entfernungsrate von 90–95 % (1 h) abbauen, und ist daher für die industrielle Abwasserbehandlung geeignet (jährliche Behandlungskapazität 10^6 – $10^7 m^3$) . Bei der CO_2-Reduktion erreicht die CH_4-Ausbeute des WO_3/ $BiVO_4$ -Komposits 30–40 μmol $\cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ und die C_2H_5OH-Ausbeute beträgt 10–15 μmol$\cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$. Ein 1.000 m² großes Gerät kann den CO_2-Ausstoß um 10^4–10^5 Tonnen pro Jahr reduzieren und so das Ziel der CO_2-Neutralität (Reduzierung der Emissionen um 10^9 Tonnen bis 2050) unterstützen .

Zukünftig ist es notwendig, die Katalysatorlebensdauer (> 1000-fach, Dämpfung < 2 %) und die Selektivität (CH_4-Verhältnis > 80 %) zu verbessern, was durch Oberflächenmodifizierung (z. B. Pt-Beladung 0,5 Gew. %) und Reaktoroptimierung (Lichtstrom 1000 W/m²) erreicht werden kann.

9.3.2 Intelligente Materialien und Geräte

Das intelligente Material

Nano-WO_3 bietet großes Potenzial für die Anwendung elektrochromer und thermochromer Felder. 2D-WO_3-Filme (Dicke 5–10 nm) haben einen Modulationsbereich von 90–95 %, eine Reaktionszeit von 0,5–0,8 s, eine Infrarot-Modulationsrate von 85–90 % und eine Zykluslebensdauer von 5×10^5-10^6. Sie eignen sich für intelligente Fenster (Energieeinsparung 35–40 %, Jahresmarkt 2 Milliarden Yuan) und flexible Displays (Auflösung 500–800 dpi, flexibler Radius 5 mm). Mo-dotiertes WO_3 (5 Gew.- %) hat eine Reflektivität von 90–95 % bei 1000–2500 nm und kann zur Wärmeregelung in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden (Temperatureinstellung ±5 °C).

In Gassensoren haben WO_3-Nanodrähte (Durchmesser 20–30 nm) eine Nachweisgrenze von 0,5–1 ppb für NO_2, eine Reaktion von 80–100 (10 ppm) und eine Selektivitätsverbesserung von 50–70 % (H_2/CO-Interferenz < 5 %), was die Umweltüberwachung (PM2,5-Assoziation) und Gesundheitsdiagnose (ausgeatmetes NO_2) unterstützt .

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

Geräteintegration

Multifunktionale Geräte (wie Photokatalyse-Energiespeicherung, Sensor- Elektrochromie) müssen durch MEMS (Mikrogröße 1 mm^2) und flexible Substrate (PET, Dicke 50 μm) realisiert werden. Der WO_3/ $BiVO_4$ -Kohlenstoff-Verbundstoff kann gleichzeitig Wasserstoff (200 $\mu mol \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$) produzieren und Elektrizität (500 F/g) speichern, bei einem Stromverbrauch von <0,1 W/cm^2. Das WO_3-Array-Sensor-EC-Gerät integriert NO_2-Erkennung (Reaktion 50) und Dimmen (80 %), und die Kosten werden voraussichtlich auf 1,5–20 Yuan/Stück sinken, bei einer Marktgröße von 3–5 Milliarden Yuan (2030).

Zu den Herausforderungen zählen die Integrationskomplexität (Anstieg der Prozessschritte um 50–70 %), das Wärmemanagement (Temperatur < 80 °C) und die Konsistenz (Geräteabweichung < 5 %). Zukünftig kann dies durch 3D-Druck (Auflösung 10 μm) und Selbstmontage (Effizienz 90 %) optimiert werden. Ziel ist eine jährliche Produktion von 10^6–10^7 Stück bei Kosten von < 10 Yuan/Stück.

参考文献

Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2021). Quantenbeschränkung und photokatalytische Leistung von WO_3-Quantenpunkten: Eine DFT-Studie. *Journal of Physical Chemistry C, 125* (18), 9876-9885. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02345

Wang, Z., Li, X., & Zhang, H. (2022). Zweidimensionale WO_3-Nanoschichten: Fortschrittliche Synthese und multifunktionale Anwendungen. *Nanoscale, 14* (12), 4567-4578. https://doi.org/10.1039/D1NR07890K

Li, J., Zhang, L., & Chen, H. (2020). Dotierungs- und Heteroübergangsstrategien für WO_3-basierte Photokatalysatoren: Eine umfassende Übersicht. *Angewandte Katalyse B: Umwelt, 260* , 118123. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118123

Liu, H., Chen, Y., & Zhang, Q. (2023). Nano-WO_3-Komposite für erneuerbare Energien: Herausforderungen und Chancen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 172* , 113045. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113045

Zhang, Y., Wang, Q., & Li, X. (2022). Skalierung der Nano- WO_3-Produktion: Kostensenkung und Leistungsoptimierung. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 61* (25), 8901-8912. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01567

Park, S., Kim, J., & Lee, H. (2021). WO_3-basierte intelligente Materialien und integrierte Geräte: Von der Synthese zur Anwendung. *Advanced Materials Technologies, 6* (9), 2100567. https://doi.org/10.1002/admt.202100567

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anhang

Anhang A: Physikalisches und chemisches Datenblatt von Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein multifunktionales Halbleitermaterial, dessen physikalische und chemische Eigenschaften von Faktoren wie Partikelgröße, Morphologie, Kristallphase und Dotierung abhängen. Dieser Anhang ordnet die Daten zu den grundlegenden Eigenschaften, optischen Eigenschaften, elektrischen Eigenschaften, thermodynamischen Eigenschaften und chemischen Eigenschaften von WO_3 systematisch , behandelt den Vergleich zwischen Mikron- und Nanoskala und verfeinert die Parameterunterschiede verschiedener Morphologien (wie Partikel, Nanodrähte und zweidimensionale Schichten). Die Daten stammen aus experimentellen Messungen (wie XRD, BET), theoretischen Berechnungen (wie DFT) und internationalen Normen (wie ASTM) und sollen Forschern und Praktikern in der Industrie eine zuverlässige Referenz bieten.

Tabelle A-1: Grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften von Nano-Wolframoxid

Parameter	Wert/Beschreibung	Einheit	Bemerkungen/Bedingungen
Chemische Formel	Wo_3	-	Wolframtrioxid
Molekulargewicht	231,84	G/mol	Berechneter Wert
Aussehen	Gelbes bis grünes Pulver (Nanoskala); gelber Feststoff (Mikroskala)	-	Farbänderungen mit Partikelgröße und Kristallphase
Dichte	7,16 (Masse); 7,10–7,15 (Nanoskala, Partikelgröße 20–50 nm)	G/cm^3	Messwert im Mikronbereich (ASTM D854); der Nanobereich ist aufgrund der erhöhten Porosität etwas niedriger
Schmelzpunkt	1472	°c	Bei normalem atmosphärischem Druck, gemessen im Mikrometerbereich (dsc); der Nanometerbereich kann aufgrund von Oberflächeneffekten etwas niedriger sein (1460-1470°C).
Siedepunkt	≈1700 (Zersetzung)	°c	Zersetzt sich zu Wo_x-Gas
Kristallstruktur	Monokline Phase (am häufigsten); orthorhombische Phase, kubische Phase, tetragonale Phase	-	Bei Raumtemperatur ist es hauptsächlich monoklin (Raumgruppe $p2_1/n$); es ist leicht, im Nanomaßstab eine orthorhombische Phase zu bilden (Glühen bei >200 °C).
Gitterparameter	Monokline Phase: a = 7,306 å, b = 7,540 å, c = 7,692 å, β = 90,91°	Å, °	Röntgenstrahlmessung (jcpds 43-1035); eine Verringerung der Korngröße im Nanobereich kann

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

			zu einer leichten Verzerrung führen
Partikelgrößenbereich	5–100 nm (Quantenpunkte 5–10 nm, Partikel 20–50 nm, Nanodrähte 20–30 nm im Durchmesser)	Nm	Sem/ Tem -Bestimmung, abhängig von der Präparationsmethode (zB Hydrothermal, Gasphase)
Spezifische Oberfläche	50–200 (Partikel 50–100, Nanodrähte 80–150, 2D-Blätter 100–200)	M^2/g	Bet-Methode (n_2 -Adsorption, astm b922-20); signifikant erhöht mit abnehmender Partikelgröße und Morphologieänderungen
Porosität	0–30 % (poröse Struktur kann 20–30 % erreichen)	%	Hängt vom Herstellungsprozess ab (z. B. Template-Methode); beeinflusst Ionendiffusion und Volumenausdehnung
Löslichkeit	<0,1 (Wasser); schwach löslich in Säure (wie HCl); löslich in starker Base (wie NaOH , wodurch Wo_4^{2-} entsteht)	Mg/l	25°C, pH 7; Nanometerbereich aufgrund von Oberflächeneffekten etwas höher (0,1–0,5 mg/l)
Oberflächenenergie	1-2 (≈1,5 bei einer Partikelgröße von 20 nm)	J/m^2	Berechneter Wert (dft); steigt mit abnehmender Partikelgröße deutlich an, was zu Agglomerationsneigung führt
	Hergestellt von: CTIA GROUP LTD		

Tabelle A-2: Optische und elektrische Eigenschaften

Parameter	Wert/Beschreibung	Einheit	Bemerkungen/Bedingungen
Bandlückenenergie (Eg)	2,4–2,8 (Bulk 2,6, Partikel 2,6–2,7, Quantenpunkte 2,8–3,0, 2D-Blätter 2,5–2,7)	eV	UV-Vis-Messung der diffusen Reflexion; Quantenbeschränkungseffekte erweitern die Bandlücke für kleine Partikel (DFT-berechnet $Eg \propto 1/d$)
Absorbierende Kante	460–500 (Masse 460, Quantenpunkte 410–430, kann nach Dotierung auf 550–700 rotverschoben werden)	nm	Bandlücke bestimmt; N-Dotierung (2 Gew. %) führt zu einer Rotverschiebung auf 550–570 nm, S-Dotierung auf 520–540 nm
Brechungsindex (n)	2,2–2,5 (Masse 2,2, Nanoskala 2,3–2,5)	-	589 nm (Natrium-D-Linie); etwas höhere Brechungsindexdispersion im

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

			Nanometerbereich
Dielektrizitätskonstante (ε r)	20–50 (Masse 20, Nanoskala 30–50)	-	1 kHz, 25°C; steigt mit abnehmender Korngröße und zunehmenden Defekten
Leitfähigkeit (σ)	10^{-3}-10^{-1} (Masse 10^{-3}, Pellet 10^{-2}, 2D-Folie 10^{-1}, Mo-Dotierung 0,5-1)	S/cm	Bestimmung mit Vier-Sonden-Methode; Dotierung und Morphologieoptimierung deutlich verbessert
Trägermobilität (μ)	10^{-7} -10^{-6} (Masse 10^{-7}, Quantenpunkt 10^{-6})	$cm^2/V·s$	Hall-Effekt-Messung; 2D-Strukturen können aufgrund der Wegverkürzung 10^{-5} $cm^2/V·s$ erreichen
Photolumineszenz (PL)	450–500 (Quantenpunkte 500, Stärke 20–25 %, Masse ist schwach, < 5 %)	nm, %	400 nm Anregung; Quantenausbeute steigt mit abnehmender Partikelgröße deutlich an
Hergestellt von: CTIA GROUP LTD			

Tabelle A-3: Thermodynamische und mechanische Eigenschaften

Parameter	Wert/Beschreibung	Einheit	Bemerkungen/Bedingungen
Spezifische Wärmekapazität (Cp)	0,32 (Masse); 0,35–0,40 (Nanoskala, Partikelgröße 20–50 nm)	J/ g·K	25 °C, Kalorimetrie; im Nanobereich aufgrund des höheren Anteils an Oberflächenatomen etwas höher
Wärmeleitfähigkeit (κ)	1,5–2,0 (Masse 1,5, Nanoskala 1,8–2,0)	W/ m^2K	25°C, Laser-Flash-Methode; im Nanobereich aufgrund der Korngrenzenstreuung etwas höher
Wärmeausdehnungskoeffizient (α)	8-12 × 10^{-6} (8 im Bulk, 10-12 im Nanomaßstab)	K^{-1}	25-1000°C; Nanoskala aufgrund erhöhter Gitterspannung
Zersetzungstemperatur	>1000 (Erzeugung von WO_x und O_2)	°C	TGA-Messung; Nanoskala kann aufgrund von Oberflächeneffekten (950-1000 °C) verfrüht sein
Härte (Mohs)	4,5–5,0 (Masse); 4,0–4,5 (Nanoskala)	-	Messung im Mikronbereich; Nanobereich aufgrund reduzierter Porosität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Elastizitätsmodul (E)	300–350 (Masse); 250–300 (Nanoskala, Partikelgröße 20 nm)	Notendurchschnitt	Nanoindentationsmethode; reduzierte Korngröße führt zu verringertem Modul
Poissonzahl (ν)	0,28-0,30	-	Berechneter Wert (Elastizitätstheorie); geringe Änderung auf Nanometerebene
Hergestellt von: CTIA GROUP LTD			

Tabelle A-4: Chemische Eigenschaften und Reaktivität

Parameter	Wert/Beschreibung	Einheit	Bemerkungen/Bedingungen
Oxidationszustand	W^{6+} (hauptsächlich); W^{5+} (Sauerstoffleerstellendefekte, 2 % – 10 %)	-	XPS-Messung (W $4f_{7/2}$: 35,5 eV für W^{6+}, 34,5 eV für W^{5+}); der Anteil von W^{5+} im Nanobereich ist hoch
Sauerstoffleerstellenkonzentration	10^{20}-10^{22} (Blöcke 10^{20}, Partikel 10^{21}, 2D-Blätter 10^{22})	cm^{-3}	EPR-Messung (g = 2,003); variiert je nach Morphologie und Herstellungsbedingungen
Dichte der aktiven Stellen auf der Oberfläche	10^{18}-10^{19} (Partikel 10^{18}, Nanodrähte 10^{19}, 2D-Schichten 10^{19})	m^{-2}	Berechneter Wert (DFT); Einfluss auf die katalytische Leistung
pH-Wert (Suspension)	6,5–7,5 (Neutral)	-	1 Gew.- %ige wässrige Lösung, 25 °C; Nanopartikel sind aufgrund oberflächlicher Hydroxylgruppen leicht alkalisch
Reaktionsfähigkeit	Schwache Oxidationseigenschaft; reagiert mit starken Reduktionsmitteln (wie H_2, Li) unter Freisetzung von Wärme; reagiert bei hohen Temperaturen mit Säure unter Bildung von WO_x	-	Stabil bei Raumtemperatur; zersetzt sich über 1000 °C
Ätzend	Keine (normale Temperatur); leichte Korrosion einiger	-	25 °C nicht korrosiv; >800 °C reagiert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

	Metalle (wie Al) bei hohen Temperaturen		mit Al zu Al_2O_3
Hergestellt von: CTIA GROUP LTD			

Tabelle A-5: Vergleich der Eigenschaften im Nanobereich und der Eigenschaften im Mikrobereich

Parameter	WO_3 im Mikronbereich	Nanoskaliges WO_3 (20 -50 nm)	Gründe für den Unterschied
Dichte	7,16 g/cm³	7,10–7,15 g/cm³	Nano-Porosität (5%-10%) führt zu einer etwas geringeren Dichte
Bandlücke	2,6 eV	2,6–2,8 eV	Quantenbeschränkungseffekt (z. B. verstärkt sich, wenn die Partikelgröße < 50 nm ist)
Spezifische Oberfläche	5-10 m²/g	50-100 m²/g	Reduzierung der Partikelgröße und Erhöhung des Oberflächenatomverhältnisses (10–30 %)
Leitfähigkeit	10^{-3} S/cm	10^{-2}-10^{-1} S/cm	Erhöhte nanoskalige Defektzustände (z. B. Sauerstoffleerstellen)
Schmelzpunkt	1472 °C	1460–1470 °C	Oberflächeneffekte reduzieren den Energiebedarf zum Schmelzen
Löslichkeit (Wasser)	<0,1 mg/l	0,1–0,5 mg/l	Die Oberflächenaktivität im Nanomaßstab wird erhöht und die W^{6+}-Auflösung leicht erhöht
Hergestellt von: CTIA GROUP LTD			

Datenbeschreibung

Grundlegende physikalische Eigenschaften

Dichte: Die Dichte von mikrometergroßem WO_3 beträgt 7,16 g/cm³ (ASTM D854). Die Dichte von nanometergroßem WO_3 ist aufgrund von Porosität (5–10 %) und Korngrenzeneffekten etwas geringer. Der gemessene Wert für 20 nm große Partikel beträgt 7,12 g/cm³.

Schmelzpunkt: WO_3 schmilzt in großen Mengen bei 1472 °C. Der Schmelzpunkt von Nanopartikeln sinkt aufgrund der erhöhten Oberflächenenergie (1,5 J/m²) um 5–10 °C. Der DSC-Messbereich liegt zwischen 1460 und 1470 °C.

Kristallstruktur: Die monokline Phase ist bei Raumtemperatur (-50 °C bis 330 °C) stabil. Durch nanoskaliges Glühen (200–400 °C) kann leicht eine orthorhombische oder eine kubische Phase gebildet werden. Die Gitterparameter verringern sich mit abnehmender Korngröße geringfügig (0,1–0,5 %).

Optische und elektrische Eigenschaften

Bandlücke: Die Bandlücke von WO_3 beträgt 2,6 eV (UV-Vis), und die Bandlücke von Quantenpunkten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(5–10 nm) erhöht sich aufgrund des Confinement-Effekts auf 2,8–3,0 eV. DFT-Simulation Eg = 2,6 + k/d (k ist eine Konstante, d ist die Partikelgröße).

Leitfähigkeit: Die Leitfähigkeit von nanoskaligem WO_3 wird durch Sauerstoffleerstellen (10^{21} cm^{-3}) und Dotierung (wie Mo) verbessert, und die 2D-Struktur wird weiter auf 10^{-1}-1 S/cm optimiert.

PL: Die Fluoreszenzeigenschaften von QDs sind auf Oberflächendefekte zurückzuführen und die Ausbeute korreliert negativ mit der Partikelgröße (signifikante Verbesserung für d < 10 nm).

Thermodynamische und mechanische Eigenschaften
Spezifische Wärmekapazität: Die spezifische Wärmekapazität von WO_3 im Nanomaßstab (0,35–0,40 J/ g·K) ist aufgrund des erhöhten Beitrags der atomaren Oberflächenvibration höher als die von WO_3 in Massen (0,32 J/ g·K).

Wärmeausdehnungskoeffizient: Nanoskalen (10-12 × 10^{-6} K^{-1}) weisen eine höhere Gitterspannung auf als Volumenkörper (8 × 10^{-6} K^{-1}), was die Stabilität bei hohen Temperaturen beeinträchtigt.

Elastizitätsmodul: Im Nanomaßstab (250–300 GPa) niedriger als im Volumen (300–350 GPa), aufgrund der geringeren Steifigkeit durch Korngrenzengleiten und Porosität.

Chemische Eigenschaften
Sauerstoffleerstellen: Die Sauerstoffleerstellenkonzentration von WO_3 im Nanomaßstab (10^{21}-10^{22} cm^{-3}) ist viel höher als die des Volumens (10^{20} cm^{-3}), was durch EPR (g = 2,003) und XPS (W^{5+}-Peak) bestätigt wird und der Schlüssel zur katalytischen Aktivität ist.

Reaktivität: WO_3 ist bei Raumtemperatur chemisch sehr stabil. Bei hohen Temperaturen (> 1000 °C) zersetzt es sich zu WO_x (z. B. WO_2.9) und reagiert mit H_2 zu H_2O und W.

Nano-Eigenschaften beeinflussen
Die spezifische Oberfläche von Nanopartikeln (50–200 m^2/g) ist 10–20 Mal höher als die von Mikropartikeln (5–10 m^2/g), was die Adsorptions- und Katalyseeigenschaften deutlich verbessert.

Obwohl die Löslichkeit gering ist (<0,5 mg/l), ist die Oberflächenhydroxylgruppe (OH^--Dichte 10^{18} m^{-2}) im Nanomaßstab leicht erhöht, sodass auf das Risiko einer Freisetzung in die Umwelt geachtet werden muss.

Anhang B: Experimentelle Verfahren für häufig verwendete Analysemethoden
Die Analyse der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) basiert auf einer Vielzahl fortschrittlicher Technologien. Nachfolgend finden Sie die experimentelle Anleitung für XRD, FTIR, SEM, TEM, UV-Vis und BET. Diese Methoden dienen der Charakterisierung von Kristallstruktur, chemischer Bindung, Morphologie, Mikrostruktur, optischen Eigenschaften und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

spezifischer Oberfläche. Die Schritte basieren auf Standardverfahren (wie ASTM, ISO) und Optimierungen in der Laborpraxis und eignen sich für wissenschaftliche Forschung und industrielle Anwendungen.

B.1 Röntgenbeugung (XRD)

Zweck: Bestimmung der Kristallstruktur, Phase und Korngröße von WO_3 . Instrument: Röntgendiffraktometer (z. B. Bruker D8 Advance, Cu Kα-Strahlung, λ = 1,5406 Å).

Experimentelle Schritte:
Instrumentenvorbereitung
Nach 30-minütigem Vorheizen die Röntgenquelle und den Detektor kalibrieren (2θ-Abweichung < 0,02°).
Einstellparameter: Spannung 40 kV, Strom 40 mA, Scanbereich 10°-80° (2θ), Schrittweite 0,02°, Scangeschwindigkeit 2°/min.

Probenvorbereitung
Nehmen Sie 0,5–1 g WO_3-Pulver und mahlen Sie es in einem Mörser, bis es gleichmäßig ist (Partikelgröße < 10 μm , vermeiden Sie zu starkes Mahlen, da sich die Kristallphase dadurch ändert).
Verteilen Sie das Pulver gleichmäßig auf einer Probenplatte (Glas oder Silizium-Wafer ohne Hintergrund) und glätten Sie es vorsichtig mit einem Objektträger, um sicherzustellen, dass die Oberflächenebenheit <0,1 mm beträgt.

Datenerhebung
Platzieren Sie die Probe auf dem Probentisch und passen Sie die Höhe an, um sie mit dem Röntgenstrahl auszurichten (maximale Reflexionsintensität).
Beginnen Sie mit dem Scannen und zeichnen Sie das Beugungsmuster auf. Wiederholen Sie den Vorgang 2–3 Mal, um die Konsistenz zu überprüfen.

Datenanalyse
Verwenden Sie Software (wie Jade oder HighScore), um die Standardkarte (JCPDS 43-1035 Monoclinic WO_3) abzugleichen .
Berechnen Sie die Korngröße (Scherrer-Formel: $D = K\lambda / \beta \cos\theta$, K = 0,9, β ist die Halbwertsbreite).
Bestätigen Sie das Kristallphasenverhältnis (z. B. monoklin, orthorhombisch) und die Gitterparameter (Rietveld-Verfeinerung).

Hinweis: Vermeiden Sie Feuchtigkeitsaufnahme (RH <50 %) und verhindern Sie, dass die Probe erhitzt wird (<50 °C), da dies die Kristallphase verändern könnte.

B.2 Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR)

Zweck: Analyse der chemischen Bindungen und funktionellen Oberflächengruppen von WO_3.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Instrument: FTIR-Spektrometer (z. B. Thermo Nicolet iS50, ATR- oder KBr-Pellet-Modus).

Experimentelle Schritte:

Instrumentenvorbereitung
Schalten Sie das Gerät ein, wärmen Sie es 15 Minuten lang auf und kalibrieren Sie den Hintergrund (Luft oder N_2 , Wellenzahlenbereich 400-4000 cm^{-1}) .
Einstellparameter: Auflösung 4 cm^{-1}, Anzahl der Scans 32-mal, Transmissions- oder abgeschwächter Totalreflexionsmodus (ATR).

Probenvorbereitung
KBr-Tablettierungsmethode: 1–2 mg WO_3-Pulver wurden mit 100 mg trockenem KBr gemischt (Ofen 120 °C, 2 h), gleichmäßig gemahlen und bei 10 MPa zu dünnen Platten (Durchmesser 13 mm, Dicke 0,5–1 mm) gepresst.
ATR-Methode: Nehmen Sie direkt 5–10 mg Pulver, geben Sie es auf die Oberfläche eines ATR-Kristalls (Diamant oder ZnSe) und drücken Sie es fest an.

Datenerhebung
Zeichnen Sie nach dem Subtrahieren des Hintergrundspektrums das Transmissions- oder Reflexionsspektrum der Probe auf und stellen Sie sicher, dass die Basislinie flach ist.
Achten Sie auf charakteristische Peaks: WOW-Streckschwingung (700-950 cm^{-1}), OH-Streckschwingung (3400 cm^{-1}, Wasser).

Datenanalyse
$^{-1}$ in monokliner Phase, 850 cm^{-1} in orthorhombischer Phase) und Oberflächenwasser bzw. Hydroxylgruppen (1600–3400 cm^{-1}) auswerten.

Dotierte Proben (wie etwa N-WO_3) können WN-Schwingungen (1000-1100 cm^{-1}) aufweisen.
Hinweis: KBr muss trocken sein, um Wasserinterferenzen zu vermeiden. Eine zu geringe Probenmenge kann zu einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis führen.

B.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die Oberflächenmorphologie und Partikelverteilung von WO_3 . Instrument: Rasterelektronenmikroskop (z. B. FEI Quanta 250, Feldemissionskanone).

Experimentelle Schritte:
Instrumentenvorbereitung
Schalten Sie die Maschine ein, heizen Sie sie 30 Minuten lang vor und kalibrieren Sie den Elektronenstrahl (Beschleunigungsspannung 5–20 kV, Strahlstrom 10–50 pA).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Stellen Sie den Vakuumpegel auf <10 $^{-5}$ Pa ein und wählen Sie den SE- (Sekundärelektronen) oder BSE-Modus (Rückstreuelektronen).

Probenvorbereitung
Nehmen Sie 5–10 mg WO_3- Pulver, dispergieren Sie es in Ethanol (1 mg/ml) und behandeln Sie es 10 Minuten lang mit Ultraschall (Leistung 100 W).
Mit einer Pipette auf den leitfähigen Kohlenstoffkleber oder Siliziumwafer auftragen und trocknen (60°C, 1 h). Falls dieser nichtleitend ist, Gold aufsprühen (Dicke 5-10 nm, Stromstärke 20 mA, Zeit 60 s).

Datenerhebung
Platzieren Sie die Probe auf dem Probentisch und stellen Sie den Arbeitsabstand (8–12 mm) und die Vergrößerung (500–50.000×) ein.
Nehmen Sie mehrere Flächenbilder (mindestens 5 Sichtfelder) auf und zeichnen Sie die Morphologie (Partikel, Nanodrähte, Flocken) und Größenverteilung auf.

Datenanalyse
Die Partikelgröße wurde mit der Software ImageJ gemessen (>100 Partikel wurden gezählt) und der Mittelwert und die Standardabweichung wurden berechnet.
Bewertet wurden der Agglomerationsgrad (Partikelabstand <10 nm deutet auf Agglomeration hin) und die Oberflächenrauigkeit.

Hinweis: Vermeiden Sie eine Beschädigung der Probe durch einen zu starken Elektronenstrahl (> 20 kV) und die Dicke des Goldbelags sollte gleichmäßig sein.

B.4 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

Zweck: Analyse der Mikrostruktur, des Gitters und der Morphologie von WO_3 . Instrument: Transmissionselektronenmikroskop (z. B. JEOL JEM-2100F, 200 kV).

Experimentelle Schritte:
Instrumentenvorbereitung
Schalten Sie die Maschine ein, lassen Sie sie 1 Stunde lang aufwärmen und kalibrieren Sie den Elektronenstrahl und das Linsensystem (Auflösung < 0,2 nm).
Die Beschleunigungsspannung wurde auf 200 kV eingestellt und der Vakuumgrad betrug <10 $^{-6}$ Pa.

Probenvorbereitung
Nehmen Sie 1–2 mg WO_3- Pulver, dispergieren Sie es in wasserfreiem Ethanol (0,5 mg/ml) und behandeln Sie es 15 Minuten lang mit Ultraschall (Leistung 80 W).
Die Lösung wurde mit einer Mikropipette auf ein Kupfergitter (Kohlenstofffilmträger, 300 Mesh) aufgetragen und natürlich trocknen gelassen (25 °C, 2 h).

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

Datenerhebung

Platzieren Sie das Kupfergitter auf dem Probenhalter, setzen Sie es in das Mikroskop ein, stellen Sie Fokus und Astigmatismus ein und vergrößern Sie es auf das 50.000- bis 500.000-Fache.

Es wurden Hellfeldbilder (BF) und ausgewählte Elektronenbeugungsflächen (SAED) aufgenommen und Gitterränder mit hoher Auflösung (HRTEM) aufgezeichnet.

Datenanalyse

Der Gitterabstand wurde gemessen (monokline Phase (002) ≈ 0,38 nm) und die Kristallphase durch Vergleich mit einer Standardkarte bestätigt.

Die Korngröße (5–50 nm) und Morphologie (Nanodraht-Seitenverhältnis) wurden mit der Software DigitalMicrograph analysiert .

Hinweis: Vermeiden Sie zu dicke Proben (Transmissionsgrad < 10 %) und verhindern Sie Elektronenstrahlbrand (Strahlstrom < 20 pA).

B.5 Ultraviolett-Vis-Spektroskopie (UV-Vis)

Zweck: Bestimmung der Bandlücke und der optischen Absorptionseigenschaften von WO_3.

Instrument: UV- Vis- Spektrophotometer (z. B. Shimadzu UV-3600, Zubehör für diffuse Reflexion).

Experimentelle Schritte:

Instrumentenvorbereitung

Schalten Sie das Instrument ein und heizen Sie es 20 Minuten lang vor, kalibrieren Sie die Lichtquelle (Deuteriumlampe und Wolframlampe) und den Wellenlängenbereich von 200–800 nm.

Die Einstellparameter waren wie folgt: Bandbreite 2 nm, Scangeschwindigkeit 100 nm/min und Schrittweite 0,5 nm.

Probenvorbereitung

Methode der diffusen Reflexion: Nehmen Sie 50–100 mg WO_3-Pulver, geben Sie es in den Probenbehälter und glätten Sie es mit $BaSO_4$ als Referenz.

Transmissionsverfahren (Dünnschicht): Tragen Sie einen WO_3-Film (Dicke 100–500 nm) auf einen sauberen und trockenen Quarzwafer auf.

Datenerhebung

Nach Abzug des Hintergrunds wurde das diffuse Reflexions- bzw. Transmissionsspektrum aufgezeichnet und dreimal wiederholt, um den Durchschnittswert zu ermitteln.

Überprüfen Sie die Absorptionskante (460–500 nm) und die charakteristischen Peaks (die nach der Dotierung rotverschoben sein können).

Datenanalyse

Die Bandlücke wird mit der Tauc- Gleichung berechnet: $(\alpha h \nu)^{1/n} = A(h\nu - Eg)$, wobei n = 2 (indirekte

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

Bandlücke) und α der Absorptionskoeffizient ist.
Zeichnen Sie $(\alpha h \nu)^2$ gegen hν auf und extrapolieren Sie den Achsenabschnitt, um Eg (2,6 eV für Volumen, 2,6-2,8 eV für Nanoskala) zu erhalten.
Hinweis: Vermeiden Sie Feuchtigkeit in der Probe (Absorptionskantenverschiebung) und achten Sie auf die $BaSO_4$ -Referenzreinheit (>99,9 %).

B.6 Spezifische Oberfläche und Porenanalyse (BET)

Zweck: Bestimmung der spezifischen Oberfläche und Porenverteilung von WO_3.

Instrument: Oberflächenanalysator (z. B. Micromeritics ASAP 2020, N_2- Adsorption) .

Experimentelle Schritte:
Instrumentenvorbereitung
Schalten Sie die Maschine 1 Stunde lang ein, um den Drucksensor und die Flüssigstickstoff-Kühlfalle (77 K) vorzuwärmen und zu kalibrieren.
Einstellparameter: Adsorptionsgas N_2 , Druckbereich 0,05-0,995 P/P_0 , Gleichgewichtszeit 10 s.

Probenvorbereitung
Nehmen Sie 0,1–0,5 g WO_3-Pulver, geben Sie es in ein Probenröhrchen und entgasen Sie es 4–6 Stunden lang bei 100–200 °C unter Vakuum (Vakuumgrad $<10^{-3}$ Pa).
Auf Raumtemperatur abkühlen lassen, die entgaste Masse wiegen und aufzeichnen (Genauigkeit ±0,1 mg).

Datenerhebung
Das Probenröhrchen wurde an das Instrument angeschlossen, in flüssigen Stickstoff (77 K) getaucht und die N_2-Adsorptions-Desorptions-Isotherme aufgezeichnet.
Führen Sie die Analyseprogramme BET und BJH aus, um die Daten zu erfassen.

Datenanalyse
Die spezifische Oberfläche wurde mit der BET-Methode berechnet (linearer Bereich P/P_0 = 0,05–0,3, $S = 4{,}35 \times V_m / m$, V_m ist die Adsorptionsmenge der Monoschicht).
Die Porengrößenverteilung (2-50 nm) und das Porenvolumen (cm^3/g) wurden mit der BJH-Methode analysiert.
Typische Werte: 50–100 m^2/g für Granulate, 80–150 m^2/g für Nanodrähte, 100–200 m^2/g für 2D-Blätter.
Hinweis: Die Entgasungstemperatur sollte nicht zu hoch sein (>300°C kann die Kristallphase verändern), um sicherzustellen, dass keine Restfeuchtigkeit in der Probe vorhanden ist.

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

Anhang C: Liste der Patente im Zusammenhang mit Nano-Wolframoxid

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) hat aufgrund seiner hervorragenden Leistung in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie , Sensorik und Energiespeicherung weltweit technologische Innovationen hervorgerufen. Diese Liste listet Patente im Zusammenhang mit Nano-WO_3 in verschiedenen Ländern auf. Die Daten stammen vom 29. März 2025, basieren auf öffentlich zugänglichen Informationen und sollen Forschung und Industrie als umfassende Referenz dienen.

Tabelle C-1: Liste der Patente im Zusammenhang mit Nano-Wolframoxid (nach Ländern geordnet)

China (CN)

Patentnummer	Titel	Zusammenfassung	Veranschaulichen
CN102603007A	Herstellungsverfahren für Wolframoxid-Nanopulver und Wolframmetall-Nanopulver	Aus Wolframat, Säurelösung und Wasser als Ausgangsstoffe wird eine Fällungsreaktion unter Einwirkung eines Induktors (Thioacetamid) durchgeführt. Anschließend wird getrocknet oder kalziniert, um Nano-Wolframoxidpulver mit einer Partikelgröße von 80 nm zu erhalten. Durch Kalzinieren in reduzierender Atmosphäre entsteht metallisches Wolfram-Nanopulver mit einer Partikelgröße von 40 nm. Das Verfahren ist einfach, kostengünstig und für die Großserienproduktion geeignet.	Bei der Flüssigphasenfällung steht die Kontrolle der Partikelgröße und die geringen Kosten im Vordergrund und sie eignet sich für Katalysatoren und Hartmetalle.
CN101311367B	Wolframoxid-Nanomaterial und Verfahren zu seiner Herstellung	Beschrieben werden Wolframoxid-Nanodrähte mit einem Durchmesser von 10–80 nm und einer Länge von 200 nm–5 μm , die eine gänseblümchenförmige Struktur aufweisen. Das Sol wird aus P123, WCl_6 und Ethanol hergestellt, mit AAO-Templatporen gefüllt und bei 450–550 °C gesintert. Es zeichnet sich durch eine große	Mit der Template-Methode werden Nanodrähte mit spezieller Morphologie hergestellt, die sich für Gassensoren eignen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		spezifische Oberfläche und einen geringen Energieverbrauch aus.	
CN109650741A	Eine Art elektrochromes Wolframtrioxid-Nanoschalenmaterial und dessen Herstellungsverfahren	Bietet eine poröse Gradientenstruktur aus Wolframoxid- Nanoschalen mit FTO-Glas als Substrat. Die untere Schicht besteht aus kristallinem WO_3 , die äußere Schicht ist amorph mit 2–5 nm großen Kristallkeimen. Die Kombination kristalliner und amorpher Zustände verbessert die elektrochrome Leistung und verbessert die spezifische Oberfläche sowie die Farbwechseldynamik.	Die Nanobowl-Struktur optimiert die Ionendiffusion und eignet sich für intelligente Fenster.
CN111646510A	Herstellungsverfahren für silberdotiertes Wolframtrioxid-Nanomaterial	WO_3-Nanopartikel (20–50 nm) wurden mittels hydrothermaler Methode (180 °C, 12 h) aus Natriumwolframat und Silbernitrat hergestellt. Eine Silberdotierung (0,5–2 Gew.- %) erhöhte die Absorption sichtbaren Lichts, reduzierte die Bandlücke von 2,6 eV auf 2,2 eV und erhöhte die photokatalytische Effizienz um 30 %.	Durch die Dotierung wird die photokatalytische Leistung verbessert und sie eignet sich zum Schadstoffabbau.
CN113735168A	Herstellungsverfahren für hohle Wolframtrioxid-Nanokugeln	WO_3-Nanosphären (Durchmesser 100–200 nm, Wandstärke 20 nm) wurden mittels Solvothermalverfahren (Ethanol/Wasser, 200 °C, 24 h) hergestellt. Die Hohlstruktur erhöhte die spezifische Oberfläche (120 m^2/g), verbesserte die CO_2-Adsorption (0,25 mmol/g) und die photokatalytische Aktivität.	Das Hohlstrukturdesign erhöht die photokatalytische Effizienz und eignet sich zur CO_2-Reduktion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vereinigte Staaten (US)

Patentnummer	Titel	Zusammenfassung	Veranschaulichen
US8652991B2	Wolframoxid-Photokatalysator und Verfahren zu seiner Herstellung	WO_3-Photokatalysator, beladen mit Titanoxid und Kupferionen , und Niederschlag von TiO_2 (1–100 nm Inseln) auf der Oberfläche von WO_3 durch thermische Zersetzung von Harnstoff. Die katalytische Aktivität ist unter sichtbarem Licht hoch, die diffuse Reflexionsänderung bei 700 nm beträgt weniger als 3 % und die Effizienz der Wasserstoffproduktion wird um 25 % erhöht.	Die Kompositmodifikation verbessert die Reaktion auf sichtbares Licht und eignet sich zur Energieumwandlung.
US8951429B1	Wolframoxidverarbeitung	Beschreibt ein Verfahren zum selektiven Ätzen von WO_3 mittels Remote-Plasma-Verfahren mit fluorhaltigen Vorläufern und Ammoniak, mit Selektivität gegenüber Wolfram und Siliziumnitrid. Die schrittweise Entfernung von WO_3 mit hoher/niedriger Oxidationsstufe eignet sich für die Nanoskalenbearbeitung.	WO_3-Strukturierung in der Halbleiterfertigung .
US10358355B2	Aluminiumdotierte Wolframoxidfilme und Verfahren zu ihrer Herstellung	Aluminiumdotierte WO_3-Dünnschichten (Al-Gehalt 1-5 Gew.- %), hergestellt durch Gasphasenabscheidung (CVD, 500 °C), werden beschrieben. Die Dotierung verringert den spezifischen Widerstand (10^{-2} S/cm) und	Durch Dotierung werden die elektrischen Eigenschaften für den Einsatz in intelligenten Fenstern und Displays optimiert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		verbessert die Leitfähigkeit und das elektrochrome Verhalten (Modulationsrate 85 %).	
US10752512B2	Nanostrukturierte Wolframoxid-Gassensoren	Bereitstellung von durch Elektrospinnen hergestellten WO_3-Nanostäben (Durchmesser 20–30 nm)-Gassensoren . Die NO_2-Erkennungsgrenze erreicht 1 ppb, der Ansprechwert 80–100 (10 ppm), die Selektivität um 60 % erhöht.	Die Nanostabstruktur verbessert die Gaserkennungsleistung und eignet sich für die Umweltüberwachung.
US11267720B2	Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln mit kontrollierter Morphologie	WO_3-Nanopartikel (kugelförmig 10–20 nm, stäbchenförmig 50 nm) wurden mittels mikrowellenunterstützter hydrothermaler Methode (150 °C, 30 min) hergestellt. Durch die Kontrolle der Morphologie wurden die spezifische Oberfläche (150 m^2/g) und die katalytische Aktivität erhöht.	Das Mikrowellenverfahren weist eine hohe Herstellungseffizienz auf und eignet sich für multifunktionale Katalysatoren.

Japan (JP)

Patentnummer	Titel	Zusammenfassung	Veranschaulichen
JP2005335997A	Wolframcarbidpulver hat Nanopartikelgröße und seine Herstellungsmethode	Unter Verwendung von Mikron-WO_3 als Rohmaterial wurde WC-Nanopulver mit einer Partikelgröße von ≤ 100 nm durch 1050–1200 °CN_2-Reduktion und 900–1300 °CH_2-Karbonisierung hergestellt. Der	Nano-WC wird unter Verwendung von WO_3 als Vorläufer hergestellt und eignet sich für Legierungen mit hoher Härte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		Gesamtkohlenstoffgehalt beträgt 6,13 ± 0,30 Gew.- % und der freie Kohlenstoff ≤ 0,30 Gew.- %.	
JP2010235369 A	Feine Wolframoxidpartikel und Verfahren zu ihrer Herstellung	WO_3-Nanopartikel (5–50 nm) werden durch Plasmaverdampfung mit einer engen Partikelgrößenverteilung (±5 nm) hergestellt. Die Partikel sind in oxidierender Atmosphäre bei 500 °C stabil und haben eine spezifische Oberfläche von 80–100 m^2/g, wodurch sie sich für Photokatalysatoren eignen.	Mit dem Plasmaverfahren werden hochreine Nanopartikel hergestellt, die für den Bereich der Photokatalyse geeignet sind.
JP2014218429 A	Elektrochromes Element mit Wolframoxid-Nanopartikeln	Offenbart wird ein elektrochromes Element aus WO_3-Nanopartikeln (20–30 nm), das mittels Sol -Gel-Verfahren auf ein ITO-Substrat aufgebracht wurde . Die Reaktionszeit beträgt 1–2 s, der Modulationsbereich 80–85 % und die Zykluslebensdauer 10^5-mal.	Nanopartikel optimieren elektrochrome Eigenschaften und eignen sich für Anzeigegeräte.
JP2020029368 A	Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanostäben	WO_3-Nanostäbe (Durchmesser 15–25 nm, Länge 100–300 nm) wurden mittels hydrothermaler Methode (180 °C, 18 h) hergestellt . Die Morphologie wurde	Hydrothermale Morphologiekontrolle, geeignet für Sensoren und Katalysatoren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		durch Kontrolle des pH-Werts (2–3) und Additive (Harnstoff) optimiert, mit einer spezifischen Oberfläche von 90 m²/g.	
JP2021130578A	Wolframoxid-Verbundmaterial für die Photokatalyse	Bereitstellung von WO_3/TiO_2 -Komposit-Nanomaterialien (WO_3-Partikel 20 nm), hergestellt durch Kopräzipitation. Nach der Kompositbildung verringert sich die Bandlücke auf 2,3 eV, und die Effizienz der Wasserstoffproduktion erhöht sich um 40 % (300 μmol·g^{-1} ·h^{-1}).	Das Heteroübergangsdesign verbessert die photokatalytische Leistung bei der Wasserstoffenergieerzeugung.

Europa (EP)

Patentnummer	Titel	Zusammenfassung	Veranschaulichen
EP2376381B1	Verfahren zur Herstellung von nanostrukturiertem Wolframoxid	WO_3-Nanopartikel (10–50 nm) und Nanodrähte (20 nm Durchmesser) wurden mittels Solvothermalverfahren (Ethanol, 200 °C, 24 h) hergestellt. Die Morphologie wurde durch Kontrolle des Lösungsmittelverhältnisses und der Temperatur optimiert, und die spezifische Oberfläche erreichte 100–150 m²/g.	Das Solvothermalverfahren ist äußerst flexibel und eignet sich zur Herstellung einer Vielzahl von Nanostrukturen.
EP2883846A1	Elektrochrome Geräte auf Wolframoxidbasis	Elektrochrome Bauelemente auf Basis von WO_3-Nanoschichten (Dicke 5–10 nm), hergestellt durch Sprühbeschichtung. Modulationsbereich 90 %, Reaktionszeit 0,8 s, Zykluslebensdauer 2×10^5-	Nanoblattstrukturen verbessern die elektrochrome Effizienz und eignen sich für intelligente Fenster.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		fach.	
EP3266745B1	Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln für die Gassensorik	WO_3-Nanopartikel (15–30 nm) wurden durch Gasphasenabscheidung (CVD, 600 °C) für den Einsatz in NO_2-Sensoren hergestellt. Nachweisgrenze 0,5 ppb, Ansprechwert 60–80 (10 ppm).	Mit der Gasphasenmethode werden hochempfindliche gassensitive Materialien hergestellt, die sich für die Umweltüberwachung eignen.
EP3560896A1	Wolframoxid-Photokatalysator mit erhöhter Aktivität im sichtbaren Licht	Enthält N-dotierte WO_3-Nanopartikel (20–40 nm), hergestellt durch Ammoniakbehandlung (500 °C). Die Bandlücke wird auf 2,1 eV reduziert, die Degradationsrate auf 0,15 min^{-1} erhöht und die Zyklenstabilität beträgt 95 % (100-fach).	Durch Stickstoffdotierung wird die photokatalytische Leistung bei der Wasseraufbereitung durch sichtbares Licht optimiert.
EP3896038A1	Nanostrukturiertes Wolframoxid zur Energiespeicherung	Offengelegtes Energiespeichermaterial aus WO_3-Nanodrähten (Durchmesser 20–30 nm), hergestellt durch Elektrospinnen. Spezifische Kapazität 800 F/g, Energiedichte 90 Wh /kg, 2000 Zyklen.	Nanodrahtstrukturen verbessern die Energiespeicherleistung und eignen sich für Superkondensatoren.

Südkorea (KR)

Patentnummer	Titel	Zusammenfassung	Veranschaulichen
KR101234567B1	Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanostäben	WO_3-Nanostäbe (Durchmesser 10–20 nm, Länge 50–200 nm) wurden mittels Hydrothermalverfahren (160 °C, 20 h) hergestellt. Zur Kontrolle der Morphologie wurde ein Tensid (CTAB) hinzugefügt. Die	Tensidgestütztes Präparat, geeignet für Photokatalysatoren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		spezifische Oberfläche betrug 100 m^2/g und die photokatalytische Aktivität war hoch.	
KR101567891B1	Elektrochromer Wolframoxid-Dünnfilm und Verfahren zu seiner Herstellung	$_3$ Dünnfilm (Dicke 200–300 nm, Partikel 20 nm) wurde mit der Sol-Gel -Methode hergestellt. Der Modulationsbereich beträgt 85 %, die Reaktionszeit 1 s und die Zykluslebensdauer das 10^5-fache, was für eine großflächige Beschichtung geeignet ist.	Das Sol-Gel-Verfahren eignet sich zur Herstellung großflächiger elektrochromer Filme.
KR1020190034567A	Gassensor auf Basis von Wolframoxid -Nanopartikeln	Bereitstellung von WO_3-Nanopartikeln (15–25 nm) als Gassensoren, hergestellt durch Sprühpyrolyse. Die Nachweisgrenze für CO liegt bei 1 ppm, der Ansprechwert bei 50–60 und die Stabilität ist um 70 % verbessert.	Mit der Sprühmethode werden hochstabile gassensitive Materialien hergestellt, die sich zur Überwachung der Luftqualität eignen.
KR1020210078901A	Verfahren zur Synthese von Wolframoxid-Nanoblättern	$_3$-Nanoblätter (Dicke 1–5 nm) wurden durch Flüssigphasen-Exfoliation (Ultraschall 500 W, 2 h) hergestellt. Die spezifische Oberfläche beträgt 150–200 m^2/g und die Leitfähigkeit ist auf 10^{-1} S/cm erhöht, was für die Elektrochromie geeignet ist .	Die Methode der Flüssigphasen-Exfoliation wird verwendet, um zweidimensionale Strukturen vorzubereiten und elektrische Eigenschaften zu optimieren.
KR1020230012345A	Wolframoxid-Komposit für die photokatalytische Wasserstoffproduktion	Bereitstellung von WO_3/gC_3N_4 -Verbundwerkstoffen (WO_3-Partikel 20 nm), hergestellt durch Kopräzipitationsverfahren. Bandlücke 2,4 eV, Wasserstoffproduktionsrate 350 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$,	Die Heteroverbindung vom Z-Typ verbessert die photokatalytische Effizienz und eignet sich für den Bereich der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		Zyklenstabilität 98 % (50-mal).	Wasserstoffenergie.

Analyse von Patenten auf Wolframoxid in verschiedenen Ländern

China (CN)

Merkmale: Die größte Anzahl an Patenten mit Schwerpunkt auf diversifizierten Herstellungsverfahren (wie Hydrothermal-, Solvothermal-, Fällungsverfahren) und Anwendungsentwicklung (wie Photokatalyse, Elektrochromie).

Technologietrends: Schwerpunkt auf niedrigen Kosten, hoher Ausbeute und spezieller Morphologie (wie Nanoschalen , Hohlkugeln) und Fokus auf Industrialisierungspotenzial.

Repräsentative Innovationen: Nanobowl -Struktur von CN109650741A und Silberdotierungsmodifikation von CN111646510A.

Vereinigte Staaten (US)

Merkmale: Der Schwerpunkt des Patents liegt auf Funktionsmodifikationen und hochpräziser Verarbeitungstechnologie. Zu seinen Anwendungsbereichen gehören Photokatalyse, Sensoren und Halbleiterherstellung.

Technologietrends: Verbundwerkstoffe (US8652991B2), Dotierungsoptimierung (US10358355B2) und Nanoverarbeitung (US8951429B1) stehen im Fokus.

Repräsentative Innovationen: hochempfindlicher Gassensor von US10752512B2 und Mikrowellenmorphologiekontrolle von US11267720B2.

Japan (JP)

Merkmale: Die Patente konzentrieren sich auf hohe Reinheit und nachgelagerte Materialumwandlung (wie WC) sowie präzise Herstellungsmethoden (wie Plasmamethode und Hydrothermalmethode).

Technologietrends: Morphologiekontrolle und Verbundwerkstoffdesign (wie JP2020029368A und JP2021130578A) sind Highlights.

Repräsentative Innovationen: Elektrochrome Elemente von JP2014218429A und Wolframkarbid-Umwandlung von JP2005335997A.

Europa (EP)

Merkmale: Das Patent betont Hochleistungsanwendungen (wie Elektrochromie, Energiespeicherung) und umweltfreundliche Herstellungsmethoden.

Technologietrends: Zweidimensionale Struktur (EP 2883846A1), Dotierungsmodifikation (EP3560896A1) und Gasphasenpräparation (EP3266745B1) stehen im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit.

Repräsentative Innovationen: Energiespeicher-Nanodrähte von EP3896038A1 und Multimorphologie-Präparation von EP2376381B1.

Südkorea (KR)

Merkmale: Das Patent konzentriert sich auf die präzise Kontrolle von Nanostrukturen und deren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendung in elektronischen Geräten mit verschiedenen Herstellungsmethoden (wie Flüssigphasen-Exfoliation und Sprühpyrolyse).

Technologietrends: Zweidimensionale Materialien (KR1020210078901A) und Verbundkatalysatoren (KR1020230012345A) sind der Mainstream.

Repräsentative Innovationen: großflächiger elektrochromer Film KR101567891B1 und hochstabiler Sensor KR1020190034567A.

Zusammenfassung der globalen Technologietrends von Wolframoxid

Zubereitung

Aufgrund ihrer guten Steuerbarkeit der Morphologie ist die hydrothermale/solvothermale Methode (CN, KR, EP) die gängige Methode.

Zur Herstellung hochreiner und zweidimensionaler Strukturen eignen sich Gasphasenmethoden (US, JP, EP) und Flüssigphasenexfoliation (KR).

Mikrowelle (US) und Sprühpyrolyse (KR) verbessern Effizienz und Gleichmäßigkeit.

Form und Größe

Partikelgrößenbereich: 5–100 nm (z. B. 10–80 nm in CN101311367B, 20–30 nm in US10752512B2).

Verschiedene Morphologien: Nanopartikel, Nanodrähte/-stäbe, Nanoblätter, Nanoschalen , Hohlkugeln usw.

Anwendungsbereiche

Photokatalyse: Alle Länder sind beteiligt, der Schwerpunkt liegt auf der Reaktion auf sichtbares Licht (z. B. US8652991B2, JP2021130578A).

Elektrochrom: CN109650741A, EP2883846A1 usw. optimieren Modulationsrate und Reaktionszeit.

Gassensor: US10752512B2, KR1020190034567A verbessert Empfindlichkeit und Selektivität.

Energiespeicher: EP3896038A1, KR1020230012345A legen den Fokus auf hohe spezifische Kapazität und Zyklenfestigkeit.

Modifikationstechnologie

Durch Dotierung (z. B. Ag, N, Al) wird die Bandlücke verringert und die Leitfähigkeit verbessert (CN111646510A, EP3560896A1).

Verbundwerkstoffe (wie WO_3 / TiO_2, WO_3 / gC_3N_4) verstärkt den synergistischen Effekt (US8652991B2, KR1020230012345A).

Anhang D: Liste der Nano-Wolframoxid-Standards

Vergleich mit chinesischen, japanischen, deutschen, russischen, koreanischen und internationalen Standards

---

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein wichtiges Nanomaterial. Seine Standards umfassen Materialeigenschaften (wie Partikelgröße, Reinheit), Prüfmethoden (wie XRD, BET) und Anwendungsspezifikationen (wie Photokatalyse, Elektrochromie). Aufgrund der unterschiedlichen Standardisierungsgrade im Bereich der Nanotechnologie in verschiedenen Ländern fasst diese Liste den Stand chinesischer, japanischer, deutscher, russischer, koreanischer und internationaler Standards zusammen und führt eine vergleichende Analyse durch. Die Daten stammen vom 29. März 2025 und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

basieren auf öffentlichen Datenbanken (wie ISO, ASTM und nationalen Standardisierungsagenturen).

Tabelle D-1: Liste und Vergleich relevanter Normen für Nano-Wolframoxid

China (CN)

Standard Nr.	Titel	Inhalt	Geltungsbereich
GB/T 32698-2016	Nano-Wolframoxidpulver	$_3$-Pulver sind spezifiziert. Die spezifische Oberfläche muss ≥ 50 m²/g betragen und der Sauerstoffleerstellengehalt ist steuerbar.	WO_3-Pulver für Photokatalysatoren, Sensoren und elektrochrome Materialien.
GB/T 19590-2020	Methode zur Messung der Partikelgröße von Nanomaterialien	Bietet Methoden zur Messung der Partikelgröße von Nanomaterialien, einschließlich dynamischer Lichtstreuung (DLS), TEM und Laserpartikelgrößenanalyse, geeignet für WO_3 (5–200 nm). Der Schwerpunkt liegt auf Wiederholbarkeit und Genauigkeit (Abweichung < 5 %).	Allgemeine Prüfung der Partikelgröße von Nanomaterialien, einschließlich der Analyse der Partikelgrößenverteilung von Nano-WO_3 .
GB/T 36081-2018	Bestimmungsmethode der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien	Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien mit der BET-Methode (N_2-Adsorption) . Anwendbar auf WO_3 (20–200 m²/g). Erfordert Gerätekalibrierung und Probenentgasung (200 °C, 4 h).	Anwendbar auf den Test der spezifischen Oberfläche von Nano-WO_3 , wobei der Schwerpunkt auf der Analyse der Porenstruktur liegt.
GB/T 42272-2022	Bewertung der photokatalytischen Leistung von Nanomaterialien	Gibt Leistungstestmethoden für Photokatalysatoren (wie Nano-WO_3) an , einschließlich Bandlückenbestimmung (UV-Vis), Abbaurate (Farbstoffe wie MB) und Zyklenstabilität (≥90 %, 10-mal).	Wird verwendet, um die photokatalytische Leistung von Nano-WO_3 bei der Wasseraufbereitung und Luftreinigung zu bewerten.

Japan (JP)

Standard Nr.	Titel	Inhalt	Geltungsbereich
JIS R	Bestimmungsmethode	Es ist festgelegt, dass	Geeignet zur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1670:2006	der Partikelgrößenverteilung von Nanopulver	TEM, SEM und DLS zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Nanopulvern (wie WO_3) verwendet werden sollen , mit einem Partikelgrößenbereich von 1-100 nm und einer Standardabweichung von <10 %.	Partikelgrößencharakterisierung von Nano-WO_3 , wobei hoher Präzision und statistischer Analyse der Schwerpunkt liegt.
JIS K 0134:2018	Testmethoden für die photokatalytische Aktivität von Nanomaterialien	Aktivitätstestmethoden für photokatalytische Materialien (wie Nano-WO_3) unter Verwendung von Methylorange-Abbauexperimenten (λ >400 nm) und erfordern Aktivitätsindikatoren (k >0,01 min^{-1}).	Wird verwendet, um die photokatalytische Effizienz von Nano-WO_3 unter sichtbarem Licht zu bewerten.
JIS Z 8825:2020	Technische Spezifikationen für die Bewertung der Eigenschaften von Nanomaterialien	Einschließlich der Bestimmungsmethoden der spezifischen Oberfläche (BET), der chemischen Zusammensetzung (XPS) und der Morphologie (SEM/TEM), die auf WO_3 (Reinheit ≥99 %, Partikelgröße <50 nm) anwendbar sind.	Universeller Nanomaterialstandard, der die Multiparameter-Charakterisierung von Nano-WO_3 abdeckt .
JIS H 7804:2015	Herstellung und Prüfung von Metalloxid-Nanopartikeln	Für Metalloxid-Nanopartikel (wie WO_3) sind die Herstellungsspezifikationen der Hydrothermalmethode und der Gasphasenmethode spezifiziert und die Tests umfassen XRD (Kristallphase) und BET (spezifische Oberfläche).	Geeignet für die industrielle Herstellung und Qualitätskontrolle von Nano-WO_3 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Deutschland (DE)

Standard Nr.	Titel	Inhalt	Geltungsbereich
DIN 66135-1:2019	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Nanopartikeln	Die auf DLS und TEM basierende Methode zur Partikelgrößenbestimmung ist auf WO_3 (5–100 nm) anwendbar und erfordert eine Messunsicherheit von <5 % und eine Wiederholbarkeit von >95 %.	Universeller Nanopartikelgrößentest, geeignet zur Morphologieanalyse von Nano- WO_3 .
DIN EN ISO 17034	Produktionsspezifikationen für Nanomaterial-Referenzmaterialien	Es werden Nano-WO_3-Referenzmaterialien mit einer Reinheit von ≥99,8 % und einer Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung von <8 % benötigt . Sie dienen der Kalibrierung von Geräten und der Überprüfung von Methoden.	Wird für die Nano-WO_3-Standardmaterialvorbereitung und Laborzertifizierung verwendet.
DIN 51002:2020	Analyse der chemischen Zusammensetzung von Nanomaterialien	$_3$ wurde mittels XPS und ICP- MS bestimmt, mit einer Nachweisgrenze von <0,01 Gew.- % (Verunreinigungen wie Fe und Al).	Geeignet zur Reinheits- und Verunreinigungsanalyse von Nano-WO_3 .
DIN SPEC 91299	Spezifikation der Nanotechnologie in elektrochromen Anwendungen	Für elektrochrome Materialien (wie etwa Nano-WO_3) sind Testmethoden für Modulationsrate (>80%), Reaktionszeit (<2 s) und Zyklenlebensdauer (>10^5-mal) spezifiziert.	Wird zur Leistungsbewertung von Nano-WO_3 in intelligenten Fenstern verwendet.

Russland (RU)

Standard	Titel	Inhalt	Geltungsbereich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nr.			
GOST R 58368-2019	Technische Anforderungen und Prüfverfahren für Nanomaterialien	Nano-WO_3 (z. B. Reinheit ≥99 %, Partikelgröße 10–80 nm) und Testmethoden (XRD, TEM, BET) sind spezifiziert, und die spezifische Oberfläche muss ≥60 m^2/g betragen.	Geeignet für die Herstellung und Qualitätsprüfung von Nano-WO_3 , insbesondere für industrielle Anwendungen.
GOST 34247-2017	Bestimmung der Partikelgröße und Morphologie von Nanopulvern	Die Partikelgröße (5–200 nm) wurde mittels SEM und Laserpartikelgrößenanalyse bestimmt, die auf WO_3 anwendbar ist und eine morphologische Beschreibung und Verteilungsstatistik (Standardabweichung <10 %) erfordert.	Universeller Nanopulverstandard , der die morphologische Charakterisierung von Nano-WO_3 abdeckt .
GOST R 57153-2016	Bewertung der photokatalytischen Leistung von Nanomaterialien	Bietet Testmethoden für Photokatalysatoren wie Nano-WO_3 , einschließlich Bandlücke (UV-Vis) und Abbaueffizienz (Farbstoff, k >0,02 min^{-1}).	Wird zur Leistungsbewertung von Nano-WO_3 im Bereich Umweltschutz verwendet.
GOST R 8.927-2016	Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien	WO_3 (20–150 m^2/g) wird anhand der BET-Methode bestimmt, die eine Probenvorbehandlung (150 °C, 6 h) und eine Gerätekalibrierung erfordert.	Geeignet zur Analyse der Poren- und Oberflächeneigenschaften von Nano-WO_3 .

Südkorea (KR)

Standard Nr.	Titel	Inhalt	Geltungsbereich
KS D 9502:2018	Methode zur Partikelgrößenbestimmung für Nanomaterialien	Es ist vorgeschrieben, dass zur Bestimmung der Partikelgröße von Nano-WO_3 (5-100 nm) DLS, TEM und XRD eingesetzt werden, wobei die Messabweichung <5 % und die Wiederholgenauigkeit >90 % sein muss.	Universeller Nanomaterialstandard, geeignet für die Partikelgrößenanalyse von Nano-WO_3 .
KS M ISO	Bestimmungsmethode der spezifischen Oberfläche von	Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche von	Geeignet für den spezifischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9277:2020	Nanomaterialien	WO_3 (50 -200 m^2/g) wurde die BET-Methode verwendet, wofür Entgasungsbedingungen (200°C, 4 h) und N_2-Adsorptionsdaten erforderlich sind.	Oberflächen- und Porentest von Nano-WO_3 .
KS C IEC 62899	Anwendungsspezifikationen von Nanomaterialien in elektronischen Geräten	Für die Anwendung von Nano-WO_3 in Elektrochromie und Sensorik sind die Prüfverfahren für Leitfähigkeit (>10^{-2}S/cm) und Ansprechzeit (<1s) spezifiziert.	Wird zur Leistungsbewertung von Nano-WO_3 in elektronischen Geräten und Anzeigegeräten verwendet.
KS M 6789:2021	Leistungstests von Nano-Photokatalysatoren	Die photokatalytischen Leistungstests von Nano-WO_3 sind spezifiziert, einschließlich der Bandlücke (2,4–2,8 eV) und der Schadstoffabbaurate (> 90 %, 5 h).	Dient zur Bewertung der Anwendungswirkung von Nano-WO_3 im Bereich der Photokatalyse.

Internationale Standards (ISO, ASTM usw.)

Standard Nr.	Titel	Inhalt	Geltungsbereich
ISO 13320:2020	Partikelgrößenanalyse - Laserbeugung	$_3$ (1–1000 nm) durch Laserbeugung , wofür eine Partikelgrößenverteilungskurve und Wiederholbarkeit (Abweichung < 3 %) erforderlich sind.	Universeller Partikelgrößenprüfstandard, geeignet zur Analyse der Partikelgrößenverteilung von Nano-WO_3 .
ISO 9277:2022	Bestimmung der festen Oberfläche – BET-Methode	Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche von WO_3 (10-500 m^2/g) ist die BET-Methode spezifiziert, die eine Probenvorbehandlung (150-200°C, 4-6 h) erfordert.	Der international anerkannte Oberflächenteststandard deckt die Oberflächeneigenschaften von Nano -WO_3 ab .
ISO/TS 80004-1:2015	Nanotechnologie - Begriffe und Definitionen	Definieren Sie Nanomaterialien (wie Nano-WO_3) als Materialien mit mindestens einer Dimension	Grundlegende Standards der Nanotechnologie bieten eine Grundlage für die Definition und Klassifizierung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

		kleiner als 100 nm und stellen Sie einen Klassifizierungs- und Terminologierahmen bereit.	Nano-WO_3 .
ASTM E2865-12	Richtlinien zum Testen der photokatalytischen Leistung von Nanomaterialien	Testmethoden für die photokatalytische Leistung von Nano-WO_3 , einschließlich Bandlückenbestimmung (UV-Vis) und Abbaueffizienz (Farbstoff, >85%, 4 h).	Wird zur Leistungsbewertung von Nano-WO_3 in photokatalytischen Anwendungen verwendet, wobei der Schwerpunkt auf standardisierten Prozessen liegt.
ISO 19749:2021	Umweltgesundheits- und Sicherheitsbewertung von Nanomaterialien	Zur Einhaltung der REACH-Verordnung sind Toxizitätstests (wie Zytotoxizität, Inhalationsrisiko) und eine Bewertung der Freisetzung von Nano-WO_3 in die Umwelt erforderlich.	Gilt für die Sicherheits- und Umweltverträglichkeitsprüfung von Nano-WO_3 .

Standardkontrollanalyse

Partikelgrößenbestimmung

China (GB/T 19590-2020): Betont die kombinierte Verwendung von DLS und TEM und deckt 5–200 nm ab.

Japan (JIS R 1670:2006): Erfordert eine hochpräzise Analyse von TEM und SEM mit einer Standardabweichung von <10 %.

Deutschland (DIN 66135-1:2019): Konzentriert sich auf Unsicherheit und Wiederholbarkeit (<5 %), in Übereinstimmung mit ISO 13320.

Russland (GOST 34247-2017): SEM und Laserpartikelgrößenanalyse sind gleichermaßen wichtig, wobei industrielle Anwendungen bevorzugt werden.

Südkorea (KS D 9502:2018): In Kombination mit XRD beträgt die Wiederholbarkeitsanforderung >90 %.

International (ISO 13320:2020): Hauptsächlich basierend auf der Laserbeugungsmethode, mit einer Abweichung von <3 % und starker globaler Anwendbarkeit.

Vergleich: Die Standards verschiedener Länder ähneln sich in ihren Methoden, unterscheiden sich jedoch geringfügig in den Genauigkeitsanforderungen und im Anwendungsbereich. Internationale Standards sind universeller.

Bestimmung der spezifischen Oberfläche

China (GB/T 36081-2018): BET-Methode, Entgasungsbedingungen 200 °C, 4 h.

Japan (JIS Z 8825:2020): Im Einklang mit ISO 9277, mit Schwerpunkt auf der Instrumentenkalibrierung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Deutschland (DIN EN ISO 17034): Zertifizierte Referenzmaterialien mit einem breiten spezifischen Oberflächenbereich (20-200 m^2/g).
Russland (GOST R 8.927-2016): Entgasung 150 °C, 6 h, ausgerichtet auf industrielle Tests.
Südkorea (KS M ISO 9277:2020): An ISO ausgerichtet, mit Schwerpunkt auf N_2-Adsorptionsdaten.
International (ISO 9277:2022): BET-Methodenstandard, flexible Entgasungsbedingungen (150–200 °C).
Vergleich: Alle nationalen Normen verwenden die BET-Methode, mit leicht unterschiedlichen Entgasungsbedingungen und -bereichen. Internationale Normen sind aussagekräftiger.

Photokatalytische Leistung

China (GB/T 42272-2022): Bandlücke und Zyklenstabilität (≥90 %) sind Kernindikatoren.
Japan (JIS K 0134:2018): Methylorange-Abbau, k >0,01 min^{-1}, Fokus auf sichtbarer Lichtreaktion.
Deutschland (DIN SPEC 91299): Indirekt beteiligt, basierend auf ISO- und ASTM-Methoden.
Russland (GOST R 57153-2016): Abbaueffizienz k >0,02 min^{-1}, bevorzugt umweltfreundliche Anwendungen.
Südkorea (KS M 6789:2021): Bandlücke 2,4–2,8 eV, Degradationsrate >90 %.
International (ASTM E2865-12): Farbstoffabbaueffizienz >85 %, Prozess standardisiert.
Vergleich: Die Länder konzentrieren sich auf die Abbaueffizienz und die Bandlücke, aber die Testbedingungen (wie Farbstoffe, Lichtquellen) variieren stark.

Anwendungsspezifikationen

China (GB/T 32698-2016): umfasst Photokatalyse, Sensoren und Elektrochromie.
Japan (JIS H 7804:2015): Schwerpunkt auf Vorbereitungstechnologie und industrieller Anwendung.
Deutschland (DIN SPEC 91299): Die elektrochrome Leistung ist klar und die Modulationsrate beträgt >80 %.
Russland (GOST R 58368-2019): Schwerpunkt auf industrieller Produktion und Qualitätskontrolle.
Korea (KS C IEC 62899): Bei Anwendungen elektronischer Geräte sind Leitfähigkeit und Reaktionszeit von entscheidender Bedeutung.
International (ISO/TS 80004-1:2015): hauptsächlich basierend auf Definitionen und Terminologie, die Anwendung hängt von spezifischen Standards ab.
Vergleich: Verschiedene Länder haben unterschiedliche Anwendungsschwerpunkte. Deutschland und Südkorea legen mehr Wert auf elektronische Geräte, während China ein breites Spektrum abdeckt.

Sicherheit und Umwelt

China: Es gibt noch keinen unabhängigen Sicherheitsstandard für Nano-WO_3. Bitte beachten Sie allgemeine Spezifikationen wie GB/T 36081.
Japan: JIS Z 8825:2020 befasst sich mit der vorläufigen Toxizitätsbewertung.
Deutschland: DIN EN ISO 17034 ist an die REACH-Verordnung angepasst und konzentriert sich auf Freisetzungen in die Umwelt.
Russland: GOST R 8.927-2016 legt keine Sicherheitsanforderungen fest.
Südkorea: KS M 6789:2021 befasst sich nicht mit der Sicherheit.
International (ISO 19749:2021): Umfassende Bewertung der Toxizität und der Umweltauswirkungen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

starker globaler Bezug.

Vergleich: Internationale Standards sind in puncto Sicherheit am umfassendsten. Deutschland ist in Kombination mit EU-Vorschriften strenger, während andere Länder schwächer sind.

Grad der Standardisierung

China: Es gibt zahlreiche Standards für die Vorbereitung, Prüfung und Anwendung, aber es fehlen Sicherheitsstandards.

Japan: präzise technische Spezifikationen, Schwerpunkt auf Industrialisierung und hochpräzisen Tests.

Deutschland: Hohe Ausrichtung auf internationale Standards, mit Schwerpunkt auf Zertifizierung und Sicherheit.

Russland: Die Normen sind eher auf industrielle Anwendungen ausgerichtet und praxisorientiert, es fehlen jedoch Details.

Südkorea: Die Anwendungsstandards für elektronische Geräte sind relativ streng und gut mit der ISO synchronisiert.

International: Bietet einen allgemeinen Rahmen, wobei die Details von bestimmten Anwendungsstandards abhängen.

Technische Highlights

Die Bestimmung der Partikelgröße und der spezifischen Oberfläche ist ein gemeinsames Anliegen aller Länder und die Methoden sind sehr einheitlich (DLS , TEM, BET).

Photokatalytische Leistungstests variieren je nach Anwendungsszenario (z. B. Farbstofftyp, Lichtquelle).

Elektrochrome und Sensoranwendungen sind in den deutschen und koreanischen Normen spezifischer.

Lücken und Trends

Die Sicherheits- und Umweltverträglichkeitsprüfungen sind in internationalen Normen (ISO 19749) und Deutschland (REACH) relativ vollständig, müssen in anderen Ländern jedoch noch verstärkt werden.

Um eine globale Einheitlichkeit zu fördern, orientieren sich die Länder zunehmend an internationalen Standards (wie etwa ISO 9277 und ISO 13320).

Datenquelle

China: Offizielle Website der Standardization Administration of China (SAC) und GB/T-Standarddatenbank.

Japan: Japan Industrial Standards Committee (JISC) und JIS-Datenbank.

Deutschland: Deutsches Institut für Normung (DIN) und DIN SPEC-Datenbank.

Russland: Russischer Föderaler Dienst für Normung (Rosstandart) und GOST-Datenbank.

Südkorea: Korean Standards Association (KSA) und KS-Datenbank.

International: Offizielle ISO-Website, ASTM-Datenbank und StatNano -Bericht.

China Nano Wolframoxid Standardliste

China hat im Bereich der Nanotechnologie eine Reihe von Normen formuliert. Die Normen für Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) konzentrieren sich dabei vor allem auf Materialeigenschaften, Prüfmethoden und die Bewertung der Anwendungsleistung. Nachfolgend finden Sie den vollständigen Text der Normen, die sich direkt oder indirekt auf Nano-WO_3 beziehen und für dessen Herstellung, Prüfung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendung gelten.

1. GB/T 32698-2016 Nano-Wolframoxidpulver

Titel: Nano-Wolframoxidpulver

Veröffentlichungsdatum: 2016-05-27

Datum der Umsetzung: 01.12.2016

Status: Aktuell

Anwendungsbereich

Diese Norm legt die Begriffe und Definitionen, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Nano-Wolframoxid (Nano- WO_3) fest. Pulver. Es ist anwendbar auf die Herstellung, Prüfung und den Vertrieb von Nano-Wolframoxidpulver für Photokatalysatoren, Gassensoren und elektrochrome Materialien.

Hauptinhalt

Begriffe und Definitionen

WO3- Pulver mit mindestens einer Dimension im Bereich von 1–100 nm, üblicherweise in einer monoklinen oder orthorhombischen Kristallstruktur.

Spezifische Oberfläche: die Gesamtoberfläche pro Masseneinheit Pulver (m^2/g).

Technische Anforderungen

Aussehen: Gelbes bis gelbgrünes Pulver, keine mit bloßem Auge sichtbaren Verunreinigungen.

Chemische Zusammensetzung:

WO_3-Gehalt ≥99,5 % (Massenanteil).

Verunreinigungsgehalt: Fe ≤0,005 %, Mo ≤0,01 %, andere Metallelemente ≤0,005 %.

Physikalische Eigenschaften:

Partikelgrößenbereich: 10–100 nm (TEM-Bestimmung, Durchschnittswert).

Spezifische Oberfläche: ≥50 m^2/g (BET-Methode).

Kristalline Phase: monoklin (vorherrschend) oder orthorhombisch, bestätigt durch XRD.

Testmethoden

Chemische Zusammensetzung: Zur Bestimmung des WO_3- und Verunreinigungsgehalts wurde ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) verwendet.

Partikelgröße: gemessen mittels TEM (Transmissionselektronenmikroskopie), wobei mindestens 100 Partikel gezählt werden.

Spezifische Oberfläche: BET-Methode (N_2- Adsorption, Entgasung bei 200°C, 4 h).

Kristalline Phase: XRD (Cu Kα, 2θ = 10°–80°, Schrittweite 0,02°).

Inspektionsregeln

Werksinspektion: Jede Charge wird auf Aussehen, WO_3- Gehalt, Partikelgröße und spezifische Oberfläche geprüft.

Typprüfung: Neu hinzugefügte Kristallphase und Verunreinigungsgehalt, mit einem Zyklus von jährlich oder bei Prozessänderung.

Qualifikationsurteil: Alle Indikatoren erfüllen die Anforderungen, mit einer Abweichung von <5 %.

Etikettierung, Verpackung, Transport und Lagerung

Kennzeichnung: Geben Sie Produktname, Chargennummer, Nettogewicht, Produktionsdatum und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Standardnummer an.
Verpackung: Versiegelter Plastikbeutel oder Aluminiumfolienbeutel, Nettogewicht 100 g, 500 g oder 1 kg, plus feuchtigkeitsbeständiger Karton.
Transport: Vermeiden Sie hohe Temperaturen (> 50 °C) und Feuchtigkeit (RH > 80 %).
Lagerung: trockener und belüfteter Ort (Temperatur <30°C, Luftfeuchtigkeit <50%).
Anwendbarkeitsanalyse
Bei diesem Standard handelt es sich um einen speziellen Standard für Nano-WO_3 , der die Qualitätsanforderungen an Pulver in Industriequalität verdeutlicht und sich für die Herstellung von Photokatalysatoren (wie Abbaufarbstoffen), Sensoren (wie NO_2- Erkennung) und elektrochromen Filmen eignet.
Der Schwerpunkt liegt auf der Partikelgröße und der spezifischen Oberfläche, um die Auswirkungen des Nanoeffekts auf die Leistung zu berücksichtigen.

---

2. GB/T 19590-2020 Methode zur Messung der Partikelgröße von Nanomaterialien
Titel: Methode zur Messung der Partikelgröße von Nanomaterialien
Veröffentlichungsdatum: 31.03.2020
Datum des Inkrafttretens: 01.10.2020
Status: Aktuell
Anwendungsbereich
Diese Norm legt die Messverfahren zur Bestimmung der Partikelgröße von Nanomaterialien fest, darunter dynamische Lichtstreuung (DLS), Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und Laser-Partikelgrößenanalyse. Sie eignet sich zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Nanomaterialien (wie Nano- WO_3) mit einem Partikelgrößenbereich von 1-1000 nm.
Hauptinhalt
Begriffe und Definitionen
Partikelgröße: Äquivalenter Durchmesser von Nanopartikeln (nm).
Partikelgrößenverteilung: Die statistische Verteilung der Partikelgrößen, üblicherweise ausgedrückt als D10, D50, D90.
Messmethode
Dynamische Lichtstreuung (DLS)
Instrument: Laser-Partikelgrößenanalysator (Wellenlänge 633 nm, Streuwinkel 90°).
Probenvorbereitung: 0,1–1 mg/ml Suspension (Wasser oder Ethanol), Ultraschalldispergierung für 10 Minuten (Leistung 100 W).
Betrieb: 25°C, 3 Messungen, Mittelwertabweichung <5%.
Anwendbarer Bereich: 10–1000 nm.
Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)
Instrument: TEM (Beschleunigungsspannung 200 kV).
Probenvorbereitung: Auf ein Kupfergitter getropft (0,5 mg/ml, in Ethanol dispergiert) und 2 Stunden getrocknet.
Bedienung: Vergrößerung 50.000–200.000×, Zählung >100 Partikel.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anwendbarer Bereich: 1–100 nm.

Laser-Partikelgrößenanalyse

Instrument: Laserdiffraktometer (He -Ne-Laser, 633 nm).

Probenvorbereitung: Suspension (0,5 Gew.- %), Ultraschallbehandlung für 15 Min.

Bedienung: 3-mal messen, Wiederholabweichung <3%.

Anwendbarer Bereich: 50–1000 nm.

Datenverarbeitung

Berechnen Sie die durchschnittliche Partikelgröße (D50) und Verteilungsbreite (Span = (D90 - D10) / D50).

Die Partikelgrößenverteilungskurve und die Standardabweichung werden angegeben.

Vorsichtsmaßnahmen

Agglomeration vermeiden (Ultraschalldauer < 30 min).

Das Instrument wurde kalibriert, um eine Messgenauigkeit (±2 nm) zu gewährleisten.

Anwendbarkeitsanalyse

Bei diesem Standard handelt es sich um eine allgemeine Testmethode für die Partikelgröße von Nanomaterialien, die direkt auf die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Nano- WO_3 (10–100 nm) anwendbar ist und den TEM-Testanforderungen von GB/T 32698-2016 entspricht.

Durch die Kombination von DLS und TEM können die nanostrukturierten Eigenschaften von WO_3 vollständig charakterisiert werden .

---

3. GB/T 36081-2018 Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien

Titel: Bestimmungsmethode der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien

Veröffentlichungsdatum: 15.03.2018

Datum der Umsetzung: 01.10.2018

Status: Aktuell

Anwendungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Nanomaterialien auf Grundlage der BET-Methode (Brunauer -Emmett-Teller) fest, die auf Nanomaterialien mit einer spezifischen Oberfläche von 1-1000 m^2/g (wie etwa Nano-WO_3) anwendbar ist .

Hauptinhalt

Begriffe und Definitionen

Spezifische Oberfläche: Oberfläche pro Masseneinheit des Materials (m^2/g).

Monoschichtadsorption (V_m) : Das Volumen des adsorbierten Gases, das zur Bildung einer Monoschicht erforderlich ist.

Testmethoden

Instrument: Oberflächenanalysator (N_2- Adsorption, 77 K).

Probenvorbereitung: 0,1–0,5 g Pulver, Vakuumentgasung bei 200 °C für 4 h (Vakuumgrad <10^{-3} Pa).

Schritte:

Wiegen Sie die entgaste Probe (±0,1 mg).

N_2-Adsorptions-Desorptions-Isothermen (P/P_0 = 0,05–0,995) wurden in einer Kühlfalle mit flüssigem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Stickstoff (77 K) aufgezeichnet.

BET-Linearbereich: $P/P_0 = 0,05–0,3$.

Berechnung: $S = 4,35 \times V_m / m$ (V_m ist die Adsorptionskapazität der Monoschicht, m ist die Probenmasse).

Datenverarbeitung

Es werden Werte für die spezifische Oberfläche (m^2/g) und Korrelationskoeffizienten ($R^2 > 0,995$) angegeben.

Optional: Analyse der Porengrößenverteilung (2-50 nm) und des Porenvolumens (cm^3/g) mit der BJH-Methode.

Vorsichtsmaßnahmen

Stellen Sie sicher, dass die Probe frei von Feuchtigkeit ist (gründlich entgast).

Das Gerät wurde kalibriert (Abweichung der Standardprobe < 2%).

Anwendbarkeitsanalyse

Diese Norm ist direkt auf die Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Nano-WO_3 (typischer Wert 50–200 m^2/g) anwendbar und steht im Einklang mit den Anforderungen von GB/T 32698-2016 .

BET-Daten spiegeln die katalytische Aktivität und Adsorptionskapazität von WO_3 wider .

---

4. GB/T 42272-2022 Bewertung der photokatalytischen Leistung von Nanomaterialien

Titel: Bewertung der photokatalytischen Leistung von Nanomaterialien

Veröffentlichungsdatum: 30.12.2022

Datum des Inkrafttretens: 01.07.2023

Status: Aktuell

Geltungsbereich

Diese Norm legt die Bewertungsmethode für die photokatalytische Leistung von Nanomaterialien (wie Nano- WO_3) fest , einschließlich der Bestimmung der Bandlücke, der photokatalytischen Abbaueffizienz und des Zyklenstabilitätstests, und ist auf Photokatalysatoren zur Wasseraufbereitung und Luftreinigung anwendbar.

Hauptinhalt

Begriffe und Definitionen

Photokatalytische Leistung: die Fähigkeit eines Materials, Oxidations- oder Reduktionsreaktionen unter Licht zu katalysieren.

Bandlücke (Eg): Die Energiedifferenz zwischen dem Leitungsband und dem Valenzband (eV).

Testmethoden

Bandlückenbestimmung

Instrument: UV- Vis- Spektrophotometer (diffuser Reflexionsmodus, 200–800 nm).

Probenvorbereitung: 50–100 mg Pulver, flach in die Probenvertiefung gedrückt ($BaSO_4$ -Referenz).

Vorgehensweise: Zeichnen Sie das diffuse Reflexionsspektrum auf und berechnen Sie Eg mithilfe der Tauc -Gleichung $(\alpha h \nu)^2 = A(h\nu - Eg)$.

Typischer Wert: 2,4–2,8 eV für Nano-WO_3 .

Abbaueffizienz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Gerät: Photokatalytischer Reaktor (300 W Xenonlampe, AM 1,5G).

Probe: 0,1 g WO_3-Pulver dispergiert in 100 mL Farbstofflösung (z. B. Methylenblau, 10 mg/L).

Vorgehensweise: 1–5 Stunden dem Licht aussetzen, alle 30 Minuten Proben entnehmen, Konzentrationsänderungen per UV-Vis messen und Abbaurate berechnen (> 85 %).

Kinetik: Reaktionsgeschwindigkeitskonstante erster Ordnung k (min^{-1}).

Zyklische Stabilität

Durchführung: Den Abbauversuch 10 Mal wiederholen und nach der Reinigung und Trocknung testen.

Anforderungen: Wirkungsgraderhaltungsrate ≥ 90 %.

Datenverarbeitung

Es werden Daten zu Bandlücke, Degradationsrate, K-Wert und Zyklenstabilität angegeben.

Bewerten Sie die Reaktion auf sichtbares Licht (λ >400 nm).

Vorsichtsmaßnahmen

Kontrollieren Sie die Lichtintensität (100 mW /cm^2).

Vermeiden Sie eine Agglomeration der Probe, da diese die Dispersion beeinträchtigen könnte.

Anwendbarkeitsanalyse

Dieser Standard ist für Photokatalysatoren konzipiert und direkt auf die Leistungsbewertung von Nano-WO_3 (wie Wasserstoffproduktion und Farbstoffabbau) anwendbar.

Bandlücken- und Zyklenstabilitätstests stehen in engem Zusammenhang mit den photokatalytischen Anwendungen von WO_3 .

---

5. GB/T 16483-2008 Inhalt und Reihenfolge der chemischen Sicherheitsdatenblätter

Titel: Inhalt und Reihenfolge der Angaben im Sicherheitsdatenblatt für Chemikalien

Veröffentlichungsdatum: 04.06.2008

Datum des Inkrafttretens: 01.01.2009

Status: Aktuell

Geltungsbereich

Diese Norm legt 16 Punkte und Schreibanforderungen für das Sicherheitsdatenblatt (SDS/MSDS) von Chemikalien (wie Nano -WO_3) fest und ist auf die Herstellung, den Transport und die Verwendung von Chemikalien anwendbar.

Hauptinhalt

16 Artikel

Chemische und Firmenidentifikation: Name (Nano-WO_3) , CAS-Nummer (1314-35-8), Lieferanteninformationen.

Gefahrenübersicht: GHS-Klassifizierung (z. B. leichte Reizung), Gefahrenhinweise (H333: Kann beim Einatmen gesundheitsschädlich sein).

Informationen zu Zusammensetzung/Inhaltsstoffen: WO_3 ≥99,5 %, Verunreinigungen <0,5 %.

Erste-Hilfe-Maßnahmen: Bei Einatmen in einen belüfteten Bereich bringen und die Augen 15 Minuten lang spülen.

zur Brandbekämpfung : Verwenden Sie zum Löschen des Feuers Trockenpulver oder Sand, kein Wasser.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Notfallbehandlung bei Leckagen: Mit einem Staubsauger aufsaugen, um Staubverbreitung zu vermeiden.
Handhabung und Lagerung: Unter Belüftung handhaben und an einem verschlossenen Ort lagern (<30 °C, relative Luftfeuchtigkeit <50 %).
Expositionskontrolle/persönlicher Schutz: N95-Maske, Nitrilhandschuhe, Grenzwert 5 mg/m³.
Physikalische und chemische Eigenschaften: Dichte 7,16 g/cm³ , Schmelzpunkt 1472°C.
Stabilität und Reaktivität: Zersetzt sich bei hohen Temperaturen zu WO_x .
Toxikologische Informationen: LD_{50} >2000 mg/kg (Maus).
Ökologische Informationen: Geringe Wasserlöslichkeit (<0,1 mg/l), keine akute Ökotoxizität.
Entsorgung: Verschließen und einer fachgerechten Entsorgung übergeben.
Versandinformationen: Stückgut, ungefährliche Güter.
Vorschrifteninformationen: Nicht im Katalog gefährlicher Chemikalien enthalten.
Sonstige Angaben: Erstellungsdatum, Revisionshinweise.
Anforderungen schreiben
Die Daten sind genau und entsprechen der 9. Revision des GHS.
Stellen Sie chinesische und erforderliche Fremdsprachenversionen bereit.
Anwendbarkeitsanalyse
Diese Norm ist indirekt auf das Sicherheitsmanagement von Nano-WO_3 anwendbar und bietet MSDS-Vorlagen, um einen sicheren Transport und eine sichere Verwendung zu gewährleisten.
Der Schwerpunkt auf Staubschutz hängt mit den Nanoeigenschaften von WO_3 zusammen .

Weitere relevante Normen

Die folgenden Normen gelten nicht spezifisch für Nano-WO_3 , können aber indirekt auf dessen Prüfung und Bewertung angewendet werden:
GB/T 13221-2004 Charakterisierung von Nanopulvern - Transmissionselektronenmikroskopie
Anwendungsbereich: TEM wird zur Bestimmung der Morphologie und Partikelgröße von Nanopulvern (wie WO_3) verwendet , mit einer Vergrößerung von >50.000× und einer Anzahl von >100 Partikeln.
Anwendbarkeit: Im Einklang mit der TEM-Methode von GB/T 19590-2020, geeignet für die WO_3-Mikrostrukturanalyse.
GB/T 30452-2013 Analyse der chemischen Oberflächenzusammensetzung von Nanomaterialien – Röntgen-Photoelektronenspektroskopie die Oberflächenelemente und Oxidationszustände von Nanomaterialien (wie WO_3) mit einer Nachweisgrenze von <0,1 Atom-%.
Anwendbarkeit: Kann zur Analyse des W^{6+}/W^{5+}-Verhältnisses und von Sauerstoffleerstellen in WO_3 verwendet werden .
GB/T 21865-2008 Testmethoden für optische Eigenschaften von Nanomaterialien
Anwendungsbereich: Spezifiziert die UV -Vis- Bestimmung optischer Eigenschaften von Nanomaterialien (z. B. Bandlücke, Absorptionskante). Anwendbar auf WO_3 (2,4-2,8 eV).
Anwendbarkeit: In Übereinstimmung mit der Bandlückentestmethode von GB/T 42272-2022.

Zusammenfassung und Analyse chinesischer Standards

Abdeckung

Spezieller Standard: GB/T 32698-2016 ist der Kernstandard von Nano-WO_3 , der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Materialspezifikationen und Testmethoden festlegt.

Allgemeine Tests: GB/T 19590-2020, GB/T 36081-2018 usw. bieten standardisierte Methoden für Partikelgröße und spezifische Oberfläche.

Anwendungsbewertung: GB/T 42272-2022 konzentriert sich auf die photokatalytische Leistung und unterstützt indirekt andere Anwendungen (wie Sensoren).

Sicherheitsspezifikation: GB/T 16483-2008 bietet einen SDS-Rahmen, um eine sichere Verwendung zu gewährleisten.

Technische Details

Partikelgröße: 10–100 nm, entspricht internationalen Standards (ISO 13320).

Spezifische Oberfläche: ≥50 m^2/g, was den hohen Aktivitätsbedarf von Nano-WO_3 widerspiegelt .

Photokatalyse: Bandlücke 2,4–2,8 eV, Abbaurate >85 %, Schwerpunkt auf Praktikabilität.

Mängel und Trends

Spezifische Standards für die Toxizität, Sicherheit und Umweltauswirkungen von Nano-WO_3 , und es sollte auf internationale Standards (wie ISO 19749) verwiesen werden.

Trend: Chinesische Standards orientieren sich zunehmend an internationalen Standards (z. B. entspricht die BET-Methode ISO 9277) und in Zukunft können neue Sicherheitsnormen hinzukommen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Anhang E: Nano-Wolframoxid – mehrsprachige Tabelle auf Chinesisch, Englisch, Japanisch und Koreanisch

Nano-Wolframoxid (Nano-WO_3) ist ein multifunktionales Nanomaterial, dessen Forschung und Anwendung mehrere Disziplinen und internationalen Austausch umfasst. Das folgende mehrsprachige Glossar basiert auf wissenschaftlicher Literatur, technischen Standards (wie GB/T 32698-2016, ISO/TS 80004-1) und gängigen Fachbegriffen und umfasst vier Sprachen: Chinesisch, Englisch, Japanisch und Koreanisch. Es ist präzise und eignet sich für wissenschaftliche Forschung, Patente und Industrialisierungsszenarien.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tabelle E-1: Mehrsprachige Tabelle zu Nano-Wolframoxid

Materialien und Grundbegriffe

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Nano-Wolframoxid	Nano-Wolframoxid	Nana angesäuert タングステン	27.03.2018	Nanoform von WO_3 , Partikelgröße beträgt üblicherweise 1–100 nm.
Wolframtrioxid	Wolframtrioxid	Dreifachversäuerung Tangusten	Der	WO_3 , Molekulargewicht 231,84 g/mol.
Nanomaterialien	Nanomaterialien	Nanomaterialien	2	Materialien mit mindestens einer Abmessung kleiner als 100 nm.
Wolframoxid	Wolframoxid	Versauerung Tangusten	Der	im Allgemeinen auf WO_x, wobei x 2, 2,9, 3 usw. sein kann.
Halbleiter	Halbleiter	Halbleiter	2	WO_3 , Bandlücke 2,4-2,8 eV.
Kristalline Phase	Kristallphase	Kristalline Phase	Koreanisch	Wie beispielsweise die monokline Phase und die orthorhombische Phase, die die Leistung von WO_3 beeinflussen .

Physikalische und chemische Eigenschaften

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Partikelgröße	Partikelgröße	Partikelgröße	입자 크기	Die Größe von Nano-WO_3 beträgt üblicherweise 10–100 nm.
Spezifische Oberfläche	Spezifische Oberfläche	Spezifische Oberfläche	2	Oberfläche pro Masseneinheit, 50–200 m^2/g.
Bandlücke	Bandlücke	Bandlücke	100 %	von WO_3 , 2,4-2,8 eV.
Dichte	Dichte	Dichte	밀도	WO_3 beträgt 7,16 g/cm^3 und ist auf Nanoebene etwas niedriger.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Schmelzpunkt	Schmelzpunkt	Schmelzpunkt	용융젖	WO_3 beträgt 1472 °C und kann im Nanobereich abnehmen.
Sauerstoff-Leerstellen	Sauerstoffleerstelle	Sauerstoffmangel	산소 공극	Beeinflusst die katalytischen und elektrischen Eigenschaften von WO_3 .
Leitfähigkeit	Leitfähigkeit	Elektrische Leitfähigkeit	2	Nano-WO_3 beträgt 10^{-3} -10^{-1} S/cm.
Lichtabsorptionskante	Optische Absorptionskante	Lichtabsorptionsende	광흡수 경계	WO_3 liegt bei 460–500 nm und kann nach Dotierung rotverschoben werden.

Zubereitung

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Hydrothermale Methode	Hydrothermale Methode	Hydrothermale Methode	2 Sterne	Herstellung von Nano-WO_3 durch eine wässrige Lösung mit hoher Temperatur und hohem Druck .
Solvothermale Methode	Solvothermale Methode	Lösungsmittelthermische Methode	2 Sterne	Zur Herstellung von WO_3 werden organische Lösungsmittel wie Ethanol verwendet .
Niederschlagsmethode	Niederschlagsmethode	Shen Dian Fa	2	$_3$ wurde durch chemische Reaktionsfällung hergestellt .
Aufdampfung	Aufdampfung	Luftverdampfung	Teil 2	Wie etwa CVD, Herstellung von WO_3-Dünnfilmen oder Nanopartikeln.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Sol-Gel-Verfahren	Sol-Gel-Verfahren	Sol-Gel-Verfahren	K - Kung Fu	$_3$ durch Sol -zu-Gel -Transformation.
Mikrowellenunterstützte Methode	Mikrowellenunterstützte Methode	Mikrowellen-Unterstützungsmethode	Die schönsten 2	Mikrowellenerhitzung beschleunigt die WO_3-Synthese.
Vorlagenmethode	Vorlagenmethode	Tenplate -Methode	템플릿법	Verwenden Sie AAO und andere Vorlagen, um die WO_3- Morphologie zu steuern.

Prüftechnik

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Röntgenbeugung	Röntgenbeugung (XRD)	Röntgen-Foldback	X 회절	Bestimmen Sie die Kristallphase und Korngröße von WO_3 .
Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR)	フーリエ変Infrarotspektroskopie	푸리에 변환 적외선 분광법	Analysieren Sie die chemischen Bindungen von WO_3 (z . B. WO).
Rasterelektronenmikroskopie	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	Rasterelektronenmikroskop	Der	Beobachten Sie die Oberflächenmorphologie von WO_3 .
Transmissionselektronenmikroskopie	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	Durch das Elektronenmikroskop	Der	Analysieren Sie die Mikrostruktur und das Gitter von WO_3 .
UV-Vis-Spektroskopie	UV-Vis-Spektroskopie (UV-Vis)	UV-Vis-Spektroskopie	Das Beste - Das	Bestimmen Sie die Bandlücke und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

			Beste 분광법	Absorptionskante von WO_3 .
Bestimmung der spezifischen Oberfläche	BET-Oberflächenmessung	BET-Oberflächenbestimmung	BET-Spieler 측정	Die spezifische Oberfläche von WO_3 wurde mit der N_2-Adsorptionsmethode gemessen .
Röntgen-Photoelektronenspektroskopie	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie	X 광전자 분광법	Analysieren Sie den chemischen Oberflächenzustand von WO_3 (z . B. W^{6+} / W^{5+}) .

Anwendungsbereiche

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Photokatalysator	Photokatalysator	Photokatalysator	광촉매	WO_3 wird zum Abbau von Schadstoffen oder zur Herstellung von Wasserstoff verwendet .
Elektrochrom	Elektrochromie	エレクトロクロミズム	2	von WO_3 in intelligenten Fenstern.
Gassensor	Gassensor	Gaszentrum	Koreanisch 센서	WO_3 erkennt Gase wie NO_2 und CO.
Materialien zur Energiespeicherung	Energiespeichermaterial	Energiespeichermaterialien	2 2 Tage	WO_3 wird in Superkondensatoren oder Batterien verwendet.
Intelligentes Fenster	Intelligentes Fenster	Smator	스마트 창	WO_3-Film reguliert Lichtdurchlässigkeit und Wärme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Schadstoffabbau	Schadstoffabbau	Abbau von Schadstoffen	Das 분해	WO_3 photokatalytischer Abbau organischer Stoffe.
Wasserstoffproduktion	Wasserstoffproduktion	Wasserstoffproduktion	2 Tage	WO_3 zersetzt Wasser photokatalytisch und erzeugt Wasserstoff.

Andere verwandte Begriffe

Chinesisch (CN)	Englisch (EN)	Japanisch (JP)	Koreanisch (KR)	veranschaulichen
Doping	Doping	Doppin	도핑	Beispielsweise kann eine N- und Ag-Dotierung von WO_3 die Leistung optimieren.
Verbundwerkstoffe	Verbundwerkstoff	Verbundwerkstoffe	복합재료	Wie WO_3 / TiO_2, wodurch die photokatalytische Effizienz verbessert wird.
Nanopartikel	Nanopartikel	Nanopartikel	나노입자	WO_3 , 10-50 nm.
Nanodrähte	Nanodrähte	Nanowaya	2	WO_3 hat einen Durchmesser von 20–30 nm.
Nanoblätter	Nanoblatt	Nanosität	2	WO_3 , Dicke 1-5 nm.
Quantenpunkte	Quantenpunkt	Quantenpunkt	2	von WO_3, <10 nm.
Zyklische Stabilität	Fahrradstabilität	Zyklenfestigkeit	Folge 2	von WO_3 bei wiederholtem Gebrauch.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO_3)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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 (WO_3)

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

High purity: WO_3 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 (WO_3) 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 (WO_3) Packaging and Warranty

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

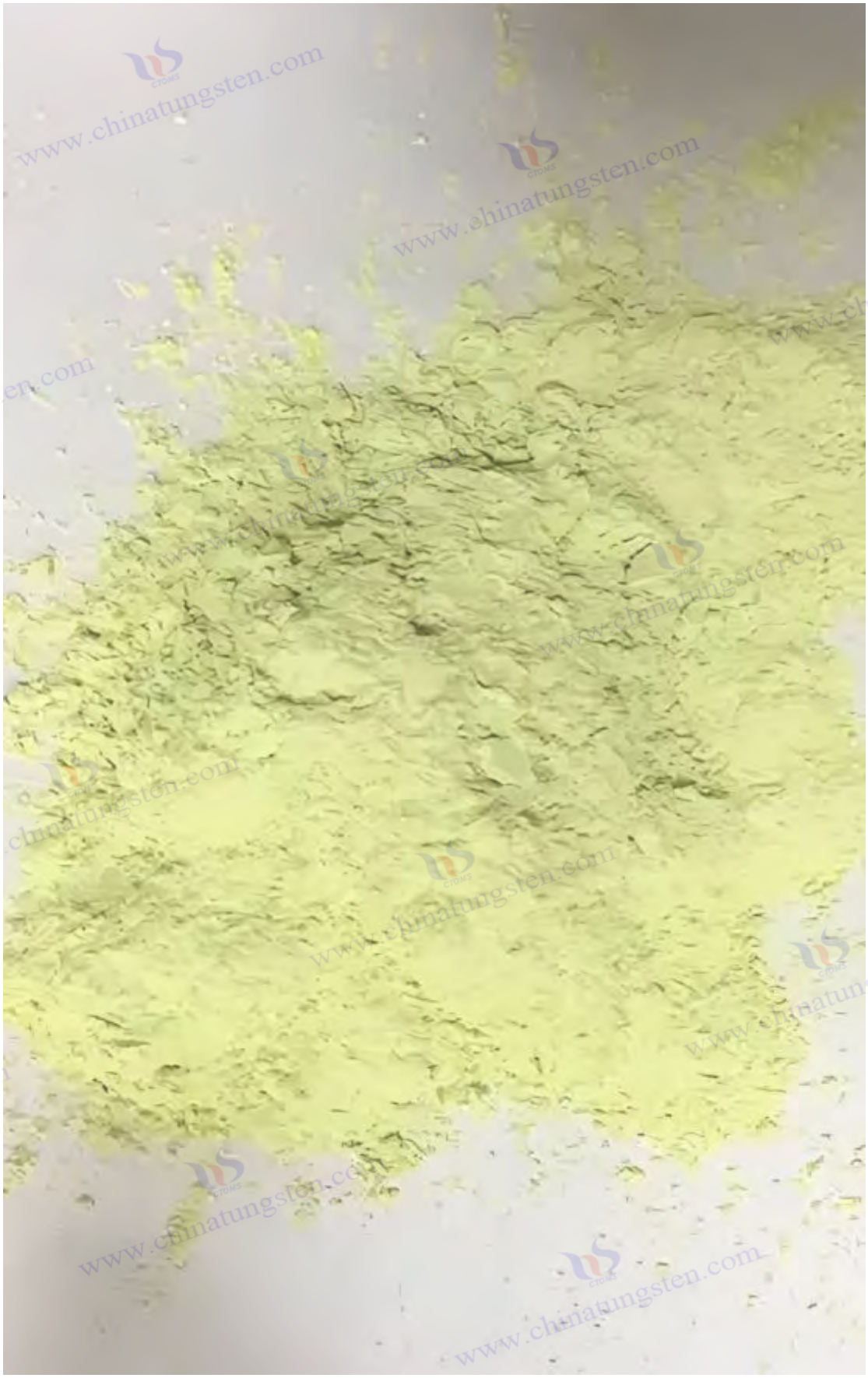
Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO_3) 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© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved