

تولید فتوالکتروشیمیایی هیدروژن از شکافت آب

روین و گردآوری

دکتر رضا پوراعتدال

استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر

زینب کرمی

سرشناسه:	پوراعتدال، حمیدرضا، ۱۳۴۶ -
عنوان و نام پدیدآور:	تولید فتوالکتروشیمیایی هیدروژن از شکافت آب/ تدوین و گردآوری حمیدرضا پوراعتدال، زینب کرمی
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری:	۳۳۲، ۵ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۷۷۳۶-۶۸-۵
وضعیت فهرست نویسی:	فیبا.
یادداشت:	وژنامه.
یادداشت:	کتابنامه.
موضوع:	آب- الکترولیز.
موضوع:	هیدروژن
موضوع:	الکتروشیمی نواری
موضوع:	کرمی، زینب، ۱۳۷۲
شماره افزوده:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات.
رده بندی کنگره:	۱۳۹۷ ت۹/پ۲۵۹ TP
رده بندی دیویی:	۳۶۳۷
کتابشناسی ملی:	۵۵۰۳۵۰۵



سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران

عنوان کتاب: تولید فتوالکتروشیمیایی هیدروژن از شکافت آب
تدوین و گردآوری: حمیدرضا پوراعتدال - زینب کرمی
ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد: زینب کرمی
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه آرایی رایانه ای: امین پژوهش جهرمی
ویراستار ادبی: امین پژوهش جهرمی
شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ: سال ۱۳۹۷
قیمت: ۴۴۰۰۰۰ ال

ISBN: 978-600-7736-68-5

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.
آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، معاونت پژوهش و فناوری، مدیریت دانش،
انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

پیشگفتار

کتاب «تولید فوتوالکتروشیمیایی هیدروژن از شکافت آب» مجموعه‌ای گردآوری و تدوین شده در زمینه تولید هیدروژن از فرآیند شکافت آب و به روش فوتوالکتروشیمیایی به عنوان منبع انرژی است. یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نویسنده، تهیه، مشخصه‌یابی و کاربرد مواد فوتوکاتالیستی است که با استفاده از منبع تابش همانند نور خورشید بتواند فرآیند شیمیایی را شروع و تسریع نماید. حذف آلاینده‌های زیست محیطی از آب و پساب، یکی از کاربردهای این دسته از مواد است. حاصل برخی از تحقیقات این کتاب در کتابی تحت عنوان «تخریب فوتوکاتالیستی آلاینده‌های شیمیایی»، به صورت کتاب الکترونیک به چاپ رسیده است. با این توجه که یکی از اجزای سلول فوتوالکتروشیمیایی فوتوالکترود است که از مواد فوتوکاتالیستی تهیه می‌شود، نویسندگان تلاش نمودند یکی دیگر از مهم‌ترین کاربردهای مواد فوتوکاتالیستی را در قالب این کتاب به معرض دید خوانندگان قرار دهند. این کاربرد مهم مواد فوتوکاتالیستی در قالب فوتوالکترود و به عنوان بخشی از سلول فوتوالکتروشیمیایی، انجام واکنش شکافت آب و در نتیجه تولید هیدروژن است. اهمیت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی با مصرف سوخت‌های فسیلی را جایگزینی تولید، ذخیره‌سازی و مصرف هیدروژن به عنوان منبع انرژی جایگزین، از جمله انگیزه‌های است که امروزه باعث شده تحقیقات گسترده‌ای درباره تولید هیدروژن از منابع مقرون به صرفه مانند آب، صورت پذیرد. در این کتاب، سعی شده است با مرور

منابع و مراجع مختلف علمی- پژوهشی بین‌المللی، اطلاعات مفیدی در مورد تولید هیدروژن به روش شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب، گردآوری و تدوین شود.

کتاب حاضر در شش فصل تهیه شده و سعی دارد مخاطبین را به مبانی علمی، کاربردها، تحلیل اقتصادی و آینده-پژوهی این زمینه تحقیقاتی آشنا کند. فصل نخست، مقدمه‌ای مشتمل بر مباحثی درباره چالش انرژی در عصر امروز، مبانی علمی فرآیند شکافت آب و تعاریف و استانداردها در فرآیند فوتوالکتروشیمیایی است. در فصل دوم، خنثی‌کننده با اصول سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی، چگونگی انجام فرآیند و مشخصه‌ای یک سلول آشنا می‌شود. در فصل سوم، که ادامه فصل دوم است، با مبانی علمی اندازه‌دهی‌های فوتوالکتروشیمیایی و اجزای مختلف سلول فوتوالکتروشیمیایی، به‌طور مفصل آشنا می‌شویم. فصل چهارم به چگونگی تهیه سامانه‌های چندسلولی برای فرآیند شکافت آب، مبانی و مشخصه‌های علمی این سامانه‌ها می‌پردازد. برخی از اطلاعات تجربی حاصل از تحقیقات، مختلف در زمینه شکافت آب به روش فوتوالکتروشیمیایی و تولید هیدروژن، در فصل پنجم گردآوری شده است. سرانجام در فصل ششم، خوانندگان، با دیدگاه‌های اقتصادی و آینده‌پژوهی در حوزه فوتوالکترولیز آب آشنا می‌شوند.

در پایان، نویسندگان، از معاونت پژوهش و فناوری، مجموعه انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر و به‌ویژه جناب آقای دکتر امین پژوهش، چهره به عنوان ویراستار ادبی این کتاب (و سه کتاب دیگر نویسنده) تقدیر و تشکر می‌کنند. امید است این کتاب بتواند اطلاعات باارزشی در اختیار پژوهشگران و دانشجویان در حوزه‌های مرتبط با هیدروژن، مواد فوتوکاتالیست و سامانه‌های فوتوالکتروشیمیایی قرار دهد.

دکتر حمید رضا پوراعتدال

پاییز یک‌هزار و سیصد و نود و هفت

فهرست مطالب

فصل نخست: مقدمه	۳
۱-۱- چالش انرژی	۳
۱-۲- منابع انرژی پایدار	۵
۳-۱- خورشید تا سوخت	۶
۴-۱- ریزش بار به هیدروژن از انرژی خورشیدی	۱۰
۵-۱- معیارهای شکست فوتوالکتروشیمیایی آب	۱۰
۶-۱- مواد برای تجهیز PEC	۱۷
۷-۱- تعاریف کارایی PEC	۱۹
۱-۷-۱- تعریف کارایی برای سولول	۲۱
۲-۷-۱- بازده‌های تشخیصی	۲۴
۸-۱- استانداردهای نیم سل	۳۰
۹-۱- خلاصه‌ای از تعاریف کارایی	۳۱
۱۰-۱- فلو چارت/نمودار تعیین مشخصات PEC	۳۲
مراجع	۳۴
فصل دوم: اصول سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی	۲۵
۱-۲- سلول فوتوالکتروشیمیایی	۲۵
۲-۲- مواد نیمه‌هادی فوتوالکترودها	۲۷
۳-۲- حامل‌های بار و آلاینده کردن	۳۴
۴-۲- شیمی نقص بلور	۳۶

- ۳۷..... ۲-۴-۱- آلاییده‌های اکسید فلزی.....
- ۳۸..... ۲-۴-۲- سطوح انرژی آلاییده‌کننده‌ها.....
- ۴۰..... ۲-۴-۳- تعادل در نقص بلور.....
- ۴۰..... ۲-۴-۴- آلاییده شدن مخلوط اکسیدهای فلزی.....
- ۴۱..... ۲-۵- فضای بارها و خم شدن نوار.....
- ۴۴..... ۲-۶- اتصال مایع - نیمه‌هادی.....
- ۴۴..... ۲-۶-۱- هیدروکسیله شدن سطح.....
- ۴۵..... ۲-۶-۲- فصل مشترک نیمه‌هادی / الکترولیت.....
- ۴۷..... ۲-۶-۳- نمودار نوار.....
- ۴۹..... ۲-۴-۱- انتقال یک پتانسیل بایاس.....
- ۵۰..... ۲-۶-۱- وابستگی pH لایه‌های نوار.....
- ۵۳..... ۲-۶-۶- پتانسیل نوار برآمده شده.....
- ۵۴..... ۲-۶-۷- سطح و حالت‌های فصل مشترک.....
- ۵۵..... ۲-۶-۸- انتقال فضایی الکترون.....
- ۵۷..... ۲-۷- سلول فتوالکتروشیمیایی تحت شرایط عمل.....
- ۵۷..... ۲-۷-۱- سطح شبه‌فرمی.....
- ۵۹..... ۲-۷-۲- مشخصه‌های فوتوجریان - انسیت.....
- ۶۰..... ۲-۷-۳- سازوکارهای واکنش.....
- ۶۲..... ۲-۷-۴- فوتو خوردگی.....
- ۶۵..... ۲-۸- بازده‌های انرژی و تبدیل کوانتومی.....
- ۶۸..... ۲-۹- نیازهای فوتوالکتروود و طراحی (پیکربندی) سلول.....
- ۶۸..... ۲-۹-۱- نیازهای طراحی.....
- ۷۲..... ۲-۹-۲- الکترودهای نانو ساختار.....
- ۷۶..... ۲-۹-۳- تنظیمات سلول PEC.....
- ۷۹..... مراجع.....

فصل سوم: اندازه‌گیری‌های فوتوالکتروشیمیایی ۸۷

۱-۳- مقدمه	۸۷
۲-۳- سلول فوتوالکتروشیمیایی	۸۸
۱-۲-۳- طراحی سلول	۸۹
۲-۲-۳- نمونه فوتوالکتروود و بستر آن	۹۲
۳-۲-۳- الکتروود مزدوج	۹۵
۴-۲-۳- الکتروود مرجع	۹۶
۵-۲-۳- الکتروولیت	۹۹
۳-۳- برپایی اندازه‌گیری‌های فوتوالکتروشیمیایی	۱۰۳
۱-۳-۳- اندازه‌گیری شبیه‌سازی شده نور خورشید	۱۰۴
۳-۳- اندازه‌گیری‌های وابسته به طول موج	۱۰۴
۳-۳-۲- تانس استات	۱۰۷
۳-۳-۳- شبیه‌سازی نور خورشید	۱۱۱
۵-۳-۳- فصل مغناطیسی	۱۱۶
۴-۳- اندازه‌گیری فوتوجریان - واز	۱۲۰
۱-۴-۳- جریان تاریکی - باطری - محطه شروع فوتوجریان	۱۲۱
۲-۴-۳- بازده‌های شکافت آب	۱۲۲
۳-۴-۳- تابش از طرف روبه‌رو و از طرف پشت	۱۲۴
۴-۴-۳- انتقالات فوتوجریان	۱۲۵
۵-۳- طیف رفتاری فوتوجریان	۱۲۷
۱-۵-۳- بازده‌های کوانتومی	۱۲۸
۲-۵-۳- برون‌یابی به عملکرد AM1.5	۱۳۰
۶-۳- اندازه‌گیری‌های امپدانس و مت - شاتکی	۱۳۰
۱-۶-۳- امپدانس فوتوالکتروود لایه نازک	۱۳۰
۲-۶-۳- منحنی مت - شاتکی: یک مثال	۱۳۳
۳-۶-۳- آنالیزکننده پاسخ فرکانس	۱۳۴

۱۳۵	۳-۶-۴- اندازه گیری پارامترها.....
۱۳۶	۳-۶-۵- شناخت محدودیت های دستگاهی.....
۱۳۶	۳-۶-۶- الکترودهای مرجع و نیمه مرجع.....
۱۳۷	۳-۶-۷- محدودیت های نمونه و کاربردها.....
۱۴۱	مراجع.....
	فصل چهارم: سامانه های چندسلولی برای شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب .. ۱۴۷
۱۴۷	۱-۱- مقدمه.....
۱۵۱	۲-۱- تبدیل انرژی خورشیدی به هیدروژن.....
۱۵۱	۴-۲-۱- ارزش هیدروژن.....
۱۵۴	۴-۲-۲- جمع خورشیدی.....
۱۵۷	۴-۳-۱- مایه های تبدیل انرژی خورشید.....
۱۵۹	۴-۲-۴- طرح های هیدروژن فوتوالکتروشیمیایی.....
۱۶۶	۴-۲-۵- آنالیزهای سی-آر-آدی.....
۱۷۰	۴-۳-۳- شکافت فوتوالکتر شیمیایی آب.....
۱۷۰	۴-۳-۱- واکنش های شکافت آب در PEC.....
۱۷۳	۴-۳-۲- تلفات شکافت آب در PEC.....
۱۷۵	۴-۳-۳- بهره وری تبدیل انرژی خورشیدی به هیدروژن PEC.....
۱۷۹	۴-۴-۱- دستگاه های نیمه هادی PEC تک سلولی.....
۱۷۹	۴-۴-۱- آرایش اتصال الکترودها.....
۱۸۳	۴-۴-۲- پاسخ به تابش.....
۱۸۵	۴-۴-۳- فوتو پتانسیل قابل استفاده.....
۱۸۹	۴-۴-۴- کاهش تلفات.....
۱۹۱	۴-۴-۵- محدودیت های بهره وری دستگاه های تک سلولی.....
۱۹۳	۴-۴-۶- نمونه های از تک سلولی.....
۱۹۴	۴-۵-۱- سامانه های چندسلولی.....
۱۹۵	۴-۵-۱- دسته های چندسلولی.....

۱۹۶.....	۲-۵-۴- ملاحظات نوری
۲۰۱.....	۳-۵-۴- روابط جریان و ولتاژ
۲۰۷.....	۴-۵-۴- چالش های عمومی طراحی
۲۰۸.....	۵-۵-۴- چندسلولی های فوتوولتائیک
۲۱۰.....	۶-۵-۴- نکاتی برای طراحی PEC چندسلولی
۲۱۲.....	۷-۵-۴- محدودیت های بهره وری سامانه های چندسلولی
۲۱۶.....	۶-۴- طرح های دستگاه چندسلولی PEC
۲۱۷.....	۴-۶-۱- دستگاه های الکترولیز- PV چندسلولی
۲۱۹.....	۷-۶-۲- فوتوالکترودهای دو سلولی PEC-PEC
۲۱۹.....	۳-۶-۳- فوتوالکترودهای هیبریدی دو سلولی PV-PEC
۲۲۲.....	۴-۶-۳- فوتوالکترودهای هیبریدی سه سلولی PV-PV-PEC
۲۲۵.....	۴-۶-۵- Z-اج برای فوتوکاتالیست
۲۲۷.....	مراجع
۲۳۵.....	فصل پنجم: بررسی های تجربی
۲۳۵.....	۵-۱-۱- آماده سازی الکترود
۲۳۵.....	۵-۱-۱-۱- ملاحظات تهیه الکترود
۲۳۵.....	۵-۱-۲- مواد نیمه هادی فعال نوری
۲۳۹.....	۵-۱-۳- ملاحظات بستر
۲۴۳.....	۵-۱-۴- اتصالات الکترود PEC
۲۴۷.....	۵-۱-۵- تعیین مساحت سطح الکترود
۲۴۹.....	۵-۲-۱- تنظیمات و اتصالات سلول برای پیکربندی دو یا سه الکترودی
۲۴۹.....	۵-۲-۱-۱- تنظیمات پایه ای طراحی فوتوالکترود شیمیایی
۲۵۱.....	۵-۲-۲- انتخاب الکترود مزدوج
۲۵۲.....	۵-۲-۳- انتخاب الکترود مرجع
۲۵۴.....	۵-۲-۴- انتخاب الکترولیت
۲۵۷.....	۵-۲-۵- اتصال الکترود به پتانسیو استات

۲۵۷	۵-۲-۶- روش های آزمایش دستگاه
۲۵۹	۵-۳-۳- اصلاح سطح کاتالیست
۲۵۹	۵-۳-۱- مبنای کاتالیزوری سطح
۲۶۰	۵-۳-۲- انتخاب کاتالیست
۲۶۱	۵-۳-۳- بررسی های ریخت شناختی
۲۶۲	۵-۳-۴- روش های رسوبدهی
۲۶۵	۵-۳-۵- توصیف مشخصات الکتریکی
۲۶۶	۵- استاندارد های طیفی
۲۶۶	۵-۴-۱- طیف مرجع AM 1.5 G
۲۷۲	۵-۲- داده های مرجع
۲۷۴	مراجع

فصل ششم: دیدگاه های آینده ای و آینده پژوهی در فوتوالکترولیز آب . ۲۸۲

۲۸۲	۶-۱- مقدمه
۲۸۳	۶-۲- نیاز به سوخت
۲۸۴	۶-۳- چالش های تجاری
۲۸۵	۶-۴- ذخیره انرژی خورشیدی: چالش جدید و راه هیدروژن
۲۸۶	۶-۵- نتایج تحقیقات PEC
۲۹۲	۶-۶- نکات مهم دیگر درباره PEC
۲۹۴	۶-۷- آینده پژوهی در حوزه PEC
۲۹۶	۶-۷-۱- نانو مواد
۲۹۹	۶-۷-۲- آرایش های نانو حفره و نانولوله با آندایزینگ
۳۰۹	۶-۷-۳- نانو فوتونیک ها
۳۱۵	مراجع

۳۱۹ واژه نامه انگلیسی به فارسی

۳۲۷ واژه نامه فارسی به انگلیسی