کاربرد نیمهرساناهای اکسیدی نانوساختار (TiO₂، CnO ، TiO₂، Fe₂O₃، TiO₂ و ...) برای شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب

مهری مقصودی*، شاهین خامنه اصل

گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چكیده: شكافت فوتوالكتروشیمیایی و فوتوكاتالیستی آب با استفاده از نیمهرساناهای اكسیدی نانوساختار یكی از روشهای موثر برای ایجاد هیدروژن است. نیمهرساناهای اكسیدی به عنوان فوتوالكترود نقش مهمی در فعال شدن فر آیندهای احیا و اكسیداسیون شیمیایی در حضور نور دارند. با جذب نور توسط فوتوالكترودها الكترونها تهییج شده و از طریق واكنش كاهش- اكسایش، جفت الكترون- حفره ایجاد میشود. جداسازی بار (جفت الكترون- حفره) و انتقال آن در شكافت فوتوالكتروشیمیایی و فوتوكاتالیستی آب موضوع مهم و اساسی است. نانومواد نسبت سطح به حجم بالایی دارند كه جداسازی بار را تسهیل كرده و از بازتر كیب جفت الكترون- حفره جلوگیری می كنند. عوامل موثر بر مكانیزم شكافت آب خصوصیات الكترونی و ساختاری فوتوكاتالیست و فوتوالكترود مورد استفاده است، به همین خاطر بطور گسترده مورد تحقیق و پژوهش قرار می گیرند. در ایس مقاله مهمترین و پركاربردترین نیمهرساناهای اكسیدی و بهبودهای اخیر این نیمهرساناها گزارش شده است.

۱- مقدمه

متأسفانه بیشتر منابع انرژی ما از منابع متداول غنی از کربن حاصل می شوند که بتدریج کاهش مییابند و تأثیر منفی بر طبیعت میگذارند. بنابراین میزان جستجوی راه حل این مشکل در منابع تجدیدپذیر بسیار زیاد است. شکافت آب با استفاده از نور خورشید برای تولید هیدروژن (به عنوان منبع انرژی پاک، پایدار و فراوان) یکی از گزینهها برای تولید انرژی است [۱، ۲]. در این مورد، اهمیت تجهیزات و دستگاههای جمعآوری نور خورشید برای استفاده از انرژی پایدار افزایش می یابد و مصرف سوختهای فسیلی را کاهش میدهد. از این و محققان تحقیق و پژوهش های فراوانی بمنظور طراحي كاتاليست مناسب و بهبود بازده آن انجام دادند بطوريكه تحت تشعشع نور خورشيد بویژه در محدوده مرئی بطور موثری عمل کند [۳، ۴]. برای اولین بار فوجیـ شیما و هونـدا تجزیـه فوتوالکتروکاتالیستی آب روی الکترودهای TiO₂ و پلاتین و تولید اکسیژن و هیـدروژن را گـزارش كردند [۵]. اكسيدهاي فلزي (بصورت منفرد/تركيبي) متداول ترين فوتوكاتاليستهاي مورد مطالعه هستند زیرا علیرغم گاف انرژی وسیع، بیشترین پایداری را دارند. با توجه به توان قوی اکسیداسیون یا احیا (یا هر دو) این اکسیدهای تهییج شده با نور برای شکافت آب بکار میرونـد. تعـداد زیـادی اکسیدهای فلـزی ماننـد SrTiO₃ ،BiVO₄ ،WO₃ ،Fe₂O₃ ،ZnO ،TiO₂ و مـوادی از ایـن قبیـل، بـا مورفولوژیهای مختلفی برای شکافت آب مورد استفاده قرار گرفتهاند [8]. گاف انرژی برخی از فوتوکاتالیستهای نیمهرسانای اکسیدی برای شکافت آب گستردهتـر از ۳ الکتـرون ولـت اسـت از اینرو جذب نور خورشید فقط به محدوده ماوراء بنفش (UV) آن محدود می شود و به بهبود بازده تبدیل کل انرژی خورشیدی نیاز دارند. ساختار نواری انواع نیمهرساناها و پتانسیل های کاهش-اکسایش برای شکافت آب در شکل ۱ نشان داده شده است [۷].



عقالات مرورم

مههنـــدس مهــری مقــصودی، نویسنده مسئول مقاله، دانــشگاه تبریز



شکل ۱- ساختار نواری نیمهرساناها و پتانسیل کاهش- اکسایش برای شکافت آب [۷].

بهبود بازده شکافت آب به مورفولوژی، ساختار و خواص الکترونی فوتوالکترود وابسته است. مواد کریستالی بسیار منظم در مقایسه با مواد آمورف عملکرد بسیار بهتری نشان میدهند. نانومواد را میتوان از نظر ابعاد به نانوساختارهای صفر، یک، دو و سه بعدی طبقهبندی کرد (شکل۲) [۸].



شکل ۲- طبقه بندی انواع نانوساختار مبتنی بر ابعاد نانومقیاس [۸]

نانوساختارهای یک بعدی شامل نانومیله (نانومیله TiO₂ ، نانومیله ZnO و نانومیله WO₃ و WO₃ و WO₃ و WO₃ و WO₃ و WO₃ مناسبی برای فرآیند شکافت آب هستند. ساختار یک ZnO و ...) و نانولوله (نانولوله 2iO₂ ، نانولوله محمد (IO₂ و ...) فوتوالکترودهای مناسبی برای فرآیند شکافت آب هستند. ساختار یک بعدی میزان نفوذ حاملهای بار را در یک جهت افزایش و میزان بازترکیب جفت الکترون – حفره را کاهش میدهند [۹]. نانوساختارهای صفر بعدی (نقاط کوانتومی¹) مانند نقاط کربنی، نقاط کوانتومی CdS و نقاط کوانتومی گرافن و جذب موثر نور مرئی و فعالیت فوتوکاتالیستی بسیار خوبی را نشان میدهند. از این رو زمانی که نیمهرسانا با نقاط کوانتومی گرافن و ... جذب موثر نور مرئی و فعالیت فوتوکاتالیستی بسیار خوبی را نشان میدهند. از این رو زمانی که نیمهرسانا با نقاط کوانتومی دارای گاف انـرژی مناسب آراییده شود، میزان بازترکیب الکترون – حفره را کاهش میده در رو نور مرئی و فعالیت فوتوکاتالیستی بسیار خوبی را نشان میدهند. از این رو زمانی که نیمهرسانا با نقاط کوانتومی دارای گاف انـرژی مناسب آراییده شود، میزان بازترکیب الکترون – حفره دارای گاف انـرژی مناسب آراییده شود کردن گاف انـرژی مناسب بـرای مناسب آراییده شود، میزان بازترکیب الکترون – حفره کاسته می شود [۱۰، ۱۱]. مهمترین مزیت نانوموادهای اکسیدی تنظیم گاف انرژی آنهاست. محدود کردن گاف انـرژی مناسب بـرای شکافت موثر آب برابر با ۲/۲ الکترون ولت است. محدوده وسیعی از نور خورشید کمک میکند. گاف انـرژی مناسب بـرای شکافت موثر آب برابر با ۲/۲ الکترون ولت است. محدوده کـردن گاف انـرژی بـا ورود عوامـل پذیرنـده^۲ و دهنـده^۳ درون نیمهرسانا امکان پذیر است [۱۲].

۲- نقش نیمهرساناهای اکسیدی در شکافت آب

با تابش فوتونهایی با انرژی برابر یا بزرگتر از گاف انرژی نیمهرسانا، جفت الکترون- حفره ایجاد میشود. در مورد الکترود نیمهرسانای نوع n حفرهها در سطح نیمهرسانا با مولکولهای آب واکنش میدهند که منجر به تشکیل مولکول اکسیژن می شود،

¹ quantum dots (QDs) ² acceptor ³ donor

94

فصلنامه

1

ام م

ايران

شماره

٦٢ تابستان

5

مقالات مروربر

در حالی که الکترونها از زیرلایه به الکترود مقابل منتقل میشوند. در الکترود مقابل نیز یون هیدروژن (+H) به مولکول هیدروژن (+H) احیا می شود. در مقابل، الکترود نیمهرسانا از نوع p مولکول های H2 و O را بترتیب در سطح الکترود نیمهرسانا و الکترود (H2) مقابل تولید می کند. طرحواره شکافت فوتوالکتروکاتالیستی آب با استفاده از نیمهرساناهای نوع n و نوع p در شکل ۳ نـشان داده شده است [10]. فوتوالکترود بکار رفته در شکافت آب باید الزامات زیر را برآورده سازد: ۱- جذب موثر نور مرئی به عبارتی گاف مشده است [10]. فوتوالکترود بکار رفته در شکافت آب باید الزامات زیر را برآورده سازد: ۱- جذب موثر نور مرئی به عبارتی گاف انرژی در محدوده ۱۲۶ اکترون ولت باشد، ۲- جداسازی موثر و انتقال سریع جفت الکترون – حفره حاصل از نـور بمنظـور جلوگیری از بازترکیب، ۳- موقعیت مطلوب لبه نوار هدایت و ظرفیت نـسبت بـه پتانـسیل کاهش – اکسایش آب، ۴- پایـداری شیمیایی بالا در الکترولیت و ۵- هزینه پایین. بـه منظـور بهبـود طـول عمـر سیستم PEP، ماده نیمـهرسانا بایـد از پایـداری الکترون از ای در ای برآورده سازد: ۱۰ جذب موثر نور مرئی به عبارتی کـاف انرژی در محدوده ۱۶ تا ۲/۲ الکترون ولت باشد، ۲- جداسازی موثر و انتقال سریع جفت الکترون – حفره حاصل از نـور بمنظـور جلوگیری از بازترکیب، ۳- موقعیت مطلوب لبه نوار هدایت و ظرفیت نـسبت بـه پتانـسیل کـاهش – اکـسایش آب، ۴- پایـداری شیمیایی بالا در الکترولیت و ۵- هزینه پایین. بـه منظـور بهبـود طـول عمـر سیستم PEP، مـاده نیمـهرسـانا بایـد از پایـداری الکتروشیمیایی کافی برخوردار باشد به گونهای که حاملهای بار در سطح آن فقط به واکنشهای شده نیمـهرسانا بایـد از پایـداری واکنش جانبی (یعنی خوردگی الکترود) منجر شوند [۱۴].



شکل ۳- طرحواره شکافت PEC آب با نیمهرساناهای نوع n و نوع p [۱۴]

ساختارهای ناهمگن متشکل از دو یا چند نیمهرسانا و آلایش و حساسسازی نیمهرسانا با عناصر یا ترکیباتی که گاف انرژی محدودتری دارند، منجر به گسترش طیف جذبی به محدوده مرئی و جداسازی موثر حاملهای بار در شکافت آب می شوند. از اینرو ساختارهای موثرتری به شمار میروند و نقش پر رنگ این نوع مواد به خوبی در مقالات اخیر مشهود است [۱۵]. روش های آماده سازی فوتو کاتالیست و فوتوالکترود در شکل ۴ نشان داده شده است. برای آماده سازی الکترود، پیش ماده های نیمهرسانا بطور مستقیم بر روی زیرلایه رسانا ترسیب شده و پس از آن تحت عملیات بعدی قرار می گیرند (روش مستقیم). روش دیگر سنتز پودر نیمهرسانا و سپس ترسیب بر روی زیرلایه است (روش غیرمستقیم) [۷].



(TiO₂) اکسید تیتانیم (-۲

TiO₂ پرکاربردترین ماده برای مطالعات شکافت آب و تولید هیدروژن است. با اینکه TiO₂ بالک کم هزینه و پایدار است اما به

¹ counter

فصلنامه

سرامید ایران شماره ۲۲ تابستان

5

قالات مرورم

دلیل گاف انرژی ۳/۰۳– ۲/۱۸ الکترون ولت، راندمان ضعیف در جذب نور خورشید دارد. در بین انواع نانومواد TiO₂، نانولوله TiO₂ ساختار مناسبی است. اندازه و شکل TiO₂ تاثیر قابل توجهی بر بازده تبدیل دارد. نانولولههای تیتانیای آنیل شده (بلوری) در مقایسه با تیتانیای آمورف جریان نوری بیشتری نشان میدهد. نانولولههای آمورف تیتانیا را میتوان در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد بلوری کرد. نانولوله های منورف جریان نوری بیشتری نشان میدهد. نانولولههای آمورف تیتانیا را میتوان در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد بلوری کرد. نانولوله های منظم با مساحت سطح زیاد، چگالی جریان و در نتیجه میزان هیدروژن بیشتری ایجاد می کنند [۶۶]. در پژوهشی مولوی و همکاران آرایههای نانولولهای TiO₂ را با نیتروژن و کربن آلاییده و سپس با نانوذرات TiO₂ کام TiO₂ از طریق روش سیلا⁴ اصلاح کردند. از این طریق افزایش قابل توجهی در فعالیت فوتوالکتروشیمیایی آرایههای آرایههای TiO₂ دامل شده (بلوری) در عرین نوری ⁴ میان در دمای ۳۰۰ در باز کرد کربن آلاییده و سپس با نانوذرات TiO₂ کام ترکند [۶۸] در طریق روش میلار⁴ اصلاح کردند. از این طریق افزایش قابل توجهی در فعالیت فوتوالکتروشیمیایی آرایههای آرایههای TiO₂ داد بازده ترین⁴ ۲۵ کاری ۲۰۰ تانوزرات TiO₂ داد با بیتروژن و کربن آلاییده و سپس با نانوذرات TiO₂ داد به به طریق روش سیلار⁴ اصلاح کردند. از این طریق افزایش قابل توجهی در فعالیت فوتوالکتروشیمیایی آرایههای ۲iO₂ داد بلوری ۲iO₂ داد بازده تبدیل فوتون به جریان⁴ ۲۸٪ حاصل شد [۱۷].

۲-۲-اکسید روی (ZnO)

نانومواد ZnO بطور گسترده برای کاربرد شکافت فوتوکاتالیستی و فوتوالکتروشیمیایی آب بکار میروند. ZnO از نوع نیمهرسانای n بوده و دارای گاف انرژی ۳/۳ الکترون ولت است و خواص نوری– الکترونی مشابه با TiO₂ است. سطح و ساختار اکسید روی بـر انتقال الکترون در فصل مشترک فوتوالکترود/ الکترولیت تاثیر دارد [۱۸]. در پژوهشی، کانـگ و همکـاران تـاثیر فـصل مـشترک (جامد/ جامد و جامد/ الکترولیت) را بر جذب موثر نور و وضعیت حاملهای بار در شکافت آب بررسی کردند. روشهـای مهندسـی فصل مشترک در فوتوآند ZnO با ساختار ناهمگن در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۵– مهندسی فصل مشترک در فوتوآند با ساختار ناهمگن مبتنی بر ZnO و جزء ثانویه [۱۹]

(Fe₂O₃) هماتیت (Fe₂O₃

هماتیت یکی دیگر از نیمهرساناهای نوع n در فرآیند شکافت آب هست. در مقایسه با سایر مواد، هماتیت دارای گاف انـرژی محدودتری (تقریبا ۲/۱ الکترون ولت) است که باعث جذب ۴۰ درصد نور خورشید می شود. در مقایسه با سایر فوتوآندها، هماتیت علاوه بر سازگاری، فراوانی و کم هزینه بودن در اکثر محیطهای آب دارای پایـداری شـیمیایی عـالی است [۲۰]. میـزان بـالای بازترکیب الکترون– حفره و نفوذ محدود بار و موقعیت تراز ظرفیت هماتیت از معایب آن است. روش سنتز و مورفولوژی هماتیت نقش مهمی در کنترل بازده فوتوالکتروکاتالیست دارند. دما نیـز بـر هـم_اراسـتایی و همتـرازی نانومیلـههـای هماتیت تـاثیر دارد. نانومیلههای بسیار منظم افزایش در پاسخ فوتوالکتروشیمیایی را نشان میدهند که عمدتا میتوان به کـاهش مقاومـت انتقـال بـار درون الکترود و در امتداد فصل مشترک الکترود و الکترولیت نسبت داد [۲۲]. شـارما^۳ و همکـاران روشهـای مختلـف اصـلاح و بهبود هماتیت بخصوص اصلاح سطح را بمنظور دستیابی به جریان نوری و بازده بیشینه معرفی کردند. روشهای اصلاح و شامل کنترل مورفولوژی، آلایش و شکلگیری اتصالات و ساختارهای ناهمگن برای بهبود انتقال بار در الکترولیت/ میران است و مورفولوژی میترک اصلاح و شامل کنترل مورفولوژی، آلایش و شکلگیری اتصالات و ساختارهای ناهمگن برای بهبود انتقال بار در الکترولیت بهبود انتقال بار کنترل مورفولوژی، آلایش و شکاری منزور در استاد و ساختارهای ایر کاری بهبود انتقال بار در الاح و در امتداد فصل مشترک ایمالات و ساختان میترک بهبود هماتیت بخصوص اصلاح سطح را بمنظور دستیابی به جریان نوری و بازده بیشینه معرفی کردند. روشهای اصلاح و شامل کنترل مورفولوژی، آلایش و شکلگیری اتصالات و ساختارهای ناهمگن برای بهبود انتقال بار در بالک و در فصل مشترک

۲−۴− تری اکسید تنگستن (3WO)

نانومواد تری اکسید تنگستن از نوع نیمهرسانای نوع n بوده و دارای گاف انرژی ۲/۵ تا ۲/۷ الکترون ولت است. مزایای WO₃

- ² incident photon to current efficiency (IPCE)
- ³ Sharma
- 69

فصلنامه

1

۔ م

ايران شماره

٦٢ تابستان

5

¹ successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR)

بلورینگی بالا، تخلخل، توانایی جذب ۱۲٪ از تشعشع خورشید و پایداری شیمیایی خوب است. بازده شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب با ۵۵٫۵ را میتوان با استفاده از دوپانتها و کامپوزیتها و ساختارهای ناهمگن بهبود داد. با ایجاد چنین ساختارهایی، عملکرد فوتوالکتروشیمیایی را افزایش میدهند از طرف دیگر میزان بازترکیب جفت الکترون – حفره را کاهش و خاصیت نفوذ و انتقال حاملهای بار را بهبود میبخشند [۲۳، ۲۴]. طی پژوهشی، لی['] و همکاران فوتوالکترود Pi کاهش و کامپراک رای کاه شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب تهیه کرده و آزمایشات PEC را انجام دادند. جریان نوری برابر ۲/۵۹mA/cm² بدست آمد که ۶/۴ برابر الکترود ۵۵۵ است [۲۵].

۳-نتیجهگیری

مقالات مرورم

مواد نانوساختار مبتنی بر اکسید فلزی (TiO2، Tio2، WO3، ،Fe₂O3، Cro و...) به عنوان فوتوالکتروشیمیایی آب بکار میروند. هر یک از این نیمهرساناهای اکسیدی مزایا و معایبی دارند و بمنظور افزایش بازده شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب بکار میروند. هر یک از این نیمهرساناهای اکسیدی مزایا و معایبی دارند و بمنظور افزایش بازده شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب بطور گسترده مورد پژوهش قرار می گیرند. بازده واکنش شکافت آب تحت تاثیر فرآیند انتقال الکترون، گاف انرژی، ساختار نواری و مورفولوژی نیمهرساناها است. با تنظیم سطوح گاف انرژی، میتوان خصوصیات الکترونی ناورد. را فراهم می آورد. گاف انرژی، ساختار نواری و مورفولوژی نیمهرساناها است. با تنظیم سطوح گاف انرژی، میتوان خصوصیات الکترونی نانومواد را تغییر داد. ترکیب نانومواد در نیمهرساناها باعث کاهش گاف انرژی شده و امکان جذب نور بیشتری را فراهم می آورد. انوساختارها بطور موثری بارها را انتقال داده و برای فرآیندهای اکسیداسیون و احیا، الکترونها و حفرات را در فصل مشترک تنوساختارها بطور موثری بارها را انتقال داده و برای فرآیندهای اکسیداسیون و احیا، الکترونها و حفرات را در فصل مشترک آب نانومواد تزریق میکند. در میان مورفولوژیهای مختلف فوتوالکترودها، نانولولهها با مساحت سطح بالا، انتقال حاملهای بار انتقال داده و برای فرآیندهای اکسیداسیون و احیا، الکترونها و حفرات را در فصل مشترک آب انومواد تزریق میکند. در میان مورفولوژیهای مختلف فوتوالکترودها، نانولولهها با مساحت سطح بالا، انتقال حاملهای بار را تسهیل و نرخ واکنش کاهش – اکسایش را افزایش میدهند. بطور کلی، بـرای افـزایش بـازده، فوتوالکترودهای نیمـهرسـانا را میتران را تسهیل و نرخ واکنش کاهش – اکسایش را افزایش میدهند. بطور کلی، بـرای افـزایش بـازده، فوتوالکترودهای نیمـهرسـانا را می تسهیل و نرخ واکنش کاهش – اکسایش را افزایش میدهند. بطور کلی، بـرای افـزایش بـازده، فوتوالکترودهای نیمـهرسانا را سیمی و میتر و میوند آلایش با عناصر فلزی – غیرفازی، کامپوزیتهای اکسیدهای مختلف و از همه مهمتر و مـوثرتر، ایجـاد می ترازهای ناهمگن.

مراجع

- [1] M. G. Walter et al., "Solar water splitting cells," Chemical reviews, vol. 110, no. 11, pp. 6446-6473, 2010.
- [2] J. Qi, W. Zhang, and R. Cao, "Solar to hydrogen energy conversion based on water splitting," Advanced Energy Materials, vol. 8, no. 5, p. 2018, 1701620
- [3] S. K. Saraswat, D. D. Rodene, and R. B. Gupta, "Recent advancements in semiconductor materials for photoelectrochemical water splitting for hydrogen production using visible light," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, pp. 2018, 228-248
- [4] R. Li, "Latest progress in hydrogen production from solar water splitting via photocatalysis, photoelectrochemical, and photovoltaic-photoelectrochemical solutions," Chinese Journal of Catalysis, vol. 38, no. 1, pp. 5-12, 2017.
- [5] A .Fujishima and K. Honda, "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode," nature, vol. 238, no. 5358, pp. 37-38, 1972.
- [6] N. Chouhan, R.-S. Liu, and J. Zhang, Photochemical Water Splitting: Materials and Applications. CRC Press, 2017.
- [7] G. Ma, T. Hisatomi, and K. Domen, "Semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical solar water splitting," in From molecules to materials: Springer, 2015, pp. 1-56.
- [8] S. Kment et al., "Photoanodes based on TiO₂ and α-Fe₂O₃ for solar water splitting-superior role of 1D nanoarchitectures and of combined heterostructures," Chemical Society Reviews, vol. 46, no. 12, pp. 3716-3769, 2017.
- [9] F. Wang, L. Song, H. Zhang, L. Luo, D. Wang, and J. Tang, "One-dimensional metal-oxide nanostructures for solar photocatalytic water-splitting," Journal of Electronic Materials, vol. 46, no. 8, pp. 4716-4724, 2017.
- [10] J. Du et al., "Enhanced charge separation of CuS and CdS quantum-dot-cosensitized porous TiO₂-based photoanodes for photoelectrochemical water splitting," Ceramics International, vol. 44, no. 3, pp. 3099-3106, 2018.
- [11] J. Xie, J. Chen, and C. M. Li, "Self-assembling reduced graphene quantum dots on hematite photoanode for passivating surface states toward significantly improved water splitting," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 10, pp. 7158-7165, 2017.
- [12] Y.-C. Chen, Y.-S. Huang, H. Huang, P.-J. Su, T.-P. Perng, and L.-J. Chen, "Photocatalytic enhancement of hydrogen production in water splitting under simulated solar light by band gap engineering and localized surface plasmon resonance of ZnxCd1-xS nanowires decorated by Au nanoparticles," Nano Energy, vol. 67, p. 104225, 2020.

¹ Li

۷.

- [13] J. Joy, J. Mathew, and S. C. George, "Nanomaterials for photoelectrochemical water splitting-review," international journal of hydrogen energy, vol. 43, no. 10, pp. 4804-4817, 2018.
- [14] S. Choudhary et al., "Nanostructured bilayered thin films in photoelectrochemical water splitting–A review," International journal of hydrogen energy, vol. 37, no. 24, pp. 18713-18730, 2012.
- [15] C. V. Reddy, K. R. Reddy, N. P. Shetti, J. Shim, T. M. Aminabhavi, and D. D. Dionysiou, "Heteronanostructured metal oxide-based hybrid photocatalysts for enhanced photoelectrochemical water splitting–A review," International journal of hydrogen energy, vol. 45, no. 36, pp. 18331-18347, 2020.
- [16] M. Ge et al., "One dimensional TiO2 nanotube photocatalysts for solar water splitting," Advanced Science, vol. 4, no. 1, p. 1600152, 2017.
- [17] M. Mollavali, C. Falamaki, and S. Rohani, "Efficient light harvesting by NiS/CdS/ZnS NPs incorporated in C, N-co-doped-TiO2 nanotube arrays as visible-light sensitive multilayer photoanode for solar applications," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. 19 ,pp. 9259-9278, 2018.
- [18] C. F. Klingshirn, A. Waag, A. Hoffmann, and J. Geurts, Zinc oxide: from fundamental properties towards novel applications. Springer Science & Business Media, 2010.
- [19] Z. Kang et al., "Interface engineering for modulation of charge carrier behavior in ZnO photoelectrochemical water splitting," Advanced Functional Materials, vol. 29, no. 15, p. 1808032, 2019.
 [20] Y. W. Phuan, W.-J. Ong, M. N. Chong, and J. D. Ocon, "Prospects of electrochemically synthesized
- [20] Y. W. Phuan, W.-J. Ong, M. N. Chong, and J. D. Ocon, "Prospects of electrochemically synthesized hematite photoanodes for photoelectrochemical water splitting: a review," Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, vol. 33, pp. 54-82, 2017.
- [21] L. Li, C. Liu, Y. Qiu, N. Mitsuzak, and Z. Chen, "The influence of the hydrothermal temperature and time on morphology and photoelectrochemical response of α-Fe₂O₃ photoanode," Journal of Alloys and Compounds, vol. 696, pp. 980-987, 2017.
- [22] P. Sharma, J. W. Jang, and J. S. Lee, "Key Strategies to Advance the Photoelectrochemical Water Splitting Performance of α - Fe2O3 Photoanode," ChemCatChem, vol. 11, no. 1, pp. 157-179, 2019.
- [23] Q. Wu et al., "Enhanced interface charge transfer via nn WO₃/Ti–Fe₂O₃ heterojunction formation for water splitting," Journal of Alloys and Compounds, vol. 803, pp. 1105-11, 11 2019.
- [24] M. B. Tahir, M. Sagir, and N. Abas, "Enhanced photocatalytic performance of CdO-WO₃ composite for hydrogen production," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, no. 45, pp. 24690-24697, 2019.
- [25] Y. Li, Z. Liu, J. Zhang, Z. Guo, Y. Xin, and L. Zhao, "1D/0D WO₃/CdS heterojunction photoanodes modified with dual co-catalysts for efficient photoelectrochemical water splitting," Journal of Alloys and Compounds, vol. 790, pp. 493-501, 2019.

فصلنامه سراميك

ايران شماره ٦٢ تابستان

5