

ساخت ساختارهای نانوصفحه- میکروکره ای اکسید روی به روش شیمیایی مرطوب و استفاده از آن ها در سلول های خورشیدی رنگدانه ای

فاطمه محمدپور^۱، محمود مرادی^۲

پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۱

دریافت: ۹۸/۱۰/۸

چکیده

نانو ساختارهای اکسید روی یکی از مواد پر کاربرد در ساخت و سنتز سلول های خورشیدی می باشند. ویژگی این نانو ساختارها به شدت وابسته به شرایط ساخت و سنتز می باشد. در این مقاله دو ساختار میکرو کره و نانوصفحه-میکرو کره اکسید روی با تغییر pH محلول رشد در روش شیمیایی مرطوب تولید شده و مشاهده شد که حضور نانوصفحات در ساختار دوم، میزان جذب رنگ را به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد که منجر به جذب نور بیشتر و در نتیجه آن، افزایش بازده سلول های خورشیدی رنگدانه ای می شود.



^۱. استادیار گروه علوم پایه، دانشگاه فرهنگیان، ایران، نویسنده مسئول، f.mohammadpour00@gmail.com

^۲. استاد بخش فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۱. مقدمه

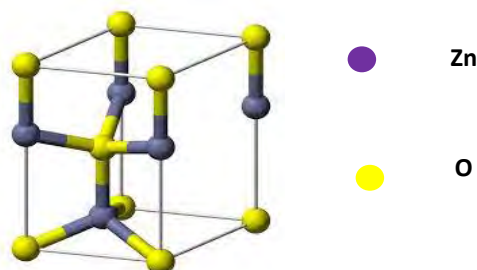
از آنجا که مواد نانو ساختار اکسید روی کارایی قابل توجهی در الکترونیک، اپتیک و فوتونیک دارند، توجه دانشمندان زیادی را به خود معطوف کرده اند [۱-۳]. از سال ۱۹۶۰ فیلم های نازک اکسید روی بمنظور کاربرد در سنسور ها، ترانسفورماتور ها و همچنین فوتوکاتالیست ها ساخته شدند و در چند دهه گذشته ساختار های اکسید روی در ابعاد نانو بسیار مورد توجه و مطالعه قرار گرفتند. به دلیل اثرات محدودیت کوانتومی و نسبت سطح به حجم بالا که نتیجه ای از کاهش اندازه در این ساختار ها است، نانو ساختار های اکسید روی خواص جالب توجه الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و اپتیکی از خود نشان دادند. اکسید روی یک ماده قابل اهمیت تکنولوژیکی است. غیاب یک مرکز تقارن در ساختار ورتزایت این ماده، در کنار جفت شدگی الکترومکانیکی بزرگ، منجر به خواص قوی پیزوالکتریکی و پیروالکتریکی در این ساختار شده است. بنابراین اکسید روی بطور وسیعی در محرک های مکانیکی و سنسور های پیزوالکتریکی به کار برده می شود. علاوه بر این، اکسید روی نیمه رسانایی با گاف انرژی پهن (۳,۳۷ eV) است که آن را برای کاربرد های اپتوالکترونیک با طول موج کوتاه مناسب می کند. انرژی بستگی بزرگ اکسیوتونی (۶۰ meV) در بلور های اکسید روی منجر به تابش اکسیوتونی بهینه ای در دمای اتاق می شود. اکسید روی نسبت به نور مرئی شفاف بوده و رسانایی اش می تواند با آلابیدن این ساختار افزایش یابد. نانو ساختار های اکسید روی دامنه وسیعی از کاربرد در تکنولوژی های پیشرفته مانند فیلتر های موجی اکوستیکی سطحی [۴]، بلور های فوتونیک [۵]، آشکار ساز های نوری [۶]، دیود های نشری نور [۷]، فوتودیود ها [۸]، سنسور های گازی [۹]، موجبر های تعدیل کننده اپتیکی [۱۰]، سلول های خورشیدی [۱۱] و متغیر ساز ها [۱۲] دارند. همچنین اکسید روی خواص ضد باکتری قابل توجهی داشته و گزارش شده است که درجه تأثیر ضد باکتری اش با کاهش اندازه ذرات افزایش می یابد [۱۳]. علاوه بر کاربرد های فراوانی که این ساختار ها دارند، از مزایای قابل توجه آن ها این است که با استفاده از روش های ارزان قیمت و دما پائین در طیف وسیعی از شکل های متفاوت نانو ساختاری قابلیت تولید دارند [۱۴].

در کار حاضر، با استفاده از روش شیمیایی مرطوب که روشی آسان و ارزان قیمت است، دو ساختار متفاوت اکسید روی ساخته می شوند. همچنین پس از بررسی خواص ساختاری و اپتیکی این ساختار ها، سلول های خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از آن ها ساخته شده و خواص فوتولتائی آن ها بررسی می شود.

۲. ساختار بلوری اکسید روی

بلور های اکسید روی شش گوشه ورتزایت بوده و مشخصه های جزئی قطبی دارند [۱۵]. همانطور که در شکل (۸-۱) دیده می شود، ساختار اکسید روی می تواند بصورت تعدادی صفحات متناوب که از یون های O^{2-} و Zn^{2+} تشکیل شده و بصورت چهار وجهی در راستای محور C قرار گرفته اند، توصیف شود. مختصات چهار ضلعی در اکسید روی و در نتیجه غیاب تقارن وارونی منجر به خواص پیزوالکتریکی و پیروالکتریکی در این ساختار می شود. مشخصه مهم دیگر در ساختار اکسید روی صفحات قطبی است. مشهورترین صفحه قطبی، صفحه بازال (۰۰۱) است. یک طرف صفحه قطبی بازال با مکان های شبکه ای Zn جزئی مثبت ختم می شود و طرف دیگر آن با مکان های شبکه ای اکسیژن جزئی منفی ختم می شود. یون های بازال با مخالف صفحات مثبت باردار شده (۰۰۱)-Zn و منفی باردار شده (۰۰۱)⁺O را تولید می کنند که منجر به گشتاور دوقطبی عمودی و قطبیدگی همزمان در طول محور C به همراه یک واریانس در انرژی سطحی می شود. برای داشتن یک ساختار پایدار، بطور معمول صفحات قطبی رخه^۱ هایی دارند یا بازسازی سطحی از نظر جرمی نشان می دهند اما صفحات (۰۰۱)± ZnO استثناء هستند: آن ها بطور اتوماتیک تخت و پایدار بوده و هیچ بازسازی از خود نشان نمی دهند [۱۴-۱۵]. تلاش های زیادی برای فهمیدن پایداری بالای صفحات قطبی (۰۰۱)± ZnO در فیزیک سطح انجام شده است [۱۶-۱۹]. دو رخه دیگر ZnO که

معمولا مشاهده شده است $\{2^{-1} 1^{-0}\}$ و $\{01^{-1} 0\}$ هستند، که غیر قطبی بوده و انرژی کم تری نسبت به رخه های $\{0001\}$ دارند.



شکل (۱): مدل ساختار ورتزایت اکسید روی.

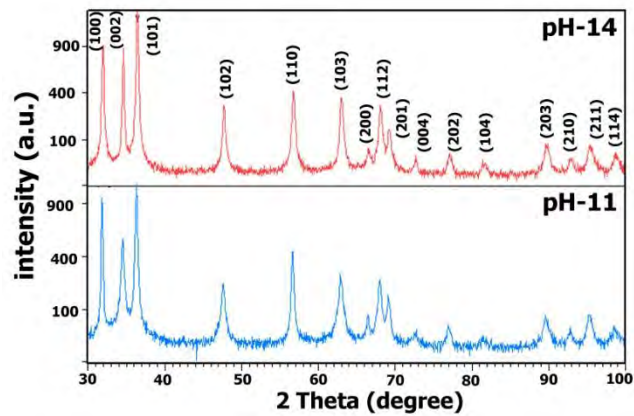
۳. روش های ساخت نانوساختار های اکسید روی

روش های تولید نانوساختار های اکسید روی به دو دسته کلی تقسیم می شود: روش های فاز گاز [۱۶] و روش های فاز محلول [۱۷]. ساخت در فاز گاز در یک محیط گازی سر بسته و معمولا در دما های بالا از 500°C تا 1500°C انجام می شود. ساخت نانوساختار ها در این فاز معمولا بسیار گران و پیچیده است. روش شیمیایی مرطوب که یکی از روش های فاز محلول است بعلت سادگی، دمای پایین فرایند، ارزان قیمت بودن و همچنین قابلیت ساخت طیف وسیعی از نانوساختار های اکسید روی، بسیار مورد توجه است. با استفاده از این روش می توان نانوساختارهایی با مورفولوژی متفاوت مانند نانوسیم ها [۱۸-۱۹]، نانوصفحاتی که بصورت کره دور هم جمع شده اند [۲۰-۲۱] و دیگر مورفولوژی ها را تولید کرد. در این روش محلولی را که برای تولید نانوساختار مورد نظر نیاز است در دمای ثابت و در یک زمان مشخص در محیطی سر بسته قرار می دهند. نانوساختار مورد نظر با گذشت زمان بر روی زیرلایه قرار داده شده درون محلول و یا به صورت پودری در ته ظرف ته نشین می شود. در این روش، دما و pH محلول نقشی اساسی در تعیین مورفولوژی نهایی ساختار حاصل دارند [۲۲-۲۳].

۱,۳. ساخت میکرو کره ها و نانوصفحه- میکرو کره های اکسید روی به روش شیمیایی مرطوب: بررسی

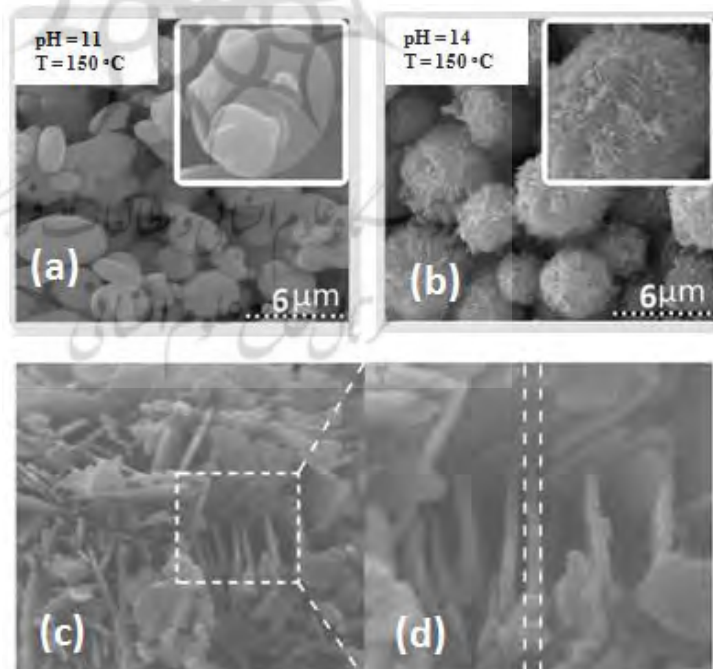
مورفولوژی و خواص ساختاری

به منظور تولید ساختار های کروی شکل ZnO، میزان ۴ گرم استات روی در ۲۰۰ میلی لیتر آب ریخته و به مدت ۳۰ دقیقه به هم زده شد و سپس با اضافه کردن ۲ گرم اسید سیتریک با خلوص ۹۹/۹٪ دوباره محلول به مدت ۱۵ دقیقه به هم زده شد [۲۴]. pH محلول حاصل با استفاده از حدود ۱۵ میلی لیتر محلول ۵ مولار هیدروکسید سدیم روی ۱۴ تنظیم گردید. به طور مشابه محلول دیگری را تهیه و با استفاده از ۸ میلی لیتر هیدروکسید سدیم pH آن محلول نیز بر روی ۱۱ تنظیم گردید. سپس محلول های حاصل در ظروف سر بسته پیرکس به مدت ۱۰ ساعت در دمای 150°C درون آون قرار گرفت. بعد از اتمام ۱۰ ساعت و خنک شدن محلول، مایع تشکیل شده بر روی ساختار های ته نشین شده خارج گردیده و بعد از خشک شدن ساختارها در دمای اتاق، مواد حاصل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتو ایکس مشخصه یابی شدند. با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس خواص ساختاری و بلوری ساختار های ZnO تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲) الگوهای XRD حاصل را نشان می دهد که تحت زاویه 30° تا 100° درجه انجام شده است. قله های حاصل انطباق بسیار خوبی را بر روی صفحات مختلف ساختار ZnO نشان می دهد. طیف XRD، ساختاری شش گوشه و با خلوص و خاصیت بلوری بالا را نشان می دهد. بررسی دقیق قله ها عدم وجود هر گونه ناخالصی را در ساختارها نشان می دهد [۲۵].



شکل (۲): الگوی پراش پرتو ایکس ساختار ZnO در pH های ۱۱ و ۱۴.

مورفولوژی ساختار ZnO تولید شده با استفاده از تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل (۳-a و b)، به وضوح تولید ساختار کروی شکل ZnO دیده می شود. ساختار های تولید شده در pH=۱۴، کره هایی تقریباً هم اندازه با قطر به طور میانگین ۴٫۸ میکرومتر هستند. در حالی که ساختار های تولید شده در pH=۱۱، از ترکیب کره هایی بزرگ با قطر میانگین ۳ میکرومتر و کره هایی کوچک تر با قطر میانگین ۱٫۲ میکرومتر تشکیل شده اند. با بررسی تصاویر SEM با بزرگنمایی بالا، شکل (۳-c و d)، به وضوح مشاهده شد که ساختار تولید شده در pH=۱۴ از کنار هم قرار گرفتن نانوصفحات نازکی تشکیل شده است. با استفاده از نرم افزار Scion ضخامت تعداد زیادی از این نانوصفحات اندازه گیری شده و پس از میانگین گیری، ضخامت میانگین نانوصفحات در حدود ۳۷ نانومتر گزارش شد. اما ساختار های تولید شده در pH=۱۱، سطحی صاف و یکنواخت دارند [۲۶].

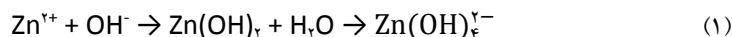


شکل (۳): تصاویر SEM ساختار های ZnO تولید شده در (a) pH=۱۴ و (b) pH=۱۱. (c) و (d) تصاویر SEM از

ساختار های تولید شده در pH=۱۴ با بزرگنمایی های بالا و پائین.

۲,۳. روند رشد ساختار های اکسید روی

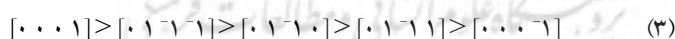
روند رشد ساختار نانوصفحه-میکرو کره ای اکسید روی در محلول ذکر شده و در $\text{pH}=14$ ، به خوبی می تواند با توجه به واکنش های شیمیایی واقع شده در این شرایط و عادت های رشد بلوری اکسید روی توصیف شود. اضافه کردن NaOH به ترکیب استات روی و سیتریک اسید نه تنها pH محلول را تنظیم می کند بلکه منبعی برای تولید OH^- است. به طور مرسوم در چنین ترکیبی واکنش های زیر رخ می دهد:



در اثر گرم کردن محلول، یون های Zn^{2+} و OH^- بیشتری شکسته شده و به تشکیل Zn(OH)_4^{2-} کمک می کنند. سرانجام، یون های Zn(OH)_4^{2-} برای تشکیل هسته های ZnO به صورت زیر جدا می شوند:



هسته های تشکیل شده اولیه ZnO بعنوان بلوک های سازنده، برای شکل گیری محصول نهایی عمل می کنند. پس از گذشت زمان و تحت شرایط گرمایی مناسب، غلظت هسته های ZnO افزایش یافته که منجر به شکل گیری محصول نهایی می شود. از آنجا که در ساختار نانوصفحه-میکروکره ای ZnO ، میکروکره ها از جمع شدن نانوصفحات نازک به دور هم تشکیل شده اند، بنظر می رسد که این نانوصفحه ها واحد های اصلی تشکیل دهنده میکروکره ها هستند. در فاز شش گوشه ورتزایت، اکسید روی صفحاتی قطبی دارد، به گونه ای که اتم های روی و اکسیژن به صورت چهارضلعی و در طول محور شش گوشه با هم ترکیب می شوند. در بلور های اکسید روی قطبی، اتم های روی و اکسیژن بصورت متناوب در طول محور C نظم یافته اند، به صورتی که صفحات بالایی به Zn منتهی شده اند، (۱۰۰۰۱)، که از نظر فعل و انفعال، فعال است و صفحات پایینی به اکسیژن منتهی می شوند، (۱۰۰۰۱-)، که از نظر شیمیایی خنثی است [۲۷-۲۸]. مورفولوژی ساختار نهایی تحت تأثیر سرعت بلور های ZnO در جهت های مختلف است. برطبق نظر لاوریس^۱ و همکارانش سرعت رشد بلور های ZnO در جهت های مختلف و تحت شرایط گرمایی به صورت زیر است [۲۹]:



برطبق رفتار های نوعی رشد اکسید روی، سریع ترین جهت رشد در بلور های ZnO ، روی محور C و در جهت [۰۰۰۱] است که به طور معمول منجر به شکل گیری نانوساختار های یک بعدی می شود. با در نظر گرفتن رشد نانوصفحه ها در این کار، می توان در نظر گرفت که تحت شرایط خاصی از آزمایش، اگرچه رشد بلوری در جهت گیری محور C ، اما در دو جهت که شامل صفحه {۰۰۰۱} می باشد صورت گرفته که منجر به شکل گیری نانوصفحه ها می شود. از نقطه نظر ترمودینامیک، رخ های قطبی با گشتاور های سطحی از نظر ترمودینامیکی ناپایدار تر از رخ های غیر قطبی بوده و اغلب به منظور کاهش انرژی سطحی شان خود را بازآرایی می کنند. در مورد نانوصفحات ZnO ، انرژی سطحی هر نانوصفحه مجزا، از آنجا که در معرض دو صفحه اصلی قرار می گیرد، بسیار بالا است. بنابراین، با جمع شدن این نانوصفحات به دور هم و کاهش مساحت بی حفاظ، انرژی سطحی ساختار کاهش می یابد. در نتیجه، این نانوصفحات بمنظور کاهش انرژی سطحی دور هم جمع شده و میکروکره ها را شکل می دهند.

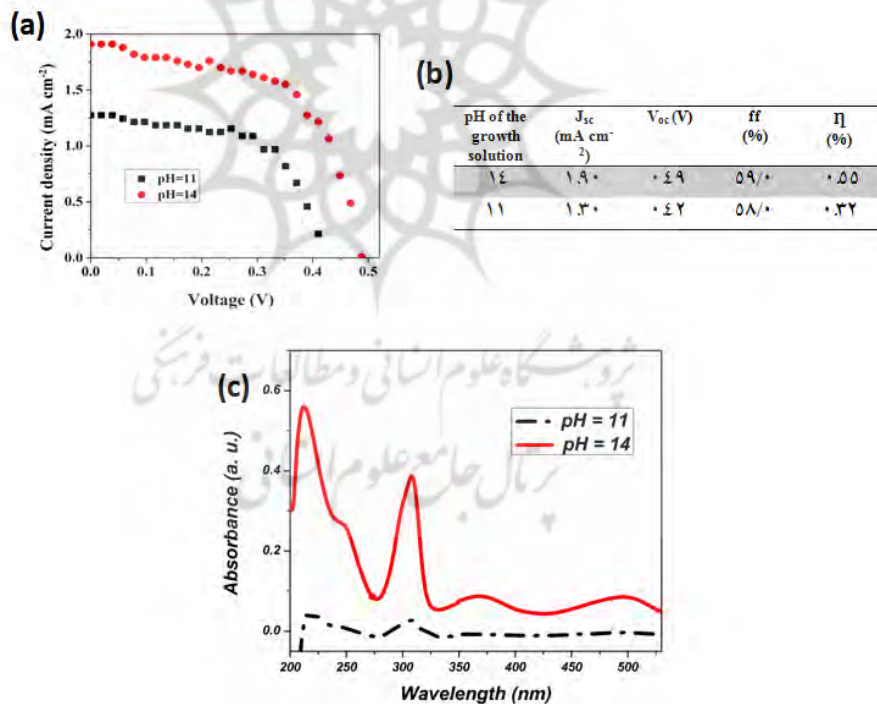
غلظت یون هیدروکسید (OH^-) موجود در محلول نیز نقش مهمی در تعیین ساختار نهایی دارد [۳۰]. در غلظت های پائین یون هیدروکسید ($\text{pH}=11$ در این کار)، واکنش بین Zn^{2+} و OH^- کاهش یافته و در نتیجه آن نرخ هسته سازی کم می شود.

^۱ Laudise

بنظر می رسد که کاهش نرخ هسته سازی، به بلوک های اولیه تشکیل دهنده ساختار نهایی اجازه می دهد که بصورت میکرو صفحه ای رشد کنند. گزارش شده است که در غلظت های کم OH^- ، ساختار های یک بعدی اکسید روی تولید می شود. بنظر می رسد که در این کار، پس از شکل گیری میکروصفحات اولیه، این بلوک ها در جهت یک بعد روی هم قرار گرفته و ساختاری مانند شکل (۳-۸) را تشکیل می دهند.

۴. ساخت سلول های خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از ساختار های تولید شده اکسید روی

به منظور به کار گیری پودرهای ZnO حاصل در ساخت سلول خورشیدی، ۲ گرم پودر ZnO با ۰/۲ گرم پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰ و ۴ میلی لیتر آب مخلوط گردید و سپس با استفاده از حدود ۵ میلی لیتر اتانول ۹۹/۹٪، غلظت خمیر مورد نظر تنظیم شد. سپس با استفاده از روش دکتر بلید لایه ای نازک از خمیر حاصل بر روی شیشه FTO از قبل شسته شده (سه مرحله ۱۵ دقیقه ای اولتراسونیک با استون، اتانول و آب) کشیده شد [۳۱]. فوتوآند حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 45°C درون کوره قرار داده شد. به منظور حساس سازی ساختار با رنگ، فوتوآند درون محلول رنگ صنعتی NV۱۹ با غلظت ۳۰۰ میکرومولار به مدت ۲۴ ساعت و در دمای 40°C غوطه ور گردید. پس از آن، فوتوآند حساس شده با رنگ در استونیتریل شسته شده تا مولکول هایی که جذب شیمیایی ساختار نشده اند، از ساختار جدا شوند. فوتوآند آماده شده به کمک یک پلیمر ۲۵ میکرومتری، به کاتد که شیشه FTO آغشته با پلاتین است متصل شده و الکترولیت دید/ تری دید در فضای خالی بین دو الکترود تزریق شد. سلول های آماده شده تحت تابش استاندارد AM ۱,۵ قرار گرفته و خواص فوتولتایی آن ها بررسی شد. شکل (۴-۲) نمودار های چگالی جریان-ولتاژ سلول ها را نشان می دهد و مشخصه های فوتولتایی آن ها در شکل (۴-۲) در جدول خلاصه شده است. همچنین شکل (۴-۳) طیف جذب اپتیکی مولکول های رنگ پس از واجدگی از ساختار اکسید روی را نشان می دهد.

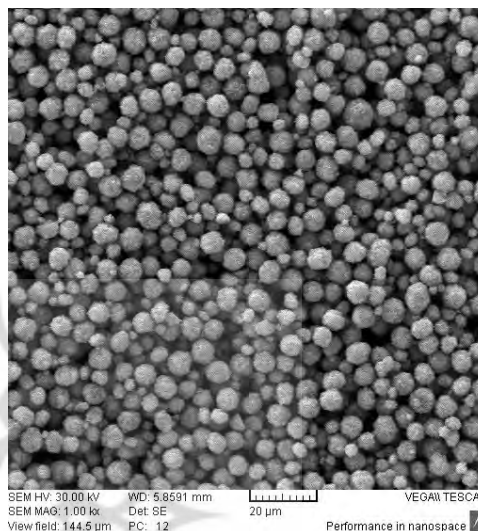


شکل (۴): (a) نمودار های جریان-ولتاژ سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده از ساختار های ZnO

تولید شده در pH های ۱۱ و ۱۴ و (b) مشخصه های فوتولتایی آن ها. (c) جذب اپتیکی مولکول های رنگ پس از واجدگی از ساختار.

همانطور که در این شکل دیده می شود، چگالی جریان حاصل از سلول شامل ساختار تولید شده در pH= ۱۴ از سلول ساخته شده از ساختار تولید شده در pH= ۱۱ بیشتر است. پارامتر های فوتولتایی، بهبود مقادیر جریان مدار کوتاه، J_{sc} ولتاژ مدار باز، V_{oc} ، فاکتور پرشدگی، ff ، و همچنین بازده، η ، را در سلول ساخته شده از ساختار تولید شده در pH= ۱۴ نسبت به

سلول دیگر نشان می دهند. همانطور که در شکل (۸-۴-۷) دیده می شود میزان بارگیری رنگ در ساختار تولید شده در $\text{pH}=14$ به میزان قابل توجهی از ساختار دیگر بیشتر است. افزایش میزان جذب رنگ بوضوح به تخلخل بسیار بالا به علت حضور نانوصفحات در ساختار تولید شده در $\text{pH}=14$ نسبت داده می شود، در حالی که ساختار تولید شده در $\text{pH}=11$ سطحی صاف و بدون تخلخل داشته (تصاویر SEM در شکل (۳))، و نمی تواند مولکول های رنگ را به میزان کافی جذب کند. در نتیجه افزایش میزان بارگیری رنگ در ساختار نانوصفحه-میکروکره ای تولید شده در $\text{pH}=14$ ، میزان جذب نور در این ساختار افزایش یافته که می تواند منجر به بهبود مشخصه های فوتولتایی در این سلول شود. شکل (۵) مورفولوژی سطح فوتوآند پس از لایه نشانی خمیر اکسید روی بر روی شیشه FTO را نشان می دهد.



شکل (۵): تصویر SEM فیلم اکسید روی لایه نشانی شده بر شیشه FTO به روش دکتر-بلید پس از بازپخت در دمای

450°C به مدت نیم ساعت.

۱. نتایج

ساختار های اکسید نیمه رسانای روی در دمای 150°C و در pH های ۱۱ و ۱۴ به روش شیمیایی مرطوب تولید شده اند. افزایش pH ، منجر به تشکیل نانوصفحاتی نازک می شود که به صورت کروی شکل دور هم جمع شده اند. روند شکل گیری این ساختار ها به اختصار توضیح داده شده است. حضور این نانوصفحات، سطح مؤثر ساختار را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد که منجر به افزایش بارگیری رنگ و به دنبال آن افزایش جذب نور و در نتیجه آن، افزایش بازده تبدیل در سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده از این نانوصفحات ها می شود.

منابع

- [] S. Dutta, S. Chattopadhyay, A. Sarkar, M. Chakrabarti, D. Sanyal, D. Jana, Prog. Mater. Sci. ۴۴, ۹۹ (۲۰۰۹).
- [۲] C. Klingshirn, Phys. Stat. Sol. B. ۲۴۴, ۳۰۲۷ (۲۰۰۷).
- [۳] L. Schmidt-Mende, J. L. MacManus-Driscoll, Mater. Today. ۰۰, ۰۰ (۲۰۰۷).
- [۴] I. Gonzalez-Valls, M. Lira-Cantu, Energy Environ. Sci. ۲, ۹۹ (۲۰۰۹).
- [۵] N. W. Emanetoglu, C. Gorla, Y. Liu, S. Liang, Y. Lu, Mater. Sci. Semicond. Process. ۲, ۷۷۷ (۹۹۹۹).
- [۶] Y. Chen, D. Bagnall, T. Yao, Mater. Sci. Eng. B. ۰۰, ۰۰۰ (۰۰۰۰).
- [۷] S. Liang, H. Sheng, Y. Liu, Z. Hio, Y. Lu, H. Chen, J. Cryst. Growth. ۰۰۰, ۰۰۰ (۰۰۲۲).
- [۸] N. Saito, H. Haneda, T. Sekiguchi, N. Ohashi, I. Sakaguchi, K. Koumoto, Adv. Mater. ۴۴, ۸۸۸ (۲۲۲۲).
- [۹] J. Y. Lee, Y. S. Choi, J. H. Kim, M. O. Park, Thin Solid Films. ۳۳۳, ۳۳۳ (۲۲۲۲).
- [۱۰] A. Mitra, A. P. Chatterjee, H. S. Maiti, Mater. Lett. ۳۰, ۳۳ (۸۸۸۸).
- [۱۱] M. H. Koch, P. Y. Timbrell, R. N. Lamb, Semicond. Sci. Technol. ۰۰, ۳۳۳۳ (۰۰۰۰).
- [۱۲] M. Gratzel, MRS Bull. ۰۰, ۴۴۴۴ (۴۴۴۴).
- [۱۳] Y. Lin, Z. Zhang, Z. Tang, F. Yuan, J. Li, Adv. Mater. Opt. Electron. ۹, ۰۰۰ (۱۱۹۹).
- [۱۴] N. Padmavathy, R. Vijayaraghavan, Sci. Technol. Adv. Mater. ۹, ۰۳۰۰۰۴ (۲۰۰۸).
- [۱۵] A. B. Djurić, Y. H. Leung, Small. ۲, ۴۴۴ (۶۶۶۶).
- [۱۶] Z. L. Wang, J. Phys.: Condens. Matter. ۱۶, R۹۹۹ (۴۴۴۴).
- [۱۷] P. G. Li, X. Wang, W. H. Tang, J Alloys Compd. ۶۶۶, ۴۴۴ (۹۹۹۹).
- [۱۸] C. Pacholski, A. Kornowski, H. Weller, Angew Chem Int Ed. ۱۱, ۸۸۸۸ (۲۲۲۲).
- [۱۹] G. Chen, K. Zheng, X. Mo, D. Sun, Q. Meng, G. Chen, Mater. Lett. ۴۴, ۶۶۶۶ (۰۰۰۰).
- [۲۰] C. K. Xu, P. Shin, L. L. Cao, D. J. Gao, J. Phys. Chem. C. ۴۴۴, ۰۰۰ (۰۰۰۰).
- [۲۱] M. S. Akhtar, M. A. Khan, M. S. Jeon, O. B. Yang, J Electrochimica Acta ۳۳, ۹۹۹۹ (۸۸۸۸).
- [۲۲] A. Umar, M. S. Chauhan, S. Chauhan, R. Kumar, G. Kumar, S. A. Al-Sayari, S. W. Hwang, A. Al-Hajry, J. Colloid and interface science. ۳۳۳, ۱۱۱ (۱۱۱۱).
- [۲۳] Q. R. Hu, S. L. Wang, W. H. Tang, Materials letters. ۴۴, ۲۲۲۲-۴۴۴۴ (۰۰۰۰).
- [۲۴] D. Lukovic Golic, Z. Brankovic, N. Daneu, S. Bernik, G. Brankovic, J. Sol-Gel. Sci. Technol. ۳۳, ۶۶۶-۰۰۰ (۲۲۲۲).
- [۲۴] محمود مرادی، فاطمه محمدپور، فاطمه اعتبار، ۱۱ امین کنفرانس فیزیک ماده چگال ایران-شاهرود، زمستان ۹۱.
- [۲۵] M. S. Chauhan, R. Kumar, S. Ahmad umar, G. Chauhan, M. Faisal, S. W. Hwang, J. Nanosci. Nanotechnol. ۱۱, ۱۱۱۱ (۱۱۱۱).
- [۲۶] امید جوهری شیرازی، ۱۱ فاطمه محمدپور، محمود مرادی، ۱۲ امین کنفرانس فیزیک ماده چگال ایران-اصفهان، زمستان ۹۳.
- [۲۷] A. Umar, B. Karunagaran, E. K. Suh, Y. B. Hahn, Nanotechnology, ۷۷, ۴۰۷۲ (۶۶۶۶).
- [۲۸] A. Umar, Y. B. Hahn, Appl. Phys. Lett. ۸۸, ۱۷۳۱۲۰ (۶۶۶۶).
- [۲۹] R. A. Laudise, A. A. Ballman, J. Phys. Chem. ۴۴, ۸۸۸ (۰۰۰۰).
- [۳۰] Z. Chen, L. Gao, J. Cryst. Growth. ۳۳۳, ۲۲۲ (۲۰۰۶).
- [۳۱] Z. Longyue, D. Songyuan, X. Weiwei, W. Kongjia, "Dye-Sensitized Solar Cells Based on ZnO Films", Plasma Science & Technology ۱, ۲۲۲ (۶۶۶۶).