

## بررسی تاثیر طول نانوسیم‌های اکسیدهای روی

### بر روی بازده سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه‌ها

سید محمد کاظم طباطبایی<sup>۱</sup>

احمد عقیقی<sup>۲</sup>

#### چکیده

در این مقاله نتایج تولید نانوسیم‌های بلند و عمودی اکسید روی با استفاده از روش هیدروترمال سریع با کمک امواج مایکروویو به منظور کاربرد در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه ارائه شده است. اثر طول‌های مختلف نانوسیم‌های اکسیدروی بر روی جذب رنگدانه در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه- نسل سوم- بررسی شده و میزان تغییرات بازده آن در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهند در صورت تولید آرایه‌ای از نانوسیم‌های اکسید روی با طول بلند در ساختار در سلول خورشیدی بر میزان جذب رنگدانه به آن افزوده خواهد شد و متناسب با آن بازده سلول خورشیدی (η) با طول اکسید روی ۶μ تا ۱۳μ حدود ۸۰٪ افزایش خواهد یافت. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی (SEM) از ساختار نانوسیم‌های اکسید روی تولید شده به روش هیدروترمال سریع به کمک امواج مایکروویو بیانگر منظم بودن آرایه‌های نانوسیم‌های بلند اکسید روی می‌باشند.

#### کلید واژه

اکسید روی، نانوسیم، هیدروترمال، سلول خورشیدی

<sup>۱</sup> دانش آموخته‌ی دکتری برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر mk.tabatabaei@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۳۹۱

تاریخ دریافت: ۱۵ اسفند ۱۳۹۰

## مقدمه‌ای بر سلول‌های خورشیدی

همه سلول‌های خورشیدی به یک ماده جاذب نور، درون ساختار خود برای جذب فوتون‌ها و تولید الکترون از طریق اثر فوتو ولتائیک نیاز دارند. این مواد جاذب نور مورد استفاده در سلول‌ها، تمایل به جذب طول موج‌های خاصی از نور را دارند. سیلیکون تنها ماده‌ای است ابتدا به صورت عمده تولید شده و سپس به منظور ساخت سلول خورشیدی به عنوان ماده جاذب کننده نور استفاده شده است. لذا سلول فاقد بستر بوده و ضخامت نسبتاً زیادی دارد. به همین دلیل این گونه از سلول‌های خورشیدی، سلول‌های بر پایه ویفر<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. بقیه انواع مواد مورد استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی به جای تولید عمده بر روی یک بستر خاص لایه‌نشانی می‌شوند و لذا سلول‌های تولید شده با این مواد سلول‌های لایه نازک<sup>۴</sup> نام گرفته‌اند [۱].

سیلیکون بلوری، جاذب نسبتاً ضعیفی برای نور خورشید است به منظور رسیدن به میزان مناسب جذب نور، نیاز به ضخامت قابل توجهی از آن برای ساخت سلول خورشیدی وجود دارد که با توجه به هزینه بالای تولید سیلیکون، این ضخامت زیاد هزینه تولید را به شدت افزایش می‌دهد این نوع سلول‌های خورشیدی، که از گونه سلول‌های بر پایه ویفر می‌باشند دارای بازده خوبی هستند ولی هزینه زیاد آن‌ها موجب گردد تحقیقات به سوی سلول‌های لایه نازک گرویده شود. سلول‌های خورشیدی لایه نازک معمولاً شامل چندین لایه بسیار نازک از مواد متفاوت که بر روی یک بستر شیشه‌ای یا فلزی لایه‌نشانی شده‌اند می‌باشند. و از اکسیدهای هادی الکتریسته و شفاف مانند اکسید قلع آلایش شده با ایندیموم<sup>۵</sup> برای الکترودی که در معرض نور قرار دارد و فلزاتی مانند آلومینیوم نیز برای الکترودی که پشت به نور قرار دارد، در این سلول‌ها به کار برده می‌شوند.

تکنولوژی‌های مختلف لایه نازک میزان ماده جاذب نور لازم برای تولید یک سلول خورشیدی را کاهش می‌دهند در حدود کمتر از یک صدم ماده لازم برای سلول‌های بر پایه ویفر سیلیکون که علت را می‌توان غیر مستقیم بودن باند انرژی سیلیکان در سلول‌های بر پایه ویفر سیلیکانی در مقابل استفاده از لایه‌های نازک با مواد مختلف پربازده در جذب نور و داشتن باند انرژی مستقیم دانست. در این تکنولوژی هزینه‌های تولید کاهش یافته اما به تبع آن بازده تبدیل انرژی نیز کاهش می‌یابد. با این حال برخی سلول‌های لایه نازک چند لایه بازدهی بهتری نسبت به سلول‌های بر پایه ویفر سیلیکون دارند. این سلول‌ها به دلیل هزینه تولید پایین، قابلیت انعطاف، وزن کمتر و آسانی

Wafer-based<sup>۳</sup>  
Thin-film<sup>۴</sup>  
Indium-doped Tin Oxide (ITO)<sup>۵</sup>

مجتمع سازی بسیار محبوب شده اند. این نوع سلول ها بر اساس ماده جذاب نور آن دسته بندی می گردد که می توان سلول های کادمیم تلورايد [۱]، سلول های چند پیوندی گالیم- آرسناید [۲]، سلول های آلی [۳] و سلول های حساس شده به رنگدانه [۴] را نام برد.

سلول های خورشیدی حساس شده به رنگدانه فاقد هرگونه پیوند p-n برای جداسازی حامل های بار ایجاد شده ناشی از تابش فوتون می باشد [۵]. یک سلول حساس شده با رنگدانه دو وظیفه ای که در نسل های قبل سلول های خورشیدی، توسط سیلیکون انجام می شد را به دو بخش جداگانه واگذار می کند. در سلول های قدیمی، سیلیکون هم به عنوان منبع تولید الکترون ها و هم به عنوان عامل ایجاد میدان الکتریکی داخلی برای جداسازی بارها و تولید جریان به کار می رود اما در سلول حساس شده با رنگدانه از یک نیمه هادی برای انتقال بار و از یک ماده حساس به نور موسوم به رنگدانه<sup>۶</sup> برای تولید الکترون استفاده می شود. این نوع سلول های خورشیدی بر اساس تحریک نوری مولکول های رنگدانه ای که در سطوح نانو ذرات جذب شده اند کار می کنند. رنگدانه نور تابیده شده را جذب نموده و سپس این الکترون از طریق نفوذ درون این نیمه هادی خود را به الکترودی که به بار الکتریکی متصل شده است می رساند. رنگدانه نیز از طریق گرفتن الکترون از الکترولیت بازسازی می شود [۵].

این نسل از سلول ها به علت هزینه پایین در تولید و تولید آسان و استحکام بالا برخلاف سلول های سیلیکونی مورد توجه قرار گرفته اند. اگرچه بازده تبدیل انرژی کمتری در مقایسه با نسل های قبل از خود دارند اما نسبت هزینه به بازدهی آنها بسیار بهتر از سلول های نسل گذشته است و این برتری، علاقه مندی به توسعه و گسترش این نسل را افزایش داده است. بیشتر تحقیقات جاری در زمینه سلول های خورشیدی حساس شده به رنگدانه بر روی مواردی چون بهبود محدوده جذب نور رنگدانه، پایداری سلول با جایگزینی الکترولیت مایع با جامدات یونی و یا پلیمرهای هادی و بهبود انتقال الکترون با استفاده از نیمه هادی های جایگزین با باند ممنوعه زیاد متمرکز هستند [۵ و ۶].

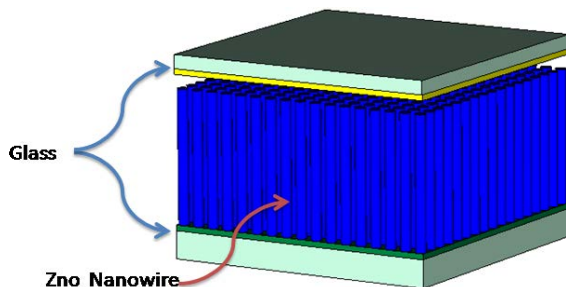
برای افزایش بازده سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه، می توان با انتخاب ماده نیمه هادی مناسب و همچنین ساختاری مناسب، به دنبال افزایش سطح برای جذب حداکثر مقدار رنگدانه در سلول را فراهم کرد و همچنین انتقال الکترون مؤثری به منظور تحویل دادن الکترون ها به الکترودی با حداقل میزان باز ترکیب ارائه داد. اخیراً از اکسیدهای فلزی مانند اکسیدروی به عنوان یک نیمه هادی مناسب در ساختار سلول خورشیدی به خاطر خواص منحصر به فرد آن، توجه شده است [۸].

## سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه مبتنی بر اکسید روی

در قلب سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه، لایه ای نازک از نانو ذرات نیمه‌هادی است که مساحت سطح مناسبی را برای جذب مولکول‌های حساس به نور فراهم می‌آورد. با این وجود سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه نانو ذرات برای انتقال الکترون به پدیده نفوذ وابسته هستند. آزمایشات و مدل‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که انتقال الکترون در سلول‌های بر پایه نانو ذرات توسط یک سری از حرکات پرشی الکترون‌ها به حالت‌های تله<sup>۷</sup> موجود در ذرات مجاور آن‌ها انجام می‌شود [۹]. بدین صورت که الکترون‌های تولید شده از جذب فوتون‌ها مکرراً با تله‌های موجود فعل و انفعال نموده و مسیری تصادفی را درون لایه نانو ذرات به سمت الکتروود آند طی می‌کنند. انتقال توسط مکانیزم جابجایی<sup>۸</sup>، که مکانیزم اصلی در بسیاری از سلول‌های خورشیدی است در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه وجود ندارد زیرا یون‌های موجود در الکتروولیت به شکلی میدان‌های الکتریکی داخلی را خنثی می‌کنند که الکترون‌های آزاد به عنوان حامل‌های بار خنثی تعبیر شوند. با توجه به مکانیزم انتقال ذکر شده، بر اساس تخمین‌های انجام شده یک الکترون ممکن است برای رسیدن به الکتروود آند از حدود  $10^3$  تا  $10^6$  ذره عبور کند [۱۰]. زمان متوسط عبور الکترون از لایه نانو ذرات در حدود میلی ثانیه ثبت شده است که این زمان نسبتاً طولانی احتمال باز ترکیب الکترون را به شدت افزایش می‌دهد. کاهش ضخامت لایه نانو ذرات مقاومت در برابر انتقال الکترون و زمان عبور آن را کاهش می‌دهد اما مساحت سطح را نیز کاهش می‌دهد که موجب جذب کمتر رنگدانه می‌شود [۹ و ۱۱].

در سال‌های اخیر اکسید روی<sup>۹</sup> ماده‌ای جذاب برای استفاده در قطعات الکترونیک نوری در مقیاس نانو می‌باشد زیرا این ماده یک نیمه‌هادی با باند ممنوعه زیاد و قابلیت حرکت مناسب برای حامل‌های بار می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای رشد نانو ساختارهای اکسید روی در دسترس قرار دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های سل-جل<sup>۱۰</sup>، لایه نشینی شیمیایی<sup>۱۱</sup>، لایه نشانی فاز بخار<sup>۱۲</sup> و دیگر اشاره نمود. این نانو ساختارها را می‌توان به اشکال مختلفی رشد داد [۱۲ و ۱۸].

trap<sup>v</sup>  
drift<sup>۸</sup>  
zinc oxide<sup>۹</sup>  
Sol-Gel<sup>۱۰</sup>  
chemical bath deposition<sup>۱۱</sup>  
vapor-phase deposition<sup>۱۲</sup>



شکل ۱. طرح واره‌ای از یک سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه بر پایه نانو سیم اکسید روی

یک راه حل امیدبخش برای حرکت به سمت افزایش بازده این نوع سلول‌ها، افزایش طول نفوذ الکترون با به کارگیری از آرایه‌ای متراکم از نانو ساختارهای نیمه‌هادی با باند ممنوعه زیاد می‌باشد. ساختار فیزیکی نانو ساختارها مسیر عبور مستقیمی برای الکترون‌ها از نقطه تزریق تا الکتروود آند فراهم می‌کنند و همزمان مساحت سطح مناسبی نیز برای جذب رنگدانه دارند. انتظار می‌رود این مسیر مستقیم سرعت انتقال الکترون به الکتروود را چندین برابر نسبت به مکانیزم انتقال تصادفی در نانو ذرات افزایش داده و در نتیجه احتمال باز ترکیب آن را کاهش دهد [۹ و ۱۳].

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد نانو ساختارهای اکسید روی، سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه نانو ساختار اکسید روی مطرح گردید. شکل ۱ ساختار کامل سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه نانو سیم‌های اکسید روی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است تنها تفاوت آن با سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه نانو ذرات، استفاده از نانو سیم‌های اکسید روی پوشانده شده با رنگدانه به جای نانو ذرات می‌باشد.

نانو سیم‌های اکسید روی در ساختار سلول‌های خورشیدی، هادی‌های الکتریکی خوبی در امتداد محور مرکزی خود برای بارهای الکتریکی محسوب می‌شوند. گزارشات و تحقیقات گذشته بیانگر این موضوع می‌باشد [۵ و ۱۴-۱۶].

بنابراین، با استفاده از آرایه‌ای با تراکم به اندازه کافی زیاد، طول زیاد و قطر کم به عنوان جاذب رنگدانه در سلول‌های خورشیدی نسل سوم، می‌توان میزان جذب رنگدانه را افزایش داد و به دنبال آن بازده سلول را افزایش داد. بنابراین در این تحقیق از اکسید روی به عنوان نیمه‌هادی مورد نظر استفاده شده است و با استفاده از روش رشد بسیار سریع اکسید روی با استفاده از امواج میکروویو، اکسیدهای روی به صورت کاملاً عمودی و متراکم در طول‌های مختلف رشد داده شده و براساس

آنها سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه ساخته شده است. نتایج به دست آمده ناشی از آن است که با افزایش طول و کاهش قطر، افزایش سطح جذب رنگدانه در سلول و افزایش بازده سلول خورشیدی را منجر خواهد شد.

### فرآیند ساخت

اکسید روی را می‌توان به روش‌های مختلفی رشد داد یکی از این روش‌ها روش هیدروترمال می‌باشد. روش هیدروترمال به دلایل مختلفی همچون سادگی تجهیزات مورد نیاز در فرآیند رشد نانوساختارهای اکسید روی، قابلیت اجرا در دماهای پایین، مقرون به صرفه بودن و در نتیجه امکان تولید انبوه، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۷ و ۱۸]. با استفاده از این روش به دلیل دما پایین بودن آن امکان رشد نانوسیم‌های اکسید روی بر روی بستر شیشه به منظور کاربرد در ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه فراهم می‌باشد.

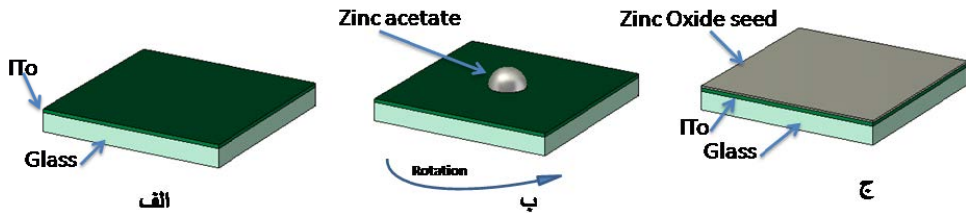
در این روش فرآیند رشد در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول نانو ذرات اکسید روی با قطرهایی متفاوت که بسته به روش بذرگذاری می‌باشد بر روی سطح بستر لایه نشانی می‌شوند. در مرحله دوم رشد نانوسیم‌های عمودی اکسید روی از طریق قرار دادن بسترهای بذرگذاری شده در درون محلولی شامل غلظت کمی از نیترات روی و هگزامین<sup>۱۳</sup> در آب در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، صورت می‌گیرد. مشکل اساسی این روش زمان بر بودن آن می‌باشد که برای حل این مشکل، از راهکاری مختلفی از جمله به کار گیری امواج مایکروویو استفاده شده است تا سرعت رشد را افزایش دهد. این روش‌ها موسوم به روش‌های سریع هیدروترمال می‌باشند [۱۸ و ۱۹].

### بذرگذاری اکسید روی بر روی بستر

در روش هیدروترمال انتخاب و چگونگی روش بذرگذاری اکسید روی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد چرا که یک نواختی لایه بذرگذاری، ضخامت لایه بذرگذاری بر روی جهت گیری نانوساختارهای اکسید روی و قطر اکسیدهای روی و همچنین توزیع یکنواخت آن تأثیر مستقیم دارد. روش‌های که برای بذرگذاری استفاده می‌شود را می‌توان بذرگذاری با فرو بردن در محلول یا بذرگذاری با چرخش نام برد. در روش دوم به خاطر حرکت چرخش انتظار می‌رود که بذرگذاری یکنواخت‌تری را نسبت به روش اول حاصل گردد.

---

(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>N<sub>4</sub><sup>۱۳</sup>

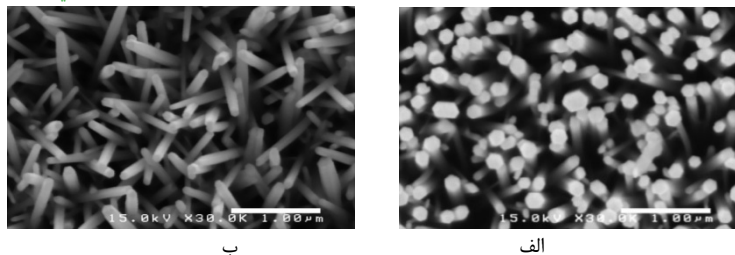


شکل ۲. طرح واره ای از بزرگداری استات روی بر روی بستر شیشه با لایه نشانی چرخشی

شکل ۲ طرح واره ای از بزرگداری استات روی بر روی بستر شیشه با لایه نشانی با چرخش را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، حرکت چرخش در این فرآیند باعث ایجاد لایه ای یکنواخت می گردد. بنابراین از روش لایه نشانی با چرخش استفاده می گردد. برای این منظور همانند شکل ۲- الف از بستر شیشه ای که بر روی آن لایه از ITO<sup>۱۴</sup> می باشد استفاده می گردد. قبل از آن باید توسط آب یونیزه شده تمیز گردد و با گاز نیتروژن خشک گردد. سپس محلول استات روی ( ۲۵ میلی مولار) بر روی بستر همانند شکل ۲- ب قرار داده و با چرخش بروی بستر قرار داده سپس لایه بذر اکسید روی با کمک تجزیه حرارتی لایه استات روی در هوا و در دمای حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، ایجاد می گردد. این عمل موجب تولید جزیره هایی از اکسید روی بر روی شیشه خواهد شد. برای به دست آوردن سطحی با توزیع یکنواخت بهتر است، حداقل چند بار این بزرگداری صورت بگیرد تا به ضخامت مناسب دست پیدا کرد این موضوع به صورت طرح واره در شکل ۳- ج نشان داده شده است. در این مقاله دو بار این بزرگداری صورت گرفته است. در این بزرگداری واکنش هایی که استات روی را به اکسید روی تبدیل می کند به صورت زیر است:



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوسیم های رشد داده شده بر روی بستری که توسط روش لایه نشانی با چرخش بزرگداری شده است را نشان می دهد. همانگونه که تصویر ۳- الف نشان می دهد نانو سیم های اکسید روی رشد کرده با دو بار بزرگداری علاوه بر توزیع قطر یکنواخت، به دلیل افزایش ضخامت لایه بذر دارای تراز مناسب نیز هستند نسبت نانوسیم های اکسید روی رشد کرده با یک بار بزرگداری که در شکل ۳- ب نشان داده شده است. لذا به نظر می رسد دو بار بزرگداری توسط روش لایه نشانی با چرخش روشی بهینه برای بزرگداری به منظور رشد نانوسیم های اکسید روی به روش هیدروترمال باشد. بنابراین در این مقاله از این روش بزرگداری برای رشد اکسیدهای روی استفاده می گردد.



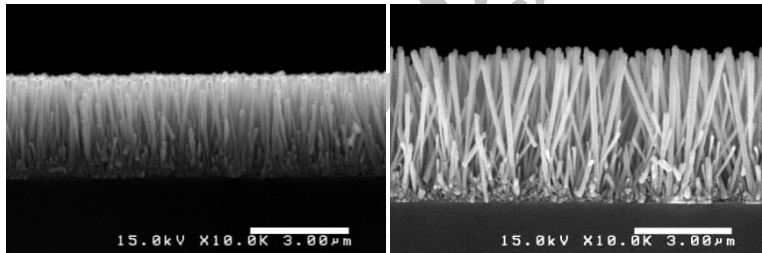
شکل ۳- نانو سیس اکسید رشد داده شده با استفاده از روش هیدروترمال با روش لایه نشانی با چرخشی (الف) دو بار بذرگذاری

(ب) یک بار بذرگذاری

### رشد اکسید روی

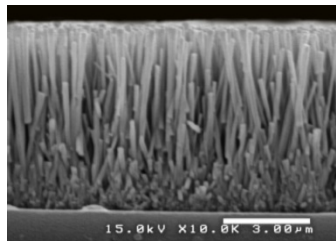
در مرحله دوم از فرآیند رشد اکسید روی در روش هیدروترمال، رشد اکسید روی بر روی بستر بذرگذاری می باشد. با توجه به اینکه مساحت سطح داخلی زیاد برای نانو ساختارهای اکسید روی یک عامل بسیار مؤثر در بهبود جداسازی بارهای الکتریکی در ادوات نیمه هادی محسوب می شود. این افزایش مساحت سطح داخلی برای نانوسیم‌های اکسید روی به معنی کاهش قطر و افزایش طول تا حد امکان می باشد. در روش هیدروترمال رایج، نمی توان به چنین ساختاری دست پیدا کرد. اخیراً برای افزایش نسبت ابعاد در نانوسیم‌های اکسید روی از یک ماده پلیمری با نام<sup>۱۵</sup> PEI به محیط رشد نانوسیم‌ها استفاده می گردد [۲۰]. نتیجه اضافه نمودن این ماده به محیط رشد، کاهش چشمگیر قطر نانوسیم‌ها و کاهش اندک طول آن‌ها در زمان‌های یکسان رشد و همچنین افزایش فاصله بین نانوسیم‌های مجاور گزارش شده است [۲۰]. در این مقاله از امواج میکروویو برای برطرف کردن مشکل زمان در روش هیدروترمال استفاده شده است. مشکلی که در روش هیدروترمال با امواج میکروویو می باشد، تشکیل اکسید روی بر روی بستر بذرگذاری شده و در درون محلول بطور همزمان می باشد. تشکیل اکسید روی در محلول موجب هدر رفت سریع مواد اولیه موجود در آن شده و لذا نرخ رشد نانوسیم‌ها بر روی بستر را کاهش می دهد. همچنین به منظور رشد نانوسیم‌های طویل باید بسترها مرتباً در درون محلول‌های تازه قرار داده شوند که زمان فرآیند تولید ادوات را به شدت افزایش می دهد. برای حل این مشکل از تکنیک مطرح شده در مرجع شماره [۲۱] استفاده شده است تا از تشکیل بذر و رسوب مواد اولیه جلوگیری کرد بدین منظور از هیدروکسید آمونیوم در محیط رشد استفاده شده است.

بنابراین به منظور رشد نانو سیم های اکسید روی، ابتدا محلولی شامل ۲۵ میلی مولار نیترات روی هگزا هیدرات  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ، ۱۲/۵ میلی مولار هگزامین، ۵ میلی مولار PEI (end-capped, o) و  $NH_4OH$  در آب یونیزه شده تهیه گردید. سپس بسترها به صورتی که سطح بذر گذاری شده رو به پایین باشد درون یک ظرف در بسته حاوی ۲۰۰ میلی لیتر از محلول رشد قرار داده شدند. ظرف حاوی محلول به منظور پایداری حرارتی بیشتر در درون یک حمام آب قرار داده شد و به همراه آن درون یک مایکروویو متداول با حداکثر توان ۸۵۰ وات در مدت زمان ۴ تا ۸۰ دقیقه قرار داده شد. در پایان رشد، بسترها از محلول بیرون آورده شده و کاملاً با آب یونیزه شده شسته شدند و سپس در دمای ۳۵۰ درجه به مدت نیم ساعت در هوا حرارت داده شدند تا هرگونه مواد آلی باقیمانده از بین برود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی بلندترین نانوسیم هایی که قادر به رشد دادن آن ها بدون تعویض محلول رشد با استفاده از روش مطرح شده با محلول مطرح شده، در توان های مختلف مایکروویو در شکل ۴ آورده شده است.



الف

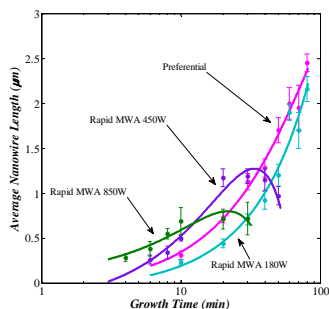
ب



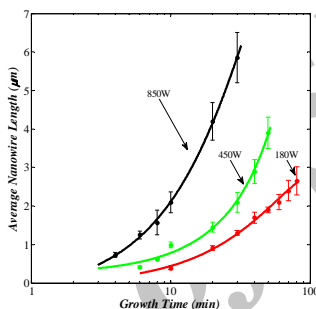
ج

شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از بلندترین نانوسیم هایی رشد داده شده با روش مطرح شده در توان های مختلف مایکروویو. الف) ۱۸۰ وات (۸۰ دقیقه) ب) ۴۵۰ وات (۵۰ دقیقه) ج) ۸۵۰ وات (۳۰ دقیقه)

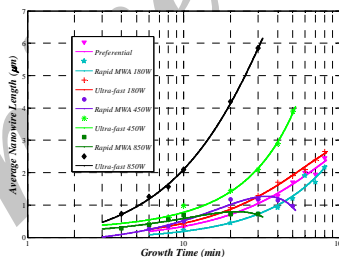
افزایش نرخ رشد و نسبت ابعاد نانوسیم‌ها با افزایش توان به وضوح در شکل‌های ۴ قابل ملاحظه می‌باشد. تصاویر نشان می‌دهند که در این روش نیز مانند بقیه روش‌های با کمک مایکروویو، توان با نرخ رشد متناسب بوده و با افزایش توان نانوسیم‌های بلندتری را در زمان کمتر می‌توان رشد داد. شکل‌های ۵-الف و ۵-ب به ترتیب میزان متوسط رشد طولی نانوسیم‌های اکسید روی بر حسب زمان فرآیند رشد را برای دو روش سریع با کمک مایکروویو [۱۸] و [۲۱] که روش رشد ترجیحی<sup>۱۶</sup> نامیده می‌شود و نیز روش انجام شده در این مقاله که همگی در یک سیستم و شرایط یکسان پیاده‌سازی شده‌اند نشان می‌دهد. تقریب چندجمله‌ای و انحراف استاندارد داده‌های حاصل نیز به منظور ایجاد درک بهتر آورده شده است.



الف



ب

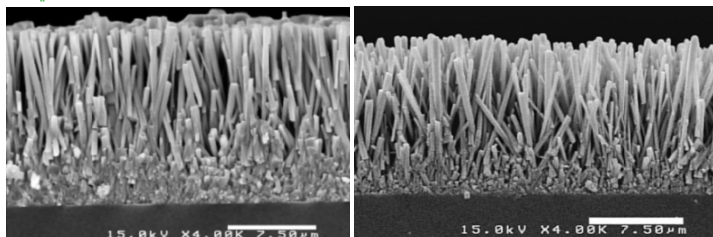


ج

شکل ۵. متوسط رشد طولی نانوسیم‌های اکسید روی رشد داده شده با روش‌های مختلف (الف) روش ترجیحی و روش سریع با کمک مایکروویو (ب) روش بسیار سریع انجام شده در این مقاله (ج) مقایسه نتایج تمام روش‌ها در یک نمودار میله‌ای خطا به دلیل جلوگیری از شلوغی شکل حذف شده است.

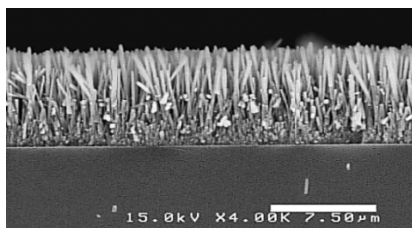
شکل ۵- ج نیز داده های حاصل از تمامی روش های بررسی شده را در یک نمودار به منظور مقایسه ی بهتر نشان می دهد. در این شکل میله های خطا به منظور جلوگیری از شلوغی شکل حذف شده اند. همان گونه که از شکل ۵- الف کاملاً مشخص است در روش سریع با کمک میکروویو در زمان های بیش از ۱۰ دقیقه اگرچه در توان های پایین، رشد طولی نانوسیم ها با افزایش زمان فرآیند روند افزایشی خود را ادامه می دهد اما هنگامی که توان های بالاتری اعمال شوند اگرچه در زمان های کوتاه رشد شاهد افزایش نرخ رشد نانو سیم ها با افزایش توان خواهیم بود اما در زمان های طولانی تر رشد طولی نانوسیم ها متوقف شده و به عبارتی به اشباع می رسد. ضمن این که هر چه توان اعمالی افزایش یابد این اشباع زودتر رخ داده و نانوسیم های کوتاه تری تولید خواهند شد. روش ترجیحی نیز اگرچه به دلیل کاهش قابل توجه تشکیل هسته همگن در فرآیند رشد، دارای نرخ رشد بیشتری نسبت به روش سریع با کمک میکروویو در توان ۱۸۰ وات می باشد اما به دلیل عدم برخورداری از گرمادهی سریع توسط میکروویو، رسیدن به نرخ رشدهایی بیش از حدود ۲ میکرون در ساعت با استفاده از این روش در سیستم ما امکان پذیر نبود.

شکل ۵- ب نشان می دهد که در روش انجام شده در این مقاله، مشکل توقف رشد نانو سیم ها پس از زمان های طولانی در توان های متوسط و بالا کاملاً رفع شده است. در واقع به دلیل این که با به کارگیری هیدروکسید آمونیوم و PEI در محلول رشد تشکیل هسته همگن به شدت کاهش یافته است [۲۱]، اکثر مواد اولیه موجود در محلول صرف رشد نانو سیم های اکسید روی می گردد. شکل ۵- ج به وضوح برتری روش انجام شده در این مقاله را نسبت به دو روش ترجیحی و سریع با کمک میکروویو نشان می دهد. بنابراین این روش، رشد نانو سیم های اکسید روی روشی مناسب برای رسیدن به طول های مختلف نانوسیم های اکسید روی در زمان های کم خواهد بود. با توجه به اینکه در صورتی که محلول تعویض نگردد دسترسی به طول های دلخواه امکان ندارد. با تعویض محلول و انجام دادن دوباره مراحل رشد، می توان به طول دلخواه رسید. شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی جانبی، چند نمونه از این آرایه ها را با حداکثر طول در حدود ۱۶ میکرومتر نشان می دهد.



ب

الف



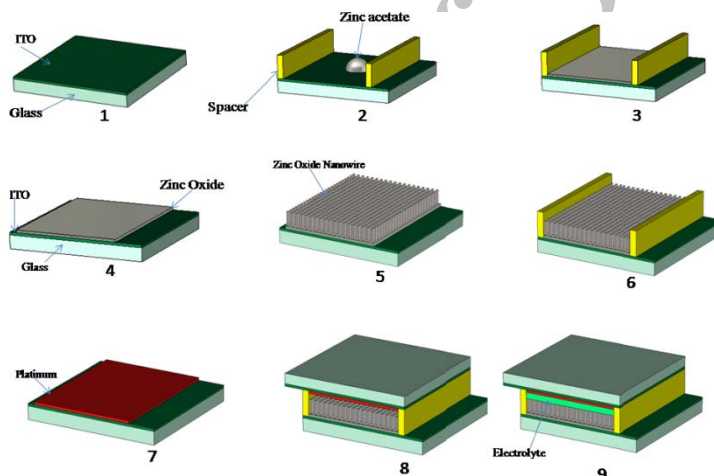
ج

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمای جانبی از آرایه‌های طولیل نانوسیم اکسید روی رشد داده شده به منظور کاربرد در ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه در طول‌های (الف) ۱۶ (ب) ۱۱ (ج) ۹ میکرومتر.

### ساخت سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه با نانو ساختار اکسید روی

برای ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه با نانو ساختار اکسید روی از اکسید روی‌های رشد داده شده استفاده می‌گردد. شکل ۷ زیر طرح واره‌ای کاملی از مراحل ساخت یک سلول خورشیدی از ابتدای تولید نانو سیم‌های اکسید روی تا آزمایش قرار دادن سلول برای درک بهتر نشان می‌دهد. اولین مرحله از فرآیند ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه‌ها پس از رشد نانوسیم‌های اکسید روی، حساس سازی نانوسیم‌های رشد داده شده به رنگدانه که الکتروود آند سلول خورشیدی را تشکیل می‌دهد، می‌باشد. شکل ۶-۵ نانوسیم‌های حساس شده با رنگدانه را نشان می‌دهد. برای این منظور بستر شامل نانوسیم‌ها درون محلول ۰/۵ میلی مولار رنگدانه مرکرو کروم [۲۲] در اتانول به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به صورت غوطه‌ور قرار گرفته است. پس از اتمام فرآیند جذب رنگدانه به الکتروود، بسترها از محلول بیرون آورده شده و با اتانول خالص شسته شدند تا هرگونه رنگدانه جذب نشده باقی مانده بر روی سطوح بستر از بین برود.

لایه نشانی پلاتین بر روی یک قطعه شیشه دارای لایه اکسید هادی شفاف که الکتروکاتد سلول را تشکیل می دهد با استفاده از محلولی از اسید هیدروکلروپلاتینیک<sup>۱۷</sup> در اتانول با غلظت ۱۰ میلی مولار، انجام می گردد. شکل ۷-۱ این ساختار را نشان می دهد. ایجاد فاصله بین دو الکتروکاتد به منظور تزریق الکتروولیت توسط دو لایه پارافیلیم انجام گرفت. در نهایت دو روزنه کوچک در دو سر سلول به منظور تزریق الکتروولیت باز گذاشته شد. الکتروولیت استفاده شده شامل ۰/۳ مولار لیتیم یدید LiI و ۰/۰۳ مولار ید I<sub>2</sub> در استونیتریل CH<sub>3</sub>CN بوده است که توسط یک سرنگ به درون سلول تزریق شده است. از الکترودهای باقی مانده جهت اتصال استفاده می گردد. شکل ۷-۹ طرح واره کاملی از یک سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه را می دهد. شکل ۸ تصویری از یک نمونه از سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه با استفاده از اکسید روی را نشان می دهد.



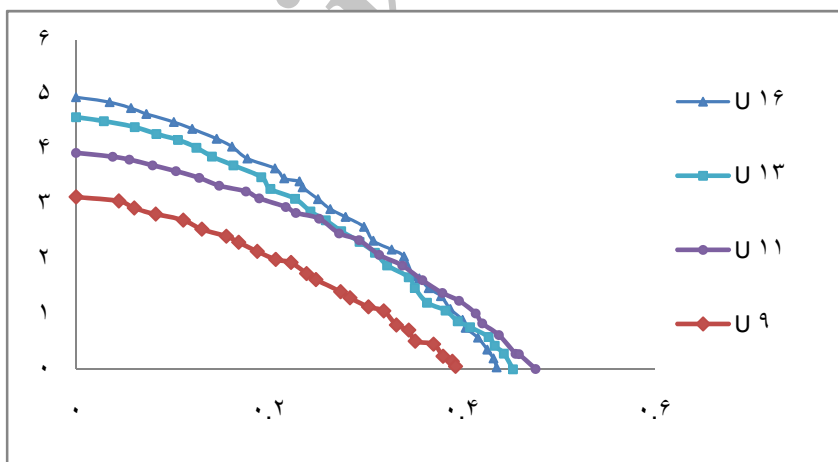
شکل ۷. شماتیکی از مراحل ساخت یک سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه (۱) آماده سازی زیرلایه شیشه همراه با ITO. (۲ و ۳) بزرگداری استات روی بر روی زیر لایه در محل مورد نظر با لایه نشانی چرخشی. (۴) تبدیل کردن استات روی با حرارت به لایه بذری از اکسید روی. (۵) رشد نانو ساختار اکسید روی با هیدروترمال با به کارگیری امواج مایکروویو و حساس سازی اکسیدهای روی با رنگدانه. (۶) آماده سازی فاصله لازم برای الکتروولیت. (۷) آماده سازی الکتروکاتد سلول خورشیدی. (۸) سوار کردن الکتروکاتد و آند سلول. (۹) تزریق الکتروولیت به درون سلول خورشیدی و سلول خورشیدی آماده برای مورد آزمایش قرار گرفتن.





شکل ۸. نمای ظاهری یک نمونه سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه اکسید روی

به منظور محاسبه بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه، از یک دستگاه شبیه‌ساز نور خورشید که با استفاده از یک لامپ زنون ۳۰۰ وات، طیف نوری مشابه با نور خورشید با چگالی توان کالیبره شده  $100 \text{ mW/cm}^2$  تولید می‌کند، استفاده شده است. برای بررسی بیشتر پنج نمونه سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه که از آرایه‌های نانوسیم اکسید روی با میزان رشد طولی مختلف است مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۹ منحنی‌های ولتاژ-جریان به دست آمده برای ۴ نمونه سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه که از آرایه‌های نانوسیم اکسید روی با میزان رشد طولی مختلف بهره می‌برند را نشان می‌دهد.



شکل ۹. منحنی‌های ولتاژ-جریان سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه ساخته شده دارای آرایه‌های نانوسیم اکسید روی با میزان رشد طولی متفاوت

پارامترهای خروجی بدست آمده از منحنی ولتاژ- جریان هر یک از سلول ها در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول  $J_{sc}$  جریان اتصال کوتاه،  $V_{oc}$  ولتاژ مدار باز سلول خورشیدی و  $FF^{18}$  ضریب انباشتگی می باشد و از رابطه ۱ بدست می آید همچنین بازده سلول که با  $\eta$  نشان داده می شود، از رابطه ۲ بدست می آید. در رابطه های ذکر شده  $I_m$  و  $V_m$  به ترتیب ولتاژ و جریان بهینه می باشند [۲۳].

(۱)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

(۲)

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$

با بررسی منحنی های ولتاژ- جریان به دست آمده، مشخص می گردد که مقدار ولتاژ مدار باز برای تمام سلول ها تقریباً یکسان بوده که دلیل آن می تواند وابسته بودن ولتاژ مدار باز به اختلاف تراز فرمی لایه نیمه هادی و پتانسیل اکسایش- کاهش الکترولیت باشد که برای تمام سلول ها تقریباً برابر است. از طرف دیگر در منحنی های ولتاژ- جریان سلول ها افزایش جریان اتصال کوتاه با افزایش میزان رشد طولی نانوسیم ها مشاهده می شود. دلیل این افزایش در جریان اتصال کوتاه می تواند افزایش مساحت سطح داخلی آرایه های نانوسیم به کار گرفته شده در سلول ها با افزایش طول نانوسیم ها و در نتیجه افزایش میزان جذب رنگدانه دانست. زیرا که افزایش جذب رنگدانه، یکی از عوامل اصلی در افزایش جذب نور و تولید الکترون و لذا افزایش جریان اتصال کوتاه سلول گزارش شده است [۲۴].

جدول ۱. پارامترهای خروجی سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه نانوسیم های اکسید روی با طول های مختلف.

طول های مختلف	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	$\eta$ (%)
طول آرایه نانوسیم (μm)				
9	3.15	0.40	0.34	0.43
11	4.59	0.44	0.37	0.75
13	4.96	0.43	0.37	0.79
16	3.98	0.46	0.34	0.62

Fill Factor<sup>18</sup>

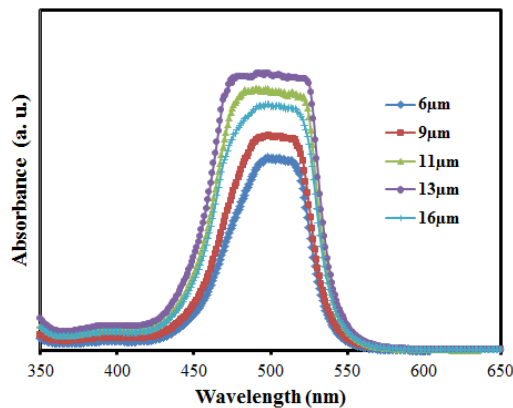
با این وجود، یک مورد استثناء در منحنی‌های شکل ۹ مشاهده می‌شود و آن کمتر بودن جریان اتصال کوتاه سلول ساخته‌شده با آرایه نانوسیم دارای طول ۱۶ میکرون نسبت به سلول‌های دارای آرایه‌های ۱۱ و ۱۳ میکرونی است که دلیل اصلی کاهش بازده تبدیل انرژی آن نسبت به سلول‌های ۱۱ و ۱۳ میکرونی نیز می‌باشد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی به دست آمده از آرایه‌ها که در شکل ۵-الف آورده شده است به خوبی مشخص است که در آرایه با میزان رشد طولی ۱۶ میکرون مقداری به هم چسبیدگی در نانوسیم‌ها مشاهده می‌گردد که ناشی از رشد جانبی آن‌ها و عدم امکان توقف آن می‌باشد. به هم چسبیدگی در آرایه نانوسیم‌ها می‌تواند دو مشکل ایجاد نماید، اول اینکه مساحت سطح داخلی آرایه را به شدت کاهش داده و لذا رنگدانه کمتری در آن جذب می‌شود. دوم اینکه نفوذ الکترولیت به درون آرایه را که به منظور بازسازی مجدد رنگدانه‌های موجود بر روی سطح نانوسیم‌ها پس از تزریق الکترون ضروری است، به خصوص در مورد الکترولیت‌های جامد، بسیار مشکل خواهد نمود. لذا کاهش جریان اتصال کوتاه در مورد سلول دارای آرایه ۱۶ میکرونی می‌تواند به دلیل کاهش جذب رنگدانه ناشی از به هم چسبیدگی نانوسیم‌ها باشد.

در مورد رابطه میزان مساحت سطح داخلی آرایه نانوسیم و لذا جذب رنگدانه با جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی از روشی به شرح زیر برای اندازه‌گیری نسبی میزان جذب رنگدانه آرایه نانوسیم‌ها بهره برده شده است. آرایه‌های نانوسیم با میزان رشد طولی متفاوت پس از جذب رنگدانه با شرایط ذکر شده در بخش قبل، در درون ۲ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ مولار هیدروکسید سدیم NaOH در آب قرار داده شدند که منجر به جداسازی کامل رنگدانه‌های جذب شده در آرایه نانوسیم و حل شدن آن‌ها در درون محلول می‌گردد. سپس محلول به دست آمده از لحاظ میزان جذب نور در محدوده مرئی و فرابنفش توسط یک دستگاه طیف سنج نور فرابنفش - مرئی (PerkinElmer Lambda 25) مورد آزمایش قرار گرفت که منحنی‌های جذب بدست آمده در شکل ۸ آورده شده است.

همان‌گونه که از شکل ۱۰ نیز واضح است محدوده جذب رنگدانه مرکروکروم به کار برده شده در طول موج‌های ۴۵۰ تا ۵۵۰ نانومتر است که محدوده جذب وسیعی محسوب نمی‌گردد. یکی از علل اصلی بازدهی کم سلول‌های ساخته شده در این پروژه نسبت به سلول‌های مشابه بر پایه نانوسیم‌های اکسید روی که از رنگدانه N719 استفاده می‌کنند [۳]. همین طیف جذب باریک تر رنگدانه مورد استفاده در این مقاله می‌باشد. از طرف دیگر از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که میزان جذب نور آرایه‌های نانوسیم با طول‌های مختلف کاملاً منطبق با نتایج به دست آمده در مورد جریان اتصال کوتاه آنها در شکل ۱۰ می‌باشد. به عبارت دیگر در این جا نیز میزان جذب نور و در نتیجه

مقدار جذب رنگدانه با افزایش رشد طولی نانوسیم ها از خود افزایش نشان می دهد به جز در مورد آرایه ۱۶ میکرونی که در انطباق کامل با نتایج منحنی ولتاژ- جریان نسبت به آرایه های ۱۱ و ۱۳ میکرونی از خود کاهش جذب نور نشان می دهد.

در صورتی که به مقادیر بازده در جدول ۱ توجه شود مشاهده می گردد که مقدار بازده آن پایین می باشد. یکی از دلایل اصلی را می توان انتخاب نوع رنگدانه می باشد در صورت انتخاب رنگدانه های با طیف جذب بیشتر مانند N719 بازده سلول خورشیدی به مراتب افزایش پیدا خواهد کرد در سال های اخیر گروه های مختلفی برای افزایش بازدهی سلول خورشید با تغییر نوع رنگدانه ها و تغییر نانوساختارهای اکسید روی به این هدف دستیابی پیدا کرده اند [۳]. با توجه به این که در این مقاله، هدف بررسی تغییرات طول اکسید روی بر روی تغییرات بازده سلول خورشیدی بوده است، بنابراین رنگدانه مرکوروکروم که دارای طیف جذب باریکی می باشد و از لحاظ هزینه بسیار پایین می باشد مورد استفاده قرار گرفته است. در صورت استفاده از رنگدانه هایی مانند N3 و N719 امکان دسترسی به بازده های در حدود ۷ درصد نیز وجود دارد [۲۵]. همچنین بازده سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه بر پایه اکسید روی دارای بازده بالایی برخوردار نمی باشند در حالی که از اکسیدهای دیگری مانند  $TiO_2$  استفاده گردد بازده های بالاتری قابل دسترسی خواهد بود [۲۶].



شکل ۱۰. منحنی میزان جذب نور فرا بنفش - مرئی رنگدانه های جدا شده از آرایه های نانوسیم اکسید روی با میزان رشد طولی مختلف

## نتیجه گیری

در این تحقیق سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه با اکسید روی ساخته شد. یکی از عوامل اصلی در میزان بازده سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه، میزان جذب رنگدانه توسط اکسیدهای روی رشد داده شده می‌باشد که این کار در این روش با رشد منظم اکسیدهای روی و رشد طویل اکسید روی صورت گردید. افزایش طول اکسید روی بر میزان جذب رنگدانه، و در نهایت میزان بازده تأثیر مستقیم دارد که علت آن افزایش انتقال الکترون به الکتروود در سلول می‌باشد که این افزایش ناشی از افزایش مساحت جانبی اکسید روی برای جذب رنگدانه می‌باشد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که بازده سلول خورشیدی (η) با طول اکسید روی ۶ μ تا ۱۳ μ به میزان ۸۰ درصد افزایش یافته است. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد که در این روش ساخت، میزان طول نانوسیم اکسید روی قابل کنترل می‌باشد و بنابراین با کنترل بر روی میزان طول می‌توان بازده سلول خورشیدی را نیز کنترل نمود. مشکلی که می‌توان در افزایش طول اکسید روی دانست به هم چسبندگی آرایه نانو سیم‌ها می‌باشد، که بازده سلول خورشیدی را کاهش دهد. این حالت در نانو اکسیدهای روی با طول ۱۶ μ در این بررسی مشاهده گردیده شد. در حالی که انتظار افزایش بازده می‌باشد با کاهش بازده روبرو شده است که می‌توان با بهبود روش رشد نانو سیم‌های اکسید روی و جلوگیری از رشد جانبی، از این مشکل نیز جلوگیری کرد.

## مراجع

- [1] M.A Green, "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," *J Mater Sci: Mater Electron*, 2007, vol.18, pp. 15-19.
- [2] N.O. Plank, I. Howard, A. Rao, M.B. Wilson, M.E. Welland and et.al, "Efficient ZnO Nanowire Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells Using Organic Dyes and Core-shell Nanostructures," *J. Phys. Chem. C*, 2009, vol.113, pp.18515–18522.
- [3] J.A. Anta, E. Guillen and R. Tena-Zaera, "ZnO-Based Dye-Sensitized Solar Cells" *J. Phys. Chem. C*, 2012, vol. 116, pp.11413–11425.
- [4] B. O'regan and M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films," *Nature*, 1991, vol. 353, no. 6346, pp. 737–740.
- [5] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells," *Nat Mater*, 2005, vol. 4, no. 6, pp. 455-459, Jun.
- [6] H. Horiuchi et al., "Electron Injection Efficiency from Excited N<sub>3</sub> into Nanocrystalline ZnO Films: Effect of (N<sub>3</sub>-Zn<sup>2+</sup>) Aggregate Formation," *J. Phys. Chem. B*, 2003, vol. 107, no. 11, pp. 2570-2574.

- [7] J.-J. Wu, G.-R.Chen, H.-H.Yang, C.-H.Ku, and J.-Y. Lai, "Effects of dye adsorption on the electron transport properties in ZnO-nanowire dye-sensitized solar cells," *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, p. 213109.
- [8] S.K. Arya, S. Saha, J.E. Ramirez-Vick, V.Gupta, S.Bhansali, S.P. Singh, "Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications" *AnalyticaChimicaActa*, 2012, vol. 737, pp. 1–21
- [9] K. D. Benkstein, N. Kopidakis, J. van de Lagemaat, and A. J. Frank, "Influence of the Percolation Network Geometry on Electron Transport in Dye-Sensitized Titanium Dioxide Solar Cells," *J. Phys. Chem. B*. 2003, vol. 107, no. 31, pp. 7759-7767, Jan.
- [10] N. Kopidakis, K. D. Benkstein, J. van de Lagemaat, and A. J. Frank, "Transport-Limited Recombination of Photocarriers in Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Solar Cells," *J. Phys. Chem. B*, Jan 2003, vol. 107, no. 41, pp. 11307-11315.
- [11] A. J. Frank, N. Kopidakis, and J. van de Lagemaat, "Electrons in nanostructured TiO<sub>2</sub> solar cells: transport, recombination and photovoltaic properties," *Coord. Chem. Rev.* 2004., vol. 248, pp. 1165–1179.
- [12] E. Stathatos, P. Lianos, S. Zakeeruddin, P. Liska, and M. Grätzel, "A quasi-solid-state dye-sensitized solar cell based on a sol-gel nanocomposite electrolyte containing ionic liquid," *Chemistry of materials*, 2003, vol. 15, no. 9, pp. 1825–1829.
- [13] P. Yang et al., "Controlled Growth of ZnO Nanowires and Their Optical Properties," *Advanced Functional Materials*, May 2002, vol. 12, no. 5, pp. 323-331,.
- [14] T. Renouard et al., "Novel Ruthenium Sensitizers Containing Functionalized Hybrid Tetradentate Ligands: Synthesis, Characterization, and INDO/S Analysis," *Inorg. Chem.* 2002, vol. 41, no. 2, pp. 367-378.
- [15] K. Hara et al., "Design of new coumarin dyes having thiophene moieties for highly efficient organic-dye-sensitized solar cells," *New Journal of Chemistry*, Apr. 2003, vol. 27, pp. 783-785.
- [16] G. Kron, T. Egerter, J. H. Werner, and U. Rau, "Electronic Transport in Dye-Sensitized Nanoporous TiO<sub>2</sub> Solar Cells Comparison of Electrolyte and Solid-State Devices," *J. Phys. Chem. B*, vol. 107, no. 15, pp. 3556-3564, 2003.
- [17] L. E. Greene et al., "Low-Temperature Wafer-Scale Production of ZnO Nanowire Arrays," *Angewandte Chemie International Edition* Jul. 2003, vol. 42, no. 26, pp. 3031-3034,.
- [18] L. E. Greene et al., "General Route to Vertical ZnO Nanowire Arrays Using Textured ZnO Seeds," *Nano Lett.* , Jan. 2005., vol. 5, no. 7, pp. 1231-1236.
- [19] H. E. Unalan, P. Hiralal, N. Rupesinghe, S. Dalal, W. I. Milne, and G. A. J. Amaratunga, "Rapid synthesis of aligned zinc oxide nanowires," *Nanotechnology* Jun. 2008, vol. 19, p. 255608,.
- [20] Y. Zhou, W. Wu, G. Hu , H. Wu, S. Cui, "Hydrothermal synthesis of ZnO nanorod arrays with the addition of polyethyleneimine," *Materials Research Bulletin*, 2008, vol. 43, pp. 2113–2118.

- [21] C. Xu, P. Shin, L. Cao, and D. Gao, "Preferential Growth of Long ZnO Nanowire Array and Its Application in Dye-Sensitized Solar Cells," *J. Phys. Chem. C*, vol. 114, no. 1, pp. 125-129, 2009.
- [22] K. Hara, T. Horiguchi, T. Kinoshita, K. Sayama, H. Sugihara, and H. Arakawa, "Highly efficient photon-to-electron conversion with mercurochrome-sensitized nanoporous oxide semiconductor solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 64, p. 115, 2000.
- [23] H. J. Möller, *Semiconductors for solar cells*. Artech House Boston^ eMA MA, 1993
- [24] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells," *Nat Mater*, Jun. 2005, vol. 4, no. 6, pp. 455-459.
- [25] C.Y Lin ,Y.H Lai, H.W Chen, J.G Chen, C. Wei Kung , R. Vittal and K.C Ho, "Highly efficient dye-sensitized solar cell with a ZnO nanosheet-based photoanode," *Energy Environ. Sci.* 2011, vol 4, pp.3448-3455.
- [26] E. Ghadiri, N. Taghavinia, S.M. Zakeeruddin, M.G Tzel, and J.E. Moser, "Enhanced Electron Collection Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells Based on Nanostructured TiO<sub>2</sub> Hollow Fibers," *Nano Letter*, 2010, vol 10, pp.1632-1638.

Archive of SID