

مقدار بهینه طول نانومیله‌های اکسید روی ساخته شده به روش سل-ژل و هیدروترمال مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی

امین جمشیدی^۱، ارغوان کاظمی^۲، روزبه سیاوش مؤخر^۳

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

^۲ دکتری تخصصی مواد پیشرفته، استادیار دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات و

فناوری، مدیر گروه مواد غیرفلزی و حفاظت

^۳ دکتری مهندسی مواد، استادیار سابق پژوهشگاه نیرو، پژوهشگر دانشکده مهندسی

پزشکی دانشگاه مک گیل کانادا



نویسنده مسئول و نویسنده اول:

مهندس امین جمشیدی

دکتر ارغوان کاظمی

دکتر روزبه سیاوش مؤخر

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۴۲ تا ۴۹

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۳۷۸۳

زبان نشریه: فارسی

دسترسی‌پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۱/۳۰

DOR: 20.1001.1.17353351.1401.18.0.8.4

چکیده: در این تحقیق، فرآیند رشد و مقدار بهینه طول نانومیله‌های اکسید روی به عنوان نیمه‌رسانای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی به روش سل-ژل و هیدروترمال مورد بررسی قرار گرفته است. این نانوساختارها با داشتن شکاف انرژی مناسب، حین دریافت نور خورشید سبب انجام فرآیند جدایش آب به عناصر سازنده آن، هیدروژن و اکسیژن می‌شوند. بیشترین مقدار رشد نانومیله‌ها با زیر لایه FTO و حلآل آب دیوینیز، دمای رشد ۹۵ درجه سانتی‌گراد و زمان رشد ۳ ساعت محقق گردید که طول نانومیله‌های رشد یافته ۱۵۰۰ نانومتر بود و بیشترین نسبت طول به عرض L/W با مقدار ۱۵ برابر در این شرایط به دست آمد. در مرحله نهایی نیز آزمون‌های فتوالکتروشیمیایی و تأثیر طول نانومیله‌ها بر فرآیند جدایش آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های فتوالکتروشیمیایی نشان می‌دهد که مقداری بهینه برای طول نانومیله‌ها وجود دارد. بهترین نتایج فتوالکتروشیمیایی با نسبت طول به عرض L/W با مقدار حداقل ۱۰ برابر و با طول نانومیله‌های حداقل تا ۱۰۰۰ نانومتر که طی مدت ۲ ساعت و دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد رشد داده شد، به دست آمد.

کلمات کلیدی: نانومیله، اکسید روی، جدایش آب، سل-ژل، فتوالکتروشیمیایی، نیمه‌رسانا.

۱- مقدمه

بزرگ‌ترین چالش موجود در توسعه استفاده از انواع مختلف سلول‌های خورشیدی، مسئله ذخیره انرژی تولید شده و همچنین بازدهی نهایی سلول‌های خورشیدی است که به کاهش مسئله هزینه به زمان منجر می‌شود. در هر کدام از انواع مختلف سلول‌های خورشیدی، عوامل تاثیرگذار مختلفی بر بازده نهایی سلول خورشیدی تاثیرگذار خواهند بود. یافتن عوامل اثرگذار و همچنین مقادیر بهینه هر یک از این پارامترها می‌تواند در پیشبرد و فرآگیر شدن این فناوری و گسترش استفاده از آن اثرگذار باشد. نانومیله‌های اکسید روی به عنوان یکی از مهم‌ترین نیمه‌رساناهای در زمینه ساخت سلول‌های خورشیدی هستند. از کاربردهای این



نانوساختارها می‌توان به عنوان سطح جلوگیری کننده از بازتاب در سلول‌های خورشیدی نسل اول و یا استفاده از نانو میله‌های اکسید روی به عنوان عامل جذب نور خورشید و استفاده از آن برای انجام فرآیند جدایش آب در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیابی نام برد. نور خورشید انرژی کافی برای ایجاد جدایش بین اکسیژن و هیدروژن را دارد، اما با توجه به ماهیت شفاف آب، این فرآیند به طور خودکار رخ نمی‌دهد و نانومیله‌های اکسید روی در این زمینه کاربرد دارند [۱]. تولید هیدروژن از نور خورشید از طریق چهار روش انجام می‌گیرد که شامل فرآیندهای حرارتی، الکتریکی، بیولوژیکی و نوری است [۲].

به دلیل اینکه هیدروژن قابلیت تولید به طور مستقیم به روش جدایش از آب به وسیله نور خورشید را دارد، تجزیه آب به روش فتوالکتروشیمیابی (PEC) یا (Photoelectrochemical Water Splitting) Photocatalytic Water Splitting معمول توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در همین رابطه، موادی که حساس به نور بوده و به عنوان جاذب انرژی خورشیدی عمل می‌کنند، برای استفاده به عنوان فتوالکترودهایی که وظیفه جذب نور و تجزیه آب و تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیابی را با هدف تولید هیدروژن دارند کاربرد خواهد داشت [۳].

اکسیدهای فلزی نیمه رسانا به دلیل ویژگی‌های خاص از بهترین مواد مورد مطالعه برای استفاده در این فرآیند هستند [۴]. این ویژگی‌های عبارتند از:

- ۱_ سهولت تولید (سترنز) نانوساختارهای صفر بعدی، یک بعدی و دو بعدی
- ۲_ شکاف انرژی مناسب و هماهنگ با پتانسیل کاوهشی و اکسایشی آب جهت تجزیه
- ۳_ مقاومت به تجزیه در محلول‌های آبی (برای کاربرد بلند مدت تجاری ضروری است).
- ۴_ قابلیت هدایت الکتریکی بالا
- ۵_ قابلیت تبلور بالا با کمترین میزان عیوب

از اکسیدهای فلزی نیمه‌رسانای معروف که در صنعت فتوولتائیک (PV) و فتوالکتروشیمیابی (PEC) کاربرد داشته و به طور گسترده مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته‌اند می‌توان به اکسید روی (ZnO) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، دی‌اکسید تیتانیوم آلایید شده با نیتروژن ($TiO_2:N$) و تری‌اکسید تنگستن (WO_3) اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهد که خواص حامل‌های شارژ نانوساختارهای اکسیدهای فلزی مثل نانوذرات و نانومیله‌ها در سلول‌های فتوالکتروشیمیابی از خواص لایه‌های نازک اکسید فلزی که به شیوه‌های سنتی اعمال می‌شد برترند. برای تولید هیدروژن به روش فتوالکتروشیمیابی، ویژگی‌هایی چون ساختار کربیستالی، مورفوژوئی، تخلخل و پارامترهای سطحی نقش مهم و تاثیرگذاری در بازده نهایی سلول فتوالکتروشیمیابی دارند [۳] و [۵].

نتایج مطالعات سال‌های اخیر نشان داده است که مواد نانوساختار اکسید روی به عنوان یک نیمه‌رسانای پر کاربرد با خواص بسیار مطلوب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اکسید روی یک گاف نواری پهن و مستقیم ($3/37\text{ eV}$) و انرژی بستگی اکسایتونی بالا (در حدود 60 meV در دمای اتاق دارد که این خواص منحصر به فرد، نانوساختارهای اکسید روی را به عنوان یک کاندیدای مهم برای کاربردهای متنوعی چون حسگرهای گاز، الکترونیک، اپتیک، فوتونیک، تصوفیه آب و از جمله در سلول‌های فتوالکتروشیمیابی معرفی می‌کند [۶] و [۷].

همچنین به علت حضور اکسیژن در ساختار اکسیدروی، تعداد بسیار زیادی جای خالی در سطح اکسیدروی وجود دارد که سبب تعامل زیاد بین مولکول‌های آب و اکسید روی برای مقاصد مربوطه می‌گردد [۸].

روش‌های متنوعی برای تولید نانوساختاری اکسید روی وجود دارد که بر پایه تولید در محلول و یا تولید از فاز گازی هستند. روش تولید از فاز محلول عمدها بر پایه حلال آب انجام می‌گیرد. در میان روش‌های مرسوم برای تولید نانوساختارهای اکسیدروی، روش‌های تولید از فاز گازی و تولید از فاز آبی بسیار مورد توجه هستند. در این تحقیق ساخت نانومیله‌ها به روش سل-ژل و هیدروترمال به عنوان روش اصلی مدنظر قرار گرفت. این انتخاب به دلیل سرعت بالا در تولید و قابل کنترل بودن شرایط رشد و همچنین دمای پائین مورد نیاز برای رشد که در این روش پائین‌تر از دمای جوش آب است انتخاب گردید.

علت انتخاب اکسید روی ZnO به عنوان ماده نیمه رسانا برای فرآیند شکافت آب، پایداری، هدایت‌پذیری، غیرسمی بودن، انرژی



اکسیتونی بالا است. شایان ذکر است که تحرک الکترونی بسیار بالاتر از TiO_2 نیز که به عنوان اولین ماده برای فرآیندهای فتوالکتروشیمیایی استفاده شده است، باعث شده که اکسید روی ماده نیمه رسانای بسیار مناسی برای ساخت سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی باشد. به علاوه، مقادیر لبه‌های نوار ظرفیت و هدایت اکسید روی، نیازهای اساسی فرآیند شکافت آب را از نظر واکنش‌های اکسایش H_2O/H_2O^+ و کاهش OH^-/O_2 فراهم می‌آورد [۹].

در این تحقیق، بررسی عوامل تاثیرگذار بر رشد نانومیله‌های اکسید روی و مقدار بهینه طول آن‌ها در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی و نحوه اثرگذاری این پارامترها بر بازده نهایی این سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

فرآیند کلی آزمایش‌ها برای به نتیجه رسیدن اهداف این پژوهش، شامل شش مرحله اصلی است. مرحله اول شامل تمیز کردن شیشه‌ها و زدودن آن‌ها از هر نوع آلودگی با استفاده از دستگاه اولتراسونیک بود. مرحله دوم تولید محلول سُل برای هسته‌گذاری به روش غیردرجا جهت ایجاد بستر مناسب برای رشد نانومیله‌ها و مرحله‌ی سوم نیز هسته‌گذاری نمونه‌ها با این روش بود. مرحله چهارم و پنجم نیز به تهیه محلول رشد و رشد نانومیله‌ها در انوکلاو اختصاص داشت. در مرحله نهایی آزمایش‌ها و سنجش‌های مربوط به اندازه‌گیری خواص نوری و الکتروشیمیایی مرتبط انجام گرفت. مواد اولیه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها شامل استون صنعتی و آب دیونیزه^۱ برای مراحل شستشو و اتانول آمین^۲، دی‌متوكسی اتانول^۳ و استات روی دوآبه^۴ برای تهیه محلول سُل مورد نیاز برای مرحله هسته‌گذاری نمونه‌ها و همچنین متان آمین^۵ و نیترات روی^۶ آبه^۷ برای تهیه محلول رشد است که شرح مواد و فرمول شیمیایی آن‌ها در جدول شماره ۱ آمده است.

جدول ۱: مواد شیمیایی مورد استفاده برای هسته‌گذاری و رشد

نام ماده	فرمول شیمیایی
اتانول آمین Ethanolamine	$NH_2CH_2CH_2OH$
دی‌متوكسی اتانول Ethyleneglycol Monomethyl ether	$CH_3OCH_2CH_2OH$
متان آمین Methenamine	$C_6H_{12}N_4$
استات روی دوآبه Zinc acetate dehydrate	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$
نیترات روی ^۶ آبه Zinc nitrate tetrahydrate	$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$

تعداد ۳ نمونه از شیشه FTO^7 با ابعاد $3*5*1$ سانتی‌متر برای رشد نانومیله‌ها در نظر گرفته شد. پس از شستشوی زیرلایه‌ها، اولین مرحله در انجام این تحقیق تهیه محلول جهت لایه‌نشانی و هسته‌گذاری زیر لایه‌ها است. روش هسته‌گذاری با استفاده از دستگاه Spin-Coating یک روش لایه‌نشانی موثر برای نشاندن لایه‌های یکنواخت بر روی سطوح است. در این روش نمونه‌ها با استفاده از نیروی گریز از مرکز، به صورت قطره‌ای لایه‌نشانی شده و در اثر این چرخش یک لایه بسیار نازک از ماده مورد نظر بر روی سطح زیرلایه نشانده می‌شود. در مرحله هسته‌گذاری، مطابق با نتایج تحقیقات Guo و همکاران [۱۰] تهیه محلول به این صورت انجام شده است که استات روی دوآبه (زنک استات دی‌هیدرات ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$)) در محلول حاوی

¹ Deionized water

² Ethanolamine

³ Ethylene glycol Monomethyl ether

⁴ Zinc acetate dehydrate

⁵ Methenamine

⁶ Zinc nitrate tetrahydrate

⁷ Fluorine-doped Tin Oxide



اتanol آمین ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) و دی متوكسی اتانول ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) حل می شود. غلظت استات روی $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ و اتانول آمین در محلول حاصل $75/0$ مولار است. محلول مورد نظر برای مدت زمان 30 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی گراد هم زده (Agitate) می شود تا یکنواخت گردد. از این محلول برای پوشش دهی و هسته گذاری سطح شیشه های FTO استفاده می گردد. محلول پوشش دهی کلوئیدی به وسیله سمپلر (میکروپیت) با حجم 200 میکرولیتر بر روی نمونه ها با قطع $1/5*3 \text{ cm}^2$ در دستگاه Spin-Coater در هین چرخش با سرعت 4000 rpm چکانده می شود. در مرحله بعد و برای رشد نانومیله ها با توجه به نمونه آزمایش های مشابه و مقرون به صرفه بودن مواد اولیه، از نیترات روی 4 آبه (zinc nitrate Tetrahydrate) برای رشد نانومیله ها به جای نیترات روی استفاده گردید. برای تهیه محلول رشد با غلظت $1/0$ مول بر لیتر در حجم 40 میلی لیتر ابتدا مقدار $1/04$ گرم نیترات روی 4 آبه را به آب دیونیزه اضافه و به مدت 10 دقیقه با دور 500 rpm در دستگاه استیرر هم زده شد. سپس مقدار $1/056$ گرم مtan آمین اضافه شد که بلا فاصله ژل تشکیل گردید که مجدداً به مدت 5 دقیقه با دور 500 rpm هم زده شد و سپس جهت انجام مراحل رشد نانومیله ها بر روی شیشه زیر لایه در داخل اتوکلاو قرار داده شد. در میان نمونه های رشد یافته، سه نمونه با کد F91، F92، و F93 برای انجام آزمون های بعدی انتخاب گردید که برای رشد نمونه ها در دمای 95 درجه سانتی گراد و در زمان به ترتیب 1 ساعت، 2 ساعت و 3 ساعت بود. مشخصات نمونه های مورد آزمایش در جدول شماره 2 شرح داده شده است.

جدول ۲: کد و مشخصات نمونه های مورد آزمایش

کد نمونه	دما (°C)	زمان (H)
F91	۹۵	۱ ساعت
F92	۹۵	۲ ساعت
F93	۹۵	۳ ساعت

۳- انجام آزمون ها و سنجش های مربوطه

برای انجام آزمایش های شناسایی و سنجشی، نمونه های آماده سازی شده توسط آزمون پراش سنجی اشعه ایکس XRD جهت شناسایی نانوذرات سنتر شده، با استفاده از دستگاه PANalytical X'Pert PRO MPD با ولتاژ 40 KV و شدت جریان 40 mA با استفاده از پرتو CuK α مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM بررسی شدند. برحسب نوع آزمون تصویرگیری از نمونه ها توسط آشکار سازهای BSE و SE در بزرگنمایی های مختلف توسط میکروسکوپ EFI ESEM QUANTA 200 کرونو آمپر متری^۱ در آزمایشگاه انرژی های پاک دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفت. برای انجام این آزمایش، از لامپ زنون (Xe) مدل EX-4000P مجهز به فیلتر IR^۲ که مجهز به سیستم سه الکترودی Ag/AgCl و (pt) بود استفاده گردید. توان خروجی این سیستم مشابه نور خورشید و به مقدار 100 mW/cm^2 است. آزمون با اعمال پتانسیل ثابت $7/40$ به الکترود ها در دو شرایط اعمال نور و بدون اعمال نور انجام گرفت. برای الکترولیت مورد نیاز برای انجام آزمون طیف سنج امپدанс الکتروشیمیایی، محلول $1/0$ مولار سولفات سدیم Na₂SO₄ انتخاب گردید.

۴- نتایج

نتایج آزمون SEM نشان از رشد نانومیله های اکسیدروی با طول متفاوت بر سطح زیر لایه دارد. اولین نمونه مورد بررسی، نمونه شماره F91 بود. این نمونه جهت رشد نانومیله ها در اتوکلاو قرار گرفت و با زمان رشد یک ساعت و دمای 95 درجه سانتی گراد در داخل آون حرارت دهی شد. مطابق شکل 1 ، نانومیله های اکسیدروی با طول تقریبی 500 nm در تصویر SEM نمای جانبی مشاهده می شود.

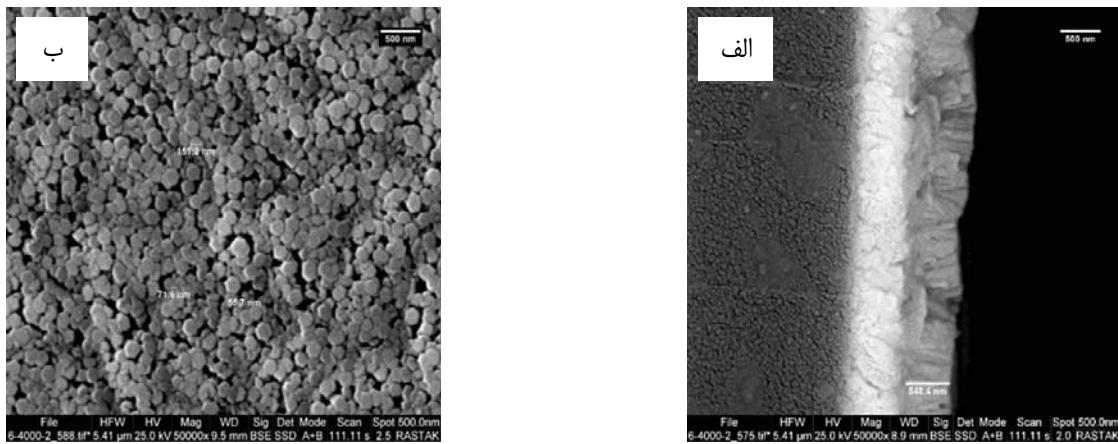
¹ Photoelectrochemical

² Chrono Amperometry

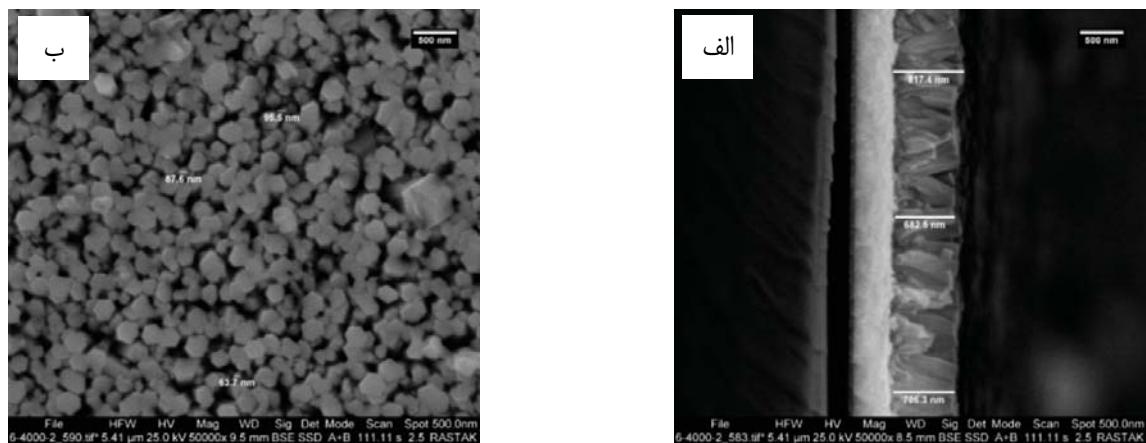
³ Infrared

همچنین در نمای از بالا در همین نمونه سطح مقطع نانومیله‌ها با ساختار شش‌ضلعی ورتیت مشاهده می‌شود. با ثابت نگاه داشتن دمای رشد، و افزایش زمان رشد به ۲ ساعت، طول نانومیله‌ها هم در نمونه شماره F92 افزایش یافت (شکل ۲) و ساختار منظم، متراکم و رشد یافته‌تری از نانومیله‌های اکسید روی را در نمای از بالا نشان می‌دهد.

بیشترین طول نانومیله‌های اکسید روی در نمونه شماره F93 (شکل ۳) مشاهده گردید که با افزایش زمان رشد به ۳ ساعت به مقدار تقریبی ۱۵۰۰ نانومتر افزایش یافته است. مطابق تصویر SEM از مقطع عرضی نمونه شماره F93 در شکل ۳، نانومیله‌های اکسید روی به مقدار زیادی رشد کرده و از تراکم ساختاری و راستای مناسبی نیز برخوردارند. با توجه به مقادیر به دست آمده در این نمونه، نسبت طول به عرض نانومیله‌ها نیز به طور میانگین در حدود ۱۵:۱ است.



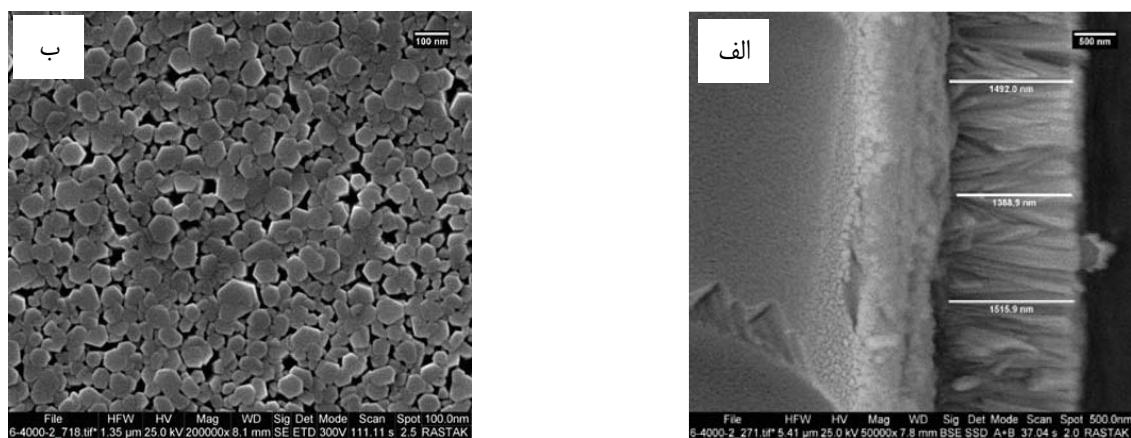
شکل ۱: تصویر SEM از نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F91



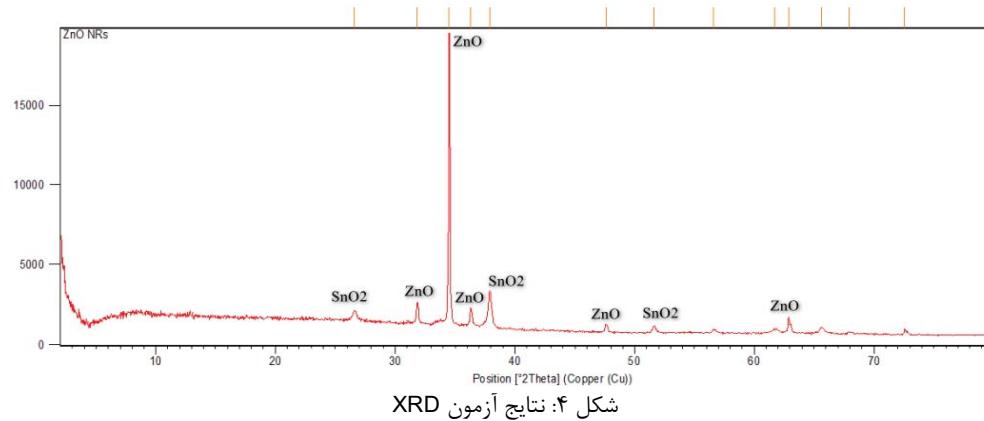
شکل ۲: تصویر SEM نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F92

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان رشد، طول نانومیله‌ها به طور معنادار افزایش یافته است که برای کاربردهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی مطلوب است. در شکل ۴ نتایج آزمون XRD مشاهده می‌شود که نتایج، با داده‌های کریستالوگرافی استاندارد الگوی M-070-2551 JCPDS 01-070-2551 مطابقت دارد و نشان می‌دهد که ساختارهای رشد یافته نانومیله‌های اکسید روی هستند. شایان ذکر است علت شناسایی ترکیبات SnO₂ به دلیل حضور این ترکیب در ساختار شیشه FTO، به عنوان زیرلایه است. برای اندازه‌گیری میزان پاسخ نوری نانومیله‌های رشد یافته و همچنین ارزیابی پایداری نمونه‌ها، آزمون کرونومپرومتری به این شیوه انجام گرفت که در بازه‌های زمانی معین و با قطع و وصل شدن جریان، تغییر در پاسخ نوری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. جریان ایجاد شده نشان‌دهنده برق‌گذشتگی الکترون‌ها در اثر تابش نور و جهش آنها از نوار ظرفیت به نوار هدایت

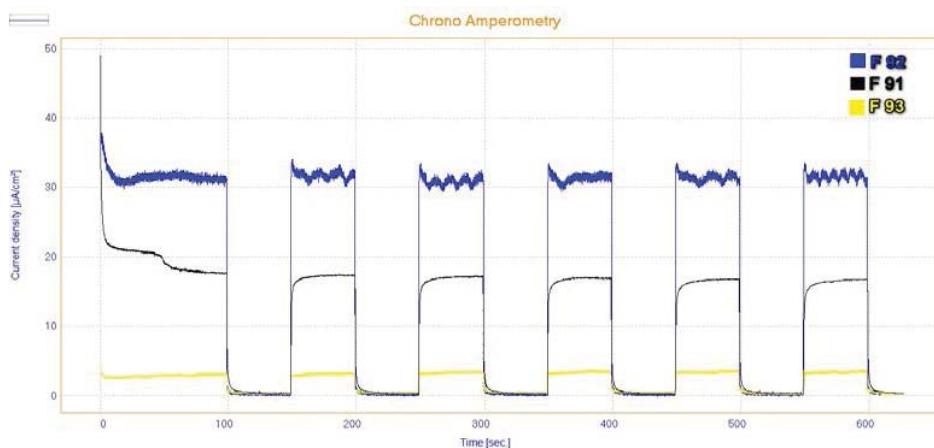
است. مطابق نمودار نمایش داده شده در شکل ۵، با قطع و وصل شدن جریان و نور تابانده شده به سطح نمونه‌ها، مقدار پاسخ نوری هر نمونه با توجه به طول نانومیله‌ها متفاوت است. در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه، تغییر در چگالی جریان همزمان با تابیدن نور مشاهده می‌شود که ممکن است این تغییرات در نانومیله‌های رشد یافته بر سطح نمونه‌ها است. همچنین مقادیر مثبت جریان تولید شده نیز حاکی از تشکیل نیمه رسانای نوع n است [۹].



شکل ۳: تصویر SEM نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F93 و افزایش طول نانومیله‌ها با افزایش زمان رشد به ۳ ساعت



شکل ۴: نتایج آزمون XRD



شکل ۵: نمودار چگالی جریان بر حسب زمان با اعمال ولتاژ $\frac{1}{4}$ ولت با الکترود Ag/AgCl

۵- نتیجه‌گیری

نتایج آزمون کرونوامپرمتري نشان می‌دهد که کمترین چگالی جریان مربوط به نمونه شماره F93 است که بیشترین طول نانوميله‌ها را با طول ميانگين ۱۵۰۰ nm دارد. بيشترین مقدار چگالی جریان نيز مربوط به نمونه شماره F92 است که طول نانوميله‌ها در آن حدакثر تا ۱۰۰۰ nm بود. با کمتر شدن طول نانوميله‌ها در نمونه شماره F91، که طول نانوميله‌ها در آن به طور ميانگين ۵۰۰ nm بود، از مقدار چگالی جریان کاسته شده است. با توجه به کاربرد نانوميله‌های اکسیدروی به عنوان لایه جاذب نور، به نظر می‌رسد که طول ۵۰۰ nm نانومتری نانوميله‌های رشد یافته در نمونه F91 به اندازه کافی سبب جذب نور و تشکیل جفت الکترون-حفره نمی‌شود. اما با افزایش طول نانوميله‌ها به مقادیر در حدود ۱۰۰۰ nm در نمونه F92 این فرآيند افزایش یافته و در ادامه با افزایش طول نانوميله‌ها به ۱۵۰۰ nm نانومتر در نمونه شماره F93، به دليل ايجاد موائع ساختاري بيشتر در مسیر نفوذ الکترون به الکترود رساناً موجب باز ترکيب الکترون و در نهاييت سبب کاهش چگالی جریان در اين نمونه شده است. نتایج پژوهش‌های مشابه در مورد نانوميله‌های CuO هم تأييد‌کننده وجود يك مقدار بهينه برای طول نانوميله‌ها است که با گذر از آن طول، ميزان پاسخ فتوالکتروشيميايی افت می‌کند [۱۱].

مراجع

- [1]. Maeda, K. and K. Domen, Photocatalytic water splitting: recent progress and future challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010. 1(18): p. 2655-2661.
- [2]. Nowotny, J., C. C. Sorrell, L. R. Sheppard, and T. Bak. "Solar-hydrogen: environmentally safe fuel for the future." *International journal of hydrogen energy* 30, no. 5 (2005): 521-544.
- [3]. Jang, Jum Suk, Hyun Gyu Kim, and Jae Sung Lee. "Heterojunction semiconductors: A strategy to develop efficient photocatalytic materials for visible light water splitting." *Catalysis today* 185, no. 1 (2012): 270-277.
- [4]. Vayssières, Lionel, ed. *On solar hydrogen and nanotechnology*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5]. Wolcott, Abraham, Wilson A. Smith, Tevye R. Kuykendall, Yiping Zhao, and Jin Z. Zhang. "Photoelectrochemical study of nanostructured ZnO thin films for hydrogen generation from water splitting." *Advanced Functional Materials* 19, no. 12 (2009): 1849-1856.
- [6]. Baruah, Sunandan, and Joydeep Dutta. "Hydrothermal growth of ZnO nanostructures." *Science and technology of advanced materials* (2009).
- [7]. Dai, Kai, Guangping Zhu, Zhongliang Liu, Qingzhuang Liu, Zheng Chen, and Luhua Lu. "Facile preparation and growth mechanism of zinc oxide nanopencils." *Materials Letters* 67, no. 1 (2012): 193-195.
- [8]. Zhang, Hongyan, Shuguo Yu, Chu Chen, Jun Zhang, Jing Liu, and Peng Li. "Effects on structure, surface oxygen defects and humidity performance of Au modified ZnO via hydrothermal method." *Applied Surface Science* 486 (2019): 482-489.
- [9]. Bakhtiargonbadi, Fatemeh, Hamid Esfahani, Roozbeh Siavash Moakhar, and Fatemeh Dabir. "Fabrication of novel electrospun Al and Cu doped ZnO thin films and evaluation of photoelectrical and sunlight-driven photoelectrochemical properties." *Materials Chemistry and Physics* 252 (2020): 123270.
- [10]. Guo, Min, Peng Diao, Xindong Wang, and Shengmin Cai. "The effect of hydrothermal growth temperature on preparation and photoelectrochemical performance of ZnO nanorod array films." *Journal of Solid State Chemistry* 178, no. 10 (2005): 3210-3215.
- [11]. Masudy-Panah, Saeid, Roozbeh Siavash Moakhar, Chin Sheng Chua, Ajay Kushwaha, Ten It Wong, and Goutam Kumar Dalapati. "Rapid thermal annealing assisted stability and efficiency enhancement in a sputter deposited CuO photocathode." *RSC advances* 6, no. 35 (2016): 29383-29390.



The Optimum Length of ZnO Nanorods Made by Sol-Gel and Hydrothermal Methods Used in Photoelectrochemical Solar Cells

Amin Jamshidi¹, Argavan Kazemi², Roozbeh Siavash Moakhar³

¹ Master of Material Science

² Assistant professor

³ PhD Researcher at McGill University

* amin.jamshidi@srbiau.ac.ir

Abstract: In this research, the process of growth and the optimum length of ZnO nanorods has been studied as a subject of semiconductors, that are used in the photoelectrochemical solar cell made by Sol-Gel and Hydrothermal method.

These Nano structures, having suitable gap, cause the decomposition of water into its constructing elements, hydrogen and oxygen.

The most length of nanorods achieved by the FTO sublayer and deionized water solvent, at 95°C growth temperature, while 3 hours growing time, and on these conditions caused the length of nanorods to be 1500 nanometers, with the biggest length to width ratio 15.

Also, at the final stage, photoelectrochemical experiments and the effects of nanorods length to the decomposition of water was studied. The results of photoelectrochemical experiments showed the optimum quantity for nanorods.

The best result of photoelectrochemical has been reached to the maximum ratio of length to width 10, and the maximum length of nanorods 1000 nanometers that has been grown at the temperature of 95°C and during 2 hours.

Keywords: ZnO Nanorods, Photoelectrochemical solar Cell, Sol-Gel, Semiconductors, Water Splitting.