



بررسی اثر پیش ماده و ضخامت لایه‌ی بذر بر ریخت و ویژگی اپتیکی نانومیله‌های اکسید روی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی پلیمری

معصومه نادری، مرتضی زرگرشوشتری*، ایرج کاظمی‌نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۱۳، نسخه نهایی: ۹۶/۲/۲۰)

چکیده: در این پژوهش، نانومیله‌های عمودی اکسید روی به روش گرمایی بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای رشد داده شدند. اثر پیش ماده‌ی لایه-ی بذر و ضخامت لایه‌ی بذر بر ساختار و ویژگی‌های اپتیکی نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده، توسط پراش پرتوی ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان (FESEM) و طیف‌سنجی UV-vis بررسی شدند. الگوهای XRD نشان دادند که نانومیله‌ها دارای ساختار بلوری ورتسایت ششگوشی در راستای [۰۰۲] هستند. تصاویر FESEM به روشنی نشان دادند که نانومیله‌های اکسید روی با غلظت‌های مختلف محلول بر ضخامت‌های مختلف لایه‌ی بذر و پیش‌ماده‌های متفاوت لایه‌ی بذر، بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای رشد کرده‌اند. نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM با ضخامت ۱۰ بار لایه‌نشانی لایه‌ی بذر، دارای ریخت بهتر و عبور اپتیکی بیشتری در ناحیه‌ی مرئی هستند. بنابراین این نمونه می‌تواند گزینه مناسبی برای لایه‌ی عبوردهنده‌ی الکترون در سلول‌های خورشیدی پلیمری وارون باشد.

واژه‌های کلیدی: نانومیله‌های اکسید روی؛ غلظت محلول رشد؛ لایه‌ی بذر؛ روش گرمایی.

مقدمه

مهمترین منابع انرژی که امروزه مورد استفاده همگانی قرار می‌گیرد سوخت‌های فسیلی هستند که علاوه بر تجدیدنپذیر بودن، بسیار آلاینده هستند. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل سهولت دسترسی مورد توجه واقع شده است [۱]. در چند دهه‌ی اخیر، ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری به دلیل کم هزینه بودن، انعطاف پذیر بودن، وزن کم و امکان تهیه در مقیاس بزرگ مورد توجه واقع شده است. در سلول‌های خورشیدی پلیمری می‌توان از لایه‌ی نازک موادی مانند اکسید روی به عنوان الکترود استفاده کرد [۲، ۳]. اکسید روی یک نیم‌رسانای نوع n با ساختار ورتسایت ششگوشی، پهنای گاف نواری ۳/۳۷ eV و عبور اپتیکی بالا در ناحیه مرئی است [۴]. لایه‌های نازک اکسید روی با روش‌های مختلفی

مانند تبخیر پرتوی الکترونی [۵، ۶]، اسپری پاپرولیز [۷، ۸]، رسوب‌گذاری لایه‌ی اتمی [۳، ۹]، کندوپاش [۱۰، ۱۱] و روش الکتروانباشت [۱۲، ۱۳] ساخته شده‌اند. در میان نانو ساختارهای اکسید روی، نانومیله‌های روی مسیر مستقیم و کوتاه‌تری را جهت حرکت الکترون به وجود می‌آورند و باعث بهبود انتقال الکترون‌ها در لایه عبور دهنده‌ی الکترون در سلول‌های خورشیدی می‌شود [۱۴]. در این پژوهش برای رشد نانومیله-های عمودی اکسید روی از روش دو مرحله‌ای استفاده شد. برای این منظور ابتدا بر زیرلایه‌های شیشه‌ای، لایه‌ی بذری از نانوذرات اکسید روی لایه‌نشانی شد و سپس با استفاده از یک نمک روی و یک آمین مناسب در محلول آبی نانومیله‌ها رشد داده شدند. همچنین در این پژوهش اثر پیش‌ماده‌های مختلف برای تولید لایه‌ی بذر، اثر ضخامت لایه‌ی بذر و غلظت محلول

رشد بر ریخت، عبور اپتیکی و گاف اپتیکی نانومیله‌های اکسید روی برای کاربرد در لایه‌ی عبور دهنده الکترون در سلول‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت.

روش آزمایش

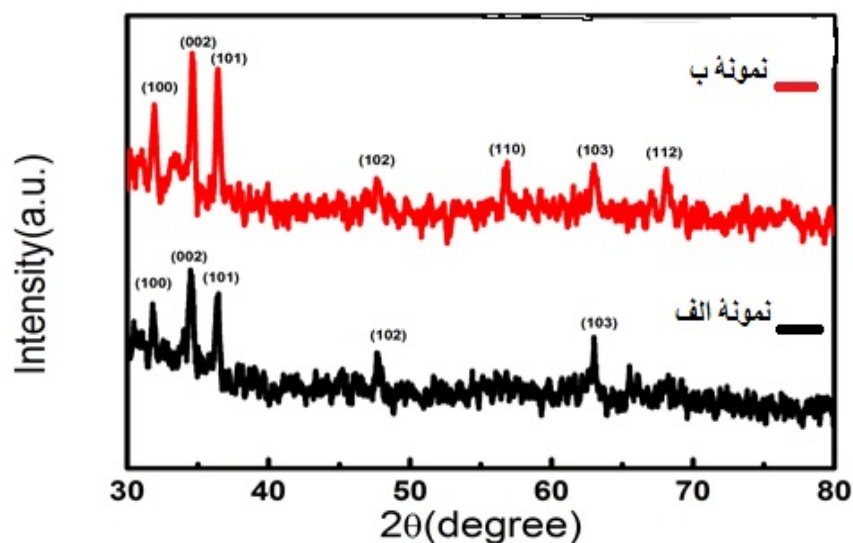
به‌منظور رشد نانومیله‌های عمودی اکسید روی، دو روش برای ایجاد پیش‌ماده لایه‌ی بذر انتخاب شد. در روش نخست، محلول ۱۰۰ mM مونواتانولامین در اتانول به‌محلول ۱۰۰ mM استات روی دوآبه در اتانول که در حال هم‌خوردن بود، اضافه شد تا محلول یکنواختی به دست آید. محلول حاصل به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت (نمونه‌ی الف). در روش دوم، محلول ۳۰ mM هیدروکسید پتاسیم در متانول را تهیه کرده و به‌صورت قطره‌ای به محلول ۱۰ mM استات روی دوآبه در متانول که در حال بهم خوردن بود، اضافه گردید و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت (نمونه‌ی ب). پس از شستشوی زیرلایه‌های شیشه‌ای به‌روش‌های معمول، لایه‌ی بذر با استفاده از دو پیش‌ماده بالا (نمونه‌های الف و ب)، به روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۱۵۰۰ rpm در مدت ۱۵ ثانیه لایه نشانی شد. پس از لایه‌نشانی، زیرلایه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد خشک شدند. این فرآیندها ۱۰ مرتبه تکرار شد تا لایه‌ی بذر مناسبی از پیش‌ماده‌های تهیه شده ایجاد شود. سپس زیر لایه‌ها به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد گرمادهی شدند. به‌منظور رشد نانومیله‌های عمودی اکسید روی، یک محلول رشد از ترکیب نیترات روی شش آبه (۲۵ mM) با هگزامتیلن تترامین

(۲۵ mM) در آب یون‌زدایی شده تهیه شده و به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق توسط همزن مغناطیسی هم‌زده شد. سپس زیرلایه‌های لایه‌نشانی شده مرحله‌ی قبل، به‌مدت یک ساعت در این محلول رشد قرار داده شدند. پس از آن، زیرلایه‌ها از این محلول خارج شده، چندین بار با آب یون‌زدایی شده شستشو داده شد و پس از آن به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتیگراد خشک شدند.

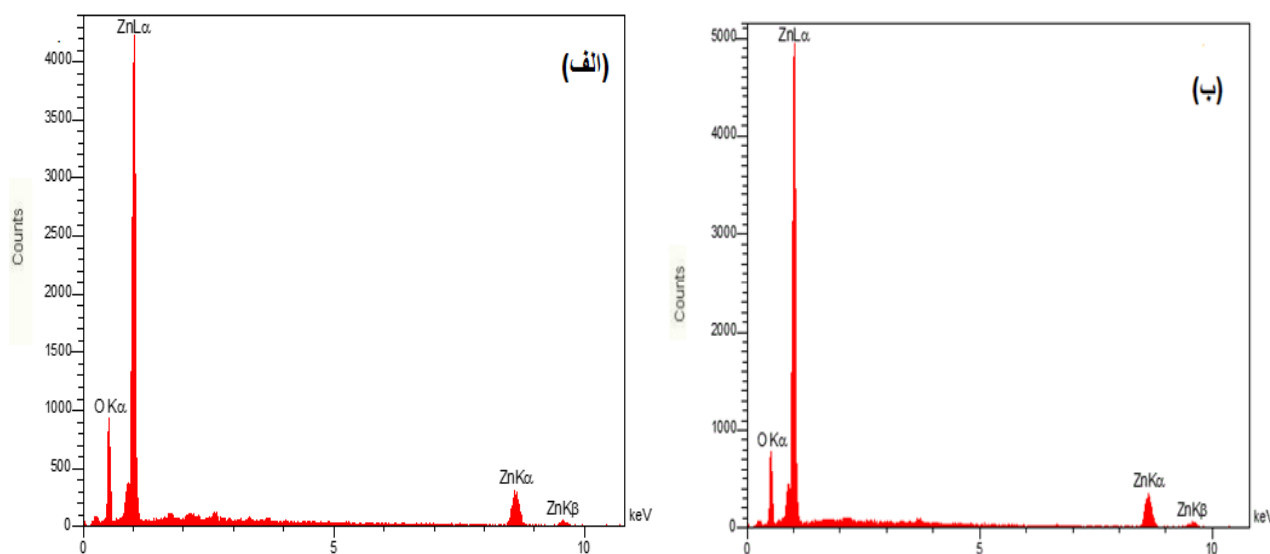
نتایج و بحث

الگوهای پراش پرتوی ایکس نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت ۲۵ mM بر زیرلایه‌های شیشه‌ای با پیش‌ماده لایه‌ی بذر متفاوت، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. الگوهای پراش نمونه‌ها با الگوی پراش کارت استاندارد ۰۱-۰۸۹-۰۵۱۱ JCPDS # مربوط به اکسید روی با ساختار بلوری ورتسایت ششگوشی همخوانی دارد. الگوی پراش پرتوی ایکس نانومیله‌ها با پیش‌ماده لایه‌ی بذر متفاوت نشان می‌دهند که نانومیله‌ها ترجیحاً در راستای [۰۰۲] رشد کرده‌اند.

ترکیب شیمیایی نانومیله‌های اکسید روی بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای توسط طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDX) بدست آمد. طیف EDX در شکل ۲ حضور عناصر Zn و O را در لایه‌های نانومیله‌های اکسید روی نشان می‌دهد. هیچ قله‌ی دیگری ناشی از ناخالصی در طیف دیده نشد که نشان دهنده رشد نانومیله‌های همرمی شش‌گوشی اکسید روی با درجه خلوص نسبتاً بالاست. این نتایج، یافته‌های حاصل از پراش پرتوی ایکس را تأیید می‌کند.



شکل ۱ الگوهای پراش پرتوی ایکس نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر لایه‌های بذر با دو پیش‌ماده مختلف.



شکل ۲ طیف EDX نانومیله‌های اکسید روی (الف) نمونه‌ی الف و (ب) نمونه‌ی ب رشد یافته بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای.

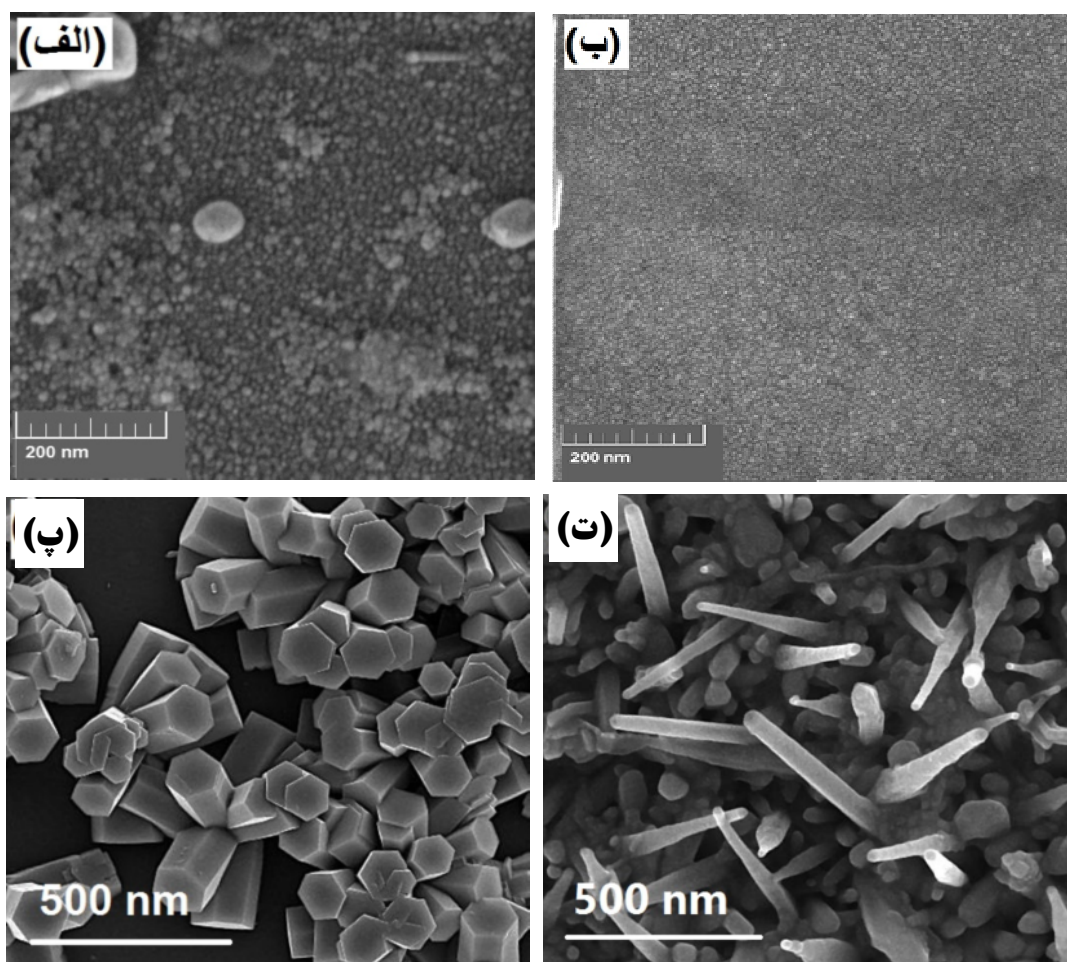
اِپتیکی نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM بر لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب روی زیرلایه‌ی شیشه‌ای را می‌توان به ریخت و خواص بلوری مناسب‌تر آن دانست. با توجه به اینکه در سلول‌های خورشیدی پلیمری عبور اپتیکی مهم است، بنابراین استفاده از نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM بر روی لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب برای لایه‌ی عبوردهنده‌ی الکترون در سلول‌های خورشیدی می‌تواند مناسب‌تر باشد [۱۵].

یکی از عوامل موثر بر ریخت و ویژگی‌های اپتیکی نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش گرمایی، غلظت محلول رشد نانومیله‌هاست. به منظور بررسی این اثر، نانومیله‌های اکسید روی با غلظت‌های ۵۰ mM و ۷۵ mM بر لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب به مدت یک ساعت رشد داده شدند. تصاویر FESEM نمای بالا و مقطع عرضی نانومیله‌های اکسید روی با غلظت‌های مختلف محلول که بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای به دست آمده‌اند، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. با افزایش غلظت محلول رشد، قطر و تراکم نانومیله‌ها افزایش یافته است. نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده با غلظت محلول ۵۰ mM، رشد یکنواخت‌تری را نسبت به نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده با دیگر غلظت‌ها دارند [۱۶].

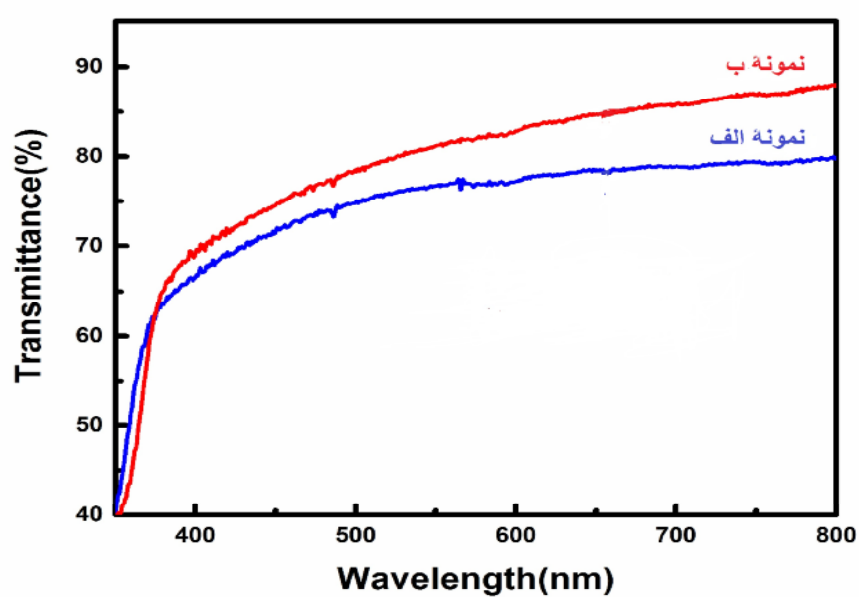
تصاویر FESEM لایه‌های بذر مختلف و نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM که با پیش ماده‌های مختلف لایه‌ی بذر بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای به دست آمده‌اند، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. دیده می‌شود که لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب یکنواخت‌تر و اندازه‌ی ذرات آن نسبت به نمونه‌ی الف کوچکتر هستند.

ساختار ششگوشی نانومیله‌ها با غلظت محلول ۲۵ mM در تصاویر با بزرگنمایی ۵۰۰ nm به خوبی مشاهده می‌شود. نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده با لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب، تراکم و یکنواختی بیشتر و قطر کوچکتری نسبت به نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده با لایه‌ی بذر نمونه‌ی الف دارند.

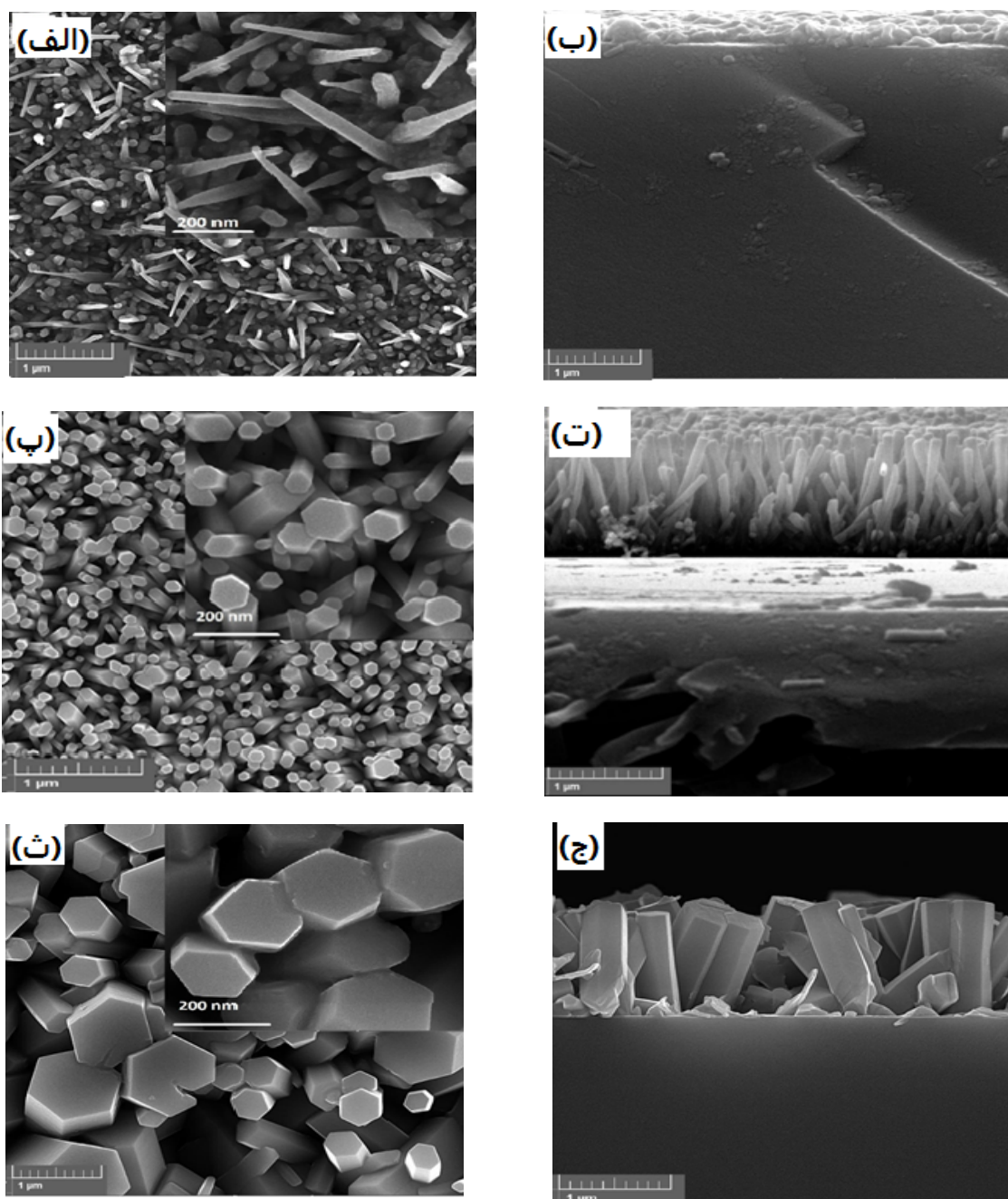
طیف عبوری نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM که با پیش ماده‌های مختلف لایه‌ی بذر بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای به دست آمده‌اند، در گستره‌ی ۸۰۰-۳۵۰ nm در شکل ۴ نمایش داده شده است که عبور اپتیکی بالای ۸۰٪ را در هر دو نمونه می‌توان مشاهده کرد. همچنین متوسط میزان عبور در ناحیه‌ی نور مرئی برای نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM بر لایه‌ی بذر نمونه‌ی ب، ۸۲٪ و برای نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM بر لایه‌ی بذر نمونه‌ی الف، ۷۶٪ است. بیشتر بودن متوسط عبور



شکل ۳ تصاویر FESEM لایه‌ی بذر نمونه‌ی (الف) نمونه‌ی (ب) و نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM رشد یافته بر لایه‌ی بذر نمونه‌ی (الف، پ) نمونه‌ی (ت). (ب) و نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM رشد یافته بر لایه‌ی بذر



شکل ۴ طیف عبوری نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM رشد یافته بر لایه‌های بذر دو نمونه‌ی الف و ب.



شکل ۵ تصاویر FESEM نمای بالا و مقطع عرضی نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول رشد ۲۵ mM، (الف و ب)، ۵۰ mM، (پ و ت) و ۷۵mM (ث و ج).

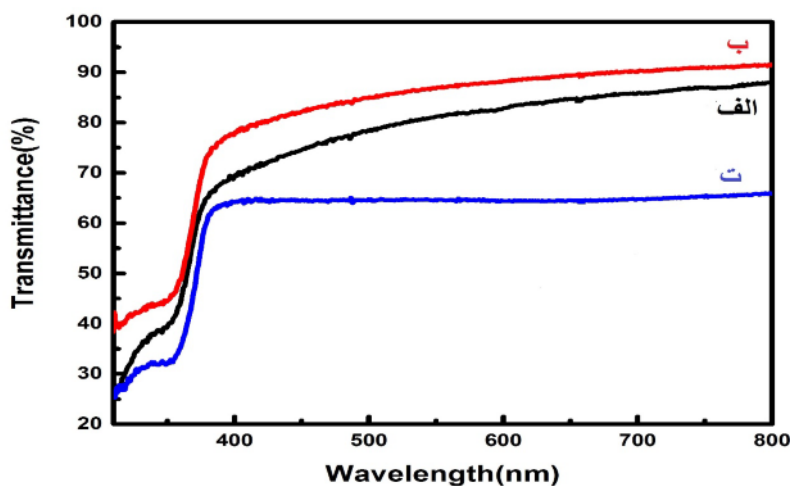
محلول ۲۵ mM، ۸۱٪ است. نانومیله‌ها با غلظت محلول mM ۷۵ عبور کمتری نسبت به نانومیله‌ها با دو غلظت دیگر دارند. در شکل ۷ برای محاسبه‌ی پهنای گاف اپتیکی با استفاده از روش تاک، نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فوتون فرودی $(h\nu)$ رسم شده است [۱۸، ۱۷]. α ضریب جذب اپتیکی است. با برون‌یابی بخش خطی نمودار بر محور افقی می‌توان انرژی گاف اپتیکی را به‌دست آورد. گاف اپتیکی برای نانومیله-

طیف عبوری نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت محلول‌های ۲۵ mM، ۵۰ mM و ۷۵ mM در گستره‌ی nm ۳۵۰-۸۰۰ در شکل ۶ نمایش داده شده است. عبور اپتیکی نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت‌های محلول ۲۵ mM و ۵۰ mM بیش از ۸۰٪ است. همچنین متوسط میزان عبور در ناحیه‌ی مرئی برای نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM، ۸۳٪ و برای نانومیله‌های اکسید روی با غلظت

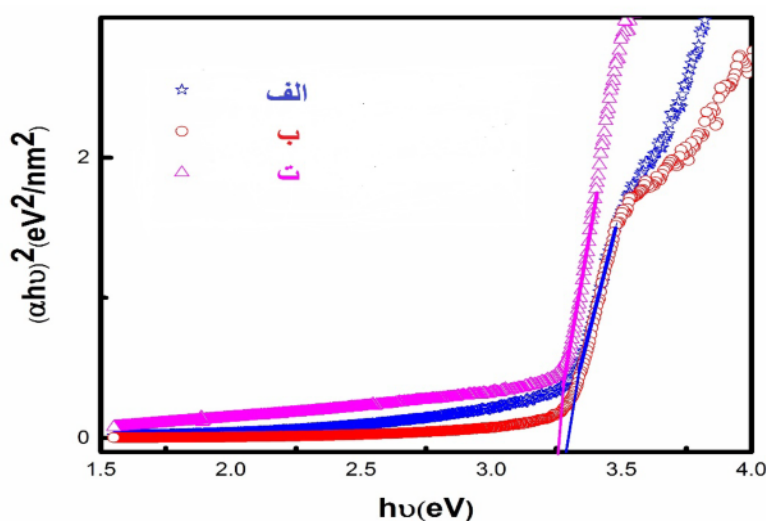
داده شدند. شکل ۸ تصاویر FESEM نانومیله‌های اکسید روی با غلظت‌های ۵۰ mM که بر ضخامت‌های مختلف لایه‌ی بذر به‌دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که برای لایه‌ی بذر نازک‌تر، تراکم نانومیله‌ها بیشتر و قطر آنها کمتر است. این امر می‌تواند به‌دلیل کاهش مراکز هسته‌زایی در ضخامت‌های بیشتر لایه‌ی بذر باشد. اندازه قطر نانومیله‌ها بستگی به اندازه ذرات در لایه‌ی بذر دارد. با افزایش ضخامت لایه‌ی بذر، اندازه‌ی ذرات در لایه‌ی بذر افزایش می‌یابد. بنابراین ضخامت لایه‌ی بذر نقش مهمی در اندازه‌ی قطر نانومیله‌های اکسید روی دارد. نتایج این پژوهش در توافق با نتایج آرپاویت و همکاران [۲۰]، نیرمال پیریس و همکاران [۲۱] و ین و همکاران است [۲۲].

های اکسید روی با غلظت محلول ۲۵ mM، ۵۰ mM و ۷۵ mM به‌ترتیب ۳/۲۷ eV، ۳/۲۷ eV و ۳/۲۵ eV به دست آمد. با افزایش غلظت محلول رشد از ۵۰ mM به ۷۵ mM، پهنای گاف اپتیکی نانومیله‌ها کاهش یافته است که این می‌تواند به اثر موس-بورستین نسبت داده شود که با افزایش غلظت حامل‌ها، لبه‌ی جذب به سمت طول موج‌های کوچک‌تر جابه‌جا می‌شود [۱۹].

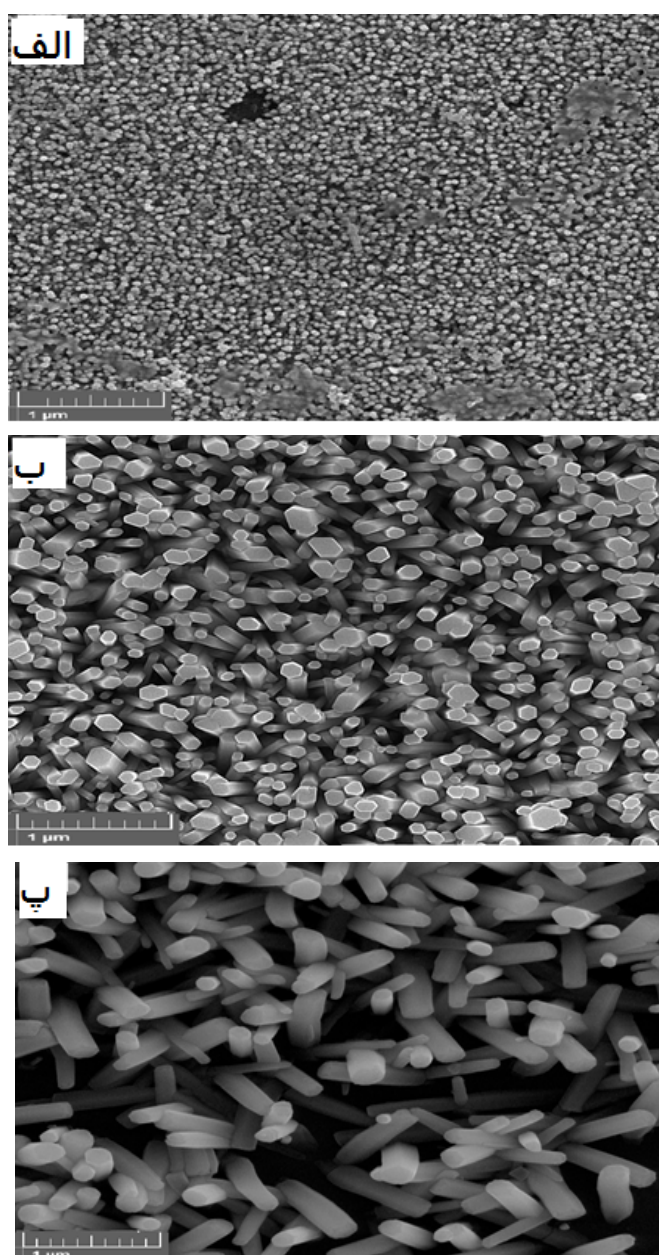
به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ی بذر بر رشد و ویژگی‌های اپتیکی نانومیله‌ها، زیرلایه‌ها با محلول نمونه‌ی ب، ۵ مرتبه، ۱۰ مرتبه و ۱۵ مرتبه با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۱۵۰۰ rpm به مدت ۱۵ ثانیه لایه‌نشانی شدند. سپس نانومیله‌ها با غلظت محلول رشد ۵۰ mM رشد



شکل ۶ طیف عبوری نانومیله‌های اکسید روی با غلظت‌های مختلف محلول رشد (الف) ۲۵ mM، (ب) ۵۰ mM، (ت) ۷۵ mM.



شکل ۷ نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فوتون فرودی نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول رشد (الف) ۲۵ mM، (ب) ۵۰ mM، (ت) ۷۵ mM.

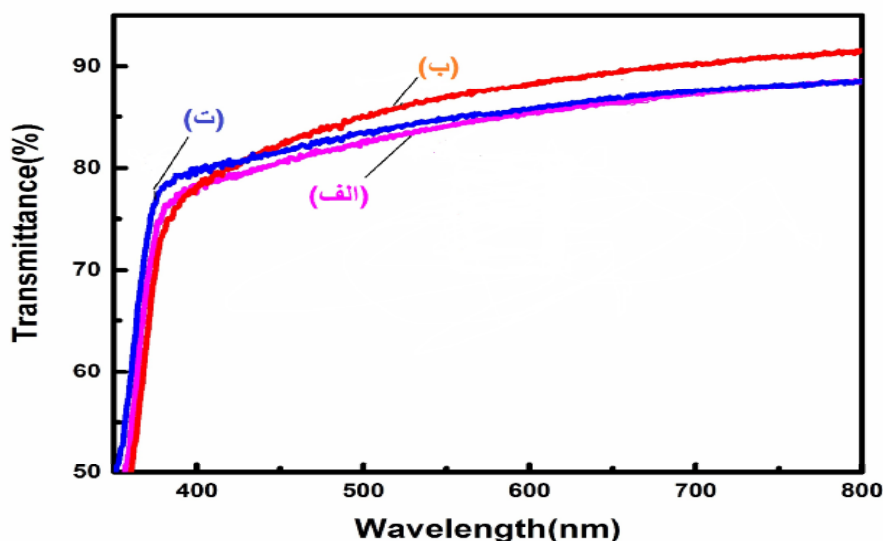


شکل ۸. تصویر FE-SEM نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یافته بر (الف) ۵، مرتبه، (ب) ۱۰ مرتبه و (پ) ۱۵ مرتبه لایه نشانی لایه‌ی بذر.

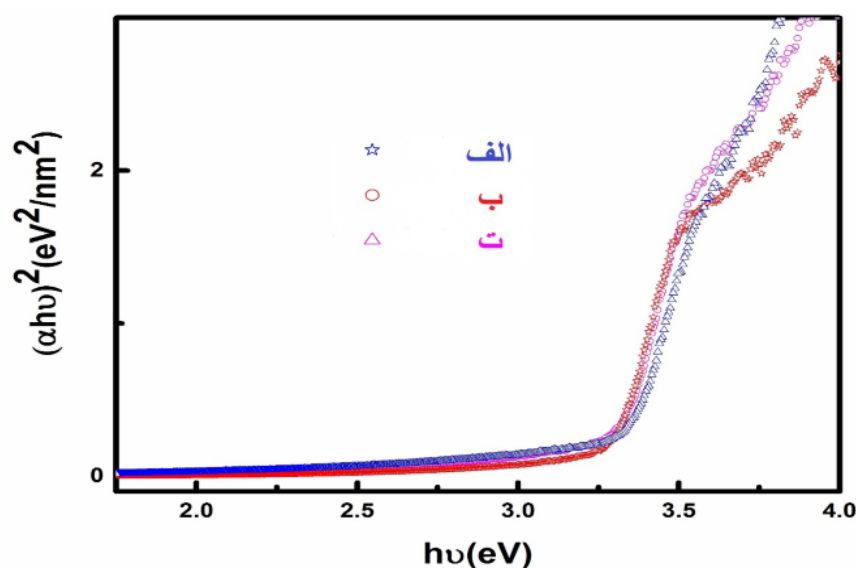
اپتیکی نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یافته بر لایه‌ی بذر با ۵، ۱۰ و ۱۵ مرتبه نشانی به- ترتیب ۳/۲۸ eV، ۳/۲۷ eV و ۳/۲۷ eV به دست آمد. مقادیر به‌دست آمده نشان می‌دهند که گاف اپتیکی نمونه‌ها کمی کوچکتر از گاف اپتیکی اکسید روی (۳/۳ eV) است که این می‌تواند به‌دلیل نقص لایه‌های بس‌بلوری و وجود مرزدانه‌ها باشد [۲۳]. نتایج این پژوهش، در توافق با نتایج کومار و همکاران است [۲۴].

طیف عبوری نانومیله‌های عمودی اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یافته بر ضخامت‌های مختلف لایه‌ی بذر در گستره‌ی ۸۰۰-۳۵۰ nm در شکل ۹ نمایش داده شده است. دیده می‌شود که عبور اپتیکی هر سه نمونه در ناحیه نور مرئی بیش از ۸۰٪ است. بیشترین درصد عبور در ناحیه‌ی مرئی مربوط به نانومیله‌هایی است که بر لایه‌ی بذر ۱۰ مرتبه رشد کرده‌اند.

در شکل ۱۰ برای محاسبه‌ی گاف اپتیکی، نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فوتون فرودی رسم شده است. پهنای گاف



شکل ۹ طیف عبوری نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یافته بر الف (۵ مرتبه، ب (۱۰ مرتبه و ت) ۱۵ مرتبه لایه نشانی لایه‌ی بذر.



شکل ۱۰ نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فوتون فرودی نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یافته بر الف (۵ بار، ب (۱۰ بار و ت) ۱۵ بار لایه نشانی لایه‌ی بذر.

برداشت

نانومیله‌های اکسید روی به روش گرمایی با غلظت محلول mM ۲۵ با پیش ماده‌های مختلف لایه‌ی بذر بر زیرلایه‌ی شیشه‌ای رشد داده شدند. نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده روی لایه‌ی بذر نمونه ب (۳۰ mM هیدروکسید پتاسیم و ۱۰ mM استات روی دوآبه در متانول) تراکم، یکنواختی و عبور اپتیکی بیشتری نسبت به نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده بر

لایه‌ی بذر نمونه الف (۱۰۰ mM استات روی دوآبه و mM ۱۰۰ مونواتانولامین در اتانول) دارند. با افزایش غلظت محلول رشد، طول و قطر نانومیله‌ها افزایش می‌یابد. نانومیله‌های اکسید روی با غلظت محلول ۵۰ mM رشد یکنواخت‌تر، عبور اپتیکی بیشتر و گاف اپتیکی بزرگتری نسبت به سایر نانومیله‌های اکسید روی دارند. با افزایش ضخامت لایه‌ی بذر قطر و طول نانومیله‌ها افزایش می‌یابد. نانومیله‌های اکسید روی با غلظت

- [8] Ajili M., Castagné M., Turki N. K., "Study on the doping effect of Sn-doped ZnO thin films", *Superlattices and Microstructures* 53 (2013) 213–222.
- [9] Ye Z. B., Lu H. L., Geng Y., Gu Y. Z., Xie Z. Y., Zhang Y., Sun Q. Q., Ding S. H., Zhang D. W., "Structural, electrical, and optical properties of Ti-doped ZnO films fabricated by atomic layer deposition", *Nanoscale Research Letters* 8 (2013) 108.
- [10] Wang F. H., Chang H. P., Tseng C. C., Chia-Cheng Huang C. C., "Effects of H₂ plasma treatment on properties of ZnO:Al thin films prepared by RF magnetron sputtering", *Surface & Coatings Technology* 205 (2011) 5269–5277.
- [11] Silva E. P., Chavesl M., Silva G. J., Arruda L. B., Paulo Noronha Lisboa-Filho P. N., Durrant S. F., Bortoleto J. R., "Al-Doping Effect on the Surface Morphology of ZnO Films Grown by Reactive RF Magnetron Sputtering", *Materials Sciences and Applications* 4 (2013) 761-767.
- [12] Pauporte T., Lincot D., "Electrodeposition of Semiconductors for Optoelectronic Devices: Results on Zinc Oxide", *Electrochimica Acta* 45 (2000) 3345-3353.
- [13] Fahoume M., Maghfoul O., Aggour M., Hartiti B., Chraibi F., Ennaoni A., "Growth and characterization of ZnO thin films prepared by electrodeposition technique", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90 (2006) 1437-1444.
- [14] Huang Y., Yin Z., Zheng Q., "Applications of ZnO in organic and hybrid solar cells", *Energy & Environmental Science* 4 (2011) 3861-3877.
- [15] Yuan Z., "Synthesis of ZnO nanocrystal by thermal decomposition for inverted polymer solar cell application", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 26 (2015) 1776–1779.
- [16] Tong F., Kim K., Wang Y., Thapa R., Sharma Y., Modic A., Ahyi A. C., Issacs-Smith T., Williams J., Ahn H., Park H., Kim D. J., Lee S., Lim E., Lee K. K., Park M., "Growth of ZnO Nanorod Arrays on Flexible Substrates: Effect of Precursor Solution Concentration", *International Scholarly Research Network ISRN Nanomaterials* (2012) 7.
- [17] Echresh A., Abbasi M. A., Zargar Shoushtari M., Farbod M., Nur O., Willander M., "Optimization and characterization of NiO thin

محلول ۵۰ mM با ضخامت ۱۰ نانومتر لایه‌نشانی لایه‌ی بذر بیشترین عبور اپتیکی در ناحیه‌ی مرئی را دارند. نظر به اینکه در سلول‌های خورشیدی پلیمری درصد بالای عبور اپتیکی اهمیت دارد، پس این نانومیلها می‌توانند به‌عنوان لایه‌ی عبوردهنده‌ی الکترون در سلول‌های خورشیدی پلیمری وارون مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

- [1] Park H. L., Lee K. H., Kumar B., Jeong K. S. W., Kim S. W., "Inverted Organic Solar Cells with ZnO Thin Films Prepared by Sol-Gel Method", *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* 5 (2010) 1-4.
- [2] Huang J., Yinb Z., Zheng Q., "Applications of ZnO in organic and hybrid solar cells", *Energy & Environmental Science* 4 (2011) 3861-3877.
- [3] Wang J. C., Weng W. T., Tsai, M. Y., Lee M. K., Horng S. F., Perng T. P., Kei C. C., Yuc C. C., Meng H. F., "Highly efficient flexible inverted organic solar cells using atomic layer deposited ZnO as electron selective layer", *Journal of Materials Chemistry* 20 (2010) 862–866.
- [4] Kim M. S., Yim K. J., Kim D. Y., Kim S., Nam G., Lee D. Y., Kim S. O., Kim J. S., Kim J. S., Son J. S., Leem J. Y., "Growth and Characterization of Seed Layer-Free ZnO Thin Films Deposited on Porous Silicon by drothermal Method", *Electronic Materials Letters* 8(1) (2012) 75-80.
- [5] Kuroyanagi A., "Properties of aluminum-doped ZnO thin films grown by electron beam evaporation", *Japanese Journal of Applied Physics* 28 (1989) 219.
- [6] Asmar R. Al., Zaouk D., Bahouth Ph., Podleki J. Foucaran A., "Characterization of electron beam evaporated ZnO thin films and stacking ZnO fabricated by e-beam evaporation and rf magnetron sputtering for the realization of resonators", *Microelectronic Engineering* 83 (2006) 393-398.
- [7] Bedia F. Z., Bedia A., Maloufi N., Aillerie M., Genty F., Benyoucef B., "Effect of tin doping on optical properties of nanostructured ZnO thin films grown by spray pyrolysis technique", *aJournal of Alloys and Compounds* 616 (2014) 312–318.

- [21] Nirmal Peiris T. A., Alessa H., S. Sagu. J., Bhatti J. A., Isherwood P., Upul Wijayantha K. G., "Effect of ZnO seed layer thickness on hierarchical ZnO nanorod growth on flexible substrates for application in dye-sensitised solar cells", *Journal of Nanoparticle Research* (15) (2013) 15:2115.
- [22] Yin Y. T., Que W. X., Kam C. H., "ZnO nanorods on ZnO seed layer derived by sol-gel process", *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 53 (2010) 605-612.
- [23] Shariffudin S. S., Salina M., Herman S. H., "Effect of Film Thickness on Structural, Electrical, and Optical Properties of Sol-Gel Deposited Layer-by-layer ZnO Nanoparticles", *Transection on Electrical and Electronic Materials* 13(2) (2012) 102-105.
- [24] Anil Kumar G., Ramana Reddy M.V., Narasimha Reddy K., "Structural, Optical and Electrical Characteristics of Nanostructured ZnO Thin Films with various Thicknesses deposited by RF Magnetron Sputtering", *Research Journal of Physical Sciences* 1(6) (2013) 17-23.
- film and the influence of thickness on the electrical properties of n-ZnO nanorods/p-NiO heterojunction*", *Semiconductor Science and Technology*. 29 (2014) 115009-115014.
- [۱۸] زرگروشتری م.، پورمقدم ا.، فرید م.، "ساخت و بررسی خواص ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ "، *مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران*، شماره ۲ (۱۳۹۵) ص ۹-۱۶.
- [19] Patil G. R., Gaikwad R. S., Shelar M. B., Mane R. S., Hand S. H., Pawar B. N., "Role of concentration and temperature on well-aligned ZnO nanorod by lowtemperature wet chemical bath deposition method", *Archives of Physics Research* 3(5) (2012) 401-406.
- [20] Arpavate W., Chungchote S., Laosiripoj N., Wootthikanokhan J., Sgawa T., "ZnO Nanorod Arrays Fabricated hydrothermal method using different thicknesses of seed layers for applications in hybrid photovoltaic cells", *Sensor and materials* 28(5) (2016) 403-408.