

سنتز لایه‌های نازک اکسیدروی با روش سل-ژل و کاربرد آن برای بهبود کارایی سلول های خورشیدی سیلیکونی

علیرضا جلالی^{۱،۲}، محمد رضا واعظی^۱، نیما نادری^{۱*}، فریبا تاج آبادی^۱ و عباس افتخاری^۳

کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی

شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی

آسمان شرکت صنایع الکترونیک سازان

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۱۷

تاریخ تصحیح: ۹۸/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۹

چکیده

در این تحقیق لایه نازک اکسیدروی (ZnO) به عنوان لایه ضدبازتاب به روش سل-ژل و با استفاده از تکنیک پوشش دهی چرخشی بر روی سیلیکون $p-n$ لایه نشانی، و اثر آن به عنوان لایه ضدبازتاب در سلول خورشیدی و افزایش راندمان سلول خورشیدی مورد توجه و بررسی قرار گرفت. در این روش از استات روی دوآبه به عنوان پیش ماده، و از مونواتانول آمین (MEA) و دی اتانول آمین (DEA) به عنوان پایدارکننده، و از ترکیبات دومتوکسی اتانول، ایزو پروپیل الکل و اتانول به عنوان حلال استفاده شد. بعد از لایه نشانی، نمونه ها توسط سشوار صنعتی در دمای $150^\circ C$ درجه سانتیگراد به مدت 10 دقیقه پیش حرارت داده شد و سپس نمونه ها در دمای $470^\circ C$ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در داخل کوره الکتریکی حرارت داده شدند و سپس اتصالات فلزی پشت (Al) و اتصالات فلزی جلوی سلول خورشیدی (Ag) را به ترتیب با روش PVD و تکنیک چاپ سطحی (شابلونی) بر روی سلول خورشیدی نصب گردید. برای مشخصه یابی لایه های نازک ZnO از پراش اشعه ایکس (XRD)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ($FESEM$) و از دستگاه پراب چهار نقطه ای برای اندازه گیری مقاومت سطحی نمونه ها کمک گرفته شد. همچنین برای بررسی خواص الکتریکی و تعیین پارامترهای قطعه سلول خورشیدی از دستگاه شبیه ساز خورشیدی استفاده شد. نتایج حاصل نشان دادند که نانو ساختار ZnO با ساختار شش گوشه با اندازه $30-50$ نانومتر بر روی سطح سیلیکون تشکیل شده و بعنوان یک لایه ضدبازتاب باعث شده که راندمان سلول خورشیدی سیلیکونی افزایش یابد.

کلمات کلیدی: سلول های خورشیدی سیلیکونی، اکسیدروی، لایه ضدبازتاب، روش سل-ژل.

۱- مقدمه

امروزه جمعیت جهان به طور فزاینده ای در حال افزایش است. و همین امر مصرف انرژی بشر را به شدت افزایش داده است. به دلیل افزایش قیمت انرژی حاصل از فرآورده های نفتی، رو به پایان بودن منابع سوخت های فسیلی و آلودگی محیط زیست، توجهات زیادی به منابع انرژی تجدید پذیر معطوف شده است. و کشورها را به سمت جایگزینی انرژی های نو از جمله انرژی خورشیدی بجای سوخت های فسیلی سوق داده است. لذا تلاش های علمی فراوانی برای استفاده از انرژی منابع تجدیدپذیر صورت

گرفته است [۱]. خورشید با یک ساعت تابش، $۸/۳ \times ۱۰^{۲۳}$ کیلو وات انرژی تولید می‌کند. که می‌تواند تقاضای انرژی مورد مصرف جهان را تامین نماید. به همین دلیل تحقیقات گسترده‌ای در زمینه یافتن مواد و طراحی سیستم‌های جدیدی که بتوانند، با بازدهی بالا انرژی خورشید را به دیگر انرژی‌های مورد نیاز تبدیل کند، در حال انجام است [۲]. با استفاده از سلولهای خورشیدی، نور خورشید به کمک یک دیود نیمه‌هادی مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. تبدیل انرژی در سلول خورشیدی شامل جذب نور (فوتون) توسط یک نیمه‌هادی و در ادامه تولید زوج الکترون-حفره و سپس جداسازی حامل‌های بار در پیوندگاه p-n برای تولید جریان الکتریکی می‌باشد [۳]. زمانی یک نیمه‌هادی نوع n و یک نیمه‌هادی نوع p در کنار هم با یک اتصال متالوژیکی قرار می‌گیرند، یک دیود نیمه‌هادی (پیوندگاه p-n) تشکیل می‌دهند. که قطعه اصلی یک سلول خورشیدی می‌باشد. عبارتی، وقتی پیوندگاه p-n شکل می‌گیرد، با توجه به این که چگالی حفره‌ها و الکترون‌ها در دو نیمه‌هادی متفاوت است. حفره‌ها از نیمه‌رسانای نوع p به نیمه‌رسانای نوع n و الکترون‌ها از نیمه‌رسانای نوع n به نیمه‌رسانای نوع p نفوذ می‌کنند. در اینجا الکترون‌ها مایلند به طرف p رفته و با حفره‌ها ترکیب شوند. اما پیوندگاه p-n مثل یک دیود عمل می‌کند، و به الکترون‌ها اجازه عبور نمی‌دهد. در دیود جریان الکتریسیته فقط در یک مسیر می‌تواند عبور کند. و لذا پیوندگاه p-n الکترون‌ها را به طرف n و حفره‌ها را به طرف p می‌فرستد. و باعث جدائی حاملان بار می‌شود. حال اگر یک مسیر خارجی (مدار) برای جریان ایجاد کنیم، الکترون‌ها از آن مسیر به طرف p جریان می‌یابند. جریان الکترون‌ها در طی این مسیر باعث تولید جریان الکتریسیته شده و برای ما کار انجام می‌دهند. همچنین پیوندگاه p-n در سلول خورشیدی باعث ایجاد ولتاژ می‌شود، که با وجود جریان و ولتاژ، توان الکتریکی خواهیم داشت.

بازدهی یک سلول خورشیدی عبارتست از درصدی از انرژی خورشیدی تابیده شده به سلول که به انرژی الکتریکی تبدیل شده است. در سلول‌های خورشیدی (سلول‌های فوتولتایی) از نیمه‌هادی‌ها برای تبدیل انرژی خورشید (نور) به الکتریسیته، استفاده می‌کنند. در نیمه‌هادی‌ها اگر فوتون‌های تابیده شده جذب گردند، می‌توانند الکترون‌ها را از لایه ظرفیت به لایه هدایت ببرند و باعث تولید جفت الکترون-حفره (آکسیتون) شوند. که بعد از جمع‌آوری حامل‌های تولید شده و جدا شدن حامل‌های بار توسط پیوندگاه p-n جریان الکتریکی در سلول خورشیدی انتقال می‌یابد. عبارتی تنها فوتون‌هایی که انرژی مساوی یا بیشتر از باندگپ (گاف انرژی) ماده نیمه‌رسانای سلول خورشیدی دارند، قادر به رها کردن الکترون آزاد برای ایجاد جریان الکتریکی در مدار می‌باشند. و می‌توانند در فرایند تبدیل انرژی شرکت کنند. اگر میزان انرژی فوتون بیشتر از انرژی باندگپ باشد آزادسازی الکترون اتفاق خواهد افتاد و انرژی اضافی به صورت گرما هدر (به عنوان تلفات) خواهد رفت. که این امر باعث بالا رفتن دمای سلول خورشیدی خواهد شد. ضمناً فوتون‌های کم انرژی بدون جذب شدن عبور می‌کنند و مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. ماکزیمم راندمان سلول خورشیدی وقتی است، که سلول خورشیدی تمام رنج نور خورشید را که در محدوده باندگپ ماده قرار دارد جذب

کند. با این فرض که هیچ تلفاتی نداشته باشیم. تلفات در سلول‌های خورشیدی را می‌توان شامل تلفات حرارتی، تلفات اپتیکی (نوری)، تلفات الکتریکی، و سایر تلفات در نظر گرفت. در حال حاضر با وجود کارآیی پایین سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بازار سلول‌های خورشیدی به دلیل فراوانی سیلیکون در اختیار سلول‌های خورشیدی سیلیکونی می‌باشد [۴-۸].

تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در مورد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی انجام گرفته و همچنان ادامه دارد. مشکل سلول‌های خورشیدی فعلی، هزینه بالا، گران بودن مواد و کارایی نسبتاً کم آن‌ها می‌باشد. لذا تلاش‌ها و راهکارهای زیادی برای افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و کاهش قیمت (هزینه‌های) تمام شده برای تولید سلول‌های خورشیدی انجام می‌شود [۹].

این تحقیقات در زمینه‌های مختلفی مانند خالص‌سازی سیلیسیم، استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب روی سطح سلول، منسوج کردن و ایجاد ناهمواری روی سطح سلول (بافت دار کردن سطح)، به کارگیری سطوح ناهموار برای کاهش بازتابش، به دام‌اندازی نور برای جذب بیشتر نور، کاهش سطح اتصالات فلزی روی سلول، ضخیم کردن سلول برای افزایش جذب فوتون‌ها، و... در حال انجام می‌باشد [۱۰-۱۱]. می‌توان گفت، که قسمت قابل توجهی از نور تابیده شده به سلول خورشیدی بدلیل بازتاب از دست می‌رود و توسط سلول جذب نمی‌شود. پوشش‌های ضد بازتاب با افزایش نور ورودی در ناحیه فعال سلول خورشیدی نقش مهمی را در بهبود عملکرد و افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی ایفا می‌کنند. پوشش‌های ضد بازتاب با تله‌گذاری نور و بدام‌اندازی نور باعث افزایش طول مسیر عبور نور و افزایش ضریب جذب نور و در نتیجه افزایش زوج الکترون-حفره و افزایش جریان می‌شوند [۱۲]. در یک پوشش ضد بازتاب دو پارامتر ضریب شکست و ضخامت پوشش از بقیه پارامترها تعیین کننده‌تر می‌باشند.

هدف از پوشش ضد بازتاب اینست که اختلاف میان ضریب شکست محیط و سلول خورشیدی سیلیکونی به حداقل برسد. عبارتی می‌توان گفت، هر چه ضریب شکست یک ماده با ضریب شکست هوا ($n=1$) هماهنگ‌تر و نزدیک‌تر باشد، بازتاب از سطح آن ماده کمتر می‌شود. لذا برای رسیدن به راندمان بالا لایه ضد بازتاب را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم، که ضریب شکستش با هوا تقریباً یکسان باشد. موادی که به عنوان پوشش ضد بازتاب به کار می‌روند، معمولاً دارای ضریب شکست کمتری نسبت به نیم‌رسانای به کاررفته در سلول‌های خورشیدی می‌باشند. این پوشش‌ها با کاهش ضریب شکست سطح نیم‌رسانا، بازتابندگی سطحی را کم می‌کنند. و می‌توانند از جنس‌های مختلفی مانند MgF_2 , ZnS , SiO_2 , Si_3N_4 و ... باشد. در حال حاضر لایه‌های نازک سیلیکون نیتريد (Si_3N_4) که بوسیله روش بخار شیمیایی پلاسمای افزایش یافته ($PECVD$) لایه‌نشانی می‌شود، استاندارد صنعتی برای پوشش‌های ضد بازتاب روی سطح سیلیکونی می‌باشد. لایه‌های نیتريد سیلیکون با شیوه‌های متفاوتی از جمله روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار ($PECVD$, $LPCVD$), روش کندوپاش و... لایه‌نشانی می‌گردد [۱۳-۱۹]. متأسفانه روش

های تولید پوشش ضد بازتاب به تجهیزات پیچیده گران قیمت نیاز دارد و معمولاً این روش‌ها هزینه بالایی دارند [۲۰-۲۱]. امروزه محققان سعی دارند، با پوشش‌های ضد انعکاسی نانوساختار که با روش‌های ساده تهیه می‌شوند، جایگزینی مناسب برای پوشش‌های ضدانعکاسی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی پیدا کنند. در این پروژه تلاش می‌شود، با توجه به خواص ویژه و منحصربفرد لایه‌های نازک اکسیدهای رسانای شفاف نظیر شفافیت اپتیکی بالا در ناحیه مرئی (بیشتر از ۷۵ درصد) و رسانائی الکتریکی بالا ($10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ یا بیشتر) عملکرد سلول‌های خورشیدی را بهبود بخشیم. از میان اکسیدهای رسانای شفاف، ZnO یک اکسید رسانای شفاف از گروه ترکیبات نیمه‌رسانای II-VI با گاف انرژی مستقیم و پهن در حدود $3/37$ الکترون ولت می‌باشد [۲۲]. که دارای خواص الکتریکی و نوری عالی، قابلیت تحرک الکترونی بالا، شفافیت خوب در بازه طول موج‌های مرئی است. که شدت نور UV را جذب و نور مرئی را عبور می‌دهد [۲۳]. همچنین بخاطر ارزان بودن و زیست سازگار بودن و سمی نبودن آن باعث شده در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از آن به عنوان رسانای شفاف بیشتر شود [۲۴]. و لذا می‌توان از ZnO جهت بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی استفاده نمود. البته یکی از مهمترین مشکلات، دستیابی همزمان به میزان شفافیت خوب و رسانایی بالا در لایه‌های نازک ZnO می‌باشد. به همین دلیل در این پروژه به دنبال ایجاد همزمان این دو ویژگی (شفافیت بالا و رسانندگی بالا) در لایه‌های نانوساختار اکسیدروی می‌باشیم. عبارتی می‌توان گفت، با افزایش قابلیت الکتریکی در چنین لایه‌هایی شفافیت نوری کاهش می‌یابد. لذا یکی از دغدغه‌های پژوهشگران این حوزه موازنه‌ای مناسب میان این دو خاصیت متضاد می‌باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- شتشیوی نمونه

ابتدا نمونه‌هایی از ویفر سیلیکونی p-n به ابعاد 2×2 تهیه شد. برای برش زدن ویفرهای سیلیکونی از لیزر Nd-YAG با طول موج 1064 نانومتر استفاده شد. به منظور دستیابی به لایه‌ای با کیفیت خوب در روش سل-ژل کنترل پارامترهای سنتر بسیار مهم می‌باشد [۲۵]. یکی از پارامترهای تاثیرگذار و مهم بر رشد و مورفولوژی لایه‌ها تمیزکاری زیرلایه می‌باشد. برای تمیزکردن زیرلایه سیلیکونی (ویفر سیلیکونی p-n) ابتدا با استفاده از مواد شوینده زیرلایه را شسته و سپس زیرلایه در داخل محلولی از اسیدسولفوریک و آب اکسیژنه به نسبت حجمی ۳ به ۱ به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه قرار داده شد. سپس نمونه را با آب مقطر شسته و آن را در داخل محلول رقیقی از HF (۱ تا ۱,۵ مولار) به منظور حل شدن SiO_2 احتمالی به مدت ده دقیقه قرار داده شد. سپس نمونه را با آب مقطر شسته و آن را در محلولی از استن و اتانول در داخل دستگاه التراسونیک به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه قرار داده شد.

سپس نمونه را با آب مقطر سه بار تقطیر شستشو داده شده و در داخل آون خشک گردید. بعد از شستشوی ویفرها، مقاومت سطحی (R_s) نمونه توسط دستگاه پروب چهار نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. مقاومت سطحی (صفحه‌ای) به صورت اهم بر مربع با نماد Ω/\square یا Ω/sq بیان می‌شود.

$$R_s = 1800 \Omega/\square$$

۲-۲- لایه‌نشانی Al در پشت نمونه به روش PVD (لایه‌نشانی فیزیکی بخار)

در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه رسانای پائینی از ماده‌ای با رسانائی بالا و به اندازه کافی ضخیم ساخته می‌شود، تا جریان را بخوبی هدایت کند. و معمولاً از جنس آلومینیوم و یا مولیبدنیوم می‌باشد. به منظور لایه‌نشانی Al در پشت ویفر سیلیکونی از روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی (روش تبخیر مقاومتی) که یکی از روش‌های PVD می‌باشد، استفاده شد. در این روش خلاء مورد نیاز 2×10^{-5} تور و ولتاژ مورد نیاز ۷۵ ولت در نظر گرفته شد.

۲-۳- قرار دادن نمونه در داخل کوره دیفیوژن

در این مرحله به منظور افزایش حامل‌های اکثریت، نمونه را داخل کوره دیفیوژن به مدت ۳ دقیقه در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد، تا Al کاملاً در داخل Si نفوذ کند. در این مرحله حفره‌ها بیشتر شده بعبارتی P به P^+ تبدیل می‌شود.

۲-۴- لایه‌نشانی ZnO توسط روش سل-ژل با استفاده از تکنیک اسپین کوتینگ

همانگونه که می‌دانیم، کنترل پارامترهایی از قبیل دما، pH، غلظت واکنش دهنده‌ها، نوع پایدارساز و نوع حلال که به پارامترهای سنتز موسوم هستند. در روش سل-ژل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۲۶-۲۷]. در این پروژه برای محلول‌سازی از استات روی دوآبه (به عنوان پیش ماده) با حلال‌های مختلفی از قبیل اتانول، ایزوپروپیل الکل، دو متوکسی اتانول و مخلوط هر کدام از هر حلال‌های فوق و همچنین از پایدارسازهای مختلفی مانند مونواتانول آمین، دی‌اتانول آمین با زمان ماندگاری محلول به مدت ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۲، ۱۴ ساعت استفاده شد [۲۸-۳۲]. همچنین برای لایه‌نشانی به روش اسپین کوتینگ در سرعت‌های متفاوت و زمان‌های متفاوت لایه‌نشانی انجام شد. بعد از لایه‌نشانی به مدت چند دقیقه هوای گرم بطور دمشی توسط سشوار صنعتی بر روی نمونه در دماهای مختلف عبور داده شد. سپس نمونه در دمای ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در کوره الکتریکی قرار داده شد.

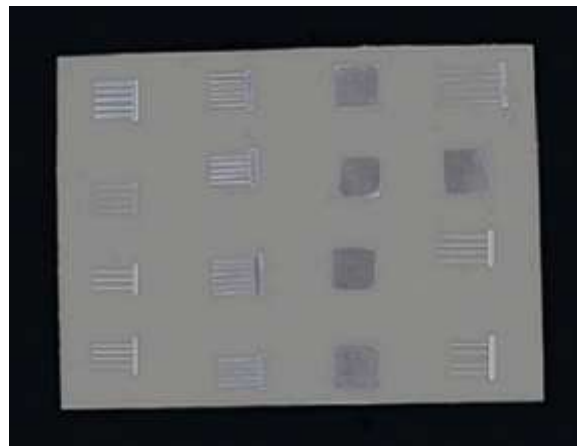
شرایط لایه‌نشانی ZnO: ۲/۵ گرم استات روی با ۴۰ سی سی حلال دو متوکسی اتانول و ۱/۵ سی سی اتانول آمین در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد و بعد از گذشت ۸ ساعت (زمان ماندگاری محلول)، توسط تکنیک اسپین کوتینگ با سرعت ۲۲۰۰ rpm/min به مدت ۲۵ ثانیه لایه‌نشانی انجام شد. بعد از لایه‌نشانی نمونه به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه بطور دمشی توسط سشوار صنعتی در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. سپس نمونه در دمای ۴۷۰ درجه سانتیگراد به مدت

یک ساعت در کوره الکتریکی قرار داده شد. بعد از لایه‌نشانی بوسیله دستگاه پروب چهارنقطه‌ای مقاومت سطحی نمونه اندازه‌گیری شد.

$$R_s = 290 \Omega/\square$$

۵-۲- لایه‌نشانی Ag (اتصال فلزی روی سلول) به روش چاپ سیلک^۱

اتصالات فلزی فوقانی برای جمع‌آوری جریان تولید شده توسط سلول خورشیدی مورد نیاز می‌باشد. باسبارها مستقیماً به بار بیرونی متصل بوده و فینگرها کار جمع‌آوری جریان از سطح سلول و رساندن آن به باسبار را به عهده دارند. در این مرحله به کمک تکنولوژی چاپ سطحی، اتصالات بر روی سلول پرینت می‌شود (شکل ۱). این روش فرآیندی به نسبت ساده با کارایی خوب و هزینه پائین می‌باشد. در این روش با استفاده از شابلون، خمیر نقره روی ویفر چاپ شده و یک شبکه اتصالات بر روی سلول قرار داده می‌شود و سپس با قرار دادن نمونه در داخل کوره دیفیوژن در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه نقره بر روی سطح سلول نفوذ می‌کند و اتصالات فلزی ایجاد می‌شود.



شکل ۱: شابلون تهیه شده برای روش چاپ سیلک

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۱-۳- نتایج اولیه

با استفاده از دستگاه پروب چهار نقطه‌ای مقاومت سطحی قبل از لایه‌نشانی و بعد از لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقاومت سطحی زیرلایه بعد از لایه‌نشانی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است.

قبل از لایه‌نشانی: $R_s = 1800 \Omega/\square$

بعد از لایه‌نشانی: $R_s = 290 \Omega/\square$

^۱ Screen printing

۲-۳- مشخصه یابی ساختاری

۱-۲-۳- الگوی پراش اشعه X

برای بررسی ساختار بلوری لایه‌های نازک اکسیدروی (ZnO) لایه‌نشانی شده از پراش اشعه ایکس استفاده شد. شکل ۲ الگوی پراش اشعه X یک ساختار اکسیدروی که توسط روش سل-ژل با استفاده از تکنیک اسپین کوتینگ تهیه شده است، را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، لایه نازک ZnO بر روی زیرلایه سیلیکون شکل گرفته است. اکسیدروی در این نمونه دارای چهار قله پراش می‌باشد که با hkl ، (100) ، (102) ، (004) ، (114) به ترتیب در مکان‌های $(33/3590)$ ، $(46/1480)$ ، $(72/0820)$ ، $(98/0870)$ طبق کد استاندارد JCPDS 5-00664 واقع شده‌اند. همانطور که مشخص است در الگوی پراش اشعه X، پیک ترجیحی (100) در مکان $\theta = 33/3590$ قرار دارد. جدول ۱ معرف مکان قله‌ها، مقادیر FWHM، اندازه بلورک، کرنش، چگالی نابجائی و ثابت شبکه لایه نازک ZnO می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود بر اساس پیک اصلی که در راستای 100 می‌باشد اندازه بلورک (اندازه کریستالیت) برابر با 33 نانومتر محاسبه شده است. برای محاسبه اندازه متوسط بلورک‌ها از رابطه شرر استفاده گردید [۳۳-۳۴].

$$D = 0.9\lambda/\beta \cos \theta \quad (1)$$

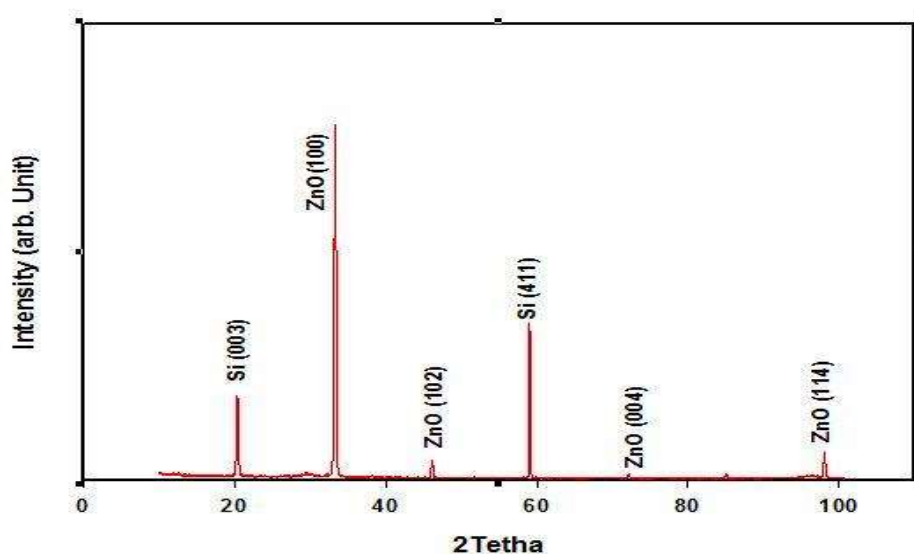
که در این رابطه D ، λ ، θ ، β به ترتیب اندازه متوسط بلورک‌ها، طول موج پرتو ایکس اعمال شده ($\lambda = 1.542 \text{ \AA}$)، $Cu_{K\alpha}$ ، زاویه پراش اشعه ایکس و پهنای قله در نصف بیشینه (FWHM) می‌باشند.

از رابطه ۲ برای محاسبه کرنش استفاده شده است، که در آن D اندازه بلورک می‌باشد.

$$\varepsilon = 1/D^2 \quad (2)$$

و برای محاسبه چگالی نابجائی (δ) از رابطه ۳ استفاده گردید.

$$\delta = (\beta \cos \theta)/4 \quad (3)$$



شکل ۲: الگوی پراش اشعه X لایه نازک ZnO/Si

جدول ۱: داده های مستخرج از الگوی پراش اشعه X لایه نازک ZnO

2Theta (2θ)	FWHM *10 ⁻³ (Radian)	d-spacing	Crystallite size(D) (nm)	Strain*10 ⁻³ (ε) (nm) ⁻²	Dislocation density*10 ⁻⁴ (δ)	lattice constant(A ⁰)	
						a=b	c
33.3590	10.000	2.6838	33.0000	2.3980	9.1827	3.0989	5.2369
46.1480	9.9433	1.9654	36.0000	2.2870	7.7160		
72.0820	8.2338	1.3092	66.0000	1.6645	2.2957		
98.0870	10.400	1.0200	50.0000	1.7095	4.0000		

و از رابطه ۴ برای تعیین ثابت شبکه استفاده شد. که در آن d فاصله صفحات شبکه می‌باشد.

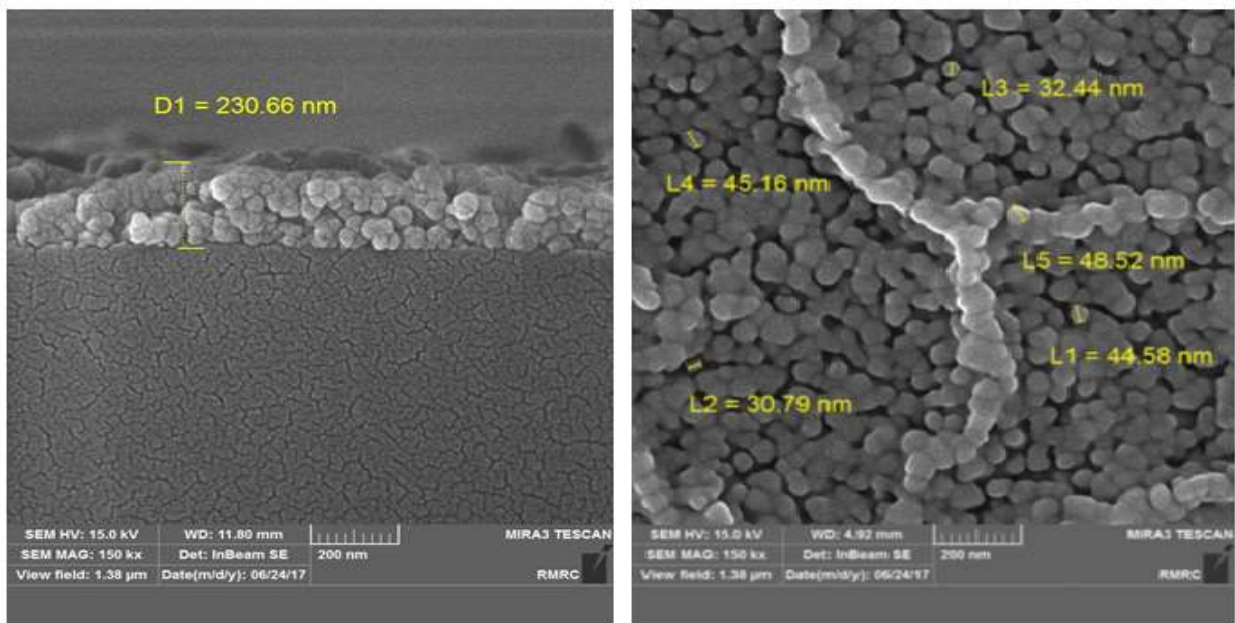
$$1/d^2 = \frac{4}{3} \{ (h^2 + hk + k^2)/a^2 \} + (l^2/c^2) \quad (۴)$$

۲-۲-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM)

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی می‌توان تصاویری با بزرگنمایی و قدرت تفکیک بسیار بالا در حد نانومتر از ماده بدست آورد.

برای بررسی مورفولوژی و توپوگرافی نمونه‌ها تصاویر FESEM آنها ثبت گردیده است. که نتایج آنها در شکل ۳ نشان داده شده

است.



ب

الف

شکل ۳: تصاویر FESEM الف: نانوذرات ZnO که اندازه ذرات آن کمتر از ۵۰ نانومتر است. ب: تصویر برش مقطعی

در تصاویر FESEM، دانه های سفید رنگ انباشتگی ذرات اکسیدروی را نشان می دهد که بصورت خوشه ای در آمده اند. انتظار می رود که ذرات ZnO در کنار هم قرار گیرند، اما چون در اینجا از روش سل-ژل و تکنیک اسپین کوتینگ استفاده می کنیم، ممکن ذرات اکسیدروی بجای اینکه در کنار هم چیده شوند روی هم انباشته شوند بعبارتی بعد از اینکه در بار اول لایه نشانی انجام شد، ممکن است در دومین بار لایه نشانی در قسمتی از نمونه کشش های سطحی بیشتر شود و لذا جذب محلول بیشتر شده و برجستگی بسیار کوچکی ایجاد شود. و به همین دلیل این انباشتگی تا پایان مرحله لایه نشانی ادامه پیدا خواهد کرد. برجستگی ها و فرورفتگی های ناخواسته که در اینجا به خاطر روش سل-ژل ایجاد شده اند می تواند باعث بافتی شدن سطح (surface Texturing) شود. بعبارتی ناهمواری های ایجاد شده می تواند، باعث جذب نور بیشتر شود. با توجه به شکل الف می توان گفت، که اندازه نمونه هایی که رشد داده ایم بین ۳۰ تا ۵۰ نانومتر می باشد و این موضوع می تواند نشانگر یک لایه نشانی یکنواخت باشد. در شکل ب همانطور که مشاهده می شود تصویر برش مقطعی از نمونه سیلیکون لایه نشانی شده با ZnO گرفته شده است. و نشان می دهد که ZnO بر روی لایه سیلیکون (n-type) به خوبی رشد پیدا کرده و همه سطح سیلیکون را پوشانده است. و سطحی تقریباً صاف در ضخامتی حدود ۲۰۰ نانومتر ایجاد شده است. با توجه به تصاویر FESEM میتوان گفت، که ساختار ZnO رشد داده شده شش گوشه (هگزاگونال) می باشد.

۳-۳- خواص الکتریکی

۳-۳-۱- منحنی جریان-ولتاژ

ابتدا توسط دستگاه چهارنقطه ای مقاومت سطحی، ولتاژ و جریان اندازه گیری شد.

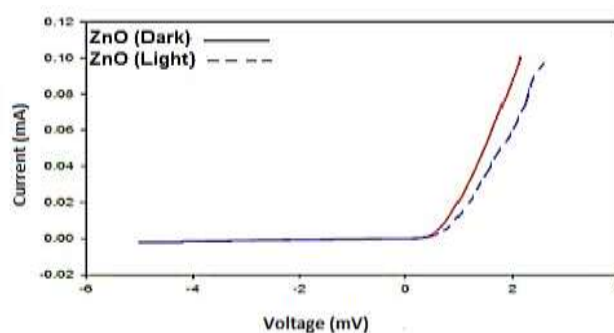
$$R_s = 290 \Omega/\square$$

$$V = 500 - 550 \text{ mV}$$

$$I = 2 - 3 \text{ mA}$$

برای بررسی مشخصه جریان-ولتاژ دیودی نمونه، از روند زیر بهره گرفته شده است.

(۱) ابتدا نمونه را در داخل محفظه مخصوص دستگاه IV قرار داده شد و بعد از انجام تنظیمات منحنی جریان-ولتاژ قطعه در تاریکی گرفته شد. یکی از اندازه‌گیری رایج در صنعت فتوولتائیک اندازه‌گیری جریان-ولتاژ در تاریکی می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، نمونه‌های رشد داده شده رفتاری همچون یک سلول خورشیدی را نشان می‌دهند، بدان معنا که در مقادیر ولتاژ منفی، از روندی کاهشی به سمت جریان‌های کمتر از صفر که مشخصه دیودها (شاتکی) است پیروی نمی‌کنند و این نشان دهنده روندی صحیح و مطلوب در فرایند لایه‌نشانی با هدف ساخت قطعه سلول خورشیدی است.



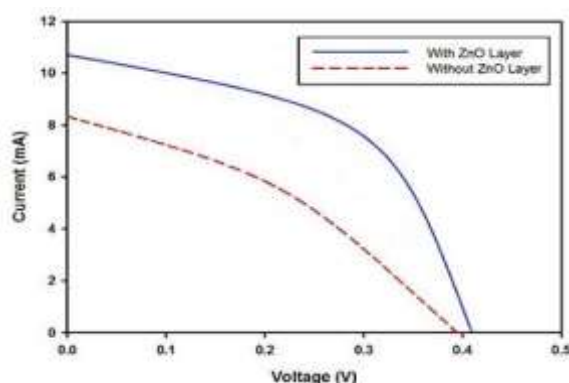
شکل ۴: منحنی جریان-ولتاژ

(۲) جهت بررسی اثر نور بر روی قطعه، آن را تحت تابش نور قرار دادیم. و منحنی جریان-ولتاژ قطعه گرفته شد. شکل ۴ نشان دهنده منحنی جریان ولتاژ نمونه‌ها در حضور و عدم حضور نور می‌باشد. نکته اولیه در این نمودارها، واکنش نمونه نسبت به حضور نور می‌باشد، چنانچه هیچ واکنشی رخ ندهد یا تغییرات در حضور تابش نور بسیار ناچیز باشد، نشان دهنده عدم دستیابی به قطعه‌ای با مشخصه‌های مطلوب است. هرچند جهت مطالعه دقیق‌تر این موضوع می‌بایست نمونه آماده شده را تحت تابش نورهای مختلف با نواحی فرکانسی متفاوت قرار داد. و سپس رفتار آن را بررسی کرد، لکن در مطالعه حاضر صرفاً تغییرات نمونه تحت تابش نور سفید با هدف مشاهده بررسی شکل‌گیری قطعه‌ای مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است.

هنگامی که نور توسط سلول خورشیدی جذب می‌شود، آکسیتون‌های متعددی (بسته به شدت و فرکانس نور تابشی) بوجود می‌آیند. این زوج‌های الکترون-حفره بسیار مقید بوده و تمایل زیادی به بازترکیب با یکدیگر دارند، پس لازم است، تا در کمترین زمان از قید یکدیگر خارج شده و خود را به محل اتصال‌ها برسانند. یکی از عواملی که می‌تواند این جداسازی را تسهیل کند، استفاده از اتصال‌های فلزی با تابع کارهای متفاوت در دو طرف قطعه سلول خورشیدی است. که در این بررسی از نقره و آلومینیوم استفاده شده است. حال چنانچه قطعه در جداسازی حامل‌های بار از یکدیگر موفق عمل کرده باشد، می‌بایست اختلاف پتانسیل دو سر قطعه در هنگام تابش نور روندی افزایشی را از خود نشان دهد. با رجوع به شکل ۴ می‌توان این روند افزایشی را در نمودار

نقطه چین برای نمونه تحت تابش نور سفید مشاهده کرد. این موضوع نیز می تواند تاییدی بر عملکرد صحیح قطعه مهیا شده در این تحقیق باشد.

۳) در مرحله دوم قطعه صرفاً در معرض نور سفید جهت بررسی رفتار صحیح آن قرار داده شد، لکن جهت دستیابی به مقادیر اصلی و مشخصه یک سلول خورشیدی می بایست آن را تحت تابش نور خورشید قرار داد. مسلماً بررسی این موضوع در هوای آزاد و تحت تابش مستقیم نور خورشید با توجه به عوامل محیطی و متفاوت آن، کار صحیحی نمی باشد، لذا از شبیه ساز طیف تابشی سلول خورشیدی بدین منظور استفاده شده است. طیف های استفاده شده در این شبیه ساز دیگر تنها طیف نور سفید استفاده شده در مرحله دوم نبوده و به گونه ای تنظیم شده است، که بتواند دقیقاً تمام گستره فرکانسی نور خورشید در محدوده مرئی را با مشخصه $AM: 1.5$ در اختیار قرار دهد. منحنی های نشان داده شده در شکل ۵ مربوط به نمونه هایی با/ بدون لایه ضد بازتاب ZnO می باشد، که مشخصه جریان- ولتاژ آنها با استفاده از شبیه ساز سلول خورشیدی رسم شده است. مسلماً و قبل از هرگونه آنالیزی، انتظار روندی افزایشی هم در مقدار ولتاژ مدار باز V_{OC} (جریان صفر) و هم ضریب پرشدگی (FF) نمونه با حضور ZnO می رود. چرایی این موضوع را می توان به جذب بیشتر نور در لایه هایی نسبت داد که در آنها از ZnO استفاده شده است، همانطور که قبلاً بیان شد، افزایش میزان جذب می تواند باعث افزایش آکسیتون ها شود، و لذا حامل هایی که به اتصال های دو طرف سلول می رسند، افزایش می یابد. مقدار بالاتر V_{OC} در نمونه هایی با حضور لایه ZnO حاکی از اختلاف پتانسیل بالاتر این نمونه است، که ناشی از تجمع بیشتر حامل های بار در دو طرف قطعه می باشد، هرچند که در این لحظه هنوز هیچ جریانی برقرار نشده است. و این می تواند مبین عملکرد خوب یک قطعه سلول خورشیدی باشد. نمودار قائم در شکل ۵ نشان دهنده جریان تولید شده توسط قطعه سلول خورشیدی می باشد. جریان خوانده شده در محل $V = 0$ را جریان مدار کوتاه I_{SC} می نامند. همانطور که مشاهده می شود I_{SC} مربوط به نمونه با حضور لایه ZnO بیشتر از نمونه دیگر است. و این موضوع به همراه مقدار V_{OC} بالاتر می تواند به افزایش مقدار FF که مربوط به سلول خورشیدی با بازده بالاتر است، منجر شود. نتایج آنالیز شده از طیف سلول خورشیدی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۵: منحنی جریان-ولتاژ با استفاده از دستگاه شبیه ساز نور خورشیدی

جدول ۲: نتایج گرفته شده توسط دستگاه شبیه ساز طیف خورشیدی

Cell condition	$V_{oc}(V)$	$I_{sc}(mA)$	FF	$\eta(\%)$
ZnO در حضور لایه نازک	0.41	10.59	0.52	10.04
ZnO در غیاب لایه نازک	0.39	8.35	0.36	5.22

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش لایه‌های نازک اکسید روی به عنوان پوشش ضد بازتاب با استفاده از روش سل-ژل و تکنیک پوشش دهی چرخشی که روشی آسان، کم هزینه و قابل تکرار می باشد بر روی سیلیکون لایه‌نشانی شد و اثر آن بر روی بازدهی سلول‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی‌های به عمل آمده مشخص شد، لایه نازک ZnO تشکیل شده بر روی زیرلایه سیلیکون می‌تواند خاصیت ضد باز تاب خوبی از خود نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد که سایز کریستالی نمونه‌های ZnO رشد داده شده بین ۳۰ تا ۵۰ نانومتر می‌باشد و این موضوع می‌تواند حاکی از یک لایه‌نشانی یکنواخت باشد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که ساختار ZnO هگزاگونالی بر روی لایه سیلیکون (n-type) به خوبی رشد پیدا کرده و همه سطح سیلیکون را پوشانده است و سطحی تقریباً صاف در ضخامتی حدود ۲۰۰ نانومتر ایجاد شده است. بنابراین لایه نازک ZnO می‌تواند سبب افزایش جذب نور و در نتیجه افزایش نرخ تولید جفت الکترون-حفره و به دنبال آن بالاتر رفتن میزان بازده سلول خورشیدی شود. روند تولید جریان الکتریکی در سلول‌های خورشیدی بر پایه تولید هر چه بیشتر جفت الکترون-حفره استوار است. البته عوامل متعدد دیگری نیز در این فرایند دخیل هستند که جهت دستیابی به نمونه بسیار مطلوب، می‌بایست همگی آنها را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مقاومت سطحی زیرلایه قبل از لایه نشانی $1800 \Omega/\square$ و بعد از لایه‌نشانی به مقدار $290 \Omega/\square$ رسیده است. همچنین راندمان سلول خورشیدی در غیاب لایه اکسیدروی ۵/۲۲ درصد و در حضور لایه ضدبازتاب اکسیدروی به مقدار ۱۰/۰۴ درصد رسیده است. بعبارتی لایه نازک ZnO با ساختار هگزاگونال می‌تواند بعنوان یک لایه ضدبازتاب خواص الکتریکی سلول خورشیدی را بهبود داده و باعث افزایش بازده سلول خورشیدی شود.

۵- مراجع

- [1] B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, Y. Qiu, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(2006) 549.
- [2] C. Li, M. Liu, N. G. Pschirer, M. aumgarten, K. Mullen, *Chemical Reviews*, 110(2010) 6817.
- [3] S. R. Forrest, *MRS Bulletin*, 30(2005) 28.
- [4] O. Isabella, K. Jager, A. Smets, R.V. Swaaij, "Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems", UIT Cambridge, (2016).
- [5] R. Somayye, E. Mohammad, H. Mohaddese, *J. Of Applied Chemistry*, 5(1389) 15, in Persian.
- [6] P.M. Sirimanne, V.P.S. Perera, *Physica Status Solidi (b)*, 241(2008) 1828.
- [7] D. Eder, Alan H. Windle, *Advanced Materials*, 20(2008) 1787.

- [8] W. Schnabel, *Polymers and light: fundamentals and technical applications*, 1st ed., John Wiley & Sons, (2007) pp.156.
- [9] S. De Wolf, A. Descoedres, Z. C. Holman, and C. Ballif, *green*, 2(2012)7.
- [10] T. Saga, *NPG Asia Mater*, 2(2010) 96.
- [11] H.B.Serreze, "Optimization Solar Cell by Simultaneous Consideration of Grid pattern Design and Interconnect Configuration".(2002), 609.
- [12] S. Duttagupta, F. Ma , B. Hoex, T. Mueller, A.G. Aberle, *Energy procedia*, 15(2012) 78.
- [13] D.N. Wright, E.S.Marstein, A. Holt, "Double Layer Antireflective Coating for Silicon Solar Cells", *IEEE*, 2005.
- [14] Y.C. Jeon, H.Y. Lee, S.K. Joo, *Journal of Applied Physics*, 75(1994) 979.
- [15] J. Schmidt, F.M. Schuurmans, W.C. Sinke, S.W.Glunz, A.G.Aberle, *Applied Physics Letters*, 71(1997) 252.
- [16] M. Lapeyrade, M.P. Besland, C. Meva'á, A.Sibai, G. Hollinger, *Journal Of Vacuum Science & Technology*, 17(1999) 433.
- [17] W.M Arnoldbik, C.H Maree, A.J Maas, M.J Van den Boogaard, *Physical Review B*,8(1993)5444.
- [18] H.P.L Löbl, M. Huppertz, *Thin Solids Films* 317(1998)153.
- [19] S.A. Awan, R.D. Gould,S. Gravano, *Thin Solids Films*, 335(1999) 456.
- [20] T. Ehara, T.Ueno, J. Abe, *physica status solidi A*, 207(2010) 1600.
- [21] C.Yang, J.Pham,*Silicon*,10(2018)2561.
- [22] J. Lee, Z. Li, M. Hodgson, J. Metson, A .Asadov, W. Gao, *Current Applied Physics* , 4(2004)398.
- [23] R.Thitima, C. Patehatee, S.Takashi, Y. Susumu, *Solid-State Electronics*, 53(2009) 176.
- [24] K. Ellmer, A. Klein, B.Rech, *Transparent Conductive Zinc Oxide :Basics and Applications in Thin Film Solar Cells*, Springer Series in Materials Science, (2008) pp.148.
- [25] L.Y.Lin, D. E. Kim, *Thin Solid Films*, 517(2009) 1 690.
- [26] J. Li, S. Srinivasan, G. N. He, J.Y. Kang, S. T. Wu, F. A. Ponce, *Journal of Crystal Growth*, 310(2008) 599.
- [27] J. B. Laughlin, J. L. Sarquis, V. M. Jones, J. A. Cox, *Journal of Chemical Education*, 77(2000) 77.
- [28] J. H.Lee, K.H. Ko, B.O.Park, *Journal Of Crystal Growth*, 247(2003) 119.
- [29] M.H. Aslan, A.Y.Oral, E. Mensur, A.Gül, E. Basaran, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82(2004) 543.
- [30] M.Caglar, S.Ilican, Y. Caglar, F.Yakuphanoglu, *Applied Surface Science*, 225(2009)4491.
- [31] Ş. Karataş, H. M. El-Nasser, Ahmed. A. Al-Ghamdi, F.Yakuphanoglu, *Silicon*,10(2018) 651.
- [32] P. Sagar, P. K. Shishodia, R. M. Mehra,*Applied Surface Science*, 253(2007) 5419.
- [33] S.Suwanboonl, R.Tanattth, R.Tanakorn,Songklanakaran, *Journal of Science and Technology*, 30(2008) 65.

[34] M.Mohammadi, M.R. Rokn-Abadi, H.Arabshahi, Indian Journal of Science and Technology, 3(2010) 110.