

بررسی تاثیر غلظت فسفر بر عملکرد سلول‌های خورشیدی حالت جامد پایه سیلیکون متخلخل

شیرین محمودی^۱، محمدجواد اشراقی^{۱*}، بنیامین یارمند^۲، نیما نادری^۱

^۱ پژوهشکده نیمه‌هادیها، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

^۲ پژوهشکده نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۳/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۷/۳/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

چکیده در پژوهش حاضر، تاثیر غلظت فسفر در محلول آلایند بر عملکرد سلول‌های خورشیدی حالت جامد پایه سیلیکون متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور بسترهای سیلیکونی به روش حکاکی شیمیایی توسط نقره و با استفاده از محلول حکاکی آبی حاوی هیدروفلوریک اسید و هیدروژن پروکسید به نسبت‌های ۰/۸۲، ۰/۸۷ و ۰/۸۹ حکاکی شدند و خصوصیات نوری و سطحی آن‌ها به ترتیب توسط بازتاب‌سنجی و میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی گسیل میدانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه، سلول‌های خورشیدی با نفوذ فسفر در سه غلظت ۳٪، ۹٪ و ۱۵٪ در محلول آلایند به درون بستر سیلیکونی با تخلخل بهینه ساخته شدند. نتایج مشخص کرد که سیلیکون حکاکی شده با هیدروفلوریک اسید و هیدروژن پروکسید به نسبت ۰/۸۲ به دلیل برخورداری از تخلخل‌های یکنواخت و با اندازه نزدیک به ذرات نقره دارای بازتابی در حدود ۱۱٪ شد که بهترین بستر برای جذب حداکثر میزان نور برخوردی به شمار می‌رود. بررسی عملکرد فوتولتاییک سلول‌های ساخته شده بیانگر افزایش ۹۸٪ جریان مدار کوتاه سلول آلایش یافته با غلظت ۳٪ از فسفر است که بازده کل سلول را به میزان ۱۰/۶٪ افزایش داده است.

کلمات کلیدی: سیلیکون متخلخل، فسفر، حکاکی شیمیایی توسط فلز و سلول خورشیدی حالت جامد.

Investigating the Effect of Phosphorus Concentration on the Performance of Porous Silicon Solid State Solar Cells

Shirin Mahmoudi¹, M. J. Eshraghi^{1*}, B. Yarmand², N. Naderi¹

¹ Semiconductor Department, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

² Nanotechnology and Advanced Materials Department, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

Abstract In this study, the effect of phosphorous concentration has been investigated on performance of porous silicon solar cells. For this purpose, silicon substrates were etched into aqueous etching solution containing hydrofluoric acid / hydrogen peroxide with molar ratios 0.82, 0.87 and 0.89 via metal-assisted chemical etching. Surface characteristics were studied by optical microscopy, field-emission electron microscopy and antireflection analysis. In the following, solar cells were fabricated by phosphorous diffusion into optimized porous silicon substrate which phosphorous concentrations had values of 3%, 9%, and 15%. The result presented that in 0.82 molar ratio, the etched silicon had uniform porosities whose sizes were nearly to Ag nano-particles. The reflectance of this substrate was decreased to 11% and was the best substrate for absorbing incident light. Survey of fabricated solar cell performance showed 98% increasing of short circuit current in the solar cell which was made by P₂O₅ 3%. This concentration due to is near the solubility of phosphorous in silicon, caused the increasing efficiency to 10.6%.

Keywords: Porous silicon, Phosphorous, Metal-Assisted Chemical Etching, Solid State Solar Cells.

۱- مقدمه

سیلیکون حجیم به علت داشتن پهنای انرژی غیرمستقیم کاربرد محدودی در ساخت سیستم‌های فوتوالکترونیک دارد که با ایجاد تخلخل‌های سطحی در محدوده ابعاد نانومتری و تغییر پهنای نواری به حالت مستقیم قابلیت نشر نور آن بهبود می‌یابد. به طوری که امروزه بسترهای سیلیکونی متخلخل کاربرد گسترده‌ای در ساخت تجهیزات فوتوالکترونیک و ذخیره اطلاعات پیدا کرده‌اند [۱]. سیلیکون متخلخل برای اولین بار در سال ۱۹۵۶ توسط آلبر ابداع شد و پس از درک خواص نوری سیلیکون نانومتخلخل توسط کَنهام در سال ۱۹۹۰ بسیار مورد توجه قرار گرفت [۲]. تغییر خواص نوری سیلیکون بر اثر متخلخل‌سازی سطح ناشی از ریز شدن اندازه بلورهای ساختار است که در نتیجه آن پهنای نواری سیلیکون مطابق با مدل تحدید کوانتومی افزایش می‌یابد [۳-۵].

$$E = E_0 + \frac{3.73}{d^{1.73}} \quad (1)$$

در این رابطه d اندازه بلورها برحسب نانومتر، $E_0 = 1.17 \text{ eV}$ پهنای نواری سیلیکون حجیم و E پهنای نواری در نظر گرفته می‌شود که برابر با پهنای نواری سیلیکون بالک است و انرژی تابش با توجه به این پهنای نسبت به رنگ آبی انتقال می‌یابد و به اندازه نانوبلور d ارتباط دارد [۴]. سیلیکون متخلخل به دلیل کاربردهای فراوان از جذابیت علمی و کاربردی قابل توجهی برخوردار است. این مواد به دلیل ویژگی ساختاری در به دام انداختن نور، خواص ضد بازتاب و خواص فوتولومینسانس برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶]. سیلیکون به خاطر داشتن پهنای نواری گسترده، طیف گسترده نور عبوری (۷۰۰-۱۰۰۰ nm)، طیف جذبی گسترده، زبری سطح و ضریب شکست موثر کمتر به عنوان یک ماده جذاب در زمینه الکترونیک و نوری-الکترونیک مطرح شد چون این ویژگی‌ها باعث کاهش اتلاف‌های بازتاب ناشی از تابش نور خورشید می‌شوند و برای بهبود خواص سیلیکون متخلخل نسبت به سیلیکون بلوری مورد توجه قرار می‌گیرند [۷، ۸]. میزان بازتاب نور از سطح سلول‌های خورشیدی پایه سیلیکونی، مانع اصلی عملکرد آن‌ها به شمار می‌آید که تابع ضریب شکست

است. به عنوان مثال، ضریب شکست سیلیکون $3/5$ است که باعث کاهش جذب نور می‌شود. ایجاد پوشش‌های ضدبازتاب روی سلول‌های خورشیدی موجب کاهش بازتاب از سطح، افزایش بازدهی تبدیل و افزایش طول عمر مبدل‌ها شده و مشخصه‌های فتولتاییک را بهبود می‌بخشد. این لایه‌ها در کاربردهای سلول خورشیدی به دلیل بازدهی زیاد و افزایش پهنای نواری، طیف جذبی گسترده و طیف عبور نور بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹]. علاوه بر این، پوشش‌های ضدبازتاب، مستلزم استفاده تجهیزات خلأ و دما بالا (نظیر سیم‌پیچ‌های مغناطیسی) هستند که در نهایت موجب افزایش هزینه تولید و اتلاف زمان می‌شود. در همین راستا طراحی روشی آسان، ارزان و قابل اطمینان مورد بررسی قرار گرفت، به طوری که با این روش می‌توان بدون دخالت پتانسیل خارجی، لایه متخلخل سیلیکونی ایجاد کرد. روش حکاکی شیمیایی توسط فلز، شامل همه این شرایط می‌شود و روی ویژگی ساختارهای ایجاد شده محدودیت قابل توجهی اعمال نمی‌کند. عوامل بسیاری از قبیل نوع و مورفولوژی فلز نجیب (کاتالیزور)، تغییر محتویات محلول حکاکی، بهبود ترکیبات و میزان آلایندگی موجود در بستر سیلیکونی، اعمال میدان خارجی و اجرای فرایندهای نهایی برای ایجاد نانو ساختارها، روی شکل‌پذیری و کنترل نانو ساختارهای سیلیکونی حکاکی شده اثر می‌گذارند. این روش حتی قادر به کنترل جهت نانو ساختارهای سیلیکون نظیر نانوسیم‌ها و تخلخل‌ها نسبت به زیرلایه است [۱۰]. پَنگ^۱ و همکاران سنتز نانوسیم را به روش حکاکی شیمیایی توسط فلز روی بستر سیلیکونی گزارش کردند. آن‌ها از این زیرلایه به عنوان بستر برای ساخت سلول-خورشیدی استفاده کردند و به جریان و ولتاژی به ترتیب در حدود ۲۱ mA و ۴۸۰ mV رسیدند [۱۰]. در این پژوهش ابتدا خواص ضدبازتاب سیلیکون متخلخل که به روش حکاکی شیمیایی توسط نقره ساخته شدند به عنوان عاملی مهم در جذب نور توسط بسترهای سیلیکونی مورد توجه قرار گرفت. سپس، خواص این بسترها بهینه‌سازی شده و بستر بهینه در ساخت سلول‌های خورشیدی نهایی به کار گرفته شد. در نهایت تاثیر غلظت آلایندگی فسفر روی بستر متخلخل مورد بررسی قرار

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

جدول ۱. مشخصات بسترهای سیلیکونی متخلخل شده.

نمونه	نسبت محلول حکاکی (P)	درصد تخلخل (%)
۱	۰٫۸۲	۶۰
۲	۰٫۸۷	۳۰
۳	۰٫۸۹	۲۲
۴	۰٫۹۰	۱۸

۲-۲ ساخت سلول خورشیدی

سلول‌های خورشیدی با نفوذ فسفر در سه غلظت ۳٪، ۹٪ و ۱۵٪ در بستر سیلیکون با ۶۰٪ تخلخل ساخته شدند. برای این منظور ابتدا محلول اورتوفسفریک اسید (Merck، ۸۵٪ H_3PO_4) با غلظت‌های مشخص و محاسبه شده از غلظت P_2O_5 روی بستر سیلیکونی پاشش شد. سپس نمونه‌ها درون کوره لوله‌ای طی دو مرحله تحت عملیات پخت قرار گرفتند. ابتدا مرحله خشک شدن لایه در دمای $200^\circ C$ به مدت ۲۰ min انجام گرفت. سپس عملیات نفوذ به مدت ۲۰ min تحت شارش گاز اکسیژن ۹۹٫۹۹٪ و در دمای $910^\circ C$ انجام شد. سلول‌های خورشیدی با اتصال‌گذاری روی بسترهای سیلیکون متخلخل آرایش یافته با درصدهای مختلف فسفر ساخته شدند. سطح زیرین بسترها لایه‌ای از آلیاژ آلومینیوم-نقره-تیتانیوم و سطح فوقانی لایه‌ای از آلیاژ نقره-تیتانیوم با طرح شانه‌ای توسط فرایند لایه‌نشانی تبخیر مقاومتی در خلأ ایجاد شدند (شکل ۱).

۲-۳ مشخصه یابی

مورفولوژی سطحی نمونه‌ها در مراحل مختلف پژوهش توسط میکروسکوپ‌های نوری (OM, Olympus BX61) و الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM, MIRA3) (TESCAN) بررسی شد. خواص نوری نمونه‌ها توسط بازتاب‌سنج (Phystec.co) در محدوده طول موج نور مرئی تخمین شد. میزان ترشوندگی نمونه توسط دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس (Tavpendar-CA95S) بررسی شد. عملکرد

گرفت و غلظت آلاینده بهینه که باعث ساخت سلول خورشیدی با بیشترین بازدهی شد شناسایی گردید.

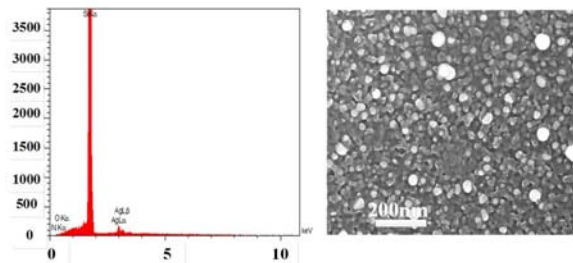
۲- روش تحقیق

۲-۱ بهینه سازی بستر سیلیکون متخلخل

از ویفر سیلیکون پولیش نشده بس‌بلور با جهت‌گیری (۱۰۰) آرایش یافته با بور (نوع p) با مقاومت $1-3 \Omega \cdot cm$ به عنوان بستر برای ساخت سلول خورشیدی استفاده شد. بسترها در ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ برش‌کاری و توسط محلول حاوی نیتریک اسید (Merck، ۶۵٪ HNO_3)، هیدروفلوریک اسید (Merck، ۴۰٪ HF) و استیک اسید (Merck، ۹۹٪ CH_3COOH) با نسبت‌های حجمی ۷۵:۱۰:۲۵ شستشو شدند. سپس برای حذف اکسیدهای سطحی، بسترها توسط اتانول (Merck، ۹۹٫۹۹٪ $EtOH$) و محلول آبی هیدروفلوریک اسید ۵٪ حجمی دوباره شسته شدند. تخلخل‌ها به روش حکاکی شیمیایی توسط نقره، روی بسترهای سیلیکونی ایجاد شدند. به همین منظور ابتدا ذرات نقره توسط محلول آبی نقره نترات با غلظت ۰٫۵ mM و هیدروفلوریک اسید ۰٫۱۴ M روی بسترهای سیلیکونی به مدت ۳ min رسوب‌دهی شدند [۱۱]. سپس با غوطه‌وری بسترها در محلول‌های آبی ۱۴M هیدروفلوریک اسید و ۲، ۳، ۴، ۵ و ۱۰٪ H_2O_2 (Merck، ۳۵٪ H_2O_2) با نسبت‌های مختلفی از نرخ مولار حکاکی ($P = \frac{HF}{HF+H_2O_2}$) ۰٫۸۲، ۰٫۸۷، ۰٫۸۹ و ۰٫۹۰ به مدت ۱۵ s در غیاب نور فرایند حکاکی شیمیایی انجام شد (جدول ۱). انجام فرایند حکاکی شیمیایی با تشکیل حباب‌های گاز روی سطح بسترهای سیلیکونی مشخص می‌شود که بیانگر آزادسازی گاز هیدروژن است. تشکیل تخلخل روی لایه سطحی موجب غیریکنواخت شدن سطح بستر می‌شود [۱۲]. از این رو برای بهبود سطح، بسترهای سیلیکون متخلخل دوباره در محلول M از KOH به مدت ۶۰s حکاکی و سپس شستشو و خشک شدند. از آنجایی که میزان تخلخل نمونه‌ها در میزان بازتاب سطح تاثیر به‌سزایی دارد، جرم آن‌ها قبل از فرایند حکاکی (m_1)، بعد از فرایند حکاکی توسط محلول‌های HF و H_2O_2 (m_2) و حکاکی توسط KOH (m_3) محاسبه شده و میزان آن‌ها با توجه به رابطه ۲ تخمین زده شد.

است که می‌تواند ناشی از اکسایش نقره در اتمسفر محیط و یا ترکیب $AgNO_3$ باشد.

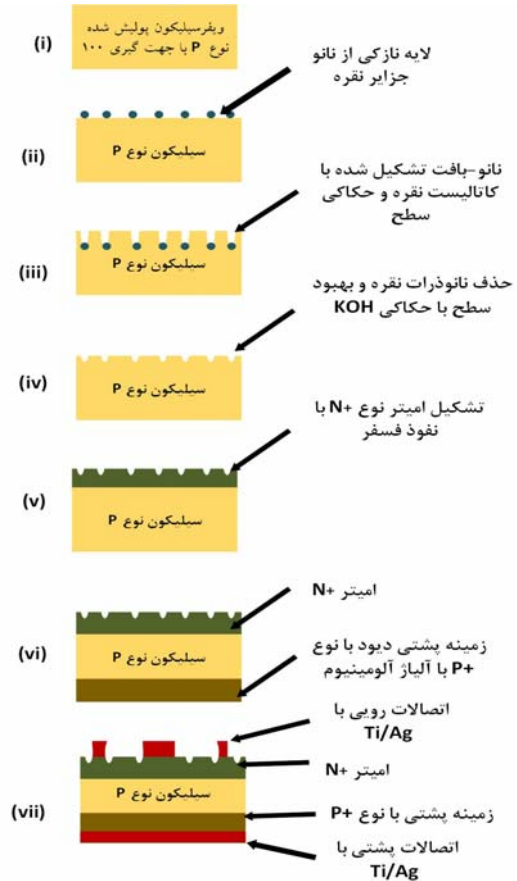
تصاویر سطح بسترهای سیلیکونی حکاکی شده با غلظت‌های مختلف محلول حکاکی در شکل ۳ نشان داده شده است. تخلخل‌های ایجاد شده در تمامی سطوح بسترها تقریباً یکنواخت است و می‌توان بیان کرد که با افزایش غلظت محلول حکاکی (p) به بیش از ۰.۸۵٪ میزان حکاکی با غلظت هیدروژن پروکسید کنترل می‌شود. روند تشکیل سیلیکون متخلخل در محلول حکاکی حاوی هیدروفلوریک اسید و نیتریک اسید هم مشابه فرایند حکاکی در محلول حاوی هیدروژن پروکسید و هیدروفلوریک اسید است. [۱۳]. هم‌چنین وقتی سیلیکون در محلول‌هایی با ۰.۸۰٪ p^{*} حکاکی می‌شود تخلخل‌هایی روی آن تشکیل می‌شود که قطر آن‌ها با قطر نانوذرات نقره یکسان است که این موضوع را هم می‌توان در تخلخل‌های ایجاد شده در شکل ۲ الف مشاهده کرد. در این شکل میانگین اندازه تخلخل‌ها حدود ۷۰ nm است که با اندازه نانوذرات نقره رسوب‌دهی شده روی سطح برابر می‌باشد.



شکل ۲. الف: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و ب: آنالیز عنصری پرتو ایکس نقطه‌ای از سطح نانوذرات رسوب کرده بر بستر سیلیکونی.

طیف پراش پرتو ایکس زیرلایه بدون تخلخل و متخلخل با نرخ حکاکی ۰.۸۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طیف پراش از بستر متخلخل حکاکی شده با نرخ حکاکی ۰.۸۲ نسبت به زیرلایه بدون تخلخل به دلیل کاهش شدت نور از مراکز بلوری موجود در زیرلایه متخلخل از شدت کم‌تری برخوردار است. افزایش پهنای پیک در نصف شدت بیشینه هم نشان‌دهنده افزایش چگالی حفرات در زیرلایه بلوری و کاهش اتم‌های سیلیکون

فوتولتاییک سلول‌های خورشیدی با اندازه‌گیری منحنی‌های مشخصه جریان-ولتاژ توسط منبع تغذیه (Keitly) تحت تابش نور با شرایط استاندارد مشخصه‌یابی شد.



شکل ۱. شماتیک مراحل ساخت سلول خورشیدی پایه سیلیکون متخلخل.

۳- بحث و نتایج

شکل ۲-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و آنالیز عنصری پرتو ایکس نقطه‌ای بستر سیلیکونی را پس از رسوب‌دهی نانوذرات نقره نشان می‌دهد. ذرات نقره به شکل کروی و توزیع جزیره‌ای تقریباً یکنواخت در تمام سطح قرار گرفته‌اند. میانگین اندازه ذرات نقره و فاصله آن‌ها از هم‌دیگر با استفاده از آنالیز تصویری به ترتیب حدود ۷۰ nm و ۵۸ تخمین زده شد. دما، زمان لایه‌نشانی و غلظت نمک فلزی از پارامترهای موثر در لایه‌نشانی نانوذرات نقره هستند [۱۳]. رسوب‌دهی ذرات نقره مطابق نتایج پژوهش قبل در شرایط بهینه شامل دمای محیط، زمان ۳ min و غلظت ۰.۵ mM انجام شد. بررسی نتایج آنالیز طیف‌سنجی عنصری پرتو ایکس نقطه‌ای بیانگر حضور نقره به همراه مقدار ناچیزی اکسیژن

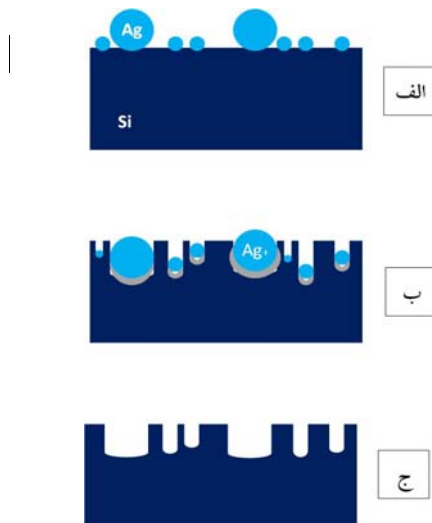
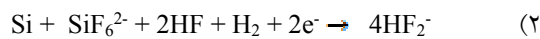
در ساختار بلوری می باشد [۱۴].

به صورت کاهش یون های نقره یک بار مثبت است که لایه های نقره فلزی تولید می کند. در حالی که واکنش آندی در محلول هیدروفلوریک اسید، (گونه های واکنش پذیر آن HF و HF_2^- هستند) باعث اکسیداسیون سیلیکون می شود. بارهای آزاد شده با اکسید شدن اتم های سیلیکون، به محل لایه نشانی نقره می روند. هم چنین در شکل ۵-ب و مطابق با واکنش ۲ در اثر تشکیل پیوند SiF_6^{2-} سیلیکون متخلخل تشکیل می شود. در مرحله آخر (شکل ۵-ج) مرحله اصلاح و یکنواخت کردن سطح صورت می پذیرد.

واکنش کاتدی انجام شده در عملیات آبکاری نقره

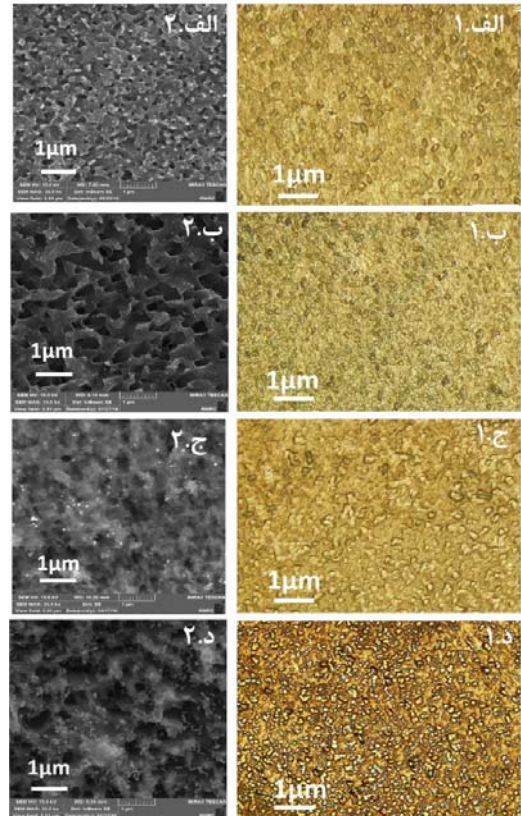


واکنش آندی انجام شده برای تشکیل سیلیکون متخلخل

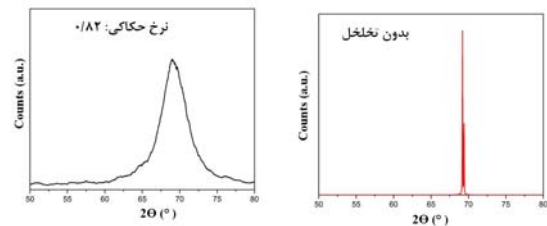


شکل ۵. شماتیک مراحل حکاکی شیمیایی به کمک نقره الف: لایه نشانی نقره، ب: حکاکی شیمیایی سطح و ج: حذف لایه نانو-متخلخل در محلول پتاسیم هیدروکسید.

طیف های بازتابش نور از سطح بسترهای حکاکی شده با غلظت های حکاکی مختلف در محدوده طول موج ۶۷۰-۵۷۰ nm در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود میزان بازتاب در طول موج مربوط به تابش استاندارد جهانی (۶۵۰ nm) از سطح بستر اول که در محلول آبی هیدروفلوریک اسید و هیدروژن پروکسید ۰/۸۲ قرار گرفت

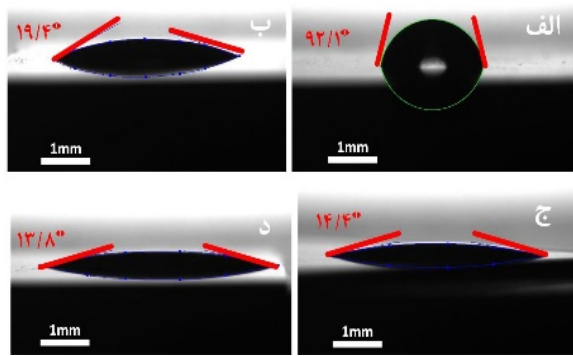


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح نمونه های حکاکی شده در محلول های حکاکی با نرخ های حکاکی مختلف برحسب مولار الف: ۰/۸۲، ب: ۰/۸۷، ج: ۰/۸۹ و د: ۰/۹۰



شکل ۴. طیف پراش پرتو ایکس از زیرلایه بدون تخلخل و زیرلایه حکاکی شده با نرخ حکاکی ۰/۸۲

در این پژوهش، سازوکار فرایند حکاکی شیمیایی توسط نقره که طی سه مرحله روی سطح بستر انجام می شود در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف لایه نشانی نقره به روش الکترولس روی سطح سیلیکون در محلول حاوی هیدروفلوریک اسید و یون های نقره یک بار مثبت انجام می شود و بر اساس واکنش جابجایی، آبکاری در سطح سیلیکون در طی دو فرایند هم زمان رخ می دهد. واکنش کاتدی



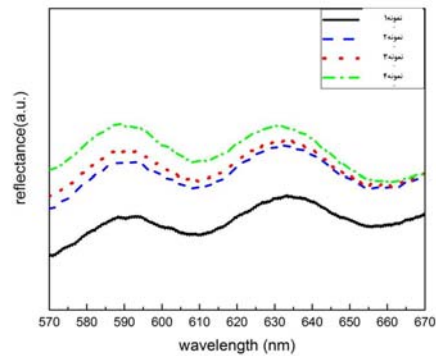
شکل ۷. تصاویر آنالیز ترشوندگی روی سطح بستر متخلخل با محلول آبی فسفریک اسید برحسب تعداد مولاریته تریتون الف: بدون تریتون، ب: M ۰,۰۰۰۸، ج: M ۰,۰۰۱ و د: M ۰,۰۰۴

شکل ۸ منحنی‌های چگالی جریان- ولتاژ سلول‌های خورشیدی ساخته شده را نشان می‌دهد که جزئیات مشخصه-یابی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. از بین سلول‌های ساخته شده در این پژوهش سلولی که با غلظت ۳٪ از P₂O₅ تحت پاشش قرار گرفت، دارای بیش‌ترین چگالی جریان مدار کوتاه و بازده در حدود ۱ A/cm² و ۱۰/۶٪ است. از آنجایی‌که با این غلظت کم، غلظت فسفر در فصل مشترک بین فسفوسیلیکا و امیتر به ۱۰^{۲۰} × ۷-۵ cm⁻³ می‌رسد، به‌همین دلیل فسفوسیلیکا تشکیل شده روی سطح قابل صرفنظر است و ضخامت آن تا حد چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۶].

جدول ۲. مشخصات چگالی جریان- ولتاژ برای سلول‌های آلیس یافته با غلظت‌های مختلف فسفر.

سلول	غلظت P ₂ O ₅ (%)	J _{sc} (A/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (%)	η (%)
۱	۳٪	۰,۱	۰,۵۴	۰,۲۸	۱۰,۶
۲	۹٪	۰,۰۹۱	۰,۵۵	۰,۲۵	۱۰,۵۱
۳	۱۵٪	۰,۰۱۶	۰,۵۵	۰,۱۴	۰,۰۲

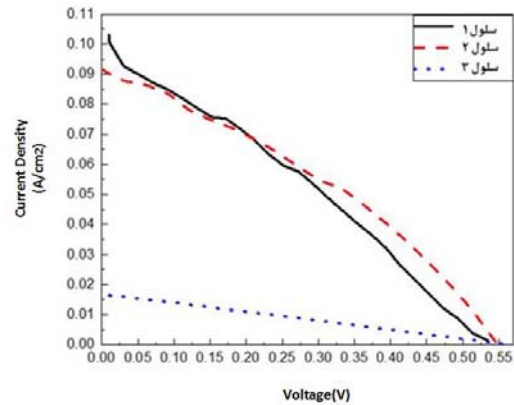
حدود ۱۲٪ نسبت به نمونه چهارم کاهش یافته است. مطابق با محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه (۱)، درصد تخلخل برای این بستر حدود ۶۰٪ می‌باشد که نسبت به سایر بسترها بیشتر بوده و به همین دلیل توانایی جذب نور در این بستر افزایش و می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی باشد [۱۵].



شکل ۶. بازتابش نور از سطح زیرلایه‌های حکاکی شده با مقادیر مختلف ρ نسبت داده شده به نمونه ۱: نمونه ۲: ۰,۸۷، نمونه ۳: ۰,۸۹ و نمونه ۴: ۰,۹۰

به منظور آب‌دوست کردن سطح بسترها، از پیش‌ماده تریتون ۱۰۰ برای افزایش ترشوندگی سطوح استفاده شد. از آنجایی‌که قطرات فسفریک اسید روی یک سطح آب‌گریز با تشکیل قطرات کروی شکل جمع می‌شوند، همین امر باعث ایجاد یک پوشش غیریکنواخت از فسفریک اسید روی سطح می‌شود. هم‌چنین فسفریک اسید روی سطوح آب‌دوست، به‌خوبی پخش می‌شود و تمام سطح را تنها با تغییرات کوچکی در ضخامت قطرات پوشش می‌دهد. این پدیده مشخص می‌سازد که وقتی از محلول آبی فسفریک اسید برای پاشش استفاده می‌شود سطح آب‌دوست نسبت به سطح آب‌گریز از برتری چشمگیری برخوردار است [۱۶]. در همین راستا مطابق با آنالیز انجام شده در شکل ۶، ترشوندگی سطح برحسب مولاریته تریتون موجود در محلول آبی فسفریک اسید مورد بررسی قرار گرفت. با مشاهده این تصاویر مشخص شد که ترشوندگی بهینه با M ۰,۰۰۱ تریتون در محلول پاشش حاصل می‌شود.

- rich SiO₂ films in relation with embedded Si mesoscopic particles. *Journal of Luminescence*, 1996. 70(1-6): p. 352-363.
3. Delerue, C., G. Allan, and M. Lannoo, Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon. *Physical Review B*, 1993. 48(15): p. 11024.
 4. Kim, B.-S., et al., Photoluminescence from nano silicon materials prepared by photoelectrochemical methods. *JOURNAL-KOREAN PHYSICAL SOCIETY*, 2001. 38(3): p. 245-250.
 5. Loni, A., et al., Porous silicon multilayer optical waveguides. *Thin solid films*, 1996. 276(1-2): p. 143-146.
 6. Uhler, A., Electrolytic shaping of germanium and silicon. *Bell Labs Technical Journal*, 1956. 35(2): p. 333-347.
 7. Chaoui, R., et al., Contribution of the photoluminescence effect of the stain etched porous silicon in improvement of screen printed silicon solar cell performance. *Revue des Energies Renouvelables*, 2013. 16(2): p. 347-356.
 8. Koshida, N. and H. Koyama. Visible electro-and photoluminescence from porous silicon and its related optoelectronic properties. in MRS Proceedings. 1991. Cambridge Univ Press.
 9. Vitanov, P., et al., Application of porous silicon layer in photovoltaic devices. *Thin Solid Films*, 1997. 297: p. 299-303.
 10. Peng, K., et al., Aligned Single-Crystalline Si Nanowire Arrays for Photovoltaic Applications. *small*, 2005. 1(11): p. 1062-1067.
 11. Chartier, C., S. Bastide, and C. Lévy-Clément, Metal-assisted chemical etching of silicon in HF-H₂O₂. *Electrochimica Acta*, 2008. 53(17): p. 5509-5516.
 12. Li, P., et al., Effective optimization of emitters and surface passivation for nanostructured silicon solar cells. *RSC Advances*, 2016. 6(106): p. 104073-104081.
 13. Chartier, C., S. Bastide, and C. Lévy-Clément, Metal-assisted chemical etching of silicon in HF-H₂O₂. *Electrochimica Acta*, 2008. 53(17): p. 5509-5516.
 ۱۴. بی.دی. کالیتی، مبانی پراش پرتو ایکس، second ed. 1389، دانشگاه شیراز.
 15. Selj, J., et al., Optimization of multilayer porous silicon antireflection coatings for silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2010. 107(7): p. 074904.
 16. Kim, D., et al., Development of a phosphorus spray diffusion system for low-cost silicon solar cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006. 153(7): p. A1391-A1396.



شکل ۸. منحنی‌های چگالی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با غلظت‌های آرایش یافته با غلظت‌های مختلف سلول ۱: ۳٪، سلول ۲: ۹٪ و سلول ۳: ۱۵٪

۴- نتایج

برای ایجاد ساختارهای متخلخل روی بسترهای سیلیکونی از روش حکاکی شیمیایی توسط نقره استفاده شد. اثر تغییر نسبت غلظت حکاکی روی مورفولوژی و میزان بازتاب از سطح بسترها مورد بررسی قرار گرفت. از بررسی مورفولوژی ساختارها مشخص شد که سطحی که در محلول حکاکی با $p=0.82$ قرار گرفت، دارای تخلخل‌هایی متناسب با اندازه نانوذرات نقره رسوب‌دهی شده روی بستر است و از یکنواختی چشمگیری هم برخوردار است. با توجه به نتایج بازتاب‌سنجی مشخص شد که با افزایش p از ۰.۸۲ به ۰.۹۰ میزان بازتاب در طول موج ۶۵۰ nm از ۲۲٪ به ۱۱٪ کاهش می‌یابد که به سبب افزایش درصد تخلخل از ۱۸٪ به ۶۰٪ می‌باشد. از آنجایی که قابلیت جذب نور بیشتر در سلول یکی از چالش‌های مهم فوتوولتائیک است، بستری که دارای کم‌ترین بازتاب و بیشترین درصد تخلخل تا حدود ۱۱٪ و ۶۰٪ است، به عنوان ساختار بهینه برای کاربرد در ساخت سلول‌ها انتخاب شد. از مشخصه‌یابی نهایی عملکرد سلول‌ها دریافت شد که سلول خورشیدی ساخته شده با غلظت ۳٪ از P_2O_5 نسبت به سلول‌های دیگر از بازدهی بیشتری تا ۱۰/۶٪ برخوردار است.

مراجع

1. Shatkovskis, E., et al., Efficiency Enhancement of Silicon Solar Cells by Porous Silicon Technology. *Materials Science*, 2012. 18(3): p. 220-222.
2. Hayashi, S. and K. Yamamoto, Optical properties of Si-