

همبستگی تخلخل با زبری توسط طیف پراکندگی سطوح نانویی سیلیکان متخلخل

ستاره ابراهیم نسب، رضا ثابت داریانی

گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا (س)، تهران

پست الکترونیکی: dariani@alzahra.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۴/۱۱)

چکیده

طیف بازتاب، چهار نمونه سیلیکان متخلخل تحت زمانهای خوردگی ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ دقیقه با چگالی جریان 10 mA/cm^2 اندازه گیری شد. رفتار طیف بازتاب برای هر چهار نمونه یکسان، اما شدت آنها متفاوت بود و با افزایش زمان، شدت بازتاب، کاهش می یافت. دلیل عدم تغییر در رفتارهای طیف بازتاب، یکسان بودن غلظت محلول الکترولیت در طول ساخت بوده و کاهش شدت بازتاب به دلیل کاهش ابعاد ذرات است. علاوه بر آن ناحیه مربوط به کمترین شدت در طیف بازتاب ($550 \text{ nm} - 650 \text{ nm}$) مربوط به گاف انرژی در سیلیکان متخلخل است که انتقال آبی را نیز نشان می دهد. بررسی زبری سطح نمونه های سیلیکان متخلخل با اندازه گیری طیف پراکندگی و با بکار بردن معیار رایلی و معادله دیویس-بنت، انجام شد. طیف پراکندگی نمونه ها در زاویه های فرود ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درجه با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر، اندازه گیری شد. شدت نور پراکنده شده با افزایش زاویه پراکندگی به غیر از حالت بازتاب آینه ای، کاهش یافت که این با معیار رایلی توافق دارد. همچنین بررسی های امان نشان دادند. با افزایش زمان خوردگی، درصد تخلخل، ابعاد و تعداد حفره ها افزایش یافته و در نتیجه میزان بیشتری از نور برخوردی جذب می شود و شدت پراکندگی از سطح کاهش خواهد یافت، اما از آنجاییکه شدت پراکندگی با تغییر مقیاس مشاهده، طول موج، تغییر می کند بنابراین شدت پراکندگی و میزان خوردگی نیز با تغییر مقیاس مشاهده تغییر می کند.

واژه های کلیدی: ریخت شناسی، پراکندگی، زبری، سیلیکان متخلخل

۱. مقدمه

بر ساختار مواد بی تاثیر است و عملاً در مورد سطوحی که به روش های دیگر پاسخ نمی دهند، می توان آن را به کار برد. از طرف دیگر پراکندگی حاصل، از برهم کنش نور با ماده است، از این رو طیف پراکندگی به نوع ماده و ریخت شناسی سطح وابسته است. بنابراین طیف پراکندگی اطلاعات مهمی از سطح ماده را در بر خواهد داشت [۱]. سطح تمام مواد دارای زبری

روش های اندازه گیری خواص سطوح زیر به دو صورت تماسی و غیرتماسی می باشد. از روش های تماسی AFM را می توان نام برد. در این روش ها سطح نمونه آسیب می بیند. یکی از روش های غیرتماسی، اندازه گیری پراکندگی است. از نکات مثبت این روش این است که وضعیت سطح را تغییر نمی دهد و

۲. ساخت نمونه

در این کار از سیلیکان نوع p آلائیده با بور، مقاومت سطح $\frac{\Omega}{\square}$ ۳۰۰ و جهت بلوری (۱۰۰) استفاده کردیم. به منظور یکنواخت شدن تخلخل، یک لایه اهمی از آلومینیوم با ضخامت ۰.۵ میکرون با روش تبخیر حرارتی در خلأ 10^{-4} mbar در 450°C به مدت ۴۰ دقیقه پخت شدند. آنده کردن در محلول الکترولیت حاوی HF (۳۸٪) و اتانول به نسبت مساوی (۱:۱) انجام گرفت.

به منظور یافتن رابطه‌ای میان زمان خوردگی با شدت بازتاب در طیف بازتاب و بررسی اثر زبری بر ریخت شناسی سطوح نانویی، نمونه‌هایی با مدت زمانهای خوردگی ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ دقیقه ساخته شدند. لازم به ذکر است که چگالی جریان به کار رفته در همه آزمایش‌ها 10 mA/cm^2 بود. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) از سطح نمونه‌ها جهت بررسی ابعاد ذرات، تهیه شد.

۳. نظریه آزمایش

(الف) پراکندگی موج از سطوح زبر اولین بار توسط رایلی در سال ۱۸۷۷ میلادی مطالعه شد. او یک موج تکفام را با زاویه θ_i به سطح تاباند و امواج پراکنده را در زوایای θ_r دریافت کرد. اختلاف فاز بین موج فرودی و موج خروجی را با استفاده از اختلاف راه به صورت زیر بدست آورد [۲]

$$\Delta\phi = k[(h_1 - h_r)(\cos\theta_i + \cos\theta_r) + (x_r - x_1)(\sin\theta_i - \sin\theta_r)], \quad (1)$$

k اندازه بردار موج فرودی و پراکنده شده است و (x_i, h_i) مختصات نقاطی هستند که پراکندگی در آنها محاسبه می‌شود. در راستای آینه‌ای اختلاف فاز بین موج فرودی و موج خروجی با معادله زیر داده می‌شود

$$\Delta\phi = 2k \Delta h (\cos\theta_i), \quad (2)$$

تداخل میان دو موج بستگی به بزرگی اختلاف فاز در مقایسه با π دارد. بدین صورت که اگر $\phi\Delta < \pi$ دو موج فرودی تقریباً هم فاز هستند و تداخل سازنده است و اگر $\phi\Delta > \pi$ باشد، آنگاه موج فرودی و خروجی تداخل غیرسازنده خواهند داشت، که

است. زبری سطح از خصوصیات مهم سطح است که بر بسیاری از ویژگی‌های مهم سطح مانند چسبندگی، اصطکاک، بازتاب و پراکندگی اثر می‌گذارد [۲].

یکی از معیارهایی که سطوح را به هموار و زبر تقسیم‌بندی می‌کند، معیار رایلی است. این معیار نشان می‌دهد، زبری خاصیت ذاتی سطح نیست و به خواص موج پراکنده شده بستگی دارد. طول موج و زاویه موج فرودی چگونگی زبری هر سطح را تعیین می‌کند. برای مثال، وقتی طول موج فرودی نسبت به ناهمواری‌های سطح کوچکتر باشد، سطح زبرتر به نظر می‌رسد [۳]. به عبارت دیگر وقتی که سطح را با مقیاس‌های متفاوت مشاهده می‌کنیم، زبری‌های متفاوتی بدست می‌آید. از آنجا که طول موج در مسایل بازتاب و پراکندگی، نقش مقیاس مشاهده را بازی می‌کند، می‌توان زبری‌های مختلف سطح را با تغییر طول موج تشخیص داد [۱].

در این کار، هدف بررسی اثر زبری بر ریخت شناسی سطح نانویی توسط طیف بازتاب آینه‌ای و پراکندگی است. سطحی که در این کار انتخاب شد، سطح سیلیکان متخلخل (PS) است، که از خوردگی الکتروشیمیایی لایه‌های سیلیکان در محلول هیدروفلوئوریک اسید (HF) ساخته می‌شود. سیلیکان ماده‌ای است که توانایی ایجاد حفره‌هایی در ابعاد نانومتری دارد. در سیلیکان نوع p به دلیل وجود حفره بیشتر، خوردگی بیشتری از نوع درختی دیده می‌شود و ساختار نانویی خواهد بود [۴]. خواص فیزیکی سیلیکان متخلخل، از نوعی به نوع دیگر تغییر می‌کند. به دلیل همین خواص متنوع و قابل تنظیم، سیلیکان متخلخل در زمینه‌های بسیاری از جمله الکترونیک، میکروالکترونیک، اپتیک، اپتوالکترونیک، ساخت انواع حسگرها، سلول‌های خورشیدی، موجبرها، آینه‌های دی الکتریک و میکروکاوک‌ها کاربرد فراوانی دارد [۴].

در مقاله حاضر، از معیار رایلی برای بررسی زبری سطح استفاده شد. جهت به کار بستن معیار رایلی، پارامتر σ جذر میانگین مربعی ارتفاع مورد نیاز توسط رابطه دیویس-بنت با استفاده از اطلاعات پراکندگی بدست آمد.

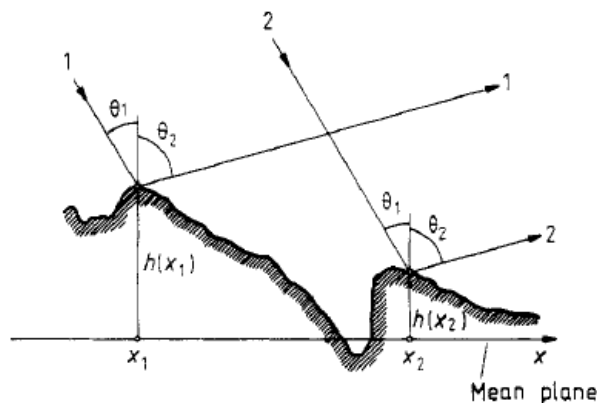
۴. نتایج و بحث

طیف بازتاب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر Ocean Optics مدل HR400 OCG-UV-NIR اندازه‌گیری شد. طیف بازتاب (R) در واقع همان بازتاب آینه‌ای است که بیشترین شدت را داراست. در شکل ۲ طیف R مربوط به سیلیکان و نمونه‌های PS اندازه‌گیری شده است.

دو قله اصلی در طیف سیلیکان در طول موج‌های ۲۷۵ nm و ۳۶۷ nm مربوط به انتقال‌های بین نواری با انرژی بالا است، یعنی حامل‌ها بین نوارها انتقال می‌یابد. در این انرژی‌ها که مربوط به نوارهای بالای رسانش می‌شوند، با توجه به این‌که در بعضی تخلخل‌ها (در نوع p) مشاهده نمی‌شوند، بنابراین در این نوع تخلخل، در همان طول موج‌ها و قله‌های Si هیچ انتقال بین نواری نداریم. همچنین قله مربوط به ۳۶۷ nm بیانگر انتقال‌های مستقیم در سیلیکان است [۶]، لذا این دو قله در طیف R مربوط به نمونه‌های سیلیکان متخلخل مشاهده نمی‌شود. بر اساس شکل ۵، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که از بین رفتن این دو قله در نمونه‌ها دلیلی بر تشکیل ساختار سیلیکان متخلخل می‌باشد. از طرف دیگر از آنجایی که حامل‌های بار در سیم‌های کوانتومی محدودتر می‌شوند، فقدان قله‌ها در طیف R نمونه‌های PS در طول موج‌های ۳۶۷ nm و ۲۷۵ nm، به دلیل محدود شدن حامل‌های بار در سیم‌های کوانتومی است که توسط مدل محدودیت کوانتومی قابل توجیه است [۶ و ۷].

در PS نوع n بر خلاف نوع p این قله‌ها از بین نمی‌روند و تنها با بازتاب کمتری مشاهده می‌شوند [۸]. قله‌ها به سمت طول موج‌های بزرگتر جابجا می‌شوند و این امر به معنای کاهش انرژی انتقال بین نواری و از دست دادن نوارهای بالایی در نوار رسانش است، به نظر می‌رسد که تخلخل در این حالت نوارهای انرژی بالاتر را از دست داده است. وجود یا عدم وجود قله‌های مربوط به انتقال بین نواری می‌تواند وجه تمایز میان PS نوع p و نوع n باشد.

شکل ۲ اثر مدت زمان خوردگی بر طیف R را نیز نشان می‌دهد. با افزایش زمان خوردگی، بازتابندگی کاهش می‌یابد



شکل ۱. نمودار اختلاف فاز بین دو پرتوی موازی پراکنده شده از دو نقطه مختلف، پراکنده شده از سطح ناهموار.

منجر به هیچ سهمی از انرژی پراکنده شده در جهت آینه‌ای نمی‌شود. معیار رایلی تعیین می‌کند اگر $\Delta\varphi < \pi/2$ پس سطح هموار بوده، و در غیر این صورت زیر است. اگر با این محدودیت از معادله (۲) در سراسر سطح میانگین بگیریم، Δh با انحراف از سطح هموار σ جابجا می‌شود و حد بحرانی رایلی در مورد سطوح ناهموار عبارت خواهد بود از: $Ra < \pi/4$ [۲].

$$Ra = k\sigma \cos\theta_1 \quad (3)$$

که در آن σ زبری سطح می‌باشد و به صورت $\sigma = [\langle h^2 \rangle - \langle h \rangle^2]^{1/2}$ برای سطوح ناهموار تصادفی است. (ب) یکی از نظریه‌های شناخته شده در زمینه بررسی زبری سطح، نظریه دیویس-بنت می‌باشد. لروندل و همکارانش این نظریه را جهت بررسی زبری سطح سیلیکان متخلخل به کار گرفتند. دیویس-بنت [۵] با این شرط که طول موج نور تابشی از ابعاد ناهمواری‌های سطح بسیار بزرگتر باشد، رابطه بین انعکاس و ناهمواری را از روابط آماری انعکاس تابش امواج الکترومغناطیس بدست آورد

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos\theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4)$$

در این رابطه R انعکاس از سطح زبر، R_0 انعکاس از سطح صاف همان ماده است. σ جذر میانگین مربعی ارتفاع است:

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi \cos\theta} \left[\ln \left(\frac{R_0}{R} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

جدول ۱. ابعاد ذرات نمونه‌ها PS۱، PS۲، PS۳ و PS۴ حاصل از تصاویر SEM.

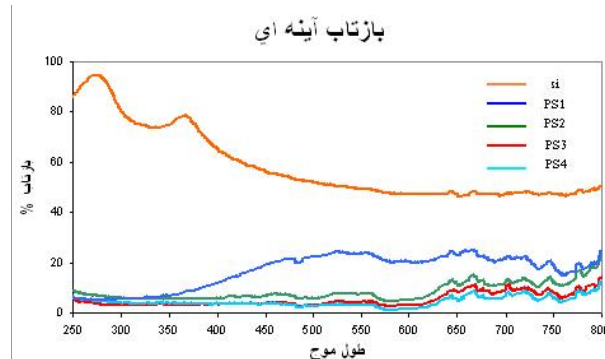
نمونه	مدت زمان خوردگی (دقیقه)	ابعاد ذرات (nm)
PS۱	۲	۷۸
PS۲	۶	۵۱
PS۳	۱۰	۳۷
PS۴	۱۴	۱۵

PS در قسمت‌های دیگر طیف، نیز مشابه هستند، و تفاوت تنها در شدت R است. بنابراین ساختار نمونه‌های PS تغییر نکرده است و این کاهش شدت R، اثر افزایش زمان خوردگی را نشان می‌دهد. این رفتار طیف بازتاب (R) مشابه رفتار شدت فوتولومینسانس (PL) نمونه‌هایی است که در محلول الکترولیت با غلظت یکسانی در مرجع ۱۱ ساخته شده‌اند.

با مقایسه طیف بازتاب بین نمونه‌های PS و Si، بازتابندگی در هر دو محدوده فرابنفش و مرئی، با کاهش شدت همراه است. در نمونه PS۱ در ناحیه مرئی بازتاب بیشتری نسبت به محدوده فرابنفش دیده می‌شود. در حالی که برای نمونه‌های با مدت زمان خوردگی بیشتر، یعنی PS۲، PS۳ و PS۴، بازتاب در ناحیه مرئی افت کرده و پس از آن دوباره افزایش می‌یابد. بنابراین عمده اختلاف PS و Si در طول موج‌های کوچکتر (ناحیه فرابنفش و مرئی تا ۶۵۰ nm) است.

به منظور بررسی رابطه ابعاد ذرات با طیف R نمونه‌ها، تصاویر SEM از آنها تهیه شد. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ابعاد ذرات در تمام نمونه‌ها در بازه ۷۸ nm - ۱۵ nm هستند و با افزایش زمان خوردگی، ابعاد ذرات کاهش می‌یابند. این ابعاد در جدول ۱ ارایه شده است.

با توجه به شکل ۲، شدت بازتاب نمونه‌های PS۱ و PS۲ که ابعاد ذرات، به ترتیب ۷۸ nm و ۵۱ nm هستند، بیشتر از ۱۰ درصد است، در حالی که ابعاد ذرات نمونه‌های PS۳ و PS۴ که به ترتیب ۳۷ nm و ۱۵ nm است، شدت بازتابشان کمتر از ۵ درصد است. بنابراین با کاهش ابعاد ذرات، شدت بازتاب نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد.



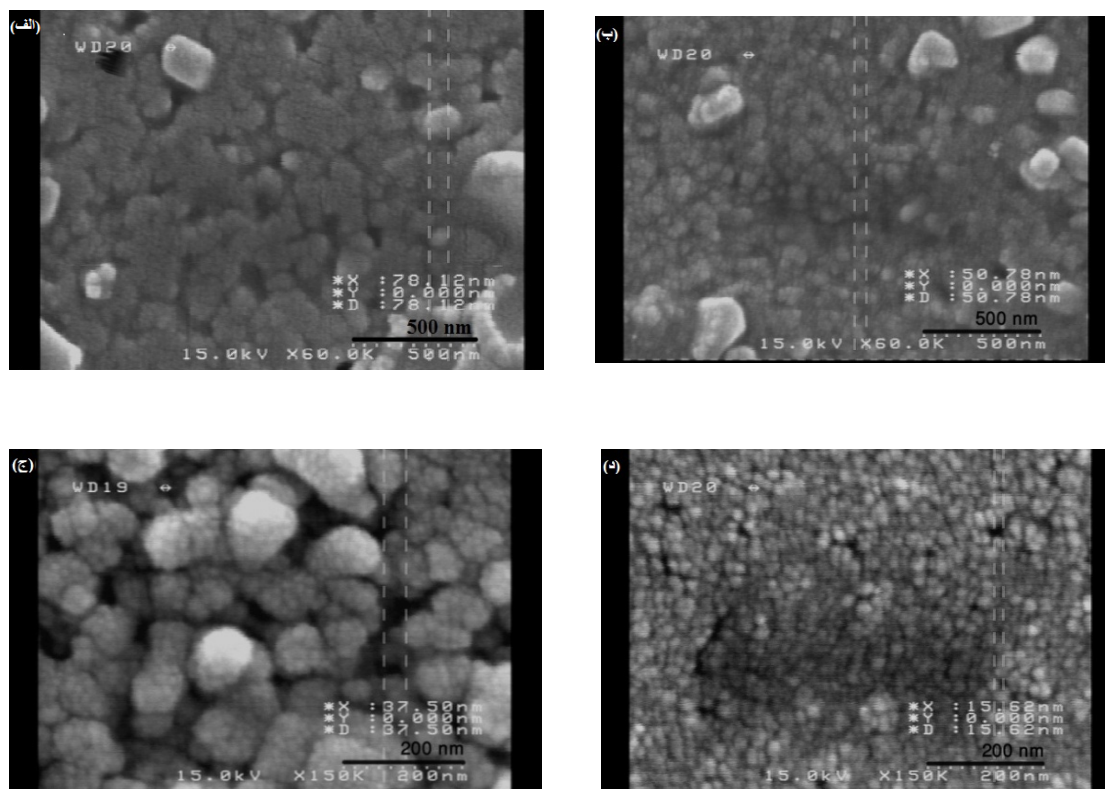
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف بازتاب برحسب طول موج برای سیلیکان و نمونه‌های PS۱، PS۲، PS۳ و PS۴.

که این کاهش بازتاب آینه‌ای، نتیجه افزایش پراکندگی، راس‌های غیر از راس‌های آینه‌ای است [۹ و ۱۰]، که به علت وجود زبری‌های موجود در سیلیکان متخلخل رخ داده است. در طول موج‌های بلندتر منحنی‌های R به یک مقدار ثابت میل می‌کنند و این بدان معناست که PS و Si در این ناحیه، رفتاری مشابه دارند.

گاف انرژی در PS نسبت به Si افزایش می‌یابد. گاف انرژی در Si حدود ۱٫۲ eV است. در مقالات گاف انرژی PS در محدوده ۲٫۲ eV - ۱٫۹ eV (منطبق بر طول موج‌های ۵۶۵ nm - ۶۵۴ nm) می‌باشد [۱۱]، برای طیف R نمونه‌های PS در ناحیه ۶۵۰ nm - ۵۵۰ nm (بیشترین جذب) دیده می‌شود، که این ناحیه مربوط به گاف انرژی PS می‌باشد. جذب اپتیکی در PS در محدوده ۴۵۰ nm - ۲۵۰ nm بیشتر از Si است، بنابراین نمونه‌های سیلیکان متخلخل یک پاسخ اپتیکی در ناحیه مرئی دارند.

از طرفی ساختارهای نانو موجب جابجایی انتقال آبی در نوار گاف PS در ناحیه مرئی می‌شوند [۹]. این انتقال در ناحیه کمترین بازتاب (ناحیه گاف انرژی) در طیف R نمونه‌های PS که در بالا بحث شد، در توافق است. بنابراین با توجه به طیف R نیز می‌توان این انتقال آبی را در نوار گاف PS نسبت به Si مشاهده نمود.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مکان این ناحیه از طیف R، در تمام نمونه‌های PS تقریباً ثابت مانده و تغییر نکرده است، علاوه بر آن افت و خیزهای طیف R نمونه‌های



شکل ۳. تصاویر SEM: (الف) نمونه PS۱، (ب) نمونه PS۲، (ج) نمونه PS۳، (د) نمونه PS۴. شکل‌های (الف)، (ب) در مقیاس ۵۰۰ نانومتر و (ج)، (د) در مقیاس ۲۰۰ نانومتر می‌باشند.

محلول NaOH ۰٫۳ مولار می‌باشد [۱۲]. جذر میانگین مربعی ارتفاع با استفاده از معادله دیویس-بنت به‌دست آمده است. از آنجایی که نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش از نوع p بودند، جذر میانگین مربعی ارتفاع در محدوده ۱۸ تا ۶۴ نانومتر بدست آمد. با توجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می‌شود با افزایش زمان خوردگی، جذر میانگین مربعی ارتفاع افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که جذر میانگین مربعی ارتفاع برای تمام نمونه‌ها، در طول موج‌های بزرگتر (کوچکتر) مقادیر کوچکتری (بزرگتری) دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که با مقیاس مشاهده (طول موج) بزرگتر سطح زبری کمتری از خود نشان می‌دهد.

اثر میزان خوردگی %P بر میزان انعکاس از سطح نمونه‌ها نیز در طول موج‌های ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ نانومتر بررسی شد. این رفتار در هر سه طول موج مشابه می‌باشد و برای نمونه در طول موج ۵۰۰ nm در شکل ۴ آورده شده است. در واقع با

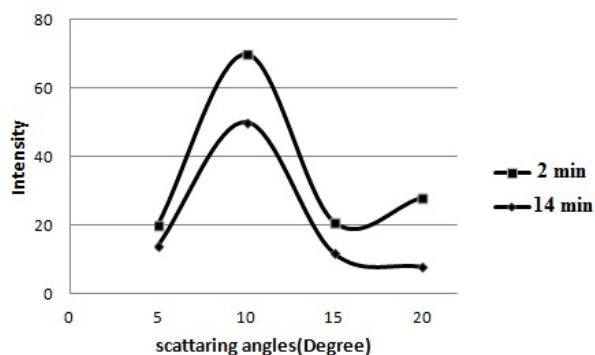
جدول ۲. ارتفاع منافذ σ_1 ، σ_2 و σ_3 به ترتیب در طول موج‌های ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ نانومتر.

مدت زمان خوردگی (دقیقه)	σ_1 $\lambda = 500$ nm	σ_2 $\lambda = 700$ nm	σ_3 $\lambda = 800$ nm	درصد تخلخل (P%)
PS۱: ۲	۴۲	۳۳	۱۸	۶۰
PS۲: ۶	۴۶	۴۳	۳۰	۶۸
PS۳: ۱۰	۵۶	۴۹	۴۲	۷۲
PS۴: ۱۴	۶۴	۵۰	۴۵	۷۸

در جدول ۲ درصد تخلخل نمونه‌ها و جذر میانگین مربعی ارتفاع، ارایه شده است. درصد تخلخل نمونه‌ها توسط روش وزن سنجی [۱۲] به صورت زیر تعیین شد:

$$p = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \quad (۶)$$

که در آن، m_1 جرم سیلیکان قبل از تخلخل، m_2 جرم سیلیکان بعد از تخلخل و m_3 جرم آن بعد از حل کردن لایه متخلخل در

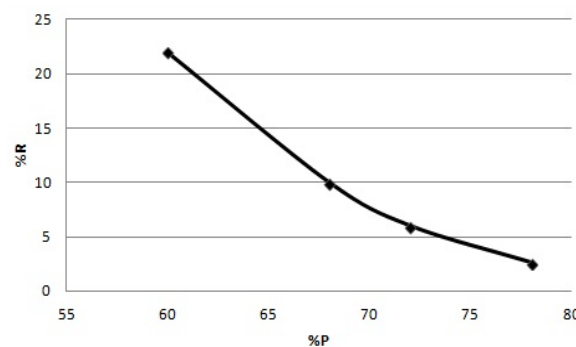


شکل ۵. نمودار شدت پراکندگی برحسب زاویه‌های پراکندگی برای دو نمونه با زمان ساخت ۲ و ۱۴ دقیقه در طول موج ۴۵۰ nm در زاویه فرودی ۱۰°.

همان طور که مشاهده می‌شود، اختلاف فاز در این حالت برای نمونه با زمان ساخت بزرگتر (۱۴ دقیقه)، در حدود π است. این مطلب بیانگر آن است که حتی در حالت پراکندگی آینه‌ای، سهم انرژی پراکنده شده به دلیل افزایش اختلاف فاز، کم شده است. در شکل ۵ می‌توان این نتیجه را به وضوح مشاهده کرد. به عبارت بهتر، بخش همدوس (شدت بازتاب) امواج پراکنده شده برای این نمونه کاهش یافته و بخش پراشیده (شدت پراکندگی) افزایش یافته است، در نتیجه شدت پراکندگی نسبت به نمونه با زمان ساخت کوچکتر (۲ دقیقه)، کمتر است.

از طرف دیگر با مقایسه میزان زبری، σ ، از جدول ۲، $\sigma_{14\text{min}} > \sigma_{2\text{min}}$ ، برای تمام طول موج‌های محاسبه شده، می‌توان پی برد که سطح PS۲ نسبت به سطح PS۴ هموارتر است.

شکل ۶، میزان شدت پراکندگی بر حسب زوایای پراکندگی برای ۳ طول موج ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ نانومتر را برای یک نمونه با زمان ساخت ۱۴ دقیقه، با زاویه فرودی ۱۰° نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، برای یک نمونه، با افزایش طول موج، شدت پراکندگی افزایش می‌یابد، که در مطابقت با معادله دیویس-بنت و مرجع [۱۵] قرار دارد. در واقع شکل ۶ بیانگر این مطلب است که با وجود ثابت بودن نمونه، شدت پراکندگی از سطح نمونه PS۴ در طول موج‌های مختلف، یکسان نیست و با تغییر طول موج، تغییر می‌کند. به عبارت دیگر شدت



شکل ۴. نمودار میزان انعکاس آینه‌ای %R بر حسب درصد تخلخل %P در طول موج ۵۰۰ nm.

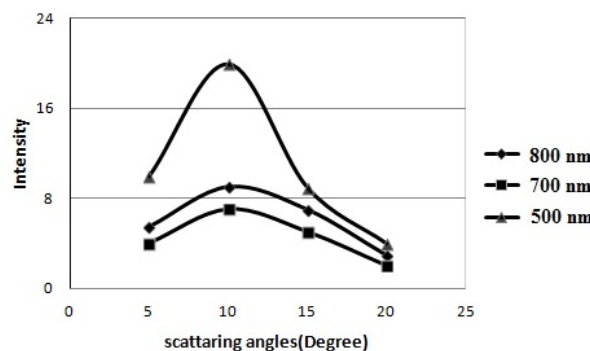
افزایش میزان خوردگی، ابعاد ذرات کاهش و اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین بیشترین سهم نور فرودی جذب شده و بخش کمتری از آن بازتاب می‌یابد. طیف پراکندگی از نمونه‌ها در زوایای فرودی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نیز برای دو نمونه با زمان‌های خوردگی ۲ و ۱۴ دقیقه، در طول موج‌های ۴۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شدند. این رفتار در هر سه طول موج مشابه می‌باشند و برای نمونه در طول موج ۴۵۰ nm با زاویه فرودی ۱۰° درجه، در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۵ با افزایش زاویه پراکندگی، کاهش در شدت نور پراکنده شده، مشاهده می‌شود، و تنها یک قله در حالت بازتاب آینه‌ای، یعنی زاویه پراکندگی ۱۰° مشاهده می‌شود، که این در توافق با مقالات [۶ و ۹] و معیار رایلی است.

از آنجایی که با افزایش مدت زمان خوردگی، زبری سطح افزایش می‌یابد، بنابراین سهم شدت بازتاب (شدت همدوس) کاهش یافته و سهم شدت پراکندگی (شدت نشری) افزایش می‌یابد. در نتیجه همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان خوردگی، شدت پراکندگی کاهش و پهنای قله افزایش می‌یابد. افزایش پهنای قله به معنای افزایش شدت پراکندگی در زاویه‌های غیر آینه‌ای (شدت نشری) است.

با استفاده از معیار رایلی $R_a < \pi/4$ اختلاف فاز را برای حالت پراکندگی آینه‌ای و مقایسه میان ناهم‌واری بین دو نمونه با زمان ساخت در طول موج ۵۰۰ nm، در زاویه ۱۰° درجه بدست آوردیم:

$$R_{a7\text{min}} = 0.3, \quad R_{a14\text{min}} = 0.9$$

نوار گاف PS مشاهده نمود، علاوه بر این، مشابه رفتار PL در PS، مشخص شد که تشابه افت و خیز نمونه‌ها و ثابت ماندن ناحیه گاف انرژی در طیف R آنها به دلیل ثابت بودن غلظت محلول الکترولیت است. از طرف دیگر، با بررسی تصاویر SEM، مشاهده شد که با افزایش زمان خوردگی، ابعاد ذرات کاهش یافته و این امر افزایش قطر حفره‌ها را به دنبال خواهد داشت که موجب کاهش بازتاب می‌شود. با افزایش زمان خوردگی، درصد تخلخل افزایش یافت که این عامل موجب افزایش جذب نور فرودی و کاهش نور پراکنده می‌شود. از طرفی میزان شدت نور پراکنده شده با افزایش (کاهش) مقیاس مشاهده (طول موج) می‌تواند افزایش (کاهش) یابد. بنابراین رابطه میان شدت نور پراکنده شده و میزان خوردگی (درصد تخلخل) با تغییر مقیاس مشاهده (طول موج) قابل تغییر است. شدت پراکندگی از سطح یک نمونه، با افزایش (کاهش) مقیاس مشاهده (طول موج)، افزایش (کاهش) می‌یابد. بنابراین یک سطح با ریخت شناسی ثابت، رفتارهای متفاوتی (تغییر شدت پراکندگی در شکل ۵) نشان می‌دهد. با توجه به این که این روش نسبت به روش‌های موجود، جهت بررسی ریخت شناسی سطح، روش ارزانه‌تری است و به سطح نمونه آسیب نمی‌رساند، انتظار می‌رود که با ادامه این تحقیق بتوان اطلاعات کامل‌تری از ریخت شناسی سطح بدست آورد.



شکل ۶. نمودار شدت پراکندگی برحسب زاویه‌های پراکندگی برای نمونه با زمان ساخت ۱۴ دقیقه، در طول موج‌های ۸۰۰، ۷۰۰، ۵۰۰ نانومتر.

پراکندگی به طول موج برخوردی به عنوان مقیاس مشاهده بستگی دارد. تفاوت بارز میان شدت‌های مشاهده شده در طول موج ۸۰۰ نانومتر در مقایسه با طول موج‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ نانومتر را می‌توان به نزدیکی دو طول موج اخیر به ناحیه گاف انرژی نسبت داد.

به این ترتیب که طول موج‌های بزرگتر، ناهمواری‌های کوچک سطح را نمی‌بیند، در نتیجه امواج پراکنده شده از سطح، با اختلاف فاز کمتری نسبت به موج فرودی، پراکنده می‌شود و سهم انرژی پراکنده شده، طبق معیار راییلی، افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در این کار با استفاده از طیف R نیز می‌توان انتقال آبی را در

مراجع

1. S Motamen, M Vahabi, and G R Jafari, *Int. Journal of Modern Physics C* **23** (2012) 10.
2. J A Ogilvy, "Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces", Taylor & Francis (1991).
3. M Paillet, P Poncharal, and A Zahab, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 186801.
4. L T Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57** (1990) 333.
5. H E Bennet and J O Porteus, *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 2 (1960) 123.
6. A Mortezaali, R S Dariani, S Asghari, and Z Bayindir, *Applied Optics* **46** (2007) 495.
7. L Vina, S Logothetidis, and M Cardona, *Phys. Rev. B* **30** (1984) 1979.
8. S D Milani, R S Dariani, A Mortezaali, V Daadmehr, and K Robee, *J Optoelectronics and*
9. G R Jafari, P Kaghazchi, R S Dariani, A Iraji Zad, S M Mahdavi, M R Rahimi Tabar, and N Taghavinia, *Journal of Statistical Mechanics* **2005** (2005) P04013.
10. S K Srivastava, D Kumar, P K Singh, M Kar, V Kumar, and M Husain, *Solar Energy Material & Solar Cells* **94**, 9 (2010) 1506.
11. J Dian, A Macek, D Niznansky, I Nemec, V Vrkoslav, T Chvojka, and I Jelinek, *Applied Surface Science* **238** (2004) 169.
12. Z Fekih, F Z Otmani, N Ghellai, and N E Chabanne-Sari, *Moroccan Journal of Condensed Matter* **7**, 1 (2006) 35.

Advanced Materials **8** (2006) 1216.

