

بررسی خواص پراکندگی سیلیکان متخلخل

رضا ثابت داریانی، عبدالله مرتضی علی و حکیمه نورانی

گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا (س)

(دریافت مقاله: ۷۸/۱۲/۶ · دریافت نسخه نهایی: ۷۹/۵/۱)

چکیده

سیلیکان متخلخل (PS) بر اثر آندیزاسیون الکتروشیمیایی روی ویفر سیلیکان به وجود می‌آید. تاکنون تحقیقات فراوانی درباره چگونگی تشکیل این ماده و خواص نوری آن به ویژه فوتولومینسانس (PL) انجام شده، اما هنوز سازوکار دقیق آنها شناخته نشده است. در این مقاله ابتدا نظریه پراکندگی نور از سطوح ناهموار تصادفی و سپس انعکاس و پراکندگی، جذب و عبور نور از PS بررسی می‌شود و سرانجام کارهای عملی انجام شده بر روی نمونه‌هایی که ساخته‌ایم و مقایسه آنها با نظریه پراکندگی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انعکاس، پراکندگی، سیلیکان متخلخل، سطح ناهموار.

۱. مقدمه

سیلیکان در صنعت الکترونیک و نیمه‌رسانا نقش اساسی دارد. برتری آن نسبت به سایر نیمه‌رساناها مربوط به ماهیت ممتاز خواص عملیاتی و فناوری بنیادی و عظیمی است که حول و حوش آن گسترش یافته است. نیمه‌رساناهای دیگر نمی‌توانند به عنوان ماده برگزیده در کاربردهای الکترونیکی جانشین سیلیکان شوند. با وجود این کارایی گسیل نوری این ماده پایین است و به همین دلیل کاربرد اپتوالکترونیکی چندانی ندارد.

اوهرل [۱] در سال ۱۹۵۶ سیلیکان متخلخل را در ضمن مطالعه روشهای الکتروشیمیایی برای جلا دادن سیلیکان کشف کرد. در سال ۱۹۹۰ کنهم [۲] گزارش داد که لایه‌های سیلیکان متخلخل ساخته شده روی سطح ویفر سیلیکان در دمای اتاق فوتولومینسانس مریی دارند. گزارش کنهم که نوید ایجاد فناوری اپتوالکترونیکی بر پایه ماده سیلیکان را می‌داد، باعث شروع تحقیقات گسترده‌ای در این مورد شد [۳].

۲. نظریه پراکندگی از سطوح ناهموار

نظریه انعکاس و پراکندگی از سطوح ناهموار در اغلب کتابهای اپتیک مورد بررسی قرار گرفته است. سیلیکان متخلخل دارای سطح ناهموار میکروسکوپی و یا ابعاد کوانتومی می‌باشد. لذا لازم است در ابتدا مدل نظریه پراکندگی از سطوح ناهموار بررسی شود. چون نمی‌توان ابعاد و شکل هندسی یکنواختی از ناهمواریهای سیلیکان متخلخل را پیش‌بینی کرد بدین ترتیب از مدلی که براساس فرایندهای تصادفی تبعیت می‌کند، استفاده می‌شود. اغلب سطوح ناهموار، به ویژه سطوحی که با فرایند کنترل شده‌ای به وجود نیامده‌اند طبیعتی تصادفی دارند و نمی‌توان پروفیل (برش عمودی) هر قسمت را با کمک اطلاعات مربوط به پروفیل بخشهای مجاور آن پیش‌بینی کرد. بنابراین در چنین سطوحی فرایندهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند.

دیویس [۴] مطلب گفته شده را برای اولین بار در مورد

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

که θ زاویه فرودی نسبت به سطح هموار است. به طور کلی پراکندگی از PS به دو عامل ضخامت لایه و میزان ناخالصی زیر لایه می‌تواند بستگی داشته باشد [۷]. پدیده‌های جذب و عبور بسیار کمتر از پدیده PL بررسی شده است که دلیل آن می‌تواند دشواری محاسبه ضریب شکست مختلط PS باشد. از آزمایشهای PL، رابطه‌ای بین طول موج قله پاسخ نوری و ابعاد ریزدانه PS به دست نیامده است در حالی که رابطه قوی معکوس بین لبه جذب اپتیکی و ابعاد وجود دارد [۸ و ۹] که با پیشگوییهای نظری درباره شکاف اپتیکی در نقطه‌های کوانتومی^۱ هماهنگی دارد و شاهد مستقیمی بر وجود اثرات محدودیت کوانتومی^۲ در PS است. همچنین با آزمایشهای عبور که حساسیت کمی نسبت به خواص سطح و میزان ناخالصی ماده دارند، می‌توان مقادیر کمی لبه جذب را اندازه‌گیری کرد که مستقیماً ساختار ذاتی PS را مشخص می‌کند.

در منحنی عبور T ضریب عبور لایه PS می‌باشد و مقدار عبور در قسمت مسطح (هموار) T_۰ است که با معلوم بودن ضخامت لایه d می‌توان از رابطه زیر α را به دست آورد [۱۵].

$$T = T_0 \exp [-\alpha d(1-p)] \quad (3)$$

که در آن p درصد تخلخل است. با معلوم بودن α می‌توان منحنی مربوط به جذب را رسم کرد. بین ضریب جذب، انعکاس و عبور مطلق رابطه زیر برقرار است [۱۸]

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (4)$$

که در آن T عبور اندازه‌گیری شده، d ضخامت لایه و R انعکاس می‌باشد.

روشهای دیگری نیز برای محاسبه جذب اپتیکی وجود دارند نظیر روش طیف سنجی فوتوآکوستیکی (PA) و طیف سنجی برانگیختگی در فوتولومینسانس (PLE).

۳. روش آزمایش

برای ساختن سیلیکان متخلخل از یک قطعه سیلیکان نوع p با

پراکندگی امواج رادار از سطوح ناهموار آب بررسی کرد. بنت [۵] با این شرط که طول موج نور تابشی از ابعاد ناهمواریهای سطح بسیار بزرگتر باشد، آن را برای ناحیه اپتیکی به کار برد و رابطه بین انعکاس و ناهمواری را از روابط آماری انعکاس تابش امواج الکترومغناطیسی از سطح ناهموار به دست آورد. ناهمواری مؤثر در مقایسه با طول موج کوتاه فرض می‌شود و خواص آماری سطح نیز نسبت به مکان در سرتاسر سطح پایاست. اگر پرتو فرودی عمودی باشد می‌توان از عبارت دیویس برای مؤلفه انعکاس آینه‌ای رسانای کامل استفاده کرده این عبارت متناسب با $\exp \left[-\frac{(\pi \sigma)^2}{\lambda^2} \right]$ است، که در آن σ انحراف ریشه میانگین مربعی ارتفاع از وضعیت هموار $\left(\sigma = \sqrt{\langle h^2 \rangle} \right)$ و λ طول موج نور فرودی است [۴]. بنت [۵] نظریه دیویس را در مورد انعکاس آینه‌ای فرود عمودی از سطوح فلز واقعی به شکل زیر اصلاح کرد:

$$R = R_0 \exp \left[-\frac{(\pi \sigma)^2}{\lambda^2} \right] \quad (1)$$

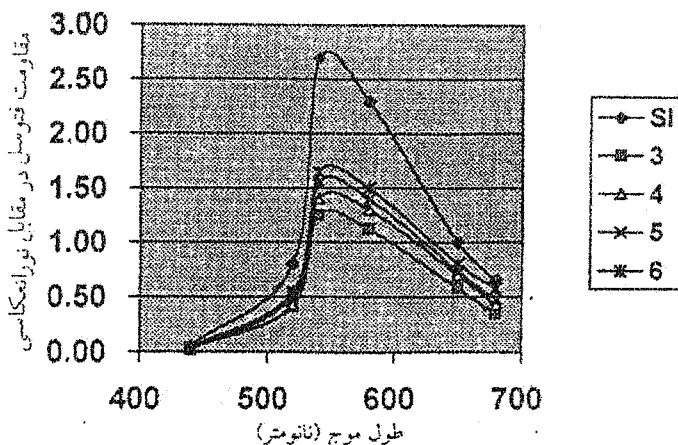
که در آن R انعکاس آینه‌ای از سطح ناهموار و R_۰ انعکاس آینه‌ای از سطح صافه همان ماده است.

رابطه فوق نشان می‌دهد با افزایش طول موج λ با σ ثابت، ناهمواریهای سطح نقش کمتری پیدا می‌کند و نسبت $\frac{R}{R_0}$ به سمت یک میل می‌کند. سطح تختی با برجستگیهای بسیار ریز و جهت گیریهای متفاوت را در نظر می‌گیریم. اگر ابعاد برجستگیها در مقایسه با طول موج نور به اندازه کافی بزرگ باشد، انعکاس سطح به کمک اپتیک هندسی بررسی می‌شود. هنگامی که طول موج بزرگتر می‌شود، اثرات پراش مهم می‌شوند و انعکاس تابعی از اندازه و شکل هندسی آنها می‌شود. هنگامی که طول موج باز هم بزرگتر می‌شود به گونه‌ای که ابعاد برجستگیها در مقایسه با طول موج کوچکتر می‌شوند، انعکاس از سطح تقریباً به طور کامل به کمک اثرات پراش تعیین می‌شود. آن وقت ناهمواری سطح تنها عامل مهم خواهد بود [۵].

حال می‌توان سطح PS را به صورت توزیع گوسی و همسانگرد بی‌نظمیها بیان کرد و با فرض اینکه تابش مایل بوده و طول موج فرودی λ در مقایسه با σ بزرگ باشد، بین ضریب انعکاس آینه‌ای و خواص آماری سطح ناهموار رابطه زیر برقرار است [۶]:

1. Quantum dots

2. Quantum Confinement effect



شکل ۱. تغییرات مقاومت فتوسل در مقابل نور انعکاسی برحسب طول موج فرودی برای یک نمونه Si و نمونه‌های از ۳ تا ۶ PS چگالی جریان این نمونه‌ها به ترتیب ۱، ۱۷، ۱۸ و $50 \frac{mA}{cm^2}$ ، با زمان آندیزاسیون یکسان بود.

از این شکل دو نتیجه کلی زیر به دست می‌آید: شدت جریان مربوط به انعکاس و پراکندگی از تمام نمونه‌های متخلخل و در تمام طول موجها از سیلیکان کمتر است که می‌تواند نشان دهنده آن باشد که سطح PS بر اثر تخلخل ناهموارتر شده و بر اثر پراکندگی شدت انعکاس آینه‌ای آن بیشتر شده است. نتیجه دیگر اینکه با افزایش چگالی جریان الکتریکی در حین ساخت، شدت انعکاس و پراکندگی از PS از نمونه ۳ تا ۶ نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تحت زوایای ۳۰ تا ۸۰ درجه نیز مشاهده شده است.

برای به دست آوردن تغییرات واقعی انعکاس نمونه‌ها، باید در یک طول موج معین بستگی شدت نسبی انعکاس از نمونه‌ها به شدت نور لامپ جیوه به ازاء طول موجهای مختلف به دست آید. در شکل (۲) این نسبتها برای نمونه‌ای از PS در زاویه ۵۰ درجه به دست آمده است. نحوه تغییرات این منحنی با کارهای انجام شده قبلی [۶، ۱۱ و ۱۲] توافق خوبی دارد.

ب. تغییرات نسبی انعکاس برحسب طول موج

برای محاسبه تغییرات نسبی انعکاس برحسب طول موج، R شدت انعکاس از نمونه متخلخل و R شدت انعکاس از Si را در نظر گرفتیم. شدت جریان ناشی از انعکاس را برای چند نمونه PS و همچنین Si در زوایای فرودی مختلف (از ۱۰ تا ۸۰ درجه) به دست آوردیم. نسبت شدت انعکاس هر نمونه PS به Si را با $\frac{R}{R_0}$ نشان می‌دهیم. این تغییرات را برحسب $\frac{R}{R_0}$

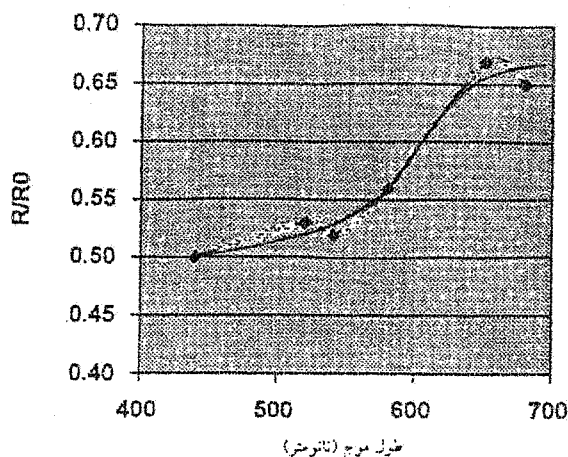
مقاومت ویژه $2/6 - 1/4 \Omega\text{-cm}$ با جهت رشد (۱۰۰) استفاده کردیم. پس از ایجاد اتصال اهمی در یک طرف قطعه، آن را در محلول با ترکیب HF (۴۰٪) و اتانل که نسبت حجم آنها (۱:۱) باشد در مداری قرار دادیم که جریان در حدود $20 \frac{mA}{cm^2}$ به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه، از آن بگذرد. در اثر این فرایند لایه‌ای از یک شبکه خیلی باریک از حفره‌ها به شعاع متوسط $4/4 \text{ nm}$ و به ضخامت $2 \mu\text{m}$ بر روی قطعه سیلیکان تشکیل می‌گردد [۱۰].

یکی از روشهای آزمایش تخلخل مشاهده PL در معرض تابش UV است [۱۰]. طول موج گسیل همه نمونه‌ها در ناحیه قرمز-نارنجی شامل رنگهای قرمز تیره، نارنجی، صورتی و ارغوانی در محدوده‌های (۶۰۰ nm الی ۷۰۰ nm) بود در حالی که با انجام این آزمایش، بر روی بلوک Si خاصیت نوری فوق مشاهده نمی‌شود. نکته قابل توجه در منحنیهای PL به ویژه از نظر مدل محدودیت کوانتومی [۲، ۸ و ۱۹] انتقال به آبی و تغییرات شدت قله PL نمونه‌های مختلف است. پس از ساخت نمونه‌های PS و تایید آنها به وسیله آزمایش PL، آزمایشهای زیر انجام و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفتند.

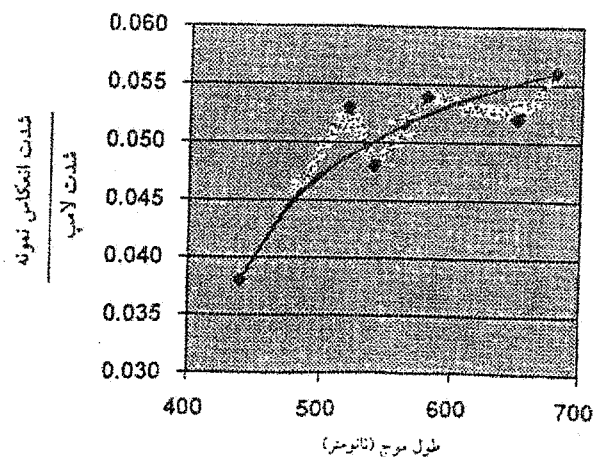
۴. تفسیر نتایج

الف. بررسی رابطه انعکاس از PS و طول موج مرئی

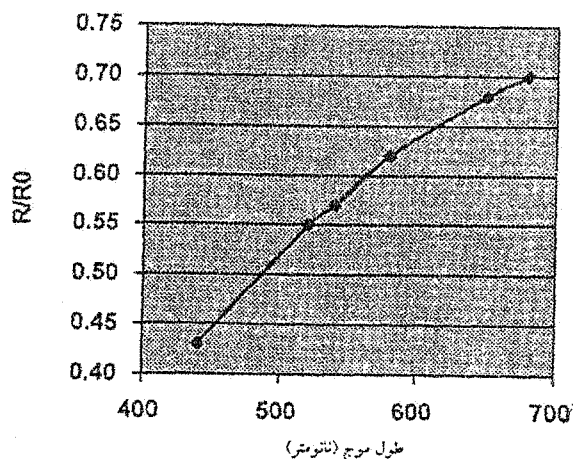
برای مقایسه شدت انعکاس Si و نمونه‌های PS، پرتو فرودی را با ۸ زاویه متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه به Si و نمونه‌های PS تابانندیم و در هر زاویه و برای هر نمونه از فیلترهای رنگی عبور دادیم. فیلترهای رنگی از محدوده ۴۰۰ nm تا ۷۰۰ nm با پهنای باند عبوری ۴۰ nm متعلق به شرکت Leybold بودند. زاویه بین آشکارساز و خط عمود را نیز تقریباً برابر با زاویه فرودی قرار دادیم. پرتوهای نور پس از انعکاس از نمونه‌ها به آشکارساز برخورد کرده و پاسخ جریان آنها توسط آمپرسنج مشخص می‌شود. ولتاژ منبع تغذیه برای نمونه‌های ۳ تا ۶، $0/75 \text{ V}$ و ولت می‌باشد. زمان آندیزاسیون تمام این نمونه‌ها ۱۰ دقیقه و چگالی جریان آنها به ترتیب ۱، ۱۷، ۱۸ و $50 \frac{mA}{cm^2}$ بود. در شکل (۱) تغییرات برای نمونه‌های PS (از شماره ۳ تا ۶) و Si در یکی از زوایای فرودی دیده می‌شود. زاویه فرودی برای نمونه‌های PS و Si هر دو ۱۰ درجه انتخاب شده بود. این تغییرات برای تمام زوایای فرودی شبیه شکل (۱) است. در این شکل در هر طول موج معین بدون در نظر گرفتن حساسیت آشکارساز یا شدت لامپ جیوه در آن طول موج، انعکاس نمونه‌های مختلف PS مقایسه شده است.



شکل ۳. $\frac{R}{R_0}$ نسبت انعکاس سیلیکان متخلخل به سیلیکان برحسب طول موج فرودی.



شکل ۲. انعکاس نوعی $\frac{R}{R_0}$ برحسب طول موج فرودی نمونه PS.



شکل ۴. $\frac{R}{R_0}$ برحسب طول موج بر مبنای مدل نظری دیویس - بنت (معادله (۲)).

داشتیم (۲۰ درجه) و زاویه آشکارساز نسبت به پرتو فرودی را از ۱۰ درجه تا ۹۰ درجه تغییر دادیم که این خود شدت پراکندگی را تعیین می‌کند (شکل ۵). همان طور که دیده می‌شود انعکاس غیرآینه‌ای از سیلیکان صیقلی تقریباً در همه زوایای پراکندگی صفر است. به طوری که آمپرسنج در این زوایا جریان تاریک آشکارساز را نشان می‌دهد. بیشترین میزان انعکاس از Si، ۱۰۰ فرض شده که در شکل نشان داده نشده و بقیه مقادیر نسبت به آن سنجیده شده است. در بازتابش آینه‌ای به طور ناگهانی شدت جریان انعکاس افزایش زیادی پیدا می‌کند و هنگامی که از این زاویه بازتابش آینه‌ای کمی دورتر می‌شویم، انعکاس مجدداً صفر می‌شود.

نمونه‌های فوق رسم کرده و آن را با منحنی لرندل [۶] مقایسه کردیم. در منحنی فوق زاویه تابش فرودی مشخص نشده است ولی داده‌های آزمایشهای ما در مورد نمونه‌هایی که به طور نسبتاً صحیح متخلخل شده بودند. در زاویه فرود ۲۰ درجه از نظر کیفی به منحنی شکل مرجع [۶] شباهت بیشتری داشت. در شکل (۳) مقادیر نسبت فوق برحسب طول موج، برای نمونه‌های PS رسم شده است. با توجه به شکل موجود در مرجع [۶] مشاهده می‌شود که این نسبت همواره کوچکتر از عدد ۱ است.

برای بررسی صحت نتیجه‌گیریهای فوق در مورد زاویه تابش ۲۰ درجه، رابطه (۲) به کمک برنامه‌ای کامپیوتری حل شد. در این برنامه طبق داده‌های مرجع [۶]، $\sigma = 50 \text{ nm}$ و λ را در گستره ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر در نظر گرفتیم. داده‌های این برنامه به ازای زاویه فرود ۲۰ درجه بیشترین تطابق را با منحنی مرجع [۶] دارد.

با داشتن رابطه (۲) و با استفاده از λ و $\frac{R}{R_0}$ به دست آمده از آزمایشهای خودمان σ را در مورد نمونه PS در زاویه فرودی ۲۰ درجه حساب کردیم و میانگین σ ، $34/4 \text{ nm}$ به دست آمد. میانگین σ را به کمک روش میانگین مربعی نیز به دست آوردیم. این مقدار تقریباً برابر با $34/4 \text{ nm}$ به دست آمد که نزدیک به روش قبلی است به علت آنکه این منحنی نسبت به λ افت و خیز ندارد. رابطه $\frac{R}{R_0}$ نسبت به λ را در شکل (۴) نشان داده‌ایم.

ج. بررسی رابطه پراکندگی با زاویه فرودی

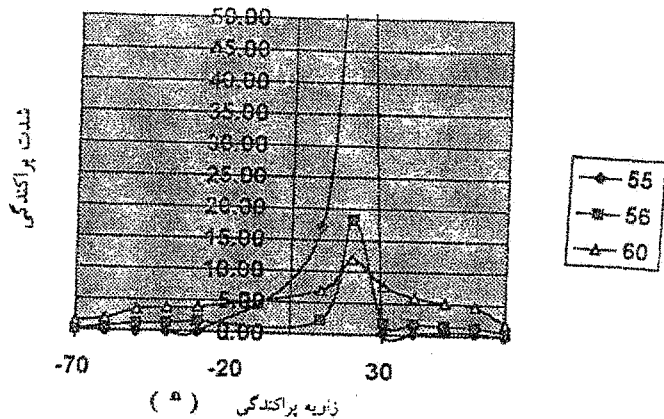
در آزمایش دیگری زاویه فرودی نور نسبت به نمونه را ثابت نگه

اندازه‌گیری شود. شکل (۶) میزان جذب نمونه‌های PS را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها را در محلول سود M ۰/۱ حل کردیم و در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار دادیم (Milton Roy 601). ابتدا محلول سود بدون نمونه را در دستگاه قرار دادیم و دستگاه میزان جذب نمونه‌ها را بر مبنای آن می‌سنجید. در ساخت این نمونه‌ها سه عامل زمان، چگالی جریان و استفاده از اولتراسونیک (معمولاً بهتر است ظرف ساخت نمونه در حین ساخت در داخل دستگاه اولتراسونیک باشد تا حبابهای به وجود آمده بر روی سطح را از بین ببرد) متفاوت‌اند. این تغییرات را به منظور جدا کردن بهتر لایه ایجاد کرده‌ایم. در شکل فوق به ازای چند طول موج در ناحیه مریبی که در آن فوتولومینسانس روی می‌دهد، میزان جذب را پیدا کرده‌ایم. رفتار جذبی کلیه نمونه‌ها مشابه هم هستند. در ناحیه قرمز - نارنجی تغییرات تدریجی است و پس از آن در طول موجهای کوتاهتر، جذب قویاً کاهش می‌یابد. شکل (۷) تغییرات عبور نمونه‌های PS در سود M ۰/۱ برحسب طول موج که به کمک اسپکتروفتومتر (PU8620) به دست آمده را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد در حالی که میزان جذب نمونه‌های PS به سمت انرژیهای کمتر کاهش می‌یابد لیکن عبور آنها به همین ترتیب افزایش می‌یابد. چگالی جریان حین ساخت باعث کوچکتر شدن ساختارهای متخلخل و افزایش شکاف ممنوعه می‌شود.

طبق منحنیهای جذب مراجع [۱۳ و ۱۴] که از لایه‌های سیلیکان متخلخل به دست آمده است با افزایش درصد تخلخل، جذب بنیادی کاهش می‌یابد. افزایش تخلخل باعث کاهش ابعاد نانوبلورها می‌شود بنابراین می‌توان کاهش جذب را به افزایش شکاف ممنوعه و اثر ابعاد کوانتومی نسبت داد. همچنین طبق شکل موجود در مرجع [۱۵] عبور از لایه‌ها با افزایش درصد تخلخل افزایش می‌یابد که آن را می‌توان به شفافتر شدن لایه بر اثر افزایش شکاف نسبت داد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

تاکنون منشا خواص نوری و به ویژه، فوتولومینانسانس سیلیکان متخلخل در قالب مدلهای متفاوتی بررسی شده است. اما هیچ یک از این مدلها نتوانسته‌اند همه جنبه‌های این خواص را توجیه کنند و توافق همگانی درباره این مدلها وجود ندارد. در ساخت نمونه‌ها اتصال اهمی و پوشش آنها در مقابل اسید اهمیت دارد. آزمایشهای انعکاس و پراکندگی باید روی



شکل ۵. پراکندگی از نمونه‌های ۵۵، ۵۶ و ۶۰ PS برحسب زاویه پراکندگی، چگالی جریان این نمونه‌ها به ترتیب ۴۰، ۶۰ و $80 \frac{mA}{cm^2}$ و زمان آندیزاسیون یکسان بود.

نمونه‌های متخلخل که ناهموار می‌باشند در زوایای غیرآینه‌ای هم شدت جریان انعکاس ایجاد می‌کنند و پاسخ انعکاسی آنها پهن است. نمونه‌های مورد آزمایش نمونه‌های شماره ۵۵، ۵۶ و ۶۰ بودند. زمان آندیزاسیون تمام این نمونه‌ها یکسان لیکن دارای چگالی جریان به ترتیب ۴۰، ۶۰ و $80 \frac{mA}{cm^2}$ بودند. در ساخت نمونه ۵۶ چگالی جریان بیشتری نسبت به نمونه ۵۵ به کار رفته و این نمونه بیشتر متخلخل شده و ناهموارتر از نمونه ۵۵ است. همان طور که دیده می‌شود شدت جریان پراکندگی آن در زوایای غیرآینه‌ای بیشتر از نمونه ۵۵ است. یعنی افزایش چگالی جریان حین ساخت باعث ایجاد ساختارهای کوچکتر و بروز خاصیت ناهمواری در سطح شده است.

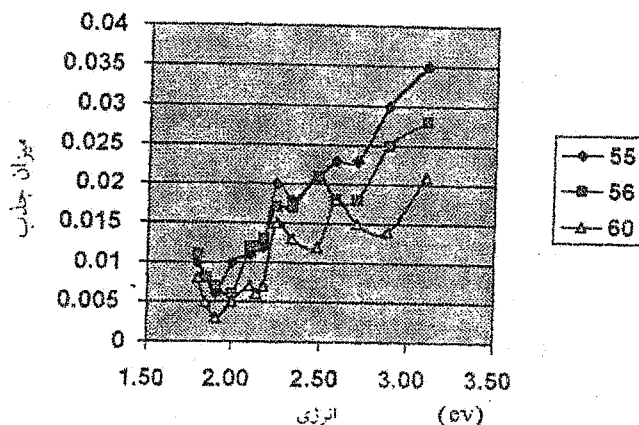
شدت انعکاس آینه‌ای نمونه‌های متخلخل بیشتر از زوایای دیگر است. اما این شدت در مورد نمونه ۵۵ که چگالی جریان حین ساخت آن کمتر بوده، بیشتر از نمونه ۵۶ است که نشان می‌دهد خاصیت آینه‌ای آن بیشتر از نمونه ۵۶ است. این نتایج در توافق با مرجع [۷] می‌باشد.

د. بررسی منحنی جذب و عبور نمونه‌های PS

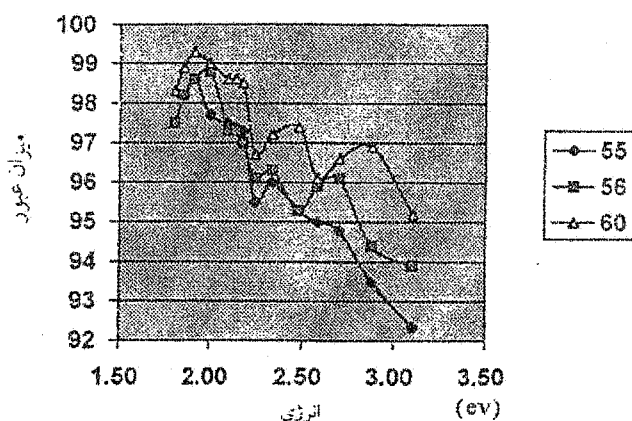
برای تعیین میزان جذب و عبور معمولاً لایه را جدا می‌کنند. از آنجایی که سطح سیلیکان متخلخل ناهموار است رابطه $R+T+A=1$ در مورد آن صدق نمی‌کند (R، T و A به ترتیب انعکاس فرنی، عبور و جذب هستند). بنابراین نمی‌توان از رابطه فوق استفاده کرد و باید جذب و عبور لایه به طور مستقل

نمونه‌های صیقلی متخلخل انجام شوند. پراکندگی سیلیکان صیقلی صفر است. فرایند آندایزاسیون باعث ناهمواری سطح شده و چگالی جریان بیشتر ساختارهای کوچکتر را ایجاد می‌کند. در این شرایط علاوه بر انعکاس آینه‌ای که باز هم بیشترین شدت را دارد، پاسخ زاویه‌ای گسترده‌ای مشاهده می‌شود که هر چه ناهمواری بیشتر باشد شدت این پاسخ بیشتر ولی شدت انعکاس آینه‌ای کمتر است. شدت انعکاس آینه‌ای از نظر نظری از رابطه (۲) تبعیت می‌کند.

تغییرات جذب و عبور نمونه‌های مختلف محلول نسبت به یکدیگر، هر چند ظاهراً شبیه این تغییرات در لایه‌های متخلخل است، اما برای نسبت دادن آن به مدل خاصی باید بررسیهای بیشتری انجام گیرد. انجام آزمایشهایی با ابزارهای دقیق بر روی سیلیکان متخلخل تا حد زیادی به یافتن علل فوتولومینانس و ساختار نواری این ماده کمک می‌کند. همچنین از آنجا که این ماده می‌تواند کاربرد اپتوالکترونیکی داشته باشد، بررسی خواص الکترومولومینانس [۱۶ و ۱۷] و کارایی آن دارای اهمیت بسیاری است. علاوه بر آن می‌توان در کارهای بعدی مقدار جذب را از طریق پاسخ نوری نمونه‌های PS با تخلخل متفاوت نسبت به Si مقایسه و نتیجه آن را با یک نظریه مناسب توجیه کرد.



شکل ۶. میزان جذب نمونه‌های PS.



شکل ۷. میزان عبور نمونه‌های PS.

مراجع

1. A Uhlir, *Bell System Tech. J.* **35**, 333 (1956).
2. L T Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
3. R T Collins, P M Fauchet and M A Tischler, *Phys. Today*, Jan 1997.
4. H Davies, *Proc. Inst. Engers.* **101**, 209 (1954).
5. H E Bennet and J O Porteus, *J. Opt. Soc. Am.* **51** (2) 123 (1061)
6. F Lerondel, P Romestain, *Thin Solid Films* **296**, 114 (1997).
7. G Lerondel et al, *Thin Solid Films* **279**, 80 (1996).
8. D J Lockwood et al., *Solid State Comm.* **89** (7) 587 (1994).
9. Y Kanemitsu et al., *Phys. Rev. B* **48** (4) 2827 (1993).
10. R Sabet-Darjani, D Haneman, A Hoffman, and D D Cohen, *J. Appl. Phys.* **73**, 2321 (1993).
11. C Pickering, M I J Beal, D J Robbins, and R Greef, *J. Phys. C.* **17**, 6535 (1984).
12. S Hibrich et al, *Thin Solid Film* **276**, 231 (1996).
13. D Kolvaley et al, *J. Appl. Phys.* **80**, 5q78 (1996).
14. J Von Behrem et al, *Solid State Comm.* **105** (5), 317 (1998).
15. I Sagnes et al., *Appl. Phys. Lett.* **62** (10), 1155 (1996).
16. F Kotlowski et al. *Thin Solid Films* **276**, 284 (1996).
17. L Tsybeskov et al. *Appl. Phys.* **68**, 2058 (1996).
18. T Takagahara and K Takeda, *Phys. Rev.* **B46**, 15578 (1992).
19. J C Vvial et al., *Phys. Rev* **B45**, 14171 (1992).