

سنتر و بررسی خواص الکترواپتیکی سیلیکون متخلخل به روش ترکیبی شیمیایی و الکتروشیمیایی

نیما نادری، محمد جواد اشراقی

پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

(دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۵/۰۱/۲۴)

چکیده

در این تحقیق، سیلیکون متخلخل به روش نوین حکاکی ترکیبی شیمیایی و الکتروشیمیایی سنتر شد و تغییرات خواص اپتیکی و ساختاری بر اساس درجه تخلخل نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. در این روش سطح زیر لایه های سیلیکونی ابتدا توسط روش اچینگ شیمیایی به مدت T_d (زمان تاخیر) آماده سازی گردید. سپس در روش اچینگ الکتروشیمیایی حفره های اولیه تولید شده در مرحله قبل، امتداد یافته و سیلیکون متخلخل یکنواختی ایجاد شد. با بهینه کردن زمان تاخیر T_d ، میزان تخلخل و یکنواختی حفره ها بهینه شد. مطالعات مورفولوژی و مشخصه یابی الکترواپتیکی نشان داد که نمونه ای که با زمان تأخیر بهینه تولید شده است، خواص فیزیکی بهتری دارد و می تواند در ادوات نوری همچون آشکارسازهای نوری به طور موثری مورد استفاده قرار گیرد. به منظور بررسی خواص الکترواپتیکی نمونه های متخلخل، آشکارسازهای نوری فلز-نیمه هادی-فلز بر پایه سیلیکون متخلخل ساخته شد. برای این منظور، دو الکتروود شانه ای شکل از جنس نیکل به روش لایه نشانی تبخیر حرارتی بر روی نمونه ها رشد داده شد و نمودار جریان -ولتاژ نمونه ها تحت تابش نور مرئی و در تاریکی، مورد بررسی قرار گرفت.

واژه های کلیدی: سیلیکون متخلخل، نانو ساختار، حکاکی الکتروشیمیایی، حکاکی شیمیایی، خواص الکترواپتیکی.

Synthesis and Optoelectrical Characterization of Porous Silicon Using Chemical and Electrochemical Techniques

Nima Naderi, Mohammad Javad Eshraghi
Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

(Received 26 Jan 2016, accepted 12 Apr 2016)

Abstract

In this report, we explained the formation and characterization of high-porosity, uniform, and stable porous silicon (PS) layers. An innovative combination of electroless and electrochemical etching of silicon was introduced using a novel parameter of delay time (T_d). The electroless chemical etching was optimized by varying the delay time (T_d) prior to the electrochemical process to control the uniformity of the pores. The porosity and uniformity of PS samples were enhanced by applying the optimized value of delay time. The PL spectra of porous samples were measured in room temperature. The optimized sample showed the most intense PL peak compare to the other porous samples due to its highest porosity and elevated specific surface area which enhanced the absorption coefficient of this porous surface. The optical characteristics of the optimized sample indicated the highest porosity of this sample due to the application of sufficient duration of electroless chemical etching prior to applying the pulsed current. It was found that the performance of the photodetector on optimized PS sample is much better than the other porous samples.

Keywords: Porous silicon, Nanostructure, Electrochemical Etching, Chemical Etching, Optoelectrical Properties.

E-mail of corresponding author: n.naderi@merc.ac.ir

مقدمه

حکاکی فوتوالکتروشیمیایی نیمه‌هادی‌ها به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن بر روی سطح نیمه‌هادی به روش الکتروشیمیایی نقوشی حکاکی می‌گردد [۱]. در این روش از نور جهت تسهیل فرآیند خوردگی استفاده می‌گردد. هنگامی که یک نیمه‌هادی درون یک الکترولیت قرار داده می‌شود، تبادل الکترون بین نیمه‌هادی و الکترولیت اتفاق می‌افتد زیرا سطح فرمی نیمه‌هادی و الکترولیت متفاوت است. در روش حکاکی فوتوالکتروشیمیایی از یک منبع تغذیه برای اعمال چگالی جریان لازم استفاده می‌شود. همچنین چشمه نور نقش بسزایی در تولید جفت الکترون-حفره در نیمه‌هادی‌های نوع n دارد. جفت الکترون-حفره به شرطی ایجاد می‌گردد که انرژی نور تابشی از انرژی باندگپ ماده نیمه‌هادی بیشتر باشد. الکترون‌های ایجاد شده (Electrons Photo-generated) از طریق دو مکانیزم نفوذ و جابجایی تحت تاثیر میدان الکتریکی به سطح نیمه‌هادی منتقل می‌شوند و باعث فرآیند حکاکی می‌شوند [۲].

اولین تحقیقات در خصوص تولید سیلیکون متخلخل توسط Canham و همکارانش در سال ۱۹۹۶ با استفاده از روش حکاکی الکتروشیمیایی بوسیله الکترولیت‌های مبتنی بر اسید هیدروفلوریک صورت گرفته است [۳-۵].

در این روش حفره‌ها در مقیاس زیادی بر روی سطح سیلیکون تشکیل می‌شوند. پارامترهایی همچون نوع الکترولیت، نوع دوپنت و میزان آن، میزان شدت جریان اعمال شده، دما و نور با طول موج‌های مختلف بر روی ساختار حفره‌ها تاثیر می‌گذارند [۶].

واکنش شیمیایی جهت اچینگ الکتروشیمیایی سیلیکون را می‌توان به صورت زیر نوشت:



بنابراین یک منبع تغذیه همواره برای ادامه این واکنش مورد نیاز است. محصول نهایی مولکول پایدار H_2SiF_6 است که به سادگی در الکترولیت حل می‌شود. در فرآیند فوتوالکتروشیمیایی، جذب فوتون در سطح سیلیکون

باعث ایجاد جفت الکترون-حفره می‌گردد که حفره به سطح سیلیکون منتقل شده و فرآیند اچینگ را باعث می‌شود. انرژی نور تابیده شده باید از باندگپ سیلیکون (1.12 eV) بیشتر باشد. بنابراین، نورهایی با طول موج زیر ۱۱۰۰ نانومتر برای تولید حامل‌های اقلیت (حفره‌ها) در سیلیکون مورد نیاز است. پس امواج ماوراء بنفش، مرئی و مادون قرمز می‌توانند به کمک HF باعث ایجاد سیلیکون متخلخل گردند. مسلماً طول موج و شدت این امواج در کیفیت حفره‌های تولید شده تاثیر می‌گذارد.

روش حکاکی فوتوالکتروشیمیایی با جریان ثابت، روش مناسب و ساده‌ای برای ایجاد سیلیکون متخلخل است. در این روش شکل حفره‌ها توسط تغییر پارامترهایی همچون چگالی جریان، طول موج نور تابشی، زمان و غلظت محلول در الکترولیت قابل کنترل است. یکی از معایب این روش، مصرف شدن HF در نزدیکی حفره‌ها است و از آنجایی که اسید تازه فرصت رسیدن به این نقاط را پیدا نمی‌کند، غلظت الکترولیت در نزدیکی حفره‌ها به مرور کاهش می‌یابد و بنابراین واکنش اچینگ کند می‌گردد. همچنین، فرآیند اچینگ، گاز هیدروژن تولید می‌کند که مولکول‌های این گاز که در مجاورت دیواره‌های حفره‌ها تجمع می‌کنند، مانع رسیدن الکترولیت به حفره‌ها می‌شوند و فرآیند اچینگ را کند می‌کنند. در روش جریان پالسی، از یک مولد تولید پالس جریان با دوره تناوب T و زمان توقف (T_{off}) جهت اچینگ الکتروشیمیایی استفاده می‌شود. در این روش، به علت قطع شدن جریان در بازه زمانی T_{off} مولکول‌های هیدروژن فرصت پیدا می‌کنند تا به سطح محلول برسند و اجازه دهند تا اسید تازه به نزدیکی دیواره حفره‌ها برسد که این پدیده مانع کند شدن فرآیند اچینگ می‌گردد. در نتیجه، در این روش همواره غلظت اسید در حوالی حفره‌ها ثابت می‌ماند و سرعت اچینگ تغییر نمی‌کند [۷].

فرآیند اچینگ شیمیایی سیلیکون در محلول HF طبق دو واکنش کوپل شده اکسایشی - کاهش‌ی زیر شکل می‌گیرد [۸]:

واکنش اکسایشی:

$$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$$

واکنش کاهش‌ی:

$$Si + 4HF \rightarrow SiF_4 + 4H^+ + 4e^-$$

$$SiF_4 + 2HF \rightarrow H_2SiF_6$$

واکنش کلی:

$$Si + H_2O_2 + 6HF \rightarrow 2H_2O + H_2SiF_6 + H_2 \uparrow$$

تولید گاز هیدروژن به عنوان یکی از محصولات واکنش بیانگر انحلال سیلیکون در محلول HF و تولید ساختار پایدار H_2SiF_6 است. در فرآیند اچینگ شیمیایی از آنجایی که تمام شرایط از جمله غلظت محلول‌های اسید و اکساینده برای تمام سطح ثابت است، حفره‌های یکنواختی ایجاد می‌گردد. اما چون با افزایش زمان واکنش، فرایند پولیشینگ اتفاق می‌افتد عمق حفره‌ها کم است [۹]. این در حالیست که در اچینگ الکتروشیمیایی به علت عدم یکنواختی جریان برای تمام نقاط سطح محصول نهایی یکنواختی بالایی ندارد. اما وجود جریان باعث می‌شود که فرآیند پولیشینگ اتفاق نیوفتد و حفره‌ها عمیق گردند. بنابراین ترکیب این دو تکنیک می‌تواند به تولید سیلیکون متخلخل با یکنواختی و عمق حفره‌های بالا بیانجامد.

در این پروژه از فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی پالسی جهت ایجاد روش نوآورانه ترکیبی شیمیایی- الکتروشیمیایی استفاده شده است. برای این منظور زمان تأخیر (T_d) که مدت زمانیست که نمونه‌ها قبل از اعمال جریان پالسی در مجاورت محلول قرار دارند، را مورد بررسی قرار می‌دهیم. علت تأثیر زمان تأخیر رقابت بین فرآیند اچینگ شیمیایی و الکتروشیمیایی در این روش است. فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی زمانی رخ می‌دهد که یک حفره به سطح سیلیکون برسد. در حالی که فرآیند

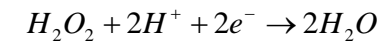
اچینگ شیمیایی در صورت تشکیل یک لایه اکسیدی بر روی سطح سیلیکون ایجاد می‌گردد. لایه اکسیدی ایجاد شده، توسط HF خورده می‌شود و حفره‌های کم عمق اما یکنواختی را روی سطح ایجاد می‌کند. واکنش شیمیایی همواره در تمام مراحل آزمایش اتفاق می‌افتد، حال آنکه واکنش الکتروشیمیایی تنها وقتی که جریان را اعمال می‌کنیم اتفاق می‌افتد. هنگامی که لایه اکسیدی به صورت یکنواخت روی سطح ایجاد شود، فرآیند پولیشینگ اتفاق می‌افتد و همه سطح در محلول HF خورده می‌شود. اما اگر تنها جزایری از لایه‌های اکسیدی بر روی سطح سیلیکون ایجاد شود، حفره‌های یکنواخت ایجاد می‌گردد. در حین اعمال زمان تأخیر (T_d)، سطح سیلیکون دستخوش فرآیند اچینگ شیمیایی می‌شود. اگر این زمان بهینه گردد حفره‌های یکنواخت قبل از فرآیند پولیشینگ روی سطح ایجاد می‌گردند. از آنجایی که فاصله نقاط انتهایی این حفره‌ها تا طرف دیگر و یفر نزدیکتر از نقاط روی سطح است، به هنگام اعمال جریان، فرایند الکتروشیمیایی در انتهای این حفره‌های اولیه ادامه می‌یابد. بنابراین فرایند اچینگ شیمیایی در مدت زمان T_d بر روی سطح سیلیکون طرح اولیه حفره‌ها (Porous Pattern) را که از یکنواختی بالایی برخوردار است تشکیل می‌دهد. در فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی این حفره‌ها توسعه می‌یابند و در عمق سیلیکون نفوذ می‌کنند اما یکنواختی اولیه را حفظ می‌نمایند. در این تحقیق، ابتدا با بررسی تغییرات زمان تأخیر، یکنواختی حفره‌ها بهینه می‌شود و سپس تأثیر این پارامتر بر خواص اپتوالکترونیکی سیلیکون متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فعالیت‌های تجربی

نمونه‌های سیلیکونی استفاده شده در این پروژه از ویفر سیلیکونی نوع n با جهت کریستالوگرافی (۱۰۰) و با مقاومت ویژه $16m\Omega cm$ بریده شدند. تمامی آزمایش‌ها

تولید گاز هیدروژن به عنوان یکی از محصولات واکنش بیانگر انحلال سیلیکون در محلول HF و تولید ساختار پایدار H_2SiF_6 است. در فرآیند اچینگ شیمیایی از آنجایی که تمام شرایط از جمله غلظت محلول‌های اسید و اکساینده برای تمام سطح ثابت است، حفره‌های یکنواختی ایجاد می‌گردد. اما چون با افزایش زمان واکنش، فرایند پولیشینگ اتفاق می‌افتد عمق حفره‌ها کم است [۹]. این در حالیست که در اچینگ الکتروشیمیایی به علت عدم یکنواختی جریان برای تمام نقاط سطح محصول نهایی یکنواختی بالایی ندارد. اما وجود جریان باعث می‌شود که فرآیند پولیشینگ اتفاق نیوفتد و حفره‌ها عمیق گردند. بنابراین ترکیب این دو تکنیک می‌تواند به تولید سیلیکون متخلخل با یکنواختی و عمق حفره‌های بالا بیانجامد.

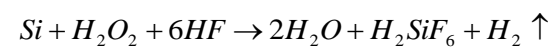
در این پروژه از فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی پالسی جهت ایجاد روش نوآورانه ترکیبی شیمیایی- الکتروشیمیایی استفاده شده است. برای این منظور زمان تأخیر (T_d) که مدت زمانیست که نمونه‌ها قبل از اعمال جریان پالسی در مجاورت محلول قرار دارند، را مورد بررسی قرار می‌دهیم. علت تأثیر زمان تأخیر رقابت بین فرآیند اچینگ شیمیایی و الکتروشیمیایی در این روش است. فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی زمانی رخ می‌دهد که یک حفره به سطح سیلیکون برسد. در حالی که فرآیند



واکنش کاهش‌ی:

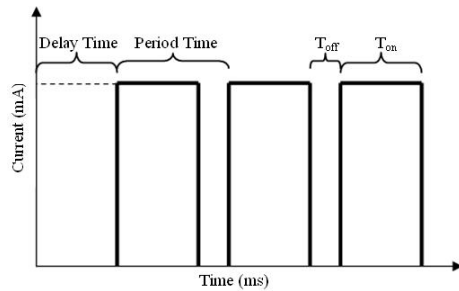


واکنش کلی:



در این پروژه از فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی پالسی جهت ایجاد روش نوآورانه ترکیبی شیمیایی- الکتروشیمیایی استفاده شده است. برای این منظور زمان تأخیر (T_d) که مدت زمانیست که نمونه‌ها قبل از اعمال جریان پالسی در مجاورت محلول قرار دارند، را مورد بررسی قرار می‌دهیم. علت تأثیر زمان تأخیر رقابت بین فرآیند اچینگ شیمیایی و الکتروشیمیایی در این روش است. فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی زمانی رخ می‌دهد که یک حفره به سطح سیلیکون برسد. در حالی که فرآیند

تولید گاز هیدروژن به عنوان یکی از محصولات واکنش بیانگر انحلال سیلیکون در محلول HF و تولید ساختار پایدار H_2SiF_6 است. در فرآیند اچینگ شیمیایی از آنجایی که تمام شرایط از جمله غلظت محلول‌های اسید و اکساینده برای تمام سطح ثابت است، حفره‌های یکنواختی ایجاد می‌گردد. اما چون با افزایش زمان واکنش، فرایند پولیشینگ اتفاق می‌افتد عمق حفره‌ها کم است [۹]. این در حالیست که در اچینگ الکتروشیمیایی به علت عدم یکنواختی جریان برای تمام نقاط سطح محصول نهایی یکنواختی بالایی ندارد. اما وجود جریان باعث می‌شود که فرآیند پولیشینگ اتفاق نیوفتد و حفره‌ها عمیق گردند. بنابراین ترکیب این دو تکنیک می‌تواند به تولید سیلیکون متخلخل با یکنواختی و عمق حفره‌های بالا بیانجامد.

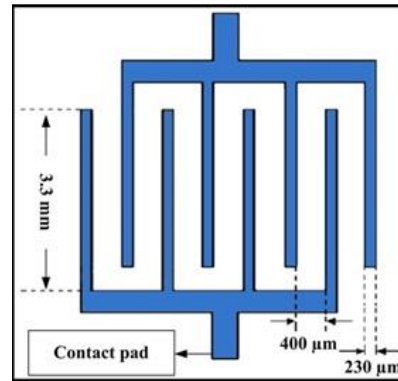


شکل ۱. نمودار شدت جریان - زمان برای موج ایجاد شده جهت اچینگ ترکیبی شیمیایی - الکتروشیمیایی

در این آزمایش از HF (۴۹٪)، اتانول (۹۵٪) و آب اکسیژنه (Hydrogen Peroxide) به نسبت حجمی ۱:۲:۲ به عنوان الکترولیت استفاده شد. از یک مخزن تفلونی به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر به عنوان سل الکتروشیمیایی استفاده شد. چگالی جریان ثابت 20 mA/cm^2 با زمان تناوب ۱۴ میلی‌ثانیه و زمان توقف ۴ میلی‌ثانیه توسط منبع تغذیه اعمال گردید. جهت بررسی اثر زمان تاخیر در روش اچینگ ترکیبی، برای نمونه‌های A، B و C این زمان به ترتیب ۰، ۲ و ۴ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اتمام فرآیند اچینگ به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها از حمام بیرون آورده و با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها در دمای اتاق خشک شدند. جهت بررسی خواص اپتوالکترونیکی نمونه‌ها، آشکارسازهای نوری فلز-نیمه هادی-فلز (MSM) بر پایه نمونه‌های سنتز شده ساخته شدند. بدین منظور دو الکتروود شانه‌ای شکل از جنس نیکل با ضخامت ۲۰۰ نانومتر به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی بر روی نمونه‌ها رشد داده شد. سپس نمونه‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه بازپخت شدند. شکل ۲ ابعاد الکترودهای شانه‌ای را نشان می‌دهد. برای سنجش خواص الکترواپتیکی آشکارسازهای نوری، نمودار جریان - ولتاژ نمونه‌ها تحت تابش نور مرئی و در تاریکی، توسط منبع تغذیه Keithley SourceMeter 2400 مورد بررسی قرار گرفت.

بر روی نمونه‌هایی به اندازه 10×10 میلی‌متر مربع و با ضخامت ۲۵۰ میکرومتر انجام شد. در ابتدا سطح نمونه‌ها به روش مرسوم RCA Clean شستشو داده شد تا ناخالصی‌های آلی، اکسیدی و فلزی موجود بر روی سطح سیلیکون از بین برود. در این روش نمونه‌ها به ترتیب در محلول‌های $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ به نسبت حجمی ۱:۱:۵ به مدت ۱۰ دقیقه و در دمای ۷۵-۸۰ درجه سانتیگراد و $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ به نسبت حجمی ۱:۵۰ به مدت ۲۰ ثانیه و در دمای اتاق و $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ به نسبت حجمی ۱:۱:۶ به مدت ۱۰ دقیقه و در دمای ۷۵-۸۰ درجه سانتیگراد شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و تحت گاز نیتروژن خشک شدند. برای کاهش مقاومت سطحی نمونه‌ها، لایه نازک آلومینیوم به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی (Thermal Evaporation) به ضخامت ۲۰۰ نانومتر پشت نمونه‌های سیلیکونی به عنوان اتصال پشتی (Back Contact) لایه نشانی شد. در این روش از فشار خلاء 10^{-5} تا 3×10^{-5} میلی‌بار استفاده گردید. سپس جهت بهبود خواص فیزیکی لایه نازک آلومینیوم، نمونه‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و تحت گاز نیتروژن در کوره تیوبی (Tube Furnace) به مدت ۱۰ دقیقه بازپخت (Annealing) شدند. جهت ایجاد سیلیکون متخلخل از جریان پالسی که توسط منبع تغذیه Keithley SourceMeter به یک سل دو الکتروود اعمال می‌شود، استفاده شد. الکتروود کاتد مفتول پلاتینی و الکتروود آند نمونه‌های سیلیکونی بودند. شکل ۱ جریان پالسی اعمال شده با پارامترهای دوره تناوب (T)، زمان کار (T_{on})، زمان توقف (T_{off})، و زمان تاخیر (T_d) را نشان می‌دهد.

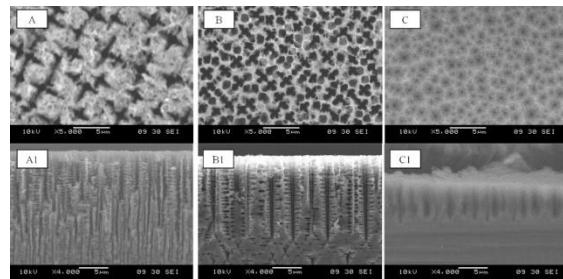
می‌دهد. این پدیده به خاطر افزایش درصد تخلخل در سطح این نمونه است. با افزایش تخلخل، سطح موثر سیلیکون افزایش یافته و در نتیجه فوتون بیشتری جذب سطح می‌گردد [۱۰]. افزایش فوتون‌های بیشتر، باعث تحریک الکترون‌های بیشتر جهت انتقال به نوار رسانش می‌شود. وجود الکترون‌های برانگیخته زیاد که در بازگشت به نوار ظرفیت فوتون تولید می‌کنند باعث افزایش شدت پیک PL می‌شود. جدول ۱ موقعیت، شدت و عرض (FWHM) پیک‌های فوتولومینسانس مربوط به نمونه‌های A، B و C را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود عرض پیک PL مربوط به نمونه B از بقیه کمتر است. این پدیده بیانگر یکنواختی و افزایش کیفیت ساختاری این نمونه است. عریض شدن پیک PL می‌تواند ناشی از انتقال الکترون از نوارهای مختلف رسانش که به علت وجود ناخالصی و یا ناهمگونی در ساختار شبکه‌ای سیلیکون ایجاد می‌شود، پدید آید. همچنین موقعیت پیک PL مربوط به نمونه B نسبت به سایر پیک‌ها به سمت آبی (طول موج‌های کمتر) جابجا شده است. این پدیده که جابجایی آبی نام دارد، به علت اثرات تصحیح کوانتومی در ذرات ریز ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده افزایش باندگپ نانوساختارها نسبت به مواد توده ای (Bulk) است [۱۱]. افزایش تخلخل در نمونه B باعث کوچکتر شدن سایز نانوذرات سیلیکونی موجود در دیواره‌های سیلیکونی موجود در این نمونه می‌شود. این پدیده باعث افزایش باندگپ با توجه به نظریه تصحیح کوانتومی می‌شود و سبب می‌شود که پیک PL به سمت آبی جابجا گردد [۱۲].



شکل ۲. تصویر شماتیک از الکترودهای شانه‌ای جهت ساخت آشکارساز نوری MSM

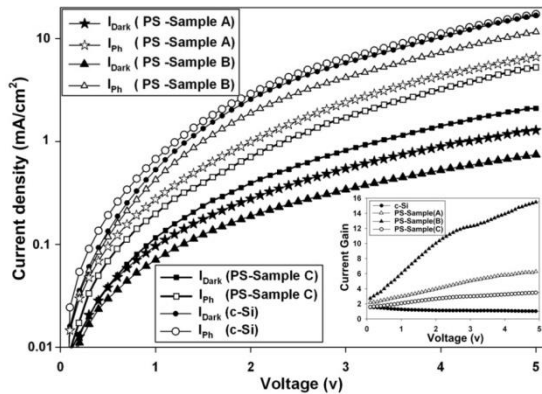
نتایج و بحث:

شکل ۳ تصویر SEM نمونه‌های A، B و C را از نمای جلو (Planar) و کناری (Cross-Sectional) نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر SEM مشخص است، زمان تأخیر دو دقیقه (برای نمونه B) زمان کافی جهت ایجاد حفره‌های منظم و یکنواخت با عمق زیاد در نمونه‌های سیلیکونی است. با افزایش این زمان (در نمونه C) فرآیند پولیشینگ اتفاق می‌افتد و کیفیت حفره‌ها به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۳. تصاویر SEM از سیلیکون متخلخل ایجاد شده به روش اچینگ ترکیبی - نمونه A با زمان تأخیر صفر دقیقه، نمونه B با زمان تأخیر ۲ دقیقه و نمونه C با زمان تأخیر ۴ دقیقه

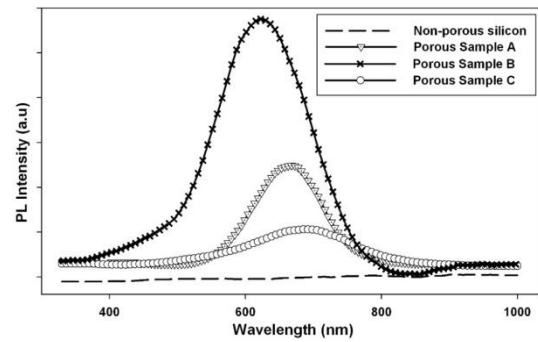
شکل ۴ نمودار فوتولومینسانس (PL) را برای هر سه نمونه و برای سیلیکون غیر متخلخل (c-Si) نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است سیلیکون کریستالی که باندگپ مستقیمی در این بازه ندارد هیچ پیکی را در این بازه نشان نمی‌دهد. حال آنکه سیلیکون متخلخل B با مدت زمان تأخیر ۲ دقیقه بیشترین شدت پیک را نشان



شکل ۵. منحنی های شدت جریان - ولتاژ برای آشکارسازهای نوری مبتنی بر سیلیکون متخلخل نوع A با زمان تاخیر صفر دقیقه، نوع B با زمان تاخیر ۲ دقیقه و نوع C با زمان تاخیر ۴ دقیقه. نمودار مربوط به سیلیکون غیر متخلخل (c-Si) نیز جهت مقایسه آورده شده است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، سیلیکون متخلخل با درجه تخلخل و یکنواختی بالا به روش ترکیبی شیمیایی - الکتروشیمیایی و با بهینه کردن پارامتر زمان تاخیر (T_d) ایجاد گردید. در مدت زمان تاخیر فرآیند اسپینگ شیمیایی باعث بوجود آمدن الگوی اولیه حفره‌ها به صورت یکنواخت بر روی سطح سیلیکون گردید. با اعمال جریان، پس از مدت زمان T_d فرآیند الکتروشیمیایی باعث امتداد همین حفره‌های اولیه و ایجاد حفره‌های عمیق‌تر شد که یکنواختی خود را حفظ کرده بودند. بررسی‌های مورفولوژی و اپتیکی نشان دادند که نمونه‌ای که مدت زمان تاخیر ۲ دقیقه را داشته است، درجه تخلخل بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. در نهایت جهت بررسی خواص الکترواپتیکی نمونه‌ها، آشکارسازهای نوری مرئی مبتنی بر نمونه‌های متخلخل مختلف ساخته شد. نمودارهای شدت جریان - ولتاژ بیانگر حساسیت بالاتر نمونه‌ای که مدت زمان تاخیر ۲ دقیقه را داشته است، بود. سطح این نمونه به علت وجود تخلخل بالا و سطح جذب زیاد، در اثر تابش نور، الکترون‌های تحریک شده بیشتری را بوجود می‌آورد که همین الکترون‌ها باعث رسانندگی بالا و حساسیت نوری زیاد می‌شوند.



شکل ۴. نمودار فوتولومینسانس برای نمونه‌های سیلیکون متخلخل با زمان تاخیر مختلف. نمودار مربوط به سیلیکون غیر متخلخل نیز با خط چین نشان داده شده است

جدول ۱. موقعیت، شدت و عرض پیک های فوتولومینسانس مربوط

به نمونه های متخلخل A, B و C

Samples	Peak wavelength (nm)	Peak intensity (a.u.)	FWHM (nm)
Sample A ($T_d = 0$ min)	663.0	25.0	151.2
Sample B ($T_d = 2$ min)	629.8	58.0	143.8
Sample C ($T_d = 4$ min)	678.2	10.96	170.1

شکل ۵ نمودار شدت جریان-ولتاژ برای آشکارسازهای نوری مبتنی بر سیلیکون‌های متخلخل مختلف و همچنین مبتنی بر سیلیکون غیر متخلخل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود آشکارسازی که مبتنی بر سیلیکون متخلخل با زمان تاخیر ۲ دقیقه است (نمونه B) بیشترین تغییرات جریان از حالت تاریک (I_d) به حالت تحت نور (I_{ph}) را نشان می‌دهد. بهره جریان (Current Gain) که از رابطه زیر بدست می‌آید، معیار خوبی جهت بررسی کیفیت آشکارسازهای نوری است [۱۳]:

$$Gain = \frac{I_{ph}}{I_d}$$

همانطور که در شکل نشان داده شده است میزان بهره جریان برای سیلیکون متخلخل نوع B از بقیه نمونه‌ها به مراتب بیشتر است. سطح نمونه B به علت وجود تخلخل بالا و سطح جذب زیاد، در اثر تابش نور، الکترون‌های تحریک شده بیشتری را بوجود می‌آورد که همین الکترون‌ها (Photo-generated Electrons) باعث رسانندگی بالا و آشکارسازی زیاد می‌شوند [۱۴].

Materials Science in Semiconductor Processing, 40 (2015) 556-63.

11. A. Ramírez-Porras, O. García, C. Vargas, A. Corrales, and J. D. Solís, *Stochastic Quantum Confinement in Nanocrystalline Silicon Layers: The Role of Quantum Dots, Quantum Wires and Localized States*, Applied Surface Science, 347 (2015) 471-74.
12. K. Kulathuraan, K. Mohanraj, and B. Natarajan, *Structural, Optical and Electrical Characterization of Nanostructured Porous Silicon: Effect of Current Density*, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 152 (2016) 51-57.
13. Feng Xie, Hai Lu, Xiangqian Xiu, Dunjun Chen, Ping Han, Rong Zhang, and Youdou Zheng, *Low Dark Current and Internal Gain Mechanism of Gan MSM Photodetectors Fabricated on Bulk Gan Substrate*, Solid-State Electronics, 57 (2011) 39-42.
14. A. F. Abd Rahim, M. R. Hashim, and N. K. Ali, *High Sensitivity of Palladium on Porous Silicon Msm Photodetector*, Physica B: Condensed Matter, 406 (2011) 1034-37.

مراجع

1. N. Naderi, and M. R. Hashim, *Effect of Different Current Densities on Optical Properties of Porous Silicon Carbide Using Photo-Electrochemical Etching*, Materials Letters, 88 (2012) 65-67.
2. M. Jaouadi, W. Dimassi, M. Gaidi, R. Chtourou, and H. Ezzaouia, *Nanoporous Silicon Membrane for Fuel Cells Realized by Electrochemical Etching*, Applied Surface Science, 258 (2012) 5654-58.
3. A. Loni, L. T. Canham, M. G. Berger, R. Arens-Fischer, H. Munder, H. Luth, H. F. Arrand, and T. M. Benson, *Porous Silicon Multilayer Optical Waveguides*, Thin Solid Films, 276 (1996) 143-46.
4. L. T. Canham, A. Loni, P. D. J. Calcott, A. J. Simons, C. Reeves, M. R. Houlton, J. P. Newey, K. J. Nash, and T. I. Cox, *On the Origin of Blue Luminescence Arising from Atmospheric Impregnation of Oxidized Porous Silicon*, Thin Solid Films, 276 (1996) 112-15.
5. L. T. Canham, T. I. Cox, A. Loni, and A. J. Simons, *Progress Towards Silicon Optoelectronics Using Porous Silicon Technology*, Applied Surface Science, 102 (1996) 436-41.
6. R. S. Dubey, and D. K. Gautam, *Porous Silicon Layers Prepared by Electrochemical Etching for Application in Silicon Thin Film Solar Cells*, Superlattices and Microstructures, 50 (2011) 269-76.
7. Tuomo Nissinen, Timo Ikonen, Mejjor Lama, Joakim Riikonen, and Vesa-Pekka Lehto, *Improved Production Efficiency of Mesoporous Silicon Nanoparticles by Pulsed Electrochemical Etching*, Powder Technology, 288 (2016) 360-65.
8. Hee Han, Zhipeng Huang, and Woo Lee, *Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon and Nanotechnology Applications*, Nano Today, 9 (2014) 271-304.
9. Ayu Wazira Azhari, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Khairunaz Mat Desa, and Saleem H. Zaidi, *Optimization of Silver-Assisted Nano-Pillar Etching Process in Silicon*, Applied Surface Science, 357, Part B (2015) 1863.
10. M. Lajvardi, H. Eshghi, M. E. Ghazi, M. Izadifard, and A. Goodarzi, *Structural and Optical Properties of Silicon Nanowires Synthesized by Ag-Assisted Chemical Etching*,