# سنتز و بررسی خواص الکترواپتیکی سیلیکون متخلخل به روش ترکیبی شیمیایی و الکتروشیمیایی

نيما نادري، محمد جواد اشراقي

پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران ( دریافت مقاله -۹۴/۱۱/۰۶ بذیرش مقاله : ۹۵/۰۱/۲۴)

## چکیدہ

در این تحقیق، سیلیکون متخلخل به روش نوین حکاکی ترکیبی شیمیایی و الکتروشیمیایی سنتز 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<sub>d</sub> (زمان تاخیر) آماده سازی گردید. سپس در روش اچینگ الکتروشیمیایی حفرههای اولیه تولید شده در مرحله قبل، امتداد یافته و سیلیکون متخلخل یکنواختی ایجاد شد. با بهینه کردن زمان تاخیر T<sub>a</sub>، میزان تخلخل و یکنواختی حفرههای اولیه تولید شده در مرحله قبل، امتداد یافته و سیلیکون متخلخل یکنواختی نمونهای که با زمان تأخیر بهینه تولید شده است، خواص فیزیکی بهتری دارد و میتواند در ادوات نوری همچون آشکارسازهای نوری به طور موثری مورد استفاده قرار گیرد. به منظور بررسی خواص الکترواپتیکی نمونههای متخلخل، آشکارسازهای نوری فلز -نیمههادی-فلز بر پایه سیلیکون متخلخل ساخته شد. برای این منظور، دو الکترود شانه ای شکل از جنس نیکل به روش لایهنشانی تبخیر حرارتی بر روی نمونهها رشد و نمودار جریان

**واژەھاي كليدى**: سيليكون متخلخل، نانوساختار، حكاكي الكتروشيميايي، حكاكي شيميايي، خواص الكترواپتيكي.

# 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

حكاكي فوتوالكتروشيميايي نيمههادي ها به فرآيندي اطلاق میشود که در آن بر روی سطح نیمههادی به روش الکتروشیمیایی نقوشی حکاکی می گردد[۱]. در این روش از نور جهت تسهیل فرآیند خوردگی استفاده میگردد. هنگامیکه یک نیمه هادی درون یک الکترولیت قرارداده می شود، تبادل الکترون بین نیمه هادی 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 می شود. همچنین چشمه نور نقش بسزایی در تولید جفت الکترون-حفره در نیمههادی های نوع n دارد. جفت الکترون-حفره به شرطی ایجاد میگردد که انرژی نور تابشی از انرژی باندگپ ماده نیمههادی بیشتر باشد. الكترون هاى ايجاد شده (Electrons Photo-generated) از طریق دو مکانیزم نفوذ و جابجایی تحت تاثیر میدان الکتریکی به سطح نیمه هادی منتقل میشوند و باعث فرآيند حكاكي مي شوند[٢].

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 می گذارند[۶].

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

 ${
m Si} + 6{
m HF} 
ightarrow {
m H}_2 {
m SiF}_6 + {
m H}_2 + 2{
m H}^+ + 2{
m e}^-$ بنابراین یک منبع تغذیه همواره برای ادامه این واکنش  ${
m H}_2 {
m SiF}_6$  بیاز است. محصول نهایی مولکول پایدار است که به سادگی در الکترولیت حل میشود. در فرایند فوتوالکتروشیمیایی، جذب فوتون در سطح سیلیکون

سطح سیلیکون منتقل شده و فرایند اچینگ را باعث می شود. انرژی نور تابیده شده باید از بندگپ سیلیکون (1.12 eV) بیشتر باشد. بنابراین، نورهایی با طول موج زیر ۱۱۰۰ نانومتر برای تولید حامل های اقلیت (حفره ها) در سیلیکون مورد نیاز است. پس امواج ماوراء بنفش، مرئی و مادون قرمز می توانند به کمک HF باعث ایجاد سيليكون متخلخل گردند. مسلماً طول موج و شدت اين امواج در کیفیت حفره های تولید شده تاثیر می گذارد. 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 مىكنند، مانع رسيدن الكتروليت 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<sub>off</sub>) جهت اچینگ الکتروشیمیایی استفاده می شود. در این روش، به علت قطع شدن جریان در بازه زمانی T<sub>off</sub> 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 اچينگ تغيير نمي کند[٧].

باعث ايجاد جفت الكترون-حفره مي گردد كه حفره به

اچینگ شیمیایی در صورت تشکیل یک لایه اکسیدی بر روی سطح سیلیکون ایجاد میگردد. لایه اکسیدی ایجاد شده، توسط HF خورده می شود و حفره های کم عمق اما یکنواختی را روی سطح ایجاد میکند. واکنش شیمیایی همواره در تمام مراحل آزمایش اتفاق میافتد، حال آنکه واكنش الكتروشيميايي تنها وقتى كه جريان را اعمال میکنیم اتفاق میافتد. هنگامی که لایه اکسیدی به صورت يكنواخت روى سطح ايجاد شود، فرآيند پوليشينگ اتفاق میافتد و همه سطح در محلول HF خورده می شود. اما اگر تنها جزایری از لایههای اکسیدی بر روی سطح سیلیکون ایجاد شود، حفرههای یکنواخت ایجاد میگردد. در حين اعمال زمان تأخير (T<sub>d</sub>)، سطح سيليكون دستخوش فرآیند اچینگ شیمیایی می شود. اگر این زمان بهینه گردد حفرههای یکنواخت قبل از فرآیند پولیشینگ روی سطح ایجاد می گردند. از آنجایی که فاصله نقاط انتهایی این حفرهها تا طرف دیگر ویفر نزدیکتر از نقاط روی سطح است، به هنگام اعمال جریان، فرایند الکتروشیمیایی در انتهای این حفره های اولیه ادامه مییابد. بنابراین فرایند اچینگ شیمیایی در مدت زمان T<sub>d</sub> 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 تحقيق، ابتدا با بررسي تغييرات زمان تأخير، يكنواختي حفرهها بهینه میشود و سپس تأثیر این پارامتر بر خواص اپتوالكترونيكي سيليكون متخلخل مورد بررسي قرار مي گير د.

### فعاليتهاي تجربي

نمونههای سیلیکونی استفاده شده در این پروژه از ویفر سیلیکونی نوع n با جهت کریستالوگرافی (۱۰۰) و با مقاومت ویژه 16mΩcm بریده شدند. تمامی آزمایشها فرآيند اچينگ شيميايى سيليكون در محلول HF طبق دو واكنش كوپل شده اكسايشى – كاهشى زير شكل مى گيرد [٨]: [A]: $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ e اكنش اكسايشى: $Si + 4HF \rightarrow SiF_4 + 4H^+ + 4e^ SiF_4 + 2HF \rightarrow H_2SiF_6$ e [كنش كلى : $Si + H_2O_2 + 6HF \rightarrow 2H_2O + H_2SiF_6 + H_2$ 

تولید گاز هیدروژن به عنوان یکی از محصولات واکنش بیانگر انحلال سیلیکون در محلول HF و تولید ساختار پایدار H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 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 می گردد. اما چون با افزایش زمان واکنش، فرایند پولیشینگ اتفاق میافتد عمق حفره ها کم است[۹]. این در حالیست که در اچینگ الکتروشیمیایی به علت عدم یکنواختی جریان برای تمام نقاط سطح باعث می شود که فرآیند پولیشینگ اتفاق نیوفتد و حفرهها عمیق گردند. بنابراین ترکیب این دو تکنیک می تواند به تولید سیلیکون متخلخل با یکنواختی و عمق حفرههای

در این پروژه از فرآیند اچینگ الکتروشیمیایی پالسی جهت ایجاد روش نوآورانه ترکیبی شیمیایی-الکتروشیمیایی استفاده شده است. برای این منظور زمان تاخیر (T<sub>d</sub>) 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 حالیکه فرآیند



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 الكتروشيميايي استفاده شد. چگالي جريان ثابت ۲۰mA/cm<sup>2</sup> با زمان تناوب ۱۴ میلی ثانیه و زمان توقف ۴ میلی ثانیه توسط منبع تغذیه اعمال گردید. جهت بررسی اثر زمان تاخیر در روش اچینگ ترکیبی، برای نمونه های B، A و C این زمان به ترتیب · ، ۲ و ۴ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اتمام فرآیند اچینگ به مدت ۳۰ دقيقه نمونهها از حمام بيرون 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 الکترود 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 الكتروايتيكي أشكارسازهاي نوري، نمودار جريان - ولتاژ نمونه ها تحت تابش نور مرئي و در تاريكي، توسط منبع تغذيه Keithley SourceMeter 2400 مورد بررسي قرار گرفت.

بر روی نمونههایی به اندازه ۱۰\*۱۰ میلیمترمربع و با ضخامت ۲۵۰ میکرومتر انجام شد. در ابتدا سطح نمونهها به روش مرسوم RCA Clean شستشو داده شد تا ناخالصی های آلی، اکسیدی و فلزی موجود بر روی سطح سیلیکون از بین برود. در این روش نمونهها به ترتیب در محلولهای NH4OH:H2O2:H2O به نسبت حجمی ۱:۱:۵ به مدت ۱۰ دقیقه و در دمای ۷۵–۸۰ درجه سانتیگراد و HF:H<sub>2</sub>O به نسبت حجمی ۱:۵۰ به مدت ۲۰ ثانیه و در دمای اتاق و HCl: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: H<sub>2</sub>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 كاهش مقاومت سطحي نمونهها، لايه نازک ألومينيوم به روش لايهنشاني تبخير حرارتي ( Thermal Evaporation) به ضخامت ۲۰۰ نانومتر پشت نمونههای سيليكوني به عنوان اتصال پشتي (Back Contact) لايه نشانی شد. در این روش از فشار خلاء <sup>۵۰</sup>-۱۰×۳۸ میلی بار استفاده گردید. سپس جهت بهبود خواص فیزیکی لايه نازک آلومينيوم، نمونهها در دماي ۴۵۰ درجه سانتیگراد و تحت گاز نیتروژن در کوره تیوبی ( Tube (Annealing) به مدت ۱۰ دقیقه بازپخت (Furnace شدند. جهت ايجاد سيليكون متخلخل از جريان پالسي كه توسط منبع تغذیه Keithley SourceMeter به یک سل دو الكتروده اعمال مي شود، استفاده شد. الكترود كاتد مفتول پلاتینی و الکترود آند نمونههای سیلیکونی بودند. شکل ۱ جریان پالسی اعمال شده با پارامترهای دوره تناوب (T)، زمان کار (T<sub>on</sub>)، زمان توقف (T<sub>off</sub>)، و زمان تاخیر  $(T_d)$  را نشان می دهد.



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

نتايج 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 حفره های 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 تاخیر صفر دقیقه، نمونه B با زمان تاخیر ۲ دقیقه و نمونه C با زمان تاخیر 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 تاخیر ۲ دقیقه بیشترین شدت پیک را نشان

میدهد. این پدیده به خاطر افزایش درصد تخلخل در سطح این نمونه است. با افزایش تخلخل، سطح موثر سیلیکون افزایش یافته و درنتیجه فوتون بیشتری جذب سطح می گردد[۱۰]. افزایش فوتون های بیشتر، باعث تحریک الکترون،های بیشتر جهت انتقال به نوار رسانش می شود. وجود الکترون های برانگیخته زیاد که در بازگشت به نوار ظرفیت فوتون تولید میکنند باعث افزایش شدت پیک PL می شود. 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 می تواند ناشی از انتقال الکترون از نوارهای مختلف رسانش که به علت وجود ناخالصی و یا ناهمگونی در ساختار شبکهای سیلیکون ایجاد می شود، پدید آید. همچنین موقعیت پیک PL مربوط به نمونه B نسبت به سایر پیکها به سمت آبی (طول موج های كمتر) جابجا شده است. این پدیده كه جابجایی آبی نام دارد، به علت اثرات تصحيح كوانتومي در ذرات ريز ايجاد مى شود كه نشاندهنده افزايش باندگپ نانوساختارها نسبت به مواد توده ای (Bulk) است[۱۱]. افزایش تخلخل در نمونه B باعث كوچكتر شدن سايز نانوذرات سیلیکونی موجود در دیوارههای سیلیکونی موجود در این نمونه میشود. این پدیده باعث افزایش باند گپ با توجه به نظریه تصحیح کوانتومی میشود و سبب میشود که ییک PL به سمت آبی جابجا گردد[۱۲]. ۶۰ نادری و همکاران، سنتز و بررسی خواص الکترواپتیکی سیلیکون متخلخل به روش ترکیبی شیمیایی، علوم و مهندسی سطح ۳۰(۱۳۹۵)



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.

نتيجه گيري

در این تحقیق، سیلیکون متخلخل با درجه تخلخل و يكنواختي بالا به روش تركيبي شيميايي - الكتروشيميايي و با بهینه کردن پارامتر زمان تاخیر (T<sub>d</sub>) ایجاد گردید. در مدت زمان تاخير فرآيند اچينگ شيميايي باعث بوجود آمدن الگوی اولیه حفرهها به صورت یکنواخت بر روی سطح سیلیکون گردید. با اعمال جریان، پس از مدت زمان T<sub>d</sub> فرآيند الكتروشيميايي باعث امتداد همين 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 تاخير ۲ دقيقه را داشته است، درجه تخلخل بالاترى نسبت به سایر نمونهها دارد. در نهایت جهت بررسی خواص الكترواپتيكى نمونهها، أشكارسازهاى نورى مرئى 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 می آورد که همین الکترون ها باعث رسانندگی بالا و حساسیت نوری زیاد می شوند.



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

به نمونه های متخلخل B ،A و C			
Samples	Peak wavelength (nm)	Peak intensity (a.u.)	FWHM (nm)
Sample A $(T_d = 0 \text{ min})$	663.0	25.0	151.2
Sample B ( $T_d = 2 \min$ )	629.8	58.0	143.8
Sample C $(T_1 - 4 \min)$	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<sub>b</sub>) به حالت تحت نور (I<sub>ph</sub>) را نشان میدهد. بهره جریان (Current Gain) که از رابطه زیر بدست میآید، معیار خوبی جهت بررسی کیفیت آشکارسازهای نوری است[۱۳]:

$$Gain = \frac{I_{Pl}}{I_{Pl}}$$

همانطور که در شکل نشان داده شده است میزان بهره جریان برای سیلیکون متخلخل نوع B از بقیه نمونه ها 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 می شوند[۱۴]. نادری و همکاران، سنتز و بررسی خواص الکترواپتیکی سیلیکون متخلخل به روش ترکیبی شیمیایی، علوم و مهندسی سطح ۳۰(۱۳۹۵) ۶۱

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 Current of 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, Mejor 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*,