

## بررسی خواص الکتریکی نمونه‌های ساندویچی (Cu/Si/PS/Au) به منظور ساخت حسگر گازهای CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub> و O<sub>2</sub>

محمداسماعیل عظیم عراقی: دانشگاه خوارزمی

\* حمیده اسکندری تربقان: دانشگاه آزاد اسلامی- واحد کاشمر، باشگاه پژوهش‌گران جوان

### چکیده

این پژوهش به منظور بررسی اثر حس‌گری گاز و رفتار الکتریکی نمونه‌های ساندویچی بر پایه سیلیکان متخلخل (PS) با ساختار Cu/Si/PS/Au انجام شده است. لایه‌های نازک PS به روش الکتروشیمیایی از زیر لایه سیلیکان با مقاومت ویژه  $1.4-2.6 \Omega cm$  ساخته می‌شوند. پارامترهای قابل تغییر در ساخت نمونه‌ها، زمان آندی‌سازی، فاصله بین آند و کاتد (L) و چگالی جریان آنودی‌سازی و غلظت محلول الکترولیت هستند که محلول الکترولیت شامل اسید هیدروفلوریک (48% HF)، اتانول (99.9% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) و آب مقطر با نسبت‌های مختلف x:y:z در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها پس از متخلخل شدن رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد که این اثر را می‌توان با اندازه‌گیری گاف انرژی از روی نمودار  $Ln(I) - 1/T$  توجیه کرد. همچنین در این مقاله مشخصه‌های I-T، I-V، نمونه‌ها در شرایط مختلف و در حضور گازهای CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub>، O<sub>2</sub> اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند. بهترین شرایط از لحاظ پاسخ به اعمال گاز متعلق به پارامترهای: چگالی جریان  $20 \text{ mA/cm}^2$ ،  $t = 1800 \text{ S}$ ،  $PH = 1.869$ ، و فاصله بین آند و کاتد  $L = 4 \text{ cm}$  است.

### مقدمه

شناسایی و کنترل گازهایی نظیر CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub>، O<sub>2</sub>، CH<sub>4</sub> که ممکن است خطرناک، یا در زمینه‌های صنعتی و علمی مفید باشد، یکی از مسائل مورد توجه در عصر حاضر است. در حالی که انجام این کار نیاز به ساخت حس‌گری دارد که علاوه بر حساسیت بالا، ارزان قیمت و پایدار باشد. [1]. در برهم‌کنش گاز با یک ماده، تنها لایه نازکی از سطح ماده (در حدود چند نانومتر) با گاز برهم‌کنش می‌کند و توده باقی‌مانده هیچ تماسی با گاز ندارد. بنا بر این برای استفاده از مواد به عنوان حسگر لازم است ماده مورد نظر به صورت لایه نازک یا متخلخل درآید تا تمام سطح با گاز در تماس باشد و در رسانش شرکت کند. با توجه به توضیحات فوق، سطح عامل مهمی در بحث حس‌گری است. بنا بر این هر قدر سطح مؤثر بیشتر باشد، مکان‌های بیش‌تری برای برخورد گاز با سطح وجود دارد. سیلیکان متخلخل (PS) به دلیل داشتن واکنش‌پذیری زیاد، کاندید خوبی برای حسگر گاز است. سیلیکان بعد از اکسیژن دومین ماده از نظر فراوانی است و اکسیدسیلیکان با کیفیت بالا را به روش گرمایی می‌توان رشد داد. قطعات سیلیکان اصلاح شده خیلی ارزان‌تر از مواد نیمه‌رسانای دیگر هستند.

واژه‌های کلیدی: سیلیسیم متخلخل، حسگر گاز N<sub>2</sub>، گاف انرژی

پذیرش ۹۰/۹/۱۳

دریافت ۸۹/۸/۱۲

\* نویسنده مسئول eskandari\_humd@yahoo.com

از طرفی بسیاری از نیم‌رساناها دارای خواص اپتیکی‌اند که  $Si$  فاقد آن‌هاست. یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از سیلیکان متخلخل به‌عنوان حس‌گر گاز، عمل‌کرد آن در دمای اتاق است. سیلیکان متخلخل (PS) به دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی از زیرلایه سیلیکان ساخته می‌شود. در روش شیمیایی زیرلایه در یک محلول شامل اسید HF، اسیدنیتریک و آب برای مدت زمان سه تا پنج دقیقه غوطه‌ور می‌شود، به عبارتی ویفر سیلیکان هر دو نقش آنود و کاتود را داراست. در طی فرایند تخلخل جای‌گاه آنود و کاتود مرتباً عوض می‌شود، اما در روش الکتروشیمیایی PS در محلول‌هایی مبتنی بر اسید HF شکل می‌گیرد که ممکن است خوردگی از طریق کنترل جریان آنودی‌سازی یا تغییر پتانسیل صورت گیرد که در حالت کلی جریان ثابت ارجحیت دارد، زیرا ضمن کنترل بهتر روی هر دو مشخصه تخلخل و ضخامت، قابلیت بازتولید خوبی از یک مرحله به مرحله دیگر دارد.

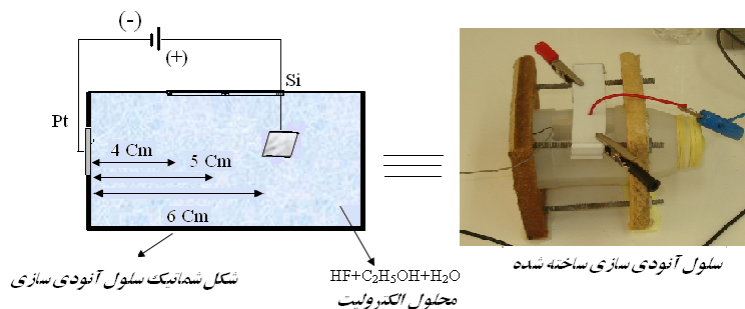
در این پژوهش از روش الکتروشیمیایی برای ساخت نمونه‌ها استفاده کردیم. پارامترهای مختلف آنودی‌سازی که در روش الکتروشیمیایی قابل تغییر هستند عبارتند از: ۱) چگالی جریان آنودی‌سازی، ۲) غلظت محلول الکترولیت، ۳) زمان آنودی‌سازی و... که با تغییر هر یک نمونه متفاوتی ساخته شده و با تکرار، امکان ساخت نمونه‌های مشابه وجود دارد. این نمونه‌ها بعد از اعمال گاز خواص الکتریکی و اپتیکی متفاوتی نسبت به قبل از تخلخل از خود نشان می‌دهند [۲]، [۳].

هر قطعه‌ای که به یک محرک (نظیر نور، گرما، صوت، فشار یا یک حرکت خاص فیزیکی یا شیمیایی) پاسخ می‌دهد و پیغامی را می‌فرستد، حس‌گر نامیده می‌شود. بنا بر این یک حس‌گر می‌تواند پیغامی را که احساس انسان قادر به درک مستقیم آن‌ها نیست و باید اندازه‌گیری شود، دریافت کند و آن را به یک خروجی مناسب مثلاً یک کمیت الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل کند.

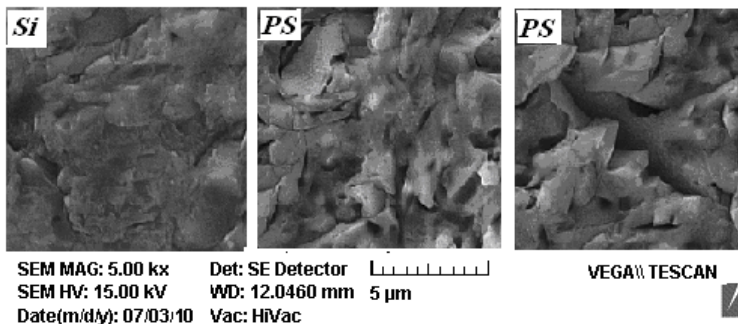
در این پژوهش رفتار الکتریکی لایه‌های نازک PS در حضور گازهای مختلف ارزیابی می‌شوند. برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌های ساخته شده، مشخصه‌های الکتریکی ساختارها در شرایط مختلف قبل و بعد از اعمال گاز با هم مقایسه می‌شوند.

### مراحل ساخت نمونه

در این کار یکی از سطوح ویفر سیلیکان نوع P با مقاومت ویژه  $1.4-2.6 \Omega cm$  را به روش تبخیر حرارتی با یک لایه نازک در حد نانومتر از فلز مس می‌پوشانیم سپس از روش الکتروشیمیایی برای متخلخل کردن نمونه‌ها استفاده می‌کنیم. (مانند آنچه در مقاله‌های [۴] و [۵] آورده شده است. در این تحقیق محلول استفاده شده شامل نسبت‌های مختلف (x:y:z) از اسید هیدروفلوریک HF (۴۸٪)، اتانول  $C_2H_5OH$  (۹۹/۹٪) و آب مقطر است. فاصله بین آنود و کاتود بین ۴-۶ سانتی‌متر، جریان آنودی‌سازی  $10 mA/cm^2$  تا  $20 mA/cm^2$  و زمان‌های آنودی‌سازی را بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه تغییر می‌دهیم و بقیه شرایط یکسان در نظر گرفته می‌شود. سلول الکتروشیمیایی استفاده شده در ساخت نمونه‌ها در شکل ۱ آورده شده است. سطح نمونه‌ها بعد از تخلخل با SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) اسکن شده و برای مقایسه در شکل ۲ آورده شده است.

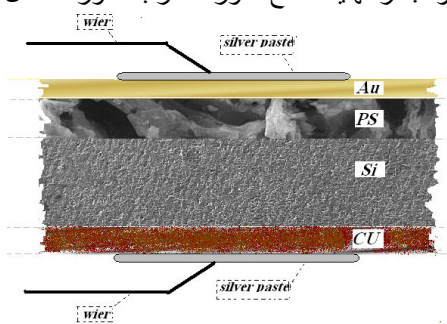


شکل ۱. سلول الکتروشیمیایی ساخته شده برای متخلخل کردن سیلیکان و نمای داخل آن به صورت شماتیک



شکل ۲. تصاویر SEM نمونه‌ها قبل و بعد از انجام عمل خوردگی

پس انجام عملیات سونش، یک لایه طلا برای ایجاد تماس اهمیک روی لایه متخلخل شده- به روش تبخیر حرارتی در فشار  $10^{-5}$  mBar،  $1 \times 8$  نشانده می‌شود. همچنین سیم‌های مسی نازکی به وسیله چسب نقره بر روی لایه‌های مس و طلا چسبانده می‌شوند. در نهایت قطع، مورد نظر به صورت شکل ۳ خواهد بود.



شکل ۳. نمایی از مقطع عرضی نمونه‌های تهیه شده

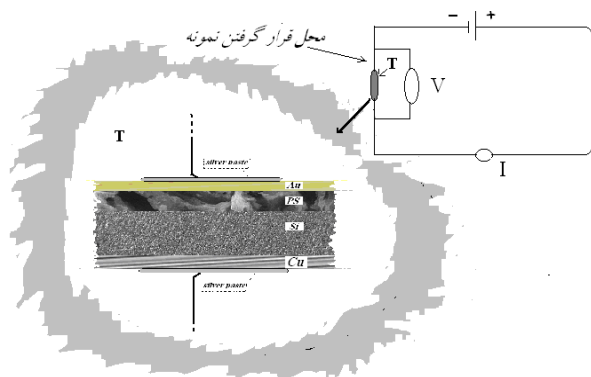
جدول ۱. مشخصات و شرایط تهیه نمونه‌ها

شماره نمونه	چگالی جریان (mA/cm <sup>2</sup> )	غلظت الکترولیت HF:EtOH:H <sub>2</sub> O	زمان (S)	PH	فاصله بین آند و کاتد (cm)
1	۱۰	۱:۲:۱	۶۰۰	۱,۸۶۹	۴
۲	۱۰	۱:۲:۱	۹۰۰	۱,۸۶۹	۴
۳	۱۰	۱:۲:۱	۱۲۰۰	۱,۸۶۹	۴
۴	۱۰	۱:۲:۱	۱۵۰۰	۱,۸۶۹	۴
۵	۱۰	۱:۲:۱	۱۸۰۰	۱,۸۶۹	۴
6	۲۰	۱:۲:۱	۱۸۰۰	۱,۸۶۹	۴
۷	۱۰	۱:۲:۲	۱۸۰۰	۲,۱۸۹	۴
۸	۱۰	۱:۲:۱	۹۰۰	۱,۸۶۹	۵

مشخصات و شرایط ساخت نمونه در جدول ۱ آورده شده است.

نمونه‌ها در یک سلول آلومینیومی به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  سانتی‌متر ثابت شده و در مدارای مانند شکل ۴ برای اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری افزایش جریان با دما و ولتاژ ابتدا دمای محیطی را که نمونه داخل آن قرار گرفته است افزایش داده و جریان عبوری از نمونه‌ها ثبت می‌گردد. سپس برای شرایط مختلف اختلاف پتانسیل دو سر نمونه را با گام‌های  $0.1V$  تغییر داده و شدت جریان عبوری در هر حالت اندازه‌گیری می‌شود. در این اندازه‌گیری باید حتماً از اعمال ولتاژ مستقیم<sup>۱</sup> استفاده شود تا بتوان تغییرات جریان را ثبت کرد، زیرا در اعمال ولتاژ معکوس<sup>۲</sup> این تغییرات بسیار کم‌اند و قابل ارائه نیستند. نتایج به‌دست آمده در این قسمت با منابع [۶] و [۷] مطابقت دارد.

در حین اندازه‌گیری I-V دمای محفظه (محیط اطراف نمونه) ثابت نگه داشته می‌شود و در هر مرحله با تغییر یکی از پارامترهای نوع گاز مورد آزمایش و مدت زمان اعمال گاز، حساسیت نمونه‌ها را بررسی و مقایسه می‌کنیم.



شکل ۴. نمایی از مدار مربوط به اندازه‌گیری جریان و محل قرارگیری نمونه در آن

## بحث و بررسی

### اندازه‌گیری گاف انرژی قطعات

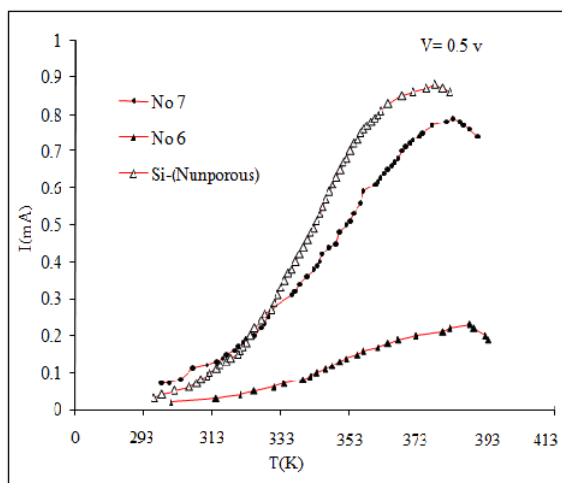
در این قسمت، با ثابت نگه داشتن ولتاژ، تغییرات شدت جریان بر حسب دما اندازه‌گیری می‌شود. قبل از گرمادهی ابتدا ولتاژ به‌صورت کنترل شده و با گام‌های بسیار کوچک افزایش داده می‌شود تا جریان شروع به افزایش کند، سپس ولتاژ ثابت نگه داشته شده و دما کم کم افزایش داده می‌شود. این افزایش جریان ثبت می‌گردد. با توجه به نمودار I-T شکل ۵، برای دو نمونه ۶ و ۷ که با شرایط متفاوت تهیه شده‌اند، مشاهده می‌شود که افزایش دما فقط تا مقدار مشخصی افزایش جریان را به‌همراه داشت. حد بالای دما برای نمونه‌های با شرایط ساخت مختلف، متفاوت است، اما برای همه نمونه‌ها تا دمای مشخصی افزایش جریان و از آن به بعد کاهش جریان خواهیم داشت. برای همین دو نمونه و نمونه متخلخل نشده در شرایط یکسان، در ولتاژ ثابت  $0.5V$  نمودار  $Ln(I) - \frac{1}{T}$  را رسم کرده و با توجه به رابطه (۱) از روی شیب نمودار گاف انرژی نمونه‌ها را محاسبه می‌کنیم (شکل ۶ a-c).

۱. forward bias

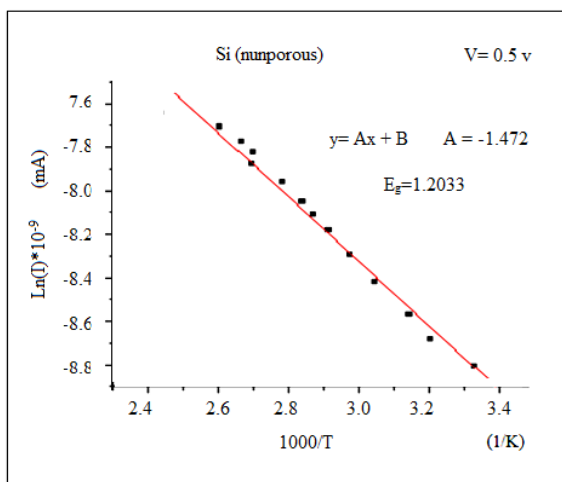
۲. reverse bias

$$I = B \exp\left(\frac{-E_g + eV}{k_B T}\right) \quad (1)$$

در رابطه بالا B با توان ۳ از درجه حرارت به صورت  $T^{3+1/2}$  وابسته است، اما چون ترم نمایی خیلی سریع‌تر افزایش پیدا می‌کند، در برابر وابستگی نمایی جریان به دما می‌توان از تغییرات مربوط به جمله  $T^{3+1/2}$  آن صرف‌نظر کرد و آن را تقریباً ثابت فرض کرد و محاسبات را ساده انجام داد. طبق آنچه در منبع [۸] آورده شده است، این افزایش شیب نسبت به قبل انجام عملیات خوردگی را می‌توان به خوبی توجیه کرد. بعد از متخلخل شدن نمونه همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سطح مؤثر نمونه سیلیکانی نسبت به قبل از تخلخل افزایش پیدا کرده و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد، در نتیجه افزایش مقاومت قطعات رسانندگی نمونه بعد از تخلخل کاهش می‌یابد. این نتیجه را در نمودار I-V دو نمونه ۶ و ۷ در مقایسه با قبل از تخلخل نیز می‌توان مشاهده کرد (شکل ۷).



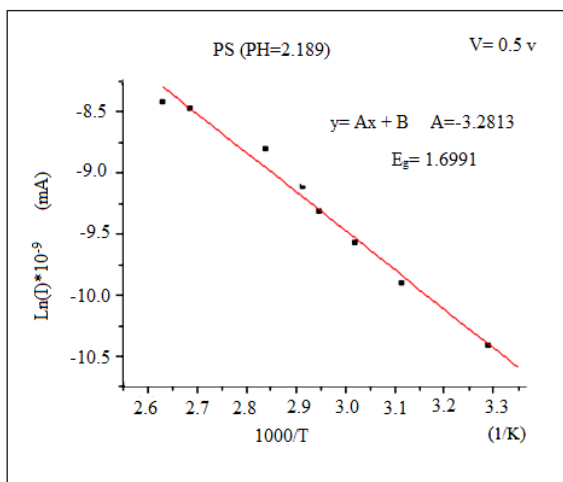
شکل ۵. نمایش تغییرات جریان با دما برای دو نمونه ۶ و ۷ و نمونه متخلخل نشده در ولتاژ  $V=0.5$  مشاهده می‌شود که رسانندگی نمونه پس از تخلخل کاهش پیدا کرده است



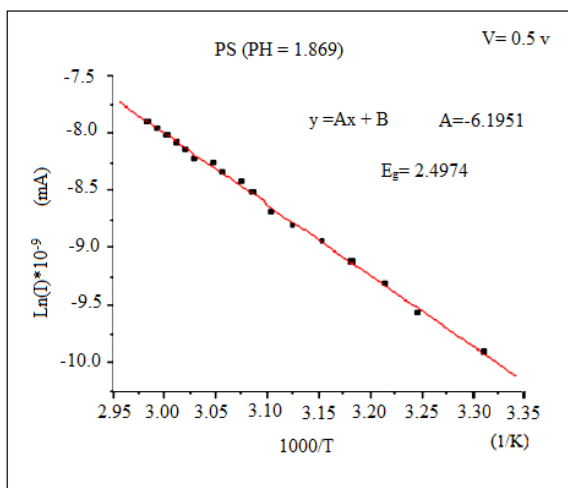
شکل ۶. a) نمودار اندازه‌گیری گاف انرژی نمونه قبل از تخلخل. گاف انرژی محاسبه شده برابر با  $1/2033$  است

سه نمونه آورده شده شامل دو نمونه متخلخل نشده است. گاف انرژی نمونه متخلخل نشده یعنی شکل ۶ a برابر  $1/2033$  به دست آمده است که از گاف انرژی دو نمونه متخلخل شده دیگر کمتر است. شکل ۶ c نمونه‌ای است که با غلظت محلول الکترولیت کمتر (محیط اسیدی‌تر) متخلخل شده است. با توجه به آنچه قبلاً گفته شد،

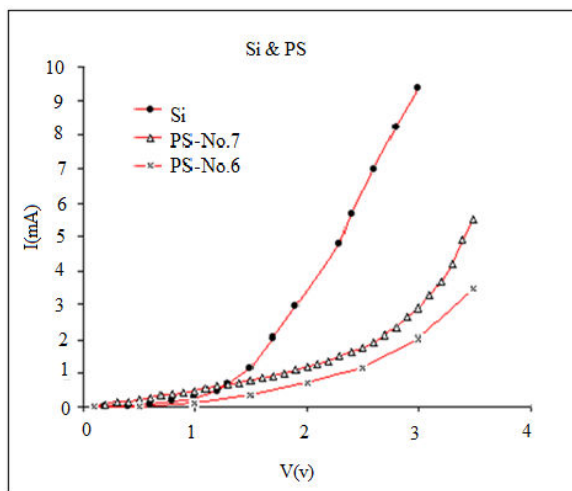
نمونه‌ای که در محیط اسیدی‌تر ساخته شود، بهتر متخلخل می‌شود. لذا هدایت الکتریکی آن کمتر است و به نظر می‌رسد گاف انرژی باید افزایش پیدا کرده باشد که این با آنچه از نمودار نشان می‌دهد تطابق دارد. هرچه PH محلول الکترولیت کمتر باشد گاف انرژی بیشتری به دست می‌آید.



شکل ۶. (b) نمودار اندازه‌گیری گاف انرژی نمونه بعد از تخلخل با PH=۲/۱۸۹



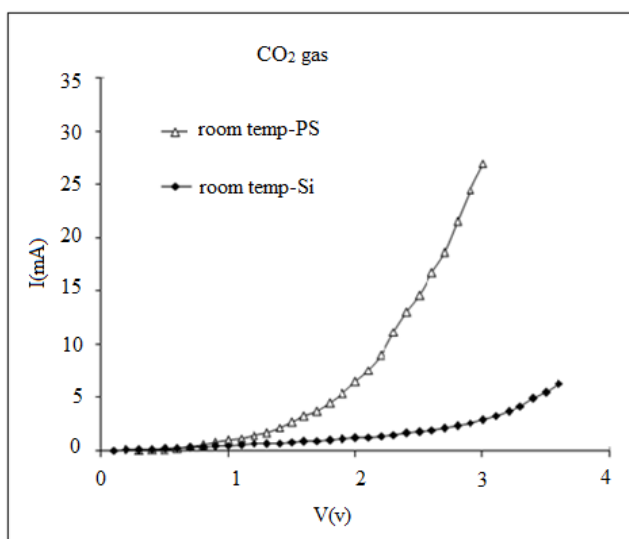
شکل ۶. (c) نمودار اندازه‌گیری گاف انرژی نمونه بعد از تخلخل با PH=۱/۸۶۹ مشاهده می‌شود که گاف انرژی در مقایسه با نمونه‌ای که با PH=۱/۸۶۹ تهیه شده افزایش پیدا کرده است یعنی نمونه بیشتر متخلخل شده



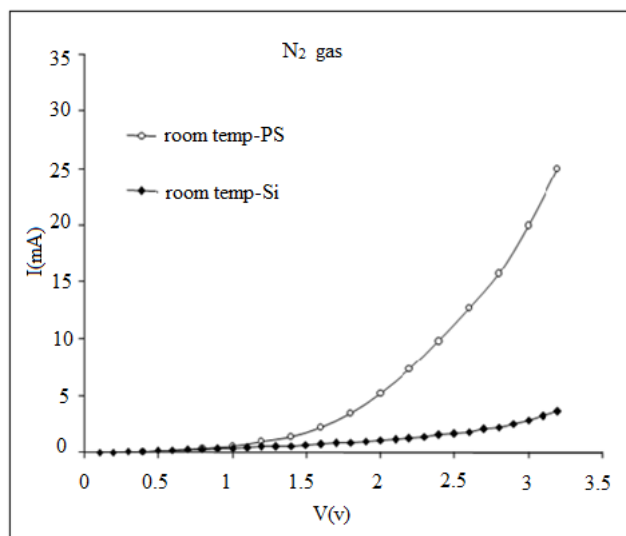
شکل ۷. نمایش اثر خوردگی بر رسانندگی نمونه‌ها. مشاهده می‌شود که پس از تخلخل رسانندگی نمونه‌ها کم می‌شود. این نتیجه با آنچه در شکل ۶ آمده است در تطابق است. هرچه گاه انرژی نمونه بیشتر باشد رسانندگی آن کمتر است.

### بررسی تغییر رفتار الکتریکی نمونه‌ها پس از اعمال گاز

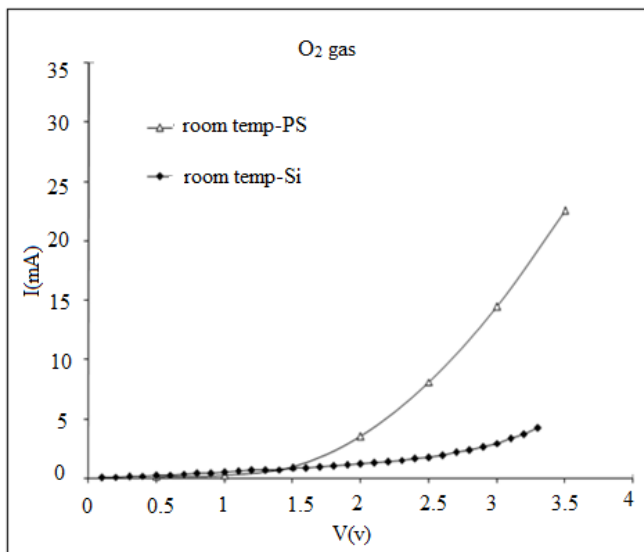
در شکل ۸ (a-c) نمودار شدت جریان- ولتاژ مربوط به نمونه‌ای که به‌طور تصادفی از بین نمونه‌ها انتخاب شده (نمونه ۵)، قبل و بعد از اعمال گازهای مختلف  $\text{CO}_2$ ،  $\text{N}_2$  و  $\text{O}_2$  آورده شده است. مشاهده می‌شود که پس از اعمال گاز، رسانندگی نمونه ۵ تا حد چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. این افزایش می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. به‌نظر می‌رسد به‌دلیل وجود پیوندهای معلق در سطح سیلیکان متخلخل پس از تخلخل، گاز عبوری از روی نمونه متخلخل شده به‌عنوان یک نوار ناخالصی بین نوار رسانش و ظرفیت عمل کرده و باعث کاهش انرژی فعال‌سازی نمونه و در نتیجه افزایش رسانندگی نمونه پس از اعمال گاز می‌شود. این اثر برای همه نمونه‌های آزمایش شده نتیجه یکسانی داشته است. شکل ۸ (a, b, c) این نتیجه را برای هر ۳ گاز آزمایش شده بر روی نمونه ۵ نشان می‌دهد. این نتیجه با [۵] مطابقت دارد.



شکل ۸. (a) رفتار الکتریکی نمونه ۵ (PS) پس از اعمال گاز  $\text{CO}_2$  در مقایسه با نمونه متخلخل نشده Si



شکل ۸. (b) رفتار الکتریکی نمونه ۵ (PS) پس از اعمال گاز  $\text{N}_2$  در مقایسه با نمونه متخلخل نشده Si

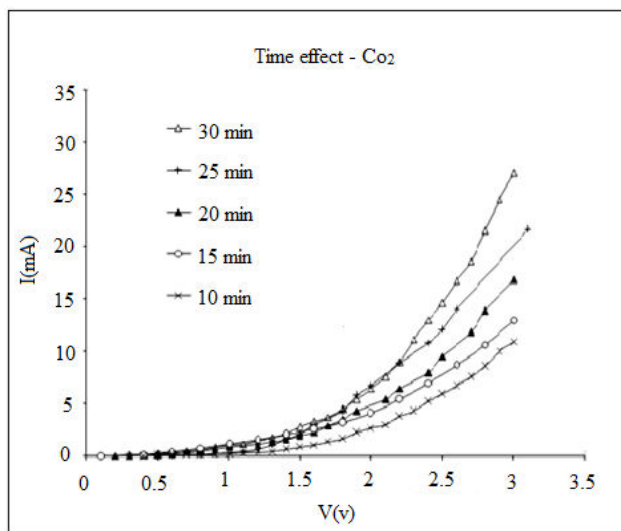


شکل ۸. رفتار الکتریکی نمونه ۵ (PS) پس از اعمال گاز  $O_2$  در مقایسه با نمونه متخلخل نشده Si

بررسی اثر شرایط ساخت نمونه‌ها بر حساسیت آن‌ها

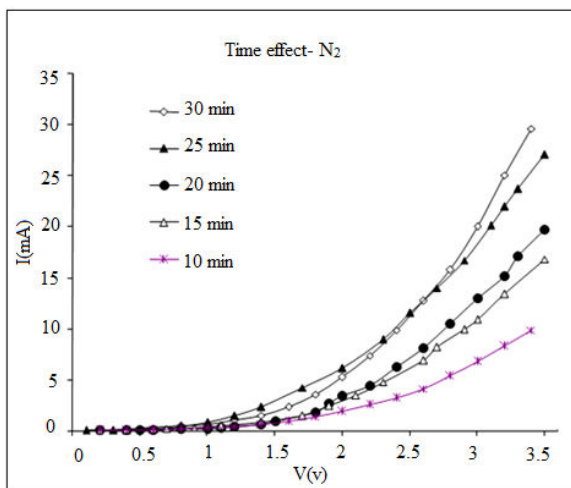
۱. اثر زمان آندی‌سازی:

در شکل ۹ (a-c) رفتار نمونه‌هایی که با شرایط یکسان و زمان آندی‌سازی متفاوت ساخته شده‌اند در برابر گازهای مختلف نشان داده می‌شود (نمونه‌های ۱ تا ۵). مشاهده می‌شود که در همه موارد نمونه‌هایی که با زمان آندی‌سازی بیش‌تری ساخته شده‌اند حساسیت بهتری نسبت به گاز از خود نشان می‌دهند. نتیجه این قسمت با [۴] و [۹] مطابقت دارد.

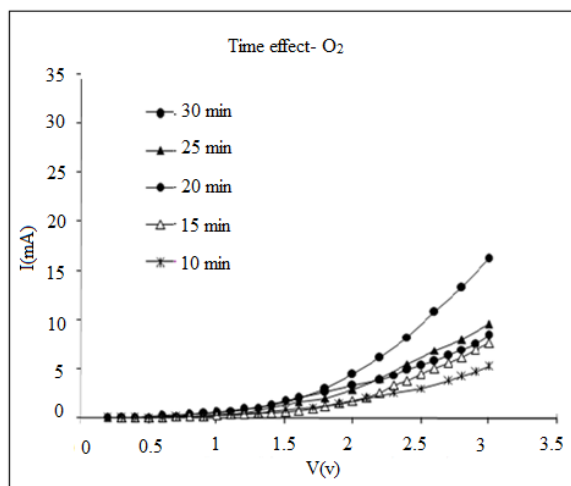


شکل ۹. اثر افزایش زمان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $CO_2$





شکل ۹. (b) اثر افزایش زمان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $N_2$

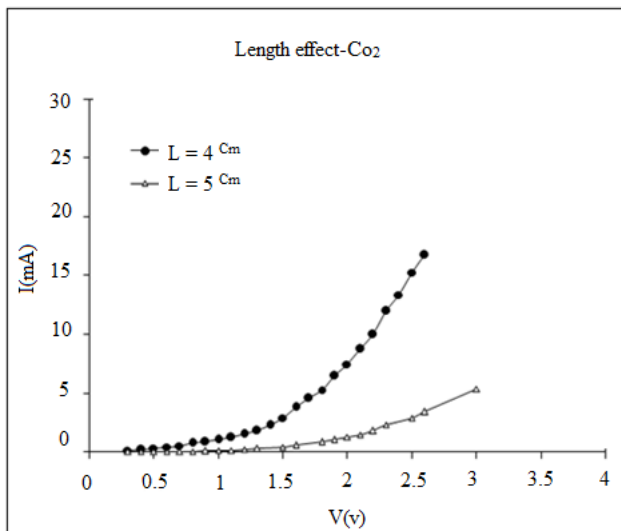


شکل ۹. (c) اثر افزایش زمان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $O_2$

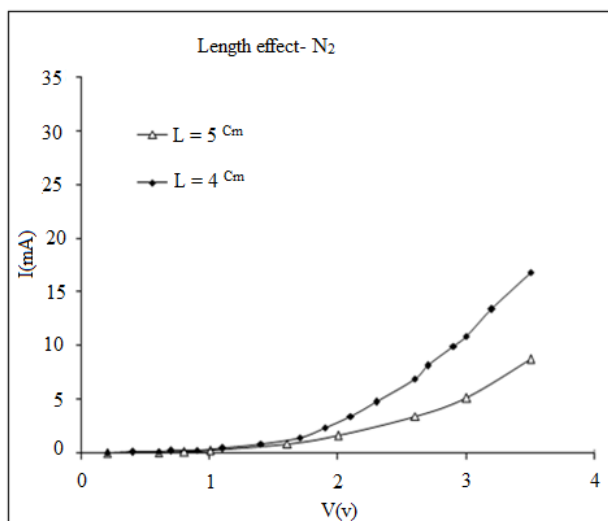
این نتیجه در اکثر موارد صحیح به نظر می‌رسد و در مواردی به دلیل افزایش بیش از حد زمان آندی‌سازی ممکن است نتیجه دقیقاً برعکس شود و این زمانی است که سطح سیلیکان به دلیل شکننده شدن ستون‌ها در اثر نازک شدن، تخریب شود، لذا با توجه به این‌که دیگر شرایط در نظر گرفته شده مانند چگالی جریان، غلظت محلول الکترولیت و فاصله بین آند و کاتد چگونه تعیین شده باشند، افزایش مدت زمان برای انجام خوردگی تا مقدار مشخصی امکان پذیر است.

## ۲. اثر فاصله بین آند و کاتد:

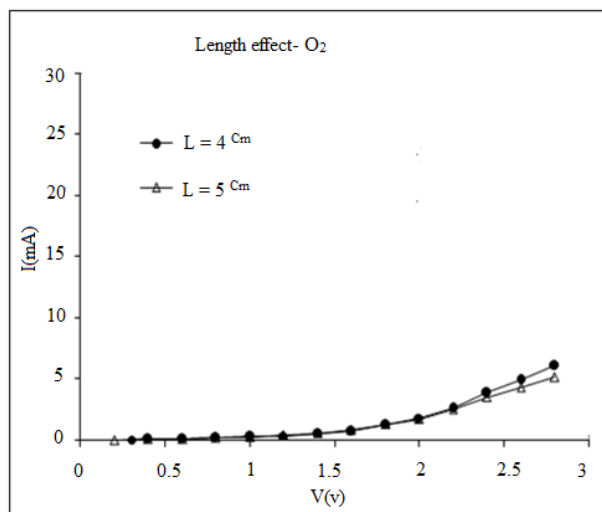
سلول ساخته شده چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، طوری تهیه شده که فاصله بین آنود و کاتود قابل تغییر باشد. برای طول‌های ۴ و ۵ سانتی‌متر منحنی جریان بر حسب ولتاژ نمونه‌ها در شکل ۱۰ (a-c) مقایسه شده است و از روی شیب نمودارها برای هر سه گاز می‌توان دریافت که هر چه این فاصله کمتر باشد نمونه بهتری به وجود می‌آید. زیرا در فواصل کم بین آنود و کاتود میدان یکنواخت‌تر و قوی‌تری ایجاد شده است. در نتیجه تعداد بیشتری مولکول گاز در سطح سیلیکان متخلخل گیر می‌افتند و جریان افزایش می‌یابد. این نتیجه در مورد حساسیت ساختار به هر سه گاز  $O_2$  و  $N_2$ ،  $CO_2$  صدق می‌کند.



شکل ۱۰. (a) اثر افزایش فاصله بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $\text{CO}_2$



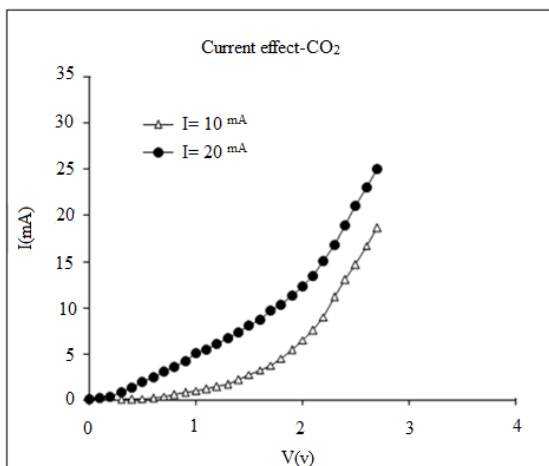
شکل ۱۰. (b) اثر افزایش فاصله بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $\text{N}_2$



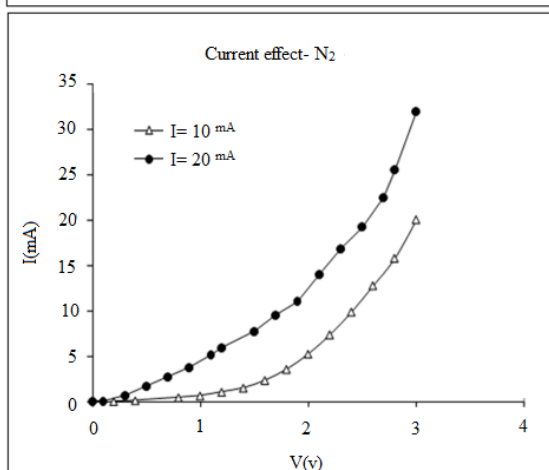
شکل ۱۰. (c) اثر افزایش فاصله بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز  $\text{O}_2$

### ۳ اثر چگالی جریان آندی‌سازی:

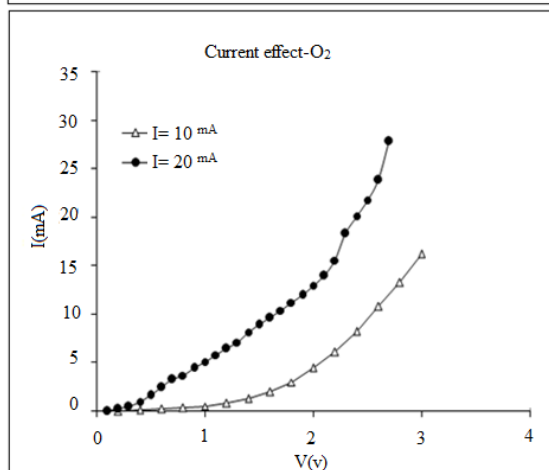
چنان‌که در شکل ۱۱ (a-c) آورده شده است، با افزایش چگالی جریان، جریان خوردگی الکتروشیمیایی، سیلیکان بیش‌تر متخلخل می‌شود و جریان تغییرات بیش‌تری از خود نشان خواهد داد. این اثر نیز مانند آنچه در قسمت الف مربوط به زمان آندی‌سازی گفته شد محدودیت دارد و چگالی جریان از حد معینی نباید فراتر رود.



شکل ۱۱. (a) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز CO<sub>2</sub>



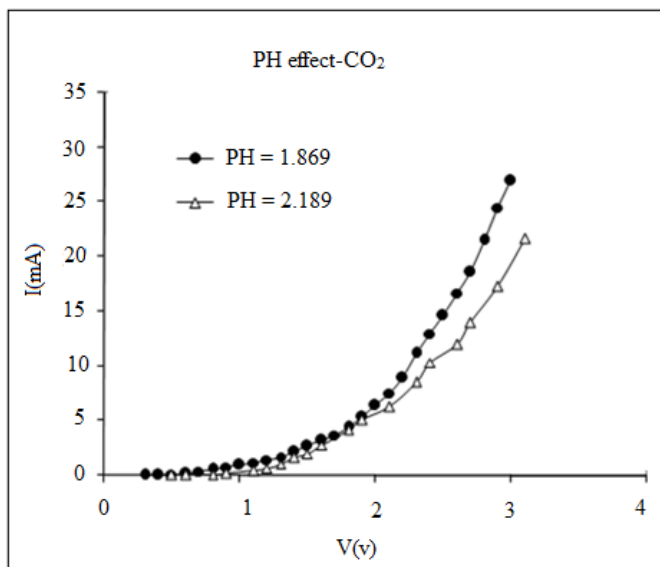
شکل ۱۱. (b) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز N<sub>2</sub>



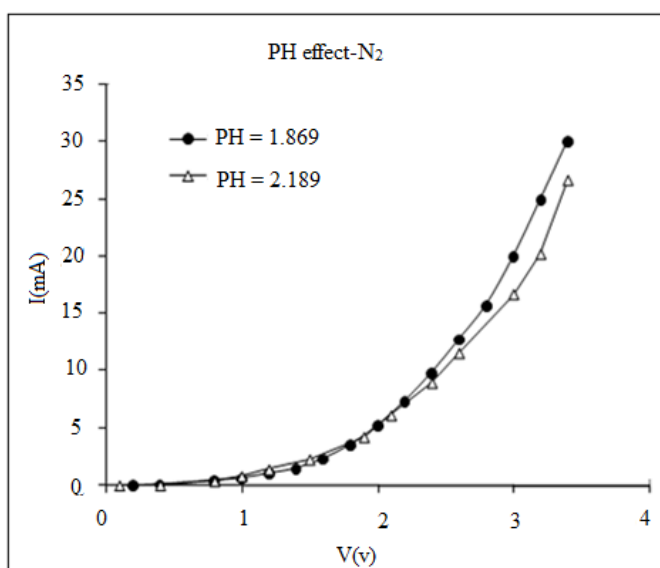
شکل ۱۱. (c) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O<sub>2</sub>

#### ۴ اثر PH محلول الکتروولیت:

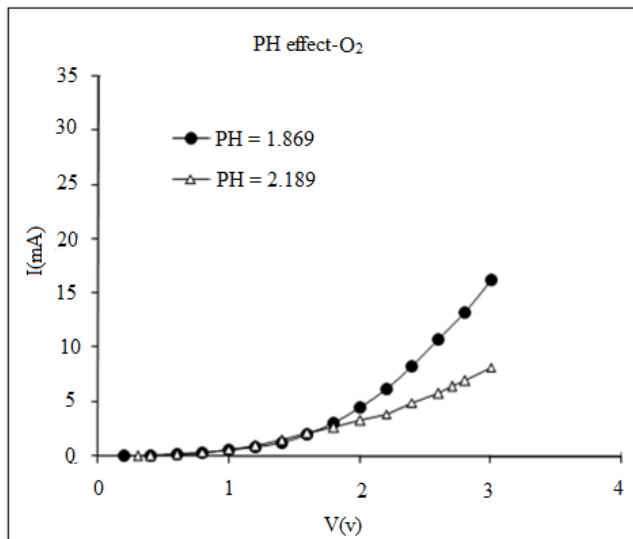
در این مرحله برای هر دو نمونه همه پارامترهای آنود کردن، غیر از نسبت اسید، الکل و آب (PH محلول) ثابت‌اند. با توجه به شکل ۱۲ (a-c) می‌توان نتیجه گرفت که هر چه PH محلول کمتر و محیط اسیدی‌تر باشد، سیلیکان بیش‌تر متخلخل می‌شود و مولکول‌های گاز بیش‌تری در داخل تخلخل‌ها جای می‌گیرند و افزایش مقدار یکسان ولتاژ، افزایش جریان بیش‌تری نسبت به نمونه دیگر خواهد داشت.



شکل ۱۲. (a) اثر کاهش PH محلول الکتروولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز CO<sub>2</sub>



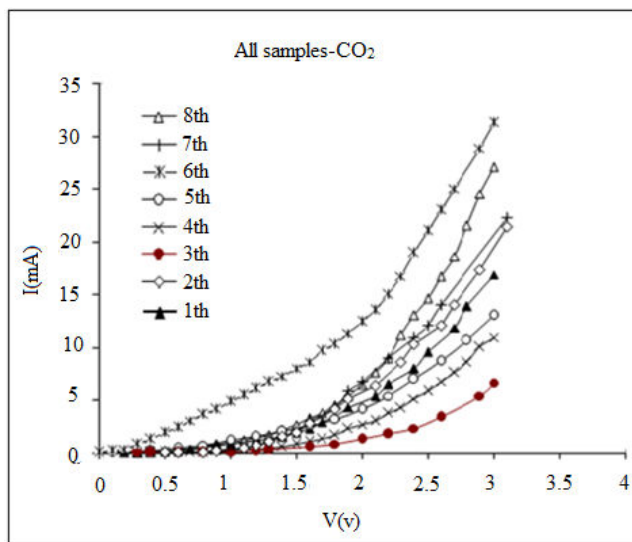
شکل ۱۲. (b) اثر کاهش PH محلول الکتروولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز N<sub>2</sub>



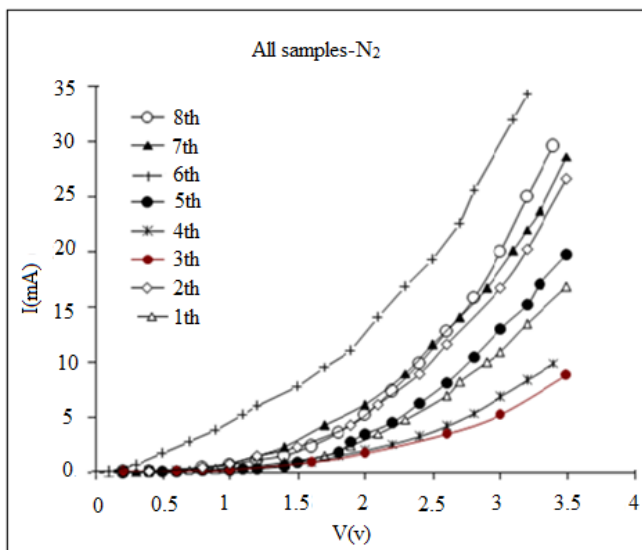
شکل ۱۲. c) اثر کاهش PH محلول الکترولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O<sub>2</sub>

### مقایسه حساسیت نمونه‌ها با یکدیگر

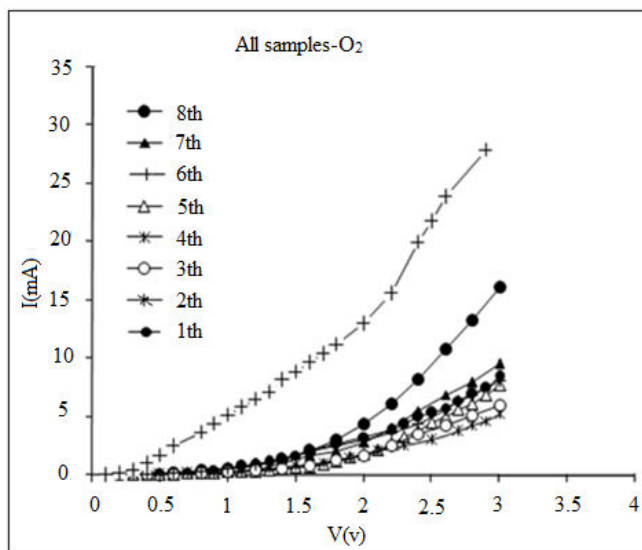
پس از اعمال شرایط مختلف در ساخت نمونه‌ها حال مقایسه‌ای روی حساسیت آن‌ها نسبت به گاز انجام می‌گیرد تا بهترین نمونه انتخاب شود. در شکل ۱۳ (a-c) نمودار I-V همه نمونه‌ها برای گاز CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> آورده شده است. بهترین قطعه از لحاظ پاسخ به اعمال گاز نمونه ۶ با چگالی جریان  $t = 1800, 20 \text{ mA/cm}^2$ ، PH = ۱/۸۶۹، S و فاصله بین آند و کاتد ۴ سانتی‌متر است که بیشترین تغییرات جریان را نسبت به نمونه‌های دیگر از خود نشان داده است. پس می‌توان از این نمونه به‌عنوان بهترین نمونه برای انجام مراحل بعدی آزمایش و ساخت نمونه‌های دیگر استفاده کرد.



شکل ۱۳. a) مقایسه اثر همه نمونه‌ها در برابر گاز CO<sub>2</sub>. مشاهده می‌شود که نمونه ۶ بهترین پاسخ را داشته است



شکل ۱۳. (b) مقایسه اثر همه نمونه‌ها در برابر گاز  $N_2$  مشاهده می‌شود که نمونه ۶ بهترین پاسخ را داشته است

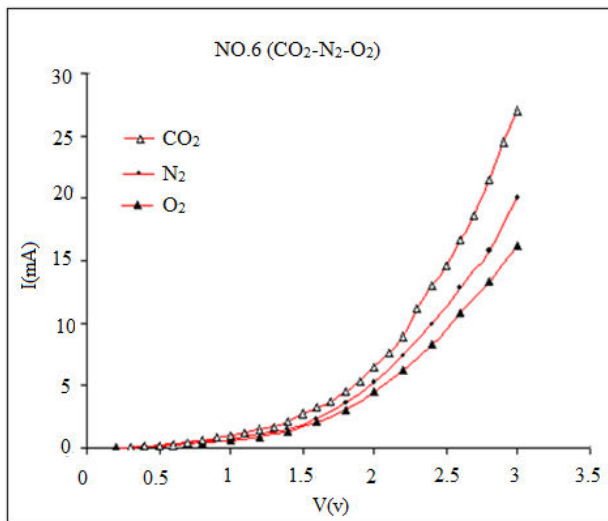


شکل ۱۳. (c) مقایسه اثر همه نمونه‌ها در برابر گاز  $O_2$  مشاهده می‌شود که نمونه ۶ بهترین پاسخ را داشته است

### بررسی اثر گازهای مختلف بر تغییرات شدت جریان

حال اثر گازهای مختلف  $O_2$  و  $N_2$ ،  $CO_2$  بر بهترین نمونه بررسی می‌شود. در شکل ۱۴ نمودار تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای بهترین نمونه، برای هر ۳ گاز  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $O_2$  رسم شده است (برای نمونه ۶). بیش‌ترین تغییرات جریان با اعمال گاز، مربوط به گاز  $CO_2$  است. نیز پاسخ نمونه به گاز  $N_2$  بهتر از  $O_2$  است و ترتیب حساسیت نمونه به گازهای اعمال شده به صورت  $O_2 < N_2 < CO_2$  است. می‌توان این رفتار را به نوع گاز و چگونگی ساخت نمونه وابسته کرد. در این قسمت از یک نمونه برای انجام آزمایش استفاده شده است، پس عامل مؤثر در حساسیت و تغییر جریان در این بخش به نوع گاز مورد آزمایش بستگی دارد. پس یکی از عوامل مؤثر در افزایش حساسیت می‌تواند قطر مولکول‌های گاز باشد. اگرچه به نظر می‌رسد که  $O_2$  و  $N_2$  مولکول‌هایی

تقریباً هم‌اندازه داشته باشند، حقیقت این است که قطر مولکول  $N_2$  کمی بیش‌تر از  $O_2$  است [۱۰]، همچنین قطر مولکول  $CO_2$  از  $O_2$  بزرگ‌تر است. می‌توان گفت در افزایش رسانندگی نمونه نسبت به یک گاز بعد از چگونگی ساخت نمونه که تأثیر به‌سزایی در اندازه تخلخل‌های ایجاد شده در سطح دارد، نوع گاز و اندازه قطر مولکول‌ها دومین عامل مؤثر خواهد بود. نتایج به‌دست آمده در این قسمت ما را به شرایط ساخت قطعه‌ای که می‌تواند برای حس‌گر گاز  $CO_2$  به کار رود نزدیک‌تر کند.



شکل ۱۴. مقایسه اثر گازهای  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $O_2$  بر افزایش شدت جریان برای نمونه ۶

### نتایج

در این پژوهش رفتار الکتریکی ساختار  $Cu/Si/PS/Au$  را برای شرایط مختلف بررسی کرده و دریافتیم که رسانندگی نمونه‌ها پس از متخلخل شدن، به‌دلیل افزایش گاف انرژی ساختار کاهش پیدا می‌کند اما پس از اعمال گاز، رسانندگی افزایش می‌یابد که این نتیجه را می‌توان ناشی از ایجاد یک تراز ناخالصی بین تراز ظرفیت و رسانش در داخل نوار ممنوعه دانست که باعث کاهش انرژی فعال‌سازی و در نتیجه کاهش گاف انرژی خواهد شد. به‌نظر می‌رسد شرایط ساخت نمونه اولین و مهم‌ترین عامل دست‌یابی ما به حس‌گر گاز است. در این کار پارامترهای مختلفی چون چگالی جریان و فاصله بین آند و کاتد، غلظت محلول الکترولیت و مدت زمان آندی‌سازی را در ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد و شرایط ساخت نمونه‌ها و اثر گازهای مختلف  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $O_2$  در حساسیت آن‌ها سنجیده شد. نمونه‌ای که با شرایط چگالی جریان  $20 \text{ mA/cm}^2$ ،  $t = 1800 \text{ S}$ ،  $PH = 1/869$  و فاصله بین آند و کاتد ۴ سانتی‌متر تهیه شده است، به‌عنوان بهترین نمونه از نظر پاسخ به گازها انتخاب شد و با اعمال ۳ گاز  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $O_2$  روی نمونه، دریافتیم که در بین این ۳ گاز  $CO_2$  بهترین پاسخ را نسبت به  $N_2$  و  $O_2$  دارد. پس می‌توان در کارهای بعدی از مشخصات این نمونه در ساخت حس‌گر گاز  $CO_2$  استفاده کرد.

## منابع

1. N. Gabouze, S. Belhousse, H. Cheraga, N. Ghellai, Y. Ouadah, Y. Belkacem, A. Keffous, "CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> detection with a CH<sub>x</sub>/porous silicon-based sensor", Vacuum 80 (2006) 986-989.
2. M. Ben-Chorin, A. Kux, I. Schechter, "Adsorbate effects on photoluminescence and electrical conductivity of porous silicon", Appl., Phys., Lett. 64 (1994) 481-483.
3. F. Moller, M. Ben-Chorin, F. Koch, "Post treatment effects on electrical conduction in porous silicon", Thin Solid Films 255 (1995) 16-19.
4. N. Liu, H. Z.Chen, M. Wang, "Heterojunctions based on perylene diimide embedded into porous silicon", Thin Solid Films 516 (2008) 4272-4276.
5. S. Khoshnevis, R. S. Dariani, M. E. Azim-Araghi, Z. Bayindir, K. Robbie, "Observation of oxygen gas effect on porous silicon-based sensors", Thin Solid Films. 515 (2006) 2650-2654.
6. D. Stievenard, D. Deresmes, "Electrical behavior of aluminum-porous silicon junction", Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 1570.
7. A. Foucaran, F. Pascal-Delannoy, A. Giani, A. Sakda, P. Combette, A. Boyer, "Porous silicon layers used for gas sensor applications", Thin Solid Films 297, (1997) 317-320.
8. J. W. Precker, M. A. Silva, J. Phys. 70 (11) (2002) 1150.
9. C. K. Sheng, W. M. M. Yunus, Z. W. Yunus, Z. A. Talib, A. Kassim, "Investigation of hydrocarbon coated porous silicon using PECVD technique to detect CO<sub>2</sub> gas", Physica B 403 (2008) 2634.
10. [www.getnitrogen.org/pdf/graham.pdf](http://www.getnitrogen.org/pdf/graham.pdf).