تاریخ چاپ: پاییز ۱۳۹۱

بررسی خواص الکتریکی نمونه‌های ساندویچی (Cu/Si/PS/Au) به منظور ساخت حس‌گر گازهای CO_2، N_2 و O_2

محمداسماعیل عظیم‌عراقی: دانشگاه خوارزمی
*حمیده اسکندری تربقان: دانشگاه آزاد اسلامی- واحد کاشمر، باشگاه پژوهش‌گران جوان

چکیده

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر حس‌گری گاز و رفتار الکتریکی نمونه‌های ساندویچی برپایهٔ سیلیکان متخلخل (PS) با ساختار Cu/Si/PS/Au انجام شده است. لایه‌های نازك PS به روش الکتروشیمیایی از زیر لایهٔ سیلیکان با مقاومت ویژه Ωcm 1.4-2.6 ساخته می‌شوند . پارامترهای قابل تغییر در ساخت نمونه‌ها، زمان آندی‌سازی، فاصلهٔ بین آند و کاتد(L) و چگالی جریان آنودی‌سازی و غلظت محلول الکترولیت هستند که محلول الکترولیت شامل اسیدهیدروفلوریك HF(48%) ، اتانول C_2H_5OH(99.9%) و آب‌مقطر 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_2,N_2,O_2 اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند. بهترین شرایط از لحاظ پاسخ به اعمال گاز متعلق به پارامترهای: چگالی جریان $20\ mA/cm^2$، t = 1800 S، PH = 1.869 و فاصله بین آند و کاتد L=4 cm است.

مقدمه

شناسایی و کنترل گازهایی نظیر CO_2,N_2,O_2,CH_4 که ممکن است خطرناك، 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 یك ماده، تنها لایهٔ نازکی از سطح ماده (در حدود چند نانومتر) با گاز برهم‌کنش می‌کند و تودهٔ باقی‌مانده هیچ تماسی با گاز ندارد. بنا بر این برای استفاده از مواد به عنوان حس‌گر لازم است مادهٔ مورد نظر به‌صورت لایهٔ نازك 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 هرقدر سطح مؤثر بیش‌تر باشد، مکان‌های بیش‌تری برای برخورد گاز با سطح وجود دارد. سیلیکان متخلخل (PS) به‌دلیل 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 نیم‌رسانای دیگر هستند.

واژه‌های کلیدی: سیلیسیم متخلخل، حس‌گر گاز N_2، گاف انرژی
دریافت ۸۹/۸/۱۲ پذیرش۹۰/۹/۱۳
*نویسنده مسئول eskandari_humd@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

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 زیرلایهٔ سیلیکان ساخته می‌شود. در روش شیمیایی زیرلایه در یك محلول شامل اسید HF ، اسیدنیتریك 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 مشخصهٔ تخلخل و ضخامت، قابلیت بازتولید خوبی از یك مرحله به مرحلهٔ 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: ۱چگالی جریان آنودی‌سازی، ۲ غلظت محلول الکترولیت، ۳ زمان آندی‌سازی و... که با تغییر هر یک نمونهٔ 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].

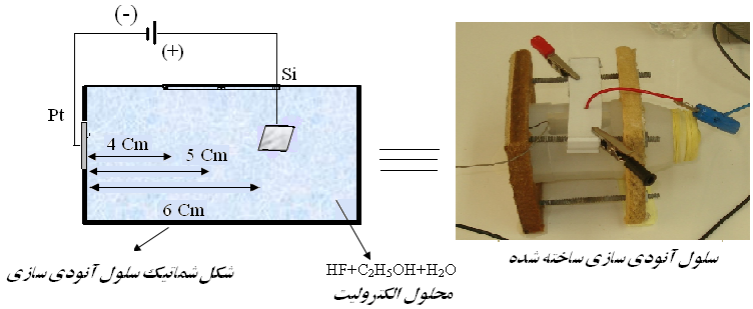
هر قطعه‌ای که به یك محرك (نظیر نور، گرما، صوت، فشار یا یك حرکت خاص فیزیکی یا شیمیایی) پاسخ می‌دهد و پیغامی را می‌فرستد، حس‌گر نامیده می‌شود. بنا بر این یك حس‌گر می‌تواند پیغامی را که احساس انسان قادر به درك مستقیم آن‌ها نیست و باید اندازه‌گیری شود، دریافت کند و آن را به یك خروجی مناسب مثلاً یك کمیت الکتریکی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

در این پژوهش رفتار الکتریکی لایه‌های نازك 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.

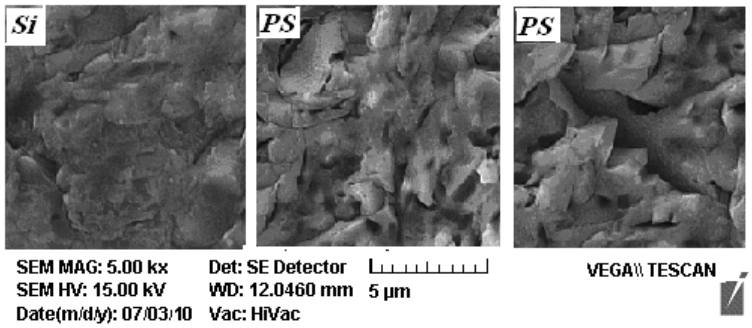
مراحل ساخت نمونه

در این کار یکی از سطوح ویفرسیلیکان نوع P با مقاومت ویژه $1.4\text{-}2.6\ \Omega cm$ را به روش تبخیر حرارتی با یك لایهٔ نازك 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 هیدروفلوریك HF (۴۸%)، اتانول C_2H_5OH (۹۹/۹%) و آب مقطر است. فاصلهٔ بین آنود و کاتود بین ۴-۶ سانتی‌متر، جریان آنودی‌سازی $۱۰mA/cm^2$ تا $۲۰mA/cm^2$ و زمان‌های آنودی‌سازی را بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه تغییر می‌دهیم و بقیهٔ شرایط یك‌سان 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

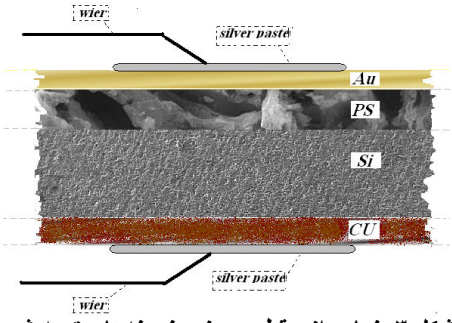


شکل ۱. سلول الکتروشیمیایی ساخته شده برای متخلخل کردن سیلیکان و نمای داخل آن به صورت شماتیك



شکل۲. تصاویر SEM نمونه‌ها قبل و بعد از انجام عمل خوردگی

پس انجام عملیات سونش، یك لایه طلا برای ایجاد تماس اهمیك روی لایهٔ متخلخل شده- به روش تبخیر حرارتی در فشار ۸×۱۰^{-۵} *mBar* نشانده می‌شود. همچنین سیم‌های مسی نازکی به‌وسیلهٔ چسب نقره بر روی لایه‌های مس و طلا چسبانده می‌شوند. در نهایت قطع، مورد نظر به‌صورت شکل ۳ خواهد بود.



شکل ۳. نمایی از مقطع عرضی نمونه‌های تهیه شده

جدول ۱. مشخصات و شرایط تهیهٔ نمونه‌ها

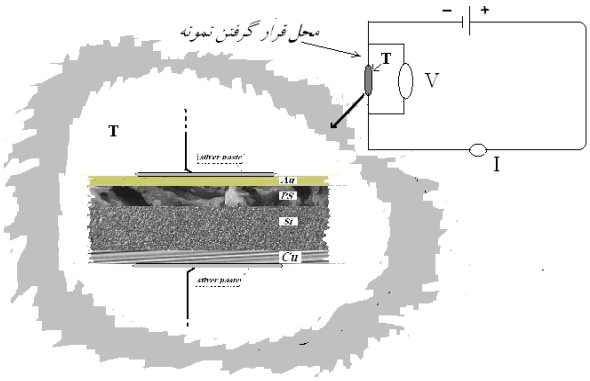
شمارهٔ نمونه	چگالی جریان (mA/cm^2)	غلظت الکترولیت $HF:EtOH:H_2O$	زمان (S)	PH	فاصلهٔ بین آند و کاتد (cm)
1	۱۰	۱:۲:۱	۶۰۰	۱.۸۶۹	۴
۲	۱۰	۱:۲:۱	۹۰۰	۱.۸۶۹	۴
۳	۱۰	۱:۲:۱	۱۲۰۰	۱.۸۶۹	۴
۴	۱۰	۱:۲:۱	۱۵۰۰	۱.۸۶۹	۴
۵	۱۰	۱:۲:۱	۱۸۰۰	۱.۸۶۹	۴
6	۲۰	۱:۲:۱	۱۸۰۰	۱.۸۶۹	۴
۷	۱۰	۱:۲:۲	۱۸۰۰	۲.۱۸۹	۴
۸	۱۰	۱:۲:۱	۹۰۰	۱.۸۶۹	۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

مشخصات و شرایط ساخت نمونه در جدول۱ آورده شده است.

نمونه‌ها در یك سلول آلومینیومی به ابعاد ۱۰×۱۰×۲۰ سانتی‌متر ثابت شده و در مداری 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 V ۰/۱ تغییر داده و شدت جریان عبوری در هر حالت اندازه‌گیری می‌شود. در این اندازه‌گیری باید حتماً از اعمال ولتاژ مستقیم[۱] استفاده شود تا بتوان تغییرات جریان را ثبت کرد، زیرا در اعمال ولتاژ معکوس[۲] 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

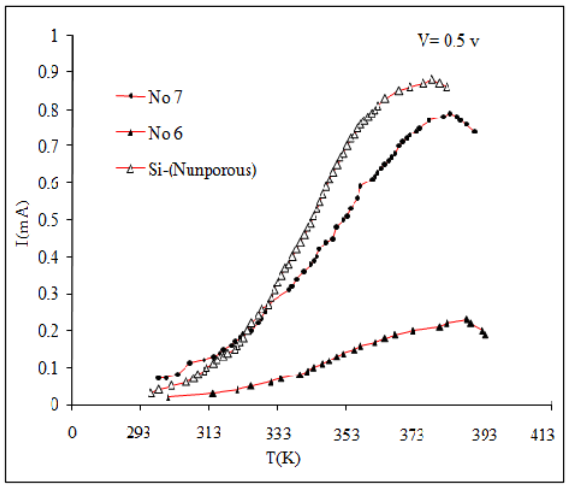
در این قسمت، با ثابت نگه داشتن ولتاژ، تغییرات شدت جریان بر حسب دما اندازه‌گیری می‌شود. قبل از گرمادهی ابتدا ولتاژ به‌صورت کنترل شده و با گام‌های بسیار کوچك افزایش داده می‌شود تا جریان شروع به افزایش کند، سپس ولتاژ ثابت نگه داشته شده و دما کم کم افزایش داده می‌شود. این افزایش جریان ثبت می‌گردد. با توجه به نمودار I-T شکل ۵، برای دو نمونهٔ ۶ و ۷ که با شرایط متفاوت تهیه شده‌اند، مشاهده می‌شود که افزایش دما فقط تا مقدار مشخصی افزایش جریان را به‌همراه خواهد داشت. حد بالای دما برای نمونه‌های با شرایط ساخت مختلف، متفاوت است، اما برای همهٔ نمونه‌ها تا دمای مشخصی افزایش جریان و از آن به بعد کاهش جریان خواهیم داشت. برای همین دو نمونه و نمونهٔ متخلخل نشده در شرایط یکسان، در ولتاژ ثابت۰/۵V نمودار $Ln(I) - 1/T$ را رسم کرده و با توجه به رابطهٔ (۱) از روی شیب نمودار گاف انرژی نمونه‌ها را محاسبه می‌کنیم (شکل ۶ a-c).

۱. forward bias ۲. reverse bias

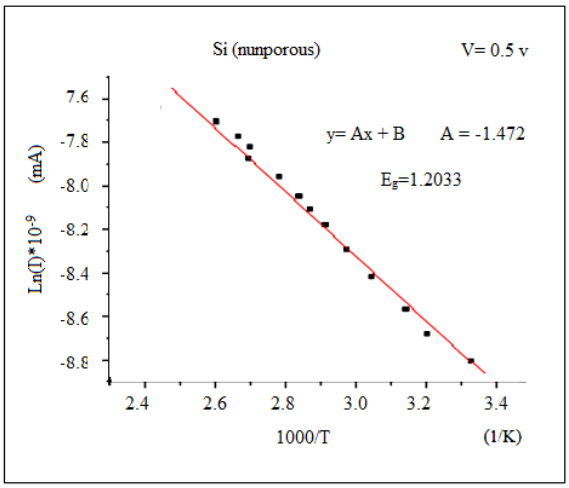
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

$$I = B\exp(\frac{-E_g + eV}{k_B T}) \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا B با توان ۳ از درجه حرارت به‌صورت $T^{3+\gamma/2}$ وابسته است، اما چون ترم نمایی خیلی سریع‌تر افزایش پیدا می‌کند، در برابر وابستگی نمایی جریان به دما می‌توان از تغییرات مربوط به جمله $T^{3+\gamma/2}$ 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 به‌خوبی توجیه کرد. بعد از متخلخل شدن نمونه همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سطح مؤثر نمونهٔ 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 و۷ در مقایسه با قبل از تخلخل نیز می‌توان مشاهده کرد (شکل ۷).



شکل ۵. نمایش تغییرات جریان با دما برای دو نمونه ۶ و۷ و نمونه متخلخل نشده در ولتاژ V=۰/۵ مشاهده می‌شود که رسانندگی نمونه پس از تخلخل کاهش پیداکرده است

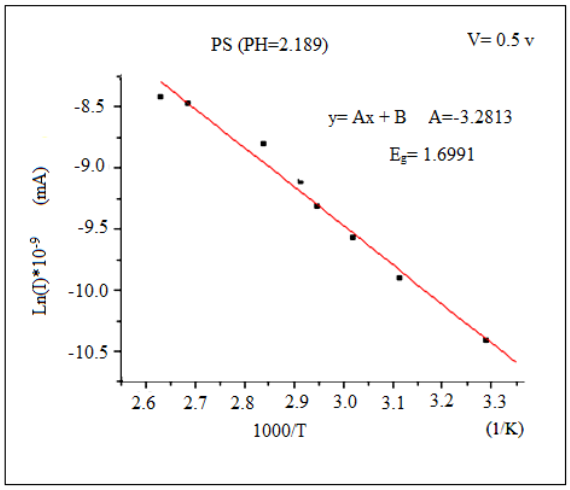


شکل ۶. a) نمودار اندازه‌گیری گاف انرژی نمونه قبل از تخلخل. گاف انرژی محاسبه شده برابر با ۱/۲۰۳۳ است

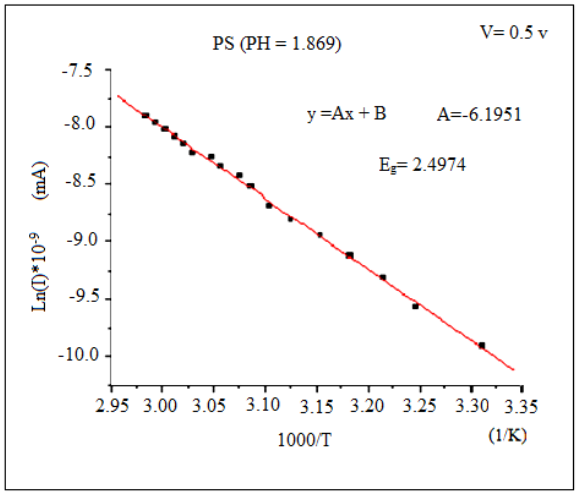
سه نمونهٔ آورده شده شامل دو نمونهٔ متخلخل نشده است. گاف انرژی نمونهٔ متخلخل نشده یعنی شکل ۶ a برابر۱/۲۰۳ به‌دست آمده است که از گاف انرژی دو نمونهٔ متخلخل شدهٔ دیگر کم‌تر است. شکل ۶ c نمونه‌ای است که با غلظت محلول الکترولیت کم‌تر (محیط اسیدی‌تر) متخلخل شده است. با توجه به آن‌چه قبلا گفته شد،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

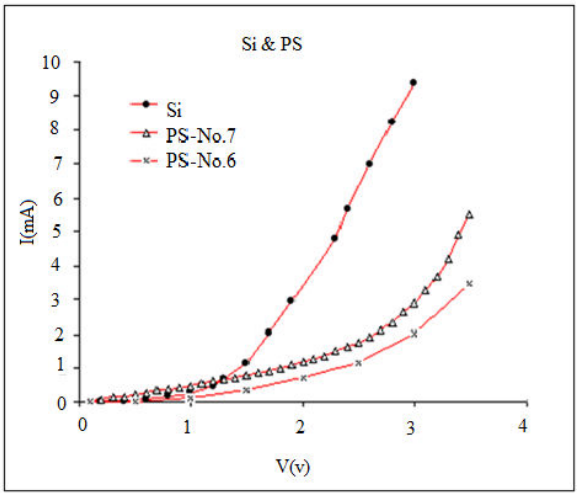
نمونه‌ای که در محیط اسیدی‌تر ساخته شود، بهتر متخلخل می‌شود. لذا هدایت الکتریکی آن کمتر است و به‌نظر می‌رسد گاف انرژی باید افزایش پیدا کرده باشد که این با آن‌چه از نمودار نشان می‌دهد تطابق دارد. هرچه PH محلول الکترولیت کمتر باشد گاف انرژی بیش‌تری به‌دست می‌آید.



شکل۶. b) نمودار اندازه‌گیری گاف انرژی نمونه بعد از تخلخل با PH=۲/۱۸۹



شکل۶. 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 نمونهٔ بیش‌تر متخلخل شده

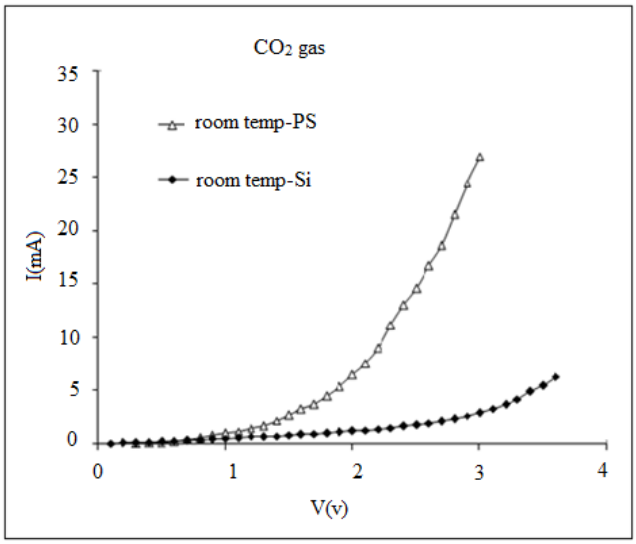


شکل ۷. نمایش اثر خوردگی بر رسانندگی نمونه‌ها. مشاهده می‌شود که پس از تخلخل رسانندگی نمونه‌ها کم می‌شود. این نتیجه با آنچه در شکل ۶ آمده است در تطابق است. هرچه گاه انرژی نمونه بیش‌تر باشد رسانندگی آن کمتر است.

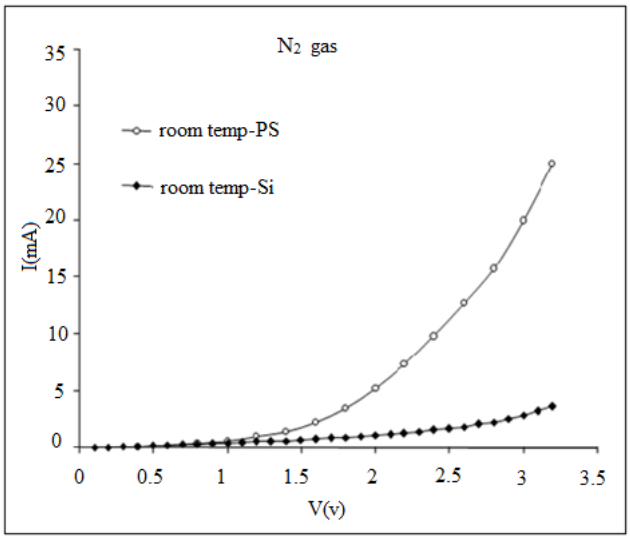
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

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 (نمونهٔ ۵)، قبل و بعد از اعمال گازهای مختلف Co_2 ، N_2 و O_2 آورده شده است. مشاهده می‌شود که پس از اعمال گاز، رسانندگی نمونهٔ 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 نمونهٔ متخلخل شده به‌عنوان یك 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 همهٔ نمونه‌های آزمایش شده نتیجه یك‌سانی داشته است. شکل ۸ (a, b, c) این نتیجه را برای هر ۳ گاز آزمایش شده برروی نمونهٔ ۵ نشان می‌دهد. این نتیجه با [۵] مطابقت دارد.

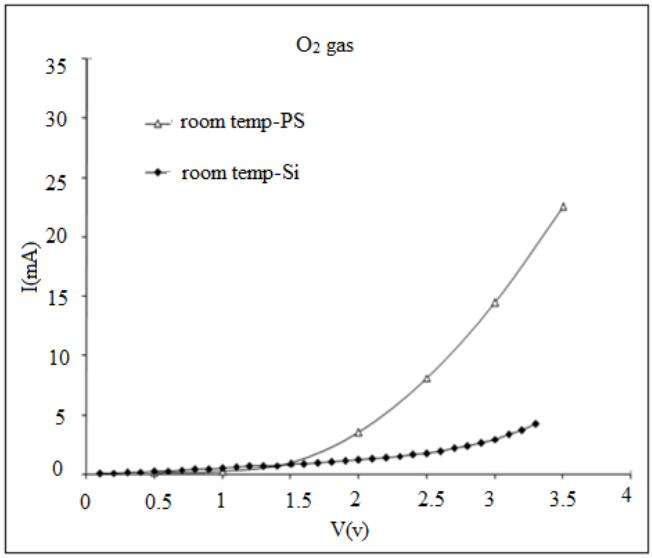


شکل ۸. a) رفتار الکتریکی نمونهٔ ۵ (PS) پس از اعمال گاز Co_2 در مقایسه با نمونهٔ متخلخل نشده Si



شکل ۸.b) رفتار الکتریکی نمونهٔ ۵ (PS) پس از اعمال گاز N_2 در مقایسه با نمونهٔ متخلخل نشده Si

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

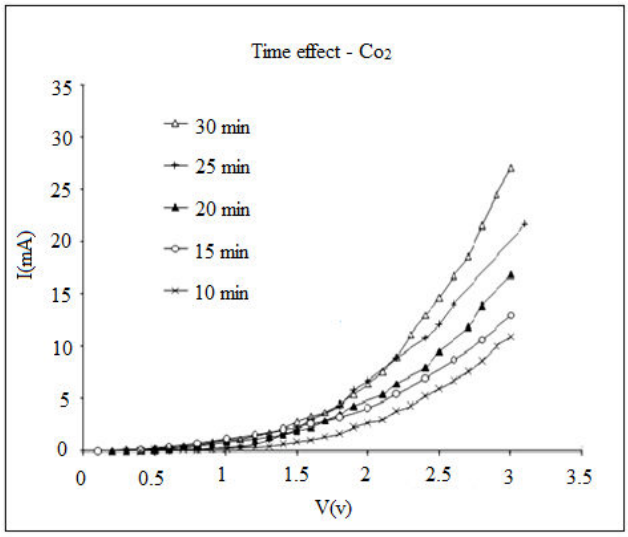


شکل ۸. c) رفتار الکتریکی نمونهٔ ۵ (PS) پس از اعمال گاز O_2 در مقایسه با نمونهٔ متخلخل نشده Si

بررسی اثر شرایط ساخت نمونه‌ها بر حساسیت آن‌ها

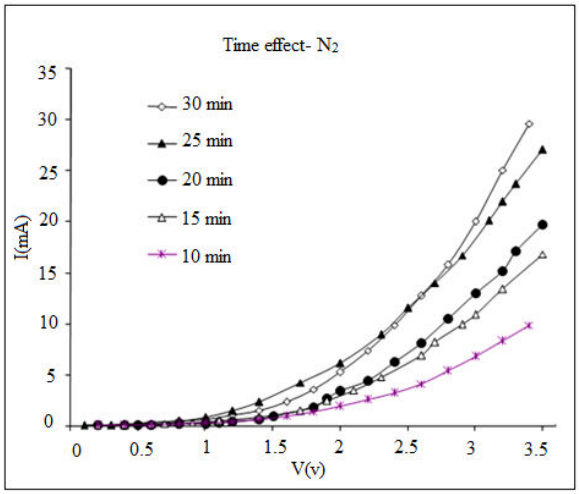
۱. اثر زمان آندی‌سازی:

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

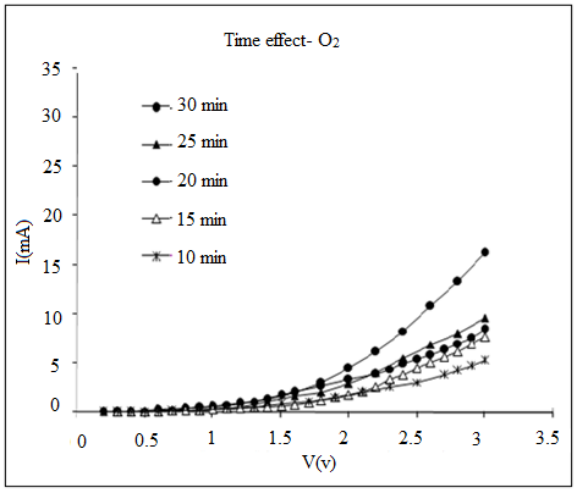


شکل ۹.a) اثر افزایش زمان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز Co_2

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



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



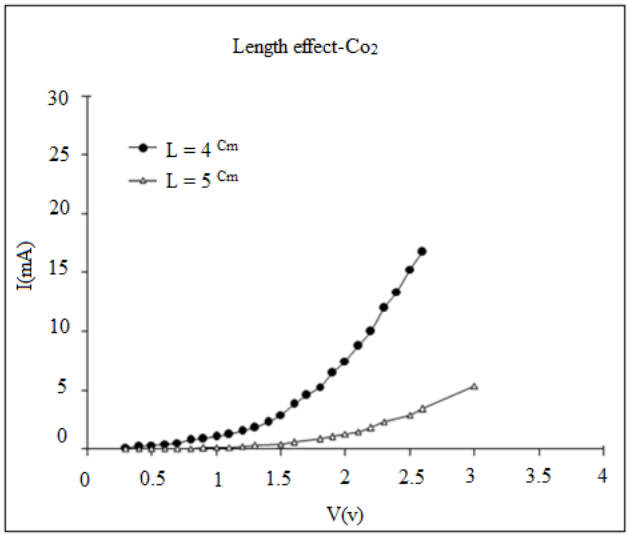
شکل ۹. c) اثر افزایش زمان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O_2

این نتیجه در اکثر موارد صحیح به نظر می‌رسد و در مواردی به‌دلیل افزایش بیش از حد زمان آنودی‌سازی ممکن است نتیجه دقیقاً برعکس شود و این زمانی است که سطح سیلیکان به‌دلیل 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 الکترویت و فاصلهٔ بین آند و کاتد چگونه تعیین شده باشند، افزایش مدت زمان برای انجام خوردگی تا مقدار مشخصی امکان پذیر است.

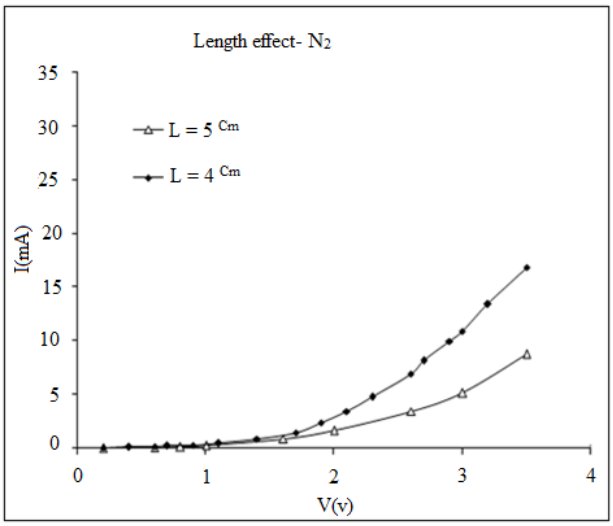
۲. اثر فاصلهٔ بین آند و کاتد:

سلول ساخته شده چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، طوری تهیه شده که فاصلهٔ بین آنود و کاتود قابل تغییر باشد. برای طول‌های ٤ و ٥ 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 نمونهٔ بهتری به‌وجود می‌آید. زیرا در فواصل کم بین آنود و کاتود میدان یکنواخت‌تر وقوی‌تری ایجاد شده است. درنتیجه تعداد بیش‌تری مولکول گاز در سطح سیلیکان متخلخل گیر می‌افتند و جریان افزایش می‌یابد. این نتیجه در مورد حساسیت ساختار به هر سه گاز Co_2 ، N_2 و O_2 صدق می‌کند.

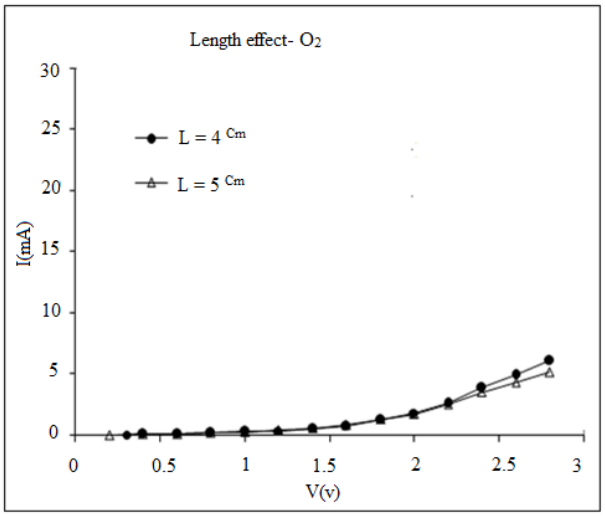
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۱۰. a) اثر افزایش فاصلهٔ بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز Co_2



شکل ۱۰. b) اثر افزایش فاصلهٔ بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز N_2

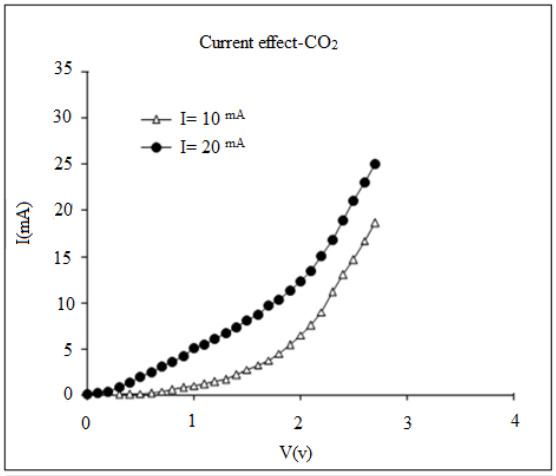


شکل ۱۰. c) اثر افزایش فاصلهٔ بین آند و کاتد بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O_2

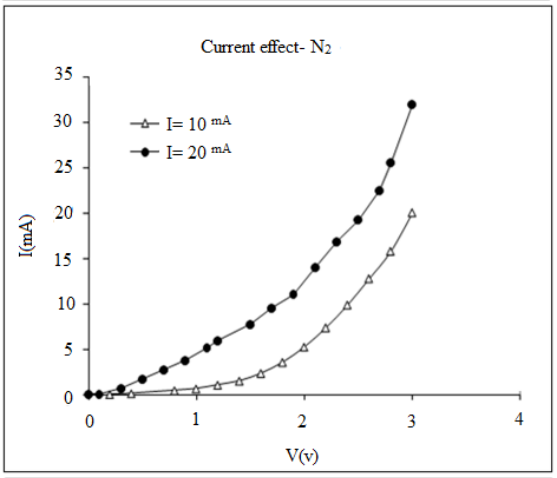
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

۳ اثر چگالی جریان آندی‌سازی:

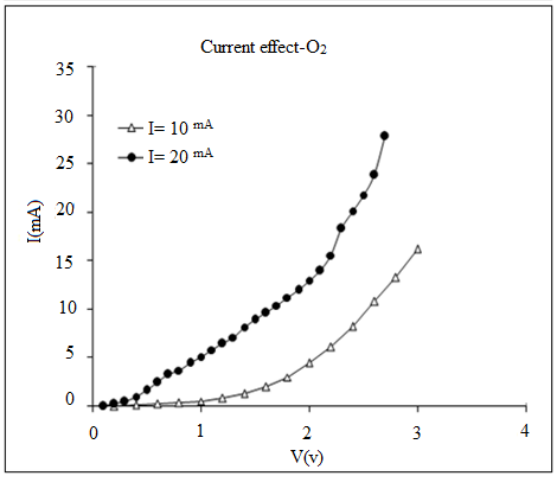
چنان‌که در شکل ۱۱(a-c) آورده شده است، با افزایش چگالی جریان، جریان خوردگی الکتروشیمیایی، سیلیکان بیش‌تر متخلخل می‌شود و جریان تغییرات بیش‌تری از خود نشان خواهد داد. این اثر نیز مانند آن‌چه در قسمت الف مربوط به زمان آندی‌سازی گفته شد محدودیت دارد و چگالی جریان از حد معینی نباید فراتر رود.



شکل ۱۱. a) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز Co_2



شکل ۱۱. b) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز N_2

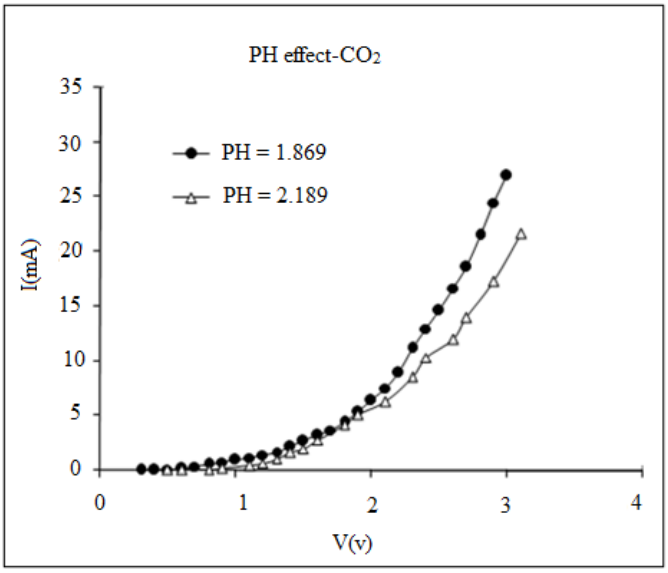


شکل ۱۱. c) اثر افزایش جریان آندی‌سازی بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O_2

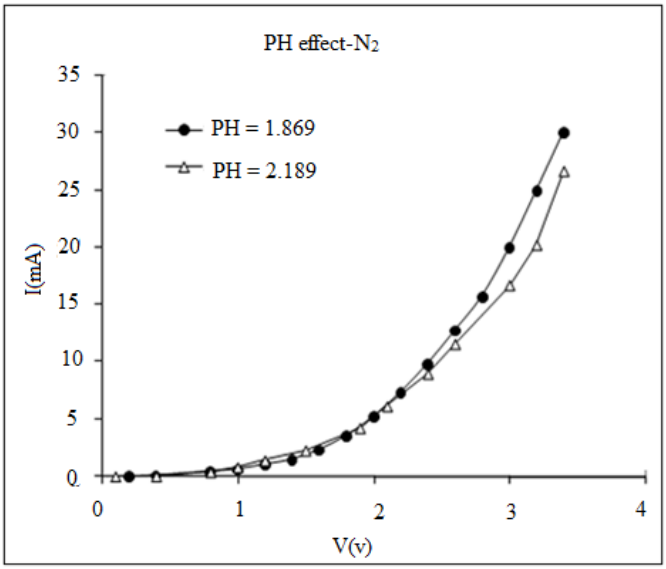
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

۴ اثر PH محلول الکترولیت:

دراین مرحله برای هر دو نمونه همهٔ 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 نمونهٔ دیگر خواهد داشت.

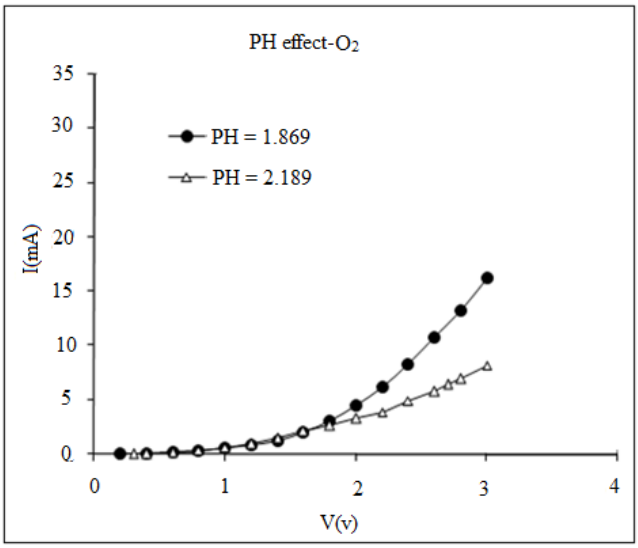


شکل ۱۲. a) اثر کاهش PH محلول الکترولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز Co_2



شکل ۱۲. b) اثر کاهش PH محلول الکترولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز N_2

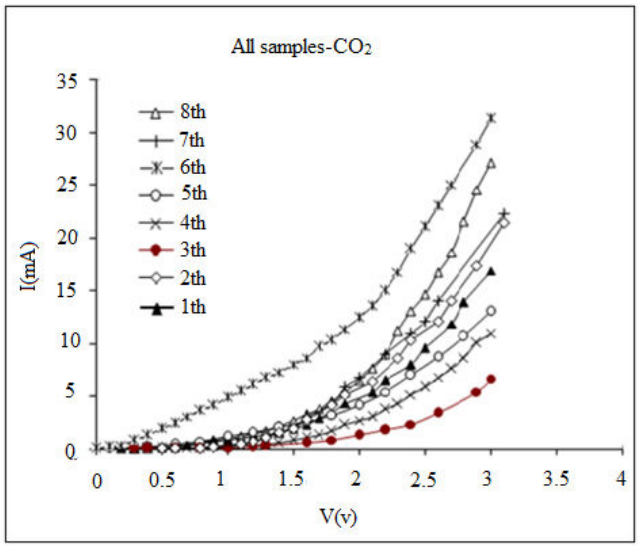
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۱۲. c) اثر کاهش PH محلول الکترولیت بر حساسیت نمونه در برابر اعمال گاز O_2

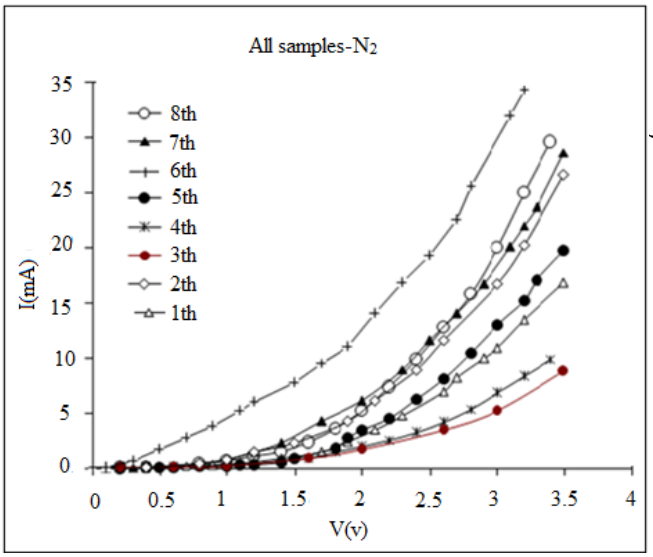
مقایسه حساسیت نمونه‌ها با یک‌دیگر

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 همهٔ نمونه‌ها برای گاز Co_2 ، N_2 و O_2 آورده شده است. بهترین قطعه از لحاظ پاسخ به اعمال گاز نمونهٔ ۶ با چگالی جریان mA/cm^2 ۲۰، t = ۱۸۰۰ S، PH = ۱/۸۶۹ و فاصله بین آند و کاتد ۴ سانتی‌متراست 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.

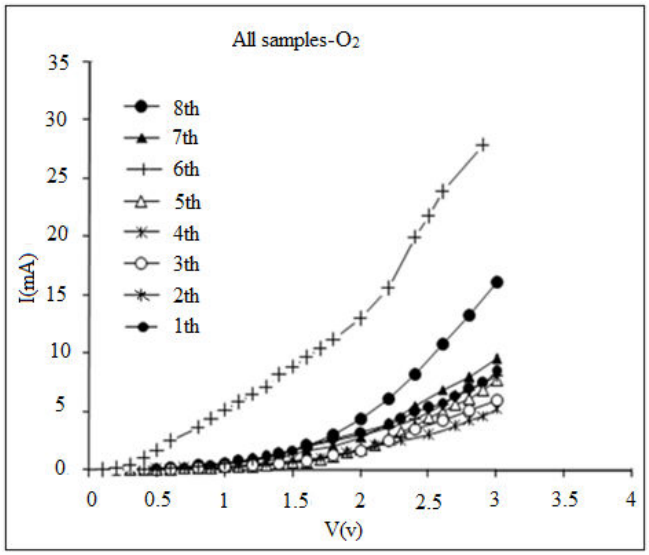


شکل ۱۳. a) مقایسهٔ اثر همه نمونه‌ها در برابر گاز Co_2. مشاهده می‌شود که نمونه ۶ بهترین پاسخ را داشته است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۱۳. b) مقایسهٔ اثر همهٔ نمونه‌ها در برابر گاز N_2 مشاهده می‌شود که نمونه ۶ بهترین پاسخ را داشته است



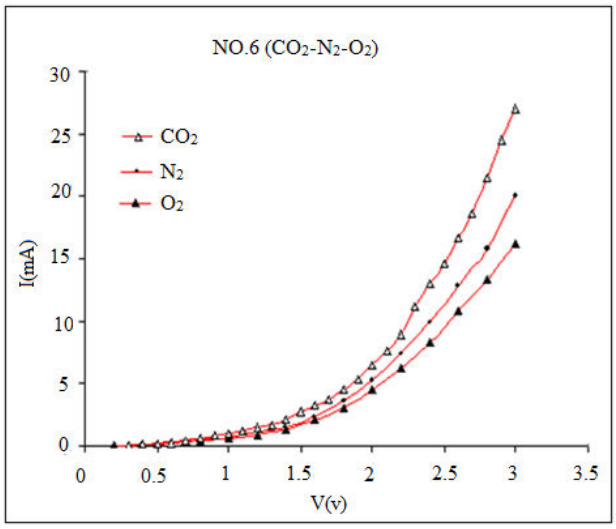
شکل ۱۳. c) مقایسهٔ اثر همهٔ نمونه‌ها در برابر گاز O_2 مشاهده می‌شود که نمونهٔ ۶ بهترین پاسخ را داشته است

بررسی اثر گازهای مختلف بر تغییرات شدت جریان

حال اثر گازهای مختلف Co_2 ، N_2 و O_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 نمونهٔ 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 به‌صورت $O_2 < N_2 < Co_2$ است. می‌توان این رفتار را به نوع گاز و چگونگی ساخت نمونه وابسته کرد. در این قسمت از یك 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 N_2 و O_2 مولکول‌هایی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

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 یك گاز بعد از چگونگی ساخت نمونه که تأثیر به‌سزایی در اندازهٔ تخلخل‌های ایجاد شده در سطح دارد، نوع گاز و اندازهٔ 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 نزدیك‌تر کند.



شکل ۱۴. مقایسهٔ اثر گازهای Co_2 ، N_2 و O_2 بر افزایش شدت جریان برای نمونهٔ 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 یك 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 فاصلهٔ 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 ۲۰ mA/cm^2، t= ۱۸۰۰ S، PH=۱/۸۶۹ 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

منابع

1. N. Gabouze, S. Belhousse, H. Cheraga, N. Ghellai, Y. Ouadah, Y. Belkacem, A. Keffous, "CO_2 and H_2 detection with a CH_x/porous silicon-based sensor", Vacuum 80 (2006) 986-989.
2. M. Ben-Chorin, A. Kux, I. Schechter, "Adsorate 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_2 gas", Physica B 403 (2008) 2634.
10. www.getnitrogen .org/pdf/graham.pdf.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]