

ساخت و ارزیابی حسگر نانویومکانیکی ازن با استفاده از نانومیله های اکسید روی: تأثیر دما بر کارایی حسگر و بهبود انتخاب پذیری به گازهای دیگر

امروزه ازن درمانی به عنوان یک روش غیرتهاجمی و کارآمد برای درمان بسیاری از بیماری ها مطرح شده است. در این مقاله، حسگر نانویومکانیکی ازن ارائه شده که از اکسید روی بر روی شیشه و الکترودهای آلومینیوم ساخته شده است. حسگر در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد بازده ۸۴٪ در اندازه گیری ppm5 گاز ازن دارد و زمان پاسخ ۱۵ ثانیه و بازیابی ۱۲۰ ثانیه را دارا است. این حسگر قابلیت اندازه گیری ppm1 گاز ازن را دارا می باشد و انتخاب پذیری مناسبی نسبت به گازهای اکسیژن و استون به ترتیب با پاسخ های ۲۱٪ و ۳۱٪ دارد. همچنین، بسته بندی مناسب بر عملکرد حسگر تأثیر ناچیزی دارد.

پارسا وزوایی^۱

دانش آموخته کارشناسی ارشد

عرفان کریم میرزا^۲

دانشجوی دکتری تخصصی

مصطفی صالحی خواه^۳

دانشجوی کارشناسی ارشد

علیرضا خدایاری^۴

استاد

پویا پایداری^۵

دانش آموخته دکتری تخصصی

نگین معنوی زاده^۶

دانشیار

مرتضی ایزدی^۷

استاد

واژه های راهنما: حسگر گاز الکتروشیمیایی، حسگر گاز ازن، حسگر گاز اکسید فلزی، نانومیله اکسید روی

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، p.vezvaei@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری تخصصی، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، erfankarimmirza@email.kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران، m.salehikhah@yahoo.com

^۴ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران، a.khodayari@iauctb.ac.ir

^۵ دانش آموخته دکتری تخصصی، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران، p.paydari@acecr.ac.ir

^۶ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، manavizadeh@kntu.ac.ir

^۷ استاد، مرکز تحقیقات سلامت، دانشگاه علوم پزشکی دانشگاه بقیه الله، تهران، ایران، morteza_izadi@yahoo.com

۱- مقدمه

ازن درمانی به عنوان یک روش جایگزین درمانی، از خواص آنتی‌اکسیدانی ازن بهره می‌برد تا در برخی از بیماری‌ها و مشکلات سلامتی مؤثر باشد. ازن درمانی به عنوان یکی از راهکارهای کم هزینه و کم خطر درمان انواع مختلفی از بیماری‌ها، مطرح است که به عنوان یک روش غیرتهاجمی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱]. این روش درمانی، با تأثیرات مثبت بر سلامت عمومی و کاهش علائم برخی بیماری‌ها، به عنوان یک گزینه کارآمد در مسیر بهبود و درمان مشکلات سلامت انسان مطرح شده است [۲].

تاریخچه استفاده از ازن به قرن شانزدهم باز می‌گردد و اثرات درمانی این گاز در غلظت‌های پایین برای اولین بار توسط وولف مطرح شد [۳]. از آن زمان، ازن به عنوان یک ماده درمانی، با پتانسیل بالقوه‌ای برای درمان انواع بیماری‌ها و مشکلات پوستی مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. در حال حاضر، تحقیقات متعدد در زمینه‌های مختلف نشان می‌دهد که ازن درمانی می‌تواند در بیش از ۵۰ فرآیند پاتولوژیک، از جمله بیماری‌های پوستی [۵]، فتق دیسک [۶]، عوارض دیابت [۷]، بیماری‌های دهان [۸]، بیماری‌های قلبی-عروقی [۹]، بیماری‌های عروقی مغز [۱۰] و حتی برخی از انواع سرطان‌ها [۱۱] مؤثر باشد. در زمینه بیماری‌های پوستی، ازن درمانی موضعی می‌تواند به عنوان یک گزینه درمانی برای بیماری‌های عفونی، التهابی و مرتبط با سیستم ایمنی، همچنین درمان زخم‌های مزمن مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. علاوه بر آن، استفاده از ازن درمانی به عنوان روشی مؤثر در تسریع فرآیند بهبود زخم‌ها [۱۳]، تسریع ترمیم پوست پس از استفاده از لیزر زیبایی [۱۴] و حتی به عنوان یک روش سیستماتیک اثر ضد درد [۱۵]، ضدپیری [۱۶] و حتی کاهش مقاومت شیمی‌درمانی [۱۷] را دارد.

مطالعات اخیر همچنین نشان داده‌اند که ازن درمانی ممکن است به عنوان یک استراتژی درمانی در برابر بیماری کروناویروس ۲۰۱۹ (COVID-19) نیز مؤثر باشد [۱۸]. این پهنه وسیع ویژگی‌های درمانی ازن، آن را به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه بهبود سلامت پوست و درمان برخی از بیماری‌ها و مشکلات جسمی معرفی می‌کند. ویژگی بارز ازن، قابلیت اکسیداسیون و واکنش‌پذیری قوی آن است که این خاصیت، آن را در رده داروها جای داده و از آنجا که ازن پس از فلوتور در رده دوم اکسیداسیون و واکنش‌پذیری قرار می‌گیرد، این خصوصیت، تأثیرات دارویی ناشی از ازن درمانی را مشخص می‌کند [۱۹]. با این حال، لازم به ذکر است که چشم و دستگاه تنفسی به ازن حساس هستند. از این رو، استفاده از ازن باید تحت مقررات و نظارت دقیق انجام شود. بنابراین با توجه به عدم امکان ذخیره سازی ازن، برای استفاده از این گاز نیاز به دستگاه ازن‌ساز می‌باشد که کنترل میزان خروجی آن و در صورت وجود مشکل در دستگاه، میزان نشستی گاز را به صورت دقیق پایش نماید و عدم کنترل دقیق میزان خروجی گاز ازن می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به بار بیاورد. به همین دلیل استفاده از حسگر گاز ازن در مرکز درمانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور، استفاده از حسگرهای الکتروشیمیایی از جمله مقاومتی-شیمیایی، کاندیدای مناسبی برای اندازه‌گیری گاز ازن می‌باشد [۲۰].

اکسیدهای فلزی به دلیل خواص منحصر به فرد خود که حساسیت، انتخاب‌پذیری و پایداری را در تشخیص غلظت ازن افزایش می‌دهد، به عنوان لایه‌های فعال در دستگاه‌های سنجش ازن (O_3) نقش مهمی ایفا می‌کنند. این مواد مانند اکسید روی (ZnO)، اکسید قلع (SnO_2) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به دلیل ماهیت نیمه‌هادی خود حساسیت بالایی به ازن نشان می‌دهند. وقتی ازن با این اکسیدهای فلزی برهم‌کنش می‌کند، خواص

الکتریکی آن‌ها، به‌ویژه مقاومت، که قابل اندازه‌گیری است و به‌طور مستقیم با غلظت ازن در محیط مرتبط است، تغییر می‌دهد.

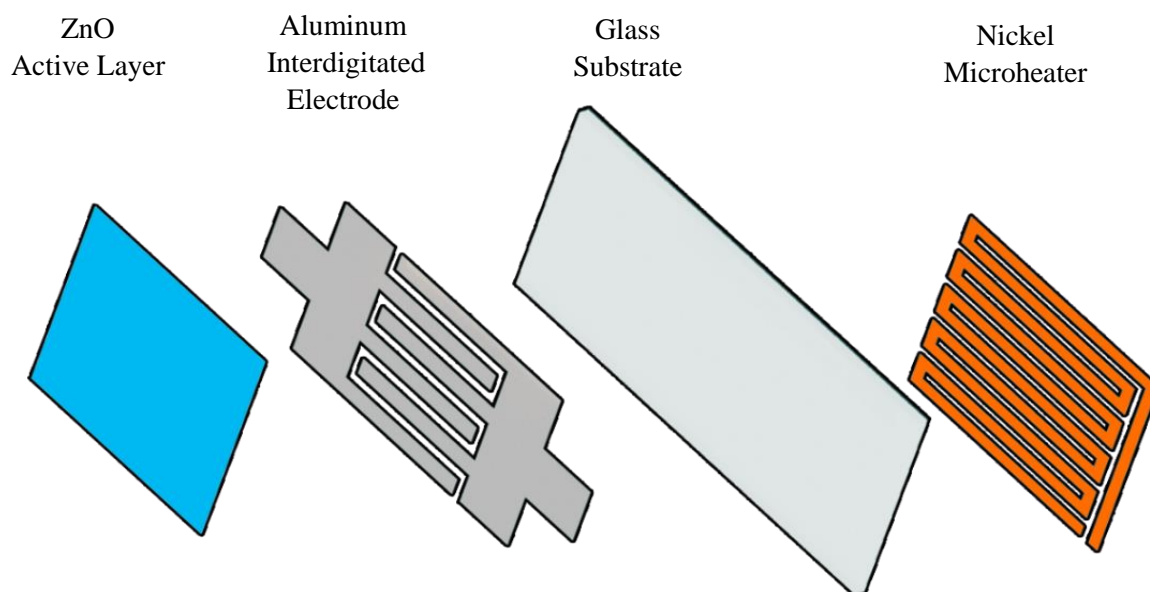
انتخاب‌پذیری اکسیدهای فلزی نسبت به ازن نسبت به سایر گازها در درجه اول به شیمی سطح آن‌ها نسبت داده می‌شود. ازن به عنوان یک عامل اکسیدکننده قوی به‌طور خاص با اتم‌های سطح اکسیدهای فلزی برهمکنش می‌کند و باعث تغییرات قابل توجهی در خواص الکتریکی آن‌ها می‌شود. اصلاحات سطحی، دوپینگ با عناصر دیگر و نانوساختار اکسیدهای فلزی می‌تواند با ایجاد مکان‌های فعال خاص برای مولکول‌های ازن، انتخاب‌پذیری آن‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، اکسیدهای فلزی به دلیل پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر شرایط سخت محیطی شناخته شده‌اند که آن‌ها را برای برنامه‌های نظارت طولانی مدت ازن مناسب می‌کند. آن‌ها می‌توانند خواص حسی خود را در مدت زمان طولانی بدون تخریب قابل توجه حفظ کنند که برای تشخیص قابل اعتماد ازن ضروری است. تعامل بین ازن و اکسیدهای فلزی معمولاً سریع است و منجر به تغییرات سریع در مقاومت الکتریکی سنسور می‌شود که منجر به زمان پاسخ سریع می‌شود که برای نظارت بر زمان واقعی ازن بسیار مهم است. علاوه بر این، اکسیدهای فلزی اغلب پس از حذف ازن، زمان بازیابی سریعی را نشان می‌دهند که به حسگرها اجازه می‌دهد در محیط‌های پویا که در آن سطوح ازن در نوسان است، استفاده شوند [۲۰].

علاوه بر این، اکسیدهای فلزی نسبتاً ارزان هستند و می‌توانند با استفاده از روش‌های مختلف کم‌هزینه سنتز شوند. فراوانی و سهولت سنتز، آن‌ها را برای تولید در مقیاس بزرگ حسگرهای ازن مقرون‌به‌صرفه می‌کند. خواص اکسیدهای فلزی را می‌توان از طریق دوپینگ، ایجاد کامپوزیت‌ها یا تغییر مورفولوژی آن‌ها در مقیاس نانو تنظیم کرد. این قابلیت تنظیم به طراحی حسگرهایی با ویژگی‌های خاص مناسب برای کاربردهای خاص، مانند افزایش حساسیت یا انتخاب‌پذیری برای غلظت‌های پایین ازن اجازه می‌دهد. علاوه بر این، سنسورهای مبتنی بر اکسید فلزی را می‌توان به راحتی با سیستم‌های میکروالکترونیک ادغام و آن‌ها را با فناوری‌های مدرن قابل حمل و پوشیدنی سازگار کرد. این ادغام توسعه دستگاه‌های سنجش ازن فشرده، کم مصرف و کارآمد را برای کاربردهای مختلف از جمله نظارت بر محیط زیست، ایمنی صنعتی و مراقبت‌های بهداشتی تسهیل می‌کند [۲۱].

به‌طور خلاصه، اکسیدهای فلزی به دلیل حساسیت استثنایی، انتخاب‌پذیری، پایداری و سهولت ساخت، به عنوان لایه‌های فعال در سنجش ازن ضروری هستند. توانایی آن‌ها در ارائه تشخیص سریع و مطمئن غلظت ازن آن‌ها را به اجزای جدایی‌ناپذیر در توسعه سنسورهای پیشرفته ازن تبدیل می‌کند. تحقیق و توسعه در حال انجام در این زمینه همچنان به بهبود عملکرد و دامنه کاربرد حسگرهای ازن مبتنی بر اکسید فلزی ادامه می‌دهد و به نظارت و حفاظت از محیط زیست کمک می‌کند [۲۲]. حسگر گاز مقاومتی-شیمیایی بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی در پاسخ به حضور گازهای هدف عمل می‌کند. مواد حساس به گاز در ساختار حسگر در اثر تغییرات شیمیایی با گازهای هدف واکنش نشان داده و منجر به تغییرات قابل اندازه‌گیری در مقاومت الکتریکی می‌شود. به صورت کلی، عملکرد حسگرهای مقاومتی-شیمیایی بر اساس تغییر در مشخصه‌های سیگنالی حسگر وابسته به جذب یون می‌باشد [۲۱]. با جذب سطحی در لایه فعال حسگر که می‌تواند از جنس اکسید فلزی باشد و تغییر در مقدار حامل‌های بار آزاد، این مشخصه‌های سیگنالی تغییر می‌کنند [۲۲]. به‌طور معمول یک

حسگر گاز با لایه فعال اکسید فلزی در محیطی با حضور رطوبت و گازهای دیگر کار می‌کند و انواع مختلف مولکول اکسیژن، آب و سایر مواد مانند دی اکسید کربن در مجاورت اکسید فلز وجود دارد [۲۳]. بعضی از این ملکول‌ها با جابجایی بار الکتریکی، پیوندهایی را با موقعیت‌های خاص اتم‌های سطح ایجاد می‌کنند و این امکان نیز وجود دارد که دو قطبی تشکیل دهند که این موارد بر مقاومت لایه حساس و یا غلظت حامل‌های بار آزاد تاثیری نمی‌گذارد. در واقع، این افتراق در پیوندهای الکتریکی و تشکیل دوقطبی‌ها باعث تغییراتی در خواص الکتریکی لایه حساس می‌شود ولی در تشخیص و اندازه‌گیری غلظت گازها در محیط خللی وارد نمی‌کند [۲۴]. یک حسگر گاز بر اساس عملکرد، مطابق شکل (۱) از اجزایی مانند گرمکن، زیرلایه، الکتروود و لایه فعال تشکیل شود [۲۵].

لایه فعال اصلی‌ترین و مهم‌ترین بخش حسگر است که معمولاً حسگرهای گاز دارای لایه حساسی از جنس اکسید فلز هستند [۲۶، ۲۷]. این اکسید فلز می‌تواند به صورت نیمه‌هادی نوع n و نوع p باشد که هر کدام برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸-۳۰]. عملکرد لایه حساس حسگرهای گاز را به صورت کلی می‌توان به سه مرحله ورود گاز، ترکیب با سطح لایه حساس و ایجاد تغییر در پارامترهای الکتریکی لایه حساس و در انتها عبور گاز و شروع فرآیند بازیابی در لایه حساس تقسیم‌بندی کرد. با ورود مولکول‌های گاز هدف، یون‌های اکسیژن کاهش یافته و باعث افزایش مقاومت نیمه‌هادی می‌شوند [۳۰-۳۴]. بعد از خروج گاز مجدد یون‌ها افزایش یافته و مقاومت به مقدار اولیه خود باز می‌گردد. لایه‌های حساس اکسید فلزی دارای مزایای زیادی از جمله حساسیت بالا و دمای عملکرد مناسب و همچنین طول عمر زیاد هستند [۳۵-۳۷]. برای عملکرد بهتر حسگر می‌توان از روش‌های مختلفی مانند استفاده از نانوساختارهای مختلف بهره برد [۳۸-۴۰]. هر کدام از انواع نانوساختار، نسبت سطح مؤثر متفاوتی دارند و می‌توانند تماس‌های مختلفی با گاز مورد هدف برقرار کنند. برای مدل‌های مختلف نانوساختار می‌توان از نانولوله، نانوصفحه، نانوجل، نانوکره، نانوسیم و نانو دیسک نام برد [۴۱-۴۳].



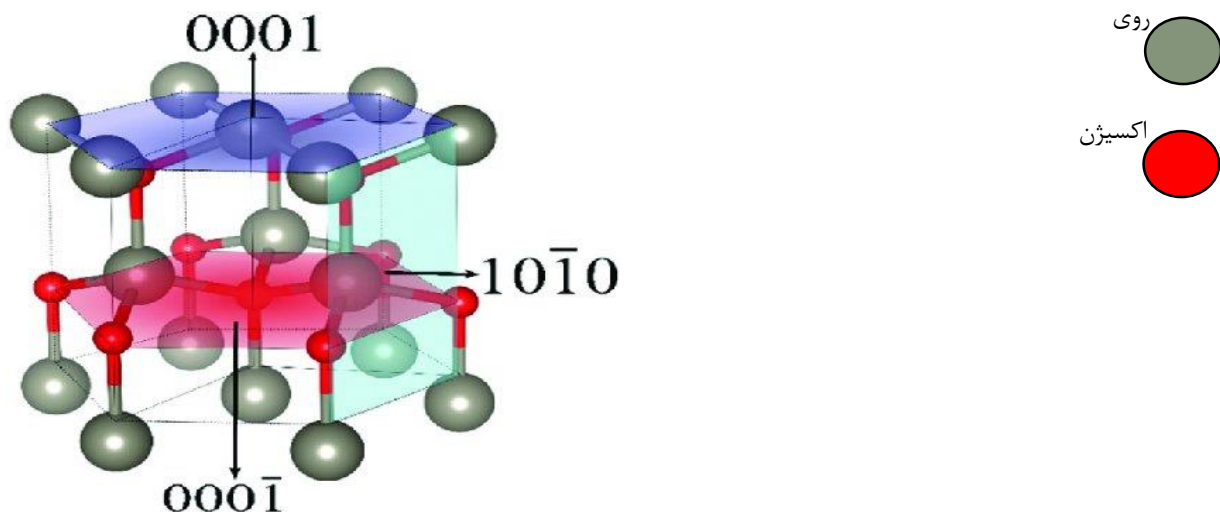
شکل ۱- پیکربندی بخش‌های مختلف حسگر گازی ساخته‌شده شامل گرمکن از جنس نیکل، زیرلایه شیشه‌ای، الکتروود آلومینیوم و لایه فعال از جنس اکسید روی

همچنین با آرایش یا تزیین مواد مختلف در لایه حساس می‌توان حساسیت حسگر را به گاز هدف افزایش داد، زمان پاسخگویی و بازیابی یا سایر ویژگی‌های حسگر را با توجه به نیاز بهینه کرد و بهبود بخشید [۴۴، ۴۵]. با توجه به موارد ذکر شده برای انتخاب لایه فعال حسگر، استفاده از نانومیله اکسید روی یکی از انتخاب‌های مناسب برای کاربرد در حسگر گاز اُزن می‌باشد.

اکسید روی یکی از اعضای گروه نیمه‌هادی‌های ترکیب دوتایی II-IV است و کریستال این ماده نیمه‌هادی به صورت ساختار شش گوشه‌ای (ورتزیت) ^۱ و همچنین صورت مکعب ترکیبی ^۲ روی وجود دارد [۴۶]. در ساختار هگزاگونال اکسید روی، اتم‌های روی و اکسیژن به شکل شش ضلعی به صورتی در کنار هم قرار گرفته‌اند که در آن یک یون Zn^{2+} توسط چهار یون O^{2-} به صورت چهار گوشه‌ای احاطه شده و همین ساختار به صورت عکس برای یون اکسیژن رخ می‌دهد [۴۷]. در سلول واحد ساختار شش ضلعی اکسید روی، مشخصه‌های شبکه به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$1/60 \text{ nm}, c/a = 5/2066 \text{ nm}, c = 0.32498 a = \quad (1)$$

علاوه بر این، ساختار شش ضلعی اکسید روی با شش سطح غیر قطبی $\{10\bar{1}0\}$ مشخص شده است که با دو صفحه قطبی پایه $Zn(0001)$ و $O(000\bar{1})$ پوشش داده شده است. رشد نانومیله‌های یک‌بعدی اکسید روی در امتداد محور C نیز به دلیل ناپایداری الکترواستاتیک این سطوح قطبی می‌باشد [۴۸-۵۰]. شکل شماتیک قرارگیری اتم‌های اکسید مس مطابق شکل (۲) قابل مشاهده است [۵۱]. ساختار باند انرژی هر ماده‌ای به صورت منحصر به فرد است و می‌توان به آن را به عنوان مهم‌ترین ویژگی آن بر شمرد. در شرایط عادی محیطی، ZnO یک ماده با شکاف باند انرژی مستقیم است که فاصله میان پایین‌ترین نقطه باند هدایت و بالاترین نقطه باند ظرفیت در حدود $3/37$ الکترون ولت است که در یک نقطه از منطقه برلین معروف به Γ اتفاق می‌افتد [۵۲].



شکل ۲- سلول واحد اکسید روی با ساختار شش گوشه‌ای (ورتزیت) [۵۱]

¹ Hexagonal wurtzite

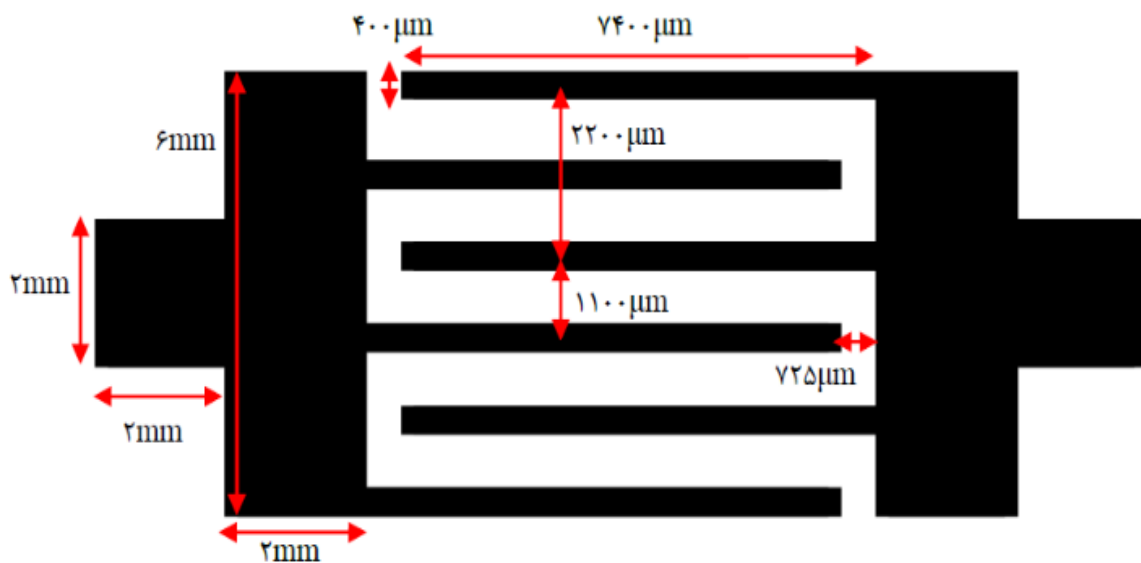
² Cubic zinblende

با توجه به ویژگی‌های یونی بالا، ZnO پایین‌ترین نقطه نوار هدایت، از سطح 4s یون Zn^{2+} و یا حالت‌های ترکیبی غیر نواری 3sp تشکیل شده است. در حالی که نوار ظرفیت توسط سطح 2p یون O^{2-} و یا اوربیتال 3sp ایجاد شده است [۵۲]. در ادامه با توجه به موارد بیان شده به ساخت حسگر گاز اُزن با لایه حساس نانوساختارهای اکسید روی پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

با توجه به اهمیت میزان مورد استفاده از گاز اُزن و امکان بروز آسیب‌های جبران‌ناپذیر مقادیر بیش از حد مجاز این گاز، استفاده از حسگر گاز اُزن اهمیت بسیار زیادی دارد. برای ساخت حسگر گاز اُزن از بستر شیشه با ابعاد 20×10 میلی‌متر مربع استفاده شده که در ابتدا به روش RCA2 شسته و خشک می‌شوند.

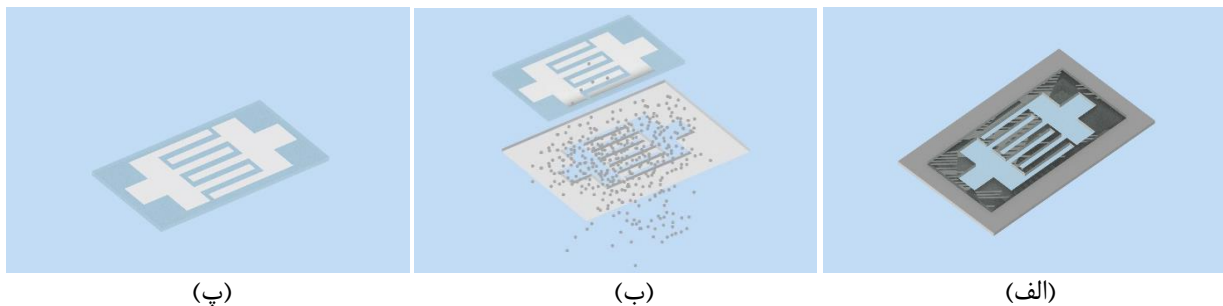
مرحله بعدی، لایه نشانی الکترودها است که در حسگرهای گاز نقش حامل سیگنال الکتریکی را ایفا می‌کنند، از این رو شکل و جنس آن‌ها بسیار حائز اهمیت است [۵۳]. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، تابع کار الکترودها لایه حساس حسگر نقش تعیین‌کننده در شاتکی یا اهمی بودن پیوندها در حسگر دارند. استفاده از الکترودهای شانه‌ای در حسگرهای گاز، مزایای قابل توجهی را به خصوص در حوزه کاربردهای سنجش گاز فراهم می‌کند. برای شروع، الکترودهای شانه‌ای با توجه به شکل خاص آن امکان تعامل بیشتر با مواد حسگر را تسهیل می‌کند. این افزایش سطح به‌طور قابل توجهی حساسیت و دقت تشخیص گاز را تقویت کرده و به اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری منجر می‌شود. علاوه بر این، الکترودهای شانه‌ای با کاهش مؤثر تاثیر افت ولتاژ، مزیت فراوانی دارند [۵۴]. پیکربندی هندسی آن‌ها به‌طور مؤثری افت ولتاژ را در طول مسیرهای الکترودها بر خلاف الکترودهای مسطح معمولی محدود می‌کند به‌طوری که این کاهش در افت ولتاژ به‌طور قابل توجهی دقت کلی اندازه‌گیری گاز را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، انگشتان با فاصله نزدیک ظرفیت خازنی را کاهش می‌دهند که منجر به زمان پاسخگویی سریع‌تر می‌شود [۵۵]. در این مقاله از طرح شانه‌ای سه شاخه استفاده شده که ابعاد بخش‌های مختلف آن در شکل (۳) قابل مشاهده است.



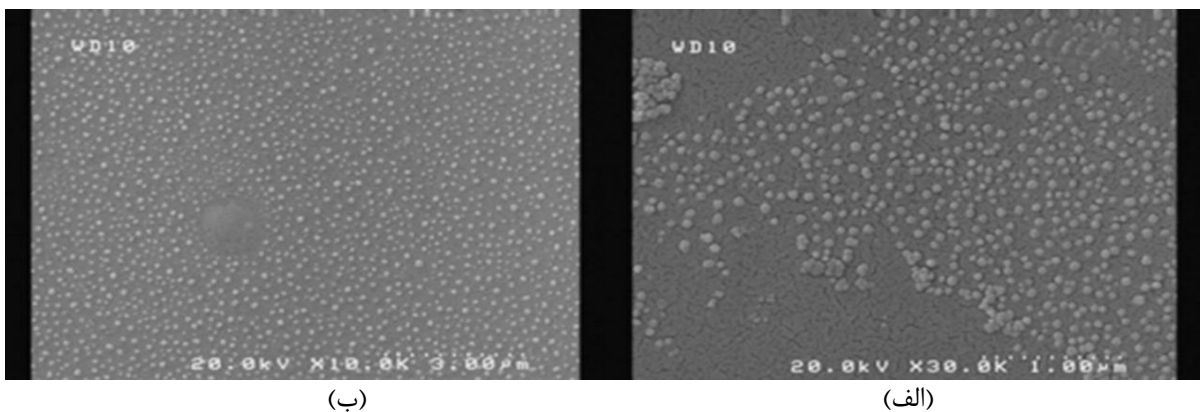
شکل ۳- الکترودهای شانه‌ای به‌کار رفته همراه با ابعاد و فاصله انگشتی‌ها

برای ایجاد الکتروود و قرار دادن آن بر روی بستر از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که در این مقاله از روش لایه‌نشانی تبخیر فیزیکی استفاده شده است. تبخیر فیزیکی چسبندگی مناسبی و اتصال قوی بین فلز لایه نشانی شده و بستر را فراهم می‌کند. این چسبندگی بالا در کاربردهایی که هدایت الکتریکی قابل اعتماد و یکنواخت بسیار مهم است اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند [۵۶-۵۸]. این لایه نشانی برای فلز آلومینیوم با تابع کار $4/1$ الکترون‌ولت و امکان ایجاد اتصال اهمی با نیمه‌هادی اکسید روی با تابع کار $4/9$ الکترون‌ولت در فشار 5×10^{-5} تور انجام و الگوی الکتروود طراحی شده با توجه به طرح شکل (۴)، به وسیله ماسک سخت بر روی زیرلایه شیشه شکل گرفته است. فرآیند لایه‌نشانی الکتروود به روش تبخیر فیزیکی در تصاویر شکل (۴) قابل مشاهده هستند.

برای رشد نانو ساختارهای اکسید روی از روش لایه نشانی حمام شیمیایی استفاده شده است. برای رشد نانو ساختارهای اکسید روی به روش حمام شیمیایی، بذریه اکسید روی نیاز است. بذریه در به دست آوردن یک لایه فعال با کیفیت، ایجاد ضخامت لازم، پوشش جامع و تراکم بالا بسیار مهم است. لایه نشانی بذریه به وسیله پوشش زینک استات دی هیدرات و متانول انجام می‌شود. برای این منظور غلظت $153/6 \text{ gr/L}$ زینک استات دی هیدرات در ۲-پروپانول حل شده و محلول بدست آمده به وسیله قطره چکان بر روی بستری که از جنس شیشه چکانده شده و با سرعت 3000 دور بر دقیقه به مدت 30 ثانیه دوران داده می‌شود و سپس به مدت 2 دقیقه در محفظه گرم با دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود [۵۹-۶۱]. این عمل 10 مرتبه تکرار شده و بعد از آن به مدت 120 دقیقه در دمای 150 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. لایه نشانی صورت گرفته در این مرحله در تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل (۵-الف) و (۵-ب) قابل مشاهده هستند.

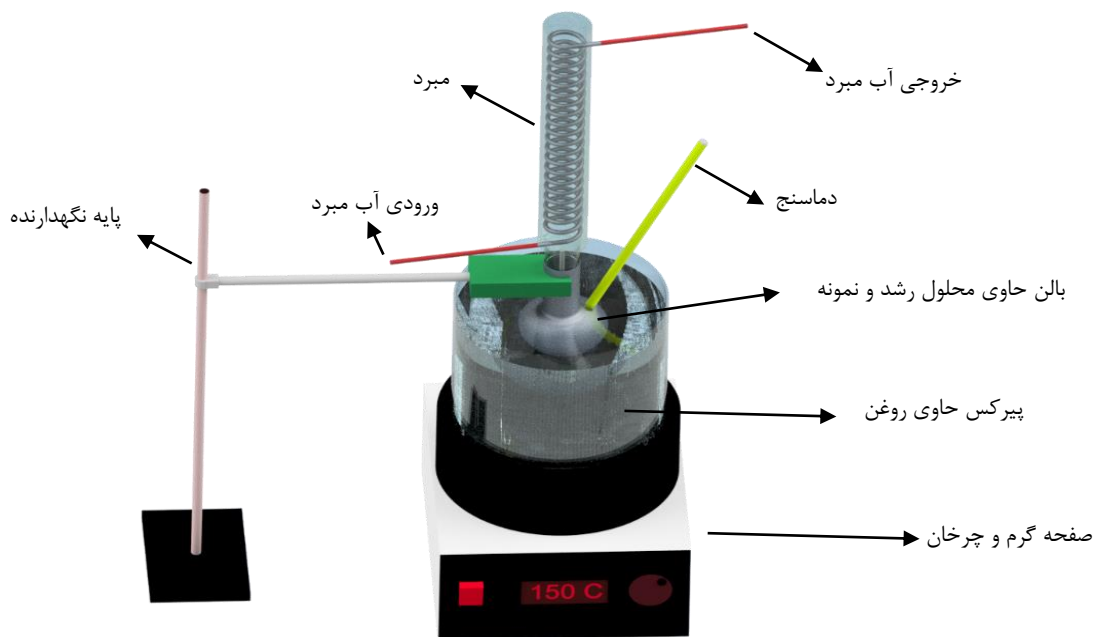


شکل ۴- (الف) نحوه قرارگیری ماسک سایه روی زیرلایه شیشه‌ای، (ب) فرآیند لایه نشانی تبخیر فیزیکی الکتروود آلومینیوم روی زیرلایه شیشه‌ای، (پ) لایه نشانی صورت گرفته با طرح شانه‌ای الکتروود روی زیرلایه شیشه‌ای

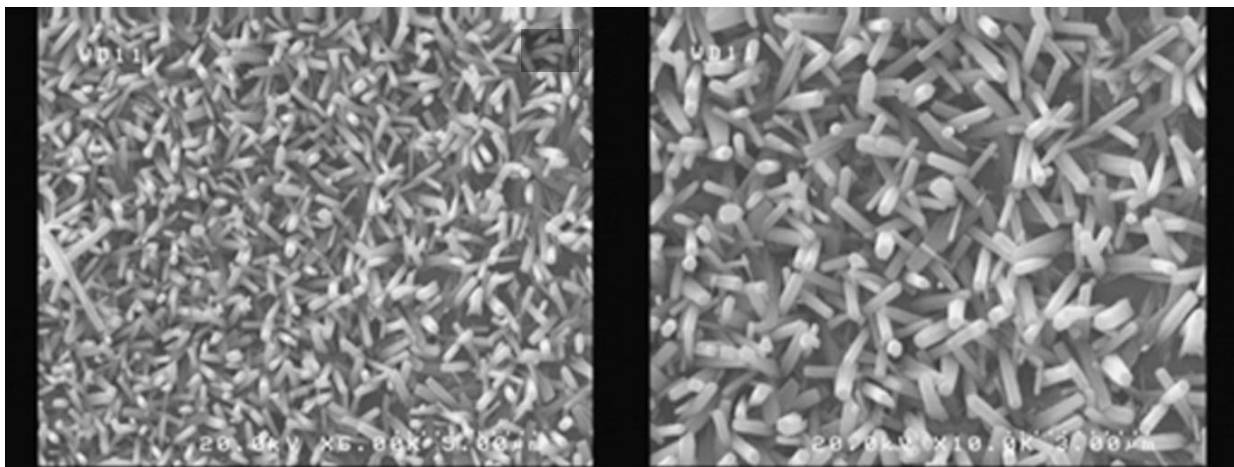


شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی؛ (الف) لایه نشانی زیر لایه با ۵ بار تکرار (ب) لایه نشانی بذردانه با ۱۰ بار تکرار

همان‌طور که در تصاویر میکروسوپ الکترونی شکل (۵) نشان داده شده است با انجام ۱۰ بار لایه‌نشانی بذرلایه سطح یکنواخت‌تری را تشکیل داده که این یکنواختی به صورت مستقیم بر روی لایه نشانی نانومیله‌ها تأثیر می‌گذارد. پس از طی شدن مراحل لایه‌نشانی بذرلایه نوبت به لایه‌نشانی نانوساختارهای لایه فعال می‌رسد. برای رشد نانومیله به روش حمام شیمیایی از دو ماده زینک نیترات و HMTA استفاده شده است [۶۲]. این دو ماده را به ترتیب با غلظت $11/5 \text{ M/L}$ و 13 M/L با یکدیگر ترکیب کرده و سپس در آب دیونیزه حل می‌شوند. سپس بستر آرایش شده با بذرلایه اکسید روی به وسیله نگهدارنده تفلونی پوشانده و به مدت ۱۵۰ دقیقه در دمای 90°C درجه سانتی‌گراد به صورت برعکس غوطه‌ور قرار می‌گیرد [۶۲]. به منظور جلوگیری از کاهش حجم، کاهش غلظت و کاهش میزان اسیدی و بازی محلول رشد از مبرد استفاده می‌شود که در تصویر شماتیک شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل ۶- تصویر شماتیک نحوه لایه‌نشانی نانومیله اکسید روی به روش حمام شیمیایی



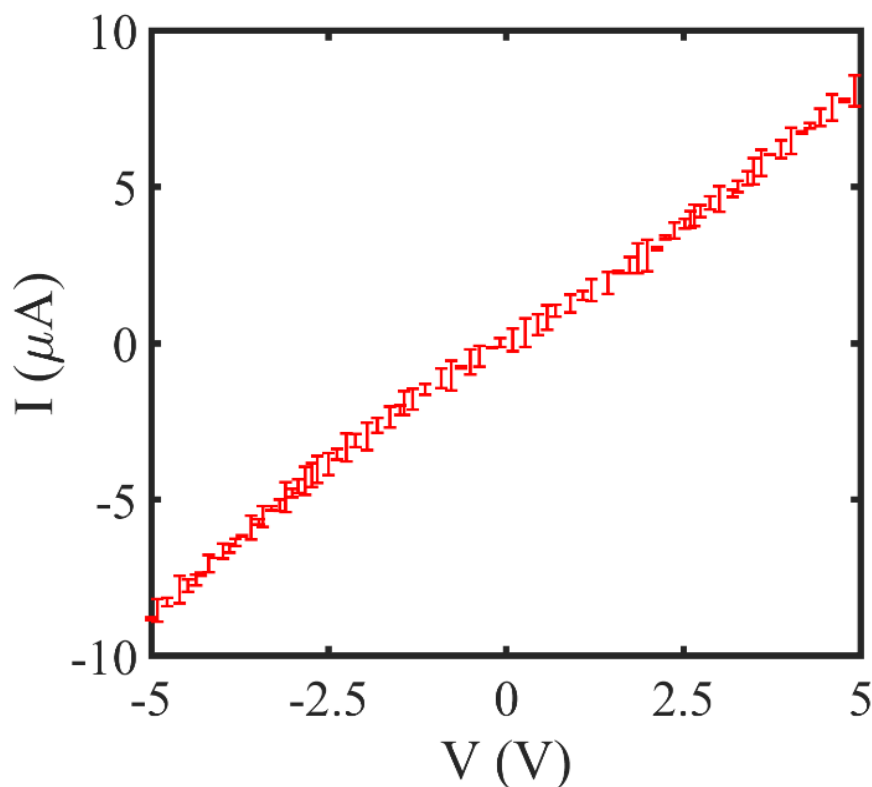
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانومیله رشد داده شده (الف) با بزرگ‌نمایی ده هزار برابر، (ب) با بزرگ‌نمایی شش هزار برابر

در پایان، نمونه‌ها توسط آب مقطر شسته و خشک می‌شوند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی لایه‌های نشانده شده از نانولوله‌های اکسید روی را در شکل (۷-الف) و (۷-ب) نشان می‌دهد. حال پس از لایه نشانی بخش‌های مختلف حسگر به بررسی و مشخصه‌یابی عملکرد حسگر پرداخته می‌شود.

۳- نتایج و بحث

پس از تکمیل ساختار حسگر، به بررسی عملکرد آن پرداخته می‌شود. اولین آزمون، بررسی مشخصه ولتاژ-جریان حسگر است که برای صحت‌سنجی مدل شاتکی یا اهمی بودن حسگر انجام می‌شود. اتصال فلز-نیمه-هادی بین لایه حساس حسگر و الکتروود با توجه به تغییر مقاومت در برابر غلظت‌های مختلف باید از نوع اهمی باشد. از آنجا که تابع کار اکسید روی $4/9$ الکترون‌ولت و یک نیمه‌هادی نوع n می‌باشد، باید تابع کار فلز از نیمه‌هادی کمتر باشد که به این منظور از فلز آلومینیوم با تابع کار $4/1$ الکترون‌ولت استفاده شده است. به منظور بررسی و اطمینان از این اتصال اهمی، مشخصه ولتاژ-جریان مطابق نمودار شکل (۸) انجام گردید. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در پنج مرتبه آزمایش در دمای اتاق و اندازه‌گیری در دفعات مختلف، مقادیر مشابه اندازه‌گیری شده با بیانگر اهمی بودن اتصال حسگر می‌باشد.

حال پس از اندازه‌گیری و بررسی مشخصه ولتاژ-جریان حسگر، به بررسی حساسیت حسگر و پاسخ آن به مقادیر مختلف گاز ازن پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که گاز ازن بسیار فعال است و به صورت عادی در محیط یافت نمی‌شود از دستگاه HAB Harrmann برای تولید گاز ازن استفاده شده است.



شکل ۸ - نمودار مشخصه ولتاژ-جریان برای بررسی اتصال اهمی فلز آلومینیوم و لایه حساس اکسید روی. به منظور ارزیابی دقیق‌تر، این آزمون ۵ مرتبه در فواصل زمانی مختلف تکرار و نتیجه به صورت نمودار نوار خطا گزارش شده است.

گاز ازن بعد از مدت کمی حضور در محیط، به گاز اکسیژن تبدیل شده و پایدار نخواهد بود. به همین دلیل امکان کپسوله کردن این گاز نیز وجود ندارد. این دستگاه به صورت کاملاً دقیق مقدار گاز تزریق شده را بر روی نمایشگر خود در واحد میکروگرم بر میلی لیتر نمایش می دهد.

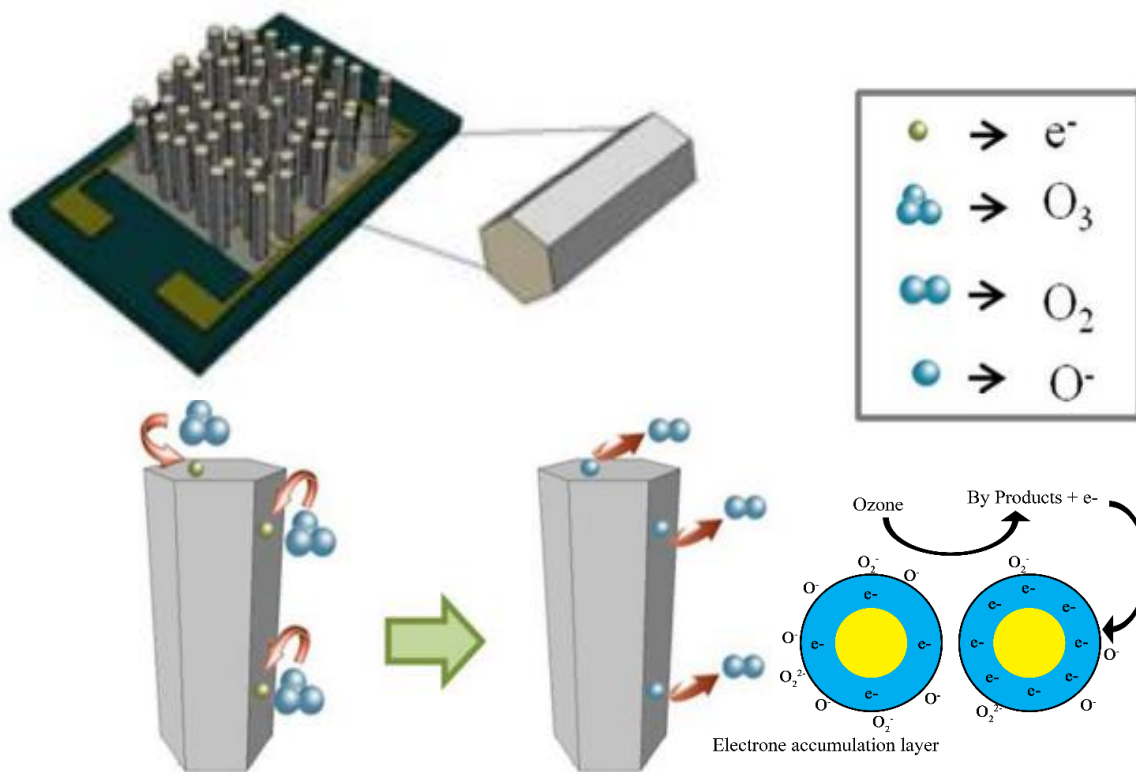
همان طور که ذکر شد، با توجه به این که اکسید روی یک ماده نیمه هادی از نوع n است، فرآیندی که در تشخیص گاز بر روی سطح لایه حساس اتفاق می افتد، مربوط به تغییرات الکترون و حفره در باند هدایت و باند ظرفیت است. با قرارگیری حسگر در محیط، طی واکنش های انجام شده در سطح لایه حساس با هوای محیط پیرامون، الکترون ها از لایه ظرفیت به لایه هدایت می روند. این روند را می توان برای بهبود حساسیت و سرعت حسگر با استفاده از منبع نور فرابنفش تسریع کرد. در این حالت حفره هایی نیز در لایه ظرفیت ایجاد می شوند. این امر منجر می شود که الکترون های موجود در لایه هدایت افزایش پیدا کند. در نتیجه مقاومت حسگر به صورت کلی کاهش پیدا کرده تا به حد ثابتی می رسد. با ورود گاز ازن به داخل محفظه، الکترون های باند هدایت لایه حساس را برداشته و مولکول های ازن به مولکول اکسیژن تبدیل می شوند. این عمل باعث کاهش مقدار الکترون در لایه هدایت شده و در نتیجه مقاومت الکتریکی حسگر افزایش پیدا می کند و با توجه به قانون اهم از آن جا که ولتاژ ثابت است در نتیجه جریان کاهش پیدا می کند. با ورود گاز ازن به محفظه رابطه (۲) و (۳) برقرار است.



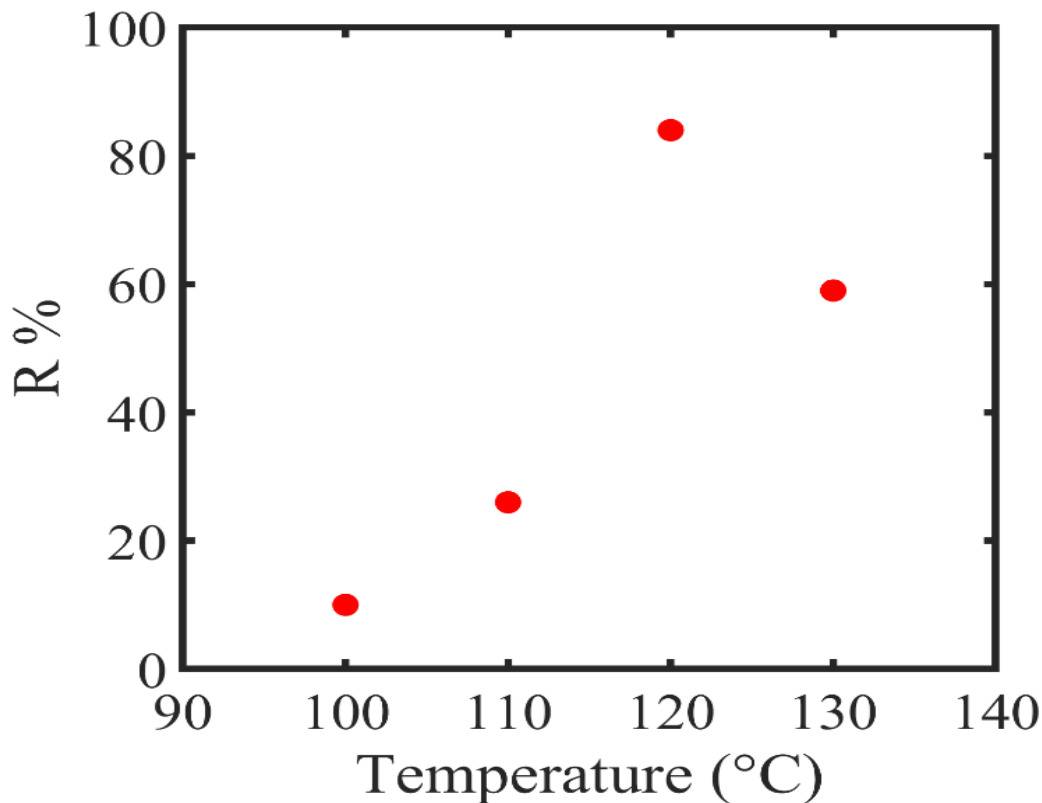
این رابطه تا پایان تزریق گاز به محفظه ادامه خواهد داشت. در ابتدا، مولکول های ازن پخش می شوند و به سطح حسگر اکسید روی می رسند. پس از ورود، آن ها بر سطح جذب می شوند، فرآیندی که در آن مولکول های ازن به سطح حسگر می چسبند. این جذب را می توان به نیروهای مختلفی از جمله نیروهای واندروالس، برهمکنش های الکترواستاتیکی و پیوند هیدروژنی، بسته به ویژگی های سطح خاص و شرایط محیط نسبت داد. اکسید روی که یک نیمه هادی نوع n است، با جذب ازن تغییراتی را در خواص الکتریکی خود تجربه می کند. مولکول های ازن الکترون هایی را به سطح اکسید روی اهدا می کنند که منجر به افزایش تراکم الکترون ها در مواد نوع n می شود. این اهدای الکترون باعث افزایش رسانایی حسگر اکسید روی می شود. میزان این تغییر در رسانایی مستقیماً با غلظت ازن در محیط متناسب است و این امکان را فراهم می کند که سطوح ازن را بر اساس پاسخ حسگر اندازه گیری کند. علاوه بر این، برهمکنش بین ازن و اکسید روی شامل یک واکنش ردوکس سطحی است که در آن مولکول های ازن به گونه های اکسیژن روی سطح اکسید روی کاهش می یابند. این فرآیند ردوکس، غلظت حامل بار را در اکسید روی تغییر می دهد و حساسیت سنسور به ازن را افزایش می دهد. به طور کلی، جذب ازن بر روی یک حسگر گاز اکسید روی شامل یک تعامل پیچیده از جذب، انتقال بار و واکنش های سطحی است. این مکانیسم ها بطور کلی خواص الکتریکی حسگر را تغییر می دهند و امکان تشخیص و تعیین کمی ازن را با دقت بالا فراهم می کنند. اثربخشی این فرآیند برای برنامه های کاربردی در نظارت بر محیط زیست، تشخیص پزشکی و ایمنی صنعتی بسیار مهم است. همان طور که در شکل (۹) نیز اصلاح گردید

مجاورت ملکول‌های گاز ازن با نانوذرات اکسید روی باعث افزایش حامل‌های بار آن که الکترون‌ها هستند می‌شود که خود باعث افزایش رسانایی و کاهش مقاومت الکتریکی آن می‌شود. پس از اتمام ورود گاز ازن به محیط آزمایش، الکترون‌ها به آرامی مجدد در باند هدایت قرار می‌گیرند و مقاومت الکتریکی بین دو الکتروود حسگر کاهش پیدا می‌کند و جریان عبوری به مقدار پیشین خود باز می‌گردد. این فرآیند در شماتیک شکل (۹) به نمایش در آمده است.

همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، هنگامی که ملکول ازن به نانومیله اکسید روی می‌رسد، یک الکترون از آن جدا می‌کند و ملکول ازن به یک ملکول O_2 و یک اتم اکسیژن تجزیه می‌شود. این ملکول O_2 وارد محیط شده و اتم اکسیژن روی نانومیله اکسید روی باقی می‌ماند. این فرآیند تکرار شده و ادامه می‌یابد و از آنجایی که الکترون‌ها حامل‌های اکثریت در نانولوله‌های اکسید روی هستند، به دلیل همین از دست دادن الکترون، مقاومت نانومیله‌ها افزایش یافته و باعث تعیین میزان ازن می‌شود. اما پیش از اندازه‌گیری حساسیت حسگر به مقادیر مختلف نیاز است تا دمای کاری حسگر نیز به‌طور دقیق مشخص گردد. در حسگرهای اکسید فلزی با افزایش دما، مقاومت کاهش و در نتیجه جریان عبوری از لایه حساس افزایش پیدا می‌کند. به منظور تعیین دمای کاری حسگر می‌بایست پاسخ حسگر به غلظت ثابتی از گاز مورد نظر در دماهای مختلف بررسی شود. به همین منظور با توجه نمودار شکل (۹)، از دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد که نمودار به صورت خطی تغییر می‌کند بررسی آغاز می‌شود. این آزمایش با غلظت ثابت ۵ppm و با گام افزایش دمای ۱۰ درجه‌ای تا دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده که نتایج در نمودارهای شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



شکل ۹- شماتیک فرآیند واکنش گاز ازن با نانومیله‌های اکسید روی و افزایش حامل‌های بار به واسطه فرارگیری حسگر در مجاورت گاز ازن



شکل ۱۰- نمودار تغییرات جریان در غلظت ۵ppm و دمای ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد

دما یک عامل بسیار مهم در حسگرهای گاز اکسید فلز است که بر حساسیت، گزینش‌پذیری، زمان پاسخ و پایداری سیگنال آن‌ها تأثیر می‌گذارد. این حسگرها در هنگام قرارگرفتن در معرض گازها بر تغییرات هدایت الکتریکی تکیه می‌کنند و دما بر سینتیک جذب و واکنش‌های شیمیایی روی سطح حسگر تأثیر می‌گذارد [۶۳-۶۵]. دماهای بالاتر نرخ واکنش و حساسیت حسگر را با تامین انرژی فعال‌سازی لازم افزایش می‌دهد، در حالی که کنترل دقیق دما امکان بهینه‌سازی انتخاب گاز را فراهم می‌کند [۶۶-۶۸]. حفظ دمای ثابت، پایداری سیگنال را تضمین می‌کند و تنظیم دمای عملیاتی امکان سازگاری با شرایط و کاربردهای مختلف محیطی را فراهم می‌کند [۶۷، ۶۹]. فراتر رفتن از بیشینه دمای آستانه در حسگر گاز اکسید فلزی می‌تواند به کاهش پاسخ حسگر به دلیل عوامل مختلف منجر شود. دماهای بالا دفع مولکول‌های گاز از سطح حسگر را تسریع می‌کند و غلظت گاز را که به هدایت الکتریکی کمک می‌کند، کاهش می‌دهد. علاوه بر این، در دماهای بالا، پاسخ حسگر ممکن است اشباع شود و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات غلظت گاز داشته باشد. تغییرات در خواص مواد، نویز ناشی از گرما و تخریب احتمالی مواد نیز می‌تواند بر عملکرد حسگر تأثیر بیشتری بگذارد. بنابراین، بسیار مهم است که این حسگرها در محدوده دمایی مشخص شده خود عمل کنند تا از تشخیص دقیق و قابل اعتماد گاز اطمینان حاصل شود و در عین حال از اثرات نامطلوب مرتبط با گرمای بیش از حد اجتناب شود.

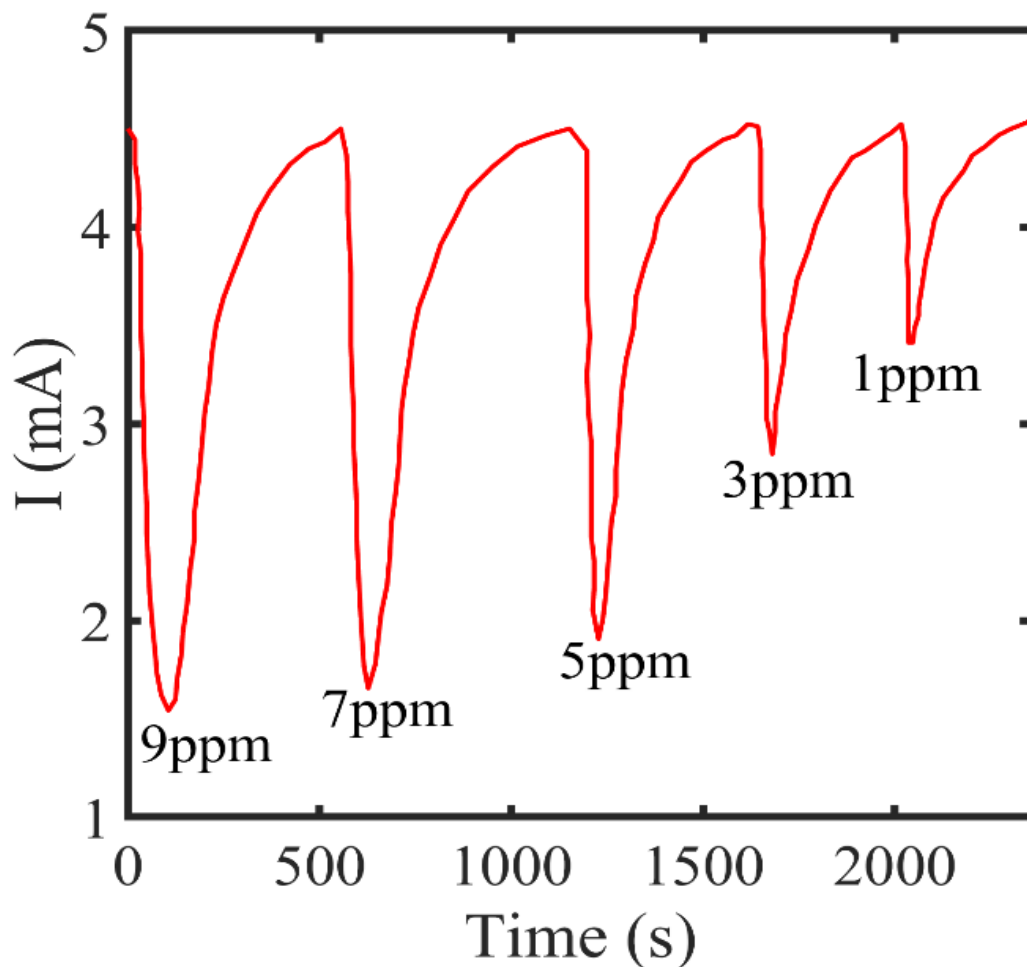
مطابق شکل (۱۰) بهترین عملکرد حسگر در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد با پاسخ ۸۴٪ مطابق رابطه (۴) اتفاق افتاده است. این دما به عنوان دمای کاری حسگر برای کلیه آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته می‌شود.

$$R\% = \frac{I_{air} - I_{gas}}{I_{gas}} \times 100 \quad (4)$$

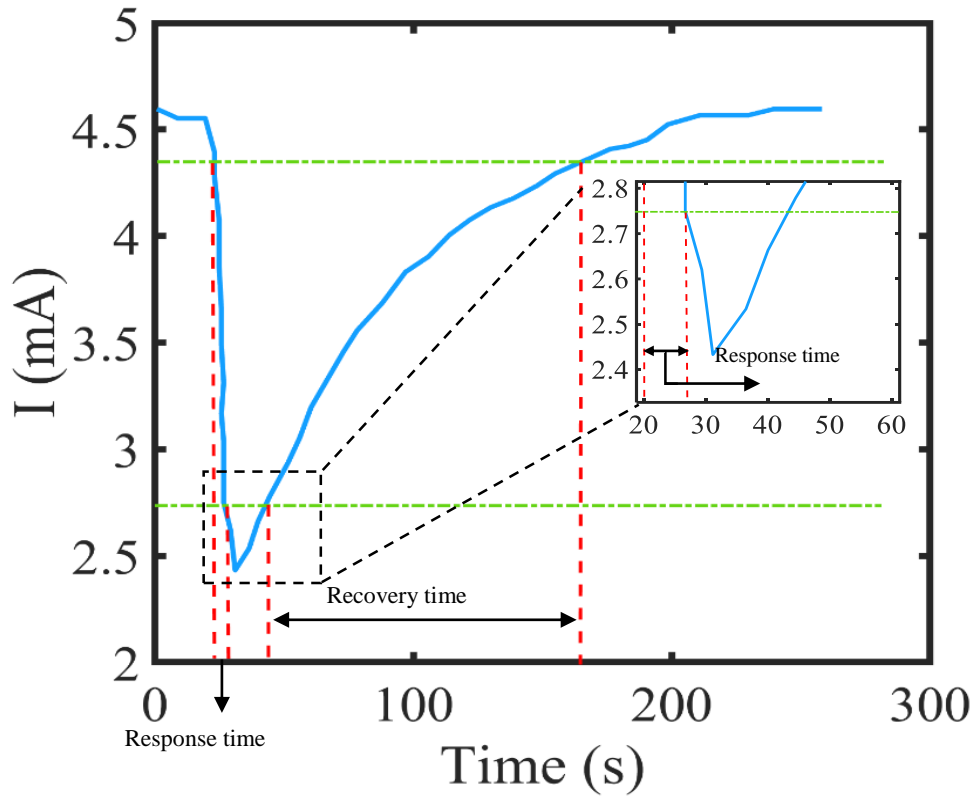
در رابطه (۴)، I_{air} جریان عبور از حسگر در مجاورت هوا، I_{gas} جریان عبور از حسگر در مجاورت گاز اُزن و $R\%$ پاسخ حسگر به میزان گاز اعمالی می‌باشد. برای مشخصه‌یابی حسگر باید عملکرد حسگر در میزان غلظت-های متفاوت مورد آزمایش قرار گیرد. حال با تغییر غلظت از ۱ ppm تا ۹ ppm پاسخ حسگر مطابق نمودار شکل (۱۱)، پاسخ حسگر به غلظت‌های مختلف گاز اُزن قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به کارکرد حسگر و میزان اهمیت پایش گاز اُزن و همچنین مقدار معمول آن در محیط، مقادیر بیش از ۱۰ ppm حائز اهمیت نبوده و همچنین تولید آن با استفاده از دستگاه تولیدکننده گاز اُزن‌ساز امکان‌پذیر نمی‌باشد.

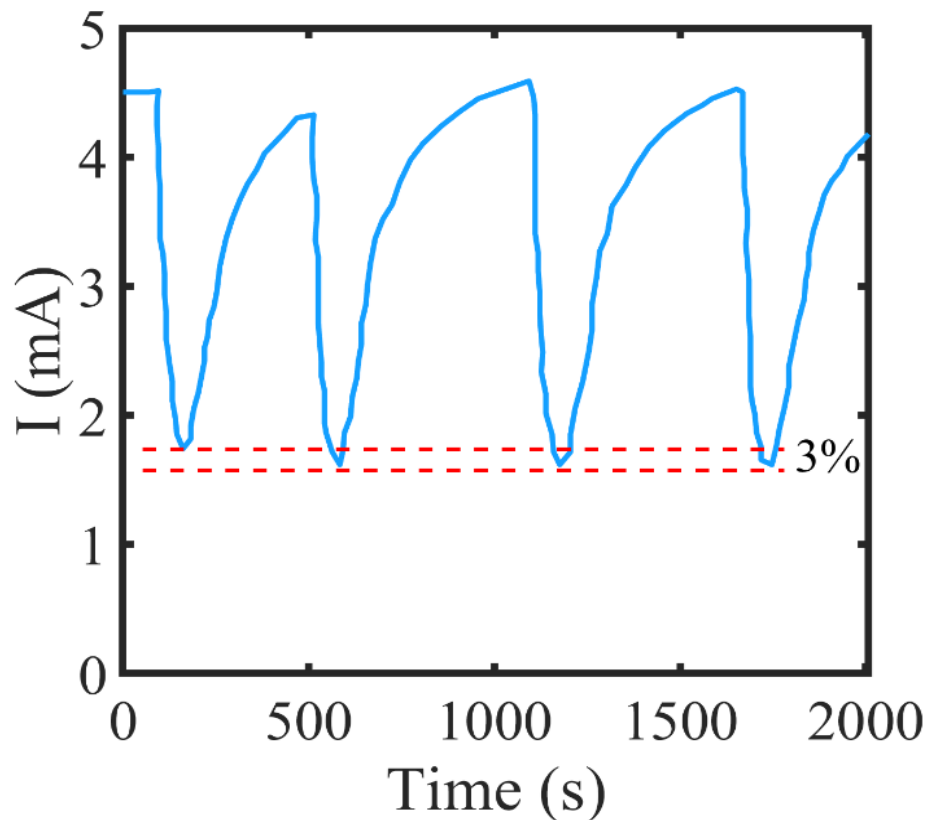
یکی از ویژگی‌های اصلی هر حسگر گاز، سرعت پاسخگویی و بازیابی آن می‌باشد. با توجه به زمان تغییر پاسخ حسگر از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار نهایی برای زمان پاسخگویی و از ۹۰٪ تغییرات به ۱۰٪ برای زمان بازیابی، مطابق نمودار شکل (۱۲)، زمان پاسخگویی و زمان بازیابی حسگر در غلظت ۵ ppm به ترتیب در حدود ۱۵ و ۱۰۰ ثانیه اندازه‌گیری شده است. ویژگی مهم دیگر یک حسگر گاز، تکرارپذیری آن است. بدین منظور آزمایش بررسی حساسیت حسگر در غلظت ثابت ۵ ppm به دفعات تکرار شد که مطابق نمودار شکل (۱۳) حداکثر اختلاف پاسخ‌های مختلف حدود ۳٪ می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات جریان نسبت به غلظت‌های مختلف گاز اُزن



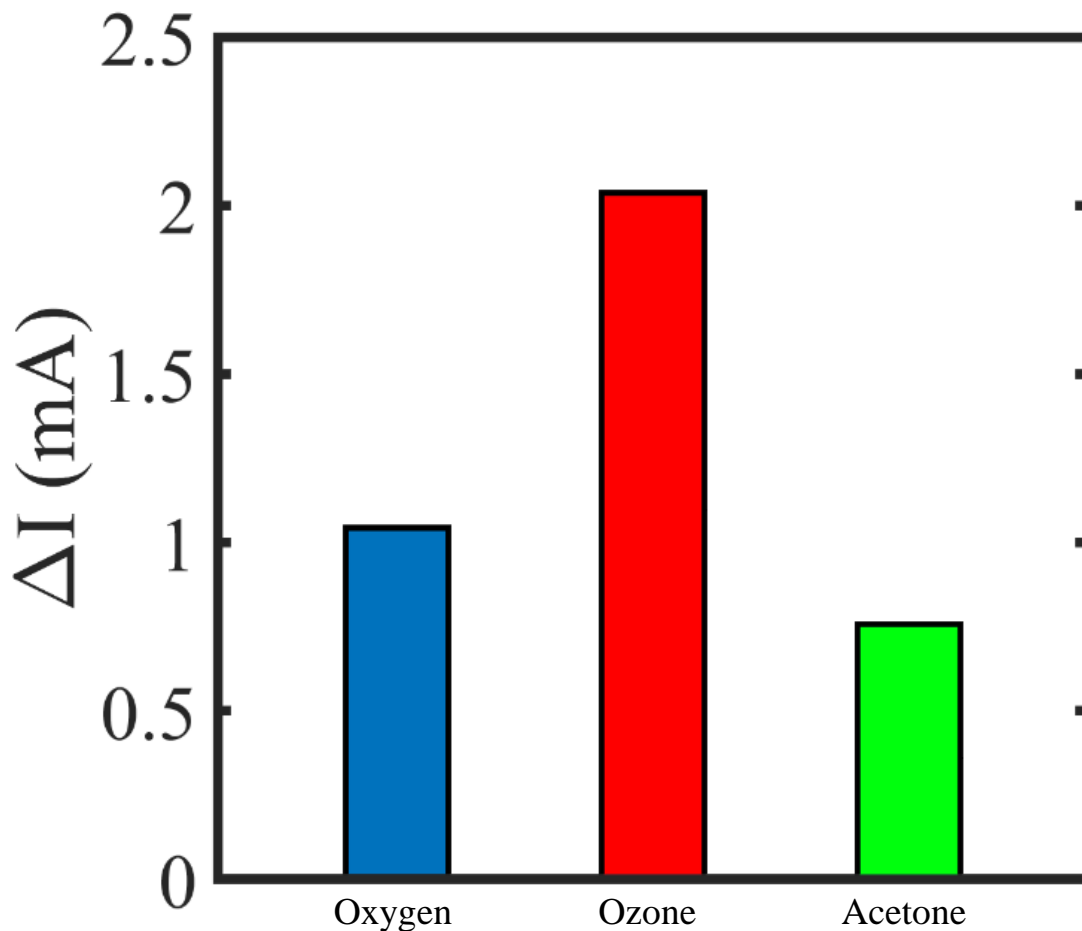
شکل ۱۲- زمان پاسخگویی و بازیابی حسگر در غلظت ۵ppm که به ترتیب در حدود ۱۵ و ۱۰۰ ثانیه می‌باشد. (تصویر داخلی: بزرگ‌نمایی زمان پاسخ حسگر)



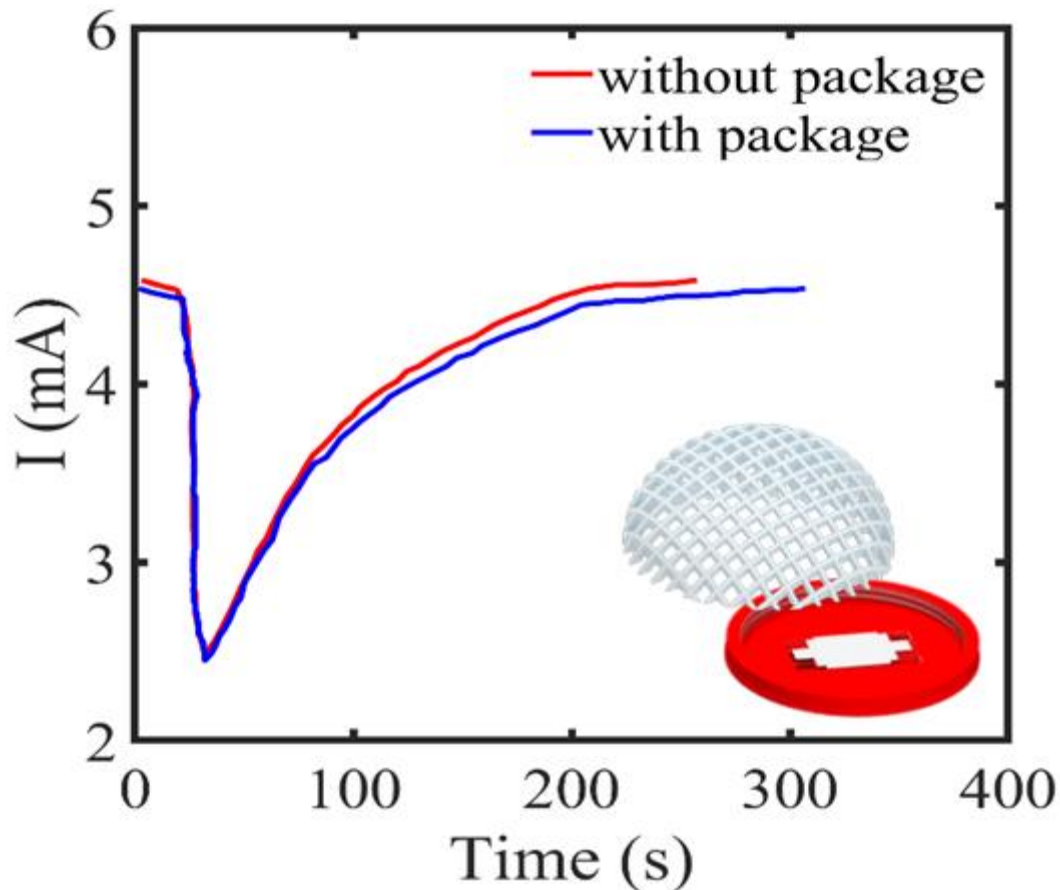
شکل ۱۳- آزمایش تکرارپذیری در غلظت ثابت ۵ppm که بیشترین اختلاف پاسخ حسگر حدود ۳٪ می‌باشد.

از آنجایی که محیط پیرامون حسگر شامل گازهای مختلف است، انتخاب‌پذیری حسگر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. گاز اول مورد بررسی، گاز اکسیژن می‌باشد که نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای برای این حسگر گاز دارد؛ زیرا همان‌طور که پیشتر بیان شد، گاز اُزن ترکیبی از اتم اکسیژن است و همچنین با قرارگیری در محیط بلافاصله به گاز اکسیژن تبدیل می‌شود و به همین دلیل در محیط پیرامون حسگر به مقدار زیادی وجود خواهد داشت. گاز دوم مورد آزمایش، گاز استون می‌باشد که فرآیند جذب مشابهی با گاز اُزن دارد. در شکل (۱۴) نمودار پاسخ حسگر به هر کدام از این گازها در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت ۵ppm ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است پاسخ حسگر به ورود هر کدام از گازها به صورت کامل با دیگری متفاوت است. پاسخ حسگر در زمان ورود گاز اُزن و گاز اکسیژن به یکدیگر شباهت دارند که به دلیل ماهیت کلی این دو گاز به یکدیگر قابل انتظار است و اتم‌های تشکیل دهنده هر دوی آنها یکسان است. پاسخ حسگر به گاز اُزن، گاز اکسیژن و گاز استون به ترتیب ۰.۸۴٪، ۰.۲۱٪ و ۰.۳۱٪ می‌باشد که نشان دهنده انتخاب‌پذیری این حسگر است.

تمامی مشخصه‌یابی‌ها تاکنون در حالتی انجام شد که حسگر درون بسته‌بندی قرار نگرفته بودند. برای بررسی تأثیر بسته‌بندی بر روی آن در همان دمای کاری ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و با غلظت ۵ppm حسگر آزمایش شد و نتایج آن در شکل (۱۵) قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- نمودار انتخاب‌پذیری در برابر گازهای اُزن، اکسیژن و استون که فرآیند جذب مشابه به هم دارند.



شکل ۱۵- نمودار جریان - زمان در حالت بسته‌بندی شده و بدون بسته‌بندی

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۵) قابل مشاهده است در عملکرد حسگر پس از قرارگیری در بسته‌بندی، مطابق انتظار تغییر قابل ملاحظه‌ای صورت نگرفته و صرفاً زمان بازیابی در حد ۲۰ ثانیه افزایش پیدا کرده است که این به دلیل باقی ماندن مولکول‌های گاز اُزن در اطراف حسگر و عدم تخلیه سریع و وجود جریان در اطراف حسگر به دلیل وجود بسته بندی می‌باشد.

برای نشان دادن ویژگی‌های این حسگر و بررسی بهتر عملکرد آن، مشخصه‌های آن با سایر حسگرهایی که ساختار مشابهی دارند، برای تعیین غلظت گاز اُزن مطابق جدول (۱) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

جدول ۱- مقایسه با سایر حسگرهای گاز اُزن

مرجع	حداقل غلظت (ppm)	زمان بازیابی (ثانیه)	زمان پاسخ‌گویی (ثانیه)	دمای کاری (درجه سانتی‌گراد)	ماده لایه فعال
[۷۰]	۱/۰۰	۲۵۰	۵۰	UV+ ۲۵	ZnO
[۷۱]	۰/۰۵	۳۰۰۰	۶۰۰	۲۴۰	SmFeO ₃
[۷۲]	۰/۱۰	۵۰۰	۱۰۰	۳۰۰	In ₂ O ₃
[۷۳]	۱/۰۰	۶۰۰	۲۰۰	۳۵۰	CuO
[۷۴]	۵/۰۰	۵۰۰	۴۰	۲۵۰	ZnO
تحقیق حاضر	۱/۰۰	۱۲۰	۱۵	۱۲۰	ZnO

۴- نتیجه‌گیری

از آنجایی که اندازه‌گیری و کنترل میزان گاز اُزن، در فرآیند اُزن درمانی بسیار حائز اهمیت بوده تا از بروز آسیب به بیمار و حتی کادر درمان جلوگیری شود، این مقاله با موفقیت یک حسگر گاز اُزن مبتنی بر نانومیله‌های اکسید روی ایجاد نمود که پتانسیل لازم برای نظارت بر میزان گاز اُزن در مراکز درمانی را دارا بود. با استفاده از نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده به روش حمام شیمیایی، حساسیت و انتخاب‌پذیری مناسبی نسبت به گاز اُزن مشاهده شد. به منظور ایجاد یک اتصال اهمی برای حسگر، از الکترودهای شانه‌ای از جنس آلومینیوم با تابع کار $4/1$ الکترون ولت استفاده شد تا علاوه در دریافت سیگنال‌های کوچک، اتصال اهمی با نانومیله‌های اکسید روی با تابع کار $4/9$ الکترون ولت ایجاد کند. این حسگر پاسخ خطی و کارایی بهینه را در دمای 120 درجه سانتی‌گراد نشان داد که مناسب بودن آن را برای اندازه‌گیری‌های دقیق و قابل اعتماد بیان نمود. علاوه بر این، ارزیابی انتخاب‌پذیری حسگر بر توانایی آن در تمایز گاز اُزن از سایر ترکیبات رایج موجود تأکید کرد. به‌طور محسوس، حسگر حساسیت قابل توجهی را نشان داده و گاز اُزن را در غلظت‌های پایین یک قسمت در میلیون تشخیص داد. حتی زمانی که با فرآیندهای جذب مشابه توسط گازهای اکسیژن و استون به چالش کشیده شد، حسگر پاسخ قوی 84% را به 5 قسمت در میلیون گاز اُزن نشان داد در حالی که پاسخ‌های کمتری به گازهای اکسیژن و استون (به ترتیب 21% و 31%) نشان داد. این حسگر با نرخ خطای کمتر از 3 درصد کار کرد و زمان پاسخ سریع 15 ثانیه و زمان ثابته را نشان داد. هم‌چنین با قرار گرفتن حسگر در بسته‌بندی طراحی شده، تغییر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ حسگر صورت نگرفت و صرفاً زمان بازیابی در حد 20 ثانیه افزایش پیدا کرد که این به دلیل باقی‌ماندن مولکول‌های گاز اُزن در اطراف حسگر و عدم تخلیه‌ی سریع و وجود جریان در اطراف حسگر به دلیل وجود بسته‌بندی بود. نتایج دلگرم‌کننده از کارآزمایی‌های بالینی اُزن درمانی بر پتانسیل جایگزینی این درمان با روش‌های رایج سنتی تأکید کرد که در آن پایش میزان گاز اُزن در هر شرایطی اهمیت ویژه‌ای داشته و حسگر اُزن طراحی و ساخته شده به واسطه حساسیت بالا در تشخیص مقادیر اندک گاز اُزن و انتخاب‌پذیری مناسب نسبت به دیگر گازها می‌تواند خطرات این درمان نوظهور را به حداقل رسانده و امکان ترویج آن را بسیار بالا ببرد.

مراجع

[1] Y. Suh, S. Patel, R. Kaitlyn, J. Gandhi, G. Joshi, N. L. Smith, and S. A. Khan, "Clinical Utility of Ozone Therapy in Dental and Oral Medicine," *Medical Gas Research*, Vol. 9, No. 3, p. 163, 2019, doi: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.266997>.

[2] S. Tahmasebi, M.T. Qasim, M.V. Krivenkova, A.O. Zekiy, L. Thangavelu, S. Aravindhan, M. Izadi, F. Jadidi-Niaragh, M. Ghaebi, S. Aslani, L. Aghebat-Maleki, M. Ahmadi, and L. Roshangar, "The Effects of Oxygen–ozone Therapy on Regulatory T-cell Responses in Multiple Sclerosis Patients," *Cell Biology International*, Vol. 45, No. 7, pp. 1498-1509, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/cbin.11589>.

[3] R. J. Rowen and H. Robins, "Ozone Therapy for Complex Regional Pain Syndrome: Review and Case Report," *Current Pain and Headache Reports*, Vol. 23, pp. 1-5, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11916-019-0776-y>.

- [4] K. Hao, S. Tang, H. Xie, X. Li, and X. He, "Application of Ozone Therapy in Interventional Medicine," *Journal of Interventional Medicine*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-11, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jimed.2019.05.003>.
- [5] J. Zeng, J. Dou, L. Gao, Y. Xiang, J. Huang, S. Ding, J. Chen, Q. Zeng, Z. Luo, W. Tan, and J. Lu, "Topical Ozone Therapy Restores Microbiome Diversity in Atopic Dermatitis," *International Immunopharmacology*, Vol. 80, p. 106191, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2020.106191>.
- [6] B. Clavo, F. Robaina, G. Urrutia, S. Bisshopp, Y. Ramallo, A. Szolna, M.A. Caramés, M. D. Fiuza, and R. Linertová, "Ozone Therapy Versus Surgery for Lumbar Disc Herniation: A Randomized Double-blind Controlled Trial," *Complementary Therapies in Medicine*, Vol. 59, p. 102724, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102724>.
- [7] Q. Wen, and Q. Chen, "An Overview of Ozone Therapy for Teating Foot Ulcers in Patients with Diabetes," *The American Journal of the Medical Sciences*, Vol. 360, No. 2, pp. 112-119, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.amjms.2020.05.01.۷>
- [8] S. Sen, and S. Sen, "Ozone Therapy a New Vista in Dentistry: Integrated Review," *Medical Gas Research*, Vol. 10, No. 4, p. 189, 2020, doi: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.304226>.
- [9] A. P. Pivotto, F. W. Banhuk, I. V. Staffen, M. A. Daga, T. S. Ayala, and R. A. Menolli, "Clinical Uses and Molecular Aspects of Ozone Therapy: A Review," *OnLine Journal of Biological Science*, Vol. 20, pp. 37-49, 2020, doi: <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2020.37.49>.
- [10] J. Masan, M. Sramka, and D. Rabarova, "The Possibilities of using the Effects of Ozone Therapy in Neurology," *Neuroendocrinology Letters*, Vol. 42, pp. 13-21, 2021, doi: <https://doi.org/0172-780X>.
- [11] L. Yanchu, P. Rong, C. Rong, Z. Li, Y. Xiaoyan, and W. Feng, "Ozone Therapy for High-grade Glioma: An Overview," *Frontiers in Oncology*, Vol. 13, p. 1161206, 2023, <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1161206>.
- [12] O. A. El Meligy, N. M. Elemam, and I. M. Talaat, "Ozone Therapy in Medicine and Dentistry: A Review of the Literature," *Dentistry Journal*, Vol. 11, No. 8, p. 187, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/dj11080187>.
- [13] L. F. Palma, C. Joia, and L. Chambrone, "Effects of Ozone Therapy on Periodontal and Peri-implant Surgical Wound Healing: A Systematic Review," *Quintessence International*, Vol. 54, No. 2, 2023, doi: <https://doi.org/10.3290/j.qi.b3512007>.
- [14] L. R. Kahkhaie, K. R. Keikhaie, A. A. Nasab, and M. R. Kahkha Zhalee, "Low-level Laser Therapy Effects on Reducing Surgical Complications and Wound Infection after Cesarean Section," *Maedica A Journal of Clinical Medicine*, Vol. 18, No. 3, 2023, doi: <https://doi.org/10.26574%2Fmaedica.2023.18.3.426>.
- [15] B. Clavo, D. Rodríguez-Abreu, S. Galván, M. Federico, G. Martínez-Sánchez, Y. Ramallo-Fariña, C. Antonelli, G. Benítez, D. Rey-Baltar, I. J. Jorge, F. Rodríguez-Esparragón and P. Serrano-Aguilar, "Long-term Improvement by Ozone Treatment in Chronic Pain Secondary to

Chemotherapy-induced Peripheral Neuropathy: A Preliminary Report," *Frontiers in Physiology*, Vol. 13, p. 935269, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.935269>.

[16] K. Karolczak and C. Watala, "Estradiol as the Trigger of Sirtuin-1-Dependent Cell Signaling with a Potential Utility in Anti-aging Therapies," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 24, No. 18, p. 13753, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms241813753>.

[17] K. Szklener, A. Rudzińska, P. Juchaniuk, Z. Kabała, and S. Mańdziuk, "Ozone in Chemotherapy-induced Peripheral Neuropathy—Current State of Art, Possibilities, and Perspectives," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 24, No. 6, p. 5279, 2023, <https://doi.org/10.3390/ijms24065279>.

[18] F. Cattell, S. Giordano, C. Bertiond, T. Lupia, S. Corcione, M. Scaldaferrri, L. Angelone, and F. Giuseppe De Rosa, "Ozone Therapy in COVID-19: A Narrative Review," *Virus Research*, Vol. 291, p. 198207, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198207>.

[19] E. I. Epelle, A. Macfarlane, M. Csack, A. Burns, J. A. Okolie, W. Mackay, M. Rateb, and M. Yaseen, "Ozone Application in Different Industries: A Review of Recent Developments," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 454, p. 140188, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140188>.

[20] C.-Y. Huang, X.-R. He, and T.-Y. Dai, "Realization of a Self-powered Cu₂O Ozone Gas Sensor through the Lateral Photovoltaic Effect," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 10, No. 43, pp. 16517-16523, 2022, doi: <https://doi.org/10.1039/D2TC03856K>.

[21] B. Behera, R. Joshi, G. A. Vishnu, S. Bhalerao, and H. J. Pandya, "Electronic Nose: A Non-invasive Technology for Breath Analysis of Diabetes and Lung Cancer Patients," *Journal of Breath Research*, Vol. 13, No. 2, p. 024001, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1752-7163/aafc77>.

[22] S. P. Singh, S. Mukherjee, L.H. Galindo, P.T.C. So, R.R. Dasari, U.Z. Khan, R. Kannan, and A. Upendran, "Evaluation of Accuracy Dependence of Raman Spectroscopic Models on the Ratio of Calibration and Validation Points for Non-invasive Glucose Sensing," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 410, pp. 6469-6475, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1244-y>.

[23] C. Linster, and O. Escanilla, "Noradrenergic Effects on Olfactory Perception and Learning," *Brain Research*, Vol. 1709, pp. 33-38, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2018.03.021>.

[24] K. Ihokura, and J. Watson, "*The Stannic Oxide Gas Sensor principles and Applications*", 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, US, 2017, <https://doi.org/10.1201/9780203735893>.

[25] G. Neri, "First Fifty Years of Chemosensitive Gas Sensors," *Chemosensors*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-20, 2015, doi: <https://doi.org/10.3390/chemosensors3010001>.

[26] H.-J. Kim, and J.-H. Lee, "Highly Sensitive and Selective Gas Sensors using P-type Oxide Semiconductors: Overview," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 192, pp. 607-627, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.005>.

- [27] X. Gao, and T. Zhang, "An Overview: Facet-dependent Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 77, pp. 604-633, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.08.129>.
- [28] N. Kazemi, B. Hashemi, and A. Mirzaei, "Promotional Effect of Nitric Acid Treatment on CO Sensing Properties of SnO₂/MWCNT Nanocomposites," *Processing and Application of Ceramics*, Vol. 10, No. 2, pp. 97-105, 2016, doi: <https://doi.org/10.2298/PAC1602097K>.
- [29] P. Paydari, N. Manavizadeh, A. Hadi, and J. Karamdel, "The Morphology Effect of Embedded ZnO Particles-based Composite on Flexible Hybrid Piezoelectric Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Biomechanical Energy," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 105, No. 2, pp. 337-347, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10971-022-06019-0>.
- [30] N. Hakimi Raad, E. Karimmirza, M. Yousefizad, N. Nouri, H. Sharifpour, E. Nadimi, M. Ahmadi Zeidabadi, and N. Manavizadeh, "Improving the Electronic and Optical Properties of Chalcogenide Cu₂ZnSnS₄ Compound with Transition Metal Dopants: A First-principles Investigation," *Thin Solid Films*, Vol. 766, p. 139653, 2023/02/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139653>.
- [31] S. Park, G.-J. Sun, H. Kheel, W. I. Le, S. Lee., S. Choi., and C. Lee, "Synergistic Effects of Codecoration of Oxide Nanoparticles on the Gas Sensing Performance of In₂O₃ Nanorods," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 227, pp. 591-599, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.12.098>.
- [32] T. Ghafouri, N. Manavizadeh, and E. Nadimi, "Biosensing Properties of Zinc Oxide Nanoribbons Toward Creatine: A First-principles Study," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 8, pp. 7433-7441, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3158700>.
- [33] F. Afshari, Z. Golshan Bafghi, and N. Manavizadeh, "Unsophisticated One-step Synthesis Super Hydrophilic Self-cleaning Coating Based on ZnO Nanosheets," *Applied Physics A*, Vol. 128, No. 1, p. 75, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-05222-0>.
- [34] S. Atashbari, E. Karimmirza, A. Khodayari, and A. M. Bidgoli, "Design and Implementation an Infrared Control-sensing System to Detect Air Bubbles in the Tubes of the Peritoneal Dialysis Machine," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME*, Vol. 26, No. 1, pp. 88-96, 2024, doi: <https://doi.org/10.30506/ijmep.2023.2000277.1932>.
- [35] N. Barsan, D. Koziej, and U. Weimar, "Metal Oxide-based Gas Sensor Research: How to?," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 121, No. 1, pp. 18-35, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.09.047>.
- [36] A. M. Eyvaraghi, E. Mohammadi, N. Manavizadeh, E. Nadimi, L. Ma'mani, F.A. Broumand, and M. Ahmadi Zeidabadi, "Experimental and Density Functional Theory Computational Studies on Highly Sensitive Ethanol Gas Sensor Based on Au-decorated ZnO Nanoparticles," *Thin Solid Films*, Vol. 741, p. 139014, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139014>.

- [37] S. Rezaie, Z. G. Bafghi, N. Manavizadeh, and S. B. Kordmahale, "Highly Sensitive Detection of Dissolved Gases in Transformer Oil with Carbon-doped ZnO Nanotube: A DFT Study," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 82-89, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3126654>.
- [38] D. Ilager, N. P. Shetti, R. S. Malladi, N. S. Shetty, K. R. Reddy, and T. M. Aminabhavi, "Synthesis of Ca-doped ZnO Nanoparticles and Its Application as Highly Efficient Electrochemical Sensor for the Determination of Anti-viral Drug, Acyclovir," *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 322, p. 114552, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114552>.
- [39] Z. Golshan Bafghi and N. Manavizadeh, "Low Power ZnO Nanorod-based Ultraviolet Photodetector: Effect of Alcoholic Growth Precursor," *Optics & Laser Technology*, Vol. 129, p. 106310, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106310>.
- [40] Z. Golshan-Bafghi, and N. Manavizadeh, "Multi-channel ZnO Nanowire FET Performance: Utilizing Different Gate Materials," in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2-4 May 2017, pp. 313-317, doi: <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2017.7985462>.
- [41] T. Li, W. Yin, S. Gao, Y. Sun, P. Xu, S. Wu, H. Kong, G. Yang, and G. Wei, "The Combination of Two-dimensional Nanomaterials with Metal Oxide Nanoparticles for Gas Sensors: A Review," *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 6, p. 982, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12060982>.
- [42] S. Rezaie, Z. G. Bafghi, and N. Manavizadeh, "Carbon-doped ZnO Nanotube-based Highly Effective Hydrogen Gas Sensor: A First-principles Study," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 27, pp. 14174-14182, 2020/05/18/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.050>.
- [43] M. N. Rezaie, N. Manavizadeh, E. M. N. Abadi, E. Nadimi, and F. A. Boroumand, "Comparison Study of Transparent RF-sputtered ITO/AZO and ITO/ZnO Bilayers for Near UV-OLED Applications," *Applied Surface Science*, Vol. 392, pp. 549-556, 2017/01/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.080>.
- [44] Y.-F. Sun, S. B. Liu, F. L. Meng, J. Y. Liu, Z. Jin, L. T. Kong, and J. H. Liu, "Metal Oxide Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review," *Sensors*, Vol. 12, No. 3, pp. 2610-2631, 2012, doi: <https://doi.org/10.3390/s120302610>.
- [45] N. Manavizadeh, "Enhanced Physical Properties of Indium Tin Oxide Films Grown on Zinc Oxide-coated Substrates," (in Persian), *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 2, No. 1, pp. 19-25, 2016, doi: <https://doi.org/10.30501/acp.2016.70014>.
- [46] Ü. Özgür, D. Hofstetter, and H. Morkoc, "ZnO Devices and Applications: A Review of Current Status and Future Prospects," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 98, No. 7, pp. 1255-1268, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2044550>.
- [47] A. Tsuruta, A. Tsuruta, T. Itoh, M. Mikami, Y. Kinemuchi, I. Terasaki, N. Murayama, and W. Shin, "Trial of an All-ceramic SnO₂ Gas Sensor Equipped with CaCu₃Ru₄O₁₂ Heater and Electrode," *Materials*, Vol. 11, No. 6, p. 981, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11060981>.

- [48] M. Alvarado, E. Navarrete, A. Romero, J. L. Ramírez, and E. Llobet, "Flexible Gas Sensors Employing Octahedral Indium Oxide Films," *Sensors*, Vol. 18, No. 4, p. 999, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s18040999>.
- [49] N. Nouri, T. Ghafouri, Z. Golshan Bafghi, N. Manavizadeh, and M. Ahmadi Zeidabadi, "A First-principles Study on the Electronic and Optical Properties of ZnO Nanowires Toward Detection of α -amino Acids," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 447, p. 115237, 2024/01/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115237>.
- [50] M. N. Rezaie, N. Manavizadeh, F. D. Nayeri, M. M. Bidgoli, E. Nadimi, and F. A. Boroumand, "Effect of Seed Layers on Low-temperature, Chemical Bath Deposited ZnO Nanorods-based Near UV-OLED Performance," *Ceramics International*, Vol. 44, No. 5, pp. 4937-4945, 2018/04/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.086>.
- [51] A. Vijay, A. Mukhopadhyaya, V. Shrivastava, D. Bhardwaj, A.K. Ganguli, M.E. Ali, and S. Vaidya, "Understanding the Role of Ionic Flux on the Polarity of the Exposed Surfaces of ZnO," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 22, No. 27, pp. 15427-15436, 2020, doi: <https://doi.org/10.1039/D0CP02095H>.
- [52] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, and R. Binions, "Metal Oxide Semi-conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring," *Sensors*, Vol. 10, No. 6, pp. 5469-5502, 2010, doi: <https://doi.org/10.3390/s100605469>.
- [53] P. Bhattacharyya, "Technological Journey Towards Reliable Microheater Development for MEMS Gas Sensors: A Review," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 14, No. 2, pp. 589-599, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/TDMR.2014.2311801>.
- [54] L. Vikas, K. Sanal, M. Jayaraj, A. Antony, and J. Puigdollers, "Vertically Aligned ZnO Nanorod Array/CuO Heterojunction for UV Detector Application," *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 211, No. 11, pp. 2493-2498, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/pssa.201431221>.
- [55] N. S. Mazlan, M. M. Ramli, M. M. A. B. Abdullah, D. S. C. Halin, S. S. M. Isa, L. F. A. Talip, N. S. Danial, and S. A. Z. Murad, "Interdigitated Electrodes as Impedance and Capacitance Biosensors: A Review," in *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1885, No. 1: AIP Publishing, doi: <https://doi.org/10.3390%2Fs21217288> .
- [56] D. M. Mattox, "*Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*", William Andrew, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-18800-1> .
- [57] N. Selvakumar and H. C. Barshilia, "Review of Physical Vapor Deposited (PVD) Spectrally Selective Coatings for Mid-and High-temperature Solar Thermal Applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 98, pp. 1-23, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>.
- [58] A. Baptista, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, and G. Pinto, "Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands," *Coatings*, Vol. 8, No. 11, p. 402, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>.

- [59] J. Kim, H. C. Lee, K.H. Kim, M.S. Hwang, J. S. Park, J. M. Lee, J. P. So, J. H. Choi, S. H. Kwon, and C. J. Barrelet, "Photon-triggered Nanowire Transistors," *Nature Nanotechnology*, Vol. 12, No. 10, pp. 963-968, 2017/10/01 2017, doi: <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.153>.
- [60] P. Paydari, N. Manavizadeh, A. Had, and J. Karamdel, "Performance Investigation of Piezi/Triboelectric Hybrid Nanogenerator Based on Zinc Oxide Composite: Copper and Aluminum Effect," *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 12, No. 3, pp. 15-30, 0621, doi: <https://doi.org/10.30501/jamt.2023.392805.1273>.
- [61] M. Yousefzad, M.M. Zarasvand, M. Bagheritabar, M. M. Ghezelayagh, A. Farahi, T. Ghafouri, F. Raissi, M. A. Zeidabadi, and N. Manavizadeh, "Performance Investigation of Low-power Flexible n-ZnO/p-CuO/n-ZnO Heterojunction Bipolar Transistor: Simulation Study," *Micro and Nanostructures*, Vol. 180, p. 207594, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2023.207594>.
- [62] W. Feng, B. Wang, P. Huang, X. Wang, J. Yu, and C. Wang, "Wet Chemistry Synthesis of ZnO Crystals with Hexamethylenetetramine(HMTA): Understanding the Role of HMTA in the Formation of ZnO Crystals," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 41, pp. 462-469, 2016/01/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.10.017>.
- [63] T. Ghafouri, and N. Manavizadeh, "A 3D-printed Millifluidic Device for Triboelectricity-driven pH Sensing Based on ZnO Nanosheets with Super-ernstian Response," *Analytica Chimica Acta*, Vol. 1267, p. 341342, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341342>.
- [64] M. Nourafkan, and N. Manavizadeh, "The Effect of Nanowire Dimensions on Resonance Frequency of ZnO-based Nanogenerator," in *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 30 April-2 May 2019, pp. 190-194, doi: <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2019.8786646>.
- [65] Z. G. Bafghi, and N. Manavizadeh, "Simulation Study of ZnO Nanowire FET Arrays for Photosensitivity Enhancement of UV Photodetectors," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 122, pp. 18-27, 2018/10/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.08.028>.
- [66] V. Shirmohammadli, N. Manavizadeh, and Z. G. Bafghi, "Efficient Capture of Circulating Tumor Cells using Patterned ZnO Nanorod Arrays," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 591-598, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2943386>.
- [67] T. Ghafouri, R. Tahmasebi, N. Manavizadeh, and E. Nadimi, "Gas Sensing Properties of Silicon Nanowires with Different Cross-sectional Shapes Toward Ammonia: A First-principles Study," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 21, pp. 1-12, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4599-x>.
- [68] S. Rezaie, Z. G. Bafghi, N. Manavizadeh, and E. Nadimi, "Hydrogen Gas Sensing Mechanism in Zinc Oxide Nanowire and Nanotube: A Density Functional Theory Study," in *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 30 April-2 May 2019, pp. 71-75, doi: <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2019.8786654>.
- [69] M. Nourafkan, E. Mohammadi, and N. Manavizadeh, "Influence of the ZnO Nanostructures Shape on Piezoelectric Energy Harvesters Performance," *IEEE Transactions on*

Electron Devices, Vol. 66, No. 11, pp. 4989-4996, 2019, doi : <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2942777>.

[70] N. Joshi, L. F. da Silva, F. M. Shimizu, V. R. Mastelaro, J. C. M'Peko, L. Lin, and O. N. Oliveira "UV-assisted Chemiresistors Made with Gold-modified ZnO Nanorods to Detect Ozone Gas at Room Temperature," *Microchimica Acta*, Vol. 186, pp. 1-9, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00604-0194-3532>.

[71] Y. Hosoya, Y. Itagaki, H. Aono, and Y. Sadaoka, "Ozone Detection in Air using SmFeO₃ Gas Sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 108, No. 1-2, pp. 198-201, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.10.059>.

[72] G. Korotcenkov, A. Cerneavschi, V Brinzari, A Vasiliev, M Ivanov, A Cornet, J Morante, A. Cabot, and J. Arbiol, "In₂O₃ Films Deposited by Spray Pyrolysis as a Material for Ozone Gas Sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 99, No. 2-3, pp. 297-303, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.01.001>.

[73] A. Bejaoui, J. Guerin, J. A. Zapien, and K. Aguir, "Theoretical and Experimental Study of the Response of CuO Gas Sensor under Ozone," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 190, pp. 8-15, 2014/01/01/ 2014, doi:S <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.06.084>.

[74] A. C. Catto, L. F. Da Silva, C. Ribeiro, S. Bernardini, K. Aguir, E. Longo, and V.R. Mastelaro, "An Easy Method of Preparing Ozone Gas Sensors Based on ZnO Nanorods," *RSC Advances*, Vol. 5, No. 25, pp. 19528-19533, 2015, doi: <https://doi.org/10.1039/C5RA00581G>.

Fabrication and Evaluation of Nanobiomechanical Ozone Sensor using Zinc Oxide Nanorods: Effect of Temperature on Sensor Performance and Improved Selectivity to Other Gases

Parsa Vezvaei

M.Sc., Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
p.vezvaei@email.kntu.ac.ir

Erfan Karimmirza

Ph.D. Candidate, Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
erfankarimmirza@email.kntu.ac.ir

Mostafa Salehikhah

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
m.salehikhah@yahoo.com

Alireza Khodayari

Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
a.khodayari@iauctb.ac.ir

Pouya Paydari

Ph.D., Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran
p.paydari@acecr.ac.ir

Corresponding author: **Negin Manavizadeh**

Associate Professor, Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
manavizadeh@kntu.ac.ir

Morteza Izadi

Professor, Health Research Center, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran
morteza_izadi@yahoo.com

Abstract

Nowadays, ozone therapy has been proposed as a non-invasive and efficient method to treat many diseases. Excess amounts of this gas are harmful to the lungs and eyes and can have adverse effects on the treatment process. Therefore, it is important to monitor the amount of ozone gas used. In this article, in order to accurately measure and control the amount of this gas, the design and construction of the nanobiomechanical ozone gas sensor has been discussed. In this sensor, zinc oxide active material is used on a glass substrate and aluminum shoulder electrodes. The results of the characterization and measurement of this sensor show that this sensor has the best performance at a temperature of 120 degrees Celsius in the amount of 5 ppm of ozone gas with an efficiency of 84%. Also, the response and recovery time of this sensor has been measured as 15 and 120 seconds, respectively. The remarkable thing about the built sensor is the ability to measure ozone gas up to the minimum value of 1 ppm. Also, it has good selectivity to oxygen and acetone gases in equal amounts, so the response of the sensor to 5

ppm of oxygen and acetone gas is 21% and 31%, respectively. Also, the results showed that the proper design of the sensor packaging, looking at its mechanical aspects, does not make significant changes to the sensor performance.

Keyword: Electrochemical gas sensor, Ozone gas sensor, Metal oxide gas sensor, Zinc oxide nanorod