

مشخصه یابی و بررسی اثر افزودن نقره بر حسگرهای گازی اکسید قلع

سکینه حیدری^۱، سعیده رهبرپور^۲، حسن غفوری فرد^۳، علی اصغر اروچی^۴.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش الکترونیک، دانشگاه سمنان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده برق، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.

۴- استاد، دانشکده برق، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

خلاصه

در این مقاله تاثیر آرایش نقره بر ویژگی های حسگری حسگر گاز اکسید قلع بررسی شده و نشان داده شده است که این فلز تاثیر ویژه ای در بهبود عملکرد حسگری اکسید قلع دارد. جهت ایجاد نانوذرات نقره، از ابتدا مقدار مشخصی از یک ترکیب نقره دار مانند نیترات نقره با پودر اکسید قلع مخلوط گردید. نیترات نقره در فرآیند تفجوشی تجزیه شده و سطح دانه های اکسید قلع با ذرات نقره حاصل از این فرآیند آرایش می شود. رفتار حسگر ساخته شده به ازای غلظت های مختلف نقره بررسی گردید. مشاهده شد که افزودن نقره به حسگر اکسید قلع سطح پاسخ حسگر به گاز ۱- بوتانول را تا چند دهه افزایش داده و باعث کاهش دمای بیشینه پاسخ از ۲۵۰ درجه سانتیگراد به ۲۰۰ درجه سانتیگراد می شود. غلظت های مختلف ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد نقره بررسی شد. و مشاهده شد که حسگر آرایش شده با ۰/۵ درصد وزنی نسبت به سایر نمونه ها از ویژگی های بهتری برخوردار است به نحوی که در پاسخ به ۱۰۰۰ ppm گاز ۱- بوتانول، نسبت به نمونه خالص ۶ برابر بیشتر تغییرات مقاومت از خود نشان داد. حسگر گازی ساخته شده به این روش یک حسگر ساده، حساس و مقرون به صرفه می باشد. رفتار مشاهده شده با استفاده از مدل فیزیکی توضیح داده شد.

کلمات کلیدی: حسگر گاز مقاومتی، اکسید قلع، نانوذرات نقره، ۱- بوتانول، دمای بیشینه پاسخ، رفتار دمایی

۱. مقدمه

اکسیدهای فلزی متفاوتی مانند WO_3 و ZnO ، TiO_2 ، SnO_2 به عنوان حسگر گاز مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱-۶]. در این میان اکسید قلع با هزینه ساخت پایین و ویژگی های حسگری مناسب، گزینه مناسبی برای استفاده در

¹ Email: sakinehheidari70@yahoo.com مسنول مکاتبات



حسگرهای تجاری تشخیص داده شده است [۷-۹]. لیکن حسگرهای مبتنی بر اکسید قلع دارای مشکلاتی از جمله دمای کاری بالا و انتخابگری پایین هستند. افزودن فلزات نجیبی مانند Pd، Pt و Rh موجب بهبود عملکرد این حسگرها می-شوند اما این فلزات به علت هزینه بالای آنها قیمت تمام شده حسگر بهبود یافته را افزایش می-دهند [۹-۱۲]. سطوح حسگرهای نیمه‌هادی آرایش شده به وسیله فلزات نجیبی پاسخ حسگرها در مواجهه با گازهای کاهشی را ارتقاء می-دهد و این امر وابسته به دما و میزان افزایش‌دهنده‌ها می‌باشد [۱۵]. در میان این فلزات، پالادیوم بیشترین فعالیت کاتالیزوری برای تجزیه هیدروژن را داراست. طبق جدول تناوبی عناصر، Ag بعد از Pd قرار دارد. به همین دلیل انتظار می‌رود خواص شیمیایی مشابهی داشته باشد [۱۳-۱۹].

فلزات نجیب عمدتاً تابع کار بالایی دارند و در اتصال آنها با اکسیدهای فلزی، نقل و انتقال بار صورت گرفته و یک دیود شاتکی^۲ در محل اتصال ایجاد می‌گردد. طبق مطالعات صورت گرفته، در صورتی که ویژگی‌های دیودی در قطعه غالب باشد و بتوان از مقاومت اکسید صرف نظر نمود، تغییرات ارتفاع سد شاتکی در حضور گازهای محیطی مختلف تعیین کننده اصلی رفتار الکتریکی و مقاومت معادل کل قطعه خواهد بود. در شرایط عملی، ممکن است ساختار به‌گونه‌ای باشد که مقاومت اکسید فلزی نیز قابل توجه باشد و در نتیجه تغییرات آن به گاز نیز در پاسخ نهایی حسگر موثر باشد. به طور مثال هیدروژن موجود در فضای اطراف حسگر به طور همزمان هم موجب افزایش هدایت در لایه اکسید قلع و هم کاهش سد پتانسیل بین نقره و اکسید قلع می‌شود که در نتیجه‌ی هر دوی این اثرها جریان عبوری از مدار بالا می‌رود [۲۰].

از آن جایی که نقره در مقایسه با دیگر فلزات نجیب دارای تابع کار کوچکی است (۴/۲۶ الکترون ولت) [۲۱،۲۲] به نظر می‌رسد با اکسیدهای فلزی اتصال اهمی ساخته و توانایی ایجاد سد شاتکی را ندارد. این به این معنی است که نقره نمی‌تواند مانند سایر فلزات نجیب از طریق سازوکار حساس سازی الکترونیکی باعث افزایش حساسیت اکسیدهای فلزی گردد. حساس سازی الکترونیکی به این معنی است که در شرایطی که در سطح نیمه‌هادی، ذرات کوچک فلز به طور مناسب پراکنده شوند، اتصال دیودی فلز-نیمه‌هادی شکل می‌گیرد. در این شرایط جذب و واجذب اکسیژن محیط در سطح ذرات فلزی موجب تغییر ارتفاع سد در نقاط اتصال و در نتیجه آن تغییر مقاومت معادل در لایه حساس می‌شود [۲۳]. این مفهوم باعث شده بود که تا مدت‌ها مطالعه‌ی بر روی حساس سازی اکسیدهای فلزی به وسیله ذرات نقره صورت نگیرد. مطالعات اخیر در رابطه با حسگرهای گاز شاتکی مبتنی بر نقره و بررسی جذب و واجذب اکسیژن در سطح نقره نشان داده‌است که تابع کار نقره به شدت به فشار جزئی اکسیژن محیط حساس است. ذرات نقره جاذب اکسیژن بوده و در نتیجه جذب اکسیژن تابع کار آن تا ۶ الکترون ولت قابلیت افزایش دارد [۲۴]. ذرات نقره با تابع کار افزایش یافته باعث ایجاد لایه‌ی تهی در سطح اکسید زیرین گشته و پاسخ به گاز اکسید فلزی را تغییر می‌هند [۲۰].

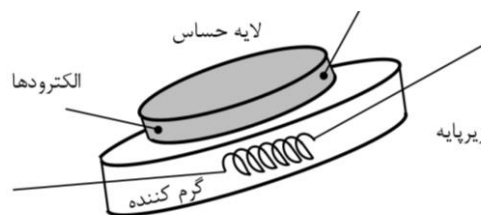
در کار حاضر نشان داده شده‌است که افزودن نقره موجب بهبود پاسخ حسگر و کاهش دمای کار آن می‌شود و میزان تاثیر به میزان افزودنی نقره در اکسید قلع وابسته است. برای مثال پاسخ حسگر حاوی ۰/۵ نقره نسبت به نمونه حاوی ۰/۳ درصد بهتر عمل می‌کند لیکن افزایش بیشتر مقدار نقره تا ۰/۷ درصد باعث افزایش میزان بهبود حسگر نمی‌شود. اگرچه حتی در این حالت نیز سطح پاسخها نسبت به نمونه خالص بالاتر است. در انتها مدل فیزیکی برای توجیه رفتار مشاهده شده ارائه شده است.

۲. کار آزمایشگاهی

۱-۲. ساخت حسگر

² Schottky diode

برای ساخت حسگر از پودر اکسید قلع و پودر نیترات نقره استفاده شد. ابتدا دوغاب غلیظی از اختلاط پودر اکسید قلع و آب مقطر ایجاد شد و سطح یکنواختی از آن بر بستر سرامیکی عایق قرار داده و الکترودهای پلاتینی در آن جایگذاری شد. جهت آرایش لایه حساس با نقره، به منظور رسیدن به درصد وزنی مطلوب، مقدار مشخصی از پودر نیترات نقره به دوغاب اولیه اضافه گردید. برای مثال با توجه به اینکه جرم مولی نیترات نقره ۱۶۹/۸۷ گرم بر مول می‌باشد و نقره ۶۳/۵ درصد آن را تشکیل می‌دهد لازم است برای ایجاد ۰/۷ درصد نقره مقدار ۱/۱ گرم نیترات نقره در ۱۰۰ گرم اکسید قلع ریخته شود. نمونه‌های مختلفی با درصدهای نقره ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی ساخته شد. از آنجا که در انتهای پروسه ساخت نمونه در کوره الکتریکی با دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۹۰ دقیقه قرار داده می‌شود، نیترات نقره تجزیه شده و ذرات نقره در سطح دانه‌های اکسید قلع شکل می‌گیرند. تغییر رنگ لایه حساس به رنگ نقره‌ای یکی از دلایل نشان دهنده تبدیل نیترات نقره به نقره می‌باشد. شکل ۱ طرحواره حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختمان داخلی حسگر مقاومتی اکسید قلع.

۲-۲. مشخصه‌یابی

شکل ۲ طرحواره سامانه اندازه‌گیری پاسخ حسگر را نشان می‌دهد. این سامانه شامل یک محفظه ۲ لیتری، دو سیم اتصال ولتاژ به ریزگرم‌کن داخلی حسگر، ۲ سیم اتصال ولتمتر به الکترودهای حسگر و یک رایانه برای قرائت مقاومت الکتریکی حسگر است. از آنجایی که عملکرد حسگرها در مواجهه با گازهای مختلف الکلی و هیدروژن تقریباً مشابه هم است، گاز ۱-بوتانول به خاطر در دسترس و غیرقابل انفجار بودن به عنوان گاز هدف و هوای آزاد به عنوان گاز مرجع در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری پاسخ حسگر، ابتدا حسگر را در هوای آزاد قرار داده و مقاومت الکتریکی آن قرائت شد. سپس حسگر به طور ناگهانی وارد محفظه گاز گردید. محفظه گاز از پیش توسط تزریق حجم مشخصی از گاز ۱-بوتانول (متناسب با غلظت گاز مطلوب) که به وسیله نمونه‌بردار میکرولیتری^۳ اندازه‌گیری شده بود آماده سازی شده بود. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی حسگر، با استفاده از قرار دادن حسگر در مدار شکل ۲ ممکن گردید. ولتاژ اعمالی به دوسر مدار ۲ ولت بود. با استفاده از یک ولتمتر دیجیتال قابل اتصال به رایانه ولتاژ V_x (نشان داده شده در شکل ۲) قرائت شد. مقاومت حسگر از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

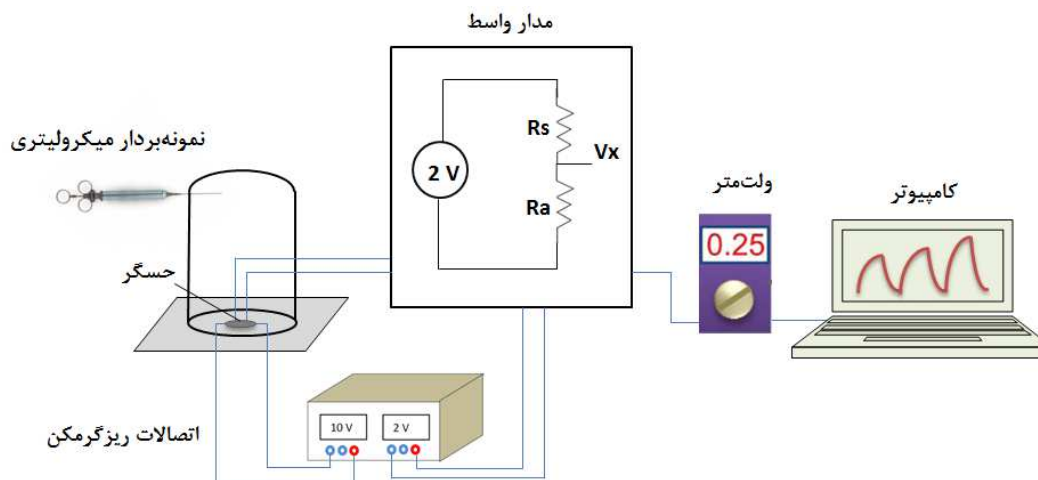
$$R_s = \left(\frac{2 - V_x}{V_x} \right) R_c \quad (1)$$

که در آن R_s مقاومت حسگر و R_c مقاومت مدار واسط است. پاسخ حسگر با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$S = R_c / R_s \quad (2)$$

³ Microsampler

که در آن R_a مقاومت حسگر در هوای تمیز و R_g مقاومت حسگر در محیط گازی است. هر دو مقدار استفاده شده در رابطه ۲ با استفاده از مدار اندازه‌گیر شکل ۲ مشخص شده‌اند.



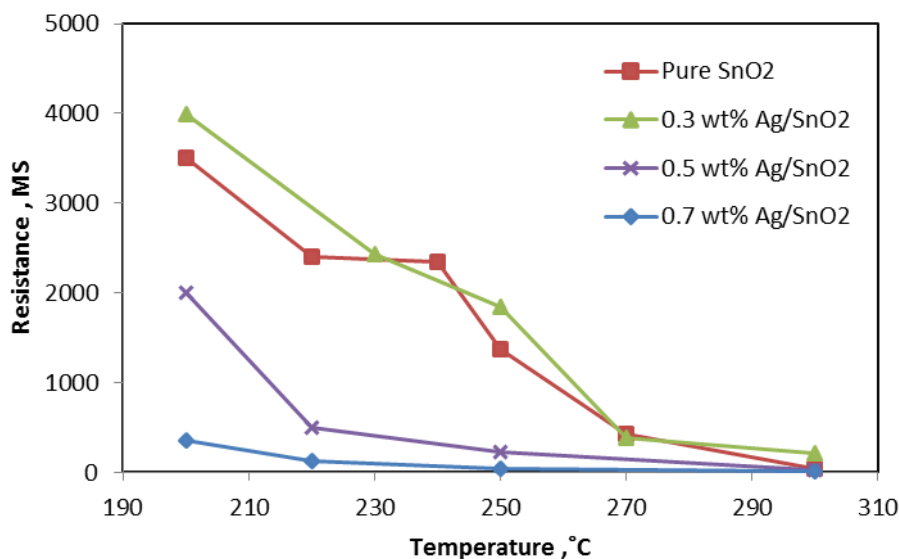
شکل ۲- طرحواره و مدار اندازه‌گیری مقاومت و پاسخ نمونه‌ها.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقاومت الکتریکی در هوا

مقاومت الکتریکی در نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی متخلخل توسط سد پتانسیل الکتریکی تولید شده در مرزخانه‌ها تعیین می‌شود. چنانچه ارتفاع سد شاتکی حادث در مرزخانه‌ها در تمام بازه‌ی دمایی مورد مطالعه ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش دما، حامل‌ها انرژی کافی برای عبور از سد شاتکی را بدست آورده و مقاومت اکسید فلزی کاهش می‌یابد [۹].

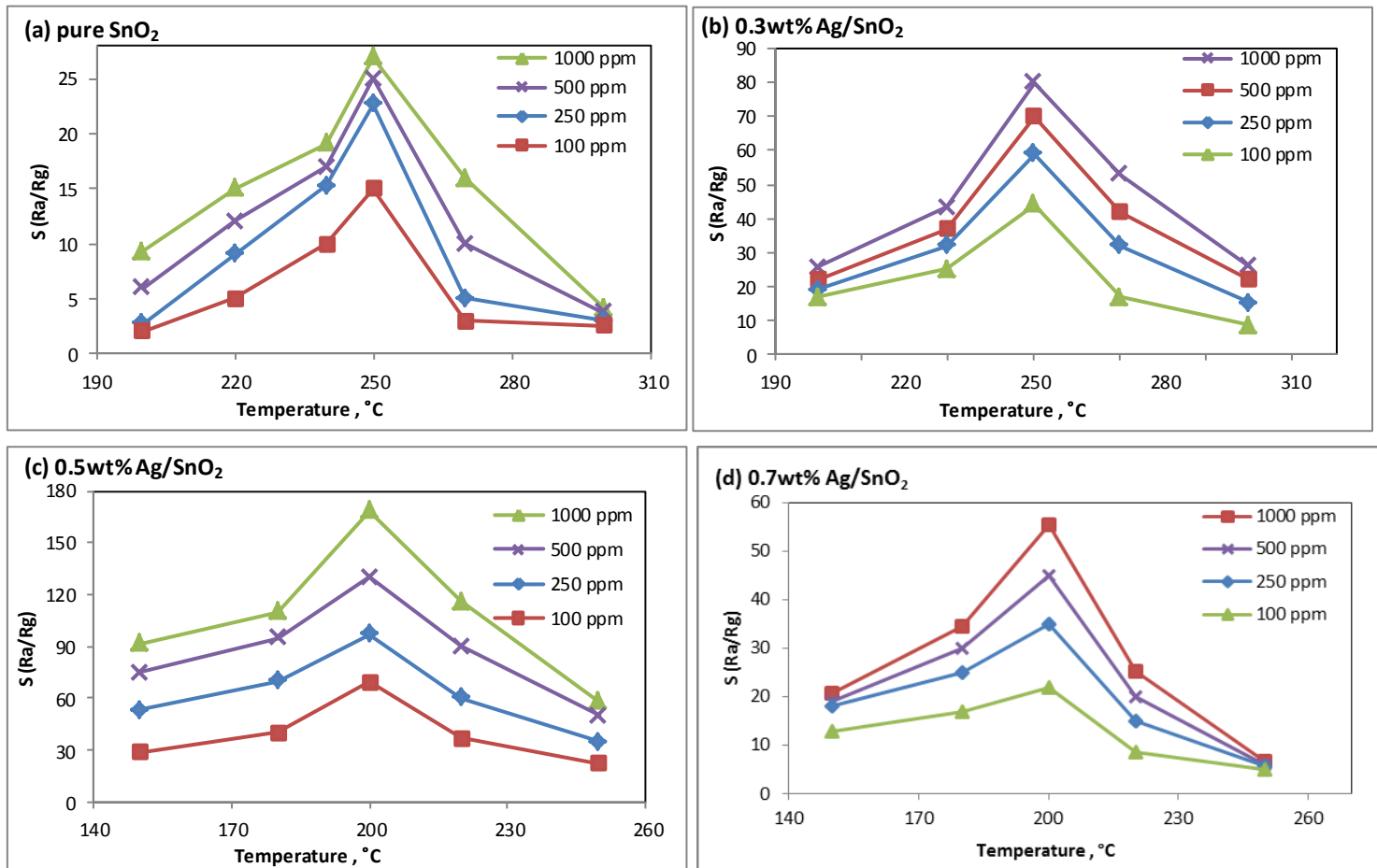
مقاومت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده در دمای کاری ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شده و در شکل ۳ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۳، مقاومت الکتریکی همه‌ی نمونه‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد. اگرچه در برخی از مقالات افزایش مقاومت الکتریکی با آرایش فلزات نجیب گزارش شده‌است [۹] لیکن در کار حاضر تاثیر نقره بصورت کاهش مقاومت بود. دلیل این امر ضخامت زیاد لایه حساس بوده‌است. در نمونه‌های لایه نازک، لایه تهی ایجاد شده در محل اتصال ذرات نقره با اکسید، می‌تواند باعث کاهش سطح مقطع عبور الکترون از یک الکتروود به الکتروود دیگر گردد. در این حالت نانوذرات نقره مانند گیت ترانزیستور عمل نموده و عبور جریان بین دو الکتروود را کنترل می‌کنند. لیکن در نمونه‌ی ساخته شده، ضخامت لایه حساس نسبت به لایه تهی بسیار بزرگتر است و افزایش مقاومت ناشی از این سازوکار دیده نمی‌شود. در مقابل ایجاد مسیر کم اهم ناشی از وجود ذرات فلزی نقره بین دو الکتروود باعث کاهش مقاومت کل قطعه می‌شود. نتایج به دست آمده با نتایج [۲۵] مطابقت دارد.



شکل ۳- مقاومت الکتریکی حسگرهای اکسید قلع خالص و اکسید قلع آرایش شده با نقره با غلظت- های مختلف نقره در محیط هوای تمیز.

۳-۲. پاسخ حسگر در حضور گاز ۱- بوتانول

پاسخ دمایی حسگرهای اکسید قلع خالص و آرایش شده با مقادیر مختلف نقره، در شکل ۴ نشان داده شده است. در خصوص هر نمونه، بررسی پاسخی در غلظت‌های مختلف ۱۰۰-۱۰۰۰ ppm از گاز ۱-بوتانول انجام شد. مشاهده گردید که نقطه دمایی بیشینه حساسیت مستقل از مقدار غلظت گاز مورد آزمایش بوده لیکن به شدت به وجود یا عدم وجود آرایش نقره ارتباط دارد. نقطه دمایی بیشینه حساسیت حسگر اکسید قلع خالص و حسگر ۰/۳ درصد وزنی ۲۰۰ درجه سانتیگراد است در حالیکه برای حسگرهای ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی ۲۵۰ درجه سانتیگراد است. میزان نقره افزوده شده در حسگر ۰/۳ درصد وزنی آنقدر کم است که در مقایسه با حسگر خالص اکسید قلع نه تنها نقطه دمایی بیشینه حساسیت حسگر را جا به جا نکرده بلکه حتی تاثیر چندانی بر مقاومت آن هم ندارد (شکل ۳).



شکل ۴- پاسخ حسگر های (a): اکسید قلع خالص، (b): اکسید قلع با ۰/۳ درصد وزنی نقره، (c): اکسید قلع با ۰/۵ درصد وزنی نقره، (d): اکسید قلع با ۰/۷ درصد وزنی نقره در مواجهه با گاز ۱- بوتانول در غلظت های ۱۰۰-۱۰۰۰ ppm.

وابستگی دمایی حساسیت به گاز اکسید قلع توسط تئوری ساکایی توصیف می شود. در واقع مدل ساکایی^۴ اولین، مهم ترین و کاربردی ترین مدل برای توجیه پاسخی حسگرهای مقاومتی است [۲۶]. در این مدل فرض می شود که گاز به لایه های داخلی لایه حساس نفوذ می کند و بر حسب تراکم موجود در هر لایه هدایت آن لایه را متاثر می کند. در این مدل، رابطه ی نفوذ به فرم دیفیوژن نادسن^۵ در نظر گرفته می شود. ساکایی و همکارانش توانستند در قطعه ی لایه نازک به فرض این که ورود و خروج گاز از رابطه ی نفوذ نادسن تبعیت کند، برای نفوذ گاز رابطه ی ارائه کنند [۲۷]. پاسخی که به دست می آید، مطابق با رابطه ۳، تابعی است از ضریب نفوذ نادسن (D_k)، ثابت نرخ (K)، چگالی گاز هدف (C_{A,S})، ضریب حساسیت (a) و ضخامت لایه (L) که نشان می دهد چگونه تراکم گاز هدف در لایه ی نازک نفوذ می کند. ضریب نفوذ نادسن و K به دما وابسته هستند.

⁴ Sakai

⁵ Knudsen Diffusion

$$S=R_a/R_g=1+\frac{aC_{A,S}}{L\sqrt{k/D_k}}\tanh(L\sqrt{k/D_k}) \quad (3)$$

$$D_k=\frac{4r}{3}\sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \quad (4)$$

رابطه‌ی ۴ ضریب نفوذ نادن را توصیف می‌کند که در آن R ثابت گازها، T دمای کاری، M جرم مولی، r شعاع حفره است. وابستگی k به دما از رابطه ۵ تبعیت می‌کند:

$$k=k_0\exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (5)$$

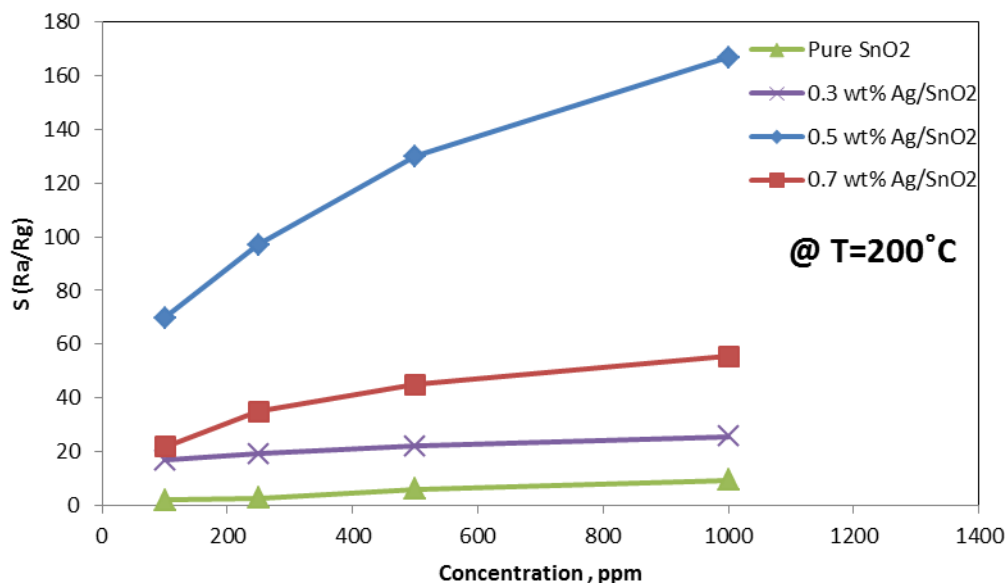
که در آن E_k انرژی فعال‌سازی واکنش مرتبه اول و K_0 ثابت پیش‌نمایی است. ضریب a در رابطه ۳ نیز به دما وابسته است، این ضریب واکنش گاز-جامد را به تغییرات نسبی در هدایت ورقه‌ای مرتبط می‌کند و به عوامل زیادی وابسته است. اما بیشتر از همه به چگالی اکسیژن جذب شده بستگی دارد. چگالی اکسیژن جذبی در شرایط پایدار به مصرف اکسیژن جذب شده توسط گاز هدف و تامین اکسیژن جذبی از فاز گاز بستگی دارد. با در نظر گرفتن وابستگی دمایی برای a خواهیم داشت:

$$a=a_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

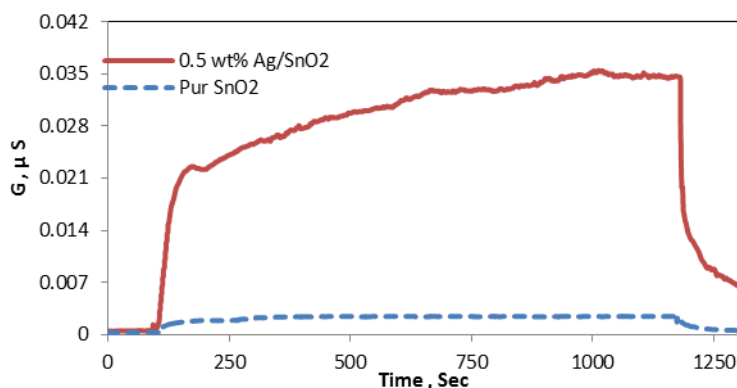
که در آن E_a انرژی فعال‌سازی برای فرآیند انتقال و a_0 ثابت پیش‌نمایی است. با جاگذاری رابطه ۶ و ۵ در ۳ داریم:

$$S=\frac{1+a_0 C_{A,S}}{AL} T^{1/4}\exp\left(-\frac{2E_a-E_k}{2RT}\right)\tanh[ALT^{-1/4}\exp\left(-\frac{E_k}{2RT}\right)] \quad (7)$$

رسم رابطه نشان داده شده در شکل ۷ در خصوص حسگرهای مقاومتی نشان‌دهنده منحنی دارای بیشینه دمایی است. مهمترین عامل موثر بر دمای بیشینه پاسخ که از رابطه ۷ بدست می‌آید، E_k است [۲۸]. فلز نقره تمایل زیادی به جذب مولکول‌های اکسیژن دارد. در حسگرهای اکسیدفلزی آرایش شده با نقره، نقره اکسیژن محیط را جذب کرده و موجب افزایش اکسیژن در سطح حسگر می‌شود و این امر E_k را کاهش می‌دهد و موجب آن می‌شود که بیشینه‌ی پاسخ حسگر در دمای پایین‌تری نسبت به نمونه خالص آن رخ دهد [۲۴]. شکل ۴ کاهش دمای بیشینه در تمامی حسگرهای آلیس شده با نقره بجز نمونه ۰/۳ درصد را نشان می‌دهد. طبق شکل ۳ بیان شد که بخاطر اندک بودن نقره در این نمونه، رفتار قطعه به نمونه خالص شبیه است لذا تغییر خاصی در پاسخ دمایی آن مشاهده نگردید. جهت مقایسه، سطح پاسخ همه حسگرهای ساخته شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۵ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی حالات سطح حساسیت بهبود پیدا کرده است. اگرچه مجدداً در خصوص نمونه ۰/۳ درصد نقره تغییرات اندک بوده است. با توجه به نمودار شکل ۵ بهترین پاسخ مربوط به حسگر ۰/۵ درصد وزنی است که پاسخ حسگر آن در غلظت ۱۰۰۰ ppm حدود ۶ برابر نمونه خالص آن است. پاسخ گذرای حسگر ۰/۵ درصد وزنی و اکسید خالص در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۵- پاسخ حسگرها در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به گاز ۱- بوتانول در غلظت‌های ۱۰۰-۱۰۰۰ ppm.



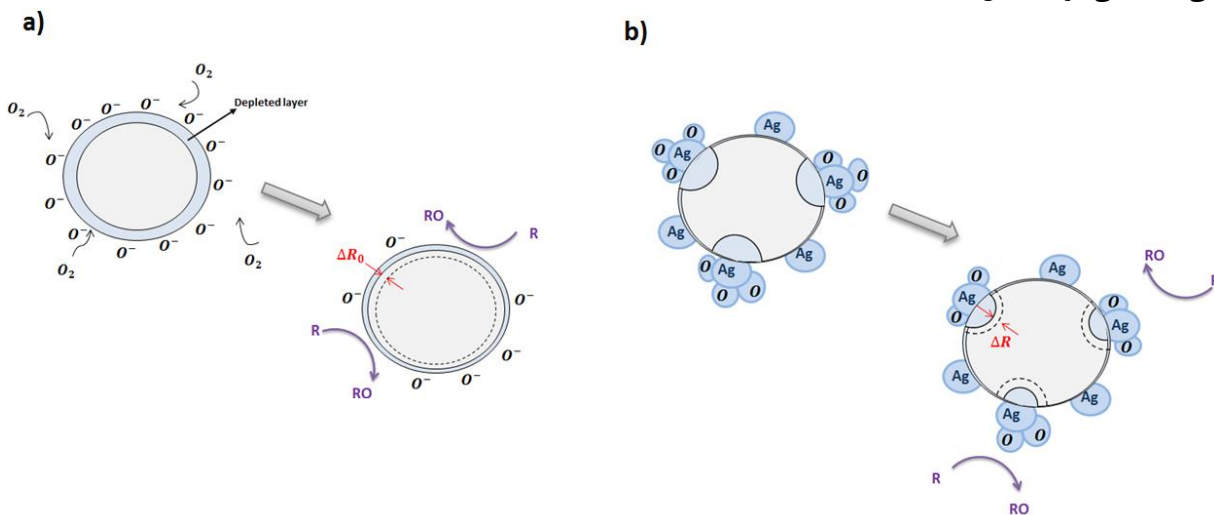
شکل ۶- پاسخ حسگرهای اکسید قلع خالص و ۵٪ درصد وزنی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد.

۵. سازوکار سنجش حسگر

دو سازوکار اصلی در نوع رفتار حسگرهای اکسید فلزی آرایش شده با فلزات نقش دارند، سازوکار شیمیایی و سازوکار الکترونیکی. به طور مثال اثر افزودن پلاتین بر مبنای سازوکار شیمیایی و پالادیوم بر مبنای سازوکار الکترونیکی قابل تحلیل است [۱۱]. در حسگر اکسید قلع آرایش شده با نقره هر دو سازوکار الکترونیکی و شیمیایی مؤثر است [۱۷-۱۹]. سازوکار الکترونیکی حسگر اکسید قلع آرایش شده با نقره به صورت تصویری در شکل ۷ نمایش داده شده است. هنگامی که حسگر اکسید قلع خالص در معرض هوا قرار می‌گیرد، مولکول‌های اکسیژن بر روی سطح آن جذب شده و به اتم‌های اکسیژن حامل بار (O_2^- یا O_2^{2-} , O^-) تبدیل می‌شوند. در این شرایط ناحیه تخلیه در سطح اکسید قلع شکل می‌گیرد. هنگامی که حسگر در معرض گاز قرار می‌گیرد، واجذب اکسیژن‌های سطحی در اثر تعامل با گاز موجب افزایش

غلظت الکترون‌های لایه حساس و در نتیجه کاهش ناحیه تخلیه شکل گرفته می‌شود. متعاقباً از مقاومت الکتریکی حسگر کاسته می‌شود (شکل ۷-ا) [۲۱].

وجود نقره در سطح دانه‌ها به منزله ایجاد تعداد زیادی دیود شاتکی اکسیدقلع-نقره در سطح حسگر است [۲۰]. در حسگرهای اکسید قلع آرایش شده با نقره، نقره به علت تمایل بالا به جذب اکسیژن، از هوا اکسیژن جذب نموده و تابع کار آن افزایش می‌یابد. در ادبیات مربوطه برای نقره ۲ الکترون ولت تغییر تابع کار در اثر جذب اکسیژن گزارش شده است [۲۹-۳۱]. افزایش تابع کار نقره باعث ایجاد ناحیه تهی در محل اتصال این ذرات با سطح دانه‌های اکسید می‌گردد. جهت بهتر نشان دادن سازوکار توضیح داده شده، در شکل ۷-ب فرض شده است که درصدی از نقره‌ها بدون جذب اکسیژن باقی بمانند که در این حالت لایه تخلیه در زیر آنها تشکیل نمی‌شود. اینکه چه تعداد از ذرات از هوا اکسیژن جذب می‌کنند و چه تعداد در این واکنش شرکت نمی‌کنند هنوز بطور دقیق مطالعه نشده است. لیکن میتوان این مساله را به مورفولوژی ذرات و ابعاد آنها نسبت داد. در نهایت وجود ذرات نقره که اکسیژن جذب نموده‌اند موجب افزایش ناحیه تخلیه و مقاومت الکتریکی قطعه می‌شود. (شکل ۷-ب) [۳۲-۳۹].



شکل ۷- سازوکار سنجش گاز توسط حسگرهای (a): اکسید قلع خالص، (b): اکسید قلع آرایش شده با نقره.

۶. نتیجه‌گیری

هدایت الکتریکی و سازوکار سنجش حسگر اکسید قلع آرایش شده با نقره مورد بررسی قرار گرفت. حسگرهای اکسید قلع خالص و اکسید قلع آرایش شده با نقره در غلظت‌های مختلف نقره با استفاده از پودر اکسید قلع و پودر نیترات نقره ساخته و عملکرد آن‌ها بررسی شد. افزودن نقره موجب بهبود پاسخ حسگر و نقطه دمایی بیشینه حساسیت آن‌ها شد و این امر وابسته به میزان غلظت نقره افزوده شده‌است. بهترین پاسخ مربوط به حسگر ۰/۵ درصد وزنی با دمایی بیشینه حساسیت حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد است. رفتار مشاهده شده بر اساس تغییر تابع کار نقره در اثر جذب و واجذب اکسیژن در محیط‌های مختلف توضیح داده‌شد.

۷. مراجع

1. M. Hjiri, R. Dhahri, K. Omri, L. El Mir, S.G. Leonardi, N. Donato, G. Neri, Mater. Sci. Semicond. Process. 27 (2014) 319–325.
2. M. Zhang, T. Ning, S. Zhang, Z. Li, Z. Yuan, Q. Cao, Mater. Sci. Semicond. Process 17 (2014) 149–154.
3. S Singh, N. Verma, A. Singh, B.C. Yadav, Mater. Sci. Semicond. Process. 18 (2014) 88–96.
4. C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, R. Gao, Sensors 10 (2010) 2088–2106.
5. S.M. Kanan, O.M. El-Kadri, I.A. Abu-Yousef, M.C. Kanan, Sensors 9 (2009) 8158–8196.
6. K. Wetchakun, T. Samerjai, N. Tamaekong, C. Liewhiran, C. Siri Wong, V. Kruefu, et al., Sens. Actuators B: Chem. 160 (2011) 580–591.
7. M. Batzill, U. Diebold, Prog. Surf. Sci. 79 (2005) 47–154.
8. X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, H. Ning, Sensors 12 (2012) 9635–9665.
9. Z. Karami Horastani, S.M. Sayedi, M.H. Sheikhi, Mater. Sci. Semicond. Process. 35 (2015) 38–44.
10. S. Basu, P. Basu, J. Sens., 2009 (2009).
11. N. Yamazoe, Y. Kurokawa, T. Seiyama, Sens. Actuators 4 (1983) 283–289.
12. J.F. Mc. Alear, P.T. Moseley, J.O. Norris, D.E. Williams, J. Chem. Soc. Faraday Trans.: Phys. Chem. Condens. Ph. 84 (1988) 441–457.
13. E. Gulari, C. Guldur, S. Osuwan, S. Srivannavit, Co oxidation by silver cobalt composite oxide, Appl. Catal. A 182 (1999) 147–163.
14. M. Luo, X. Yuan, X. Zheng, Catalyst characterization and activity of Ag–Mn, Ag–Co and Ag–Ce composite oxides for oxidation of volatile organic compounds, Appl. Catal. A 175 (1998) 121–129.
15. J. Zhang, B.K. Miremedi, K. Colbow, Effects of surface silver additives on tin oxide thin film gas sensors, J. Mater. Sci. Lett. 13 (1994) 1048–1050.
16. M.S. Tong, G.R. Dai, Y.D. Wu, D.S. Gao, High sensitivity and switching-like response behavior of SnO₂–Ag–SnO₂ element to H₂S at room temperature, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 11 (2000) 661–665.
17. N. Yamazoe, New approaches for improving semiconductor gas sensors, Sens. Actuators B 5 (1991) 7–19.
18. J. Zhang, K. Colbow, Surface silver clusters as oxidation catalysts on semiconductor gas sensors, Sens. Actuators B 40 (1997) 47–52.
19. R.K. Joshi, F.E. Kruis, O. Dmitrieva, Gas sensing behavior of SnO_{1.8}:Ag films composed of size-selected nanoparticles, J. Nanopart. Res. 8 (2006) 797–808. metal oxides, Meas.
20. F. Hossein-Babaei, S. Rahbarpour, Separate assessment of chemoresistivity and Schottky-type gas sensitivity in M–metal oxide–M' structures, Sensors and Actuators B 160 (2011) 174–180.
21. C. Bittencourt, E. Llobet, P. Ivanov, X. Vilanova, X. Correig, M.A.P. Silva, L.A.O. Nunes, J.J. Pieaux, Ag induced modifications on WO₃ films studied by AFM, Raman and x-ray photoelectron spectroscopy, J. Phys. D: Appl. Phys. 37(2004) 3383–3391.
22. Y. Wang, X. Cui, Q. Yang, J. Liu, Y. Gao, P. Sun, G. Lu, Preparation of Ag-loaded mesoporous WO₃ and its enhanced NO₂ sensing performance, Sensors and Actuators B 225 (2016) 544–552.

23. C. Rehren, M. Muhler, X. Bao, R. Schlogl, G. Ertl, The interaction of silver with oxygen: an investigation with thermal desorption and photoelectron spectroscopy, *Z. Phys. Chem.* 174 (1991) S.11–S.52.
24. G. Korotcenkov, B.K. Cho, L.B. Gulina, V.P. Tolstoy, Gas sensor application of Ag nanoclusters synthesized by SILD method, *Sensors and Actuators B* 166– 167 (2012) 402– 410.
25. J. Zhao, W. Wang, Y. Liu, J. Ma, X. Li, G. Lu, Ordered mesoporous Pd/SnO₂ synthesized by a nanocasting route for high hydrogen sensing performance, *Sens. Actuators, B: Chem.* 160 (2011) 604–608.
26. S. Matsushima, Y. Teraoka, N. Miura, N. Yamazoe, Electronic interaction between metal additives and tin dioxide in tin dioxide-based gas sensors, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 (1988) 1798–1802.
27. H. Jia, Y. Zhang, X. Chen, J. Shu, X. Luo, Z. Zhang, D. Yu, Efficient field emission from single crystalline indium oxide pyramids, *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003) 4146–4148.
28. S.Rahbarpour, S.M.Hosseini-Golgo, Diode type Ag–TiO₂ hydrogen sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* 187, 262-266.
29. G. Sakai, G. Matsunaga, N. Shimano, K. Yamazoe, Theory of gasdiffusion controlled sensitivity for thin film semiconductor gas sensor. *Sensors and Actuators B Chemical* (2001) 125-131.
30. F. Hossein-Babaei, S. Abbaszadeh, M.S. Esfahani, Gas sensitive porous silver-rutile high-temperature Schottky diode on thermally oxidized titanium, *Sensors Journal, IEEE* 9 (3), 237-243.
31. F. Hossein-Babaei, S.Rahbarpour, Titanium and silver contacts on thermally oxidized titanium chip: electrical and gas sensing properties, *Solid-State Electronics* 56 (1) 185-190.
32. N. Yamazoe, G. Sakai, K. Shimano, Oxide semiconductor gas sensors, *Catal.Surv. Asia* 7 (2003) 63–75.
33. B. Ruhland, Th. Becker, G. Muller, Gas–kinetic interaction of nitrous oxides with SnO₂ surface, *Sens. Actuators, B: Chem.* 50 (1998) 85–94.
34. Z. Zanolli, R. Leghrib, A. Felten, J.-J. Pireaux, E. Llobet, J.-C. Charlier, Gas sensing with Au-decorated carbon nanotubes, *ACS Nano* 5 (2011) 4592–4599.
35. A. Cabot, A. Dieguez, A.R. Rodriguez, J.R. Morante, N. Barsan, Influence of the catalytic introduction procedure on the nano-SnO₂ gas sensor performance: where and how stay the catalytic atoms *Sens. Actuators, B: Chem.* 79 (2001)98–106.
36. G. Halek, I.D. Baikie, H. Teterycz, P. Halek, P.S. Wozniak, K. Wisniewski, Workfunction analysis of gas sensitive WO₃layers with Pt doping, *Sens. Actuators,B: Chem.* 187 (2013) 379–385.
37. J. Zhao, W. Wang, Y. Liu, J. Ma, X. Li, G. Lu, Ordered mesoporous Pd/SnO₂ synthesized by a nanocasting route for high hydrogen sensing performance, *Sens. Actuators, B: Chem.* 160 (2011) 604–608.
38. H.W. Kim, H.G. Na, D.S. Kwak, H.Y. Cho, Y.J. Kwon, Enhanced gas sensing characteristics of Ag₂O-functionalized networked In₂O₃ nanowires, *Jpn. J.Appl. Phys.* 52 (2013) 10MD01.
39. C. Bittencourt, E. Llobet, P. Ivanov, X. Vilanova, X. Correig, M.A.P. Silva, L.A.O.Nunes, J.J. Pieaux, Ag induced modifications on WO₃ films studied by AFM, Raman and x-ray photoelectron spectroscopy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37(2004) 3383–3391.