

بررسی پارامترهای حسگری نسبت به گاز اتانول و تعیین بند گپ در اثر افزودن اکسید نیکل به زیرکونیای پایدارشده با ایتریا

زهرا ابوالقاسمی*
مرتضی تمیزی فر
کاوه ارزانی
علی نعمتی
ارسیا خانفکر

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران
استادیار، دانشکده مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران

چکیده

در این مقاله پس از فرمول بندی و ساخت لایه های ضخیم ۸YSZ و ۱/۵Ni-۸YSZ توسط روش چاپ سیلک روی زیرپایه آلومینایی، مقدار بندگپ در اثر افزودن اکسید نیکل با نمونه بدون دوپنت و همچنین حساسیت این حسگرها نسبت به بخار اتانول مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. از اهداف این پژوهش بررسی و مقایسه مقدار بندگپ، انرژی فعال سازی، تغییرات حساسیت، زمان پاسخ و بازیابی می باشد. نتایج نشان می دهد که نمونه بدون دوپنت نسبت به Ni-YSZ مقدار کم تر بندگپ و حساسیت بهتری را نشان می دهد، همچنین دمای کار کم تر و حساسیت در دمای کم تر از دیگر مزایای آن است.

واژه های کلیدی: YSZ، اکسید نیکل، حسگر، بخار اتانول

Investigation the Ethanol Gas Sensing Parameters and the Band Gap of Vttria-Stabilized Zirconia with the Addition of Nickel Oxide

Z. Abolghasemi M. Sc., Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran,
M. Tamizifar Associate Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Science and Technology, Tehran
K. Arzani Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran
A. Nemati Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran
A. Khanfekar Ph.D. student, Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Science and Technology, Tehran

Abstract

In this paper after the formulation and manufacture of thick 8YSZ and 1.5Ni-8YSZ layers by screen-printing method on Alumina substrate, the amount of YSZ and Ni-YSZ band gaps and the sensitivity of these sensors to ethanol vapor have been studied and compared. The objectives of this study are to examine and compare the amount of band gap, activation energy, sensitivity changes, response and recovery time. Regarding to the sensing results, YSZ causes a lower band gap and better sensitivity than Ni-YSZ, other advantages of the sample without dopant are the lower working temperature and sensitivity at lower temperature.

Keywords: YSZ, Nickel Oxide, Sensor, Ethanol Vapor

۱- مقدمه

حسگر YSZ جزء حسگرهای الکتروشیمیایی است که خروجی حسگر پارامترهای الکتریکی (ولتاژ، جریان و مقاومت ظرفیت خازنی) می‌باشد. حسگرهای الکتروشیمیایی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

(الف) حسگرهای اندازه‌گیر ولتاژ: این نوع، حسگرهای پتانسیومتریک نامیده می‌شوند.

(ب) حسگرهای اندازه‌گیر جریان الکتریکی: این نوع، حسگرهای آمپرومتریک نامیده می‌شوند.

(ج) حسگرهایی که تکیه بر هدایت دارند: این نوع، حسگرهای اندازه‌گیر هدایت نامیده می‌شوند.

قسمت اصلی حسگرهای الکتروشیمیایی یک الکتروود مثبت و یک الکتروود منفی برای پراکنده کردن بار یا الکترون‌ها و یک الکتروولیت برای انتقال بار یا الکترون‌ها از یک الکتروود به الکتروود دیگر می‌باشد [۱].

وقتی مواد اکسید زیرکونیم با ۱۸-۸٪ اکسید ایتیم دوپ می‌شوند مواد حاصله زیرکونیای پایدار شده با ایترا نامیده می‌شوند که تحرک بالای یون اکسیژن وقتی دما به 350°C می‌رسد را نشان می‌دهند. بنابراین مواد می‌توانند به‌عنوان الکتروولیت برای انتقال یون‌های اکسیژن از یک الکتروود به دیگری در سلول الکتروشیمیایی استفاده شوند. در طی فرایند الکتروولیز (انتقال بار)، مولکول‌های اکسیژن در یک طرف سطح به یون تبدیل می‌شوند، از YSZ عبور می‌کنند و به مولکول خنثی با انتقال الکترون‌ها به سطح دیگر تبدیل می‌شوند. بنابراین در طی این فرایند، الکترون‌ها از یک الکتروود به دیگری در نتیجه‌ی اختلاف بار بین دو الکتروود انتقال می‌یابند.

اکسیژن موجود در محیط مرجع باید به سطح YSZ برسد، انتقال یون‌های اکسیژن از میان الکتروولیت زیرکونیا، فرایند فعال شده با گرما می‌باشد که این انتقال وقتی دمای الکتروولیت کم‌تر از 350°C باشد، امکان پذیر نمی‌باشد. ولتاژی که در کل الکتروولیت شناسایی می‌شود تنها در بالای این دما قابل قبول است [۱].

به‌دلیل آلودگی هوا توسط ترکیبات آلی فرار (VOCs)، غلظت آن‌ها در هوا باید به میزان زیادی کاهش یابد. درمیان روش‌های مختلف استفاده شده برای تشخیص این گازهای مضر، حسگرهای حالت جامد به‌دلیل اندازه کوچک و سهولت در استفاده، مطلوب می‌باشند. حسگرهای الکتروشیمیایی بر اساس زیرکونیا که برای تشخیص CO ، NO_x و هیدروکربن‌ها مناسب می‌باشند، برای این منظور در نظر گرفته می‌شوند. این نوع حسگرهای پتانسیومتریک برای تشخیص ترکیبات آلی فرار (مانند: اسید استیک، متیل اتیل کتون، اتانول، بنزن، تولوئن) در حد ppm در محدوده دمایی $400-500$ درجه سانتی‌گراد به کار

می‌روند [۲]. حسگر اکسیژن پتانسیومتریک برای تشخیص ترکیبات آلی فرار در غلظت کمتر از ۱۰ ppm در محدوده دمایی $400-500^{\circ}\text{C}$ توسط Mori و همکارانش بررسی شد. آن‌ها از دو الکتروود Pt استفاده کردند که یکی از آن‌ها با Au پوشش داده شد. نتایج نشان داد که این پوشش موثر در افزایش حساسیت می‌باشد. زمان پاسخ و زمان بازبایی با افزایش دما افزایش درحالیکه پاسخ نیروی محرکه (EMF) کاهش یافت همچنین مقدار EMF بطور خطی با افزایش در لگاریتم غلظت ترکیبات آلی، افزایش یافت [۲].

جذب اکسیژن هدایت مواد نیمه هادی نوع p را در ازای افزایش غلظت حفرات افزایش می‌دهد، که حامل‌های اصلی بار در نیمه هادی‌های نوع p می‌باشند. به علاوه مقاومت آنها با استفاده از گازهای احیایی مانند اتانول افزایش می‌یابد [۳].

در تحقیق دیگری که توسط Bartolomeo و همکارانش انجام شد به بررسی حسگرهایی براساس لایه ضخیم YSZ با دو الکتروود موازی Pt پرداختند که یکی از الکتروودها به‌عنوان الکتروود تشخیص، توسط لایه ضخیم WO_3 پوشیده شد و دیگری به‌عنوان الکتروود مرجع شناخته شد. حسگر در معرض NO_2 و CO در غلظت‌های مختلف (۱۰۰۰-۲۰۰ ppm) در هوا) در محدوده دمایی $650-500^{\circ}\text{C}$ قرار داده شد. بهترین حساسیت به گازهای NO_2 و CO ، در دمای 550 درجه سانتیگراد مشاهده شد. زمان پاسخ به NO_2 و CO در 550 درجه سانتیگراد به‌ترتیب ۲ دقیقه و ۴ ثانیه گزارش شد و با افزایش دمای عملیاتی سنسور، زمان پاسخ سریع‌تر شد [۴].

از عوامل مؤثر در افزایش یا کاهش حساسیت می‌توان به افزودن دوپنت، کاهش و یا افزایش سایز دانه اشاره کرد [۵]. در برخی مطالعات نشان داده شده است که در اثر افزودن Ni به‌عنوان دوپنت به ساختار YSZ هدایت کاهش یافته است زیرا در طی ساخت در دمای بالا، Ni داخل الکتروولیت YSZ حل می‌شود و هدایت فیلم YSZ را کاهش می‌دهد [۶-۷]. همچنین برای کاربردهای نوری [۸] نظیر طیف سنجی و پوشش‌های سد حرارتی [۹] نیز استفاده می‌شود. تحقیقات قبلی اثرات اندازه کریستال را روی ویژگی‌های نوری فیلم‌های اکسید بر پایه زیرکونیا نشان داده‌اند [۸]. حسگرها عموماً در دو حالت پودر پرس شده یا لایه ای (ضخیم و نازک) مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این تحقیق از طریق لایه، حسگر مورد نظر ساخته شده است، به این صورت که لایه‌های YSZ و Ni-YSZ روی زیرپایه آلومینایی چاپ سیلک شدند و سپس مقدار بندگپ نمونه‌های تهیه شده توسط آنالیز DRS (Diffuse Reflection Spectroscopy) محاسبه شد و خواص حسگری آن‌ها نسبت به گاز اتانول مورد بررسی قرار گرفت،

همچنین انرژی فعالسازی از طریق منحنی آرنیوس نیز محاسبه شد.

۲- روش تهیه

ابتدا نانو پودرهای تهیه شده توسط روش سل-ژل [۱۰] با چسب آلی پلی ونیل الکل (PVA ۵ wt%) مخلوط و خمیر حاصله روی زیرپایه آلومینا چاپ سیلک (اسکرین پرینت) شدند به این صورت که شابلون با توری پلیمری و سایز مش ۳۲۵ بر روی یک تکیه گاه کاملاً مسطح نصب و زیرپایه‌ها در زیر شابلون قرار داده شدند. سپس خمیر تهیه شده با استفاده از کاردک پلیمری (اسکویبجی) بر روی زیرپایه‌ها چاپ شد. لایه‌های به‌دست آمده از چاپ در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس ۲ ساعت در 1270°C پخت شدند. بعد از عملیات حرارتی، دمای نمونه‌ها همراه با پائین آمدن دمای کوره پائین آمد و سپس برای ساخت حساسه‌های گاز مورد استفاده قرار گرفت.

اندازه‌گیری طیف‌های بازتاب در ناحیه ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر انجام شد و خروجی آنالیز DRS دو طیف بازتاب و جذب است. این سیستم بر اساس تاباندن نور به سطح یک ماده و اندازه‌گیری میزان بازتاب پختی و مقایسه با یک نمونه استاندارد (بدون جذب با پراکندگی زیاد) عمل می‌کند.

برای ایجاد اتصالات الکتریکی به لایه حساس به گاز، از چسب رسانا بر پایه نقره با تحمل دمایی بالا استفاده شد. اندازه‌گیری مقاومت نمونه بر حسب دما توسط منحنی آرنیوس به‌دست می‌آید. به‌منظور تعیین مقاومت حسگرها از روش تقسیم ولتاژ استفاده شد. بدین ترتیب که یک مقاومت ثابت را با حسگر سری کرده و مقدار ۴ ولت ولتاژ متناوب با فرکانس ۸۰ Hz به این مجموعه اعمال شد. با خواندن افت ولتاژ دو سر مقاومت ثابت، مقدار مقاومت حسگر از رابطه (۱) تعیین شد:

$$R_x = \left(\frac{V_{in}}{V_o} - 1 \right) R_o \quad (1)$$

که R_s مقاومت حسگر در هر دما، V_{in} ولتاژ ورودی که روی ۴ ولت تنظیم شده بود، V_o ولتاژ دو سر مقاومت و R_o مقاومت ثابت سری شده با حسگر است.

حساسیت به‌صورت نسبت اندازه عامل متغیر حسگر در هوای آلوده به گاز هدف، به اندازه همان عامل در هوای خالص تعریف شده است. لذا حساسیت حسگر، به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود که در این رابطه R_g مقاومت الکتریکی در حضور گاز هدف و R_a همان مقاومت در هوای خالص است [۱۱-۱۲]:

$$S = R_g/R_a \quad (2)$$

گاز استفاده شده برای آزمایش در این پژوهش بخار اتانول با غلظت ۵۰۰۰-۱۰۰۰ ppm است. مقایسه مقدار بندگپ، تعیین انرژی فعالسازی از روی منحنی آرنیوس، همچنین تغییرات حساسیت بر حسب دماهای مختلف برای تعیین دمای کار و

تغییرات حساسیت بر حسب غلظت های مختلف گاز و بررسی کوتاه‌ترین زمان پاسخ و بازیابی از اهداف این پژوهش است.

۳- نتایج و بحث

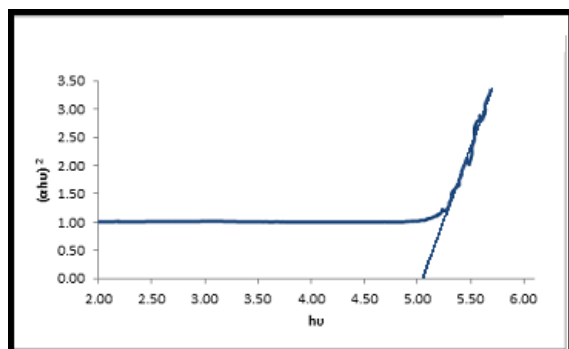
۳-۱- تعیین مقدار بندگپ

به منظور به‌دست آوردن بندگپ، مواد با بندگپ مستقیم $(\alpha h\nu)^2$ در مقابل انرژی $h\nu$ رسم شد. انرژی بندگپ (E_g) می‌تواند با فرض انتقال مستقیم بند ظرفیت و هدایت به‌دست آید. بندگپ فیلم YSZ، ۵.۰۶ eV می‌باشد که مطابق مقادیر گزارش شده است، و مربوط به ترکیب الکترون‌های به دام افتاده در جاهای خالی اکسیژن و یون‌های اکسیژن با حفره‌های به دام افتاده می‌باشد [۱۳]. بندگپ می‌تواند از رابطه ۳ حاصل شود:

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3)$$

که α ضریب جذب خطی، E_g انرژی بندگپ، A ثابت، $h\nu$ انرژی فوتون و η ثابتی است که برابر ۰.۵ و ۲ برای به‌ترتیب بندگپ مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد.

با توجه به ظرفیت متفاوت دوپنت، به ازای هر جایگزینی در داخل سیستم حفره الکترونی ایجاد می‌شود که یک سطح فرعی را ایجاد می‌کند. معمولاً سطح فرعی در داخل بند ممنوعه قرار می‌گیرد. اگر مکان هندسی جاهای خالی (حفره) باشد با توجه به کمینه بودن انرژی، جذب الکترون می‌شود که نزدیک باند والانس قرار می‌گیرد و گیرنده الکترون می‌باشد و به‌عنوان نیمه هادی نوع p (مثبت) شناخته می‌شود. در این صورت سطح فرمی را به سمت پائین سوق می‌دهد و یک سطح فرمی هم بین باند گیرنده و باند والانس ایجاد می‌شود و به سطح فرمی فرعی تبدیل می‌شود. تحرک پذیری هر ناقل در بند ممنوعه صفر می‌باشد و در نیمه‌هادی‌های نوع p الکترون‌ها نقش در هدایت ندارند و حفرات موجود در باند والانس هدایت را ایجاد می‌کنند. شکل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب بندگپ نمونه‌های ۸YSZ و ۱۵Ni/۵Ni را نشان می‌دهند.



شکل ۱- تعیین بند گپ نمونه YSZ (خط چین مقدار بندگپ را نشان می‌دهد)

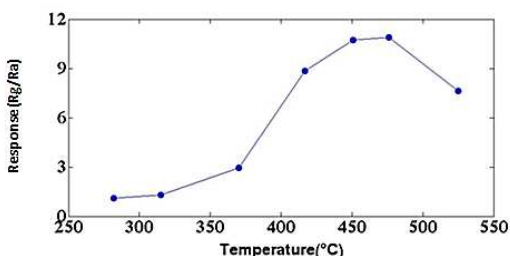
افزودن اکسید نیکل به عنوان دوپنت با محتوی کم به معنی انحلال دوپنت در شبکه زیرکونیا می باشد که منجر به افزایش انرژی فعالسازی به دلیل افزایش پراکندگی شده است اما در غلظت های بالاتر دوپنت، مازاد NiO روی مرزهای دانه رسوب و به عنوان رسانای الکترونیکی در مرز دانه عمل می کند و منجر به کاهش انرژی اکتیواسیون می شود [۱۴].

جدول ۱- انرژی فعالسازی حسگرهای ساخته شده

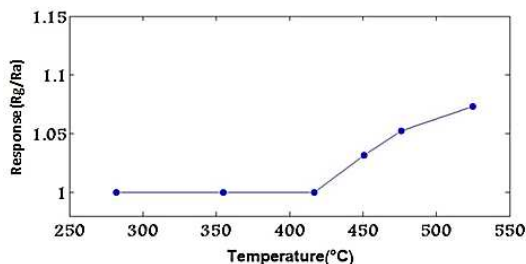
نمونه	۸YSZ	۱,۵Ni - ۸YSZ
انرژی فعالسازی (eV)	۰,۴۸	۱,۸

۳-۳- تعیین دمای کار

دمای کار یکی از عواملی است که می تواند اثرات عمده ای را بر حساسیت داشته باشد. از همین رو پیدا کردن دمای مناسب کار یک حسگر، یعنی دمایی که در آن حسگر بیشترین میزان حساسیت مورد انتظار را داراست، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برای یافتن دمای مناسب، میزان حساسیت به درصد ثابتی از گاز مورد انتظار (۲۰۰۰ppm) در دماهای مختلف اندازه گیری می شود. تغییرات حساسیت بر حسب دما برای حسگرهای ساخته شده در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

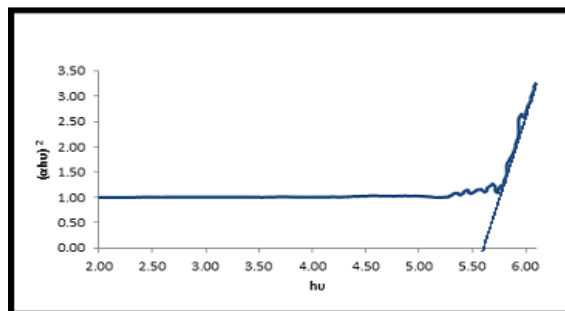


شکل ۳- منحنی تغییرات پاسخ به ۲۰۰۰ppm گاز اتانول بر حسب دما برای نمونه ۸YSZ



شکل ۴- منحنی تغییرات پاسخ به ۲۰۰۰ppm گاز اتانول بر حسب دما برای نمونه ۱,۵Ni - ۸YSZ

همان طور که در شکل های ۵ و ۶ دیده می شود، با افزایش دما، حساسیت حسگر به گاز اتانول به دلیل کافی بودن انرژی گرمایی برای غلبه بر سد انرژی فعالسازی افزایش می یابد تا به بیشینه

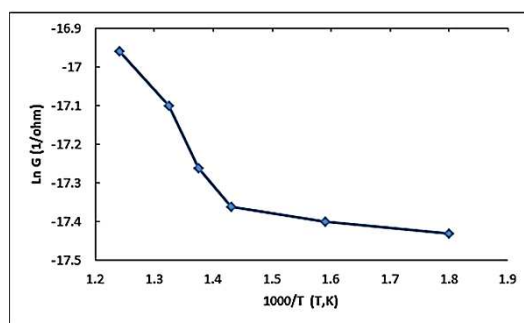


شکل ۵- تعیین بندگپ نمونه Ni-YSZ (خط چین مقدار بندگپ را نشان می دهد)

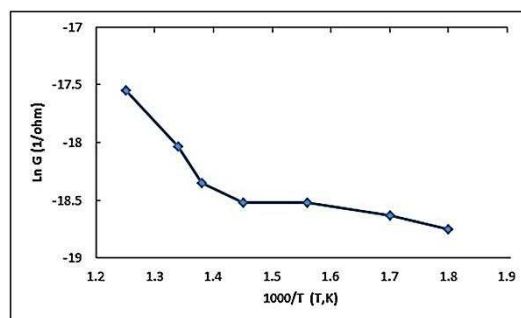
با افزودن اکسید نیکل بندگپ افزایش یافته است (۵,۶) زیرا انرژی فعالسازی افزایش می یابد، جدول ۲ نیز این مطلب را تأیید می کند و بنابراین کاهش نفوذ شبکه را باعث شده است [۱۴].

۳-۳- تعیین انرژی فعالسازی

شکل های ۳ و ۴ نشان دهنده تغییرات لگاریتم رسانش الکتریکی بر حسب عکس دمای مطلق (نمودار آرنیوس) برای نمونه های به ترتیب YSZ و Ni - YSZ است.

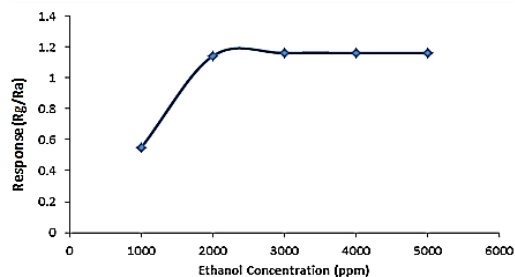


شکل ۶- منحنی آرنیوس نمونه ۸YSZ



شکل ۷- منحنی آرنیوس نمونه ۱,۵Ni - ۸YSZ

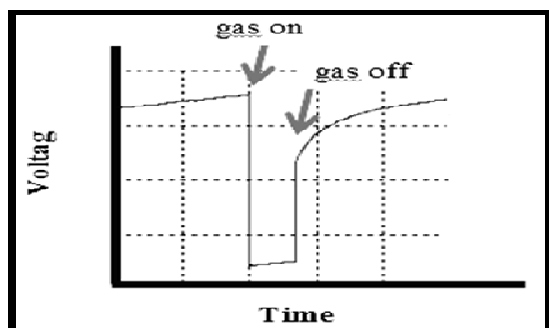
منحنی آرنیوس معیاری برای یافتن انرژی فعالسازی هدایت می باشد که انرژی فعالسازی از روی شیب نمودارهای فوق به دست می آید. انرژی فعالسازی بیانگر توانایی بر هم کنش اکسیژن های جذب شیمیایی شده با گاز جذب شده است [۱۵]. در جدول ۱ انرژی فعالسازی هر دو نمونه لیست شده است.



شکل ۸- منحنی حساسیت بر حسب غلظت گاز اتانول برای نمونه ۸YSZ - ۱٫۵Ni

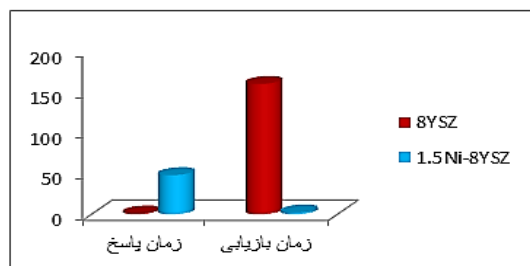
۳-۵- زمان پاسخ و بازیابی

مطابق شکل ۹، زمانی که طول می‌کشد تا ولتاژ به ۱۰٪ مقدار کمینه‌اش برسد زمان پاسخ و زمانی که طول می‌کشد تا ولتاژ به ۹۰٪ مقدار ورودی‌اش بازگردد، زمان بازیابی نام دارد. زمان پاسخ به معنای جذب اکسیژن روی سطح توسط گاز ورودی و زمان بازیابی به معنای پس دهی اکسیژن می‌باشد به عبارتی اکسیژن‌هایی که با گاز واکنش داده بودند دوباره جذب سطح می‌شوند که با زیاد شدن غلظت گاز زمان پاسخ کاهش و زمان بازیابی افزایش می‌یابد زیرا تعداد بیش‌تری از مولکول‌های گاز هدف توسط اکسیژن‌های سطحی در واحد زمان جذب می‌شوند.



شکل ۹- منحنی ولتاژ بر حسب زمان

شکل ۱۰ و جدول ۲ کوتاه‌ترین زمان پاسخ و بازیابی را نشان می‌دهند که نمونه حاوی اکسید نیکل به دلیل دارا بودن انرژی فعالسازي بالا، زمان پاسخ طولانی‌تری را سبب شده است.

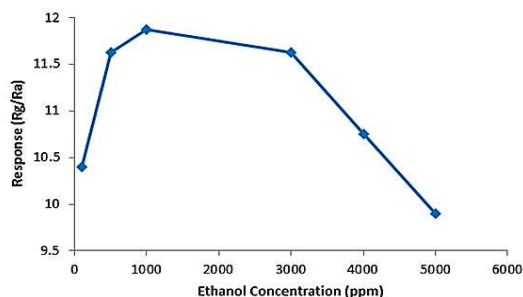


شکل ۱۰- مقایسه کوتاه‌ترین زمان پاسخ و بازیابی

مقدار خود می‌رسد. با افزایش بیش‌تر دما مشاهده می‌شود که مقدار حساسیت حسگر به گاز هدف به علت دفع اکسیژن‌های جذب شده روی سطح کاهش می‌یابد [۱۶]، به دلیل اینکه در دماهای پایین، محصول واکنش گاز و اکسیژن مستقر در سطح حسگر (RO)، نمی‌تواند از سطح جامد جدا شود تجمع RO در سطح، از ادامه واکنش گاز (R) با سطح حسگر ممانعت و باعث کاهش حساسیت می‌شود. بالا رفتن دما باعث تسهیل جدایش RO از سطح گردیده و سطح را برای اتصال R دیگر آماده می‌کند. همچنین نرخ واکنش احیایی با دما افزایش می‌یابد که این نیز به نوبه خود موجب افزایش حساسیت می‌شود. از طرف دیگر، در دماهای بالاتر نرخ جذب فیزیکی گاز احیا کننده به سطح کاهش می‌یابد که این خود باعث کاهش نرخ واکنش احیایی شده و منجر به کاهش حساسیت می‌شود [۱۱-۱۲]. با توجه به شکل ۵ دمای کار برای نمونه ۸YSZ، 475°C و با توجه به شکل ۶ دمای کار برای نمونه ۸YSZ-۱٫۵Ni، 525°C است.

۳-۴- بررسی تغییرات حساسیت با غلظت گاز

بعد از به دست آوردن دمای کار هر حسگر، حساسیت آن نسبت به غلظت‌های مختلف گاز اتانول در دمای کار بررسی می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸ مربوط به منحنی‌های حساسیت بر حسب غلظت در برابر گاز اتانول می‌باشد. با افزایش میزان غلظت گاز هدف احتمال واکنش میان مولکول‌های گاز و اتم‌های اکسیژنی که به صورت سطحی جذب شده‌اند بالا می‌رود. به همین دلیل است که شاهد افزایش حساسیت با بالا رفتن غلظت گاز اتانول هستیم. در حالت اشباع، تمام یون‌های اکسیژنی که مجاز به انجام واکنش هستند درگیر شده و افزایش بیش از حد غلظت گاز، نه تنها با افزایش حساسیت همراه نخواهد بود بلکه، از آنجایی که ممکن است در هنگام تخلیه گاز، تمام اتم‌های اکسیژن که پیش از انجام واکنش بر روی سطح جذب شده بودند، امکان واکنش مجدد با سطح را به دلیل حضور اتم‌های گاز هدف بر روی سطح پیدا نکنند، لذا حساسیت کاهش می‌یابد.



شکل ۷- منحنی حساسیت بر حسب غلظت گاز اتانول برای نمونه ۸YSZ

[7] Herle, J.V., Vasquez, R. " Conductivity of Mn and Ni-doped stabilized zirconia electrolyte", J. European Ceramic Society, vol. 24, Issue 6, pp. 1177-1180, 2004.

[8] Petrovsky, I. V., Anderson, H.U., "Band gap energy in nanocrystalline ZrO₂:16% Y thin films", J. Applied Physics Letters, vol. 74, Issue 3, pp. 341-343, 1999.

[9] Leoni, M., Jones, R.L., Scardi, P., "Phase stability of scandia-ytria-stabilized zirconia TBCs", J. Surface and Coating Technology, vol. 108-109, Issue 10, pp. 107-113, 1998.

[10] Abolghasemi, Z., Tamizifar, M., Arzani, K., Nemati, A., Khanfekr, A., Bolandi, M., "Synthesis of nanocrystalline Ni/Ce-YSZ powder via a polymerization route", J. Materials Science-Poland, vol. 31, Issue 3, pp. 343-349, 2013.

[11] Wu, R. J., Chen, C. Y., Chen, M. H., Sun, Y. L. "photoreduction measurement of ozone using Pt/TiO₂-SnO₂ material at room temperature", J. Sensors and Actuators B, vol. 123, Issue 2, pp. 1077-1082, 2007.

[12] Choe, Y. S. "New gas sensing mechanism for SnO₂ thin film gas sensors fabricated by using dual ion beam sputtering", J. Sensors and Actuators B, vol. 77, Issues 1-2, pp. 200-208, 2001.

[13] Xiang, X., Zu, X. T., Zhu, S., Wang, L. M. "Optical and magnetic properties of Ni/NiO nanoparticles in YSZ by metal ion implantation and post-implantation annealing", J. Physica B: Condensed Matter, vol. 368, Issues 1-4, pp. 88-93, 2005.

[14] Batista, R. M., Muccillo, E. N. S. "Structure, microstructure and electrical conductivity of 8YSZ containing NiO", J. Ceramics International, vol. 37, Issue 6, pp. 1929-1934, 2011.

[15] Wang, Z. L. "Nanostructure of zinc oxide", J. Materials today, vol. 7, Issue 6, pp. 26-38, 2004.

[16] Liu, X., Cheng, B., Qin, H., Song, P., Huang, Sh., Zhang, R., Hu, J., Jiang, M. "Preparation, electrical and gas-sensing properties of perovskite-type La_{1-x}Mg_xFeO₃ semiconductor materials", J. Physics and Chemistry of solids, vol. 68, Issue 4, pp. 511-515, 2007.

جدول ۲- کوتاه‌ترین زمان پاسخ و بازیابی

نمونه	۸YSZ	۱/۵Ni - ۸YSZ
زمان پاسخ (ثانیه)	۱	۴۸
زمان بازیابی (ثانیه)	۱۶۰	۲,۲۵

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل شده از این پژوهش به شرح زیر است:

(۱) افزایش دما سبب افزایش هدایت برای هر دو نوع نمونه شده است.

(۲) در اثر افزودن پیش ماده‌ی نیکل به‌عنوان دوپنت، انرژی فعالسازی افزایش یافت.

(۳) نمونه Ni - YSZ حساسیت را در دمای بالاتر نسبت به نمونه بدون دوپنت (YSZ) نشان داده است.

(۴) نمونه بدون دوپنت باعث حساسیت بهتری شده است.

(۵) با توجه به بیش‌تر شدن انرژی فعالسازی در نمونه Ni - YSZ، زمان پاسخ طولانی‌تری حاصل شده است.

(۶) مزیت استفاده از دوپنت نیکل کوتاه بودن زمان بازیابی آن است.

(۷) در اثر افزودن دوپنت (اکسید نیکل) بندگپ با توجه به افزایش انرژی فعالسازی، افزایش یافته است.

مراجع

[1] Sivaraman, R., "calibration of YSZ sensor for the measurement of oxygen concentration in liquid PBE", Master of Science Thesis, university of Nevada Las Vegas, USA, 2000.

[2] Mori, M., Sadaoka, Y. "Potentiometric VOC detection at sub-ppm levels based on YSZ electrolyte and platinum electrode covered with gold", J. Sensors and Actuators B, vol. 146, Issue 1, pp. 46-52, 2010.

[3] Chen, L., Hu, J., Fang, Sh., Han, Zh., Zhao, M., Wu, Zh., Liu, X., Qin, H., "Ethanol-sensing properties of SmFe_{1-x}Ni_xO₃ perovskite oxides", J. Sensors and Actuators B: chemical, vol. 139, Issue 2, pp. 407-410, 2009.

[4] Bartolomeo, E. D., Grilli, M. L., "YSZ-based electrochemical sensors: From materials preparation to testing in the exhausts of an engine bench test", J. European Ceramic Society, vol. 25, Issue 12, pp. 2959-2964, 2005.

[5] Li Liu, Y., Xing, Y., Yang, H. F., Liu, Zh. M., Yang, Y., Shen, G. L., Yu, R. Q. "Ethanol gas sensing properties of nano-crystalline cadmium stannate thick films doped with Pt", J. Analytica Chimica Acta, vol. 527, Issue 1, pp. 21-26, 2004.

[6] Basu, R.N., Tietz, F., Wessel, E., Stöver, D. "Interface reactions during co-firing of solid oxide fuel cell components", J. Materials Processing Technology, vol. 147, Issue 1, pp. 85-89, 2004.