

رفتار Low-High سنسور پایه SnO_2 در حضور گازهای قابل احتراق و هوا در حدود ناحیه استوکیومتری

سهیلا خاقانی کاوکانی

آزمایشگاه کاتالیست و مهندسی واکنشها - گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

عباسعلی خدادادی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

شمس الدین مهاجر زاده

دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

افسانه صدر

مریی گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۷۹/۷/۳۰، تاریخ تصویب: ۸۲/۳/۳۱)

چکیده

در این مقاله اثر نسبت هوا به گازهای قابل احتراق، شبیه گاز اگزوز خودروهای بنزینی، روی عملکرد اکسید فلزی نیمه هادی پایه دی اکسید قلع در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. گازهای قابل احتراق ترکیبات مختلفی از گاز مونوکسیدکربن و اتان در هلیوم بوده و با هوا مخلوط گردیده است. این بررسیها برای گاز مونوکسیدکربن در هوا در محدوده دمایی $300-400^\circ\text{C}$ و برای اتان در هوا در محدوده دمایی بالاتر $400-460^\circ\text{C}$ انجام شد. با تغییر نسبت هوا به گاز قابل احتراق مقاومت سنسور بصورت منحنیهای بشکل S تغییر می کند که دارای سه ناحیه مقاومت کم، انتقالی و مقاومت زیاد می باشد. محدوده تغییرات مقاومت انتقالی (از مقاومت کم به زیاد) بسته به دما و نوع گاز از ده تا هزار مرتبه می باشد. همچنین ناحیه انتقالی این منحنیها، برای ترکیب گاز CO در هوا بالاتر و برای ترکیب گاز C_2H_6 در هوا پائین تر از نسبت استوکیومتری مربوطه اتفاق می افتد. با افزایش دما تغییرات مقاومت شدیدتر می شود. همچنین با قرار دادن یک محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور شیب منحنی S شکل در ناحیه انتقالی زیاد تر شده و این انتقال در حدود نسبت استوکیومتری رخ می دهد.

واژه های کلیدی: سنسور، نیمه هادی، اکسید فلزی، گازهای قابل احتراق، ناحیه انتقالی، مقاومت الکتریکی، محفظه احتراق کاتالیستی، جای خالی اکسیژن

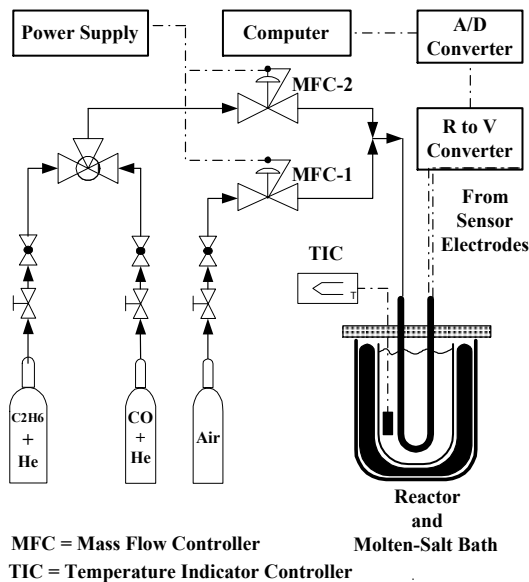
مقدمه

حسگرهای پایه دی اکسید قلع بعنوان متداولترین آشکارساز گازهای قابل احتراق، آلاینده و سمی در محیط بکار می روند. حسگرهای پایه اکسید قلع در واقع نیمه هادیهایی از نوع دهنده می باشند که در دمای بالا تعداد قابل ملاحظه ای الکترون توسط جای خالی اتمهای اکسیژن به شبکه تزریق می گردد. این عمل باعث کاهش مقاومت افزاره در دماهای بالاتر خواهد شد. حضور برخی گازهای احیا کننده مانند مونوکسید کربن در سطح سنسور سبب کاهش بیشتر اکسیژنهای شبکه شده و جای

اکسیدهای فلزی مثل اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید روی (ZnO) و اکسید قلع (SnO_2)، در محیطهای گازی حساسیت زیادی نشان می دهند [۱]. هدایت الکتریکی آنها در هوای معمولی پائین است ولی زمانی که در معرض گازهای احیاء کننده قرار می گیرند بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در ابتدا این پدیده برای آشکار سازی گاز CO بکار می رفت و بعدها بطور وسیعی برای تعیین نشت گاز شهری یا LPG و تعیین گاز های آلاینده و سمی مورد استفاده قرار گرفت [۲].

$$R_s = \frac{R_r V_s}{3.94 - V_s} \quad (1)$$

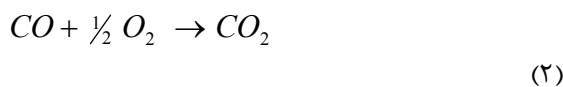
که در آن V_s ولتاژ دو سر سنسور می باشد. جهت بررسی رفتار سنسور، آنرا در داخل راکتور، روی بستر خرد شده شیشه، قرار داده و الکتروود های پلاتینی آنرا به مدار الکتریکی فوق وصل می کنیم، با تغییر دما و جریان هوا و گاز های قابل احتراق در نواحی استوکیومتری، مقاومت سنسور و در نتیجه ولتاژ (V_s) تغییر می کند که بطور لحظه ای نمایش داده می شود.



شکل ۱: شماتیک سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تست سنسور.

روش های آزمایش

برای هر گاز قابل احتراق، با استفاده از رابطه استوکیومتری سوختن کامل گاز، نسبت وزنی هوا به سوخت (ATF) استوکیومتری بدست می آید. بعنوان مثال برای گاز CO داریم:



$$ATF = \frac{AIR}{CO} = \frac{0.5(29/0.21)}{1 \times 28} = 2.46 \quad (3)$$

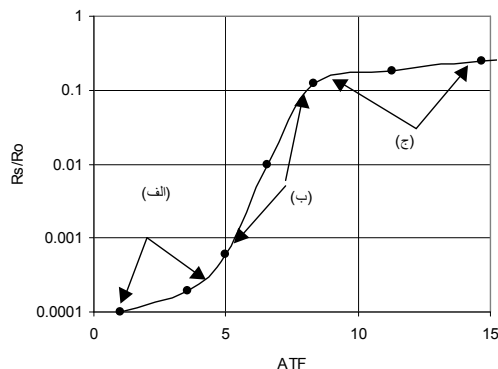
خالی بیشتری به شبکه تزریق می گردد و در نتیجه مقاومت افزاره کاهش پیدا می کند. میزان این کاهش به دما، نوع گاز و مواد افزودنی در حسگر بستگی دارد [۳-۸]. حضور فلزاتی مانند P_t و P_d بعنوان کاتالیست تا حدود زیادی پدیده اکسیداسیون گازهای محیط را تسهیل کرده و در حساسیت حسگر به این گازها تأثیر بسزایی خواهد داشت [۹].

حسگرهای گاز پایه اکسید قلع معمولا برای آشکار سازی غلظتهای کمی از گازهای آلاینده مانند CO بکار می روند. در این مقاله، برای اولین بار، رفتار این حسگرها در حضور گازی شبیه گاز اگزوز خودروهای بنزینی که شامل CO و هیدروکربنها با غلظت های نسبتا بالا ولی مقدار هوای کم (در حدود نسبت استوکیومتری) می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در چنین شرایطی، تغییر نسبت هوا به گاز های قابل احتراق در نواحی نسبت استوکیومتری، باعث تغییرات بسیار شدیدی در مقاومت حسگر می گردد. این رفتار که انتقال بالا-پایین^۱ نامیده شده، در صنایع خودرو سازی برای تعیین نسبت هوا به سوخت و کنترل آن مورد استفاده قرار می گیرد [۱۰].

سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم از بخشهای اصلی تزریق گاز، راکتور و پردازش داده ها تشکیل شده است. تزریق جریان کنترل شده ای از گازها با نسبت مشخص، توسط دو عدد کنترل کننده جریان جرمی (MFC) انجام می شود. راکتور به شکل U بوده و قسمت تحتانی آن با خرد شده شیشه پر شده تا جریان گاز، با عبور از روی آن، به دمای حمام نمک مذاب برسد. دمای حمام با استفاده از یک حلقه بسته کنترل دما شامل ترموکوپل، دستگاه کنترل دما و منبع تغذیه، کنترل می شود. سیستم پردازش داده ها از یک مدار الکتریکی، یک مبدل A/D، کامپیوتر و نرم افزار Peak-Simple II تشکیل شده است. مدار الکتریکی اندازه گیری مقاومت سنسور شامل مقاومت معلوم (R_r) است که قابل تغییر بوده و بطور سری با مقاومت سنسور (R_s) در مدار قرار گرفته است. ولتاژ مرجع (V_0) برابر ۳/۹۴ ولت می باشد، در نتیجه:

در ناحیه سوم (ج) مقداری اکسیژن اضافی در مخلوط وجود دارد که مقاومت سنسور را افزایش داده و به مقدار اولیه آن در هوا نزدیک می‌کند. در ناحیه میانی یعنی ناحیه انتقال (ب) تغییرات مقاومت در نواحی نسبت استوکیومتری رخ می‌دهد و شیب تغییرات مقاومت بر حسب (ATF) بسیار بیشتر از دو ناحیه دیگر می‌باشد.



شکل ۲: نمایش تغییرات منحنی‌های به شکل S گاز CO در دمای 350°C (الف ناحیه پایین ب) ناحیه انتقالی (ج) ناحیه بالا.

نتایج آزمایشات و بحث

جهت نشان دادن خاصیت نیمه هادی نوع n سنسور SnO_2 ، ابتدا سنسور در معرض مخلوط گازمونواکسید کربن در هلیوم قرار می‌گیرد (شکل ۳). با توجه به عدم حضور اکسیژن مقاومت سنسور به مقادیر بسیار کمی افت می‌کند. سپس با تزریق پالسهای هوا در جریان گاز (CO+He)، مقاومت سنسور افزایش می‌یابد و پس از مصرف و عبور پالس هوا از روی سنسور دوباره مقاومت افت پیدا می‌کند. جریان هوای تزریق شده به ترتیب ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌لیتر می‌باشد که متناسب با هوای تزریق شده ارتفاع قله‌ها زیاد شده است. Y1 همان پاسخ Y2 می‌باشد که بزرگنمایی شده است.

در آزمایش‌های بعدی، ابتدا راکتور تا دمای مشخصی در جریان هوا گرم می‌شود و سپس گاز قابل احتراق (مونواکسید کربن و یا اتان در هلیوم) همراه با میزان جریان‌های مختلف هوا از روی سنسور عبور داده می‌شود. با تغییر میزان جریان هوا، نسبت ATF تغییر

نسبت ATF برای اتان ۱۶/۱۱ می‌باشد.

در این تحقیق گازهای ۸/۴٪ مونواکسید کربن در هلیوم و ۱/۲٪ اتان در هلیوم و در مخلوط آن دو با ترکیب ۳/۲۶٪ مونواکسید کربن و ۰/۸۵٪ اتان در هلیوم مورد استفاده قرار گرفت. خلوص گازهای مورد استفاده در تهیه مخلوط گازهای فوق، برای مونواکسید کربن ۹۹/۹۵٪، برای اتان ۹۹/۹۸٪ و برای هلیوم ۹۹/۹۹٪ بود. ترکیب مخلوط گازها توسط دستگاه کروماتوگرافی AGC400 از شرکت Carle تایید گردید.

در شروع آزمایش دمای راکتور (حالی سنسور) را در جریان هوا بالا برده و در این دما نگه می‌داریم تا پاسخ سنسور (مقاومت R_0) به حالت پایدار برسد. سپس جریان هوا قطع و گاز قابل احتراق (مونواکسید کربن و یا اتان در هلیوم) در راکتور از روی سنسور جریان می‌یابد که باعث افت شدیدی در مقاومت سنسور می‌گردد. مقدار این افت مقاومت به ترکیب گاز و دما بستگی دارد. زمانی که مقاومت سنسور به حداقل رسید، جریان هوا مرحله به مرحله اضافه می‌شود. در هر مرحله افزایش هوا مقاومت بصورت پله‌ای و متناسب با میزان افزایش هوا بالا می‌رود. افزایش هوا تا رسیدن مقاومت سنسور (R_s) به مقاومت (R_0) اولیه ادامه پیدا می‌کند.

تغییرات نسبت مقاومت سنسور به مقاومت اولیه در هوا (R_s/R_0) بر حسب نسبت هوا به سوخت (ATF) بصورت منحنی‌هایی به شکل S حاصل می‌شود که یک نمونه آن در شکل (۲) نشان داده شده است. این منحنی‌ها از سه ناحیه تشکیل شده‌اند:

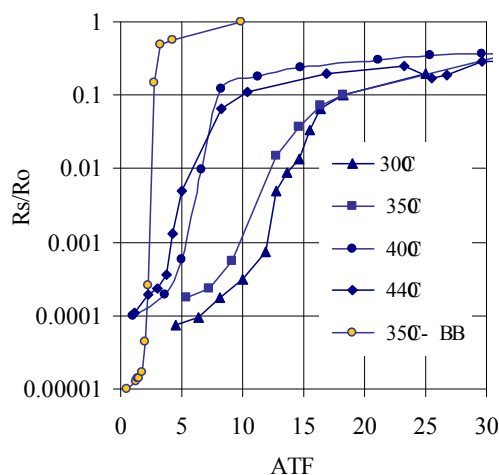
الف- ناحیه پایین^۲: در نسبت هوا به گاز قابل احتراق کم، یعنی غلظت بالای^۳ سوخت

ب- ناحیه انتقالی: در نسبت هوا به گاز قابل احتراق در نواحی نسبت استوکیومتری می‌باشد.

ج- ناحیه بالا^۴: در نسبت هوا به گاز قابل احتراق بالا، یعنی غلظت پایین^۵ سوخت

در ناحیه پایین، مقاومت الکتریکی سنسور بسیار کم است، چون هوایی که گاز قابل احتراق اضافه می‌شود کمتر از نسبت استوکیومتری بوده و کمبود اکسیژن از سطح و شبکه سنسور تامین می‌شود و با ایجاد فضای خالی اکسیژن هدایت الکتریکی سنسور بالا می‌رود.

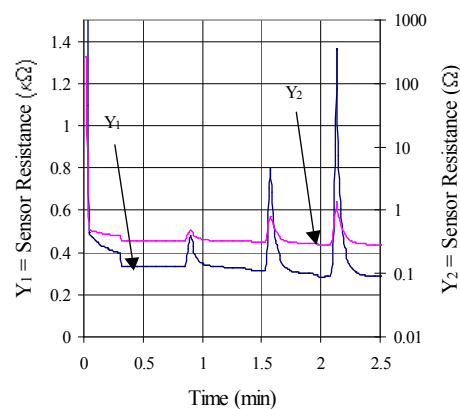
حداقل خود می باشد. در این حالت منحنی به شکل S در قسمت پایین قرار دارد. جایی که نسبت هوا به CO در نسبت استوکیومتری باشد یعنی در ناحیه انتقال، تغییرات مقاومت از ناحیه پایین ناگهان به ناحیه بالا رسیده و منحنی دارای شیب تند خواهد بود. تغییرات مقاومت سنسور در این آزمایش در حدود صد هزار برابر می باشد. چنانچه از نتایج شکل (۴) مشهود است، در صورتیکه از محفظه احتراق کاتالیستی (BB) استفاده نشود،



شکل ۴: اثر تغییرات نسبت وزنی هوا به CO (ATF) روی مقاومت نسبی (R_s/R_0) سنسور پایه SnO_2 در دماهای مختلف و با استفاده از محفظه احتراق کاتالیستی (BB) قبل از سنسور در دمای $350^\circ C$.

منحنی‌های بشکل S در سمت راست منحنی BB قرار می‌گیرند یعنی ناحیه انتقال در مقادیر بزرگتر از نسبت استوکیومتری ATF اتفاق می‌افتد. بعلاوه با افزایش دمای سنسور، ناحیه انتقال به نسبت استوکیومتری نزدیک می‌شود. در عین حال، منحنی‌های مربوط به دماهای $300^\circ C$ و $350^\circ C$ و همچنین دماهای $400^\circ C$ و $440^\circ C$ بهم نزدیک هستند و فاصله زیادی بین منحنی‌های $350^\circ C$ تا $400^\circ C$ می‌باشد. اگر چه علت این پدیده مشخص نیست اما احتمالاً دلیل این رفتار را می‌توان به تغییر مکانیسم عمل سنسور از دمای $350^\circ C$ به دمای $400^\circ C$ ربط داد. در دماهای پایین‌تر از $350^\circ C$ ، عمدتاً جذب قوی CO اتفاق می‌افتد ولی در دمای بالاتر از $400^\circ C$ جذب ضعیف‌تر داشته و نیز می‌سوزد. سوختن پدیده ای است که به دما بستگی

کرده و باعث تغییر مقاومت الکتریکی سنسور می‌شود. همچنین دما بعنوان یک پارامتر اساسی در تعیین رفتار سنسور مورد بررسی قرار گرفته است. دماهای مورد آزمایش 300 ، 350 ، 400 و 440 درجه سانتی‌گراد بود. در دماهای پایین‌تر از 300 درجه سانتی‌گراد سنسور حساسیت قابل ملاحظه‌ای به CO نشان نمی‌دهد. همچنین در برخی آزمایشات از یک محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور استفاده شده است تا گازهای قابل احتراق تا حد امکان سوخته و پاسخ سنسور به گاز قابل احتراق یا اکسیژن تنها بدست آید.



شکل ۳: تزریق هوا در جریان مخلوط گاز CO در He در دمای $350^\circ C$. جریان هوای تزریق شده به ترتیب $0/1$ ، $0/3$ و $0/5$ میلی‌لیتر می‌باشد. Y_1 همان پاسخ Y_2 است که بزرگنمایی شده است.

نتایج آزمایشات با گاز مونواکسید کربن در هلیوم در شکل (۴) نشان داده شده است. نسبت هوا به CO (ATF) استوکیومتری برای سوختن کامل CO در هوا $2/5$ می‌باشد. زمانی که محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور قرار گیرد، مخلوط گاز CO و هوا قبل از رسیدن به سنسور می‌سوزد و آنچه که به سنسور می‌رسد باقیمانده اکسیژن هوا و یا CO به تنهایی خواهد بود. در حالتی ATF بالاتر از مقدار استوکیومتری ($2/5$) باشد، پس از عبور از محفظه احتراق کاتالیستی، باقیمانده گاز فقط هوا می‌باشد و مقاومت سنسور بالا بوده و در منحنی به شکل S در قسمت بالا قرار دارد و در حالت دیگر که ATF کمتر از مقدار استوکیومتری ($2/5$) باشد، CO در هلیوم به سنسور می‌رسد و مقاومت سنسور در میزان

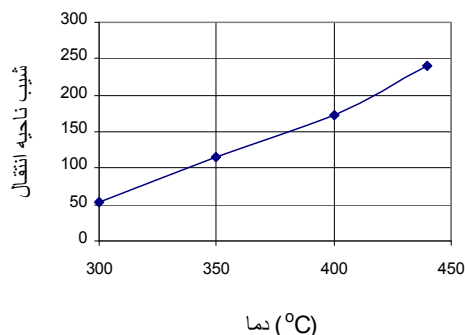
بررسی رفتار سنسور پایه SnO_2 در حضور نسبت‌های مختلف گاز C_2H_6 و هوا

در این آزمایش‌ها نسبت های مختلف گاز اتان (در هلیوم) به هوا در دما های معین از روی سنسور عبور داده شد. دماهای مورد آزمایش ۴۰۰ و ۴۲۰ و ۴۴۰ و 460°C بود (شکل ۶). در دماهای پایین تر از 400°C حساسیت سنسور پایین است. در دمای 420°C محفظه احتراق کاتالیستی (BB) قبل از سنسور قرار گرفت. نسبت استوکیومتری ATF گاز اتان معادل ۱۶/۱۱ می‌باشد و زمانی که BB قبل از سنسور قرار گیرد، ATF ناحیه انتقال در همین حدود می‌باشد. در مقادیر هوای کمتر از نسبت استوکیومتری، باقیمانده اتان به سنسور می‌رسد و منجر به کاهش مقاومت الکتریکی آن می‌شود، در حالیکه در مقادیر هوای بالاتر از نسبت استوکیومتری باقیمانده هوا به سنسور می‌رسد و مقاومت الکتریکی سنسور مقادیر بالا، نزدیک مقدار اولیه آن در هوا (R_0) را نشان خواهد داد. در حالتیکه نسبت هوا به اتان در حدود نسبت استوکیومتری باشد ناحیه انتقال مشاهده می‌شود و مقاومت سنسور از ناحیه پایین به ناحیه بالا می‌رسد در حضور محفظه کاتالیستی تغییرات مقاومت الکتریکی سنسور در حدود صد هزار برابر و ناحیه انتقال دارای تندترین شیب می‌باشد (شکل ۶).

وقتی سنسور به تنهایی (بدون محفظه احتراق کاتالیستی) استفاده شود، ناحیه انتقال دور از نسبت استوکیومتری قرار می‌گیرد. ولی بر خلاف گاز CO ، ناحیه انتقال در نسبت‌های کمتر از نسبت استوکیومتری اتفاق می‌افتد و با افزایش دما به آن نزدیک تر می‌شود. در این حالت شیب ناحیه انتقال کمتر از حالتیکه محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور قرار گیرد، می‌باشد. همچنین شیب این ناحیه با افزایش دما زیاد می‌شود.

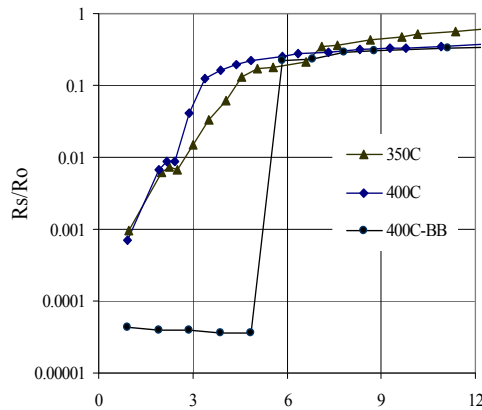
شدیدی دارد و لذا سرعت سوختن CO از دمای 350°C تا دمای 400°C بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر از 400°C احتمالاً پدیده‌های دیگری همچون انتقال جرم عامل کنترل کننده می‌شود.

ATF ناحیه انتقال در منحنی‌های بشکل S در دماهای 300°C و 350°C در حدود ۱۲-۱۵ بوده و در دماهای 400°C و 440°C در حدود ۵-۸ می‌باشد. این در حالی است که ATF ناحیه انتقال، وقتی محفظه کاتالیستی قبل از سنسور قرار گیرد، در حدود مقدار استوکیومتری یعنی ۲/۵ می‌باشد. همچنین محدوده تغییرات مقاومت در دماهای زیر 350°C حدود صد برابر و در دمای 400°C حدود هزار برابر و برای منحنی با محفظه احتراق کاتالیستی در حدود صد هزار برابر می‌باشد.

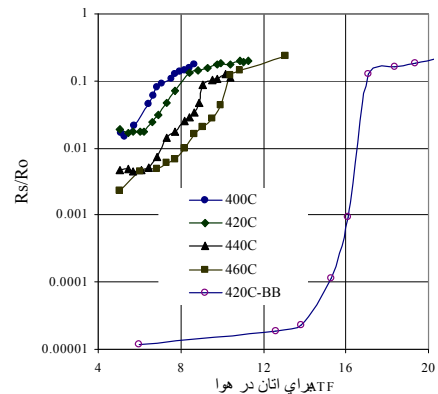


شکل ۵: تغییرات شیب ناحیه انتقال منحنی‌های به سحن CO بر حسب تغییرات دما. همانطور که دیده می‌شود شیب منحنی‌ها در دمای بالاتر افزوده می‌شود.

به نظر می‌رسد با افزایش دما قدرت جذب CO کمتر شده و سرعت واکنش افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان مصرف اکسیژن بیشتر شده و ناحیه انتقال به طرف نسبت ATF استوکیومتری نزدیک تر می‌شود. همچنین شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش دما شیب نواحی انتقال افزایش پیدا می‌کند و علاوه بر آن محدوده تغییرات مقاومت هم زیادتر می‌شود. شکل (۵) تغییرات شیب ناحیه انتقال منحنی‌های به شکل S را بر حسب تغییرات دما نشان می‌دهد.



شکل ۶: اثر تغییرات نسبت وزنی هوا به اتان (ATF) بر مقاومت نسبی سنسور پایه SnO_2 در دماهای مختلف و با استفاده از BB قبل از سنسور در دمای 420°C .

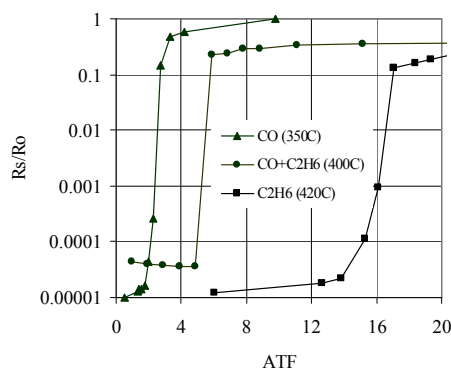


شکل ۷: اثر تغییرات نسبت وزنی هوا به مخلوط ۳/۲۶ در صد مونواکسید کربن و ۰/۸۵ در صد اتان در هلیوم بر مقاومت نسبی سنسور پایه SnO_2 در دماهای مختلف و با استفاده از محفظه احتراق کاتالیستی (BB) قبل از سنسور در دمای 400°C .

شکل ۷: اثر تغییرات نسبت وزنی هوا به مخلوط ۳/۲۶ در صد مونواکسید کربن و ۰/۸۵ در صد اتان در هلیوم بر مقاومت نسبی سنسور پایه SnO_2 در دماهای مختلف و با استفاده از محفظه احتراق کاتالیستی (BB) قبل از سنسور در دمای 400°C .

شکل (۷) نشان می دهد که ناحیه انتقالی منحنی های بشکل S در کمتر از نسبت استوکیومتری ۵/۴۴ اتفاق می افتد.

در شکل (۸) نمودارهای بالا-پایین این سه گاز، C_2H_6 ، CO و مخلوط آنها برای وقتی که محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور قرار گرفته مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود ناحیه انتقالی مخلوط دو گاز بین گازهای تنها قرار گرفته است.



شکل ۸: مقایسه ناحیه انتقالی تغییرات مقاومت نسبی سنسور بر حسب نسبت وزنی هوا به سوخت (ATF) برای CO ، C_2H_6 و مخلوط آنها، با وجود محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود دو منحنی به شکل S در 400°C و 420°C دمای ناحیه انتقال بهم نزدیک هستند و محدوده تغییرات مقاومت الکتریکی آنها در حدود ده برابر بوده و ناحیه انتقال در مقادیر ATF بین ۶ الی ۸ قرار می گیرد. ولی در دمای بالای 440°C محدوده تغییرات مقاومت صد برابر شده و ناحیه انتقال بین نسبت ATF بین ۷ الی ۱۰ قرار می گیرد. بنظر می رسد مکانیسم عملکرد سنسور در فاصله دمای 420°C و 440°C عوض شده باشد، احتمالاً سوختن اتان در دماهای بالاتر از 420°C انجام می شود.

رفتار سنسور پایه SnO_2 در حضور نسبت های مختلف دو گاز CO و C_2H_6 در هلیوم و هوا

در این آزمایش ها مخلوط گازهای CO ۳/۲۶٪ و گاز C_2H_6 ۰/۸۵٪ در هلیوم استفاده شد که نسبت هوا به سوخت (ATF) استوکیومتری آن ۵/۴۴ می باشد. آزمایش ها در دماهای 350°C و 400°C و یک آزمایش نیز با قرار دادن محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور در دمای 400°C انجام گردید. اثر تغییر دما روی مقاومت الکتریکی سنسور پایه SnO_2 در شکل (۷) نشان داده شده است.

نتیجه گیری

ناحیه انتقالی در مقادیر بیشتر از ATF استوکیومتری ولی برای گاز اتان در مقادیر کمتر از آن اتفاق می افتد. با افزایش دمای کار سنسور ناحیه انتقالی به ATF استوکیومتری برای سوختن کامل گازهای قابل احتراق در هوا نزدیک می گردد. با قرار دادن یک محفظه احتراق کاتالیستی قبل از سنسور این انتقال در محل استوکیومتری اتفاق می افتد.

با افزایش نسبت هوا به گازهای قابل احتراق (ATF) منواسید کربن، اتان و مخلوط آنها، تغییر مقاومت سنسورهای پایه SnO_2 به صورت منحنی‌های به شکل S، دارای سه ناحیه مقاومت کم، ناحیه انتقالی و ناحیه مقاومت زیاد می‌باشد. ناحیه انتقالی که اهمیت بسیاری در تعیین نسبت هوا به گازهای قابل احتراق دارد بسته به نوع گاز و دمای کار سنسور تغییر می کند. برای گاز CO

مراجع

- 1 - Simone, D. O., Kennelly, T., Brungard, N. L. and Farauto, R. J. (1991). "Reversible poisoning of palladium catalysts for methane oxidation." *Appl. Catal.*, Vol. 70, PP. 87- 100.
- 2 - Yamazoe, N., Kurokawa, Y. and Seiyama, T. (1983). *Proc. Intern. Mtg. Chem. Sensors*, PP. 35.
- 3 - Wada, K. and Egashira, M. (2000). "Hydrogen sensing properties of SnO_2 subjected to surface chemical modification with ethoxysilanes." *Sensors and Actuators B* 62, PP. 211-219.
- 4 - Dieguez, A. et. al. (2000). "Influence on the gas sensor performances of the metal chemical states introduced by impregnation of calcined SnO_2 sol-gel nanocrystals." *Sensors and Actuators B*, Vol. 68, PP. 94 -99.
- 5 - Takada, T., Fukunaga, T. and Maekawa, T. (2000). "New method for gas identification using a single semiconductor sensor." *Sensors and Actuators B* 66, PP. 22-24.
- 6 - Barsan, N., Stetter, J. R., Findlay, M. and Gopel, W. (2000). "High performance gas sensing of CO: comparative tests for (SnO_2 -based) semiconducting and for electrochemical sensors." *Sensors and Actuators B* 66, PP. 34 33.
- 7 - Pan, Q. et. al. (2000). "Gas-sensitive properties of nanometer-sized SnO_2 ." *Sensors and Actuators B* 66 PP. 237-239.
- 8 - Xiaohua Zhou et. al. (1997). "Tin oxide – based methane gas sensor promoted by alumina – supported pd catalyst." *Sensors and Actuators B* 45, PP. 271- 277.
- 9 – Vlachos, D. S., et. al. (1997). "Characterisation of the Catalyst – semiconductor interaction mechanism in metal – Oxide gas." *Sensors and Actuators B* 44, PP. 458- 461.
- ۱۰ - خاقانی کاوکانی، س. "بررسی اثر نسبت اکسیژن در گازهای قابل سوختن بر روی عملکرد نیمه هادیهای پایه دی اکسید قلع." تز کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Transition Low-High
- 2 – Low
- 3 – Rich
- 4 – High
- 5 – Lean
- 6 - Transition