

امکان تنظیم حساسیت به بخار اتانل در حسگرهای گاز دو لایه‌ای ZnO/SnO_2

محمد عروتی‌نیا^{۱*}، رضا افضل زاده^۲، فرامرز حسین بابائی^۳

۱- استادیار دانشکده علمی کاربردی پست و مخابرات

۲- استادیار دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*تهران، صندوق پستی ۱۶۳۱۵-۷۴۶

orvatinia@iran.ir

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: مهر ۱۳۸۹)

چکیده- در این مقاله، حساسیت به بخار اتانل در حسگرهای مقاومتی گاز ساخته شده بر مبنای لایه‌های نازک SnO_2 و دولایه‌ای ZnO/SnO_2 بررسی می‌شود. لایه‌های اکسیدفلزی حساس به گاز و اتصالات اهمی پلاتین را به روش PVD^۱ و با استفاده از "تبخیر با باریکه الکترونی"^۲ در خلأ، روی زیرپایه پورسلانی^۳ لایه نشانی و نمونه‌های حاصل در دماهای مختلف گرمایی شده است. نقش دمای فرایند در تعیین انرژی فعال‌سازی هدایت الکتریکی لایه بررسی و ملاحظه شد که با تغییر دما، انرژی فعال‌سازی هدایت و حساسیت مقاومت الکتریکی در لایه‌های دوگانه ZnO/SnO_2 به بخار اتانل قابل تغییر و تنظیم است. حساسیت حسگرهای گاز ساخته شده با لایه‌های SnO_2 و ZnO/SnO_2 به اتمسفر حاوی بخار اتانل، اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط ساخت و آزمون یکسان، حساسیت حسگر دولایه‌ای ZnO/SnO_2 به بخار اتانل ۱/۶ برابر بیشتر از حساسیت حسگر تک لایه SnO_2 است. استفاده از این روش برای کنترل حساسیت و ارائه یک درجه آزادی بیشتر در طراحی حسگرهای گاز، برای اولین بار در این مقاله مطرح می‌شود.

کلیدواژه‌گان: حسگر مقاومتی گاز، اکسید قلع، اکسید روی، حساسیت، PVD، تبخیر با باریکه الکترونی.

۱- مقدمه

حساسیت مناسب و قیمت پایین به‌طور وسیعی استفاده می‌شود. مزیت دیگر این حسگرها آن است که آنها را می‌توان به‌صورت مجتمع همراه با مدارهای الکترونیک دیگر بر روی زیرپایه نشانده به‌طور مجتمع تولید کرد [۱].

از حسگرهای گاز نیمه‌هادی به‌دلیل کوچک بودن،

1. Physical Vapor Deposition
2. Electron Beam Evaporation
3. Porcelain

«حسگرهای مقاومتی گاز»^۱ عمومی‌ترین حسگرهای گاز نیمه‌هادی بوده و اساس کار آنها تغییر هدایت الکتریکی لایه حساس در برخورد با گاز هدف است [۲]. لایه حساس معمولاً از جنس نیمه‌هادی‌های اکسیدی مانند SnO_2 [۳] و ZnO [۴-۵] است.

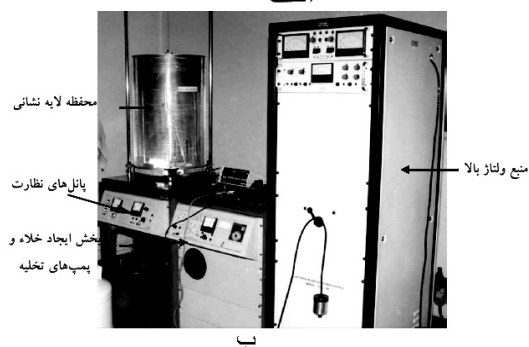
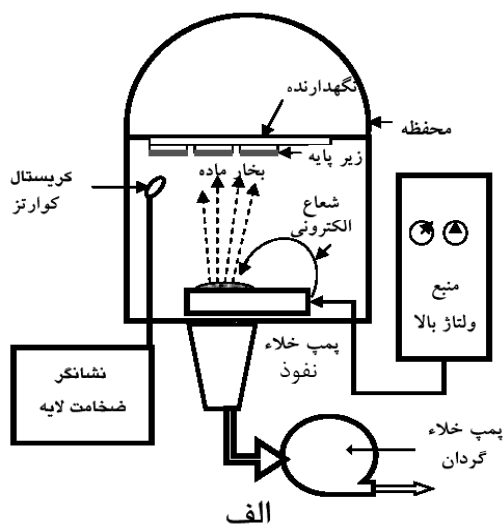
دو ویژگی اصلی در حسگرهای گاز، حساسیت و انتخابگری است و بهبود این دو، مهم‌ترین زمینه تحقیق بر روی این نوع حسگرها است. برای افزایش حساسیت این حسگرها تاکنون روشهای مختلفی تجربه شده که استفاده از انواع آلایش [۶]، نشانش لایه‌ای به‌عنوان کاتالیزور [۷] و استفاده از روشهای ساخت متنوع برای تولید لایه حساس [۸]، از آن جمله‌اند. تلاش برای بهبود کیفیت حسگرها و کاهش معایب ذاتی آنها، همچنین منجر به استفاده از اکسید فلزهای مختلفی شده است. تاکنون SnO_2 مهم‌ترین ماده در ساخت حسگرهای گاز بوده و پس از آن ZnO بیشترین کاربرد را داشته است [۹]. همچنین از اکسیدهای فلزی مانند TiO_2 [۱۰]، WO_3 [۱۱]، و Ga_2O_3 [۱۲] استفاده شده است. البته برای افزایش حساسیت، استفاده از ترکیب نیمه‌هادی‌های اکسیدی و تشکیل اکسیدهای دوگانه نیز پیشنهاد شده است [۱۳] و [۱۲]. ایجاد اکسیدهای دوگانه با روشهای مختلفی قابل تحقق است که ساده‌ترین روش، ترکیب پودرهای مواد اولیه و ایجاد لایه حساس با پودر ترکیبی حاصل است [۱۴]. راه دیگر، ترکیب فلزهای موردنظر و سپس اکسید کردن آنها است [۱۵]. روش دیگر افزایش حساسیت، استفاده از ساختارهای چند لایه‌ای از نیمه‌هادی‌های مختلف است که معمولاً به روش چاپ سیلک بر روی هم قرار می‌گیرند [۱۶]. انتخابگری نیز با روشهای مختلف انجام می‌گیرد که یکی از این روشها

استفاده از پاسخ گذرای حسگر است [۱۷]. روش نشانش فیزیکی بخار (PVD)، یکی از روشهای لایه نشانی است که به‌علت امکان کنترل پذیری خلوص و ضخامت لایه، به‌طور وسیعی برای نشانش لایه‌های حساس به گاز به‌کار می‌رود [۱۹] و [۱۸]. اساس این روش، تبخیر ماده مورد نظر در محفظه خلأ و چگالش بخار آن بر روی زیرپایه مناسب است. تبخیر در روش PVD با سازوکارهای مختلفی قابل انجام است که ساده‌ترین آن، تبخیر حرارتی ماده مورد نظر است. در تولید حسگرهای گاز، این روش به‌طور گسترده‌ای برای نشانش فلزها به‌عنوان اتصالات اهمی و آرایش کاتالیزری به‌کار رفته است [۲۰]. به علت دیرگداز بودن اکسیدهای فلزی حساس به گاز، روش تبخیر حرارتی کاربرد چندانی در لایه نشانی این گونه مواد ندارد. یکی از روشهای ساخت در این زمینه، نشانش فلز مورد نظر با تبخیر حرارتی و سپس اکسید کردن لایه فلزی حاصل با حرارت دادن کنترل شده آن در حضور اکسیژن است [۲۱]. نشاندن فلز به روش تبخیر حرارتی و سپس اکسید کردن آن، برای ساخت اکسیدهای دوگانه نیمه‌هادی نیز به‌کار رفته است [۲۲-۲۳]. روش مناسب برای تبخیر مستقیم مواد دیرگداز، از جمله نیمه‌هادی‌های اکسیدی، «تبخیر با باریکه الکترونی» است [۲۵] و [۲۴]. این روش برای تبخیر فلزهای با نقطه ذوب بالا، مانند پلاتین نیز مناسب است [۲۶].

در مرحله اول کار حاضر، به ساخت و آزمودن حسگرهای گاز SnO_2 به روش PVD پرداخته شد. سپس افزایش حساسیت حسگرهای ساخته شده با نشانش لایه ZnO بر روی لایه SnO_2 اولیه و تشکیل حسگر دو لایه‌ای ZnO/SnO_2 بررسی شده است. ساخت حسگر دو لایه ZnO/SnO_2 به روش PVD در این جا برای

1. Resistive gas sensors

به صورت پودر و از نوع سینتتیک تجاری با خلوص ۹۹/۸٪ (شرکت پارس، ایران) است. نقطه ذوب ZnO، ۱۹۵۰°C و چگالی آن برابر $۵/۶۶ \text{ g/cm}^3$ است.



شکل ۱ سامانه لایه نشانی به روش PVD با تبخیر توسط باریکه الکترونی: الف) طرحواره دستگاه لایه نشانی، ب) تصویر دستگاه.

مراحل اجرایی فرایند لایه نشانی در [۲۷] تشریح شده و در اینجا به طور خلاصه آورده می شود. ابتدا محفظه خلأ، ملحقات آن و زیر پایه ها در طی مراحل شسته و خشک می شود. زیر پایه های تمیز و بوت های حاوی مواد هدف در مکان های مربوط قرار می گیرند. با روشن کردن پمپ خلأ گردان، وقتی فشار محفظه به حدود $۰/۰۱ \text{ Torr}$ رسید، با

اولین بار گزارش می شود. نشان داده شده که در افزار دولایه به دست آمده، انرژی فعال سازی هدایت الکتریکی و به تبع آن حساسیت به گاز می تواند با اجرای نوعی ترمیم حرارتی کنترل و حتی تنظیم شود.

۲- کار آزمایشگاهی

طرحواره و تصویر سامانه لایه نشانی در شکل (۱) نشان داده شده است. این سامانه از قسمت های اصلی زیر تشکیل شده است:

- محفظه لایه نشانی شامل بخش های تبخیرکننده، نگهدارنده زیر پایه ها و دستگاه ضخامت سنج،
- بخش ایجاد خلأ شامل پمپ های تخلیه، فشار سنج ها و شیرهای کنترل،
- بخش منبع ولتاژ بالا و تفنگ الکترونی متصل به کنترل کننده های ولتاژ و جریان رشته گرمکن،
- بخش کنترل خلاء بادی،
- بخش ولتاژ بالا و تفنگ الکترونی 6 kW با چهار آتشدان.

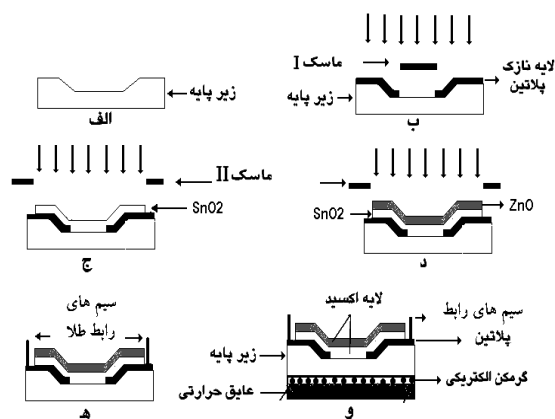
سازوکار لایه نشانی بدین ترتیب است که باریکه ای از الکترون ها با ولتاژ حد اکثر 10 kV شتاب گرفته و به سمت هدف مورد نظر در آتشدان (اکسید قلع) هدایت می شود. برخورد الکترون ها به هدف و تبدیل انرژی جنبشی به گرما، باعث تبخیر موضعی ماده هدف می شود. بخار حاصل به سمت زیر پایه ها که در بالای محفظه تبخیر (شکل ۱- الف) نصب شده رفته و بر روی آنها می نشیند.

به عنوان ماده اولیه از پودر SnO_2 نوع سینتتیک تجاری (Westwood Ceramic Supply) WC/IP-684 (USA) استفاده شده است. نقطه ذوب اکسید قلع ۱۶۳۰°C و چگالی آن برابر $۶/۹۵ \text{ g/cm}^3$ است. ZnO به کار رفته

• قرار دادن گرمکن الکتریکی کوچکی در قسمت زیرین زیرپایه برای تأمین دمای نقطه کار. حسگرهای تک لایه اکسید قلع نیز به‌عنوان مبنای مقایسه، با روشی مشابه ساخته شد. این نوع اخیر بسیار مورد توجه بوده است [۲۸] و در اینجا به این نوع حسگر فقط به‌عنوان مقایسه نگاه شده است.

۳- نتایج و بحث

لایه‌های SnO_2 و دو لایه‌های ZnO/SnO_2 بر روی زیر پایه‌های پورسلان نشانده شد. این لایه‌ها از چسبندگی خوبی به سطح زیر پایه‌ها برخوردار بودند. در دمای اتاق، هدایت الکتریکی این نمونه‌ها از $10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}$ کمتر بوده و با دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود قابل سنجش نبود. ملاحظه شد که ترمیم حرارتی^۱ در دمای 600°C ، هدایت الکتریکی این لایه‌ها را افزایش می‌دهد



شکل ۲ مراحل ساخت حسگر گاز مقاوم دو لایه: الف) زیر پایه سرامیکی با شکل هندسی خاص، ب) نشان لایه پلاتین، ج) نشان لایه اکسید قلع، د) نشان لایه اکسید روی، ه) برقراری اتصالات الکتریکی، و) قرار گرفتن گرمکن الکتریکی و عایق حرارتی.

روشن کردن پمپ نفوذ و با استفاده از تله نیتروژن مایع، خلأ به 10^{-6} Torr رسیده و کار لایه نشانی آغاز می‌شود. لایه نشانی با گرم کردن زیر پایه‌ها، روشن کردن منبع ولتاژ بالا و رساندن ولتاژ تفنگ الکترونی به 7 kV آغاز می‌شود. عمل تبخیر با هدایت و کنترل جریان باریکه الکترونی به محل ماده هدف و نظارت همزمان بر فشار محفظه و ضخامت لایه نشانده شده ادامه می‌یابد. فشار محفظه در ابتدا در حدود $5 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ بود و در حین لایه‌نشانی گاهی تا 2×10^{-5} نیز افزایش می‌یافت. نرخ نشست برابر $3-5 \text{ \AA/s}$ بود و جریان باریکه الکترونی حدود 100 mA ثابت شد. عملیات لایه نشانی با قطع ولتاژ تفنگ الکترونی پایان می‌یابد.

عملیات فوق در ابتدا برای نشان پلاتین در محل اتصالات اهمی به کار رفت؛ سپس دو بار دیگر، هر بار با تعویض ماسک، همین عملیات برای نشان لایه‌های ZnO و SnO_2 تکرار شد. ضخامت هر یک از لایه‌های اکسید برابر 7000 \AA است.

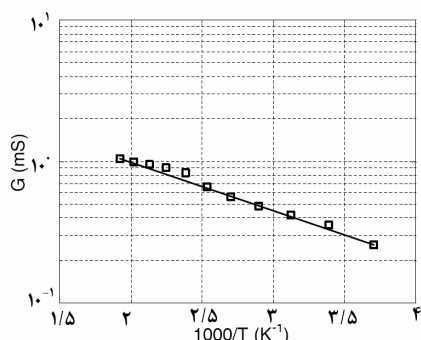
۲-۱- ساخت حسگر

حسگر گاز نمونه در طی مراحل نشان داده شده در شکل (۲) الف تا و ساخته شد. این مراحل عبارتند از:

- ساخت زیر پایه سرامیکی با شکل هندسی خاص.
- نشان فیزیکی لایه پلاتین با شکل هندسی مشخص شده توسط ماسک I، به‌عنوان اتصالات الکتریکی.
- نشان فیزیکی لایه اکسید قلع با شکل هندسی مشخص شده توسط ماسک II.
- نشان فیزیکی لایه اکسید روی با شکل هندسی مشخص شده توسط ماسک II.
- برقراری اتصالات الکتریکی به دو الکترود پلاتین با استفاده از خمیر نقره.

در دمای 1000°C عایق بودند. همچنین مشاهده شد که اعمال سیکل‌های گرمایی تا دمای 600°C نیز باعث کاهش غیر قابل بازگشت هدایت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود؛ به طوری که پس از چند سیکل، لایه در عمل عایق می‌شود. به نظر می‌رسد که این وابستگی به ترکیب دو اکسید در دمای بالا و تشکیل فاز دیگر مربوط می‌شود. بحث در این زمینه خارج از موضوع مقاله حاضر است و در جای دیگری به آن خواهیم پرداخت.

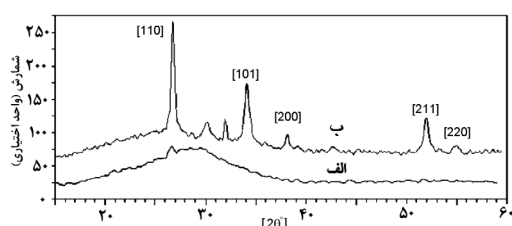
تحقیقات قبلی محققان نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سد پتانسیل مربوط به سازوکار هدایت الکتریکی در لایه باعث افزایش حساسیت حسگر می‌شود [۲۹]. لذا انتظار داریم که حساسیت حسگر دولایه‌ای ZnO/SnO_2 - که در دمای 600°C باز پخته شده - بیشتر از حساسیت حسگر تک لایه SnO_2 باشد. برای اثبات این فرضیه، حساسیت دو نمونه حسگر در شرایطی مشابه مقایسه شد. نمونه الف بر اساس تک لایه SnO_2 بوده و شرایط نشانش و ترمیم حرارتی آن در بالا ارائه شد و انرژی فعال سازی هدایت در آن 70 meV بر آورد شده است. نمونه ب بر اساس لایه حساس دوگانه ZnO/SnO_2 است که به روش بالا ساخته شده و انرژی فعال سازی آن معادل 500 meV اندازه گیری شده است.



شکل ۴ منحنی آرنیوس تک لایه SnO_2 نشانده شده به روش PVD پس از ترمیم حرارتی در 600°C .

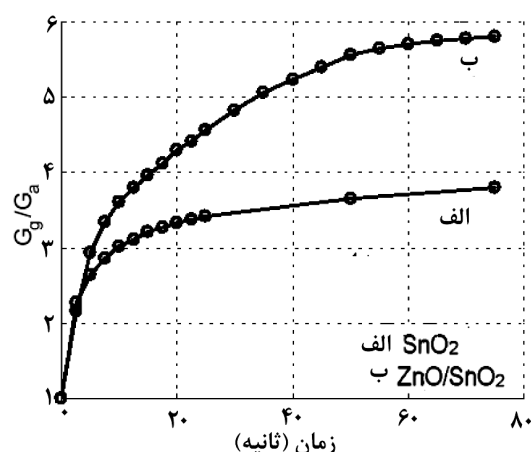
برای بررسی نقش ترمیم حرارتی در ساختار لایه نشانده شده، الگوی XRD لایه‌های SnO_2 قبل و بعد از این عملیات بررسی شد. نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. در الگوی XRD قبل از ترمیم حرارتی، قله‌های مربوط به سطوح مختلف کریستال SnO_2 مشاهده نمی‌شود؛ اما پس از این عملیات، قله‌ها کاملاً آشکار شده است. لذا افزایش هدایت الکتریکی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی را نیز می‌توان به کریستالی شدن آن در طول عملیات نسبت داد.

در شکل (۴) منحنی آرنیوس برای نمونه‌های تک لایه SnO_2 ، پس از ترمیم حرارتی در دمای 600°C ، نشان داده شده است. با توجه به شیب خط به دست آمده، انرژی فعال سازی هدایت در این لایه‌ها برابر 70 meV به دست آمد. این نتیجه، هدایت الکتریکی قابل ملاحظه لایه‌های مذکور را در دمای اتاق توجیه می‌کند. منحنی آرنیوس دو لایه‌های ZnO/SnO_2 که در دو دمای مختلف ترمیم حرارتی شده در شکل (۵) آورده شده است. دمای ترمیم نمونه‌های الف و ب به ترتیب برابر 300°C و 600°C است. از روی شیب منحنی، انرژی فعال سازی هدایت الکتریکی در این دو نمونه به ترتیب برابر 60 meV و 500 meV به دست آمد.

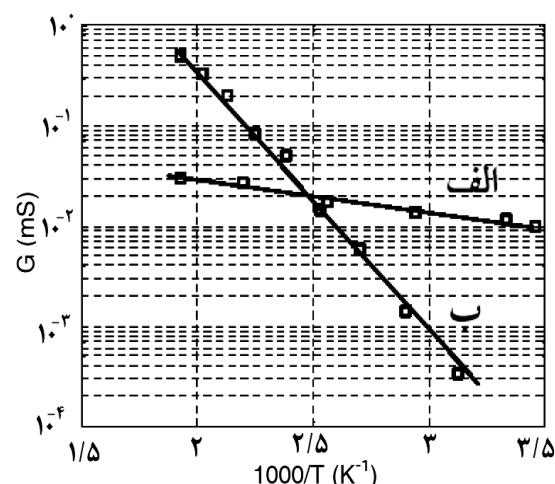


شکل ۳ الگوی XRD لایه‌های SnO_2 نشانده شده: الف) قبل و ب) بعد از ترمیم حرارتی در 600°C .

خواص الکتریکی لایه‌های دوگانه ZnO/SnO_2 به شدت به عملیات حرارتی پس از نشانش وابسته است. برای مثال، با وجود هدایت الکتریکی قابل ملاحظه در نمونه‌های مربوط به عملیات در دمای 300°C تا 600°C نمونه‌های باز پخت شده



شکل ۶ پاسخ حسگرهای ساخته شده با لایه‌های حاصل از روش PVD، پس از باز پخت در دمای 700°C ، نسبت به بخار اتانل با تراکم 4000 ppm .



شکل ۵ منحنی آرنیوس لایه ZnO/SnO_2 نشانده شده به روش PVD، پس از ترمیم حرارتی در (الف) 300°C و (ب) 700°C .

امکان کنترل ارتفاع سد پتانسیل، توانایی قابل توجهی است که ساخت حسگرهای گاز در محدوده وسیعی از حساسیت را ممکن می‌سازد. این توانایی از دید صنعتی اهمیت بالایی دارد. به عنوان مثال، در ساخت کنترل شده آرایه حسگرها - که در آن محدوده وسیعی از حساسیت مورد نیاز است - این توانایی مفید واقع می‌شود. در کارهای قبلی نویسندگان روش دیگری برای تنظیم حساسیت بر اساس کنترل ضخامت لایه‌های حساس حاصل از روش CVD پیشنهاد داده شده است [۳۱][۳۰].

۴- نتیجه‌گیری

روش جدیدی برای بالا بردن حساسیت حسگرهای مقاومتی گاز لایه نازک SnO_2 حاصل از روش PVD پیشنهاد شده است. اساس کار، نشان دادن لایه دیگری از جنس اکسید روی و تشکیل ساختار دولایه‌ای ZnO/SnO_2 است. ساختارهای دولایه مذکور پس از نشانش، ترمیم حرارتی شده است و دیده شد که بالا بردن

نتیجه آزمایش حساسیت در شکل (۶) آورده شده و نشانگر بالاتر بودن حساسیت به گاز در نمونه دوم است. افزایش حساسیت در حدود دو برابر، فرضیه بالا را تأیید می‌کند.

در این شکل نمودار تغییرات G_g/G_a بر حسب زمان در حضور بخار اتانل با تراکم 4000 ppm نشان داده شده است. G_a هدایت الکتریکی حسگر در هوای تمیز و G_g هدایت آن در هوای آلوده شده به گاز مورد نظر است. مقدار G_g/G_a در چند ثانیه اول دارای افزایش شدید بوده و سپس با شیب ملایم‌تری به سمت اشباع می‌رود. حساسیت به گاز هدف برابر مقدار پایدار این منحنی‌ها تعریف می‌شود [۷]. شکل (۶) نشان می‌دهد که نمونه‌های ZnO/SnO_2 حساسیت بیشتری دارند. حساسیت لایه‌های مضاعف حدود ۵۵٪ بیشتر از تک لایه‌ای SnO_2 بوده و چنین نتیجه‌گیری می‌شود که حسگر ZnO/SnO_2 برای آشکار سازی بخار اتانل مناسب‌تر از حسگر تک لایه‌ای SnO_2 است.

حساسه گاز الکتروسرامیکی متخلخل" نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۸، شماره ۳، شهریور ۱۳۸۳ ص ۳۴۹-۳۵۶،

- [5] Hossein-Babaei F. and Taghibakhsh, F., "Electrophoretically Deposited Zinc Oxide Thick Film Gas Sensors", *Electronics Lett*, 36, 2000, 1815-1816.
- [6] Sayago I., Gutiérrez J., Arés L., Robla J. I., Horrillo M. C., Rino J., Getino J. and Agapito J. A., "The Effect of Additives in Tin Oxide on the Sensitivity and Selectivity to NO_x and CO", *Sensors and Actuators B* 26-27, 1995, 19-23.
- [7] Sauvan M. and Pijolat Ch., "Selectivity Improvement of SnO₂ Films by Superficial Metallic Films", *Sensors and Actuators B* 58, 1-3, 1999, 295-301.
- [8] Gopel W. and Schierbaum K. D., "SnO₂ Sensors Current Status and Future Prospects ", *Sensors and Actuators B* 26-27, 1995, 1-12.
- [9] Szekely J., Evans J. W. and Sohn H. Y., *Gas-solid Reaction*, Academic Press, 1979, pp. 24.
- [10] Jung S. J. and Yanagida H., "The Characterization of a CuO/ZnO Heterocontact-type Gas Sensor Having Selectivity for CO Gas", *Sensors and Actuators B* 37, 1996, 55-60.
- [11] Chang J. F., Kuo H. H., Leu I. C. and

دمای این فرایند باعث کاهش هدایت نمونه‌ها شده و انرژی فعال‌سازی هدایت الکتریکی را افزایش می‌دهد. با توجه به ارتباط قوی بین حساسیت حسگر و ارتفاع سد پتانسیل بین دانه‌ها (انرژی فعال‌سازی)، این یافته می‌تواند از دید ساخت حسگر با حساسیت کنترل شده حائز اهمیت صنعتی باشد. مقایسه حساسیت نمونه‌های تک لایه SnO₂ با حساسیت حسگرهای دو لایه‌ای ZnO/SnO₂ نشان داد که در شرایط ساخت و آزمون یکسان، حساسیت حسگر دولایه‌ای ZnO/SnO₂ به بخار اتانل ۱/۶ برابر حساسیت حسگر تک لایه SnO₂ است.

۵- منابع

- [1] Simon I., Bârsan, N., Bauer M., and Weimar U., "Micromachined Metal Oxide Gas Sensors: Opportunities to Improve Sensor Performance", *Sensors and Actuators B*, 2001, 73, 1-26.
- [2] Maffei's T. G., Owen G. T., Penny M. W., Starke T. K. H., Clark S. A., Ferkel H. and Wilks S. P., "Nano-crystalline SnO₂ Gas Sensor Response to O₂ and CH₄ at Elevated Temperature Investigated by XPS", *Surface Science*, 520, 2002, 29-34.
- [3] Yamazoe, N, "New Approaches for Improving Semiconductor Gas Sensors", *Sensors and Actuators B* 5, 1991, 7-19.
- [۴] حسین بابائی، فرامرز و عروتی نیا، محمد، " استخراج پارامترهای تشخیص از پاسخ گذرای

- Science: Material in Electronics 5, 1994, 300-304.
- [۱۷] عروتی نیا، محمد و حسین بابائی، فرامرز. "عوامل مؤثر در تعیین پاسخ گذرای حسگرهای مقاومتی گاز"، مجله فنی و مهندسی مدرس شماره ۲۲ زمستان ۱۳۸۴، ص ۷۹-۶۹
- [18] Michel H. J., Leiste H., and Halbritter J., "Structural and Electrical Characterization of PVD-deposited SnO₂ Films for Gas-Sensor Application", Sensors and Actuators B 25, 1995, 568-572.
- [19] Ferroni M., Boscarino D., Comini E., Gnani D., Guidi V., Martinelli G., Nelli P., Rigato V. and Sberveglieri G., "Nanosized Thin Films of Tungsten-Titanium Mixed Oxides as Gas Sensors", Sensors and Actuators B 58, 1999, 289-294
- [20] Gurbuz Y., Kang W. P., Davidson J. L. and Kerns D. V., "Current Conduction Mechanism and Gas Adsorption Effects on Device Parameters of the Pt/SnOx/diamond Gas Sensor", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 46, No. 5, 1999, 914-920.
- [21] Sberveglieri G., "Classical and Novel Techniques for the Preparation of SnO₂ Thin-film Gas Sensors", Sensors and Actuators B 6, 1992, 239-247
- [22] Galatsis K., Li Y.X., Wlodarski W., Hon M. H., "The Effects of Thickness and Operation Temperature on ZnO:Al Thin Film CO Gas Sensor", Sensors and Actuators B 84, 2002, 258-264.
- [12] Schneider T., Schutt G., Goschnick J., Bruns M. and Ache H. J., "Tungsten Trioxide Gas Sensor Array Constructed from Partitioned Layers of the Metal Oxide", IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, 1997, 567-568.
- [13] Frank J., Fleischer, M., Meixner H. and Feltz A., "Enhancement of Sensitivity and Conductivity of Semiconducting Ga₂O₃ Gas Sensors by Doping", IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, 1997, 955-958.
- [14] Ono M., Shimano K., Miura N., and Yamazoe N., "Reaction Analysis on Sensing Electrode of Amperometric NO₂ Sensor Based on Sodium Ion Conductor by Using Chronopotentiometry", Sensors and Actuators B 77, 2001, 78-83.
- [15] Yamada Y., Yamashita K., Masuoka Y. and Seno Y., "Zn-Sn-Sb-O Thin Film Sensor for ppm Level NO₂ Detection", Sensors and Actuators B 77, 2001, 12-15.
- [16] Park J. H., Park S.J., "Effect of V₂O₅ on the Electrical Properties of TiO₂-V₂O₅ Humidity Sensors", Journal of Material

- [28] Takada T., "A New Method for Gas Identification Using a Single Semiconductor Sensor", *Sensors and Actuators B* 52, 1998, 45-52.
- [29] Martinelli G. and Carotta M.C., "Sensitivity to Reducing Gas as a Function of Energy Barrier in SnO₂ Thick-film Gas Sensor", *Sensors and Actuators*, B7, 1992, 717-720.
- [30] Hossein Babaei F. and Orvatinia M., "Thickness Dependence of Sensitivity in Thin Film Tin Oxide gas Sensors Deposited by Vapor pyrolysis", *International J. of Engineering* Vol. 16, No.1, 2003, 33-40.
- [31] Hossein-Babaei F. and Orvatinia M., "Analysis of Thickness Dependence of the Sensitivity in Thin-Film Resistive Gas Sensors", *Sensors and Actuators*, B 89, 2003, 256-261.
- Comini E., Sberveglieri G., Cantalini C., Santucci S., " Comparison of Single and Binary Oxide MoO₃, TiO₂ and WO₃ sol-gel Gas Sensors ", *Sensors and Actuators B* 83, 2002, 276-280.
- [23] Sberveglieri G., "Recent Developments in Semiconducting Thin-film Gas Sensors", *Sensors and Actuators B* 23 1995, 103-109.
- [24] Madhusudhana Reddy M. H. and Chandorkar A. N., "E-beam Deposited SnO₂, Pt-SnO₂ and Pd-SnO₂ Thin Films for LPG Detection ", *Thin Solid Films* 349, 1999, 260-265.
- [25] Aste T., Botter R. and Beruto D., "Double-layer Granular SnO₂ Sensors", *Sensors and Actuators*, B25, 1995, 826-829.
- [26] Schweizer-Berberich M., Zheng J.G., Weimar U., Gopel W., Barsan N., Pentia E., Tomescu A., "The Effect of Pt and Pd Surface Doping on the Response of Nanocrystalline Tin Dioxide Gas Sensors to CO ", *Sensors and Actuators B* 31, 1996, 71-75.
- [۲۷] عروتی نیا، محمد، سنسورهای مقاومتی گاز تشخیصی بر اساس تحلیل رفتار گذرا، پایان نامه دوره دکتری مهندسی برق-الکترونیک، زیر نظر دکتر فرامرز حسین بابائی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، مهر ۱۳۸۲.