

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

محمد عروتی‌نیا<sup>۱\*</sup>، رضا افضل زاده<sup>۲</sup>، فرامرز حسین بابائی<sup>۳</sup>

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<sup>۱</sup> و با استفاده از "تبخیر با باریکه الکترونی"<sup>۲</sup> در خلأ، روی زیرپایه پورسلانی<sup>۳</sup> لایه نشانی و نمونه‌های حاصل در دماهای مختلف ترمیم حرارتی 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 یگدیگر 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

استفاده از پاسخ گذرای حسگر است [۱۷]. روش نشانش فیزیکی بخار (PVD)، یکی از روشهای لایه نشانی است که به علت امکان کنترل پذیری خلوص و ضخامت لایه، به طور وسیعی برای نشانش لایه‌های حساس به گاز به کار 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 به طور گسترده‌ای برای نشانش فلزها به عنوان اتصالات اهمی و آرایش کاتالیزری به کار 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 به کار 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  $\text{SnO}_2$  به روش PVD پرداخته شد. سپس افزایش حساسیت حسگرهای ساخته شده با نشانش لایه  $\text{ZnO}$  بر روی لایه  $\text{SnO}_2$  اولیه و تشکیل حسگر دو لایه‌ای  $\text{ZnO/SnO}_2$  بررسی شده است. ساخت حسگر دو لایه  $\text{ZnO/SnO}_2$  به روش PVD در این جا برای

«حسگرهای مقاومتی گاز»<sup>۱</sup> 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  $\text{SnO}_2$  [۳] و  $\text{ZnO}$  [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 به عنوان 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  $\text{SnO}_2$  مهم‌ترین ماده در ساخت حسگرهای گاز بوده و پس از آن  $\text{ZnO}$  بیشترین کاربرد را داشته است [۹]. همچنین از اکسیدهای فلزی مانند  $\text{TiO}_2$  [۱۰]،  $\text{WO}_3$  [۱۱]، و  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  [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 مورد نظر 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

1. Resistive gas sensors

به صورت پودر و از نوع سینتتیک تجاری با خلوص ۹۹/۸٪ (شرکت پارس، ایران) است. نقطه ذوب ZnO،  $1950^{\circ}\text{C}$  و چگالی آن برابر  $5/66 \text{ g/cm}^3$  است.

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.

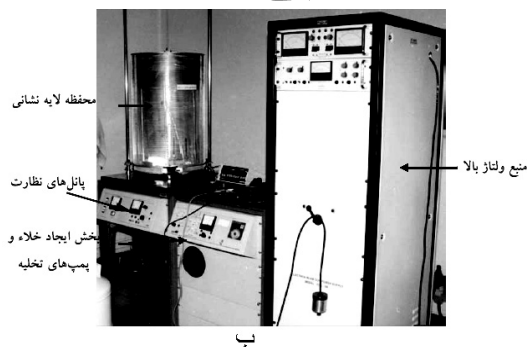
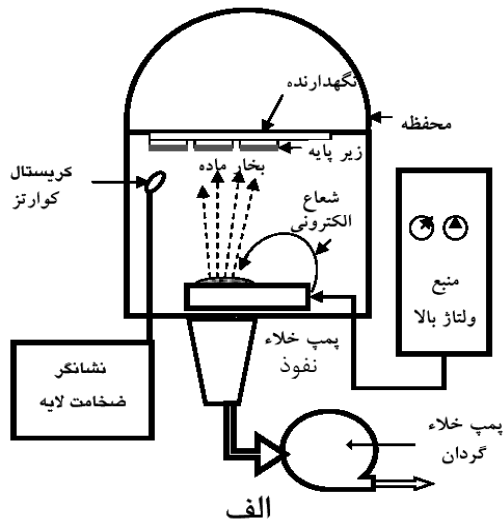
## ۲- کار آزمایشگاهی

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 کتترل خلأ بادی،
- بخش ولتاژ بالا و تفنگ الکترونی 6 kW با چهار آتشدان.

سازوکار لایه نشانی بدین ترتیب است که باریکه ای از الکترونها با ولتاژ حد اکثر 10 kV شتاب گرفته و به سمت هدف مورد نظر در آتشدان (اکسید قلع) هدایت می شود. برخورد الکترونها 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  $\text{SnO}_2$  نوع سینتتیک تجاری (Westwood Ceramic Supply) WC/IP-684 (USA) استفاده شده است. نقطه ذوب اکسید قلع  $1630^{\circ}\text{C}$  و چگالی آن برابر  $7/95 \text{ g/cm}^3$  است. ZnO به کار رفته



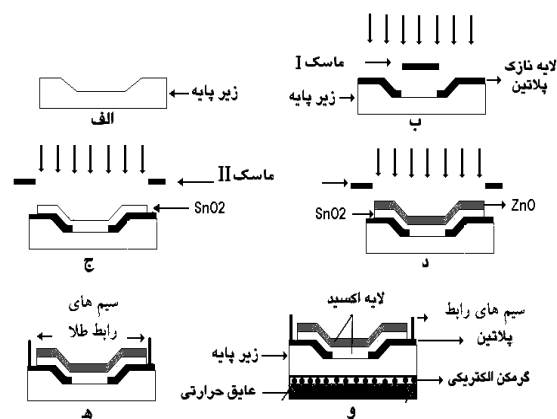
شکل ۱ سامانه لایه نشانی به روش PVD با تبخیر توسط باریکه الکترونی: الف) طرحواره دستگاه لایه نشانی، ب) تصویر دستگاه.

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  $0/01 \text{ Torr}$  رسید، با

• 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  $\text{SnO}_2$  و دو لایه‌های  $\text{ZnO/SnO}_2$  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<sup>۱</sup> در دمای  $600^\circ\text{C}$ ، 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) نشانش لایه پلاتین، ج) نشانش لایه اکسید قلع، د) نشانش 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  $10^{-6} \text{ Torr}$  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  $7 \text{ kV}$  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  $2 \times 10^{-5}$  نیز افزایش می‌یافت. نرخ نشست برابر  $3-5 \text{ \AA/s}$  بود و جریان باریکه الکترونی حدود  $100 \text{ mA}$  ثبت شد. عملیات لایه نشانی با قطع ولتاژ تفنگ الکترونی پایان می‌یابد.

عملیات فوق در ابتدا برای نشانش پلاتین در محل اتصالات اهمی به کار رفت؛ سپس دو بار دیگر، هر بار با تعویض ماسک، همین عملیات برای نشانش لایه‌های  $\text{ZnO}$  و  $\text{SnO}_2$  تکرار شد. ضخامت هر یک از لایه‌های اکسید برابر  $7000 \text{ \AA}$  است.

### ۲-۱- ساخت حسگر

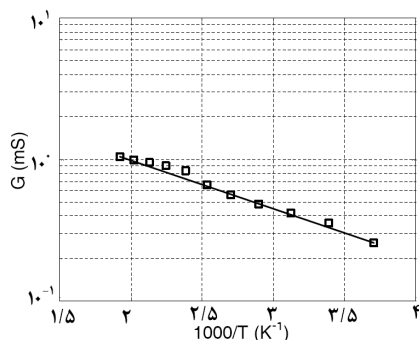
حسگر گاز نمونه در طی مراحل نشان داده شده در شکل (۲) الف تا و ساخته شد. این مراحل عبارتند از:

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

#### 1. Annealing

در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  عایق بودند. همچنین مشاهده شد که اعمال سیکل‌های گرمایی تا دمای  $600^{\circ}\text{C}$  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.

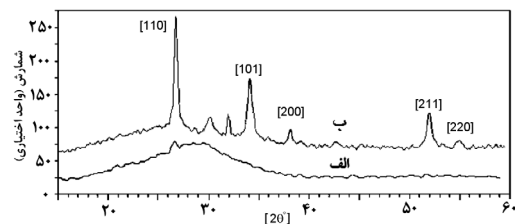
تحقیقات قبلی محققان نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سد پتانسیل مربوط به سازوکار هدایت الکتریکی در لایه باعث افزایش حساسیت حسگر می‌شود [۲۹]. لذا انتظار داریم که حساسیت حسگر دولایه‌ای  $\text{ZnO/SnO}_2$  - که در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  باز پخته شده - بیشتر از حساسیت حسگر تک لایه  $\text{SnO}_2$  باشد. برای اثبات این فرضیه، حساسیت دو نمونه حسگر در شرایطی مشابه مقایسه شد. نمونه الف بر اساس تک لایه  $\text{SnO}_2$  بوده و شرایط نشانش و ترمیم حرارتی آن در بالا ارائه شد و انرژی فعال سازی هدایت در آن  $70\text{ meV}$  بر آورد شده است. نمونه ب بر اساس لایه حساس دوگانه  $\text{ZnO/SnO}_2$  است که به روش بالا ساخته شده و انرژی فعال سازی آن معادل  $500\text{ meV}$  اندازه گیری شده است.



شکل ۴ منحنی آرنیوس تک لایه  $\text{SnO}_2$  نشانده شده به روش PVD پس از ترمیم حرارتی در  $600^{\circ}\text{C}$ .

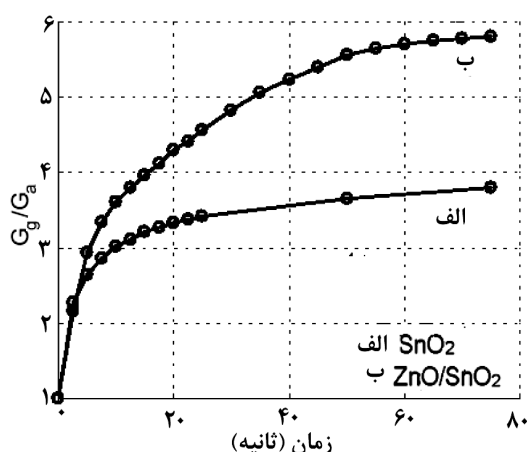
برای بررسی نقش ترمیم حرارتی در ساختار لایه نشانده شده، الگوی XRD لایه‌های  $\text{SnO}_2$  قبل و بعد از این عملیات بررسی شد. نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. در الگوی XRD قبل از ترمیم حرارتی، قله‌های مربوط به سطوح مختلف کریستال  $\text{SnO}_2$  مشاهده نمی‌شود؛ اما پس از این عملیات، قله‌ها کاملاً آشکار 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  $\text{SnO}_2$ ، پس از ترمیم حرارتی در دمای  $600^{\circ}\text{C}$ ، نشان داده شده است. با توجه به شیب خط به دست آمده، انرژی فعال سازی هدایت در این لایه‌ها برابر  $70\text{ meV}$  به دست آمد. این نتیجه، هدایت الکتریکی قابل ملاحظه لایه‌های مذکور را در دمای اتاق توجیه می‌کند. منحنی آرنیوس دو لایه‌های  $\text{ZnO/SnO}_2$  که در دو دمای مختلف ترمیم حرارتی شده در شکل (۵) آورده شده است. دمای ترمیم نمونه‌های الف و ب به ترتیب برابر  $300^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  است. از روی شیب منحنی، انرژی فعال سازی هدایت الکتریکی در این دو نمونه به ترتیب برابر  $60\text{ meV}$  و  $500\text{ meV}$  به دست آمد.

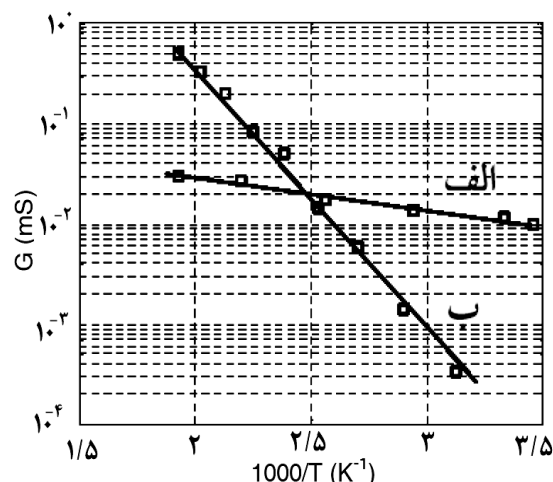


شکل ۳ الگوی XRD لایه‌های  $\text{SnO}_2$  نشانده شده: الف) قبل (ب) بعد از ترمیم حرارتی در  $600^{\circ}\text{C}$ .

خواص الکتریکی لایه‌های دوگانه  $\text{ZnO/SnO}_2$  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  $300^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  نمونه‌های باز پخت شده



شکل ۶ پاسخ حسگرهای ساخته شده با لایه‌های حاصل از روش PVD، پس از باز پخت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$ ، نسبت به بخار اتانل با تراکم  $4000\text{ ppm}$ .



شکل ۵ منحنی آرنیوس لایه  $\text{ZnO/SnO}_2$  نشانده شده به روش PVD، پس از ترمیم حرارتی در (الف)  $300^{\circ}\text{C}$  و (ب)  $700^{\circ}\text{C}$ .

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. به‌عنوان 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  $\text{SnO}_2$  حاصل از روش PVD پیشنهاد شده است. اساس کار، نشان دادن لایه دیگری از جنس اکسید روی و تشکیل ساختار دولایه‌ای  $\text{ZnO/SnO}_2$  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  $4000\text{ ppm}$  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  $\text{ZnO/SnO}_2$  حساسیت بیشتری دارند. حساسیت لایه‌های مضاعف حدود ۵۵٪ بیشتر از تک لایه‌ای  $\text{SnO}_2$  بوده و چنین نتیجه‌گیری می‌شود که حسگر  $\text{ZnO/SnO}_2$  برای آشکار سازی بخار اتانل مناسب‌تر از حسگر تک لایه‌ای  $\text{SnO}_2$  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<sub>x</sub> and CO", *Sensors and Actuators B* 26-27, 1995, 19-23.
- [7] Sauvan M. and Pijolat Ch., "Selectivity Improvement of SnO<sub>2</sub> Films by Superficial Metallic Films", *Sensors and Actuators B* 58, 1-3, 1999, 295-301.
- [8] Gopel W. and Schierbaum K. D., "SnO<sub>2</sub> 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 SnO<sub>2</sub> با حساسیت حسگرهای دو لایه‌ای ZnO/SnO<sub>2</sub> نشان داد که در شرایط ساخت و آزمون یکسان، حساسیت حسگر دولایه‌ای ZnO/SnO<sub>2</sub> به بخار اتانل ۱/۶ برابر حساسیت حسگر تک لایه SnO<sub>2</sub> 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 SnO<sub>2</sub> Gas Sensor Response to O<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> 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 SnO<sub>2</sub> 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 SnO<sub>2</sub> 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 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> Detection", Sensors and Actuators B 77, 2001, 12-15.
- [16] Park J. H., Park S.J., "Effect of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on the Electrical Properties of TiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 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 SnO<sub>2</sub> 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 MoO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> 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 SnO<sub>2</sub>, Pt-SnO<sub>2</sub> and Pd-SnO<sub>2</sub> Thin Films for LPG Detection ", *Thin Solid Films* 349, 1999, 260-265.
- [25] Aste T., Botter R. and Beruto D., "Double-layer Granular SnO<sub>2</sub> 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.