



مقایسه عملکرد حسگر گازی نانوسیمهای SnO₂ در حضور گاز مایع و بخار اتانول

مریم برزگر * و حمید هراتیزاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاريخ ثبت اوليه: ١٣٩٢/٠١/١٨، تاريخ دريافت نسخه اصلاح شده: ١٣٩٢/٠٢/٢٠، تاريخ پذيرش قطعي: ١٣٩٢/٠٣/٢٩

چکیدہ

در این مقاله، نانوسیمهای SnO₂ با قطر متفاوت به روش رسوبدهی بخار شیمیایی (CVD) بر روی زیرلایههای آلومینا، کوارتز و سیلیکون (۱۰۰) سنتز شدند. نانوساختارهای یک بعدی سنتز شده بوسیله پراش پرتو X، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف فوتولومینسانس و میکروسکوپ الکترونی عبوری مشخصهیایی شدند. از نانوسیمهای SnO₂ به عنوان لایه حساس و فعال در ساخت حسگر گاز استفاده شده است. برای ایجاد اتصال الکتریکی یک جفت الکترود طلا بر روی لایه نازک نانوسیمهای SnO₂ لایه نشانی شد. عملکرد حسگری نانوساختارهای SnO₂ سنتز شده برای دو گاز مهم و پرکاربرد گاز مایع و بخار اتانول بررسی شده است. به منظور بهینه کردن شرایط حسگری و عملکرد حسگر، حساسیت و پاسخ نانوسیمهای SnO₂ در گستره دمایی ۵۰ تا ک[°] ۳۰۰ بررسی شده و پارامترهای مهمی غلظتهای بسیار کم گاز مایع (IPG) حساسیت و پاسخ نانوسیمهای SnO₂ در گستره دمایی ۵۰ تا ک[°] ۳۰۰ بررسی شده و پارامترهای مهمی کون زمان پاسخدهی، زمان بازیافت و دمای کار برای قطعات ساخته شده بدست آمد. در دماهای باز، حسگر ساخته شده نسبت به غلظتهای بسیار کم گاز مایع (LPG) حساسیت قابل قبولی را نشان داده است. از طرف دیگر این حسگر زمان پاسخدهی و بازیاف

واژههای کلیدی: رسوبدهی بخار شیمیایی، اکسید قلع، حسگر گاز، گاز مایع، بخار اتانول.

۱– مقدمه

نیمه رساناهای اکسید فلزی یکی از مواد مهمی هستند که در حسگرهای گازی بکار برده میشوند. وقتی مولکولهای یک گاز با سطح نیمه رسانا برهمکنش میکنند، میتوانند ویژگیهای سطحی مانند هدایت و پتانسیل سطحی نیمه رساناها را تحت تاثیر قرار دهند. اولین حسگر گازی نیمه رسانای مقاومتی، توسط سیاما در سال ۱۹۶۲ساخته شد [۱]. خاصیت حسگری یکی از مهمترین و شاخته شدهترین ویژگی نانوساختارهای اکسید فلزی است. امروزه،

نشانی: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک

maryambarzegar1985@gmail.com ، پست الکترونیکی: ۰۲۷۳-۳۳۳۴۴۱۹، دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۳۴۴۱۹، sigmail.com

حسگرهای گازی نیمه رسانا به عنوان آشکارسازهای گاز در صنایع و منازل استفاده می شوند و در سیستمهای مختلف از جمله هشدار دهندههای کمبود گاز، کنترل کنندههای فرآیند و کنترل کنندههای آلودگی هوا بکار گرفته می شود. بعلاوه، حسگرهای گازی نیمه رسانا بطور موفقیت آمیزی برای آشکارسازی گازهای مختلف مانند 2H، CO2، الکل NO2، IC، PH، O2 و گاز مایع (LPG) بکار می روند [۲]. SNO2 با گاف نواری پهن و مستقیم (LPG = ۳/۶ eV) به عنوان یک نیمه رسانای نوع n یکی از مهمترین مواد استفاده شده در حسگرهای گاز

^{*} **عهدهدار مکاتبات:** مریم برزگر

محسوب می شود [۳].

در این مقاله، به ساخت حسگر گازی بر پایه نانوسیمهای SnO₂ پرداخته شده است. یکی از نانوساختارهایی که از زمان کشف نانولولههای کربنی در سال ۱۹۹۱ تاکنون توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، نانوساختارهای یک بعدی هستند [۴]. این ساختارها به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بالا و اندازه کوچک در حد طول دبی، حساسیت بسیار خوبی به فرآیندهای شیمیایی سطحى دارند. بعلاوه، محدوديت كوانتومي اندازه اين ساختارها، موجب تغییرات گاف نواری، راندمان نوری بالا و سرعت عملکرد بیشتر آنها می شود [۵]. در سالهای گذشته تکنیکهای رشد به طور نمایی افزایش یافته است. مکانیزم رشد نانوساختارها را به دو دسته متفاوت می دوان تقسیم کرد، بدون کاتالیزور و با کمک کاتالیزور، که مى توان رشد فاز محلول و بخار را از هم تميز داد. نيمه رساناها (Si ،Ge ،Si-Ge و غيره) و اکسیدهای فلری (SnO₂ ،TiO₂ و غیرہ) اغلب به صورت فاز بخار سنتز میشوند، اگر چه تکنیکهای رشد فاز محلول دارای فرآیندهای تغییریذیر و کم هزینهتری هستند [۶]. در چند سال گذشته، محققان برای سنتز نانوساختارهای یک بعدی روش های متعددی، مانند ساییدگی لیزری [۷]، انتقال بخار [٨]، سلوترمال [٩]، سد كولني (يا تونالزني تک الکترون) [۱۰]، تولید الکتروشیمیایی با کمک الگو [۱۱] و رسوبدهی بخار شیمیایی [۱۲،۱۳] را مورد مطالعه قرار دادهاند. در میان روشهای مختلف سنتز نانوساختارهای یک بعدی اکسید فلزی، روش CVD یکے از جـذابترین و کـاربردیترین روشها است [۱۴]. تکنیکهای CVD مرسوم که CVD با گرما فعال شده نامیده میشوند، از انرژی گرمایی برای فعالسازی واكنشها استفاده مي شود [۱۵،۱۶]. اگرچه واكنشهاي CVD مى توانند با منابع انرژى مختلفى انجام شوند كه اين منجر به روشهای مختلف CVD اعم از CVD با پلاسما CVD ،[۱۷] با کمک نور [۱۸] و CVD با کمک لیزر [۱۹] می شود که به ترتیب از پلاسما و نور و لیزر برای فعال سازی واکنش ها استفاده می شود. تکنیک های CVD فوايد بسياري دارند اعـم از: قابليت توليـد مـواد خـالص و بسیار چگال، تولید تکراریذیر موادی که به خوبی به

زیرلایه ها می چسبند، آهنگ رشد سریع و عناصری با اشکال پیچیده، قابلیت کنترل ساختار کریستالی، مورفولوژی سطح و جهت گیری نانوساختارها با کنترل پارامترهای فرآیند، قیمت مقرون به صرفه، تنوع بالا در به کار گرفتن پیش ماده های شیمیایی مانند هالیدها، هیدریدها، فلزهای آلی که طیف وسیعی از مواد شامل فلزها را در برمی گیرد، کاربیدها، فیترایدها، اکسیدها، سولفیدها، ترکیبهای سه-پنج و دو- شش و دماهای رشد نسبتا پایین [۲۰]. CVD به عنوان یک روش جدید در مقایسه با دیگر روش ها بسیار مفید است.

۲- فعالیتهای تجربی

حسگر ساخته شدہ یک حسگر گازی مقاومتی است کے ماده فعال آن از نانوسیمهای SnO₂ رشد داده شده بر روی زیرلایههای عایق کوارتز تشکیل شده است. جهت سنتز این مواد از یک کوره الکتریکی دو ناحیهای تحت اتمسفر گازهای خاص به روش CVD استفاده شده است. فرآیند CVD به پارامترهای فرآیند مثل دمای زیرلایه (T_s)، دمای ماده (T_P)، اندازه ذرات کاتالیزور بستگی دارد بطوریکه این یارامترها بر مورفولوژی، ترکیب و ابعاد نانوساختارها تاثیر مستقیم دارند. برای رسیدن به نتایج تکرارپذیر، بدست آوردن شرایط بهینه برای پارامترهای فرآیند رشد بسیار مهم است. اگر چه هر آزمایش CVD حداقل ۱۲۰ دقیقه زمان نیاز دارد، اما بدست آوردن شرایط بهینه برای پارامترهای دخیل، به صورت آزمون و خطا بررسی می شود. بنابراین تشخیص و رسیدن به شرایط بهینه یارامترهای فرآیند برای رشد نانوساختارها هـدفی بـزرگ و مهم است. در این مطالعه با مروری بر نتایج دیگر محققان، شرایط بهینه سنتز به شرح زیر در نظر گرفته شده است [۲۱]. فرآیند سنتز نانوسیمهای SnO₂ در یک لوله کوارتز که درون کوره الکتریکی قرار داشت، انجام شد. ابتدا لوله کوارتز بوسیله یک پمپ روتاری تا فشار ۵ mtorr خلا شد، پس از آن دمای کوره تا دمای ^C° ۱۰۵۰ با آهنگ V/۵ °C/min افزایش یافت و به مدت ۱۲۰ دقیقه در طول فرآیند سنتز نانوساختارها در این دما ثابت نگه داشته شد. در این فرآیند از ترکیب پودر قلع و پودر کربن به عنوان



کاتالیست با نسبت ۱ به ۱ درون بوته کوارتز استفاده شد و گازهای آرگون و اکسیژن به ترتیب به عنوان گاز حامل و فعال مورد استفاده قرار گرفت. زیرلایه های از جنس های مختلف مانند کوارتز، آلومینا و سیلیکون (۱۰۰) برای رشد نانوساختارها در فاصله های مختلف بین ۶ تا ۱۰ cm از بوته حاوی مواد اولیه قرار داده شدند (شکل ۱).



شکل ۱: a) سیستم CVD بکار برده شده در این تحقیق که شامل کوره دو ناحیهای و پمپ روتاری میباشد و b) تصویر شماتیک از مکان زیرلایههای کوارتز، آلومینا و سیلیکون درون کوره الکتریکی.

بررسی نانوساختارهای SnO₂، توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل (RR-TEM, JEOL2100F)، میکروسکوپ الکترونی عسوری مدل میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی مدل (Bruker AXS)، XRD مدل (FESEM, Hitachis-4160) و فوتولومینسانس مدل (FESEM, Hitachis-4160) صورت گرفت. اندازه گیریهای حسگری در یک راکتور تست گازی شامل یک محفظه تفلونی مجهز به یک هیتر قابل کنترل شامل یک محفظه تفلونی مجهز به یک هیتر قابل کنترل نامل یک محفظه تفلونی مجهز به یک هیتر قابل کنترل دمایی با دقت بالا و یک مولتیمتر متصل به کامپیوتر لایهنشانی یک جفت الکترود طلا بر روی نانوساختارهای SnO₂ میسر شد. مساحت نمونه می ۱×۱ در نظر گرفته شد (شکل ۲۵). حسگری نمونههای سنتز شده در حضور دو گاز بخار اتانول و گاز LPG در دماهای مختلف اندازه گیری شد.





شکل a :۲) راکتور تست گازی و b) طرح شماتیک نمونه تهیه شده.

۳- نتايج و بحث

۳–۱– آنالیز ساختاری

شکل ۳ تصاویر FE-SEM نانوسیمهای سنتز شده روی زیرلایههای مختلف را نشان میدهد. تمام نمونهها در شرایط یکسانی سنتز شدهاند و پارامترهای متغیر در سنتز آنها فقط جنس زيرلايه و مكان زيرلايه نسبت به بوته حاوى مواد اوليه بوده است (شكل ١b). تفاوت مورفولوژى نانوساختارهای سنتز شده روی هر یک از زیرلایهها را می توان به تفاوت ساختار کریستالی ماده زیر لایه نسبت داد. از آنجایی که نانوساختارهای SnO₂ به صورت لایه تک اتمی بر روی زیرلایه ها رشد می یابند، در نتیجه اتم های زيرلايه مانند مكانهاى جوانهزنى براى نانوساختارها عمل میکنند و با توجه به تفاوت ثابت شبکه، ساختار کریستالی و پیوند بین اتمهای زیرلایه، مورفولوژی نانوساختارها بر روی هر زیرلایه متفاوت خواهد بود. شکل ۳b نانوسیمهای نوعی با قطر میانگین nm و طولی در حدود چند ده میکرومتر بر روی زیرلایه سیلیکون (۱۰۰) با پوشش طلا را نشان میدهد. نانوسیمهای این نمونه به روش VLS شکل گرفتهاند و اتمهای طلا نقش عوامل جوانهزا را ایف





شکل ۳: تصاویر SEM مربوط به نانوسیمهای SnO₂ سنتز شده روی زیرلایههای، a) کوارتز، b) سیلیکون (۱۰۰) با پوشش طلا، c) آلومینا، e ،d و f) تصاویر بزرگنمایی شده از نمونههای قبلی هستند.

نقص شبکه در صفحات بلوری نانوسیمهای سنتز شده مشاهده نمی شود. الگوی پراش XRD که زوایای پراش ۱۰ تا ۷۰ درجه را در بر می گیرد، پرتودهی توسط پرتو Cu-Ka با طول موج ۸ ۱/۵۴۰۶ انجام شده است. الگوی پراش نشان داد که نانوسیمهای SnO دارای ساختار پراش نشان داد که نانوسیمهای SnO دارای ساختار قلهای که حاکی از ناخالصی باشد دیده نمی شود. قلههای قلهای که حاکی از ناخالصی باشد دیده نمی شود. قله های تیز و پرشدت در طیف XRD نمونه ها بیانگر میزان بالای کریستالی شدن نانوساختارهای SnO سنتز شده بوده و کردند. قطر متوسط نانوسیمهای رشد داده شده به روی زیرلایه کوارتز کمی بیشتر از نمونههای قبلی میباشد (شـکل ۴۵). در شـکل ۴۵ کـه تصـویر HR-TEM نانوسیمهای SnO₂ سنتز شده بر روی زیرلایه کوارتز را نشان میدهد، فاصله صفحات بلوری به وضوح قابل مشاهده میباشد و این فاصله برای یک نانوسیم انتخابی که در تصویر نشان داده شده است در حدود nm ۱/۳ nm در تصویر ۴ تاییدی بر ساختار تـک کریستالی و یکنواخت نانوسیمهای SnO₂ است و هیچگونه دررفتگی و



ساختار تک بلوری نشان داده شده در تصویر HR-TEM شکل ۴ را تصدیق میکند.



شکل ۴: تصاویر HR-TEM از نانوسیمهای SnO₂ سنتز شده بر روی زیرلایه کوارتز، a) نانوسیمها با قطر یکنواخت و b) فاصله صفحات بلوری یکی از نانوسیمهای انتخابی.

(b)



شکل ۵ تشکیل ساختار کریستالی SnO₂ نانوسیمهای نوعی سنتز شده بر روی زیرلایه SiO₂ را تصدیق میکند [۲۲]. گزارشهای زیادی در مورد طیف فوتولومینسانس SnO₂ با

مورفولوژیهای متفاوت در مقالات وجود دارد [۲۳].



اهمیت نقش تهی جاهای اکسیژن در گسیل لومینسانس و خواص حسگری گاز اکسید قلع به خـوبی پذیرفتـه شـده است. شکل ۶ طیف فوتولومینسانس نمونـه نانوسـیمهای SnO₂ در دمای اتاق را نشان میدهد. وجود یک پیک قوی در طول موج ۸۸۰ را میتوان به تهی جاهای اکسـیژن که از نقصهای موجـود در اکسـیدهای فلـزی بـه حسـاب میآیند نسبت داد [۲۴] و پیک دیگـر در ناحیـه آبی و بین حالتهای الکترونیکی تهی جاهـای اکسـیژن و دیگـر نقصهای شبکه (مانند تهی جاهـا یـا اتـمهـای قلـع درون شبکهای) میباشد [۲۵].

نمونههای تهیه شده در دماهای مختلفی از دمای اتاق تا ° ۳۰۰ بکار گرفته شدند. قبل از اندازه گیری حسگری، برای جلوگیری از اثر رطوبت هوا، حسگرها به مدت ۱۰ دقیقه در جریان گاز خالص نیتروژن با درجه خلوص /۹۹/۹۹۹۹ با شار Lit/h قرار گرفتند تا مقاومت آنها به پایداری برسد. سپس در هر دمای تنظیم شده، گاز مایع یا بخار اتانول به مدت ۵ دقیقه وارد راکتور حسگری شد. شکل ۷۵ پاسخ حسگر ساخته شده در دمای ۲۵ برای غلظتهای مختلف گاز LPG را نشان میدهد. همانطور که





کار بهینه حسگر، پاسخ آن در دماهای مختلف از ۵۰ تا ۳۰۰ ۰°C بررسی شده است.

در تمام دماها حساسیت حسگر به طور خطی با افزایش غلظت گاز LPG افزایش یافته است. دمای کار به وضوح بر پاسخ حسگر اثرگذار است. نمودار پاسخ حسگر به گاز مایع بر حسب دما یک قله در دمای C° ۲۵۰ نشان میدهد با حساسیت ماکزیمم ۱۵/۵ که در مقایسه با گزارشهای قبلی بسیار چشمگیر است [۲۶،۲۷]. شکل ۷۵ نشان میدهد که با ۳ برابر شدن غلظت گاز مایع، حساسیت حسگر ۱۶۰٪ افزایش مییابد.

در اینجا زمان پاسخدهی (زمان بازیافت) معمولا بصورت مدت زمانی که نیاز است تا تغییرات مقاومت قطعه از ۱۰٪ (۹۰٪) به ۹۰٪ (۱۰۰٪) مقدار تعادلی خود در حضور گاز اکسید کننده (احیا کننده) برسد، تعریف میشود [۲۸].

شکل ۸ چگونگی پاسخ حسگر گازی به گاز مایع و بازیافت آن را نشان میدهد. ملاحظه میشود که زمان پاسخ دهی و بازیافت به ترتیب ۹۰ و ۱۶۰ ثانیه با حساسیت ماکزیمم ۱۵/۵ میباشد که نتیجه با ارزشی است.



مکانیزم حسگری نانوسیمهای SnO₂ را میتوان با انتقال سطحی الکترون از تهی جاهای اکسیژن و یا مولکولهای گازی جذب شده به عنوان دهنده یا پذیرندههای الکترون توضیح داد. زمانیکه اکسیدهای فلزی در مجاورت هوا قرار میگیرند اکسیژن روی سطح آنها جذب میشود. جذب اکسیژن موجود در اتمسفر روی سطح حسگر، گونههای یونی ²O و ⁻O تشکیل میدهد که از نوار هدایت الکترون میگیرد. سینتیک واکنش به صورت زیر است [۲۹]:

$$O_2 (gas) \rightarrow O_2 (ads)$$
 (1)

 $O_2 (ads) + e^- \rightarrow O^{2-} (ads)$ (7)

$$O^{-}(ads) + e^{-} \rightarrow 2O^{-}(ads)$$
 (°)

در دماهای بالا اکسیژن جذب شده (^{CO}) و رطوبت (OH) الکترونهای نوار هدایت را روی سطح SnO₂ به دام میاندازند. دو واکنش بین گاز هدف و سطح SnO₂ وجود دارد که باعث کاهش مقاومت SnO₂ میشود. ابتدا، مولکولهای گاز در دمای کار روی سطح SnO جذب



شیمیایی میشوند، سپس گونههای اکسیژن جـذب شـده (-²O) گاز هدف را اکسید میکنند و باعث انتقـال الکتـرون از مولکـولهـای گـاز بـه -²O مـیشـوند. بنـابراین اکثـر الکترونهای به دام افتاده توسط -²O بـه سـطح SnO بـاز میگردنند که باعث افزایش هدایت الکتریکی حسـگرهای میگردنند که باعث افزایش هدایت الکتریکی حسـگرهای مقاومت نمونهها به محض مرهمکنش گـاز IPG بـا سـطح مسگر کاهش مییابد. مولکـولهـای هیـدروکربن معمـولا قبل از واکنش با اکسیژن جذب شـده شکسـته میشـوند. سپس مولکولهای شکسته شـده بـر روی سـطح حسـاس SnO2 برهمکنش میکنند. تمـام واکـنشهـای انجـام شـده بـین مولکولهای IPG و اکسیژن جذب سطحی شده به صورت زیر توضیح داده میشود:

$$C_n H_{2n+2} + 2O \leftrightarrow H_2O + C_n H_{2n} - O + e^-$$
 (*)

Γ

با نگاهی به واکنشها به نظر میرسد که گاز LPG به طـور کامل اکسید نمیشود و احتمالا واکنش زیر اتفاق میافتـد [۳۱]:

$$C_4H_{10} + 2O^- \rightarrow C_4H_8 - O + H_2O + 2e^-$$
 (Δ)

بعد از خروج گونههای احیا کننده (گاز LPG) یا ورود گاز نیتروژن به راکتور حسگر، عکس مکانیزم بالا اتفاق میافتد و هدایت الکتریکی به حالت اولیه خود باز میگردد.

۳-۲-۲- بخار اتانول

دقت آشکارسازی بخار الکل یکی دیگر از جنبههای مهم تجاریسازی یک حسگر است. مهمترین کاربرد معمول حسگرهای الکل تشخیص میزان بخار الکل موجود در وابسته است. حسگرهای گازی بر اساس نیمه رساناهای اکسید فلز برای تشخیص بخار الکل بسیار مفید واقع شدهاند. SnO2 یک نیمه رسانای نوع n است که نقایص اکسیژن دارد. اکسیژن شبکه به شکل گاز تبخیر می شود که تهی جای اکسیژن دوبار یونیزه و الکترون تولید

می کند. این الکترونها در رسانش نقش بازی می کنند. اگر اکسید قلیع در دمیای C^o ۲۰۰-۳۰۰ گیرم شیود، اکسیژنهای اتمسفر بر روی سطح SnO₂ جذب می شوند. چون الکترون مربوط به سطح کریستال است سطح اکسید قلع به یک لایه تخلیه الکترون تبدیل می شود و این به معنی تشکیل سد پتانسیل نزدیک مرزدانهها است. شکل ۹۵ پاسخ حسگر به بخار اتانول در دمای کار بهینه محینین می توان دریافت که با ۳ برابر شدن غلظت بخار اتانول، حساسیت حسگر به شدت و تا ۱۱۰٪ افزایش می یابد. زمان پاسخدهی و بازیافت حسگر در شکل ط۹ به ترتیب ۲۰ و ۹۰ ثانیه بدست آمده است.





برهمکنش بین گونههای گاز احیا کننده با اکسیژن جـذب شیمیایی شده، موجب آزاد شدن الکترونهای به دام افتاده

شده، بنابراین باعث افزایش چگالی حاملهای الکترونی در لایههای حساس SnO2 می شود. این افزایش چگالی الکترونها در نوار هدایت لایههای SnO2 باعث کاهش مقاومت حسگر در حضور گاز احیا کننده می شود. گونههای اکسیژن با اتانول واکنشهای پیچیدهای انجام می دهند که در زیر آورده شده است [۳۱]:

$$C_2H_5OH + 6O^- \rightarrow 3H_2O + 2CO_2 + 6e^-$$
 (7)

$$C_4H_{10} + 13O^- \rightarrow 5H_2O + 4CO_2 + 13e^-$$
 (V)

این واکنش ها تنها در حالتی که گازها بطور کامل روی سطح اکسید شوند اتفاق می افتد. با مقایسه عملکرد حسگر برای هر دو گاز مایع و بخار اتانول از نمودارهای ۸ و ۹۵، می توان دید علت اینکه نمودار پاسخ حسگر به گاز مایع پهن تر شده است، به طولانی تر بودن زمان پاسخدهی و بازیافت حسگر برای گاز مایع نسبت به بخار اتانول است. همانطور که در شکل ۹۵ می توان دید، هنگامی که زمان پاسخ دهی حسگر کاهش می یابد به این معنی است که حسگر سریع تر به حالت اشباع می رسد و نمودار پاسخ حسگر به شکل یک خط اشباع می رسد و نمودار پاسخ حسگر به شکل یک خط راست در مقدار ماکزیمم حساسیت خود در می آید.

۳–۳–گزینشگری گاز گزینشگری به عنوان توانایی حسگر در تشخیص یک گاز در میان گازهای دیگر است. گزینشگری حسگر میتواند به صورت مقایسه حساسیت برای هر گاز مورد مطالعه، تعیین شود [۳۱]. رابطه ۸ گزینشگری گاز حسگر را برای یک گاز مورد مطالعه نشان میدهد که (a) مربوط به گاز مورد مطالعه دیگر و (d) مربوط به گاز هدف می باشد.

Selectivity (Sg)=Sensitivity_{Gas (a)}/Sensitivity_{Gas (b)} (λ)

گزینشگری نیز تابع دمای کار حسگر میباشد بطوریکه نانوسیمهای SNO₂ در دمای C^o ۲۵۰ حساسیت بیشتری به ۱۰۰۰ ppm گاز مایع نشان میدهد تا به ۲۰۰۰ ppm بخار اتانول در دمای C^o ۲۰۰۰، که به معنی تشخیص گاز



۴- نتیجهگیری

نانوساختارهای SnO₂ برای کاربرد حسگری گاز به صورت موفقیت آمیزی به روش CVD در یک کوره الکتریکی تحت خلا سنتز شدند. آنالیز ساختاری نمونههای سنتز شده با SEM و TEM و TEM، تشكيل نانوسيم هاى SnO2 با کیفیت ساختاری و بلوری مناسب را تصدیق میکنند. نتایج حسیگری گاز LPG و بخار اتانول دستاورد چشمگیری را نشان میدهد به نحوی که زمان پاسخدهی و بازیافت بخار اتانول به ترتیب کمتر از ۲۰ و ۹۰ ثانیه بدست آمد که نشان میدهد نانوسیمهای SnO₂ کاندیدای مناسبی برای ساخت یک حسگر با حساسیت خوب و سرعت عمل بالاست. حساسیت بهینه حسگر گازی نانوسیمهای SnO₂ در دمای ۲۵۰ و ^C ۲۰۰ برای گاز مایع و بخار اتانول بدست آمد. باید در نظر داشت که حساسیت خوب حسگر گازی ساخته شده از نانوسیمهای SnO₂ در تشخیص گاز مایع و نیز کوتاهی زمان پاسخدهی و بازیافت در تشخیص بخار اتانول از نتایج با ارزش این تحقیق است که برای کاربردهای صنعتی میتواند مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری مولفین از علی معافی از دانشگاه RMIT استرالیا به خـاطر تهیه تصاویر HR-TEM سپاسگزاری میکنند.

مراجع

- [1] T. Seiyama, A. Kato, K. Fulishi, M. Nagatani, *Anal. Chem.*, **34**, 1962, 1502.
- [2] K.J. Choi, H. Won Jang, Sensors, 10, 2010, 4083.
- [3] T.Y. Wei, P.H. Yeh, S.Y. Lu, Z.L. Wang, J. Am. Chem. Soc., 131, 2009, 17690.
- [4] J.X. Wang, D.F. Liu, X.Q. Yan, H.J. Yuan, L.J. Ci, Z.P. Zhou, Y. Gao, L. Song, L.F. Liu, W.Y. Zhou, G. Wang, S.S. Xie. *Solid State Communications*, **130**, 2004, 89.
- [5] C.N. Rao, F.L. Deepak, G. Gundiah, A. Govindaraj, Prog. Solid State Chem., 31, 2003, 5.
- [6] J.G. Lu, P. Chang, *Mater. Sci. Eng. R*, **52**, 2006, 49.
- [7] A.M. Morales, C.M. Lieber, Science, 279, 1998, 208.
- [8] Y. Wu, P.D. Yang, Chem. Mater., **12**, 2000, 605.
- [9] J.R. Heath, F.K. Legoues, *Chem. Phys. Lett.*, **208**, 1993, 263.



- [21] L.V. Thong, L.T. Loan, N.V. Hieu, Sens. Actuators B, 150, 2010, 112.
- [22] S. Luo, J. Fan, W. Liu, M. Zhang, Z. Song, C. Lin, X. Wu, P. Chu, *Nanotechnology*, **17**, 2006, 1695.
- [23] H.T. Chen, S.J. Xiong, X.L. Wu, J. Zhu, J.C. Shen, Nanoletters, 9, 2009, 1926.
- [24] P. Mitra, S. Mondal, Bull. Pol. Ac. Tech, 56, 2008, 295.
- [25] D. Haridas, A. Chowdhuri, K. Sreenivas, V. Gupta1, Int.
- J. Smart Sensing and Intelligent Systems, 2, 2009, 503.
- [26] J. Huang, Q. Wan, Sensors, 9, 2009, 9903.
- [27] B. Adamowicz, W. Izydorczyk, J. Izydorczyk, A. Klimasek, W. Jakubik, J. Zywicki, *Vacuum*, **82**, 2008, 966.
- [28] J. Hongjun, L. Xiaoheng, W. Xin, Y. Xujie, L. Lude, G.
- Xiutao, L. Yonghong, J. Phys.: Conf. Series, 152, 2009, 120.
- [29] M. Penza, C. Martucci, G. Cassano, *Sens. Actuators B*, **50**, 1998, 52.
- [30] D.N. Suryawanshi, D.R. Patil, L.A. Patil, *Sens. Actuators B*, **134**, 2008, 579.
- [31] N. Yamazoe, G. Sakai, K. Shimanoe, *Catal. Surv. Asia*, 7, 2003, 63.

- [10] K.K. Likharev, T. Claeson, Sci. Am., 80, 1992, 1.
- [11] C. Schonenberger, B.M. Van der Zande, L.G. Fokkink, M. Henny, C. Schmid, M. Kruger, A. Bachtold, R. Huber, H. Birk,
- U. Staufer, J. Phys. Chem. B, 101, 1997, 5497.
 [12] H. Adhikari, A.F. Marshall, C.E. Chidsey, P.C. Mcintyre,
- Nano Lett., **6**, 2006, 318.
- [13] S. Kodambaka, J. Tersoff, M.C. Reuter, F.M. Ross, *Science*, **316**, 2007, 729.
- [14] W.A. Bryant, J. Electrochem. Soc., 125, 1978, 1534.
- [15] J.D. Buckley, Am. Ceram. Soc. Bull., 67, 1988, 364.
- [16] A. Kumar, W.R. Taube, R. Sarvanan, P.B. Agarwal, P. Kothari, D. Kumar, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, **1**, 2012, 111.
- [17] K.L. Choy, Progress in Materials Science, 48, 2003, 57.
- [17] R.E. Choy, Progress in Materials Selence, 40, 2005, 57.
 [18] X. Jiang, C. Liu, F. Lin, J. Mater. Sci. Technol., 23, 2007,
- 449
- [19] S. Mathur, S. Barth, H. Shen, J.C. Pyun, U. Werner, *Small*, **1**, 2005, 713.
- [20] Y.J. Choi, I.S. Hwang, J.G. Park, K.J. Choi, J.H. Park, J.H. Lee, *Nanotechnology*, **19**, 2008, 095508.

