

## طراحی و ساخت سنسور نیمه هادی لایه نازک برای تشخیص گاز

سید خطیب الاسلام صدر نژاد (استاد)

محمد رضا واعظی (دانشجوی دکترا)

### چکیده

جذب گاز بر سطح حسگر نیمه هادی باعث تغییر مقاومت الکتریکی و اختلاف ولتاژ قابل اندازه گیری می شود. جنس، ضخامت، مورفولوژی، تخلخل، اندازه دانه و نقايس ساختاری بر میزان حساسیت، توان انتخاب، پایداری شیمیایی، عمر مفید و عملکرد حسگرهای گازی تاثیر دارند. سرعت پاسخگویی عامل مهمی است که با نازک شدن لایه، افزایش تخلخل و چگال تر شدن گاز، بهبود می یابد. عیب اصلی حسگرهای لایه نازک کوچکی قدرت انتخاب، کندی پاسخگویی و ناپایداری آنها است. با افزودن آلینده و نشاندن کاتالیزور، این ضعفها را می توان جبران کرد. در این تحقیق لایه های نازک از جنس اکسیدهای فلزاتی همچون روی و قلع طبق یک روش ابتکاری دو مرحله ای شیمیایی تولید شده است. نحوه بوجود آمدن سطح برخورد بزرگ از طریق کنترل میزان تخلخل به منظور افزایش توان حسگری بررسی شده و آنatomی حسگرهای لایه نازک منفرد، زوج و چند لایه ای ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** اکسید روی، اکسید قلع، نیمه هادی، لایه نازک، گاز، آلینده، حسگر

### مقدمه

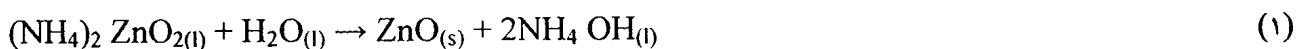
کاربردهای بالقوه اکسیدهای فلزی همچون اکسید روی و اکسید قلع در ساخت حسگرهای گازی، سولولهای خورشیدی، مبدلها پیزوالکتریک و لرزاننده های ماوراء فرکانس صوت همراه با خواص نوری، الکتریکی و پیزوالکتریکی جالب سبب توسعه تحقیق درباره این مواد در سالهای اخیر شده است [۱]. این مواد همچنین از مزیت نسبی پایداری شیمیایی و مکانیکی برخوردار بوده و به طور روز افزونی مورد توجه قرار گرفته اند. یک کاربرد مهم این مواد، استفاده در ساخت حسگرهای گازی است [۱۲-۲] تولید لایه نازک این مواد به روشهای گوناگون همچون لایه نشانی بخار، اسپاترینگ، پرس و زینتر کردن پودر، هیدرولیز ترکیبات کلریدی و لایه نشانی الکتروفورتیکی میسر است. لایه های اکسید فلزی را می توان از طریق سل ژل، غوطه وری شیمیایی، پرولیز حرارتی، تبخیر و نشاندن فیزیکی بخار، اسپاترینگ مغناطیسی، نشاندن شیمیائی بخار و روشهای کلوئیدی تولید کرد [۱۶-۱۳]. روش شیمیایی هیدرولیز به مناسبت هزینه نسبتاً کم، امکان کار در دماهای معمولی، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، سهولت دسترسی، عدم ایجاد آلودگی فراوان محیطی و سادگی کنترل عوامل موثر، به شدت مورد توجه قرار گرفته و در حال گسترش است. امکان جوانه زنی و رشد یکنواخت و ایجاد ترکیب شیمیایی همگن از مزیتهای روش اخیر است.



سل ژل یک روش شیمیایی متداول دارای مزیت های فراوان نسبت به سایر روشها است. از این روش می توان لایه های بسیار نازک ساخت. برای ساخت لایه اکسید قلع در این تحقیق از روش سل ژل استفاده شد. برای تولید لایه اکسید روی از یک روش ابتکاری جدید بنام روش شیمیایی دو مرحله ای مشتمل بر غوطه وری در محلول حاوی کمپلکس  $\text{ZnO}_2(\text{NH}_4)_2$  و سپس غوطه وری در آب جوش نیز در این تحقیق استفاده شد [۱۷، ۱۸]. حسگرهای اکسید روی و اکسید قلع به سبب دمای کاری پائین و حساسیت نسبتاً بالا مورد تحقیق قرار گرفتند [۱۹]. اکسید قلع، یک نیمه هادی نوع n است. جاهای خالی اکسیژن در این ماده به عنوان "دهنه" عمل می کنند. سرعت پاسخگویی اکسید قلع تحت تاثیر اندازه دانه، مورفولوژی سطح و تخلخل داخلی بوده و بدین ترتیب می تواند بهینه سازی شود. با توجه به روابط سینتیک شیمیایی و انتقال، انرژی تحریک و فاکتور فرکانس فرایند لایه نشانی از طریق تلفیق داده های تجربی با روابط سینتیکی تحقیق شد [۲۰، ۲۱]. حسگرهای دو لایه نازک نظیر  $\text{SnO}_2\text{-PdO}$  به سبب خاصیت جذب گاز بالا و قدرت انتخاب برتر کارآیی مناسبی داشته و مورد تحقیق قرار گرفت.

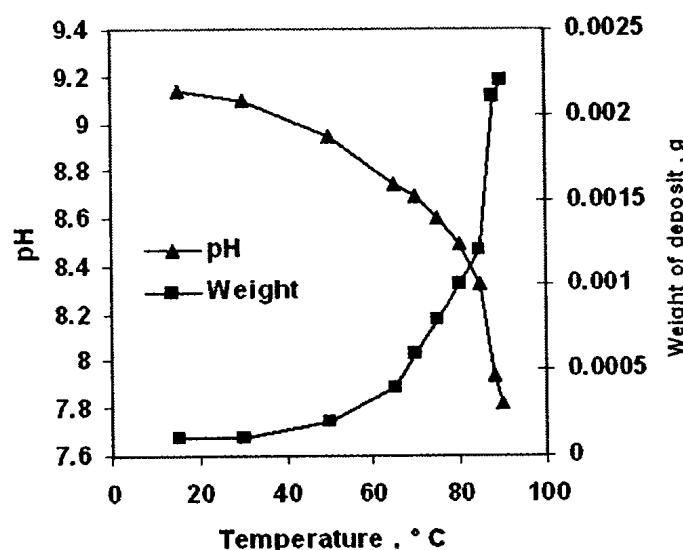
## روش تحقیق

آزمایشها برای تعیین دمای تعادلی واکنش تشکیل لایه اکسید روی (معادله ۱) از طریق اندازه گیری تغییر pH محلول و وزن رسوب بر حسب دما انجام شد:



با پیشرفت واکنش  $\text{NH}_4 \text{OH}$  تشکیل می شود. لذا درجه قلیایی بودن محلول با انجام واکنش بیشتر می شود. افزایش وزن رسوب، سرعت بیشتر واکنش را نشان می دهد. نتیجه آزمایشها به صورت شکل ۱ است. همانطور که دیده می شود، سرعت واکنش در همه دمای مخالف صفر است. اما، مطابق شکل، این سرعت در دمای های کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد به سمت صفر میل می کند. بنابراین دمای تعادل مساوی و پا پایین تر از ۲۰ درجه سانتیگراد است.

برای نشاندن پوشش اکسید روی و اکسید قلع و دوپینگ با سایر عناصر، سه نوع زیر لایه شیشه ای نوع کوارتز، نوع سودا لایم و نوع تیغه آلومینی دارای خلوص بالا بکار گرفته شد. سینتیک رشد لایه نازک و تعیین مکانیزم و مراحل کنترل کننده



شکل ۱ - دیاگرام تغییرات درجه قلیایی بودن و وزن رسوب بر حسب دما.



سرعت و میزان اثر بخشی هر یک به تفصیل بررسی شد. چند نمونه لایه نازک از جنس اکسید روی و اکسید قلع بدون آلاینده و دارای آلاینده پالادیوم برای استفاده در طراحی و ساخت سنسور حساس به گاز ساخته شد.

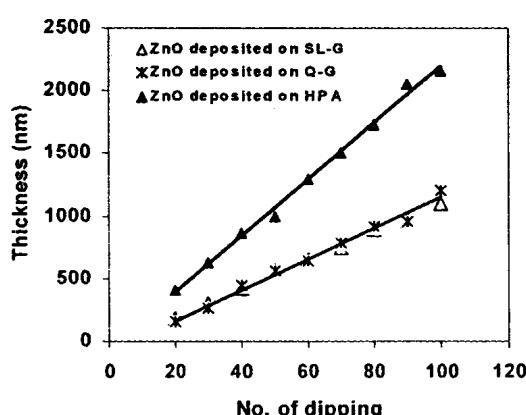
برای ساخت لایه نازک اکسید روی محلول غلیظ آمونیاک به ۱۰۰ سی سی از محلول کلرید روی با غلظت ۰/۵ مولار اضافه شد تا رسوب سفید رنگ  $Zn(OH)_2$  تشکیل شود. پس از آن محلول فوق با افزودن آب یون زدایی شده و برای بدست آوردن محلول کمپلکس دارای  $Zn^{+2}$  تا غلظت ۱/۰ مولار رقیق شد. تیغه ها ابتدا در محلول فوق غوطه ور شده و سپس در آب جوش به مدت ۲ ثانیه وارد شدند.

برای ساخت لایه اکسید قلع از روش سل ژل استفاده شد. به آلکوکسید قلع با فرمول شیمیایی  $\gamma(OC_3H_7)_xSnCl_x$  مقادیر مناسبی آب مقطر و پروپانول اضافه شد. سپس مخلوط در حدود ۱ ساعت در دمای اتاق بوسیله همز مغناطیسی هم زده شد تا یکنواخت شود. تیغه های زیر لایه پس از عملیات آماده سازی سطحی شامل شستشو با آب مقطر و استن در اتوکلاو خشک شدند. عملیات پوشش دهنده بر روی تیغه ها از طریق غوطه ور کردن آنها در محلول حاوی آلکوکسید قلع انجام گردید. عملیات خشک کردن نمونه ها در دمای ۱۱۰°C به مدت ۰/۵ ساعت انجام شد. برای استحکام بخشی به نمونه ها، عملیات پخت در دمای ۶۰۰°C انجام گزید.

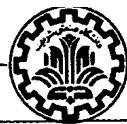
به منظور بهبود حساسیت و انتخاب حسگرهای ساخته شده از اکسید قلع، عملیات آلایش با استفاده از کلوروپالادیم انجام شد. بدین منظور محلول سل تهیه شده دارای ۹۵%  $PdO$ -۵%  $SnO_2$  با مقدار مناسبی بوتائل رقیق شده و سپس مقدار مشخصی کلوروپالادیم به آن اضافه شد. سل تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت با همز مغناطیسی هم زده شد. نمونه ها سپس به روش غوطه وری تهیه شدند. ملاحظه شد که ضخامت لایه ها به شدت تابع تعداد دفعات غوطه وری و اختلاف دمای مایع و تیغه نگهدارنده است (شکل ۲). برای بهبود روش ساخت و خواص لایه به دست آمده خصوصیات کریستالی و مورفولوژی ترکیب حاصل با استفاده از شیوه های SEM، XRD و EDAX بررسی شد.

### ترمودینامیک و سینتیک رشد لایه نازک

شرایط تشکیل و میزان رشد لایه نازک حساس به گاز از طریق اندازه گیری های ترمودینامیکی میسر است. اندازه گیری ها نشان داد که سرعت رشد در همه دمایا مخالف صفر است. کیتیک رشد لایه طبق واکنش ۱ و با فرض درجه ۲/۱ مودله سرعت



شکل ۲ - تأثیر تعداد دفعات غوطه وری بر ضخامت لایه اکسید روی نشانده شده بر سطح سه نوع زیر لایه مختلف.



به قرار زیر است:

$$-\frac{dC}{dt} = k C^n \quad n = 0 \quad (2)$$

سرعت رشد بر اساس انتالپی واکنش و موازنۀ حرارتی در جبهه واکنش برای تشکیل جوانه و رشد از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\dot{q}}{\Delta H_G \cdot \rho} M_{ZnO} = \frac{h \Delta T_1}{\Delta H_G \cdot \rho} M_{ZnO} \quad (3)$$

تعریف دما براساس متوسط دمای مایع و کمپلکس در حال تشکیل:

$$T = \frac{T_{H_2O} M_{H_2O} + T_{Complex} M_{Complex}}{M_{H_2O} + M_{Complex}} \quad (4)$$

فرکانس پیوستن مولکولها از کمپلکس به لایه اکسید از رابطه ۵ و فرکانس خالص رشد لایه از رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$\omega_1 = \omega_0 \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\omega_G = \omega_1 - \omega_2 = \omega_0 \left[ \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-Q_2}{RT}\right) \right] \quad (6)$$

با جایگزینی تغییر انرژی آزاد با تفاوت انرژی‌های کینتیکی رفت و برگشت فرایند، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\omega_G = \omega_0 \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) [1 - \exp\left(\frac{\Delta G_G}{RT}\right)] \quad (7)$$

با استفاده از روابط معمول ترمودینامیکی، چنین نتیجه می‌شود که:

$$\Delta G_G = \Delta H_G - T \Delta S_G \approx \Delta H_G - T \frac{\Delta H_G}{T_{DP}} = \Delta H_G \cdot \frac{\Delta T_2}{T_{DP}} \quad (8)$$

در رابطه فوق کمیات  $\Delta H_G$ ،  $\Delta G_G$  و  $\Delta S_G$  عبارتند از تغییر انرژی آزاد، انتالپی و انتروپی رسوب لایه. اختلاف دمای کمپلکس حاوی روی و زیر لایه جامد با  $\Delta T_2$  و دمای تعادلی رسوب گذاری با  $T_{DP}$  نمایش داده شده است. این دما مقدار ثابتی داشته و از طریق تجربی تعیین می‌شود. با استفاده از روابط ۷ و ۸ فوق نتیجه می‌شود:

$$\omega_G = \omega_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{\Delta H_G \cdot \Delta T_2}{R \cdot T_{DP}^2}\right) \right] \quad (9)$$

با این فرض که تمام محل‌های فصل مشترک برای رشد مناسب باشند، سرعت رشد پیوسته  $V_G$  برابر  $d_m \cdot \omega_G$  است که در آن  $d_m$  فاصله‌ای از فصل مشترک است که با پیوستن یک مولکول پیش می‌رود. بنابراین خواهیم داشت:

$$V_G = d_m \cdot \omega_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{\Delta H_G \cdot \Delta T_2}{R \cdot T_{DP}^2}\right) \right] \quad (10)$$

رابطه فرکانس پرش با ضریب نفوذ مولکولی از طریق رابطه زیر معین می‌شود:

$$\omega = \frac{6D}{d_m^2} \quad (11)$$

فرکانس برخورد اتمها با فصل مشترک یک ششم فرکانس پرش آنهاست. بنابراین:

$$\omega_1 = \frac{D_1}{d_m^2} \quad (12)$$

$D_1$  ضریب نفوذ متوسط جزء رسوب کننده به داخل لایه اکسید است. با جایگزاری معادله ۱۲ در ۱۰ نتیجه می‌شود:



$$V_G = \frac{D_1}{d_m} \left[ 1 - \exp \left( \frac{\Delta H_G \cdot \Delta T_2}{R T_{DP}^2} \right) \right] \quad (13)$$

سرعت رشد لایه نازک ایجاد شده روی زیر لایه سودا لایم طبق رابطه ۱۳ و معادله سرعت رشد لایه به قرار زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta H_G \cdot \rho}{h} + \frac{d_m R T_{DP}^2}{D_1 \cdot \Delta H_G}} = U \cdot \Delta T \quad (14)$$

ضریب سرعت رشد کل با  $U$  و  $\Delta T$  تفاوت دمای آب داغ و زیر لایه است. معادله آرنیوس به قرار زیر نوشته می‌شود:

$$U = U_0 \exp \left( -\frac{Q}{RT} \right) \quad (15)$$

نتیجه به قرار زیر است:

$$Q = 17.20 \pm 0.42 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (16)$$

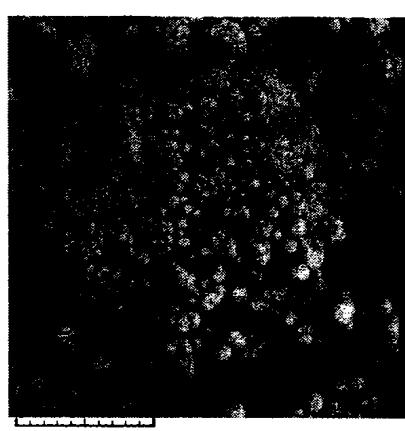
$$U_0 = 2.81 \pm 0.07 \text{ } \mu\text{m.s}^{-1} \quad (17)$$

ملحوظه می‌شود که انرژی تحریک بدست آمده در محدوده فرایندهای کم انرژی فیزیکی مانند انتقال حرارت قرار داشته و با فرضهای اولیه و مکانیزم پیشنهادی کاملاً مطابقت دارد.

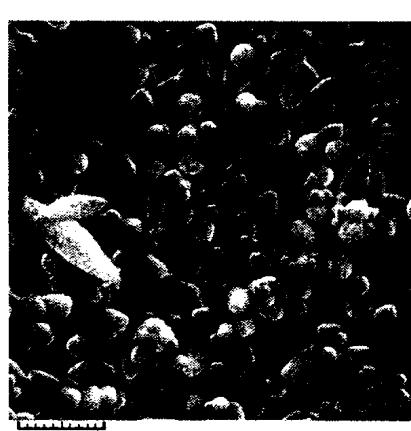
## نتایج

تاثیر دما، غلظت، فشار، جنس زیر لایه، حضور کاتالیست و آلاینده‌ها بر تشکیل و سرعت رشد لایه نازک حساس به گاز تعیین شد. معلوم شد که ساختار لایه‌ها کربیستالی و شکل دانه‌های اکسید روی بیضوی (ماهی مانند) و در موقعی مخروطی (به شکل کله قند) است (شکل ۳). بر اساس مطالعات انجام شده، لایه‌های ساخته شده حاوی  $ZnO$ ,  $SnO_2$ -PdO و  $SnO_2$  خالص بود. شکل و جهت کربیستالی دانه‌ها به شدت تابع جنس زیر لایه و عملیات حرارتی پس از تولید بود. به طوری که با تغییر جنس زیر لایه و آنیل کردن در دماهای بالاتر از ۱۸۰ درجه سانتیگراد از حالت تکی به شکل خوش‌ای مطابق شکل ۳ تغییر می‌کردند.

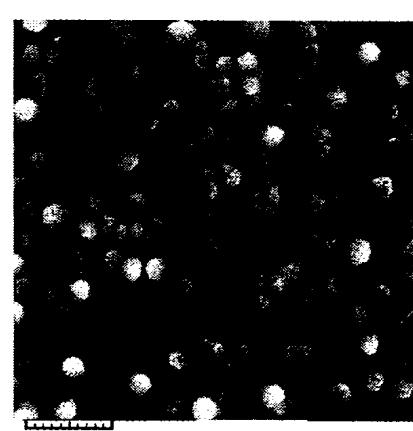
خواص حسگری لایه‌های مختلف مانند حساسیت، انتخابی بودن، خواص الکتریکی و زمان پاسخ مورد آزمایش و بررسی



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۳ - تصاویر میکروسکوب الکترونی از سطح مقطع نمونه‌های  $ZnO$  رسوب داده شده بر سطح (الف) شیشه کوارتز، (ب) شیشه سودا لایم و (ج) نگهدارنده از جنس دیر گذاز آلمینی اداری خلوص بالا.



قرار گرفت. برای اتصال الکتریکی لایه نشانده شده به حسگر از دو سیم پلاتینی استفاده شد. سیمها با چسب نقره به حسگر چسبانده شدند. نمونه سپس در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد خشک شد. آزمایش‌های تعیین خصوصیات الکتریکی مانند مقاومت مخصوص در مقابل جریان انجام شد. به علت ضخامت کم لایه‌ها، تعیین مقادیر مقاومت با روشهای معمولی امکان پذیر نبود زیرا مدار قطع بوده و مقاومت بسیار بزرگی حاصل می‌شد. برای مثال حسگرهایی که با استفاده از لایه‌های ساخته شده با تعداد ۲۰ و ۳۰ بار غوطه وری در محلول حاوی کمپلکس ساخته شده بودند، ضخامت کافی برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نداشتند. اما حسگرهایی که با استفاده از لایه‌های ساخته شده با تعداد ۴۰ بار غوطه وری در محلول حاوی کمپلکس ساخته شده بودند دارای حساسیت عالی بوده و گازهای متانول و ایزوپوتانول را در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد بخوبی جذب می‌نمودند. آلایش لایه نازک با عناصری مانند پالادیوم و مولیبدن بر خصوصیات جذب و حسگری تاثیر داشت. لایه اکسید بجا مانده از تجزیه کمپلکس بر سطح زیر لایه در اثر غوطه وری در آب جوش مقاومت الکتریکی بزرگی داشته و با آلاینده کلرور قلع بیشتر می‌شد.

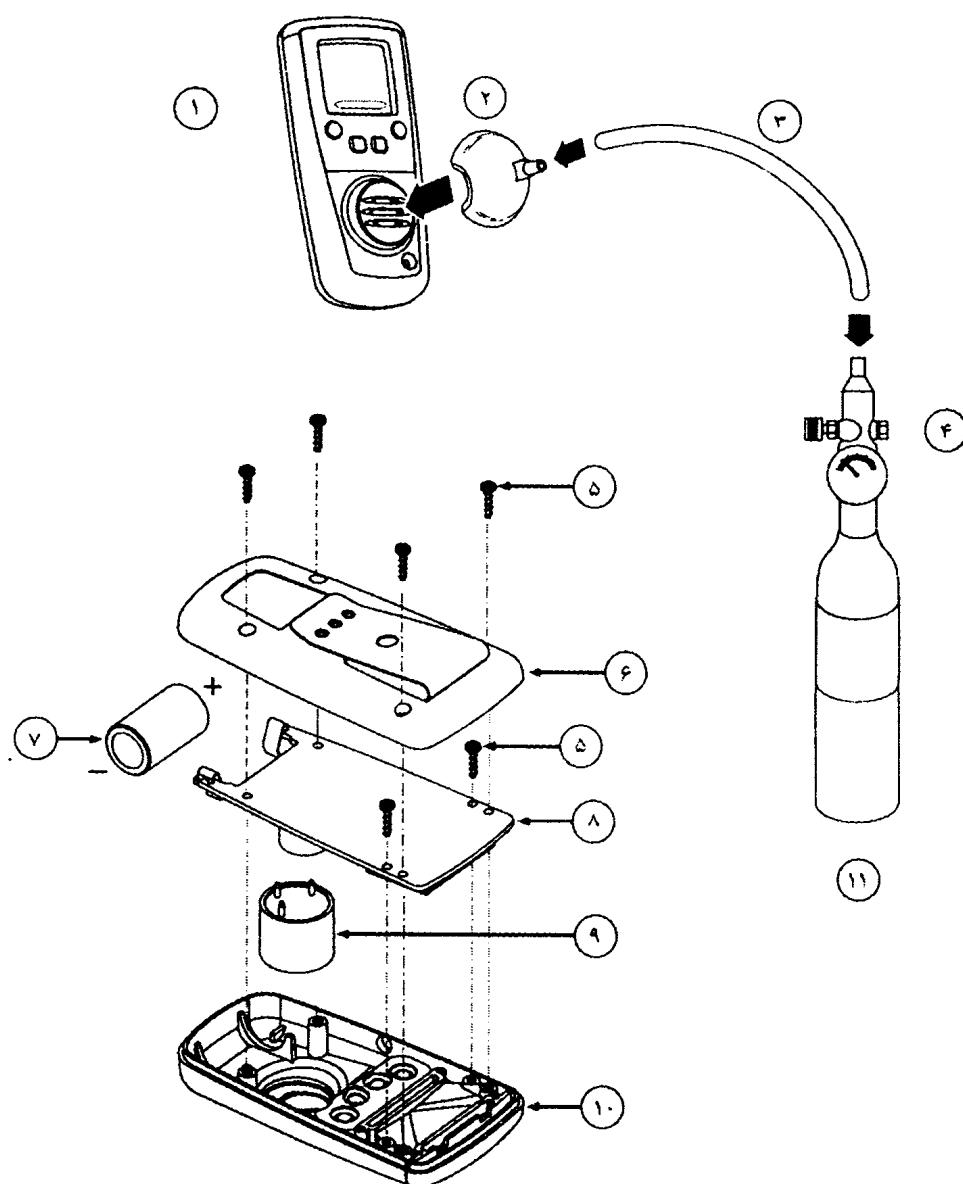
آناتومی یک نمونه حسگر گازی و شیوه تشخیص گاز در آن در شکل ۴ آمده است. نحوه مونتاژ و روشهای ساخت آنالیز کننده گاز تکی و چند تایی بطور تصویری و به اختصار در شکل نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیدا است، ورود گاز به پنجه ورود به حسگر سبب جذب شدن گاز توسط لایه نازک حساس شده و در نهایت عکس العمل حسگر را به همراه خواهد داشت. وظیفه حسگر گرفتن و تبدیل سیگنال شیمیائی به سیگنال الکتریکی است. این کار در سطح لایه از طریق انجام واکنش‌های شیمیائی همراه با انتقال بار اتفاق می‌افتد. جذب مولکولهای گاز بر سطح ماده، سبب به دام افتادن الکترونها و تغییر مقاومت الکتریکی لایه می‌شود. مقاومت الکتریکی به ریز ساختار ماده هم بستگی دارد. واکنش سطح با گاز پیچیده بوده و در مکانهای فعال سطح نظری محل اتمهای اکسیژن، عیوب نقطه ای ذاتی (مانند جاهای خالی)، عیوب نقطه ای خارجی (نظری اتمهای فلزی)، مرز دانه‌ها و مرزهای سه فازی (محل تماس فلز با نیمه هادی) اتفاق می‌افتد.

## بحث

در همه واکنش‌های حسگری سطحی، اکسیژن مولکولی  $O_2^-$  و یا اکسیژن اتمی  $O^-$  نقش دارند. از مزایای استفاده از لایه نازک برای طراحی و ساخت حسگرهای گازی سادگی، کم وزنی و قیمت پایین است. توانایی تشخیص بستگی به غلظت، سمی بودن، قابلیت احتراق، احیایی یا اکسیدی بودن، و شرایط اتمسفر بدون گاز وابسته است. توانایی تشخیص منوکسید کربن در هوای برای مثال با تشخیص منوکسید کربن در هیدروژن یکسان نیست.

برای تعیین خواص الکتریکی حسگر لایه نازک، از روشهای متنوعی می‌توان بهره گرفت. اثر هال یک روش سودمند برای اندازه‌گیری میانگین چگالی حاملهای آزاد در نمونه‌های پلی کریستالی برای جدا کردن اثر برخورد سطحی بر تحرک و غلظت حامل بار است [۲۱]. اندازه‌گیری امپدانس کمپلکس بصورت تابعی از فرکانس برای تعیین مدار معادل RC یک دانه و همچنین تاثیر مرز دانه‌ها، سطح نیمه هادی یا تماسهای الکتریکی بر هدایت حسگر کارآیی دارد. تصاویر SEM و AFM/STM می‌توانند برای مشخصه یابی مورفوژوئیکی سطح لایه استفاده شوند. در حالی که AES و EDAX می‌توانند برای دادن اطلاعات در مورد ترکیب شیمیائی سطح بکار گرفته شوند [۲۲-۲۳].

یک لایه پلی کریستالی با کریستالیتهای به ابعاد کمتر از ۵ نانومتر نسبت به نیمه هادی دارای دانه‌های بزرگتر، حساسیت به گاز بالاتری دارد. لذا تهیه مواد با اندازه نانو روش مهمی برای افزایش حساسیت حسگرها است. پارامترهایی نظری ضخامت نمونه، اندازه دانه و استوکیومتری می‌توانند بر حساسیت، قدرت انتخاب و پاسخ لایه‌های نازک پلی کریستالی تاثیر گذاشته و آن را بهبود

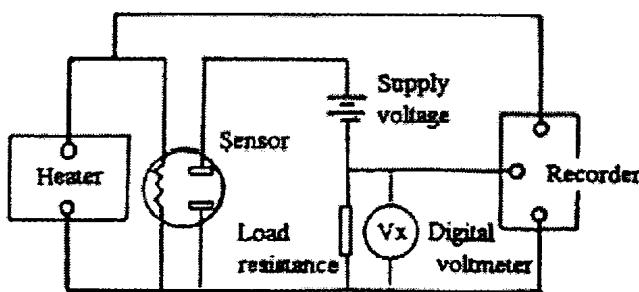


۱- بدنه حسگر، ۲- در پوش، ۳- لوله انعطاف پذیر، ۴- رگلاتور، ۵- پیچ اتصال قطعات حسگر، ۶- قاب زیرین حسگر،  
۷- باتری، ۸- کارت مادر، ۹- حسگر، ۱۰- جلد حسگر، ۱۱- کپسول گاز

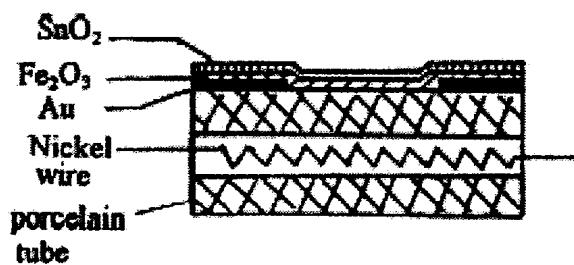
شکل ۴- یک نمونه حسگر گازی و طرز کار آن.

بخشند [۲۱]. نمونه حسگرهای صنعتی چند گازی و شیوه استفاده از تک لایه ها و دو لایه های نازک مشابه شکل ۴ ولی با روشهای مونتاژ گوناگون قابل ساخت است. حسگرهای دو و چند لایه با بکارگیری مخلوط دو و یا چند لایه های نازک نظری  $\text{SnO}_2-\text{PdO}$  و نیز کاتالیست ساخته می شوند. لایه کاتالیست از طریق آلایش با یک ماده موثر مانند پالادیم ایجاد شده و سبب افزایش قابلیت انتخاب و ایجاد امکان چند گازی شدن حسگر می شود. در اثر برخورد مولکولهای گاز با سطح لایه، خواص سطحی لایه نظری هدایت الکتریکی و پتانسیل سطحی تغییر می کنند [۲۷-۲۸]. شکل ۵ آنatomی لایه ها و مدار اندازه گیری ولتاژ عبوری در یک حسگر گازی دو لایه ای را نشان می دهد [۲۸].

پارامترهای موثر در ساخت حسگر عبارتند از حساسیت، انتخاب، پایداری، زمان پاسخ، زمان بازیابی و طول عمر. حساسیت



(ب)



(الف)

شکل ۵ - یک نمونه حسگر گازی با دو لایه نازک: (الف) نحوه مونتاژ لایه ها و

(ب) مدار اندازه گیری مقاومت الکتریکی لایه ها [۳۹].

$$\text{از رابطه } S = \frac{R_a}{R_g} \text{، مقاومت الکتریکی در هوای خالص و } R_g \text{ مقاومت در محیط دارای گاز} \text{ یا } S = \frac{G_g}{G_a} \text{ تعیین می شود.}$$

انتخاب عبارتست از قدرت تشخیص یک گاز معین در حضور گازهای فعال دیگر که بطور همزمان به حسگر اعمال شده اند. پایداری بیانگر عدم وابستگی حساسیت حسگر به زمان، دفعات آزمایش و گاز مورد آزمایش قبلی است. زمان پاسخ، مدت زمان لازم برای رسیدن  $R_{gas}$  ( مقاومت در حضور گاز) به ۹۰٪ مقدار حالت پایدار و زمان بازیابی مدت زمان لازم برای رسیدن مقاومت در هوا هنگام قطع دمش گاز آلوده کننده) به میزان ۹۰ درصد مقدار حالت پایدار می باشد [۳۹]. قیمت مشتمل بر هزینه خرید و بکارگیری حسگر است و طول عمر، مدت عملکرد مطلوب حسگر را نشان می دهد.

### نتیجه گیری و جمع بندی

هدف تحقیق افزایش حساسیت، سرعت دادن به پاسخ دهی و بهبود انتخاب گری حسگر است. در این رابطه استفاده از انواع آلاش، غربال مولکولی و آلاش با لایه های کاتالیست امکان پذیر است. اندازه متوسط دانه، ماهیت کریستالی و یا آمورف بودن لایه، ایجاد حفره و ترک داری لایه بر خصوصیات حسگر و میزان جذب آن تاثیر دارد. با کاهش تخلخل، نفوذ گاز در لایه و زیر لایه کاهش یافته و کارایی سنسور تحت تاثیر قرار می گیرد. انتخاب طرح مطلوب با توجه به وسایل موجود برای ساخت و شیوه اندازه گیری خواص از طریق آزمایش های استاندارد، خواص مورد نیاز و عملکرد بهینه حسگر را تسهیل می سازد. آنatomی یک نمونه حسگر گازی دو لایه نازک و نحوه مونتاژ لایه ها و اندازه گیری مقاومت الکتریکی همراه با طرز قرار گیری و نحوه مونتاژ لایه ها با توجه به محیط استفاده حسگر ارائه شده است.

روش سل ژل برای تولید اکسید قلع و شیوه غوطه وری دو مرحله ای برای ساختن پوشش اکسید روی استفاده شده است. این روشهای ساده، ارزان و سازگار با محیط بوده و کنترل ضخامت لایه از طریق تغییر پارامترهای اجرایی بویژه تعداد دفعات غوطه وری را ارائه داده است. لایه های اکسیدی ساخته شده مانند  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$  (در حالت غیرآلایش شده) و  $\text{SnO}_2\text{-PdO}$  (در حالت آلایش شده) کاملاً کریستالی بوده و از خلوص بالایی برخوردار بوده اند. سینتیک رشد برای لایه اکسید روی از درجه صفر بوده و بوسیله سرعت جریان حرارت توسط مدلی که اولین بار توسط نویسندهای این مقاله ارائه شده، کنترل می شود. میزان انرژی تحریک ۱۷/۲ کیلوژول بر مول و فاکتور فرکانس تشکیل و رشد لایه اکسید روی ۲/۸۱ میکرون بر ثانیه است. اندازه کریستالیتی های  $\text{ZnO}$  تولید شده پس از ۴۰ بار غوطه وری در محدوده نانومتر قرار داشته و از نظر قدرت جذب توانایی قابل قبولی ارائه می دهد.



ترمودینامیک و سیستمیک رشد لایه نشان داد که اتمهای مایع با پیوستن به سطح جامد افزایش نظم داده و با شبکه کریستالی جامد هماهنگ می شوند. سرعت رشد لایه تابع اختلاف دمای زیر لایه و پوشش بود و پارامترهای دیگر همچون دمای سطح، غلظت کمپلکس و هندسه سیستم نیز بر سرعت رشد تاثیر داشتند. برای بهبود روش ساخت و خواص لایه به دست آمده خصوصیات کریستالی و مورفولوژی ترکیب حاصل با استفاده از شیوه های XRD، EDAX و SEM بررسی شد. ترمودینامیک و سیستمیک رشد لایه نشان داد که اتمهای مایع با پیوستن به سطح جامد افزایش نظم داده و با شبکه کریستالی جامد هماهنگ می شوند. سرعت رشد لایه تابع تفاوت دمای زیر لایه و پوشش بود.

### قدرتدانی

بدینوسیله از مسئولین و کارکنان حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف بخاطر حمایت مالی طرح قدردانی می شود.

### مراجع

- Capone, S., Epifani, M., Quaranta, F., Siciliano, P., Vasanelli, L., Application of a semiconductor sol-gel sensor array to the discrimination of pollutants in air, *Thin Solid Films*, 391, 2001, pp 314–319.
- Arnaldo, D.A., Sberveglieri, G., Sensors for domestic applications, *Proceedings of the First European School on Sensors*, 1994.
- Zeng, K., Zhu, F., Hu, J., Shen, L., Zhang, K., Gong, H., Investigation of mechanical properties of transparent conducting oxide thin films, *Thin Solid Films*, 443, 2003, pp 60-65.
- Mukashev, B.N., Tokmoldin, S.Z., Beisenkhanov, N.B., Kikkarin, S.M., Valitova, I.V., Glazman, V.B., Aimagambetov, A.B., Dmitrieva, E.A., Veremenithev, B.M., Influence of structure changes of oxide films on their physical properties, *Mater. Sci. and Eng. B*, 118, 2005, pp 164-169.
- Paraguay, F., Yoshida, M.M., Morales, J., Solis, J., Estrada, W., Influence of Al, In, Cu, Fe and Sn dopants on the response of thin film ZnO gas sensor to ethanol vapor, *Thin Solid Films*, 373, 2000, pp 137-140.
- Ahmad, A., Walsh, J., Wheat, T.A., Effect of processing on the properties of tin oxide based thick film gas sensors, *Sensors and Actuators*, B, 93, 2003, pp 538-545.
- Comini, A., Faglia, G., Sberveglieri, G., CO and NO<sub>2</sub> response of tin oxide silicon doped thin films, *Sensors and Actuators*, B, 76, 2001, pp 270-274.
- Khakani, M.A., Dolbec, R., Serventi, A.M., Horrillo, M.C., Trudeau, M., Saint-Jacques, R.S., Rickerby, D.G., Sayago, I., Pulsed laser deposition of nanostructured tin oxide films for gas sensing applications, *Sensors and Actuators*, B, 77, 2001, pp 383-388.
- Fau, P., Sauvan, M., Trautweilev, S., Nayral, C., Nanosized tin oxide sensitive layer on a silicon platform for domestic gas applications, *Sensors and Actuators*, B, 78, 2001, pp 83-88.
- Sun, H.T., Cantalini, C., Faccio, M., Pelino, M., NO<sub>2</sub> gas sensitivity of sol gel derived  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films, *Thin Solid Films*, 269, 1995, pp 97-101.
- Baratto, C., Faglia, G., Comini, E., Sberveglieri, G., Taroni, A., Ferrara, V.L., Quercia, L., Francia, G.D., A novel porous silicon sensor for detection of sub-ppm NO<sub>2</sub> concentration, *Sensors and Actuators*, B, 77, 2001, pp 62-66.
- Wollenstein, J., Bottner, H., Jaegle, M., Becker, W.J., Wagner, E., Material Properties and the influence of metallic catalysts at the surface of highly dense SnO<sub>2</sub> films, *Sensors and Actuators*, B, 70, 2000, pp 196-202.
- Rosenthal, A., Tarre, A., Gerst, A., Unstare, T., Sammelselg, V., Atomic-layer chemical vapor deposition of SnO<sub>2</sub> for gas-sensing applications, *Sensors and Acuators*, B 77, 1-2, 2001, 297-300.
- Marry, F., Ajoud, M., Study of the properties of the in stiupd doped thin films prepared by MOCVD, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 27, 2002, pp 61–68.
- Leito, E.R., Weber, I.T., Longo, E., Vavela, J.A., A new method to control sensor application, *Advanced Materials*, 12, 2000, pp 965-968.



16. Ciruriena, P., Middelhoke, S., Thin film resistive sensors, IOP Publishing Ltd, NY, 1992, pp 454-460.
17. Nunes, P., Fortunato, E., Lopes, A., Martins, R., Influence of the Deposition Conditions on the Gas Sensitivity of Zinc Oxide Films Deposited by Spray Pyrolysis, International Journal of Inorganic Materials, 3, 2001, pp 1129-1131.
18. Ristov, M., Sinadinovski, G.J., Grozdanov, I., Mitreski, M., Chemical Deposition of ZnO Films, Thin Solid Films, 149, 1987, pp 65-71.
19. Tarre, A., Rosental, A., Sundqvist, J., Harsta, A., Unstare, T., Sammelseig, V., Nanoepitaxy of  $\text{SnO}_2$  on  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (012), Surface Science, 532-535, 2003, pp 514-518.
20. Bittencourt, C., Liobet, E., Silva, M.A.P., Landers, R., Nieto, L., Vicaro, K.O., Sueiras, J.E., Calderer, J., Correig, X., Influence of the Deposition Method on the Morphology and Elemental Composition of Tin Oxide Films for Gas Sensing: Atomic Force and X-Ray Photoemission Spectroscopy Analysis, Sensors and Actuators B, 92, 2003, pp 67-72.
21. Arnaldo, D.A., Sberveglieri, G., Sensors for domestic applications, Proceedings of the First European School on Sensors, 1994.
22. LaGraff, J.R., Pan, G.Z., Tu, K.N., Si ion implantation of  $\text{SrTiO}_3$  Passivated  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  films for multilayer processing of electronic circuits, Physica, c 338, 2000, pp 269-283.
23. Mourzina, Yu.A., Schoning, M.J., Schubert, J., Zander, W., Legn, A.V., Vlasov, Yu. G., Luth, H., Copper, cadmium and thallium thin film sensors based on chalcogenide glasses, Analytica chimica Acta, 433, 2001, pp 103-110.
24. Chen, X.F., Zhu, W.G., Tan, O.K., Microstructure, dielectric properties and hydrogen gas sensitivity of sputtered amorphous  $\text{Ba}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{TiO}_3$  thin films, Mater. Sci. and Eng. B, 77, 2000, pp 177-184.
25. Chaabane, R.B., Gamoudi, M., Guillaud, G., Jouve, C., Lamartine, R., Bouazizi, A., Maaref, H., Study of the membrane morphology and investigation of sensitivity to ions for sensors based on calixarenes, Sensors and Actuators, B, 31, 1996, pp 41-44.
26. Glaninger, A., Jachimowicz, A., Kolhl, F., Chabicovsky, R., Urban, G., Wide range semiconductor flow sensors, Sensors and Actuators, B, 85, 2000, pp 139-146.
27. Pijolat, C., Pupier, C., Sauvan, M., Tournier, G., Lalauze, R., Gas detection for automotive pollution control, Sensors and Actuators, B, 59, 1999, pp 195-202.
28. Seiyama, T., Kato, A., Fujushi, K., Nagattani, M., A new detector for gaseous components using semiconductor thin film, Anal. Chem., 34, 1962, 1052-1058.
29. Currie, J.F., Essalik, A., Marusic, J.C., Micromachined thin film solid state electrochemical  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , and  $\text{SO}_2$  gas sensors, Sensors and Actuators, B, 59, 1999, pp 235-241.
30. Yamada, Y., Seno, Y., Masuoka, Y., Nakamura, T., Yamashita, K.,  $\text{NO}_2$  sensing characteristics of Nb doped  $\text{TiO}_2$  thin films and their electronic properties, Sensors and Actuators, B, 66, 2000, pp 164-166.
31. Lin, H.M., Keng, C.H., Tung, C.Y., Gas sensing properties of nanocrystalline  $\text{TiO}_2$ , Nanostructured Materials, 9, 1997, pp 747-750.
32. Mourzina, Y., Schoning, M.J., Schubert, J., Zander, W., A new thin film Pb microsensor based on chalcogenide glasses, Sensors and Actuators, B, 71, 2000, pp 13-18.
33. Carotla, M.C., Martinelli, G., Crema, L., Malagu, C., Merli, M., Ghiotti, G., Traversa, E., Nanostructured thick film gas sensors for atmospheric pollutant monitoring: quantitative analysis on field tests, Sensors and Actuators, B, 76, 2001, pp 336-342.
34. Ferroni, M., Guidi, V., Martinelli, G., Sacevdoti, M., Nelli, P., Sberveglieri, G.,  $\text{MoO}_3$ -based sputtered thin films for fast  $\text{NO}_2$  detection, Sensors and Actuators, B, 48, 1998, pp 285-288.
35. Lee, M., Yoo, M., Detection of thin film NTC thermal sensors, Sensors and Actuators, B, 96, 2002, pp 97-104.
36. Fleischer, M., Kornely, S., Weh, T., Frank, J., Meixner, H., Selective gas detection with high temperature operated metal oxides using catalytic filters, Sensors and Actuators, B, 69, 2000, pp 205-210.
37. Lu, Y. M., Chang, C. M., Tsai, S. I., Wey, T. S., Improving the conductance of  $\text{ZnO}$  thin films by doping with Ti, Thin Solid Films, 447-448, 2004, pp 56-60.
38. Maosong, T., Guorui, D., Dingsan, G., Surface modification of oxide thin film and its gas sensing properties, Applied surface Science, 171, 2001, pp 226-230.
39. Leo, G., Rella, R., Siciliano, P., Capone, S., Alonso, J.C., Pankov, V., Ortiz, A., Sprayed  $\text{SnO}_2$  thin films for  $\text{NO}_2$  sensors, Sensors and Actuators, B 58, 1999, pp 370-374.