

بررسی خواص حسگری لایه‌های اکسید قلع نانوساختار لایه‌نشانی شده به روش‌های تبخیر گرمایی و کند و پاش نسبت به اتانول

شهرام سیدین^{۱*}، سیدمحسن حسینی گلگو^۲، محمد حسین قزل‌ایاغ^۳ و فریما آگند^۴

۱- مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

۳- گروه الکترونیک، دانشکده فوا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۴- دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۸/۲۵)

چکیده - در این مقاله، نحوه ساخت و ارزیابی حسگرهای گاز مبتنی بر لایه نازک اکسید قلع نانوساختار به دو روش تبخیر گرمایی (نوع I) و کند و پاش (نوع II) نسبت به اتانول بررسی شده است. لایه نازک اکسید قلع بر روی زیرلایه‌هایی از ویفر سیلیکن ایجاد و بر روی آن‌ها عملیات حرارتی انجام شد. با استفاده از روش‌های ساختارسنجی و تحلیل مختلف (SEM، AFM، XRD و EDS) ریزساختار بدنه‌های نیمه‌هادی مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر SEM، وجود دانه‌بندی یکنواخت با ابعاد نانومتری در هر دو نوع نمونه را نشان داد. مقاومت حسگرها در هوای تمیز و تغییرات گذرای مقاومت آن‌ها در پاسخ به تغییرات آبی بخار اتانول (۳۰۰ppm) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پس از پایداری حسگرها، پاسخ ۳ برای حسگر نوع I و ۱/۱۸ برای حسگر نوع II به دست آمد که بیانگر خواص حسگری بهتر لایه نازک اکسید قلع نانوساختار ایجاد شده به روش تبخیر گرمایی بود. دلیل آن را می‌توان ناشی از سطح مؤثر، مکان‌های جذب و مقاومت بیس‌لین بیش‌تر به واسطه داشتن دانه‌های ریزتر دانست هرچند به لحاظ زمان پاسخ و بازیابی، عملکرد کندتری داشت.

واژگان کلیدی: حسگر گاز، اکسید قلع، نانوساختار، تبخیر گرمایی، کند و پاش، اتانول.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sh.seyy@gmail.com

Investigation of Sensory Properties of Nanostructure Tin Oxide Layers Deposited by Thermal Evaporation and Sputtering Methods Compared to Ethanol

Sh. Seyyedini^{1*}, S. M. Hosseini-Golgoobi², M. H. Ghezel ayagh³ and F. Agend⁴

1- Faculty of Materials Science and manufacturing Technology, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Electrical Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran

3- Faculty of Electronic & IT, Emam Hossein University, Tehran, Iran

4- Department of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract: *In this paper, manufacturing and evaluation of ethanol gas sensors based on thin films of nanostructure tin oxide have been investigated. SnO₂ thin films were prepared by both thermal evaporation (type I) and sputtering (type II) methods and heat treated on silicon wafer substrates. Scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectra (EDS) are employed to study the morphology and chemical composition of the semiconductor samples. Nano-scale grain size with homogenous distribution showed in SEM images of both types. Sensors resistance in air and its variation-transient response toward ethanol vapours (3000 ppm) was determined. The response of the stable sensors was obtained 3 and 1.18 for type I and type II, respectively. That shows thin film of nanostructure tin oxide by thermal evaporation (type I) has better sensitivity than the other. More effective surface, adsorption sites and base-line resistance due to the more fine grain size in type I nanostructure, are its important reasons. however, it is slow due extensive rise time and fall time.*

Keywords: Gas sensor, Tin oxide, Nanostructure, Thermal evaporation, Sputtering, Ethanol

۱- مقدمه

برای ساخت حسگرهای گاز، لایه‌های نازک یا لایه‌های ضخیم اکسید قلع توسط روش‌های مختلفی بر روی زیرلایه‌هایی از جنس‌های مختلف لایه‌نشانی می‌شود. به‌منظور افزایش حسگری، می‌توان این لایه‌ها را با عناصری مانند طلا، پالادیوم و پلاتین آلییده کرد [۹-۱۱]. هم‌چنین می‌توان با تغییر پارامترهای فرایند لایه‌نشانی مانند دمای زیرلایه، فشار گاز، نوع گاز موجود در محفظه و توان دستگاه، حسگری این لایه‌های را افزایش داد. لایه حاصل از این فرایندها، غالباً ساختاری غیر بلوری دارند و برای رسیدن به ساختار بلوری و به‌طور خاص نانو سایز شدن دانه‌ها، تحت فرآیند آنیل در دما و زمان بهینه قرار می‌گیرند [۴، ۹ و ۱۲-۲۲]. در نهایت بعد از الکتروگذاری و بستن مدار الکتریکی، آزمون‌های حسگری بر روی این زیرلایه‌ها صورت می‌گیرد.

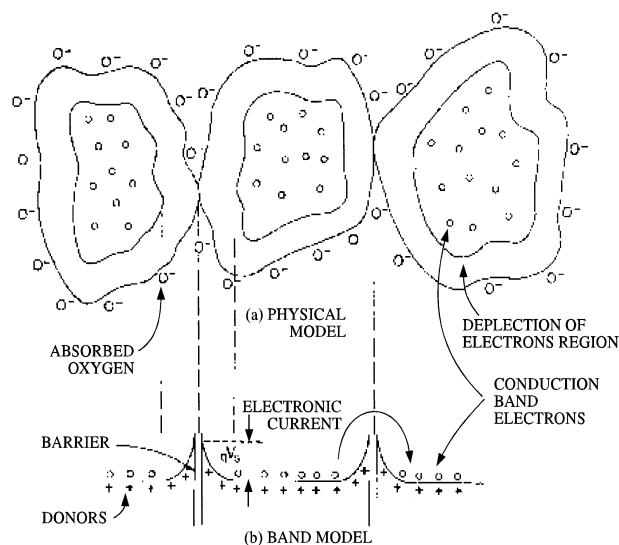
حسگرهایی که در دمای زیر ۶۰۰°C کار می‌کنند، مقاومت ویژه سطح دانه‌ها را به‌واسطه جذب و واکنش با گاز تغییر می‌دهند. هدایت الکتریکی اصولاً از مرز دانه‌ها صورت می‌گیرد،

حساسیت خواص الکتریکی نیمه‌هادی‌ها نسبت به گازهای موجود در محیط (همانند O₂، CO، CH₄، H₂، C₂H₅OH و رطوبت) از سال‌های دور مورد توجه بوده است. در سال ۱۹۶۲ سیاما و همکاران [۱] نشان دادند که لایه‌های نازک ZnO که تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده شده‌اند، به مقادیر بسیار کم گازهای نجیب، بسیار حساس است. هم‌چنین در همان سال تاگوچی [۲] خواص مشابه را برای SnO₂ تف‌جوشی شده نشان داد. حسگرهای نیمه‌هادی بر پایه واکنش میان نیمه‌هادی و گاز موجود در محیط استوارند که در نتیجه چنین واکنشی تغییری در میزان رسانایی نیمه‌هادی ایجاد می‌شود. اکسید قلع (II) (SnO₂) یکی از مواد نیمه‌هادی است که به‌طور گسترده در حسگری گازها استفاده می‌شود و دارای این قابلیت است که در غلظت‌های بسیار پایین گاز، حساسیت بالایی از خود نشان دهد [۳-۸].

ریزگر مکن حسگر، آب مقطر، استن، ویفر سیلیکن به عنوان زیرپایه در فرایندهای لایه نشانی هستند. همچنین از تجهیزاتی نظیر سیستم لایه نشانی با روش تبخیر گرمایی و کند و پاش، کوره الکتریکی، هم زن مافوق صوت نیز استفاده شده است. با استفاده از برش لیزر، ویفر سیلیکن به قطعات مستطیلی شکل با ابعاد $10 \times 7 \text{ mm}^2$ برش داده شد. برای ایجاد ضخامت های مطلوب از اکسید بر روی سیلیکن، از اکسیداسیون گرمایی سیلیکن استفاده شد. ویفر سیلیکن به مدت دو ساعت در دمای 1100°C در کوره قرار داده شد. اتمسفر کوره هوا بوده، در حین فرایند به طور متوسط در هر پنج دقیقه دمش هوای محیط به داخل کوره صورت می گرفت. مطابق پارامترهای جدول (۱) برای لایه نشانی به روش تبخیر گرمایی از منبع پودری اکسید قلع و برای ساخت حسگرهای نمونه های نوع I، به روش کند و پاش از تارگت اکسید قلع استفاده و ساخت حسگرهای نمونه های نوع II طی مراحل زیر انجام شد.

- ۱- آماده سازی زیرپایه ها
 - ۲- لایه نشانی اکسید قلع
 - ۳- عملیات حرارتی نمونه ها
 - ۴- نصب اتصال های الکتریکی مناسب.
- برای رسیدن به ساختارهای نانو در دانه بندی لایه ها، به مدت دو ساعت عملیات حرارتی در دمای 400°C درجه سانتی گراد، بر روی نمونه ها اعمال شد.

بررسی ساختارشناسی و اندازه دانه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA II شرکت TESCAN با انرژی باریکه الکترون های اولیه فرودی ۱۰ و ۲۰ کیلو الکترون ولت و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با نام تجاری DME ساخت دانمارک و با نوکی به شعاع ۱۰ نانومتر انجام پذیرفت. شناسایی ساختار بلوری و فازهای تشکیل شده در لایه ها، توسط پراش سنج پرتو ایکس (XRD) مدل X Pert MPD شرکت Philips هلند و تحلیل از سطح نمونه ها با سیستم طیف سنجی پخش انرژی (EDS) نصب شده بر روی SEM مدل SR-50 شرکت Isiatb ژاپن انجام شد.



شکل ۱- ساختار سطح حسگر [۲۳].

به طوری که مولکول های اکسیژن روی سطح دانه اکسید فلزی جذب می شود و برای تشکیل یون های اکسیژن، الکترون ها را جذب می کند (شکل ۱) [۲۳]. این پدیده یک محدوده خالی در مرزهای دانه ایجاد می کند که باعث ایجاد باند خمشی در ماده می شود و مقاومت ویژه ماده را افزایش یا کاهش می دهد. وقتی یک مولکول مثل CO برای تشکیل CO_2 با اکسیژن جذب شده واکنش می دهد، عناصر دوباره به ماده اکسیدی پس داده می شوند و مقاومت ویژه کاهش می یابد [۴-۷، ۹-۱۱، ۱۳، ۱۸، ۲۰ و ۲۶-۲۲].

در پژوهش حاضر، خواص حسگری لایه های اکسید قلع نانوساختار لایه نشانی شده به روش های تبخیر گرمایی و کند و پاش نسبت به اتانول در ارزیابی ساختارسنجی بررسی و پاسخ های حسگری آن ها ارائه شده است.

۲- مواد و روش پژوهش

مواد مورد استفاده شامل اکسید قلع (II) از درجه الکترونیکی با خلوص ۹۹/۵٪ محصول شرکت Merck، چسب هادی جهت اتصال الکتریکی به مواد نیمه هادی و برقراری اتصالات اهمی (محصول شرکت Contronics آمریکا)، سیم المنت (آلومینوفروکروم نازک به قطر ۰/۲ میلی متر) برای ساخت

جدول ۱- پارامترهای لایه‌نشانی اکسید قلع برای تولید نمونه‌های نوع I و II.

پارامتر	روش تبخیر گرمایی	روش گند و پاش
سطح خلاء با استفاده از پمپ چرخشی (torr)	$\approx 10^{-3}$	$\approx 10^{-3}$
سطح خلاء نهایی (torr)	$\approx 3/4 \times 10^{-5}$	$\approx 2/3 \times 10^{-5}$
ولتاژ اعمالی به گرم‌کن تنگستنی در حالت پایدار	۰/۹ V	---
جریان عبوری از گرم‌کن تنگستنی در حالت پایدار	≈ 65 A	---
توان RF	---	۱۹۵ W
فاصله هدف از زیرپایه‌ها (cm)	۱۲	۱۲
نرخ متوسط لایه‌نشانی (nm/min)	۰/۱	۰/۲
ضخامت لایه نهایی (nm)	۱۵۰	۱۵۰
رنگ لایه‌ها	خاکستری مایل به زرد	قهوه‌ای

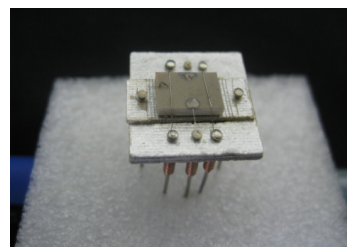
هوای تمیز و هوای آلوده به گاز هدف و ΔR اختلاف این دو مقدار است. در برخی از مراجع $\Delta R/R_g$ را طبق رابطه (۲) به‌عنوان پاسخ تعریف نموده‌اند که به اندازه یک واحد از تعریف قبل کمتر است:

$$\text{Response} = \frac{\Delta R}{R_g} \quad (2)$$

این عبارت در برخی از متون به‌صورت درصد تغییر مقاومت نیز بیان می‌شود [۲۸]. در پژوهش حاضر همواره از رابطه (۱) برای محاسبه پاسخ حالت پایدار حسگر استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

جهت بررسی ساختار سطحی و تعیین زبری سطح لایه‌ها، تصاویر AFM نمونه‌ها در شکل (۳) ارائه شده است. ناحیه اسکن شده برای نمونه نوع I دارای ابعاد $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ و برای نمونه نوع II، $500 \times 500 \text{ nm}^2$ بود. در تصویر (۳-الف) که مربوط به نمونه نوع I است، لایه‌ها به‌صورت جزیره‌ای و پاره پاره توزیع شده و یکنواخت نیستند. هم‌چنین از تصاویر AFM حاصله ارتفاع تپه‌ها حدود ۵۰۰ نانومتر تخمین زده شد که می‌توان دلیل آنرا در سطح ناصاف سیلیکن اکسید شده جستجو نمود. در واقع ذرات مشاهده شده در این تصویر مربوط به ذرات اکسید سیلیکن رشد یافته در سطح سیلیکن اند و



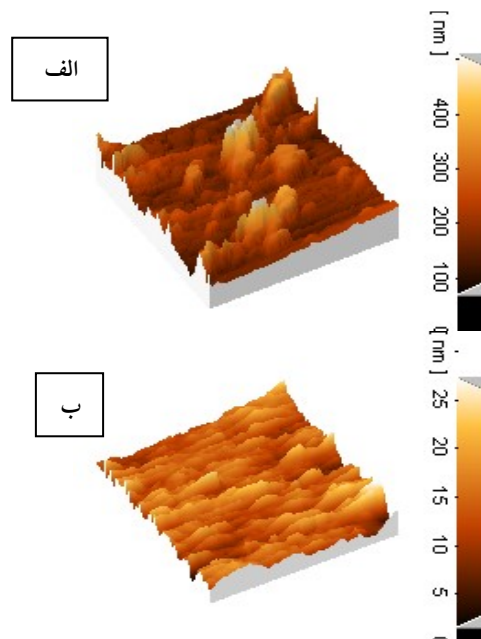
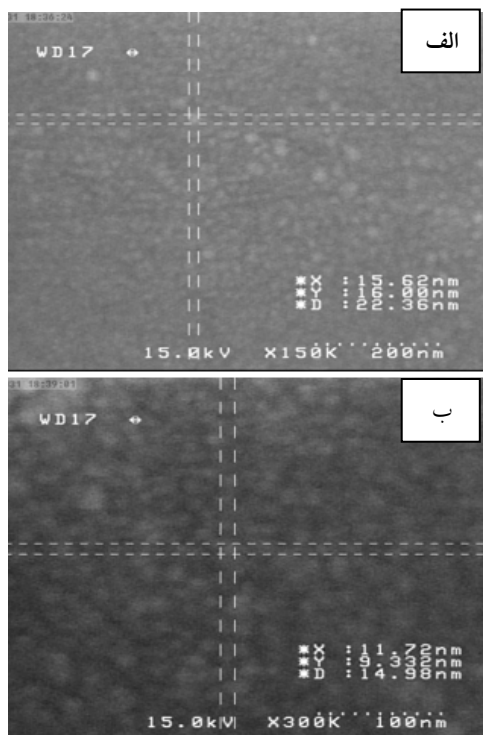
شکل ۲- یک نمونه حسگر نصب شده بر روی ریزگرم‌کن.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی عملکرد حسگری، ریزگرم‌کن‌های مقاومتی در مجاورت سطح حساس برای کارکرد مطلوب حسگر که در دمای بالا به‌دست می‌آید، تهیه شد. مجموعه نمونه و گرم‌کن بر روی یک عایق گرمایی از جنس میکا تعبیه شد. از چسب هادی نقره به‌عنوان اتصال الکتریکی نمونه‌ها و از سیم‌های نازک پلاتین به‌عنوان الکتروود که وظیفه اتصال نمونه را به مدار خارجی بر عهده دارد، استفاده شد. شکل ۲ تصویر یک نمونه حسگر نصب شده بر روی ریزگرم‌کن را نشان می‌دهد.

یکی از پارامترهایی که برای مقایسه عملکرد حسگرها مورد استفاده قرار می‌گیرد پاسخ حسگر است که برای حسگر نوع-n، به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\text{Response} = \frac{R_a}{R_g} = \frac{R_g + \Delta R}{R_g} = 1 + \frac{\Delta R}{R_g} \quad (1)$$

که در آن R_a و R_g مقاومت حالت پایدار حسگر به‌ترتیب در



شکل ۳- تحلیل AFM (الف) از یک سطح $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ نمونه نوع I- لایه نشانی شده بر روی زیرپایه سیلیکن اکسید شده، (ب) از یک سطح $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ از نمونه نوع II- لایه نشانی شده بر روی زیرپایه شیشه سودالایم. نمونه ها به مدت دو ساعت در دمای 400°C درجه سانتی گراد تفجوشی شده است.

شکل ۴- تصاویر SEM از نمونه نوع I لایه نشانی شده بر روی زیرپایه سیلیکن اکسید شده، تصاویر اسکن شده در بزرگ نمایی های متفاوت. نمونه ها به مدت دو ساعت در دمای 400°C تفجوشی شده است.

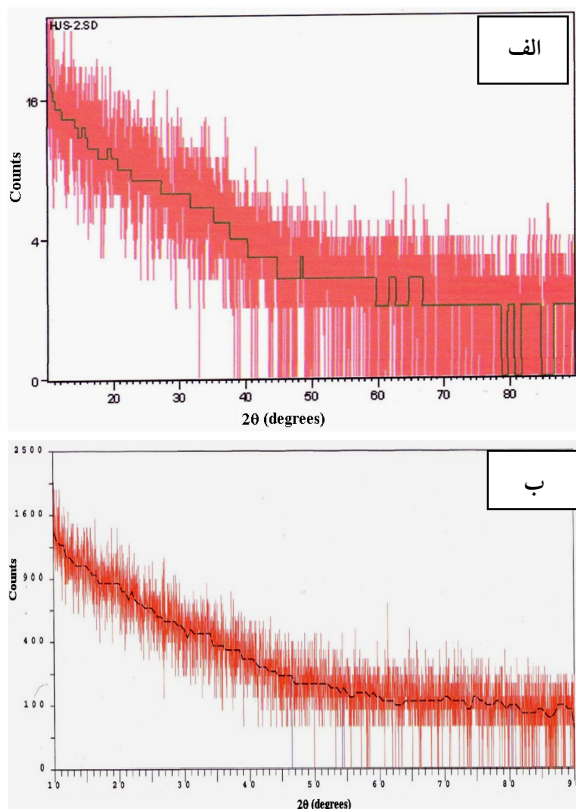
نوع I و II برای بررسی ساختاری لایه های لایه نشانی شده به وسیله روش های تبخیر گرمایی و کند و پاش و محاسبه اندازه دانه ها ارائه شده است. هر دو تصویر، وجود دانه بندی کاملاً یکنواخت را در فیلم های لایه نشانی شده و در ابعاد نانومتری نشان می دهند. اندازه دانه ها برای نمونه نوع I در محدوده ۱۱ تا ۱۶ نانومتر و برای نمونه نوع II در محدوده ۲۵-۱۲ نانومتر تخمین زده می شوند.

نتیجه XRD از نمونه نوع I و نوع II در شکل (۶) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل پیداست هیچ گونه پیک واضحی در طیف حاصل دیده نمی شود. این امر را می توان به این دلیل مرتبط دانست که مقادیر بسیار کوچک اندازه دانه که در تصاویر SEM مشخص شد، سبب ایجاد قله های بسیار پهن در طیف XRD می شود. این قله های پهن در طیف نوفه دار مربوط به زیرپایه غیر بلوری مدفون می شوند، لذا هیچ گونه

ذرات اکسید قلع را باید با تفکیک پذیری بالاتری از هر یک از قله های مشاهده شده در این شکل جستجو نمود.

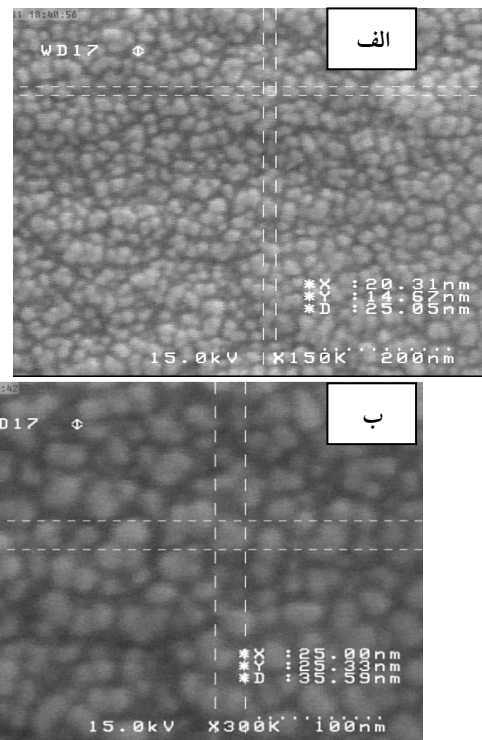
برای نمونه نوع II ابتدا تصاویر تحلیل AFM از سطح با ابعاد ۵ در ۵ میکرون گرفته شد که تصاویر به دست آمده نشان دهنده عدم یکنواختی در لایه نشانی بود و لایه ها به صورت خوشه ای بر روی قسمت های مختلف سطح پخش شد و این خوشه ها دارای ارتفاع بالایی بودند. بنابراین احتمال داده شد که نوک حسگر دستگاه AFM مورد استفاده دارای اشکال باشد. به این علت بررسی بیشتر در سطح اسکن $500 \times 500 \text{ nm}^2$ صورت گرفت که در شکل (۳-ب) ارائه شده است. از این تصویر دو نکته قابل تأمل است. یکی وجود ذراتی با اندازه کمتر از ۲۰ نانومتر و دیگری کشیدگی واضح تصویر. برای بررسی دقیق تر، سطح نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترون عبوری مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل های (۴) و (۵)، تصویر SEM از ریزساختار نمونه های



شکل ۶- طیف XRD مربوط به الف) نمونه نوع I و ب) نمونه نوع II.

به دلیل عدم مشاهده پیک‌های اکسید قلع در طیف‌های XRD، برای تعیین ترکیب شیمیایی (در حد کیفی)، از تحلیل EDS سیستم SEM استفاده شد. دستگاه مورد استفاده فاقد قابلیت شناسایی اکسیژن بود، اما سایر مواد را با دقت مناسبی ردیابی می‌نمود. در شکل (۷) نتایج تحلیل EDS نمونه‌های نوع I و II نشان داده شده است که مؤید وجود لایه‌ای با ترکیبی از قلع است و با توجه به ماده اولیه در هر دو روش لایه‌نشانی، قطعیت جنس لایه موجود از اکسید قلع حاصل می‌آید. لازم به ذکر است که وجود Si در نتایج، مربوط به زیرپایه سیلیکونی نمونه‌ها است. ارزیابی الکتریکی لایه‌های نشاندۀ شده به روش تبخیر گرمایی (نوع I) و کند و پاش (نوع II) حاکی از آن بود که مقاومت لایه‌ها بیش از $40\text{ M}\Omega$ است. این امر نشان‌دهندۀ غیر بلوری (و عایق) بودن لایه‌ها است که پس از تفجوشی [۱۵، ۱۷ و ۲۴]، مقاومت لایه‌ها در محدوده ۱۸-۱۲ کیلو اهم قرار گرفته است.

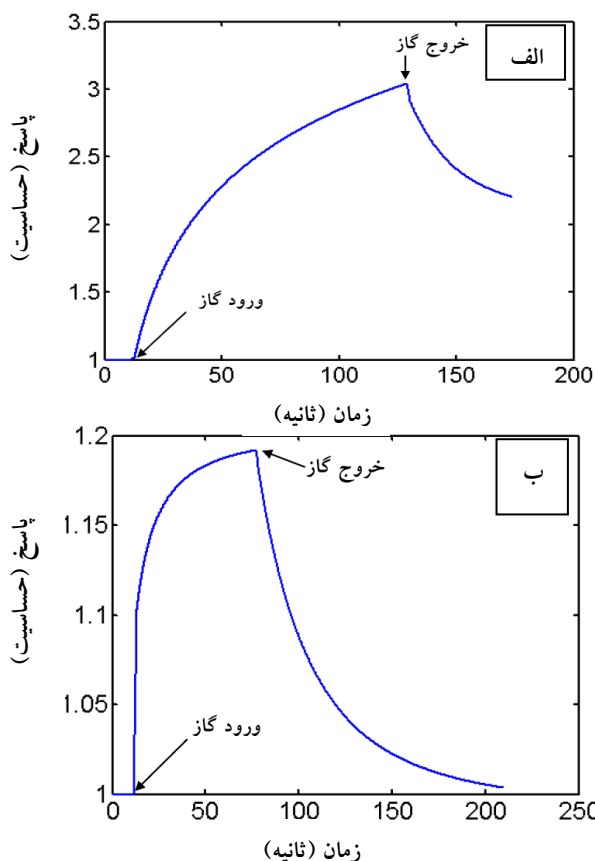


شکل ۵- تصاویر SEM از نمونه نوع II لایه‌نشانی شده بر روی زیرپایه سیلیکن اکسید شده، تصاویر اسکن شده در بزرگنمایی‌های متفاوت. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 400°C تفجوشی شده است.

الگوی واضحی در طیف‌های XRD مشاهده نمی‌شود. علت پهن شدن قله‌ها را می‌توان از رابطه شرر^۱ استخراج کرد که نحوه محاسبه اندازه ذره (R_x)، را از الگوهای XRD بیان می‌نماید:

$$R_x = 0.9 \lambda / \beta \cos \theta \quad (3)$$

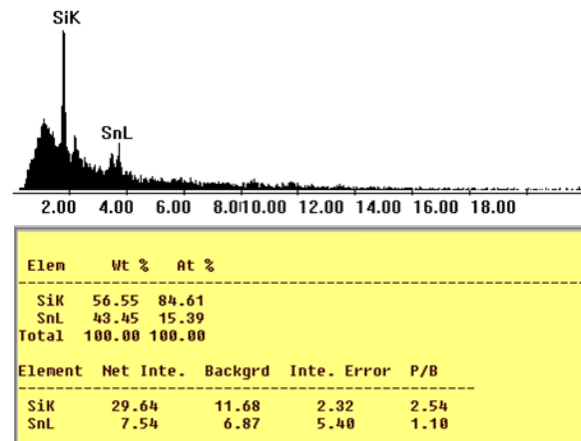
در رابطه (۳)، λ طول موج اشعه X تولیدی (مثلاً برای تشعشع $\text{CuK}\alpha$ ، $1/54$ آنگستروم است)، β پهنای کل در نصف حداکثر یک قله (FWHM)^۲ برحسب رادیان و θ زاویه انحراف است. β معیاری از پهن یا تیز بودن قله‌هاست. هر چه β بزرگ‌تر باشد، قله‌ها پهن‌تر است که این امر بنا به رابطه (۳) سبب کاهش اندازه ذره می‌شود.



شکل ۸- نمودار پاسخ دینامیکی حسگر در دمای 290°C سطح حساس در حضور 3000 ppm اتانول. (الف) نوع I و (ب) نوع II.

صعود و فرود حسگر نوع I بیش‌تر است یا به عبارت دیگر این نوع حسگر در سرعت پاسخ‌دهی و بازیابی، کندتر عمل کرده است. بنابراین از نظر حساسیت، حسگر نوع I با گستره اندازه ذرات $11-16\text{ nm}$ ، عملکرد بهتری نسبت به حسگر نوع II (با گستره اندازه ذرات $12-25\text{ nm}$) دارد. دلیل آن‌را می‌توان ناشی از سطح مؤثر و مکان‌های جذب بیش‌تر و از طرفی نیز مقاومت خط پایه بالاتر در حسگر نوع I به واسطه داشتن دانه‌های ریزتر دانست. در نتیجه همین پدیده، تراکم آستانه و گستره دینامیکی آن نسبت به حسگر نوع II بهتر شده است [۳، ۴ و ۲۵].

زیادتر بودن زمان پاسخ و بازیابی در حسگر نوع I را نیز می‌توان به ریزتر بودن دانه‌های آن مرتبط دانست که به دلیل بیش‌تر بودن سطح مؤثر و مکان‌های جذب، زمان جذب و



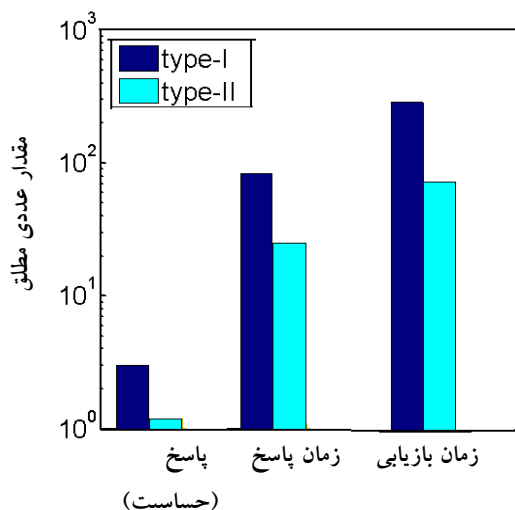
شکل ۷- نتایج تحلیل EDS نمونه‌های نوع I و II.

نمودار پاسخ دینامیکی نمونه‌های حسگر نوع I و II که در دمای 400°C به مدت دو ساعت تفجوشی شده بودند در حضور 3000 ppm اتانول و دمای 290°C سطح حسگر در شکل (۸) ارائه شده است.

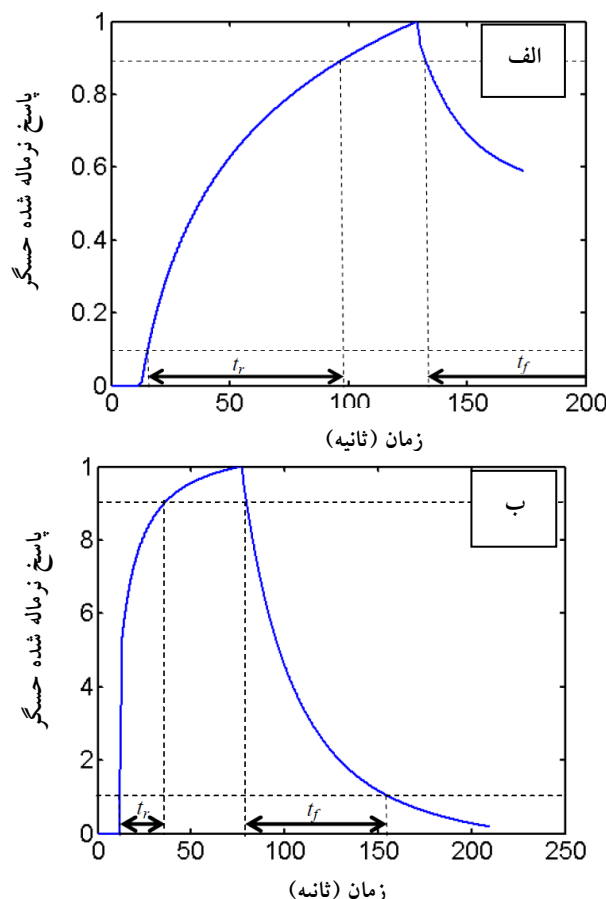
زمان پاسخ (t_r) به صورت مدت زمان رسیدن پاسخ حسگر از مقدار $0/1$ تا $0/9$ حداکثر آن در حضور گاز تعریف می‌شود. به طور مشابه زمان بازیابی (t_f) به صورت مدت زمان رسیدن پاسخ حسگر از مقدار $0/9$ تا $0/1$ مقدار حداکثر آن پس از برداشتن گاز (در هوای تمیز) تعریف می‌شود. برای محاسبه این دو مقدار مناسب است که از پاسخ نرمال شده حسگر استفاده شود. این منحنی برای حسگرهای نوع I و II در شکل (۹) نشان داده شده است. برای حسگر نوع I در شرایط آزمایش، زمان پاسخ برابر با 83 ثانیه و زمان بازیابی حدود 300 ثانیه و برای حسگر نوع II، زمان پاسخ برابر با 25 ثانیه و زمان بازیابی 75 ثانیه محاسبه شد.

مطابق منحنی‌های شکل (۸) (حاصل محاسبات تغییرات مقاومت نمونه‌ها)، عدد پاسخ ۳ برای حسگر نوع I و عدد پاسخ $1/18$ برای حسگر نوع II به دست آمد.

اندازه و سرعت پاسخ دو نوع حسگر در نمودار شکل (۱۰) در مقایسه با هم دیگر نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه پاسخ (حساسیت) حسگر نوع II (برابر با $1/18$) کم‌تر از نوع I (برابر با ۳) است. از طرفی زمان



شکل ۱۰- مقایسه حساسیت، زمان پاسخ و زمان بازیابی در دو نوع حسگر ساخته شده.



شکل ۹- پاسخ نرمال شده الف) شکل ۸- الف و ب) شکل ۸- ب.

واجذب در آن بالاتر رفته است به همین علت حسگر، عملکرد کندتری از خود بروز داده است [۷ و ۲۶].

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، ساخت حسگرهای گاز اتانول مبتنی بر لایه‌های نازک اکسید قلع نانوساختار ایجاد شده با دو روش تبخیر گرمایی (نوع I) و کند و پاش (نوع II) و ارزیابی خواص حسگری آنها انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که: ۱. مقاومت الکتریکی لایه‌های نشانده شده به روش تبخیر گرمایی و کند و پاش بزرگ‌تر از $40 \text{ M}\Omega$ بود که بیانگر عایق بودن لایه‌ها بود، لیکن با اعمال فرایند تفجوشی و تشکیل دانه‌های بلوری، مقاومت لایه‌ها در گستره ۱۸-۱۲ کیلو اهم قرار گرفت. ۲. تصاویر SEM، وجود دانه‌بندی یکنواخت و در ابعاد

نانومتری را در لایه‌های هر دو روش لایه‌نشانی نشان داد. اندازه دانه‌ها برای نمونه‌های نوع I در گستره ۱۱ تا ۱۶ نانومتر و برای نمونه‌های نوع II در بازه ۲۵-۱۲ نانومتر تعیین شد. ۳. در نتایج مربوط به تحلیل XRD هیچ‌گونه پیک واضحی در طیف حاصل مشاهده نشد. این امر را می‌توان به مقادیر بسیار کوچک اندازه دانه و پدیده پهن شدگی پیک‌ها نسبت داد. نتایج DES، ترکیب شیمیایی لایه‌ها را در حد کیفی، تأیید نمود. ۴. در دو لایه نازک نانوساختار ایجاد شده به روش‌های تبخیر گرمایی و کند و پاش تحت شرایط لایه‌نشانی و تفجوشی یکسان، حسگر ساخته شده از نمونه تبخیر گرمایی دارای حساسیت بیش‌تری نسبت به گاز بود.

۵. در دمای 290°C و حضور 3000 ppm بخار اتانول، برای حسگر نوع I عدد پاسخ ۳ و برای حسگر نوع II عدد پاسخ ۱/۱۸ به دست آمد که بیانگر حساسیت بهتر حسگر نوع I (با اندازه ذرات ۱۱-۱۶ nm) نسبت به حسگر نوع II (با اندازه ذرات ۱۲-۲۵ nm) است.

۶. زیاده‌تر بودن زمان پاسخ و بازیابی در حسگر نوع I که نشانگر کندی عملکرد آن است، می‌تواند به دلیل ریزتر بودن دانه‌های آن و در نتیجه افزایش زمان جذب و واجذب باشد.

مراجع

1. Scherrer Equation
2. full width half maximum

1. Seiyama T., Kato, A., Fulishi K., Nagatani M., "A New Detector for Gaseous Components Using semiconductive thin films", *Analytical Chemistry*, Vol. 34, pp. 1502-1503, 1962.
2. Chiba A., in "Chemical Sensor Technology", Vol. 4, Yamauchi S. (Ed.), Kodansha, Tokyo, p.1, 1991.
3. Ansari S.G., Boroojerdian P., Sainkar S.R., "Grain Size Effects on H₂ Gas Sensitivity of Thick Film Resistor Using SnO₂ Nanoparticles", *Thin Solid Films*, Vol. 295, pp. 271-276, 1997.
4. Cavicchi R.E., Semancik S., Dimeo JR F., Taylor, C.J., "Use of Microhotplates in the Controlled Growth and Characterization of Metal Oxides for Chemical Sensing", *Electroceramics*, Vol. 9, pp.155-164, 2002.
5. Sberveglieri, G., "Recent Developments in Semiconducting Thin-Film Gas Sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 23, Iss.2-3, pp. 103-109, 1995.
6. Baratto, C., Comini, E., Faglia, G., Sberveglieri, G., Zha M., Zappettini A., "Metal Oxide Nanocrystals for Gas Sensing", *Sensors and Actuators B*, Vol. 109, pp 2-5, 2005.
7. Batzill M., Diebold U., "The Surface and Materials Science of Tin Oxide", *Progress in Surface Science*, Vol.79, pp.47-154, 2005.
8. Lee Y.C., Tan O. K., Huang H., Tse M. S., "Deposition and Gas Sensing Properties of Tin Oxide Thin Films by Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition", *Electroceram*, Vol. 16, pp. 507-509, 2006.
9. Comini E., Vomiero A., Faglia G., Della Mea, G., Sberveglieri G., "Influence of Iron Addition on Ethanol and CO Sensing Properties of Tin Oxide Prepared with the RGTO Technique", *Sensors and Actuators B*, Vol. 115, pp. 561-566, 2006.
10. 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 SnO₂ Films", *Sensors and Actuators B*, Vol. 70, pp. 196-202, 2000.
11. Jinkawa T., Sakai G., Tamaki J., Miura N., Yamazoe, N., "Relationship Between Ethanol Gas Sensitivity and Surface Catalytic Property of Tin Oxide Sensors Modified with Acidic or Basic Oxides", *Molecular Catalysis A: Chemical*, Vol. 155, pp.193-200, 2000.
12. Song S-K., Cho J-S., "Structure and Gas-Sensing Characteristics of Undoped Tin Oxide Thin Films Fabricated by Ion-assisted Deposition", *Sensors and Actuators B*, Vol. 46, pp. 42-49, 1998.
13. Martinelli G., Carotta M.C., "Thick-Film Gas Sensors", *Sensors and Actuators B*, Vol. 23, pp. 157-161, 1995.
14. Honore M., Lenaerts S., Desmet J., Huyberegts G., Roggen J., "Synthesis and Characterization of Tin Dioxide Powders for the Realization of Thick-Film Gas Sensors", *Sensors and Actuators B*, Vol. 18-19, pp. 621-624, 1994.
15. Laghrib S., Amardjia-Adnani H., Abdi D., "Thermal Oxidation of Tin Layers and Study of the Effect of Their Annealing on Their Structural and Electrical Properties", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 13, pp. 364-370, 2010.
16. Khan A.F., Mehmood M., "Optical Characterization of rf-Magnetron Sputtered Nanostructured SnO₂ Thin Films", *Chinese Physics Letters*, Vol. 26, 077803, 1-4, 2009.
۱۷. حسینی گلگو، س.م.، "لایه‌نشانی اکسید روی آمورف و فرآیندهای اولیه در فرآیند Recrystallization"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۲.
18. Diaz Delgado R., "Tin Oxide Gas Sensors: An Electrochemical Approach", PhD. Thesis, Barcelona university, 2002.
19. Dai Z. R., Wei Pan Zh., Wang Zh. L., "Novel Nanostructures of Functional Oxides Synthesized by Thermal Evaporation", *Advanced Functional Materials*, Vol. 13, pp.9-24, 2003.
20. Ahmad A., Walsh J., "The Influence of Precursor Powders and Processing Parameters on the Properties of SnO₂-Based Gas Sensors", *Materials Science*, Vol. 38, pp.4325-4332, 2003.
21. Zhao Y., Feng Zh., Liang Y., "SnO₂ Gas Sensor Films Deposited by Pulsed Laser Ablation", *Sensors and Actuators B*, Vol. 56, pp. 224-227, 1999.
22. Brousse, T., Schleich, D. M., "Sprayed and Thermally Evaporated SnO₂ Thin Films for Ethanol Sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 31, Iss.1-2, pp.77-79, 1996.
23. Blaser G., Ruhl Th., Diehl C., Ulrich M., Kohl D., "Nanostructured semiconductor Gas Sensors to Overcome Sensitivity Limitations due to Percolation Effects", *Physica A*, Vol. 266, pp. 218-223, 1999.
24. Sarala Devi, G., Masthan S. K., Shakuntalav M., Rao J., "Correlation Between Structural Properties and Gas Sensing Characteristics of SnO₂ Based Gas Sensors", *Journal of Materials, Science: Materials in Electronics*, Vol. 10, pp. 545-549, 1999.

25. Adamyan A.Z., Adamian Z. N., Aroutiounian V.M., "Preparation of SnO₂ Films with Thermally Stable Nanoparticles", *Sensors*, Vol. 3, pp. 438–442, 2003.
26. Idriss H., Seebauer E.G., "Reactions of Ethanol Over Metal Oxides", *Molecular Catalysis A: Chemical*, Vol. 152, pp. 201–212, 2000.
۲۷. حسینی گلگو، س.م.، حسین بابایی، ف.، افضل زاده، ر.، "آشکارسازی گازهای قابل اشتعال توسط حسگر اکسید قلع

ساخته شده به روش تبخیر با باریکه الکترونی"، نشریه علمی پژوهشی شریف، شماره ۳۸، ص. ۲۱–۲۹، ۱۳۸۶.

۲۸. حسینی گلگو، س.م.، "تعیین مدل یک حسگر گاز تحت مدولاسیون دمایی برای شناسایی بو"، پایان نامه دکتري، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.