

تهیه لایه‌های نانوساختاری  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  با روش سل - ژل آبی در کاربرد حسگر گازپیمان فرهپور<sup>۱</sup>، محمدرضا محمدی<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۹/۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۱۲/۲۲

**چکیده** لایه‌های دوتایی و پودرهای نانوساختار شده و نانومتخلخل  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  با نسبت‌های مولی  $\text{Sn:Ti}$  مختلف با روش ساده سل - ژل آبی تهیه شدند. سل‌های تهیه شده دارای ذرات با ابعاد نانومتری بودند. آنالیز پراش اشعه ایکس نشان داد که نسبت مولی  $\text{Sn:Ti}$  و دمای عملیات حرارتی بر ترکیب فازی محصول تاثیر داشته و استحاله فازی آناتاز به روتیل در حضور فاز  $\text{SnO}_2$  به تأخیر افتاد. نتایج میکروسکوپ الکترونی عبوری تأیید نمود که اندازه بلورک محصول در حدود ۳ نانومتر است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورفولوژی نانوساختار با اندازه دانه در گستره ۲۰-۴۰ نانومتر را نشان داد. حسگرهای ساخته شده از لایه نانوساختار  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  پاسخ بالایی به غلظت پائین گاز CO در دمای کاری پائین ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد داشتند.

کلمات کلیدی:  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ ، سل - ژل، حسگر گاز.

## Preparation of nanostructured $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ films by aqueous sol-gel for gas sensor application

P. Farahpour<sup>1</sup> and M.R. Mohammadi<sup>\*2</sup><sup>1</sup>Faculty of Mechanical and Industrial Engineering Department, Qazvin Islamic Azad University<sup>2</sup>Materials Science and Engineering Department, Sharif University

**Abstract** Nanostructured  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  films were prepared by a facile aqueous sol-gel route. The prepared sols showed particle size in nano-meter scale. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that phase composition of the films depend on  $\text{Sn:Ti}$  molar ratio and annealing temperature. Moreover,  $\text{SnO}_2$  retarded the anatase to rutile transformation. Transmission electron microscope (TEM) image showed that one of the smallest crystallite sizes was obtained for  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  binary mixed oxide, being 3 nm. Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) analysis revealed that the deposited films had nanostructured morphology with the average grain size in the range 20-40 nm. Thin films produced under optimized conditions showed excellent microstructural properties for gas sensing applications towards low concentrations of CO gas at low operating temperature of 200°C.

**Keywords:**  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ , sol-gel, gas sensor.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه شریف

تلفن: -، دورنگار: -، پیام‌نگار: -

## ۱- مقدمه

اسید کلریدریک (مرک ۳۷٪) و ۰/۰۱ مولاریته از تترا ایزوپروپوکسید تیتانیم (سیگما آلدریچ) (TTIP) به درون فلاکس ریخته شد. سپس مقدار لازم کلرید قلع به آنها اضافه شد. در نهایت آب یونیزه شده به مخلوط قبلی افزوده شد و مخلوط حاصله ۳۰ دقیقه بهم زده شد. جدول (۱) ترکیب شیمیائی و شرایط تهیه سل‌های  $TiO_2-SnO_2$  را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ترکیب شیمیائی و شرایط تهیه سل‌های  $TiO_2-SnO_2$ 

Sample reference	Sn:Ti (molar ratio)
ST13	25:75
ST11	50:50
ST31	75:25

۲-۲- سنتز پودرهای  $TiO_2-SnO_2$ 

پودرهای اکسیدهای دوتائی  $TiO_2-SnO_2$  با خشک کردن هر یک از سل‌ها در دمای  $120^\circ C$  و به مدت ۷۲ ساعت تهیه شدند.

۲-۳- روش ساخت لایه‌های نازک  $TiO_2-SnO_2$ 

زیر لایه‌های مصرفی جهت ارزیابی ریزساختار و توپوگرافی سطح لایه‌های حساس از جنس آلومینا به ابعاد  $10 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$  انتخاب شد. پس از تمیز کردن زیر لایه‌ها، لایه‌های حساس با روش غوطه‌وری رسوب داده شدند. بدین ترتیب که زیرلایه‌ها در هر یک از سل‌های تهیه شده غوطه‌ور شدند و پس از گذشت چند دقیقه، با سرعت  $2/1 \text{ mm/min}$  از محلول خارج شدند. پس از خشک شدن لایه عملیات خشک کردن و آنیل کردن انجام شد. تعداد سیکل پوشش‌دهی زیر لایه‌ها برابر یک سیکل می‌باشد.

## ۲-۴- خشک کردن و عملیات حرارتی آنیل

لایه‌های نازک نانوساختاری اکسیدهای دوتائی  $TiO_2-SnO_2$  پس از رسوب دهی با روش غوطه‌وری بر زیرلایه‌های آلومینا تحت عملیات خشک کردن و آنیل کردن قرار گرفتند. دمای عملیات خشک کردن در  $250^\circ C$  و به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. این لایه‌ها پس از خشک شدن در دماهای  $400^\circ C$ ،  $600^\circ C$  و  $800^\circ C$  در هوا حرارت داده شدند و به مدت ۳۰

دی‌اکسید تیتانیم دارای کاربردهای وسیعی است که امروزه در صنایع مختلف مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد. یکی از این کاربردهای حسگرهای گاز است. به منظور بهبود خواص حسگری این ماده تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است که اغلب در زمینه کنترل ریزساختار و مورفولوژی آن است، نظیر ایجاد ساختاری با سطح ویژه بالا، مورفولوژی نانومتری و آلیش با عناصری نظیر Sn, V Cr, W, Co, Cu, Fe, Nb, Ta, Ga. روش دیگری که اخیراً برای افزایش کارائی حسگر گاز مورد توجه قرار گرفته است، تهیه ترکیب دوتائی بر پایه دی‌اکسید تیتانیم است که در این رابطه حسگرهای گاز  $TiO_2-V_2O_5$ ،  $TiO_2-Cr_2O_3$ ،  $TiO_2-WO_3$ ،  $TiO_2-MoO_3$  و  $TiO_2-Ga_2O_3$  گزارش شده‌اند. J.H. Oh و W.P. Tai خواص حسگری به رطوبت لایه‌های  $TiO_2-SnO_2$  را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که ترکیب  $TiO_2-20 \text{ wt.} \% SnO_2$  بالاترین حساسیت را به رطوبت دارد. F. Edelman و همکارانش خواص ساختاری لایه‌های نانوساختاری  $SnO_2-TiO_2$  را برای کاربرد حسگری گاز بررسی کردند. M. Radecka و همکارانش دریافتند که حسگر با ترکیب  $50 \text{ mol} \% SnO_2/50 \text{ mol} \% TiO_2$  بالاترین پاسخ را به آمونیا (با غلظت  $100 \text{ ppm}$  تا  $5000 \text{ ppm}$ ) در دمای کاری  $400^\circ C$  درجه سانتی‌گراد از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق بهبود خواص حسگری لایه  $TiO_2$  نانوساختاری تهیه شده با روش سل-ژل آبی با افزودن  $SnO_2$  با نسبتهای مولی مختلف Sn:Ti مورد مطالعه قرار گرفت. اثر نسبت مولی Sn:Ti و دمای عملیات حرارتی بر خواص الکتریکی، شیمیائی و فیزیکی لایه‌های نانوساختاری  $SnO_2-TiO_2$  بررسی شد.

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- تهیه محلول‌های سل-ژل اکسیدهای دوتائی

 $TiO_2-SnO_2$ 

روشی جدید و ارزان قیمت جهت تهیه محلول سل-ژل اکسید دوتائی  $TiO_2-SnO_2$  با نسبتهای مولی Sn:Ti مختلف ارائه شد. یکی از مزایای روش ارائه شده، استفاده از ماده غیرآلکوکسید (کلرید قلع سیگما آلدریچ) بعنوان منبع قلع است. کلرید قلع با خلوص ۹۹ درصد مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه سل‌های  $TiO_2-SnO_2$  ابتدا مقدار ۱/۷ مولاریته

دقیقه در این دما نگه داشته شدند و در نهایت تا دمای اتاق سرد شدند.

## ۲-۵- روش‌های مشخصه‌یابی

اندازه ذرات سل‌ها در این تحقیق به کمک دستگاه Malvern Zetasizer 3000HS اندازه‌گیری شد. پودرها و لایه‌های نازک تهیه شده توسط دستگاه Philips E' Pert PW3020 همراه با فیلتر Cu-K $\alpha$  در رنج  $2\theta = 10^\circ - 60^\circ$  مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه بلورک‌ها به کمک معادله دبی-شرر محاسبه شدند.

(معادله ۱)

$$d = \frac{k\lambda}{B \cos \theta}$$

در جاییکه  $d$  اندازه بلورک‌ها برحسب  $k$  عدد ثابت  $nm$ ،  $\lambda$  طول موج اشعه X مس ( $1.5406 \text{ \AA}$ )،  $\theta$  زاویه براگ<sup>۱</sup> برحسب درجه و  $B$  عرض کامل در نصف ماکزیمم<sup>۲</sup> (FWHM) پیک مورد نظر است.

میکروسکوپ TEM به منظور بررسی ساختار درونی نمونه‌ها (شکل و ابعاد بلورک‌ها) استفاده شد. میکروسکوپ TEM مدل JEOL 200CX در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. ریزساختار، توپوگرافی سطحی، ترکیب شیمیایی و همگن بودن، لایه‌های حساس ساخته شده بر روی زیرلایه کوارتز به کمک میکروسکوپ FE-SEM با فاصله کاری  $5 \text{ mm}$  بررسی شدند. میکروسکوپ FE-SEM مورد استفاده در این تحقیق مدل JEOL 6340 با حداکثر بزرگنمایی  $350,000 \times$  می‌باشد. توپوگرافی، ریزساختار و زبری سطح لایه‌های حساس نانو ساختاری را به دو صورت تصاویر دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) توسط میکروسکوپ AFM مورد مطالعه قرار گرفت. میکروسکوپ AFM استفاده شده در این تحقیق مدل Nano Scope III, Digital Instrument Inc. می‌باشد. در نهایت خواص الکتریکی (حساسیت) حسگرهای ساخته شده به گاز CO توسط سیستم الکتریکی طراحی شده مطالعه شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- خواص سل‌ها

شکل (۱) اندازه متوسط ذرات سل‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. اندازه متوسط ذرات در سل‌ها برابر  $17/2$ ،  $18/0$  و  $19/30$  نانومتر است.

### ۳-۲- آنالیز XRD

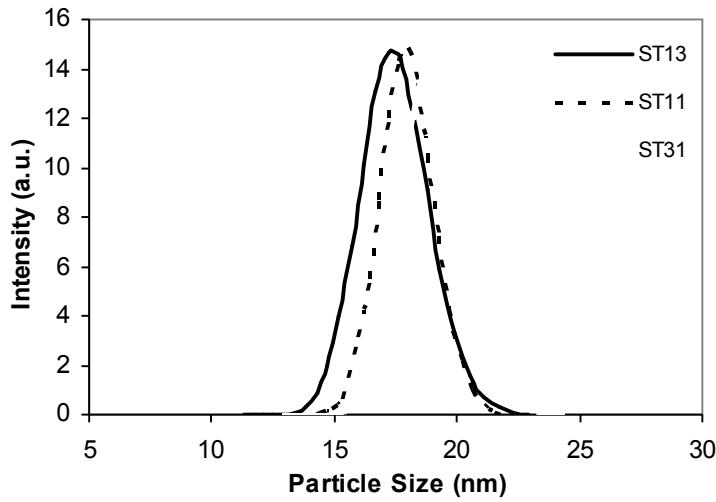
شکل (۲) الگوی تفرق اشعه ایکس پودرهای ST۳۱، TS۱۱ و ST۱۳ آنیل شده در دماهای  $400^\circ\text{C}$ ،  $600^\circ\text{C}$  و  $800^\circ\text{C}$  به مدت یک ساعت را نشان می‌دهد. حضور فازهای آناتاز و روتیل و وجود فاز  $\text{SnO}_2$  تشکیل اکسید قلع را در سیستم دوتائی  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  اثبات می‌کند. پودرهای  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دماهای  $400^\circ\text{C}$ ،  $600^\circ\text{C}$  و  $800^\circ\text{C}$  پیک‌های مختلفی ارائه داد که به فازهای  $\text{SnO}_2$ ، آناتاز و روتیل نسبت داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، ترکیب فازی پودرها بستگی به نسبت مولی Ti:Sn و دمای آنیل دارد. تمام پودرها کریستالینیتی خوبی دارند. واضح است که حضور  $\text{SnO}_2$  سبب به تاخیر افتادن استحاله فازی آناتاز به روتیل شده است. اندازه متوسط بلورک پودرهای ST۱۳، ST۱۱ و ST۳۱ آنیل شده در دمای  $600^\circ\text{C}$  به ترتیب  $2/3 \text{ nm}$ ،  $4/4 \text{ nm}$  و  $4/7 \text{ nm}$  اندازه‌گیری شد.

در مقایسه با روش‌های سل - ژل گزارش شده برای تهیه  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  موفق شدیم که این ترکیب را بطور کریستالی در دمای پائین  $400^\circ\text{C}$  درجه با روش سل - ژل آبی سنتز کنیم. علت این امر را می‌توان به مسیر نفوذ کوتاه عناصر در ضمن عملیات حرارتی ناشی از بلورک‌های بسیار ریز دانست.

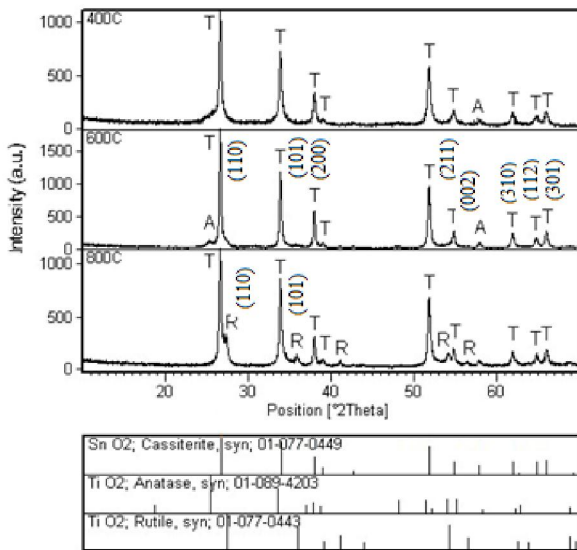
شکل (۳) اثر دما بر اندازه بلورک پودرهای سنتز شده را نشان می‌دهد. بر اساس شیب این نمودار انرژی اکتیواسیون رشد بلورک برای پودرهای ST13، ST11 و ST31 به ترتیب  $6/87$ ،  $2/38$  و  $0/96 \text{ kJ/mol}$  محاسبه شد. کم بودن انرژی اکتیواسیون را می‌توان مربوط به اندازه نانومتری ذرات دانست که دارای سطح ویژه بالا بوده و لذا دارای انرژی سطحی زیاد هستند که منجر به کاهش انرژی اکتیواسیون رشد می‌گردد.

<sup>1</sup> - Bragg's Angle

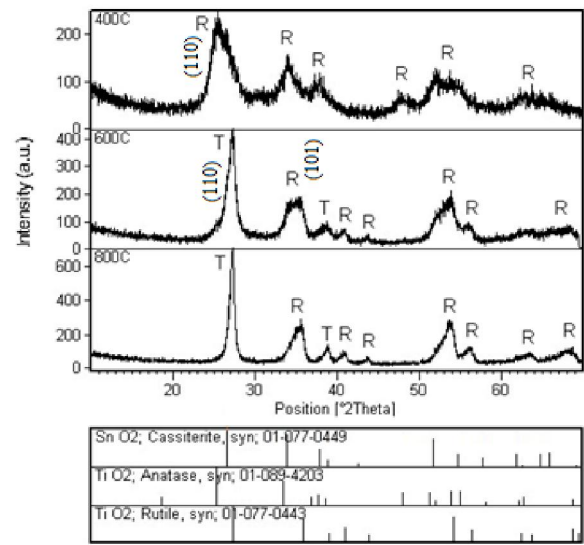
<sup>2</sup> - Full Width at Half Maximum



شکل ۱. اندازه متوسط ذرات در سل های  $TiO_2-SnO_2$  (خطای تخمین  $\pm 0.5$  است).

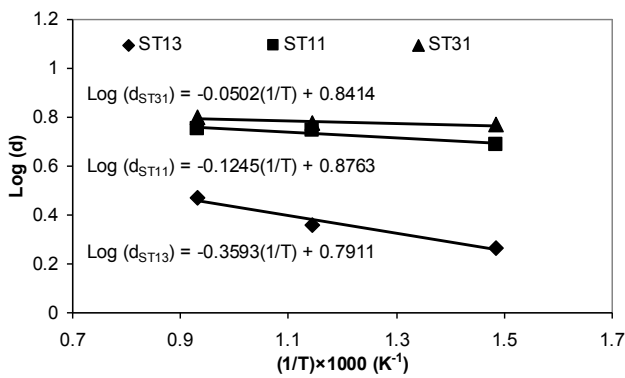


(ج)

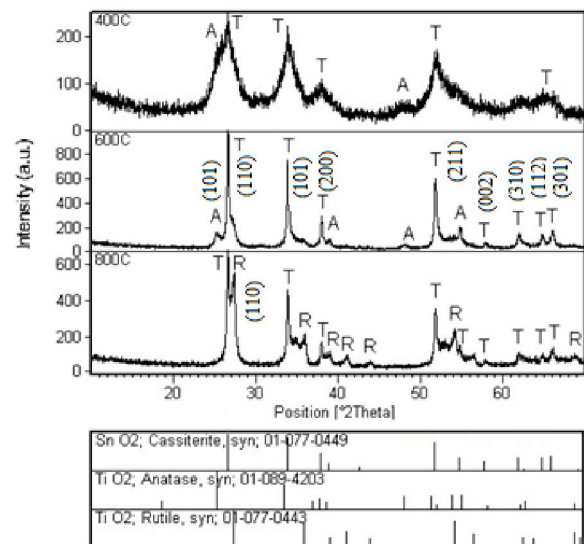


(الف)

شکل ۲. الگوی XRD پودرهای  $TiO_2-SnO_2$  آنیل شده در ۴۰۰-۸۰۰ درجه (الف) ST13، (ب) ST11 و (ج) ST31.



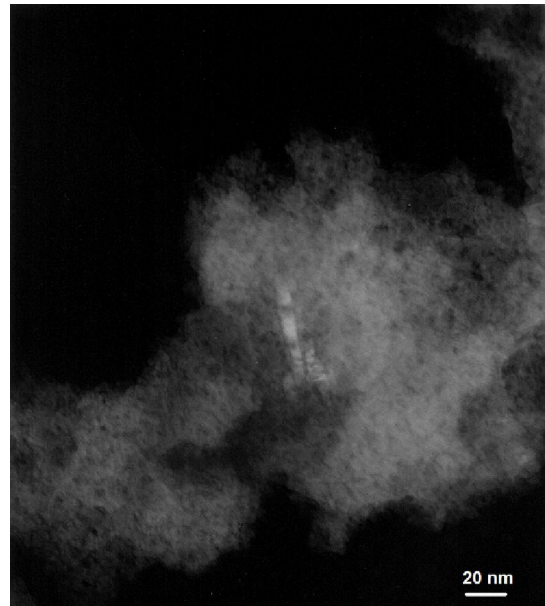
شکل ۳. نمودار اندازه متوسط بلورک برحسب دما برای محاسبه انرژی اکتیواسیون رشد بلورک اکسید دوتائی  $TiO_2-SnO_2$ .



(ب)

## ۳-۳- آنالیز TEM

شکل (۴) الگوی تفرق منطقه انتخاب شده (SADP) پودر ST13 آنیل شده در دماهای  $600^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، این پودر یکنواختی بالا در اندازه و شکل ذرات دارد. اندازه متوسط کریستالیت این پودر حدود  $3\text{nm}$  است که این نتیجه در توافق خوبی با مقدار حاصله از آنالیز XRD است.



شکل ۴. آنالیز TEM پودر ST13 آنیل شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$ .

## ۳-۵- آنالیز AFM

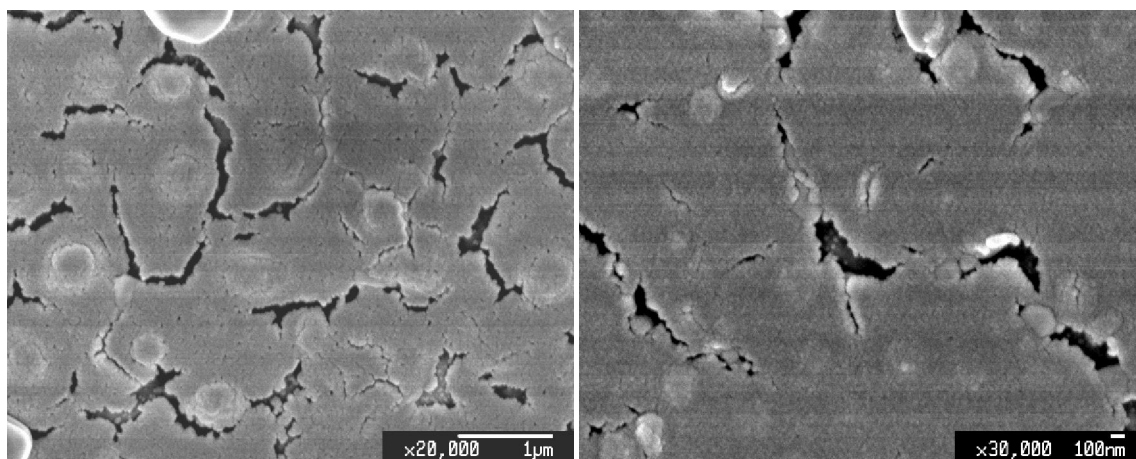
شکل (۶) توپوگرافی دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) لایه ST13 آنیل شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. تصاویر نشان دادند که لایه دارای ساختاری نانومتخلخل، زبر و همگن با دانه‌های  $22\text{nm}$  نانومتری می‌باشد. تصویر سه بعدی نشان داد که لایه  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  مورفولوژی ستونی مانند<sup>۱</sup> دارد. دارا بودن اندازه دانه کوچک و زبری بالای اکسیدهای دوتائی  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  پیش‌بینی بهبود خواص حسگری گازی این لایه‌ها را امکان پذیر می‌سازد.

## ۳-۶- آنالیز حسگری گازی

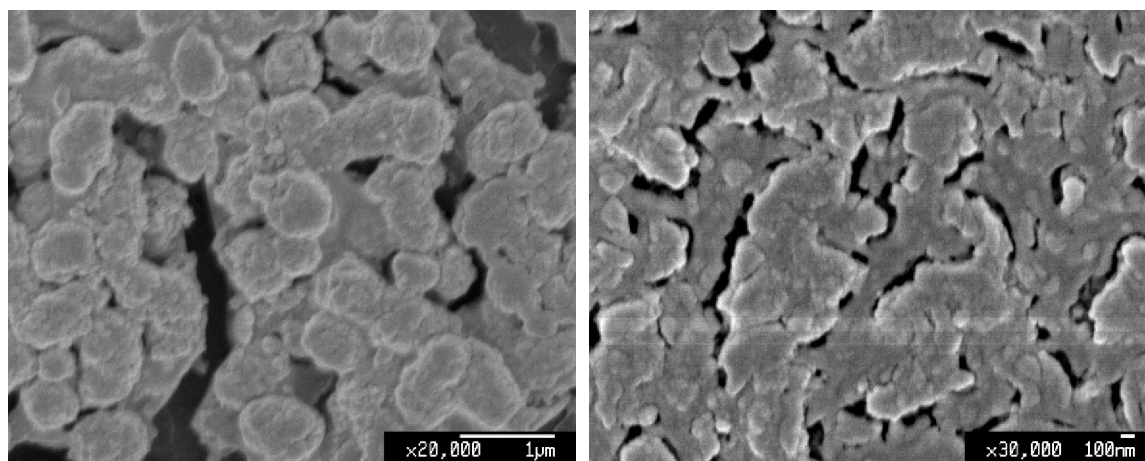
شکل (۷) پاسخ دینامیکی حسگرهای  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ ساعت را به گاز CO در دمای کاری  $200^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد نشان می‌دهد. تمام حسگرها در دمای کاری  $200^{\circ}\text{C}$  پاسخ پایدار، قابل تولید مجدد و قابل اعتمادی به گازهای مورد نظر دارند. میزان پاسخ حسگرها به  $400\text{ ppm}$  گاز CO به ترتیب  $19/6$ ،  $15/7$  و  $12/0$  برای حسگرهای ST13، ST11 و ST31 بود. همچنین زمان پاسخ و زمان بازیابی حسگرها به این مقدار گاز CO به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۰ ثانیه بود. همانطور که مشاهده می‌شود بزرگی پاسخ با افزودن  $\text{SnO}_2$  به لایه  $\text{TiO}_2$  بطور موفقیت آمیزی افزایش یافت. علت این امر را می‌توان با تغییر ریزساختار، مورفولوژی و توپوگرافی لایه‌های حساس شرح داد. کاهش اندازه دانه و افزایش مساحت سطح ویژه، محل‌های انجام واکنش میان گاز- لایه را افزایش داد، علاوه بر اینکه فاز آاناتاز نیز واکنش پذیری بالاتری به گاز دارد. لذا همانطور که قبلاً پیش‌بینی می‌شد، حسگرهای  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  پاسخ دینامیکی بالاتری به گازهای مورد نظر در مقایسه با حسگر  $\text{TiO}_2$  نشان دادند. از سوی دیگر بدلیل آنکه حسگر ST13 دارای کوچکترین اندازه دانه در میان حسگرهای ساخته شده بود، بالاترین مقدار پاسخ را به گاز نشان داد. با افزایش غلظت گاز CO بزرگی پاسخ تمام حسگرها افزایش یافت که علت آن افزایش سرعت واکنش میان لایه-گاز است.

## ۳-۴- آنالیز FE-SEM

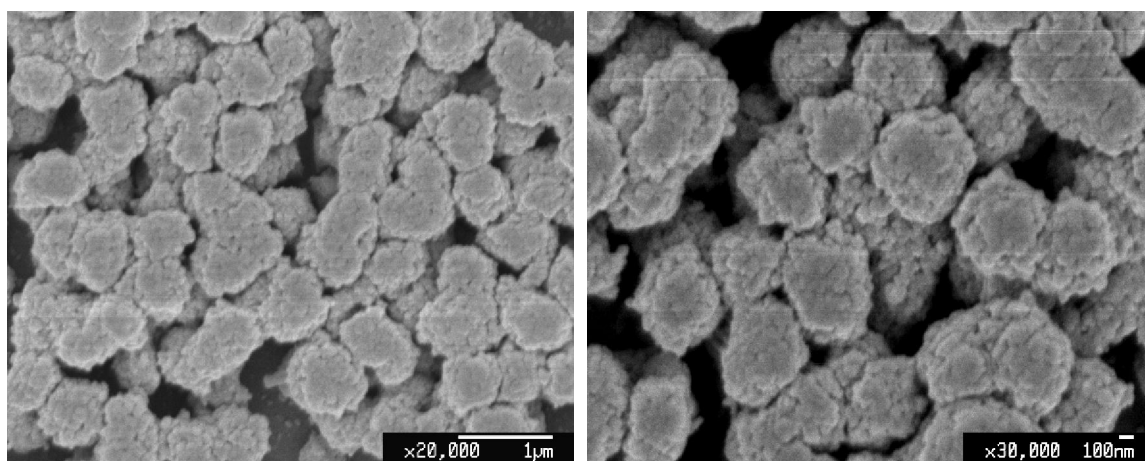
شکل (۵) تصاویر FE-SEM سطح لایه‌های  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که لایه‌ها شامل دانه‌های کروی است که سطح زیر لایه‌ها را پوشانده‌اند. تمامی لایه‌ها نانو ساختاری و نانومتخلخل بودند. با افزایش نسبت مولی  $\text{Sn:Ti}$  میزان تخلخل لایه‌ها افزایش یافت. علت این امر این است که تجزیه کلرید قلع واکنشی گرماگیر بوده و تجزیه مواد آلی گرمازا. لذا گرمای آزاد شده توسط سوختن مواد آلی صرف تجزیه ترکیب معدنی کلرید قلع می‌شود و از اینرو زینترینگ ذرات کمتر اتفاق افتاده و تخلخل افزایش می‌یابد. اندازه متوسط دانه لایه‌ها در محدوده  $20\text{-}40\text{nm}$  نانومتر بود.



(الف)

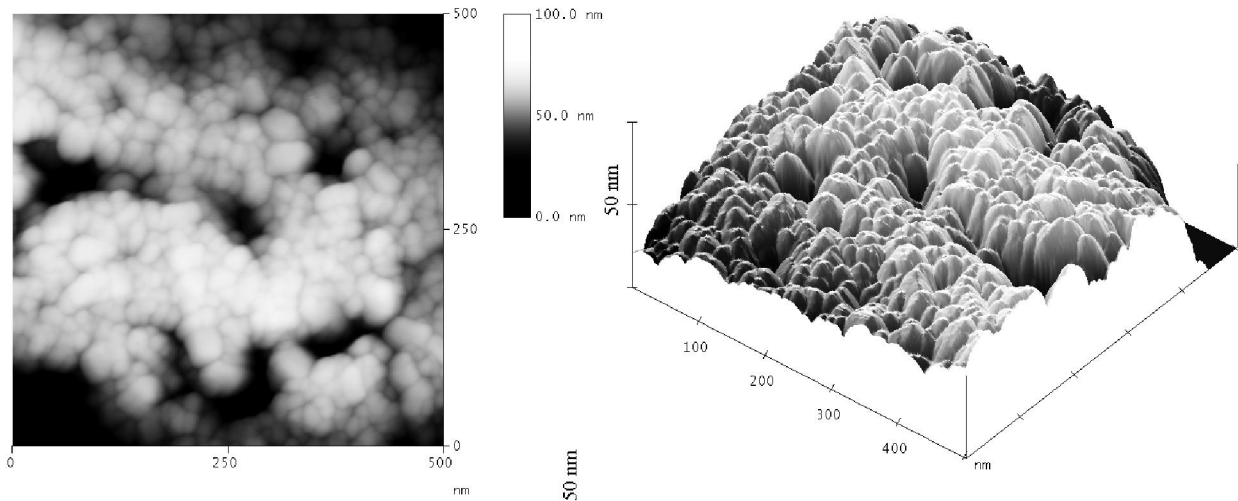


(ب)

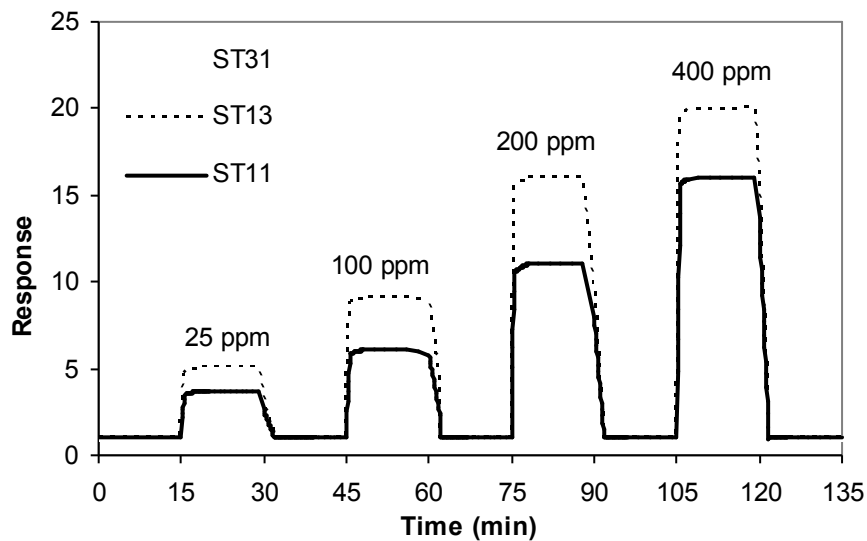


(ج)

شکل ۵. مورفولوژی سطح لایه‌های  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دمای  $600^\circ\text{C}$  به مدت ۱ ساعت برحسب تابعی از تغییر ترکیب شیمیایی: (الف) ST13، (ب) ST11 و (ج) ST31.



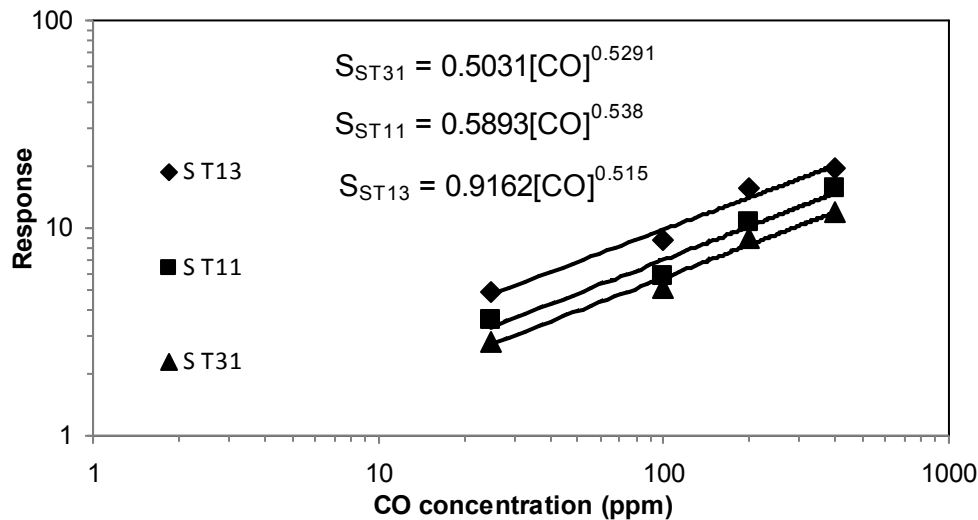
شکل ۶. تصاویر AFM لایه ST13 آنیل شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ ساعت.



شکل ۷. پاسخ الکتریکی لایه‌های نازک  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ ساعت در دمای کاری  $200^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد به  $10\text{-}100\text{ ppm}$  گاز CO.

شده است. هرچه مقدار توان B بالاتر باشد، حسگر قابلیت تفکیک بهتری نسبت بین دو غلظت گاز را دارد و در حالتیکه مقدار توان B کوچک باشد، قابلیت تشخیص غلظت پائین گاز را دارد. بنابراین، حسگر  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  دارای قابلیت تشخیص غلظت پائین گاز را دارد.

شکل (۸) منحنی کالیبراسیون حسگر  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آنیل شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  به گاز CO در دمای کاری  $200^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد را نشان می‌دهد. حسگر از رابطه توانی  $S = A[\text{gas}]^B$  پیروی می‌کند (S حساسیت حسگر، A و B مقادیر ثابت). مقادیر برای تطابق در جدول (۲) آورده



شکل ۸. منحنی کالیبراسیون حسگر  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  آئیل شده در دمای ۵۰۰ درجه به گاز CO در دمای کاری ۲۰۰ درجه و رطوبت نسبی ۳۰ درصد

CO) دارند. حسگرهای ساخته شده قابلیت کار در دمای کاری پائین ( $200^\circ\text{C}$ ) را داشتند که از دیدگاه اقتصادی سبب کاهش مصرف توان حسگرها در ضمن کار می‌شود.

جدول ۲. مقادیر برای تطابق با رابطه توانی  $S = A[\text{gas}]^B$  برای حسگر

	$\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$		
	ST13	ST11	ST31
A	0.916	0.589	0.503
B	0.515	0.538	0.529

## مراجع

1. C. Garzella, E. Comini, E. Tempesti, C. Frigeri, G. Sberveglier,  $\text{TiO}_2$  thin films by a novel sol-gel processing for gas sensor application, *Sensors and Actuators B: Chem.* 68, 2000, 189-196.
2. M. C. Carotta, M. Ferroni, D. Gnani, V. Guidi, M. Merli, G. Martinelli, M.C. Casale, M. Notaro, Nanostructured pure and Nb-doped  $\text{TiO}_2$  as thick film gas sensors for environmental monitoring, *Sensors and Actuators B: Chem.* 58, 1999, 310-317.
3. M. Ruiz, A. Cornet, K. Shimanoe, J.R. Morante, N. Yamazoe, Effects of various metal additives on the gas sensing performances of  $\text{TiO}_2$  nanocrystals obtained from hydrothermal treatment, *Sensors and Actuators B: Chem.* 108, 2005, 34-40.
4. S. Zhuiykov, W. Wlodarski, Y. Li, Nanocrystalline  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$  thin-films for oxygen sensing prepared by sol-gel process, *Sensors and Actuators B: Chem.* 77, 2001, 484-490.
5. A.M. Ruiz, A. Cornet, K. Shimanoe, J.R. Morante, N. Yamazoe, Transition metals (Co, Cu) as additives on hydrothermally treated  $\text{TiO}_2$  for gas sensing, *Sens. Actuators B: Chem.* 109, 2005, 7-12.
6. M. Ferroni, M.C. Carotta, V. Guidi, G. Martinelli, F. Ronconi, M. Sacerdoti, E. Traversa, Preparation and characterization of nanosized titania sensing film, *Sensors and Actuators. B* 77, 2001, 163-166.
7. K. Galatsis, Y.X. Li, W. Wlodarski, E. Comini, G. Faglia, G. Sberveglieri, Semiconductor  $\text{MoO}_3\text{-TiO}_2$  thin film gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chem.* 77, 2001, 472-477.
8. H. Yang, D. Zhang, L. Wang, Synthesis and characterization of tungsten oxide-doped titania

## ۴- نتیجه گیری

هدف این تحقیق بررسی لایه‌های نازک  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  نانو ساختار و نانومتخلخل شده، تهیه شده با روشی نوین از فرایند سل-ژل، برای کاربردهای حسگری گاز بود. سل‌های پایدار با اندازه ذرات نانومتری با استفاده از مواد آغازگر تترا ایزوپروپوکسید تیتانیم و کلرید قلع ساخته شدند. با کنترل پارامترهای فرایند سل-ژل سلی پایدار با اندازه ذرات در رنج ۱۷/۲-۱۹/۳ nm تهیه شد. از سل‌های تهیه شده لایه‌های نازک حساس ساخته شد و خواص فیزیکی و حسگری گاز آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. پودرهای  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  با اندازه بلورک‌های بسیار ریز در حدود ۳ نانومتر در محدوده دمایی  $400-800^\circ\text{C}$  تهیه شدند. ترکیب فازی پودرهای ساخته شده حاوی مخلوط فازی آاناتاز و  $\text{SnO}_2$  در رنج دمایی  $400-600^\circ\text{C}$  و مخلوط فازی روتیل و  $\text{SnO}_2$  در دمایی  $800^\circ\text{C}$  بود. لایه‌های نازک  $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$  با اندازه دانه‌های نانومتری در رنج ۴۰-۲۰ nm بسته به نسبت مولی Sn:Ti ساخته شدند. در تمام حالات لایه‌ها همگن، نانو ساختار و نانومتخلخل بودند. توپوگرافی ستونی مانند مشاهده شد. کلیه حسگرهای ساخته شده قابلیت تشخیص گاز CO در غلظت‌های بسیار پائین (۲۵ppm) برای



- nanocrystallites, *Sensors and Actuators B: Chem.* 57, 2002, 674-678.
9. Y. Li, W. Wlodarski, K. Galatsis, S.H. Moslih, J. Cole, S. Russo, N. Rockelmann, Gas sensing properties of p-type semiconducting Cr-doped TiO<sub>2</sub> thin films, *Sensors and Actuators B: Chem.* 83, 2002, 160-163.
  10. M. R. Mohammadi, M. Ghorbani, M. C. Cordero-cabrera, D. J. Fray, Preparation and characterisation of nanostructural TiO<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> binary oxides with high surface area derived from particulate sol-gel route, *J. Mater. Sci.* 42, 2007, 4976-4986.
  11. W.P. Tai, J.H. Oh, Fabrication and humidity sensing properties of nanostructured TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> thin films, *Sensors and Actuators. B* 85, 2002, 154-157.
  12. Felix Edelman, Horst Hahn, Stefan Seifried, Christian Aloff, Holger Hoche, Adam Balogh, Peter Werner, Katarzyna Zakrzewska, Marta Radecka, Pawel Pasierb, Albert Chack, Vissarion Mikhelashvili, Ghadi Eisenstein, Structural evolution of SnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocrystalline films for gas sensors, *Materials Science and Engineering. B* 69-70, 2000, 386-391.
  13. M. Radecka, A. Kusior, A. Lacz, A. Trenczek-Zajac, B. Lyson-Sypien, K. Zakrzewska, Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> composites for gas sensors, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 108, 2012, 1079-1084.