

تهیه لایه‌های نانوساختاری $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ با روش سل - ژل آبی در کاربرد حسگر گازپیمان فرهپور^۱، محمدرضا محمدی^{۲*}^۱ دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین^۲ 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 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 Sn:Ti و دمای عملیات حرارتی بر ترکیب فازی محصول تاثیر داشته و استحاله فازی آناتاز به روتیل در حضور فاز 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 applicationP. Farahpour¹ and M.R. Mohammadi^{2*}¹Faculty of Mechanical and Industrial Engineering Department, Qazvin Islamic Azad University²Materials 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 Sn:Ti molar ratio and annealing temperature. Moreover, 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 ppm تا 5000 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

۲-۱-۱- 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

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 ۱۷/۲، ۱۸/۰ و ۱۹/۳۰ نانومتر است.

۳-۲- آنالیز XRD

شکل (۲) الگوی تفرق اشعه ایکس پودرهای ST۳۱، TS۱۱ و ST۱۳ آنیل شده در دماهای ۴۰۰°C، ۶۰۰°C و ۸۰۰°C به مدت یک ساعت را نشان می‌دهد. حضور فازهای آناتاز و روتیل و وجود فاز SnO₂ تشکیل اکسید قلع را در سیستم دوتائی TiO₂-SnO₂ اثبات می‌کند. پودرهای TiO₂-SnO₂ آنیل شده در دماهای ۴۰۰°C، ۶۰۰°C و ۸۰۰°C پیکهای مختلفی ارائه داد که به فازهای SnO₂، 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 SnO₂ سبب به تاخیر افتادن استحاله فازی آناتاز به روتیل شده است. اندازه متوسط بلورک پودرهای ST۱۳، ST۱۱ و ST۳۱ آنیل شده در دمای ۶۰۰°C به ترتیب ۲/۳ nm، ۴/۴ nm و ۴/۷ nm اندازه‌گیری شد.

در مقایسه با روش‌های سل - ژل گزارش شده برای تهیه TiO₂-SnO₂ موفق شدیم که این ترکیب را بطور کریستالی در دمای پائین ۴۰۰ 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 ۶/۸۷، ۲/۳۸ و ۰/۹۶ 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.

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_α در رنج ۶۰-۱۰=۲θ مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه بلورک‌ها به کمک معادله دبی-شرر محاسبه شدند.

(معادله ۱)

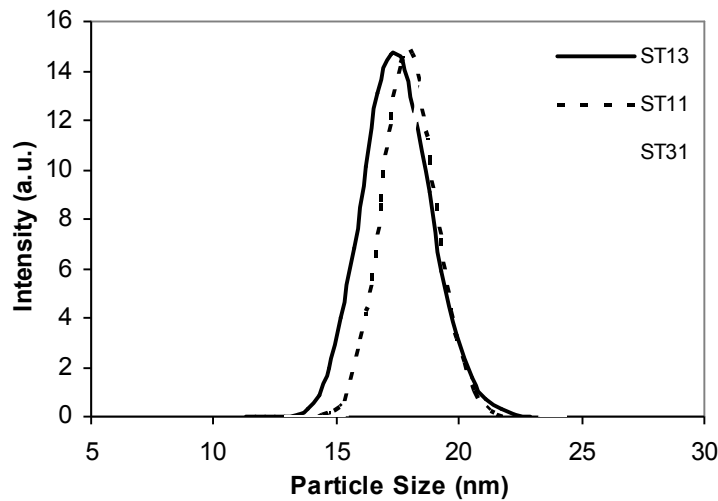
$$d = \frac{k\lambda}{B \cos \theta}$$

در جاییکه d اندازه بلورک‌ها برحسب nm، k عدد ثابت ۰/۹، λ طول موج اشعه X مس (۱/۵۴۰۶ Å)، θ زاویه براگ^۱ برحسب درجه و B عرض کامل در نصف ماکزیمم^۲ (FWHM) پیک مورد نظر است.

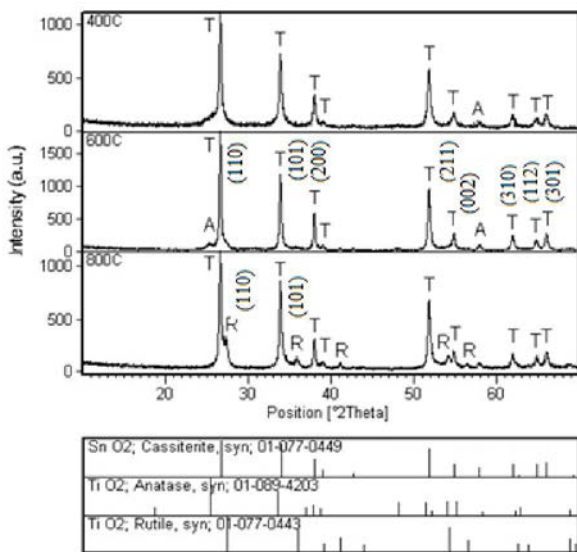
میکروسکوپ TEM به منظور بررسی ساختار درونی نمونه‌ها (شکل و ابعاد بلورک‌ها) استفاده شد. میکروسکوپ TEM مدل JEOL 200CX در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. ریزساختار، توپوگرافی سطحی، ترکیب شیمیایی و همگن بودن، لایه‌های حساس ساخته شده بر روی زیرلایه کوارتز به کمک میکروسکوپ FE-SEM با فاصله کاری ۵ mm بررسی شدند. میکروسکوپ FE-SEM مورد استفاده در این تحقیق مدل JEOL 6340 با حداکثر بزرگنمایی ۳۵۰/۰۰۰ × 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.

¹ - Bragg's Angle

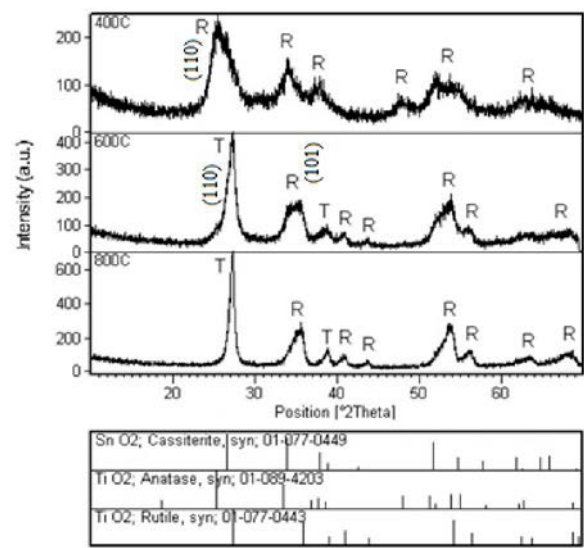
² - Full Width at Half Maximum



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

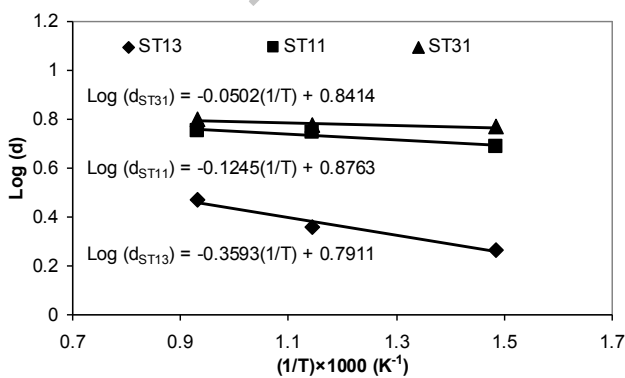


(ج)

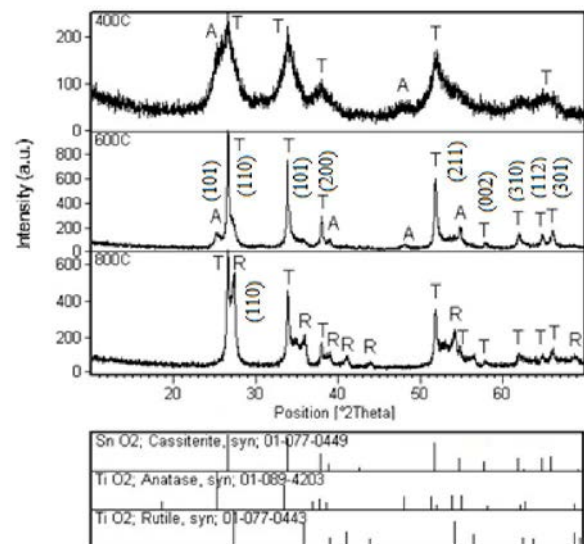


(الف)

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



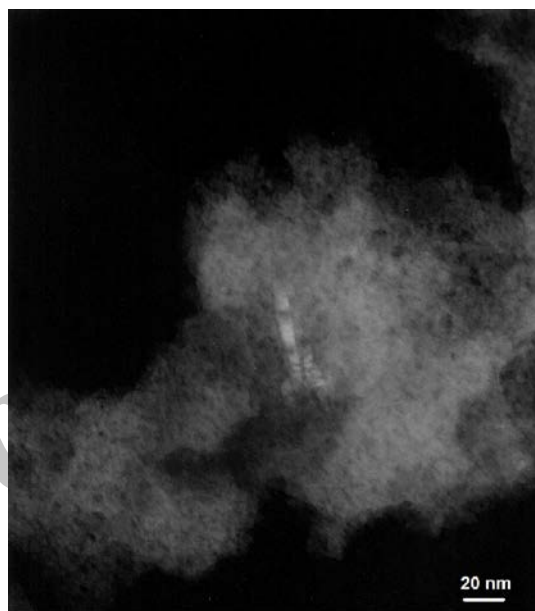
شکل ۳. نمودار اندازه متوسط بلورک برحسب دما برای محاسبه انرژی اکتیواسیون رشد بلورک اکسید دوتائی TiO_2-SnO_2 .



(ب)

۳-۳- آنالیز TEM

شکل (۴) الگوی تفرق منطقه انتخاب شده (SADP) پودر ST13 آنیل شده در دماهای 600°C را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، این پودر یکنواختی بالا در اندازه و شکل ذرات دارد. اندازه متوسط کریستالیت این پودر حدود 3nm 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°C .

۳-۵- آنالیز AFM

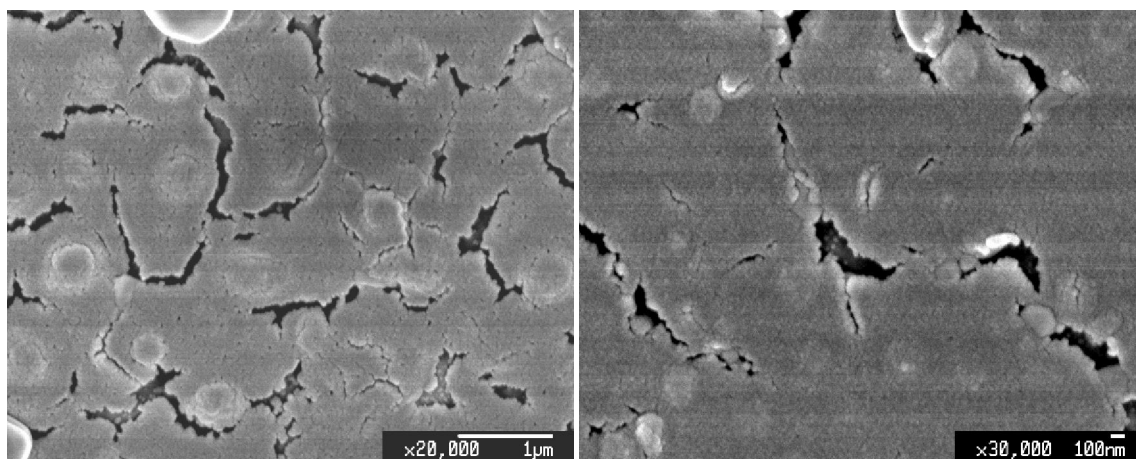
شکل (۶) توپوگرافی دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) لایه ST13 آنیل شده در دمای 600°C را نشان می‌دهد. تصاویر نشان دادند که لایه دارای ساختاری نانومتخلخل، زبر و همگن با دانه‌های 22nm نانومتری می‌باشد. تصویر سه بعدی نشان داد که لایه $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ مورفولوژی ستونی مانند^۱ دارد. دارا بودن اندازه دانه 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

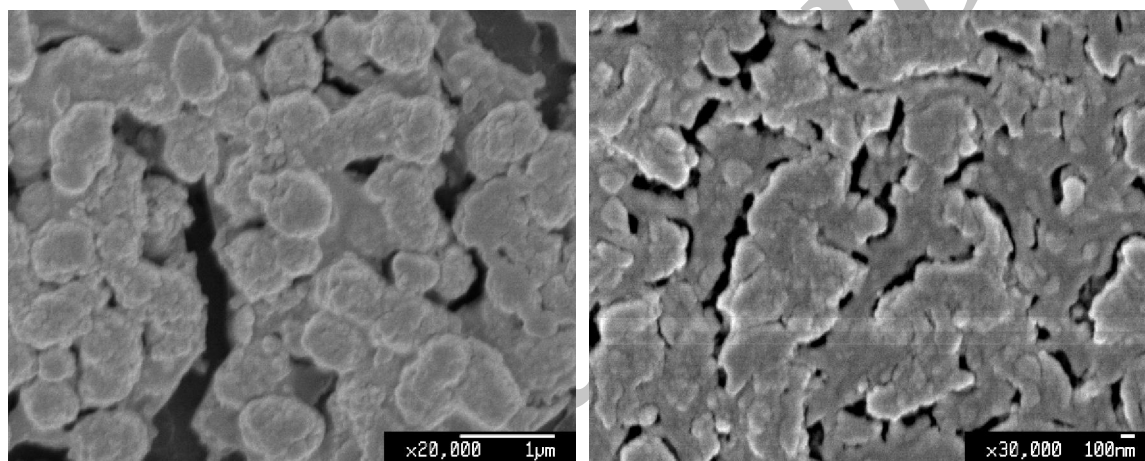
شکل (۷) پاسخ دینامیکی حسگرهای $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ آنیل شده در دمای 600°C به مدت ۱ ساعت را به گاز CO در دمای کاری 200°C و رطوبت نسبی ۳۰ درصد نشان می‌دهد. تمام حسگرها در دمای کاری 200°C پاسخ پایدار، قابل تولید مجدد و قابل اعتمادی به گازهای مورد نظر دارند. میزان پاسخ حسگرها به 400 ppm گاز CO به 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 SnO_2 به لایه 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 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

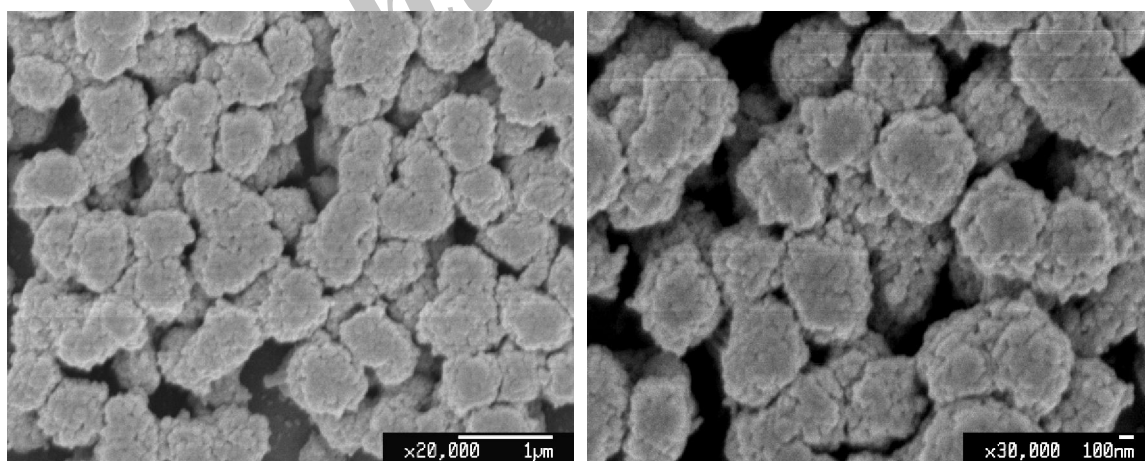
شکل (۵) تصاویر FE-SEM سطح لایه‌های $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ آنیل شده در دمای 600°C را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که لایه‌ها شامل دانه‌های کروی است که سطح زیر لایه‌ها را پوشانده‌اند. تمامی لایه‌ها نانو ساختاری و نانومتخلخل بودند. با افزایش نسبت مولی Sn:Ti میزان تخلخل لایه‌ها افزایش یافت. علت این 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)

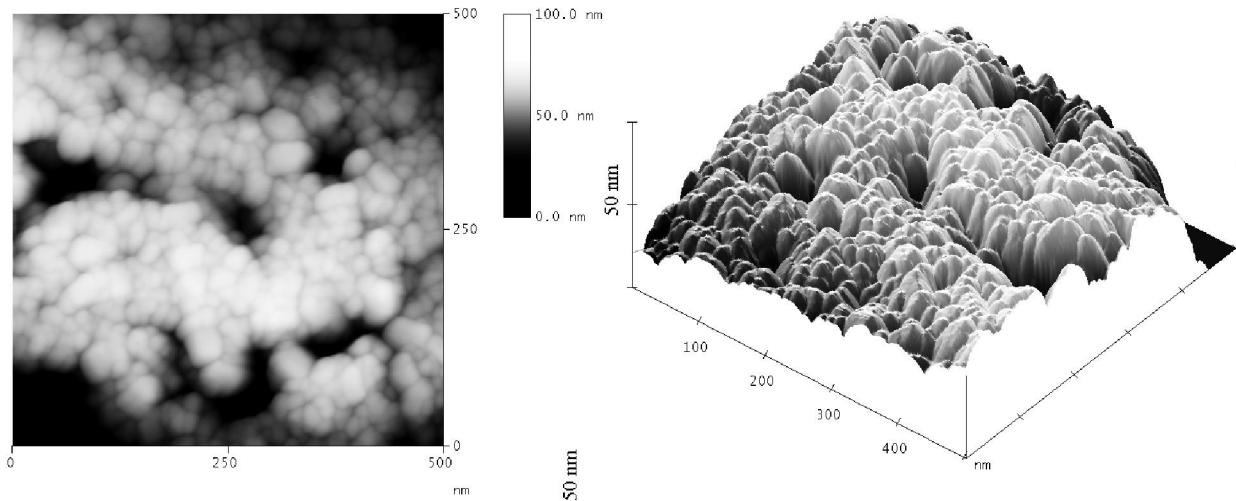


(ب)

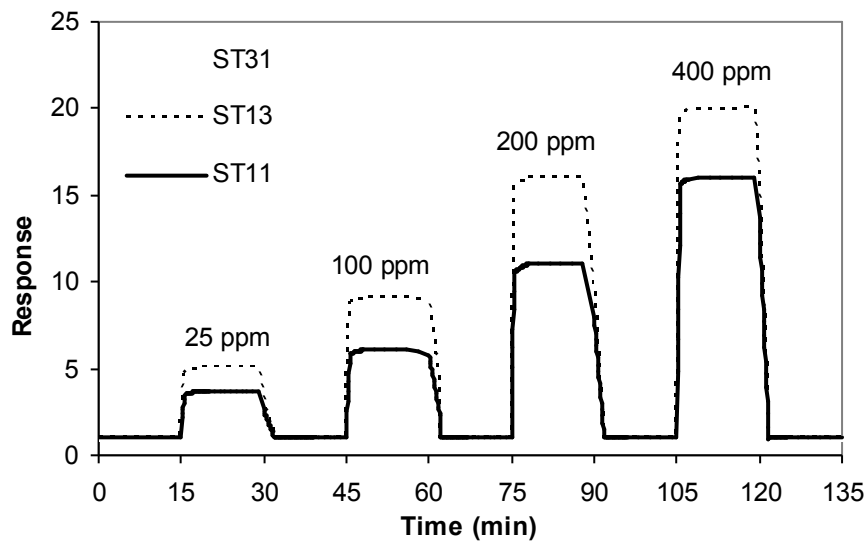


(ج)

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



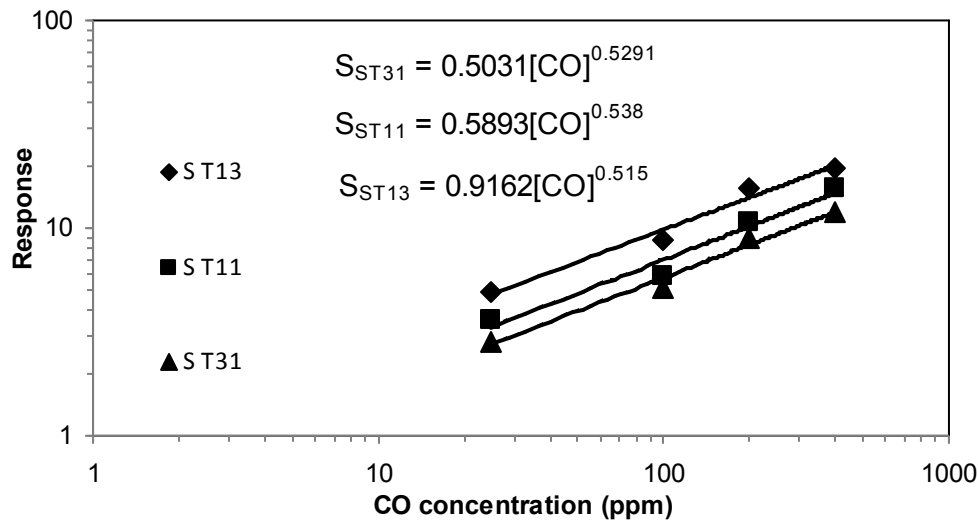
شکل ۶. تصاویر AFM لایه ST13 آنیل شده در دمای 600°C به مدت ۱ ساعت.



شکل ۷. پاسخ الکتریکی لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ آنیل شده در دمای 500°C به مدت ۱ ساعت در دمای کاری 200°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°C به گاز CO در دمای کاری 200°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°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, 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 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 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 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 $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ نانوساختار 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 SnO_2 در رنج دمایی $400-600^\circ\text{C}$ و مخلوط فازی روتیل و SnO_2 در دمایی 800°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 TiO₂ 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 TiO₂-Ga₂O₃ 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 TiO₂-SnO₂ thin films, *Sensors and Actuators. B* 85, 2002, 154-157.
 12. Felix Edelman, Horst Hahn, Stefan Seifried, Christian Aloh, Holger Hoche, Adam Balogh, Peter Werner, Katarzyna Zakrzewska, Marta Radecka, Pawel Pasierb, Albert Chack, Vissarion Mikhelashvili, Ghadi Eisenstein, Structural evolution of SnO₂-TiO₂ 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 TiO₂/SnO₂ composites for gas sensors, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 108, 2012, 1079-1084.

Archive