

ساخت لایه‌های نازک نانو ساختار TiO_2-SnO_2 تهیه شده به روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل به عنوان حسگر اتانول

نرگس بیگ محمدی^۱، غضنفر میرجلیلی^۱ و هادی ملکی^۲

۱. دانشکده علوم پایه، دانشگاه یزد

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۱۶)

چکیده

لایه‌های نازک نانوساختار TiO_2-SnO_2 بر روی زیرلایه شیشه به روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل ساخته شدند. خواص ساختاری سطح، مورفولوژی و عبوراپتیکی لایه‌ها توسط پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و بیناب‌سنج UV/VIS/NIR انجام پذیرفت. ضخامت لایه‌های نازک کمتر از ۳۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. اندازه دانه‌ها در روش باریکه الکترونی ۲۰ و در روش سل ژل ۳۰ نانومتر تخمین زده شد. خواص حسگری لایه‌های نازک نانوساختار در حضور گاز اتانول با آهنگ‌های شارش ۲۴۰۰، ۲۰۰۰ و ۱۸۰۰ cc/min دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. در هردو روش، با افزایش شارش گاز خاصیت حسگری افزایش یافت اما در روش سل ژل خاصیت حسگری به دلیل نقص‌های شبکه و محدودیت مناطق حسگری اندکی کمتر مشاهده شد.

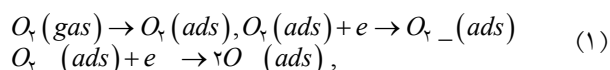
واژه‌های کلیدی: لایه نازک نانوساختار TiO_2-SnO_2 ، باریکه الکترونی، سل ژل، حسگر اتانول

۱. مقدمه

اکسایشی-کاهشی بین گاز هدف و اکسیژن باردار جذب شده روی سطح است [۲]. یکی از بیشترین فعالیت‌ها در زمینه تحقیقات حسگری گاز، کشف مواد جدید به منظور هموارکردن راه برای افزایش خواص حسگری می‌باشد. در این میان اکسیدهای نیمه‌رسانا به دلیل داشتن خواص فیزیکی مناسب به عنوان حسگر گاز گزینه مناسبی هستند [۳]. همچنین یک نیمه‌رسانا با گاف انرژی بالا به دلیل کاربردهای متنوع مانند لایه نشانی اپتیکی، سلول‌های فوتوالکتروشیمی

شناسایی گازهای سمی و قابل اشتعال موضوعی مهم در محیط اطراف است. لایه‌های نازک نیمه‌رسانای اکسید فلزی به دلیل وابستگی رسانایی الکتریکی آنها به گازهای محیطی مانند اکسیژن، مونوکسیدکربن، اکسید نیتروژن و... به عنوان حسگرهای گازی قابل استفاده هستند [۱]. ترکیبات نانوساختار با نسبت سطح به حجم بالا از حساسیت خوبی برخوردار می‌باشند، زیرا فعالیت حسگری یک اندرکنش

لایه در حضور کاهش یا اکسایش گازها است که منجر به تغییر انرژی برای حامل‌های بار آزاد می‌شود. حساسیت حسگرهای لایه نازک نانوکریستالی تحت تأثیر کاهش اندازه ذره است که با نسبت سطح به حجم رابطه‌ای معکوس دارد، در نتیجه حساسیت افزایش می‌یابد، همچنین توپولوژی تخلخل لایه نیز مهم است که تأثیر زیادی روی رفتار حسگری گاز دارد. در بحث حسگری گاز سه نکته اصلی حائز اهمیت است: (۱) خاصیت حسگری حسگر توسط سطح پایه ریزی می‌شود، (۲) تغییر مقاومتی به وسیله نمونه‌ها و مقادیر اکسیژن جذب شده روی سطح حسگر کنترل می‌شود، (۳) اکسیژن جذب شده می‌تواند الکترون‌ها را از سطح گرفته و به شکل‌های متنوع از یون‌های اکسیژن به صورت زیر بیان شود [۳]:



به طور کلی، رفتار حسگری به طور گسترده به جذب و یونیزاسیون روی سطح مواد حسگر بستگی دارد [۷]. در این مقاله، مقایسه‌ای میان روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل و شرایط لایه نشانی برای ساخت لایه‌های نازک به عنوان حسگر گاز اتانول صورت گرفته است.

۲. روش انجام آزمایش

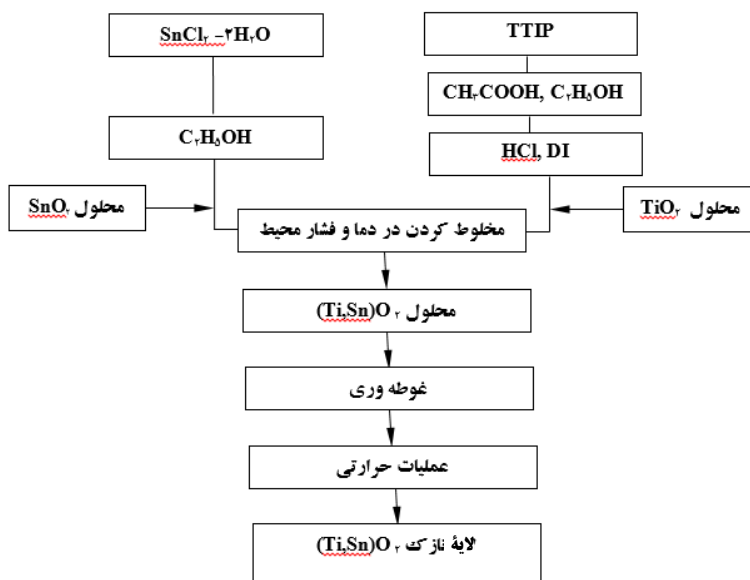
لایه‌های نازک TiO_2-SnO_2 به روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای از جنس سودالایم لایه نشانی شدند. قرص‌های TiO_2-SnO_2 به عنوان چشمه در یک خلأ حدود $1/5 \times 10^{-5}$ تور در محفظه لایه نشانی قرار گرفتند. دمای نمونه‌ها در طی فرایند 170° درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. آهنگ لایه نشانی برابر 1 nm/s بود. ضخامت لایه‌های نازک حدود 300 نانومتر توسط ضخامت سنج کریستال کوآرتز اندازه‌گیری شد. بعد از لایه نشانی همه نمونه‌ها در دمای 400° درجه سانتی‌گراد با آهنگ افزایش دمایی $3/3^\circ \text{C/min}$ به مدت 2 ساعت تحت فرایند بازیخت قرار گرفتند.

شرایط و مواد مورد استفاده در لایه نشانی به روش سل ژل به قرار زیر بود:

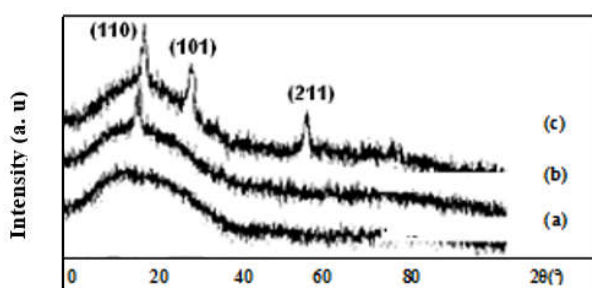
حساس، حسگر گازی و... یک موضوع موردعلاقه برای تحقیق بوده است.

SnO_2 یک نیمه‌رسانای نوع n با جاهای خالی اکسیژن و Sn^{+4} بینابینی می‌باشد. در نتیجه خواص اپتیکی، الکترونیکی و ساختاری با پایداری شیمیایی خوب، دی اکسید قلع را به عنوان یک حسگر گاز و داشتن حساسیت بالا، قطعه اپتوالکترونیکی و جمع‌کننده (کلکتور) خورشیدی مورد توجه می‌سازد [۴]. TiO_2 میان همه اکسیدهای نیمه‌رسانا بیشترین پایداری شیمیایی را به خصوص در محیط‌های خشن و دمای بالا از خود نشان می‌دهد و از این رو مورد توجه ویژه قرار گرفته است. همچنین لایه تیتانیوم به علت خصوصیات نیمه‌رسانایی خاص، برای ساخت حسگرهای گازی و سرامیک متخلخل و حسگرهای رطوبت استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد ترکیب TiO_2 با SnO_2 خصوصیات بهتری نسبت به هر دو حسگر داشته باشد [۵، ۶]. لایه نازک نیز خواص حسگری بهتری نسبت به تیتانیوم تنها دارد [۷]. حسگرهای لایه نازک دارای حساسیت بالا، هزینه ساخت پایین و مصرف توان پایین در مقایسه با حسگرهای پلی کریستال متخلخل دارد [۸]. سیستم‌های اکسیدهای ترکیبی می‌تواند به عنوان موادی حساس به گاز استفاده شوند [۹]. خواص لایه‌های نازک به شدت تحت تأثیر روش ساخت است [۴]. نوع لایه نشانی و شرایط انجام آن بر مورفولوژی سطح، ریزساختار و آهنگ شارش نقص‌های لایه نازک مؤثر است [۸]. این لایه‌ها به وسیله روش‌های سل ژل، تف جوشی، کندوپاش یونی، کندوپاش باریکه الکترونی، تبخیر و CVD تولید می‌شوند [۸، ۱]. فرایند سل ژل فواید بسیار زیادی مانند همگنی بسیار بالا، قابلیت کنترل ضخامت، لایه نشانی روی سطوح بزرگ و پیچیده و مقرون به صرفه بودن در مقایسه با روش‌های دیگر دارد [۱].

حسگر بخار اتانول به این دلیل در میان حسگرهای گازی مهم است که می‌توان از آن در پزشکی و صنایع غذایی مانند آزمون‌های تنفسی و الکل در رانندگان و نظارت بر ترکیب شیمیایی مواد و... استفاده کرد [۹]. حسگری گاز نیمه‌رساناها بر مبنای تغییرات کاهشی در راستای مرزدهانه‌های



شکل ۱. دیاگرام فرایند برای تولید لایه نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ به روش سل ژل.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در روش سل ژل (a,b) و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در روش باریکه الکترونی (c).

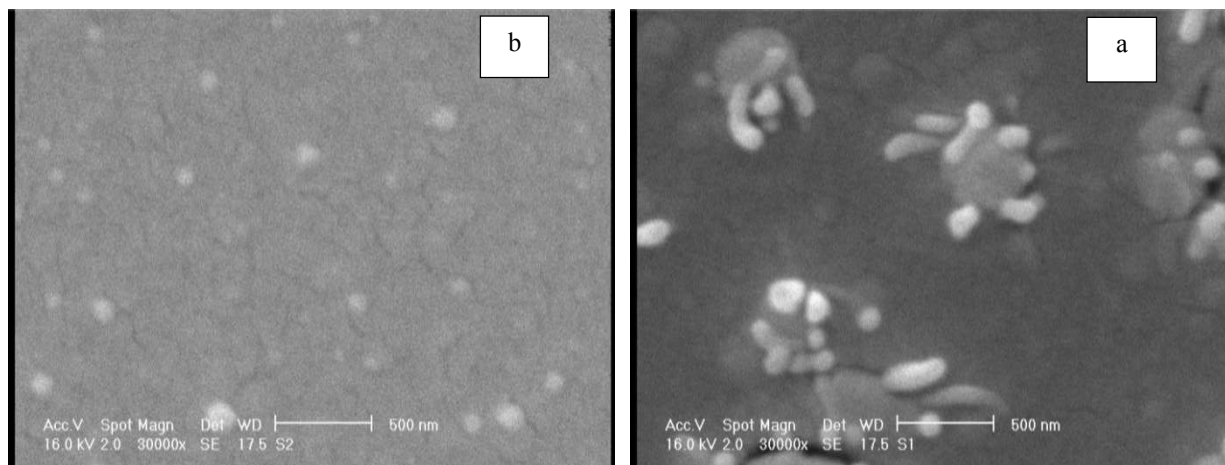
دقیقه خشک شدند. سپس همه نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. ضخامت لایه‌ها حدود ۳۰۰ نانومتر توسط دکتک^۱ تخمین زده شد. دیاگرام فرایند در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. خواص ساختاری

به منظور مطالعه مورفولوژی و خواص بلوری لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ بر روی زیرلایه شیشه از تکنیک‌های XRD و SEM بهره گرفته شد. شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک ساخته شده به روش سل ژل در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰

برای تهیه محلول ابتدا ۴/۵ گرم $\text{SnCl}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ در ۲۸/۵۶ میلی‌لیتر اتانول حل شد. به همین ترتیب، محلول TiO_2 با مخلوط کردن ۷ میلی‌لیتر تیتانیوم تترا‌ایزوپروپیل (TTIP) و ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول، ۲۸ میلی‌لیتر اسید نیتریک، ۱/۳۲ میلی‌لیتر CH_3COOH و آب DI به دست آمد. سپس محلول‌های TiO_2 و SnO_2 به مدت ۲۴ ساعت در اتمسفر قرار گرفتند. بعد از آن به مدت ۱ ساعت با یکدیگر مخلوط شدند. نهایتاً برای محلول حاصل مدت زمان ۲۴ ساعت زمان پیرسازی در نظر گرفته شد. لایه‌ها روی زیرلایه شیشه‌ای سودالایم با آهنگ لایه نشانی 10 cm min^{-1} به روش غوطه‌وری که یکی از روش‌های متداول در سل ژل است، ساخته شدند. لایه‌ها در اتمسفر در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵

۱. Dektak



شکل ۳. تصاویر SEM لایه‌های $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ ساخته شده به روش باریکه الکترونی (a) و سل ژل (b).

اکسیژن بیشتری جذب می‌کند [۱۱].

مورفولوژی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM گرفته شد. شکل ۳ تصاویر سطح لایه‌های نازک به روش باریکه الکترونی در دمای بازپخت ۴۰۰ و سل ژل در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. مورفولوژی و ناهمواری سطح لایه‌های نازک به وضوح متفاوت است. در شکل ۳ قسمت a قرارگیری ذرات به گونه‌ای است که منافذی بین ذرات ایجاد شده است و ذرات به صورت چندتایی کنار هم تشکیل یک ذره واحد با ابعاد بزرگ‌تر و دارای تخلخل بیشتر را داده‌اند. طبق شکل منافذ مذکور در سطح لایه توزیع شده است. این منافذ مکان‌های مهمی هستند، زیرا می‌توانند نقشی حیاتی در فرایند جذب گاز ایفا کنند و بنابراین حساسیت لایه‌های اکسیدی را تحت تأثیر قرار دهند. در شکل ۴ قسمت b، توزیع ذرات در سطح لایه یکنواخت بوده و ذرات به صورت منفرد تحت فاصله نانومتری از هم قرار گرفته‌اند و آنگونه که در قسمت a مشاهده شد قرارگیری به صورت مجموعه‌ای وجود نداشت.

۴. خواص اپتیکی

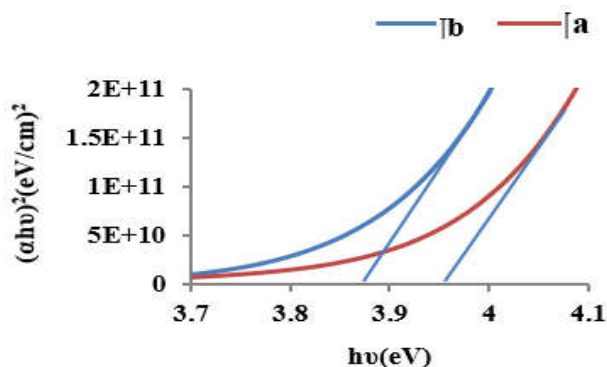
هیچ ماده‌ای در همه بسامدهای اپتیکی شفاف نیست و بنابراین مقداری ضریب جذب وجود خواهد داشت که طبق فرمول لمبر قابل محاسبه است [۱۲]:

درجه سانتی‌گراد است. قسمت c الگوی پراش پرتو ایکس لایه نازک آماده شده به روش باریکه الکترونی در دمای بازپخت ۴۰۰ درجه می‌باشد. طبق شکل لایه‌ها در روش سل ژل در دمای ۴۰۰ درجه آمورف بودند. به همین دلیل یک افزایش دمای ۱۰۰ درجه روی لایه‌ها (با توجه به محدودیت دمای قابل اعمال روی زیرلایه) اعمال شد. در شکل درجه کریستالی با افزایش دما از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بهبود یافت. جهت ترجیحی در راستای صفحه (۱۱۰) در هر دو روش وجود داشت. طیف XRD لایه‌ها توافق خوبی با داده‌های پراش JCPDS، (۲۱-۱۲۵۰) برای SnO_2 و (۲۱-۱۲۷۶) برای روتایل TiO_2 دارد.

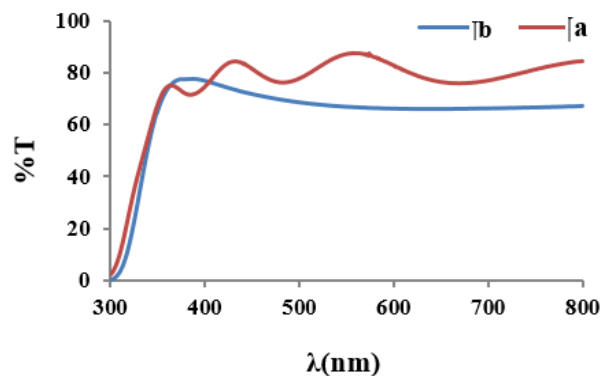
طبق رابطه شرر که در آن λ طول موج پرتو ایکس، B پهنای قله در ارتفاع نیم بیشینه و θ زاویه پراش است [۱۰].

$$D = \frac{(\lambda / \sin \theta)}{B \cos \theta}$$

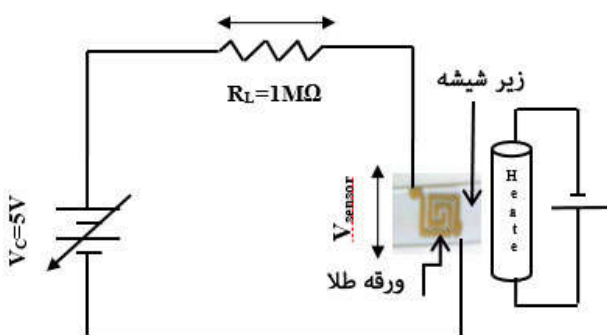
میانگین اندازه دانه برابر ۲۰ و ۳۰ نانومتر به ترتیب برای روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل تخمین زده شد. در روش باریکه الکترونی به دلیل بهبود اندازه دانه چگالی مرزدهانه‌ها کمتر از وقتی است که لایه‌های نازک به روش سل ژل تهیه می‌شدند. این بهینه‌سازی ساختاری نقش مهمی در بهبود یا بهینه کردن خاصیت حسگری حسگرهای SnO_2 تزیق شده با TiO_2 دارد. در حسگر گاز، اندازه کوچک دانه به طور گسترده فعالیت سطحی را افزایش داده و با افزایش مناطق سطحی یون‌های



شکل ۵. منحنی $(\alpha h\nu)^2 (\text{eV}/\text{cm})^2$ بر حسب $(h\nu)$ برای لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ ساخته شده به روش باریکه الکترونی (a) و سل ژل (b).



شکل ۴. منحنی عبور نور لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ ساخته شده به روش باریکه الکترونی (a) و سل ژل (b).



شکل ۶. نحوه قرارگیری حسگر لایه نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در مدار الکتریکی.

فاکتورها شامل اندازه، بهبود خاصیت کریستالی لایه با فرایند بازپخت، ضخامت لایه، شرایط لایه نشانی و pH محلول است [۱۲]. مطابق شکل ۵ گاف انرژی لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل به ترتیب برابر ۳٫۹۶ و ۳٫۸۷ الکترون ولت تخمین زده شد. دلیل این امر بالا بودن گاف انرژی SnO_2 نسبت به TiO_2 است. مواد با گاف انرژی بالا معمولاً به صورت کریستالی رشد می‌کنند. بنابراین، گاف انرژی بزرگ‌تر ممکن است به دلیل ساختار بلوری و میزان عبور نور باشد [۱۴].

۵. سیستم حسگری

به منظور بررسی خاصیت حسگری لایه نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در حضور گاز اتانول از سیستم استاتیکی بهره گرفته شد. یک جفت الکتروود طلا مطابق الگوی طراحی شده در شکل ۶، به

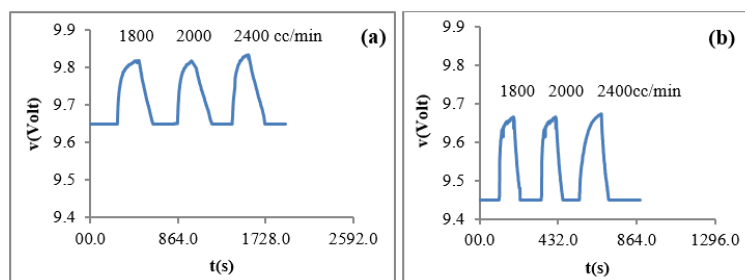
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right), \quad (2)$$

T و d به ترتیب میزان عبور و ضخامت هستند. عبور با استفاده از بیناب‌سنج UV/VIS/NIR تعیین شد. شکل ۴ منحنی عبور نور لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ لایه نشانی شده به روش‌های باریکه الکترونی و سل ژل را نشان می‌دهد. در این طیف، تداخلات اپتیکی نمایان است، دلیل این امر بازتاب‌های متعدد تابش الکترومغناطیسی بین لایه و زیرلایه است. همچنین یک افتان تیز در محدوده طول موجی ۳۵۵ نانومتر به دلیل جذب زیرلایه وجود داشت [۱۳]. این کاهش سریع می‌تواند به انتقال اکسایتون نیز مربوط باشد [۱۴]. عبور اپتیکی حدود ۸۰٫۷٪ در روش باریکه الکترونی و ۶۷٫۹٪ در روش سل ژل به دست آمد. کاهش میزان عبور در روش سل ژل می‌تواند به دلیل حضور TTIP و شکستگی بالای محلول باشد. در روش سل ژل، لبه جذب به آرامی به سمت طول موج‌های بالاتر جابه‌جا شده و کمی تیز شده که ممکن است به دلیل حضور بلورهایی با اندازه بزرگ‌تر و افزایش پراکندگی به دلیل ناهمواری سطح باشد [۱۳].

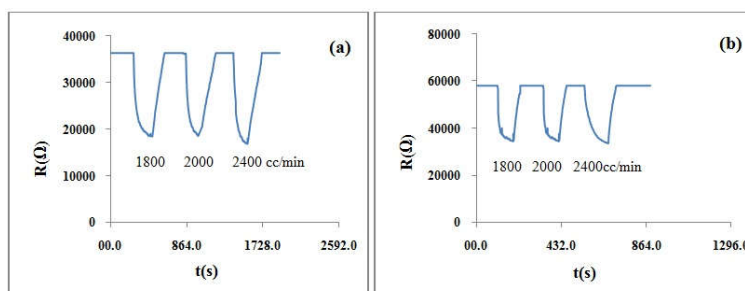
ضریب جذب α برای گذار مستقیم $n=2$ تابعی از شدت انرژی فوتون $h\nu$ است و طبق رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$(\alpha h\nu)^n \approx (h\nu - E_g), \quad (3)$$

E_g گاف انرژی است. گاف انرژی از $(\alpha h\nu)^n$ بر حسب نمودار $h\nu$ به دست می‌آید. گاف انرژی یک نیم‌رسانا، تحت تأثیر چند عامل است و بنابراین مقداری قطعی نیست. این



شکل ۷. ولتاژ الکتریکی بر حسب زمان لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در حضور آهنگ شارش‌های مختلف گاز اتانول (۲۴۰۰ و ۲۰۰۰ و ۱۸۰۰) باریکه الکتریکی (a) و سل ژل (b).



شکل ۸. مقاومت الکتریکی بر حسب زمان لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در حضور آهنگ شارش‌های مختلف گاز اتانول (۲۴۰۰ و ۲۰۰۰ و ۱۸۰۰) باریکه الکتریکی (a) و سل ژل (b).

جذب اکسیژن بیشتری را روی سطح ایجاد می‌کنند و در نتیجه به مقاومت کمتری در مواد منجر می‌شود و حساسیت به دلیل تغییر مهم در مقاومت بالا می‌رود [۱۵].

پاسخ یک حسگر به گاز به صورت فرمول زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$S = R_g / R_a \quad (4)$$

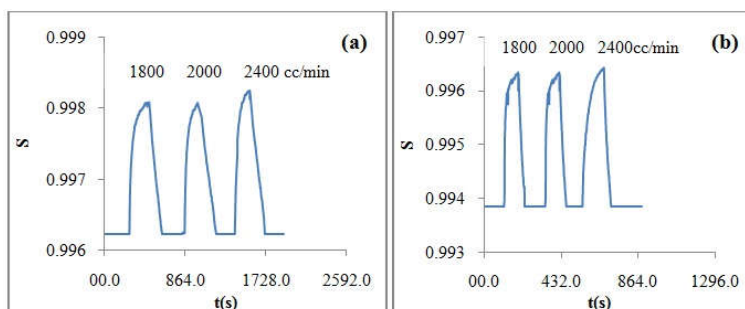
تغییرات پارامتر مذکور برای لایه نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ به عنوان تابعی از زمان برای اتانول، برای هر دو روش باریکه الکترونی a و سل ژل b، در شکل ۹ نشان داده شده است. در روش سل ژل خاصیت حسگری اندکی کمتر است. نقص‌های شبکه مکان‌های مناسبی برای مولکول‌های هوا می‌باشند، در نتیجه مقاومت لایه به وسیله محبوس کردن الکترون‌ها توسط مولکول‌های اکسیژن هوا افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار ممکن است به دلیل محدودیت مناطق حسگری فعال باشد. آهنگ جذب شیمیایی و در نتیجه حساسیت نیز کمتر می‌شود [۱۷].

کاهش تدریجی در واکنش حسگری به دلیل رشد اندازه ذره

روش تبخیر حرارتی به ضخامت ۱۰۰ نانومتر بر روی لایه پوشش دهی شد. نمونه حاضر به دو میله متصل شده و در مدار الکتریکی مطابق شکل قرار گرفت.

آهنگ شارش آزمون گاز در طی فرایند برابر مقادیر ۲۴۰۰، ۲۰۰۰ و ۱۸۰۰ cc/min در نظر گرفته شد. ولتاژ مدار برابر ۵ ولت، ولتاژ خروجی (V_{out}) مربوط به مقاومت موجود در مدار و دمای کاری حسگر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. شکل‌های ۷ و ۸ ولتاژ و مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک را به عنوان تابعی از زمان در هر دو روش در حضور آهنگ شارش‌های مختلفی از گاز اتانول نشان می‌دهند. مطابق شکل ولتاژ با نفوذ گاز بالا رفته و به سرعت با کاهش گاز به مقدار اولیه‌اش بر می‌گردد.

در شکل ۸، مقاومت حسگر تحت حضور گاز افزایش یافت. این رفتار برگشتی می‌تواند به تغییر اندازه دانه مرتبط باشد. اکسیژن در هوا توسط الکترون‌های سطح به خاطر الکترون‌گاتیویته بالای آن محبوس می‌شود. الکترون‌های بیشتر



شکل ۹. تغییر عامل حساسیت لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در حضور آهنگ شارش‌های مختلف گاز اتانول (۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ cc/min) باریکه الکترونیکی (a) و سل ژل (b).

نازک تحت شرایط مختلف لایه نشانی به آسانی با تغییر ترکیب شیمیایی، ریزساختار و مورفولوژی سطح تغییر کردند. میانگین اندازه دانه در روش باریکه الکترونی کمتر از روش سل ژل بود. میزان عبور نور یا به عبارتی شفافیت لایه‌ها در روش سل ژل به دلیل حضور TTIP کمتر بود. بنابراین پراکندگی به دلیل ناهمواری سطح افزایش یافت. آزمایش‌های حسگری نشان داد حسگرهای لایه نانو ساختار $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ در روش باریکه الکترونی از عملکرد بهتری برخوردار بودند. حساسیت خوب را می‌توان به دلیل توزیع تخلخل روی سطح و داشتن مناطقی با نسبت سطح به حجم بالا برای فرایندهای جذب و واجذب دانست. فعالیت سطحی نیز به دلیل اندازه کوچک دانه، سپس جذب بیشتر یون‌های اکسیژن در سطح بود. حساسیت در روش سل ژل نیز با توجه به تعدد نانوذرات در سطح لایه در مقیاس نانومتری قابل مقایسه با روش دیگر مشاهده شد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که روش موفق سل ژل، تولید مواد نانوکریستالی ارزان به شیوه‌ای ساده را ارائه می‌دهد.

است. یکی از عامل‌های مهم برای واکنش حسگری اتانول نسبت سطح به حجم بالای نانو ساختارها است. وقتی اندازه ذره افزایش یابد، نسبت سطح به حجم کاهش خواهد یافت، در نتیجه واکنش حسگر به گاز کم می‌شود. خواص حسگری گاز غالباً توسط جذب سطحی با ایجاد انرژی سطحی قابل کنترل است، بنابراین رسانش نیز تغییر می‌کند. در حالت‌های مختلف جذبی، مولکول‌های گاز وابستگی‌های الکترونی متفاوت دارند که منجر به رسانش متفاوت حسگر بعد از جذب ترکیبات ارگانیک فرار می‌شود. این اثر انتقال الکترون را بین مولکول گاز و سطح ماده حسگری تحریک کرده و بنابراین حساسیت حسگر افزایش خواهد یافت [۱۸].

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش‌های لایه نشانی باریکه الکترونی و سل ژل برای ساخت لایه‌های نازک $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ بهره گرفته شد و ریزساختار و خاصیت حسگری نمونه‌ها بررسی شد. لایه‌های

مراجع

1. F Edelman, H Hahn, S Seifried, ChAlof, and H Hoche, *Materials Science and Engineering B* **69** (2000) 386.
2. Ch SMoon, H R Kim, G Auctherloni, J Drenna, and J H Lee, *Sensors and Actuators B* **131** (2008)556.
3. W Zeng, T Liu, and Z Wang, *Physica E* **43** (2010) 633.
4. V Geraldo, L V A Scalvi, M J Saeki, T J Pereira, and C V Santilli, *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo* **2** (2003).
5. Z M Shi and L Yan, *Journal of Non-Crystalline Solids* **354** (2008) 4654.
6. F Edelman, H Hahn, S Seifried, and C Alof, *et al., Materials Science and Engineering B* **69** (2000) 386.
7. Z M Shi and L Yan, *Journal of Non-Crystalline Solids* **354** (2008) 4654.
8. M Mehrabian, K Mirabbaszadeh, and H Afarideh, *Phys. Scr.* **88** (2013).
9. J Tauc, R Grigorvici, and A Bancu, *Phys. Status Solid* (1966) 15627.

14. M H Yeh, W S Hwang, G B Lee, Y M Lu, *Materials Transactions* **45** (2004) 3318.
15. R J Wu, C Y Chena, M H Chena, Y L Sun, *Sensors and Actuators B* **123** (2007) 1077.
16. M Parmar, K Rajanna, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* **4** (2011) 710.
17. Z Wen, L Tianmo, *Physica B* **405** (2010) 1345.
10. H Ching Lee and W S Hwang, *Applied Surface Science* **253** (2006) 1889.
11. N Talebian and M R Nilforoushan, *Thin Solid Films* **518** (2010) 2210.
12. S Ray, P S Gupta, and G Singh, *Journal of Ovonic Research* **6** (2010) 63.
13. S Mahanty, S Roy, S Sen, *Journal of Crystal Growth* **261** (2004) 77.