

بررسی تاثیر فرکانس میدان الکتریکی غیریکنواخت بر ایجاد ترک در جریان لایه‌نشانی الکتروفوریتیک نانوذرات اکسید روی با هدف ساخت حسگر گاز CO

ساسان قشقایی*، احسان مرزبان‌راد، بابک رئیسی و نادى شجاعى

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۰۱/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۱/۰۳/۰۱

چکیده

در پژوهش حاضر، از اعمال میدان الکتریکی غیریکنواخت به عنوان روشی ساده و کم هزینه جهت انتقال و جابجایی نانوذرات سرامیکی با هدف ساخت حسگر گاز استفاده گردید. بدین منظور، لایه‌نشانی الکتروفوریتیک نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای هم صفحه از جنس طلا در ولتاژ ۳۵ V و زمان ۱۵ min در محیط استون خالص به منظور دستیابی به لایه‌ای بدون ترک به انجام رسید. تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری (OM) و الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که در فرکانس ۱ Hz، لایه تشکیل شده در فضای بین دو الکترودهای دارای ترک می‌باشد. با افزایش فرکانس به ۱۰۰ Hz و ۱ kHz به دلیل تغییر مکانیزم نشست، از حضور ذرات در فضای بین دو الکترودها کاسته شده تا در ۱۰ kHz، با توجه بوجود نیروی دی الکتروفورس به عنوان نیروی غالب وارد بر گشتاور دو قطبی ذرات معلق، ذرات با قرار گرفتن در امتداد خطوط میدان الکتریکی فاصله بین دو الکترودها را با تشکیل زنجیره به طور کامل پل زده و لایه‌ای عاری از ترک تشکیل دهند. نتایج آزمون حسگری گاز CO بر روی حسگر ساخته شده در فرکانس بهینه نشانگر پاسخی روشن، پایدار و تکرارپذیر در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۵۰۰ °C است.

واژه‌های کلیدی: میدان الکتریکی غیریکنواخت، سنسور گازی، منواکسید کربن، نانوذرات اکسید روی.

۱- مقدمه

امکان وجود دارد که از طریق اعمال یک نیروی خارجی نانوذرات را برای تولید قطعات حتی پیچیده به سمت مکان‌های مناسب هدایت نمود. به این ترتیب، به حرکت در آوردن هدفمند ذرات به سمت مکان‌های مشخص عنوان یک فرآیند کلونیدی موثر و متنوع برای تولید ارزان و انبوه پوشش از سوسپانسیون‌هایی با غلظت کم مورد توجه قرار می‌گیرد [۱]. اگرچه از عمر مطالعات صورت گرفته بر روی حرکت ذرات تحت میدان‌های الکتریکی

در حوزه‌های مربوط به نانوذرات (Nanoparticles) سرامیکی، روش‌های کلونیدی بر خلاف سایر روش‌ها از جمله تبخیر گرمایی (Thermal Evaporation)، نشست از طریق پرتو الکترونی (E-beam Deposition)، پاشش پلاسمایی (Plasma Spray) و غیره که با برخورد تصادفی ذرات با یکدیگر و نیز با سطح الکترودها همراه هستند، این

*عهدہ‌دار مکاتبات: ساسان قشقایی

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، دورنگار: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، پست الکترونیکی: sasan.ghashghai@gmail.com

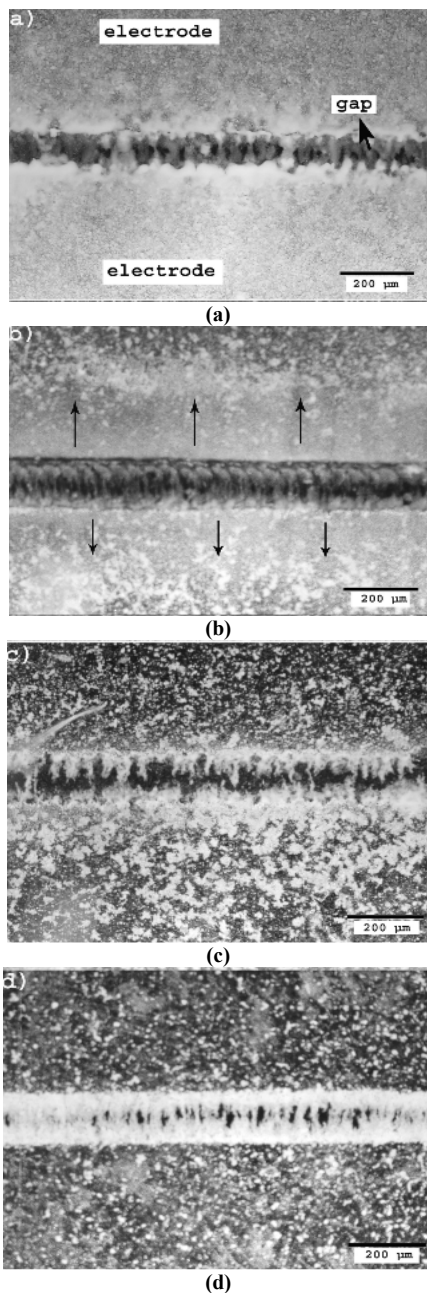
می‌توان کیفیت و الگوی نشست ذرات را با هدف دستیابی به لایه‌ای با حداقل عیوب (ترک و حفره) بالا برده و از ایجاد اختلال در خواص الکتریکی-نوری ابزار ساخته شده جلوگیری نمود. نانوساختارهای اکسید روی به عنوان یک اکسید سرامیکی با شکاف انرژی حدود $3/37 \text{ eV}$ همواره در ساخت ابزارآلات الکترونیکی به ویژه حسگرهای گازی مورد توجه بوده‌اند. مکانیزم عملکرد حسگرهای مقاومتی به تغییر مقاومت ماده حسگر در حضور مقدار معینی از گاز هدف بستگی دارد [۱۰]. در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت توسعه روش‌های کم هزینه و قابل کنترل در ساخت ابزار آلات الکترونیکی، کیفیت لایه ایجاد شده در فرکانس‌های مختلف بر روی الکترودهای هم صفحه از جنس طلا در محیط استون خالص با هدف دستیابی به لایه‌ای بدون ترک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، میزان حساسیت حسگر ساخته شده در شرایط بهینه نشست به حضور مقادیر مختلف از گاز CO بررسی شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

جهت لایه‌نشانی نانوذرات اکسید روی از دو الکترودهم صفحه موازی بر روی یک پایه نارسانا استفاده شد. برای ساخت الکتروده از خمیر طلای تجاری (Degussa, GZ117) استفاده شد. لایه طلا ابتدا خشک و سپس از طریق پخت به مدت یک ساعت در دمای 610°C پایدار شد. در ادامه، شیاری با پهنای حدود $170 \mu\text{m}$ با استفاده از پرتوی لیزر بر روی لایه طلای بدست آمده ایجاد گردید. پیش از انجام لایه‌نشانی الکتروفوریتیک، ابتدا سوسپانسیونی با غلظت $0/5 \text{ g/lit}$ از نانوذرات اکسید روی (M.K. Impex Canada) با قطر متوسط حدود 30 nm در محیط استون خالص تهیه گردید. عملیات آماده‌سازی شامل 45 min هم‌زدن مغناطیسی با دور متوسط و 15 min قرار گرفتن در حمام مافوق صوت به منظور باز کردن ذرات پودر از یکدیگر و پراکنده‌سازی آن در داخل محیط به انجام رسید. پس از تعیین فرکانس بهینه جهت دستیابی به لایه بدون ترک، لایه‌نشانی در شرایط بهینه بر روی الکترودهای شانه‌ای از جنس پلاتین نیز انجام شد. جهت انجام لایه‌نشانی

مستقیم (DC) بیش از 100 سال می‌گذرد، تنها در طول چند دهه اخیر به نحوه رفتار ذرات در میدان‌های متناوب (AC) به طور دقیق پرداخته شده است [۲،۳]. میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت متناوب به طور گسترده‌ای به منظور جداسازی و شناسایی ذرات بیولوژیکی میکرونی به کار گرفته شده است [۴،۵]. باید توجه داشت که در حوزه نانوذرات سرامیکی، تمرکز اصلی این تحقیقات بر نانوساختارهای اکسید فلزی بوده و عموماً با هدف ساخت لایه‌های ضخیم و حسگرهای گازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶،۷]. به طور کلی، جابجا کردن (manipulation) و سر هم نمودن (assembly) کنترل شده نانوساختارها از جمله مهمترین چالش‌ها بر سر راه ساخت ابزارآلات الکترونیکی از این مواد به شمار می‌آید. در این رابطه، با اعمال میدان‌های غیریکنواخت AC در مقایسه با روش‌های پرهزینه و بعضاً پیچیده‌ای هم چون رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار و جابجا کردن ذرات به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی به راحتی می‌توان از طریق تغییر پارامترهای میدان الکتریکی اعمالی مانند شدت میدان و فرکانس، نحوه نشست و جهت‌گیری ذرات را کنترل نمود [۷]. ما در کارهای گذشته خود، لایه‌نشانی الکتروفوریتیک فرکانس پایین ذرات سرامیکی را به عنوان روشی ساده و کم هزینه جهت نشست ذرات بر سطح هر دو الکتروده و نیز فضای بین دو الکتروده گزارش کردیم [۴]. همچنین، با اعمال میدان الکتریکی مناسب AC بر نانوذرات معلق اکسید تنگستن در همان محدوده فرکانس‌های پایین اقدام به ساخت حسگر گازی NO_2 نمودیم [۸]. در فرکانس‌های کمتر از حدود 10 Hz ، نیروهای کلمبی وارد بر بار سطحی ذره به همراه جریان سیال ایجاد شده در مجاورت الکتروده نقش اصلی را در حرکت ذره ایفا می‌کنند [۹]. این در حالی است که با افزایش فرکانس به بالاتر از 1 kHz ، گرادیان میدان الکتریکی و نیروی الکتریکی وارد بر گشتاور دو قطبی ذره پلاریزه شده سهم اصلی را در به حرکت در آمدن خواهند داشت. علاوه بر این، بسته به فرکانس میدان اعمالی، نوع خاصی از جریان سیال با عنوان الکترواسمز جریان متناوب ذرات را به دور از لبه‌ها و به سمت سطح الکتروده هدایت می‌کند. بنابراین، با کنترل پارامترهای میدان الکتریکی

پایین ایفا می‌کند. شکل ۲a تصویر SEM الگوی نشست بدست آمده در ۱ Hz را به نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری الگوی نشست ذرات در فرکانس‌های (a) ۱، (b) ۱۰۰، (c) ۱۰۰۰ و (d) ۱۰۰۰۰ Hz.

مشاهده می‌شود که ترک‌هایی در نقاطی از لایه بویژه در محل اتصال آن به الکتروود ایجاد گردیده است. با توجه به ضخامت زیاد لایه تشکیل شده، ایجاد ترک‌ها را می‌توان به سرعت بالای تبخیر استون پس از خارج کردن نمونه از

الکتروفورتیک، به ترتیب از یک تقویت کننده ولتاژ (HP 6826 A) و سیگنال ژنراتور (RIGOL DG 1022) جهت اعمال میدان الکتریکی متناوب با ولتاژ ۳۵ V و فرکانس‌های ۱ Hz، ۱۰۰ Hz، ۱ kHz و ۱۰ kHz استفاده شد. شکل موج اعمالی سینوسی و زمان هر آزمون ۱۵ min در نظر گرفته شد. جهت مشاهده میکروساختار لایه تشکیل شده از میکروسکوپ نوری (Olympus DP72) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi S4160) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر فرکانس بر الگوی نشست

الگوی نشست بدست آمده از لایه نشانی الکتروفورتیک نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای هم صفحه طلا در ولتاژ ۳۵ V و زمان ۱۵ min در محدوده فرکانس ۱ Hz تا ۱۰ kHz در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در فرکانس ۱ Hz (۱a) ذرات بر روی لبه الکترودها تجمع نموده و نیز تا اندازه‌ای فضای بین دو الکتروود (گپ) را پر کرده‌اند. این در حالی است که با افزایش فرکانس به ۱۰ kHz (۱b)، از حضور ذرات در لبه‌ها کاسته شده و بخش اعظم ذرات نشست یافته با ایجاد زنجیره گپ را پر می‌زنند. در یک نگاه کلی، الگوی بدست آمده از موقعیت قرارگیری ذرات بر روی الکتروود ناشی از تعادلی است که در روند لایه‌نشانی بین نیروهای الکتریکی و نیروی وارد شده از سوی سیال برقرار می‌گردد.

در هنگام اعمال میدان الکتریکی متناوب بر سوسپانسیون، جهت حرکت ذره با تغییر پولاتیته الکتروود در نیم سیکل بعدی عکس می‌شود. در ۱ Hz ذره فرصت کافی برای حرکت در هر نیم سیکل را داراست و همانطور که قبلاً هم نشان داده شد [۵] برآیند فاصله پیموده شده در یک سیکل کامل برای آن صفر نمی‌باشد. در این محدوده از فرکانس، نیروی کلمبی وارد بر بار سطحی ذره معلق ($F=Eq$) آنرا به سمت الکتروود مخالف و نیز داخل گپ [۹] هدایت می‌کند. نکته اساسی دیگر جریان سیال ایجاد شده در مجاورت الکتروود می‌باشد که نقش مهمی را در کشاندن ذرات از اطراف به سمت گپ در فرکانس‌های بسیار

در هنگام اعمال میدان الکتریکی متناوب بر الکترودهای تخت موازی، پلاریزاسیون سیال در مقابل الکتروود منجر به تشکیل یک لایه مضاعف بر روی الکتروود می‌گردد که نیروی وارد شده از سوی میدان بر این لایه، سیال را به حرکت در می‌آورد. با توجه به اینکه جریان ایجاد شده از لبه الکتروود به سمت سطح (خارج از گپ) می‌باشد، این نیرو می‌تواند سهم عمده‌ای از کاهش میزان حضور ذرات در گپ را به خود اختصاص دهد.

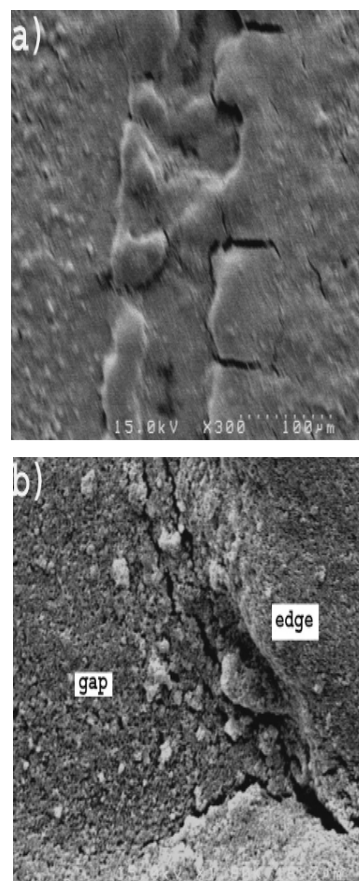
این پدیده که عمدتاً در محدوده ۱ Hz تا ۱ kHz مشاهده می‌شود الکترواسمز متناوب نام دارد و جهت آن توسط پیکان‌های مشکی رنگ در شکل ۱b نشان داده شده است [۱۱]. در این فرکانس با توجه به کاهش قابل ملاحظه مقدار پودر قرار گرفته بر روی لبه‌ها و فضای بین دو الکتروود، طبیعتاً ترکی در ساختار مشاهده نمی‌شود.

با افزایش فرکانس اعمالی به ۱ kHz، مجدداً حضور ذرات بر روی لبه‌ها و نیز فضای بین دو الکتروود تقویت می‌شود. این روند تا ۱۰ kHz ادامه می‌یابد بگونه‌ای که در این فرکانس ذرات پودر با تشکیل زنجیره دو لبه ی الکتروود را به یکدیگر وصل می‌کنند (شکل‌های ۱c و ۱d). در این حالت، از حضور ذرات بر روی سطح و نیز مجاورت لبه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با فرکانس‌های پایین‌تر کاسته شده و تجمع آنها در گپ مشهود است.

تصویر SEM بدست آمده از الگوی نشست در ۱۰ kHz نشان می‌دهد که علیرغم تجمع قابل ملاحظه ذرات پودر در فضای بین دو الکتروود، ترکی نیز در آن مشاهده نمی‌گردد (شکل ۳). در حقیقت در ۱۰ kHz بر خلاف ۱ Hz که نیروی نوسانی کلمبی و جریان سیال منجر به قرارگیری تصادفی و غیرجهت‌دار ذرات در فضای گپ و در نتیجه اتصال دو لبه الکتروود می‌گردد، بواسطه کنار هم قرار گرفتن زنجیره‌هایی که لبه دو الکتروود را به یکدیگر وصل کرده‌اند لایه‌ای منسجم و بدون ترک تشکیل می‌گردد.

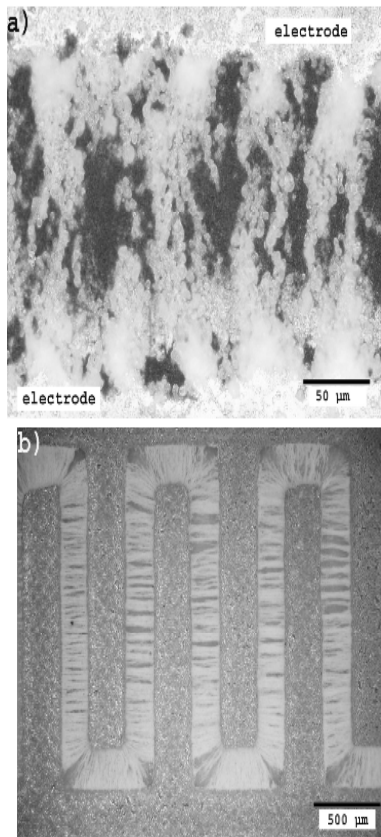
به طور کلی، در فرکانس‌های بالا با توجه به عکس شدن جهت میدان الکتریکی اعمالی در کسر بسیار کوچکی از ثانیه، نقش نیروی الکتریکی وارد بر بار سطحی ذره در جابجایی آن شدیداً کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در این محدوده از فرکانس به این دلیل که یون‌ها زمان کافی برای مهاجرت و نفوذ به سمت الکتروود با بار مخالف را ندارند،

درون محلول و نیز انقباض لایه در هنگام خشک شدن نسبت داد. همانطور که در شکل ۲b به وضوح دیده می‌شود، اشاعه ترک می‌تواند باعث از بین رفتن اتصال الکتریکی بین لایه و سطح رسانا گردد. در این حالت، در رابطه با کاربردهایی هم چون حسگر گاز که پیش از این بدان اشاره شد سیگنال دریافتی از ماده حسگر ممکن است دچار اختلال و در نتیجه بروز خطا گردد. با افزایش فرکانس به ۱۰۰ Hz از حضور ذرات بر روی لبه‌ها و نیز فضای بین دو الکتروود کاسته شده است (۱b). با توجه به افزایش فرکانس در این حالت، ذرات در مقایسه با ۱ Hz فرصت کافی برای پاسخگویی به معکوس گردیدن جهت میدان الکتریکی را ندارند که این امر نقش نیروهای کلمبی در نشست را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. اما علاوه بر نیروی الکتریکی عوامل دیگری نیز در ارتباط با حرکت ذرات نقش آفرینی می‌کنند.



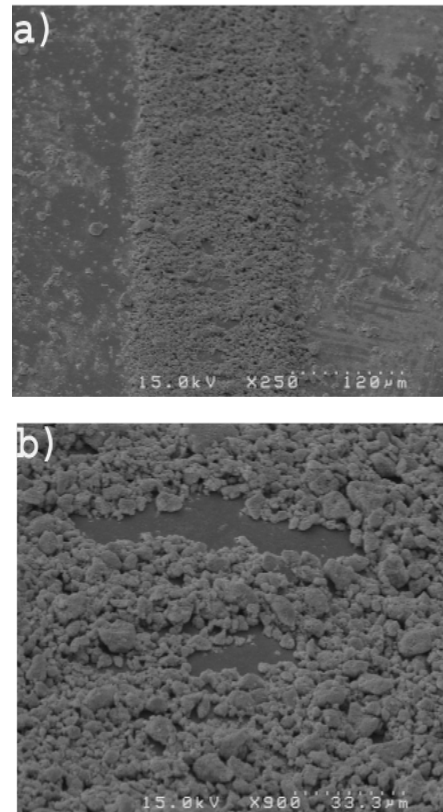
شکل ۲: تصویر SEM تشکیل ترک در لایه نشست داده شده در ۱ Hz در دو بزرگنمایی مختلف، ۱۵۰۰۰۰X (a) و ۳۰۰۰۰۰X (b)

فرکانس و خواص الکتریکی ذره و محیط بوده و نشانگر قابلیت ذره برای پلاریزه شدن می‌باشد. با توجه به تصاویر میکروسکوپی ارائه شده از نحوه قرارگیری ذرات در ۱۰ kHz، چینش آنها در امتداد خطوط میدان و تشکیل زنجیره‌های موازی بین دو لبه الکتروود را بایستی به حرکت و جهت‌گیری دو قطبی‌ها تحت اثر نیروی دی الکتروفورس نسبت داد. شکل ۴a تصویر واضحی از این زنجیره‌ها را در فاصله بین دو الکتروود طلا نشان می‌دهد. در این وضعیت، ذرات به جای تجمع در لبه‌ها یا حضور پراکنده در فضای گپ، تمایل به قرار گرفتن در امتداد ذره قبلی و ادامه این روند تا پل زدن الکتروود را دارند. در چنین شرایطی، پیوستگی بوجود آمده در میان ذرات و رشد زنجیره‌ها در امتداد خطوط میدان الکتریکی به سمت الکتروود مقابل امکان ایجاد و رشد ترک در ساختار لایه را به حداقل می‌رساند.



شکل ۴: (a) تصویر میکروسکوپ نوری تشکیل زنجیره از نانوذرات اکسید روی در ۱۰ kHz و اتصال دو لبه الکتروود و (b) انجام لایه‌نشانی در فرکانس پهنه ی ۱۰ kHz بر روی الکتروودهای شانه‌ای از جنس پلاتین.

تأثیر الکترواسمز متناوب و نیز جریان سیالی که در ۱ Hz بدان اشاره شد ناچیز خواهد بود [۱۱].



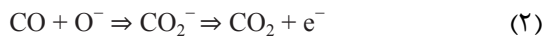
شکل ۳: (a) پر کردن فضای بین دو الکتروود طلا توسط ذرات پودر در ۱۰ kHz بدون ایجاد ترک و (b) اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل زنجیره.

مکانیزم حرکتی غالب در این شرایط، نیرویی است که نخستین بار توسط دبای و همکارانش در ۱۹۵۴ گزارش شد. این نیرو، نیروی دی الکتروفورس نام دارد و عبارت است از نیروی وارد شده از سوی میدان بر گشتاور دو قطبی ذره:

$$F_{DEP} = (\rho \cdot \nabla) E = 4\pi\epsilon_m r^3 \text{Re}[k(\omega)] \cdot \nabla E^2 \quad (1)$$

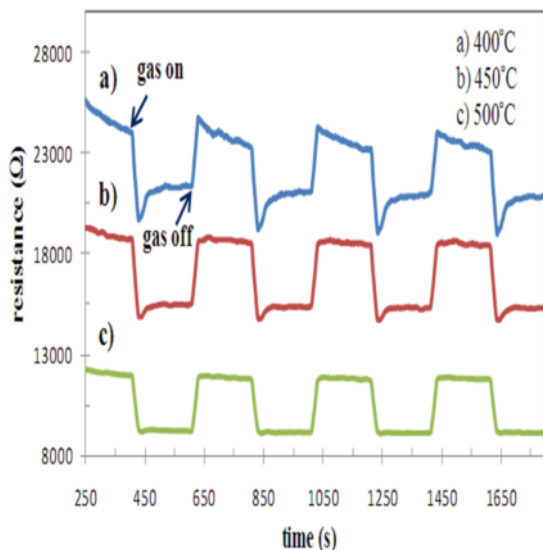
در معادله ۱، p گشتاور دو قطبی ذره، ϵ_m نفوذپذیری مطلق محیط، r شعاع ذره، E میدان الکتریکی و ω فرکانس زاویه‌ای میدان الکتریکی اعمالی می‌باشد. $R[K(\omega)]$ نیز عبارت است از بخش حقیقی فاکتور پولاریزاسیون که به فاکتور کلاسیوس مسوتی (Clausius-Mossotti) مشهور است [۱۱]. این فاکتور تابع

معرض گاز CO، یون های اکسیژن موجود در سطح اکسید با مولکول های CO واکنش داده و با تولید CO₂ سبب آزاد شدن الکترون ها از اکسیژن به سطح اکسید می شوند. واکنش صورت گرفته بین اکسیژن های سطحی و گاز CO به این ترتیب خواهد بود:



در حدود ۴۵۰ °C، انرژی گرمایی کافی جهت غلبه بر انرژی اکتیواسیون واکنش بالا وجود دارد. هر چند کاهش حساسیت در دماهای بالاتر را می توان به دشوار بودن انجام واکنش گرمای جذب CO نسبت داد. بنابراین، یک دمای بهینه وجود خواهد داشت که در آن حسگر بیشترین پاسخ را به گاز هدف نشان می دهد.

پاسخ دینامیک حسگر در دماهای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ °C به حضور ۵۴۵ ppm از گاز CO رقیق شده با N₂ (به عنوان گاز حامل) در شکل ۹ نشان داده شده است. زمان پاسخ و بازیابی به صورت زمانی که لایه حسگر به ۹۰٪ پاسخ اشباع خود به ترتیب در حضور و عدم حضور CO می رسد تعریف می گردد. بر این اساس، زمان پاسخ و بازیابی در هر سه دما بین ۱۸ تا ۲۰ ثانیه محاسبه گردید که در مقایسه با حسگرهای ساخته شده به روش های دیگر بسیار مطلوب تلقی می گردد [۱۳، ۱۲].



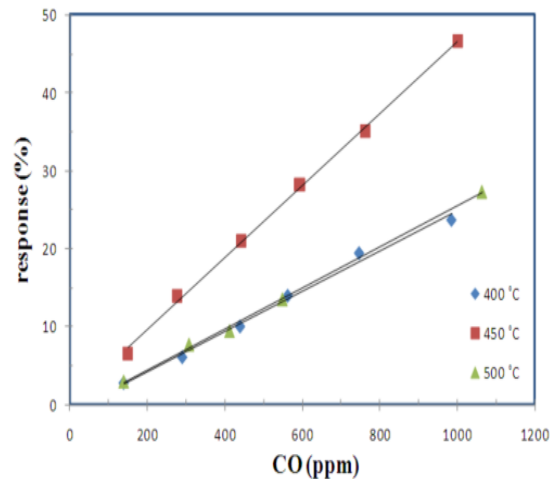
شکل ۶: پاسخ دینامیک حسگر در حضور ۵۴۵ ppm از گاز CO و دماهای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ °C.

۳-۲- ساخت حسگر و بررسی میزان پاسخ

به دنبال دستیابی به فرکانس مناسب جهت ایجاد لایه های بدون ترک از نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای هم صفحه طلا، نشست این ذرات در ۱۰ kHz بر روی الکترودهای شانه ای پلاتینی که در پشت زیرلایه آلومینیومی خود مجهز به یک هیتر جهت انجام آزمون های حسگری در حضور گاز می باشند انجام گرفت که الگوی حاصل آن را می توان در شکل ۴b مشاهده کرد.

پس از شستن فضای بین دو الکتروود توسط نانوذرات اکسید روی از طریق تشکیل پل های موازی در امتداد خطوط میدان الکتریکی در شکل قابل مشاهده است. پاسخ حسگر با استفاده از رابطه $S = (R_N - R_G) / R_N$ محاسبه گردید که در آن، R_N و R_G به ترتیب مقاومت در حضور گاز نیتروژن و گاز هدف (CO) می باشد. نمودار پاسخ حسگر به غلظت های مختلف (۱۰۰ - ۱۰۰۰ ppm) از گاز CO در سه دمای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ °C در شکل ۵ نشان داده شده است.

به این ترتیب، پاسخ به صورت خطی با افزایش غلظت گاز افزایش می یابد که مزیتی ویژه در ارتباط با کاربردهای صنعتی به شمار می آید.



شکل ۵: پاسخ حسگر به غلظت های مختلف از گاز CO در سه دمای مختلف.

با توجه به شکل، بیشترین حساسیت در دمای ۴۵۰ °C بدست می آید که در ادامه به دلایل احتمالی آن اشاره خواهد شد. با قرار گرفتن لایه حسگر اکسید روی در

۴- نتیجه گیری

مراجع

- [1] B. Ferrari, R. Moreno, *Journal of European Ceramic Society*, **30**, 2010, 1069.
- [2] J.W. Lee, K.J. Moon, M.H. Ham, J.M. Myoung, *Solid State Communications*, **148**, 2008, 194.
- [3] M. Zhao, G. Hu, H. Zhou, K. Zheng, G. Zhu, Y. Cui, *Chinese Optics Letters*, **7**, 2009, 235.
- [4] B. Raissi, E. Marzbanrad, A.R. Gardeshzadeh, *Journal of Material Science*, **43**, 2008, 2502.
- [5] B. Raissi, E. Marzbanrad, A.R. Gardeshzadeh, *Journal of the European Ceramic Society*, **29**, 2009, 3289.
- [6] K. W. Jiang, W.J. Liu, L.J. Wan, J. Zhang, *Sensors and Actuators B*, **134**, 2008, 79.
- [7] W.J. Liu, J. Zhang, L.J. Wan, K.W. Jiang, B.R. Tao, H.L. Li, *Sensors and Actuators B*, **133**, 2008, 664.
- [8] E.K. Heidari, C. Zamani, E. Marzbanrad, B. Raissi, S. Nazarpour, *Sensors and Actuators B*, **146**, 2010, 165.
- [9] R. Riahifar, E. Marzbanrad, B. Raissi, C. Zamani, *Materials Letters*, **64**, 2010, 559.
- [10] S.Y. Leea, A. Umara, D. Suha, J.E. Park, *Physica E*, **40**, 2008, 866.
- [11] A. Ramos, H. Morganz, N.G. Greenz, A. Castellanosy, *Journal of Physics: Applied Physics*, **31**, 1998, 2338.
- [12] J.F. Chang, H.H. Kuo, I.C. Leu, M.H. Hon, *Sensors and Actuators B*, **84**, 2002, 258.
- [13] T. Krishnakumar, R. Jayaprakash, N. Pinna, N. Donato, A. Bonavita, *Sensors and Actuators B*, **143**, 2009, 198.

در لایه‌نشانی الکتروفور تیک نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای هم صفحه طلا، افزایش فرکانس از ۱ Hz به ۱۰ kHz منجر به حذف ترک‌های ایجاد شده در ساختار لایه بواسطه اصلاح الگوی نشست گردید. با افزایش فرکانس به ۱۰ kHz، عوامل تأثیرگذار بر نحوه قرارگیری ذرات در فضای بین دو الکتروود از نیروی کشش سیال و نیروی کلمبی به نیروی دی الکتروفورس وارد بر گشتاور دوقطبی ذره تغییر هویت می‌دهند. این امر منجر به تشکیل زنجیره از ذرات نشست یافته در امتداد خطوط میدان می‌گردد. آزمون به عمل آمده از حسگر ساخته شده در ۱۰ kHz نشان دهنده پاسخ روشن و پایدار آن به گاز CO می‌باشد. بنابراین، این حسگر تلفیقی از خواص حسگری مورد نیاز شامل پایداری بالا، دینامیک سریع و پاسخ خطی در گستره‌ای وسیع از غلظت گاز را دارا است.