

ساخت حسگر رطوبت بر پایه نانو ذرات اکسید قلع و گرافیت به

روش اسپری پیرولیز

حسین سالار آملی* | محمدرضا محرم زاده

گروه شیمی معدنی و کاتالیست آزمایشگاه لایه نازک، پژوهشکده صنایع شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران

► salar@irost.ir

چکیده: در این کار تحقیقاتی نانو ذرات قلع به همراه گرافیت به روش اسپری پیرولیز، برای اولین بار در دنیا بر روی شیشه به منظور ساخت حسگر رطوبت، سنتز شد. برای ساخت این حسگرها از محلول کلرید قلع و گرافیت پخش شده در اتانول بعنوان محلول اولیه پیرولیز استفاده و بر روی شیشه های حرارت دیده در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد با استفاده از تکنیک اسپری پیرولیز پوشش داده شد. از یک اهمتر دیجیتال برای اندازه گیری تغییرات مقاومت دوسر حسگر در درجه رطوبت های نسبی مختلف و از محلول نمک های اشباع برای ساخت فضای فوقانی با درجه رطوبت استاندارد استفاده شد. با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوب الکترونی روبشی سطح حسگر مورد بررسی قرار گرفت و نانوذرات قلع بر روی ذرات گرافیت مشاهده شد. حساسیت حسگر در دماهای پیرولیز مختلف مطالعه شده و با هم مقایسه شد. اثر ضخامت بر روی حساسیت حسگر و زمان پاسخ بهینه سازی شد. بررسیها نشان داد حسگر ساخته شده در ۱۹ ثانیه به پاسخ ۹۰ درصد و در ۴۵ ثانیه به حالت پایه برمی گردد. در دمای محیط (۲۳ درجه سانتیگراد) حساسیت حسگر ۱۱۲،۲ اهم به ازای هر درجه رطوبت می باشد. همچنین این حسگر با مکانیسم عملکرد متفاوت نسبت به رطوبت در مقایسه با سایر گازها بصورت گزینشی عمل می کند.

واژه های کلیدی: اسپری پیرولیز، حسگر رطوبت، نانولایه های اکسید قلع/گرافیت.

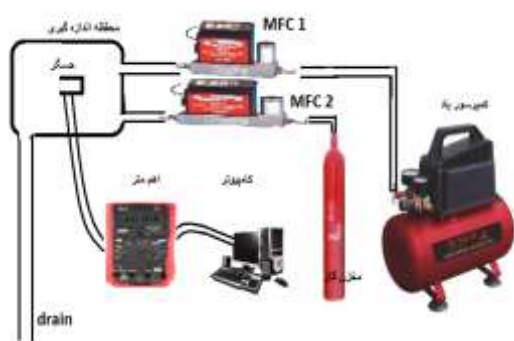
اندازه گیری رطوبت و گازهای خطرناک در صنایع استفاده می شود [۷-۱۱]. میزان حساسیت این حسگرها به مواد مورد استفاده، اندازه ذرات و مورفولوژی کریستال ها و در نهایت به نوع روش آماده سازی حسگر وابسته است. لایه هایی با ساختار نانو دارای سطح تماس و تخلخل بالایی بوده و توانایی زیادی در جذب و واجذب مواد دارند که این قابلیت باعث بالا رفتن سرعت و حساسیت پاسخ دهی به حسگر می شود [۱۲-۱۵].

اکسید قلع یک نیمه رسانا با باند هدایت پهن می باشد. این ماده به علت داشتن پایداری شیمیایی بالا در زمینه های مختلفی اعم از سلول های خورشیدی، الکتروود های شفاف و رسانا و حسگر های گازی استفاده می شود [۱۶] برای افزایش حساسیت و سرعت پاسخ دهی، افزایش پایداری مکانیکی و شیمیایی و گزینش پذیری از روش آلیاژ (دوپ)

۱ مقدمه

حسگر رطوبت کاربردهای گسترده در صنایع مختلف از قبیل دستگاه های آنالیز، ماشین آلات، کارخانجات داروسازی و بسته بندی و حتی ماهواره های هواشناسی و ماهواره ها دارد [۲،۱]. وجود این حسگر برای اندازه گیری بخار آب و کنترل آن در فرایندهای صنعتی از ملزومات اساسی اکثر صنایع می باشد. بطوری که امروزه دانشمندان تحقیقاتی زیادی بر روی ساخت حسگری که سرعت پاسخ دهی سریع و پایداری مکانیکی و شیمیایی بالا، قیمت ارزان، پاسخ دهی مستقل از دمای محیط و حساسیت بالا را داشته باشد در مسیر توسعه قرار داده اند. تاکنون از سرامیک ها و پلیمر های مختلف برای ساخت این حسگرها استفاده شده است [۳-۶] و اخیرا از نانو کریستال های اکسید فلزی برای

محلول از شرکت مرک با درجه خلوص سنتزی خریداری شد. دستگاه اسپری پیرولیز مورد استفاده در سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ساخته شده بود که به یک کمپرسور باد با فشار ۶ اتمسفر وصل شده بود و هیتر آن قابلیت کنترل دما از دمای محیط تا ۵۵۰ درجه سلسیوس را داشت. از یک اهم تر تغییرات و ثبت مقاومت استفاده شد. برای اندازه گیری اثر گاز های مزاحم از ست آپ شکل ۱ استفاده شد.



شکل ۱- ست آپ اندازه گیری گازهای مزاحم

برای آماده سازی سطح ابتدا شیشه هایی با ابعاد ۲×۲ cm به ضخامت ۲ میلی متر بریده شده و با استون به مدت ۲۰ دقیقه شستشو داده سپس شیشه را در اسید کلریدریک غلیظ در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه قرار می دهیم تا سطح آن ضمن تمیز شدن فعال سازی شود. سپس با آب دیونیزه در حمام التراسونیک شستشو می دهیم. برای بررسی مورفولوژی از یک میکروسکوپ نیروی اتمی از دستگاه ساخت شرکت Digital instrument مدل Nanoscope III و میکروسکوب الکترونی روبشی ساخت شرکت TESCAN مدل MIRAI استفاده شد.

روش آزمایش

۰/۰۱ گرم گرافیت در ۲ میلی لیتر اتانول پخش شده و با ۸ میلی محلول ۰/۰۱ مولار کلرید قلع مخلوط شده و در التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه با انرژی ۷۵ وات پخش شد. محلول پخش شده سریعاً به محفظه دستگاه اسپری پیرولیز انتقال داده شده و بر روی شیشه هایی که سطوح آن آماده شده و دمای آن تثبیت شده بود اسپری شد. ارتفاع نازل

کردن در حسگر ها استفاده می شود. استفاده از حالت کامپوزیتی مواد این مزیت را دارد که می توان لایه های نازک نانومتری با تخلخل بالا جهت کاربردهای مختلف بدست آورد. افزایش تخلخل رابطه مستقیم با افزایش حساسیت دارد چون حفره هایی که در سطح شیشه ایجاد شده است جایگاهی برای پذیرش مولکولهای آب می باشد. در این تحقیق از روش اسپری پیرولیز استفاده شده است. این دستگاه در آزمایشگاه نانو و لایه های نازک سازمان پژوهش های علمی و صنعتی تهیه شده و دارای کارایی مناسبی است [۱۷]. روش اسپری پیرولیز یک روش ساده، ارزان و سریع بوده و از این دستگاه برای سنتز لایه های نانومتری شفاف و رسانا، حسگرها و سطوح مقاوم به خوردگی می توان استفاده کرد. امروزه از این روش برای ساخت لایه نیمه رسانا، رسانا و یا نارسانا با مورفولوژی و ضخامت نانومتر در ساخت شیشه های هوشمند، حسگرها، سلول های خورشیدی و الکترودهای الکتروشیمیایی استفاده می کنند [۲۰-۱۸].

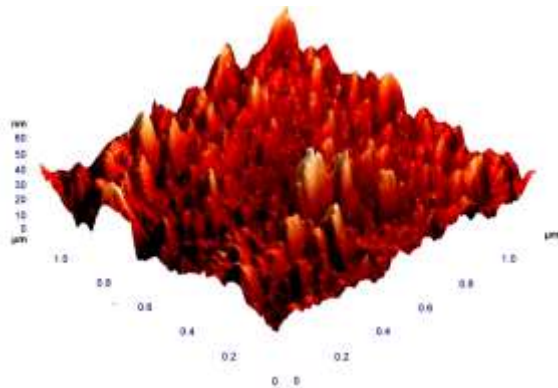
این کار تحقیقاتی با توجه به فعالیت ها و تحقیقات گسترده قبلی، مرتبط با لایه نشانی بر روی زیرلایه هایی از جنس شیشه و پلیمر، آغاز شد [۲۱، ۲۲]. از روش اسپری پیرولیز برای سنتز لایه های نانومتری اکسید قلع رشد داده شده در بین صفحات گرافیت برای اولین بار در دنیا در ساخت حسگر رطوبت مورد استفاده شد و سطوح مورد نظر با میکروسکوپ نیروی اتمی و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. حساسیت و پایداری شیمیایی و مکانیکی در مدت زمان طولانی مورد آنالیز قرار گرفت و نتایج حاصل گزارش گردید. اثر دمای اسپری بر حساسیت و زمان پاسخ دهی و حساسیت حسگر نسبت به ضخامت مختلف لایه حساس، برگشت پذیری سنسور، گرینش پذیری و نمودار کالیبراسیون آن مورد مطالعه قرار گرفت.

۲ بخش تجربی

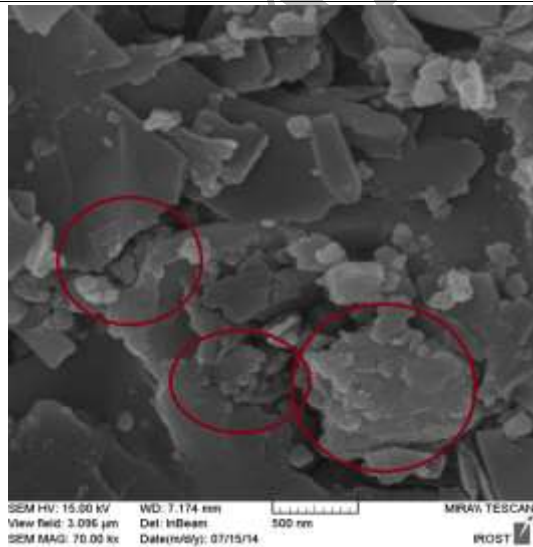
مواد و تجهیزات

ترا کلرید قلع از شرکت Rankem با درجه خلوص ۹۹٪، گرافیت، اتانول مطلق با درجه خلوص ۹۹٫۹۹٪، هیدروکلریک اسید، استون و کلیه نمک های بکاربرده شده برای ساخت

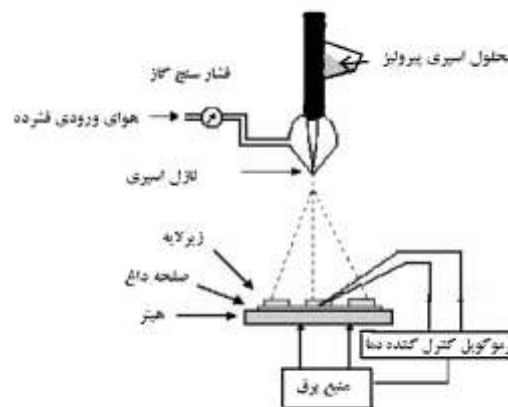
سطح از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شد. پروب میکروسکوپ ناحیه ای به ابعاد ۱ میکرومتر در ۱ میکرومتر از سطح حسگر را جاروب کرد. شکل شماره ۳ تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی را نشان می دهد. مورفولوژی سطح حسگر زبر و یکنواخت بوده و دانه بندی آن در حدود ۵۰ نانومتر بوده و ضخامت لایه کمتر از ۶۰ نانومتر می باشد. همچنین برای بررسی بیشتر سطح مورد نظر با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. بررسی ها تصاویر شکل ۴ نشان می دهد که ذرات اکسید قلع با اندازه های کمتر از ۶۰ نانومتر در بین ذرات گرافیت پخش شده و علاوه بر وظیفه انتقالات الکترونی و پاسخ به رطوبت باعث چسبندگی گرافیت به یکدیگر و استحکام لایه بر روی زیرلایه شده است. همچنین وجود گرافیت باعث افزایش لایه به لایه بستر رشد برای اکسید قلع شده است. محل هایی که نانو ذرات قلع بر روی صفحه گرافیتی رشد پیدا کرده است در داخل دایره قرمز قرار گرفته اند.



شکل ۳- مطالعات مورفولوژی سطح تصویر AFM گرفته شده از سطح حسگر



دستگاه اسپری پیرولیز از سطح شیشه ۳۰cm و فشار هوای ورودی ۶ بار بود. بعد از اتمام مرحله اسپری پیرولیز شیشه های سنتز شده به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد گذاشته و عمل آوری شد. شکل شماره ۲، شماتیک کلی دستگاه اسپری پیرولیز را نشان می دهد.



شکل ۲- شماتیک کلی دستگاه اسپری پیرولیز ساخته شده در سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

برای ساخت فضای فوقانی با درصد بخار نسبی مشخص از محلول نمک های اشباع استفاده شد. از لیتیم کلراید، پتاسیم استات، پتاسیم کربنات، منگنز نیترات، کلرید سدیم، کلرید پتاسیم، نیترات پتاسیم به ترتیب برای ساخت محلول هایی با درجه رطوبت های نسبی ۹۵، ۸۴، ۶۹، ۴۳، ۲۳، ۱۱، ۶ درصد استفاده شد. محلول نمک های اشباع ۲۴ ساعت در حضور حسگر در ظرف در بسته شیشه ای و در دمای اتاق (۲۳ درجه سانتیگراد) نگهداری شده و بعد از رسیدن به تعادل میزان تغییرات مقاومت هر محلول خوانده شد.

۳ نتایج و بحث

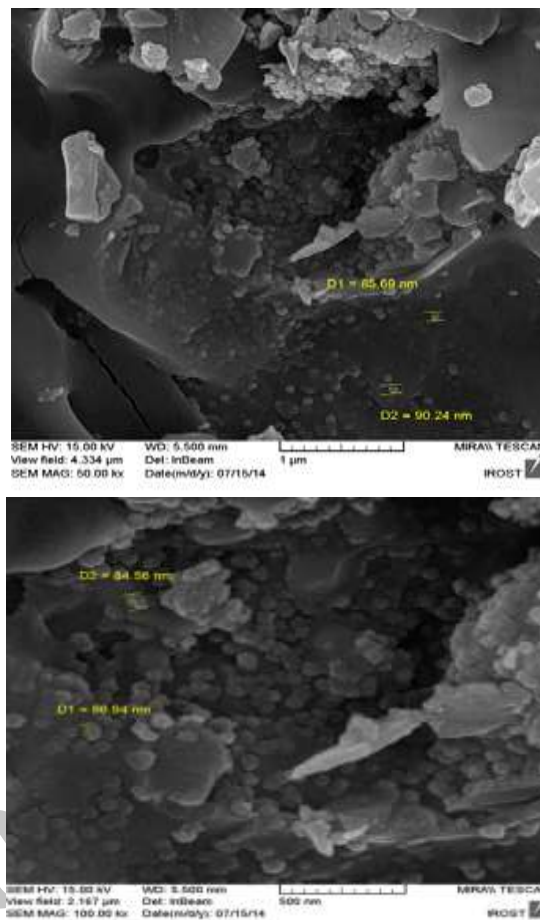
بررسی مورفولوژی سطح

قرار گرفتن فیلمی نازک از گرافیت/اکسید قلع بر روی سطوح شیشه ای دارای حساسیتی است که عمدتاً با تهیه مواد مناسب، پخش شدن آن در حلال مناسب و زمان اسپری شدن مرتبط می باشد. سطوح ناهماهنگ و فیلم هایی با قطر متفاوت می توانند بر کارایی سیستم اثر غیر قابل تشخیصی باقی گذارند و گزینش پذیری لایه را تغییر دهد. برای بررسی

حسگر ثبات بیشتری پیدا کرد. در دمای پایین رفتار حسگر غیر متعارف بوده و بالا رفتن دما تبدیل کلرید قلع به اکسید قلع را کامل می کند و دما در ۴۵۰ درجه سانتیگراد تثبیت شد. زاویه پاشش نازل با صفحه در ۶۰ درجه تنظیم شد. در این زاویه صفحات پوشش داده شده از یکنواختی بیشتری داشت. محلول کلرید قلع برای افزایش سرعت کار در ۰/۱ مولار نگه داشته شد. افزایش مولاریته محلول باعث ایجاد ذرات در اندازه میکرو شده و کارایی سیستم را کاهش دهد. کاهش غلظت باعث افزایش زمان اسپری شده و اندازه ذرات در طول اسپری شدن به علت تغییر دمای سطح شیشه در طی زمان طولانی غیر یکنواخت می شود.

بررسی رفتار حسگر

برای بررسی رفتار حسگرها آزمایشات متعددی برنامه ریزی شد تا ارتباط بین پاسخ حسگر در شرایط مختلف بدست آید. شکل ۵ و ۶ نحوه تغییرات مقاومت دوسر حسگر نسبت به تغییرات در صد نسبی بخار را نشان می دهد. بررسی نمودار نحوه تغییرات مقاومت به رطوبت نشان می دهد که تغییرات مقاومت به نسبت به رطوبت کاملاً خطی می باشد. خطی بودن حسگر یکی از کلیدی ترین محورهای مربوط به راندمان و کارایی آن به حساب می آید تا جایی که این خطی بودن سبب می شود که از آنها بتوان به راحتی در مدارهای الکترونیک استفاده کرد. همچنین حسگر ساخته شده نیاز به هیتر جهت فعال سازی اکسید قلع نداشته و با افزایش سطح و کاهش اندازه ذرات به زیر ۱۰۰ نانومتر باعث افزایش طول عمر فیلم شده و همچنین کاهش مصرف انرژی در مدار حسگر می شود. حسگر شیبی مثبت به تغییرات رطوبت دارد و با افزایش رطوبت مقاومت نیز افزایش میابد و به ازای تغییر یک درصد رطوبت ۱۱۲ اهم مقاومت افزایش می یابد این تغییر قابل ملاحظه و عالی بوده و با ساده ترین مدار قابل عملیاتی شدن است. همچنین نمودار کالیبراسیون از ضریب همبستگی بالای ۹۹٪ برخوردار بوده و داده ها قابل استناد می باشد. برای بررسی برگشت پذیری حسگر چندین بار حسگر در معرض بخار آب ۹۵٪ قرار گرفته و دوباره با تزریق هوای محیط به رطوبت محیط برگشت داده شد و پاسخ آن ثبت شد این کار چندین بار تکرار شد و نمودارهای



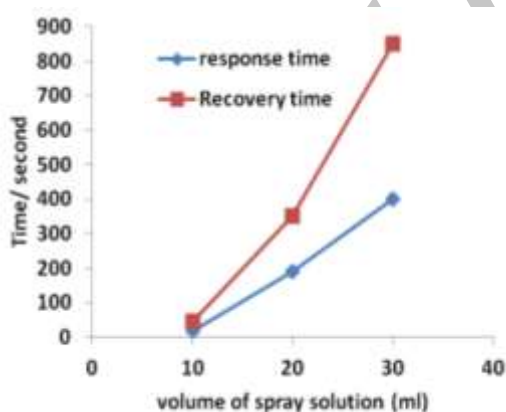
شکل ۴- تصاویر SEM از لایه اکسید قلع و گرافیت که ذرات اکسید قلع در بین و روی لایه های گرافیت پخش شده است

بررسی عوامل موثر در اسپری پیرولیز

چگونگی پخش ذرات، میزان هوادهی به مخزن، محلول اسپری و دمایی که بستر بر روی آن حرارت می بیند از جمله عوامل موثر بر لایه نشانی به حساب می آید. زاویه پاشش دستگاه به دفعات تغییر داده شد تا کاملترین لایه نشانی صورت پذیرد. بعد از هر آزمایش میزان مقاومت سطوح به عنوان یک عامل از لایه نشانی بررسی شد و بهترین شرایط بدست آمد. متناسباً دما می تواند بر کریستالیزه شدن و تشکیل کامل اکسید قلع بر روی لایه های گرافیت اثر بگذارد از اینرو برای بررسی اثر دما اسپری پیرولیز در سه دمای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتیگراد بررسی شد. که نشان داد بالا رفتن دما کارایی حسگر را تغییر داده و با بالا رفتن دما رفتار

ندارد. بررسی ها نشان داد که افزایش ضخامت در کنار افزایش حساسیت اثر منفی در زمان پاسخ (مدت زمان جذب و واجذب رطوبت تا رسیدن به تعادل) دارد.

یکی از مزیت های استفاده از روش لایه نازک کاهش زمان پاسخ دهی حسگر می باشد برای بررسی اثر ضخامت بر مدت زمان پاسخ، بجای اندازه گیری ضخامت از مقدار ماده اسپری شده بر روی شیشه استفاده شد. بنابراین محلول مورد نظر در حجم های ۳۰ و ۲۰ و ۱۰ میلی لیتر ساخته شده و بر روی شیشه اسپری شد. سپس حسگرهای ساخته شده در رطوبت ۹۶ درصد مورد بررسی قرار گرفت. از زمان قرار گرفتن در معرض رطوبت تا ثابت شدن مقاومت به عنوان مدت زمان تعادل در نظر گرفته شد. بررسی شکل ۷ نشان می دهد که افزایش ضخامت باعث افزایش مدت زمان پاسخ دهی شده و سرعت جذب و واجذب را کاهش می دهد. بنابراین مقدار ماده ای که بر روی شیشه اسپری شد ۱۰ میلی لیتر بود. همچنین افزایش ضخامت باعث کاهش مقاومت اولیه حسگر می شود بطوری که با افزایش محلول اسپری از ۱۰ میلی به ۲۰ میلی لیتر مقاومت اولیه از ۸۰۰ اهم به ۵۰۰ اهم می رسد ولی میزان حساسیت کمتر از ۵٪ تغییر می کند. به همین خاطر برای ادامه کار حسگر های بعدی با همان ۱۰ میلی لیتر ساخته شد.

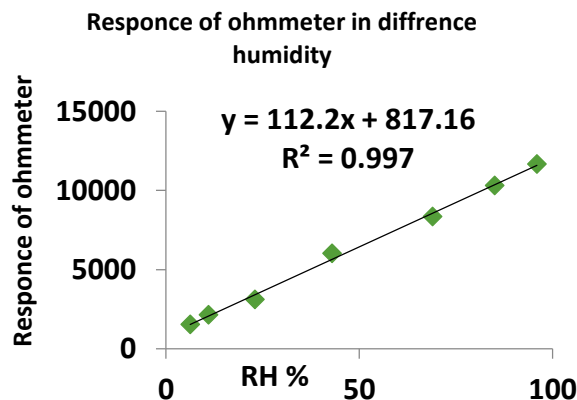


شکل ۷- بررسی اثر ضخامت بر روی سرعت جذب و واجذب یا سرعت پاسخ به رطوبت ۹۵٪

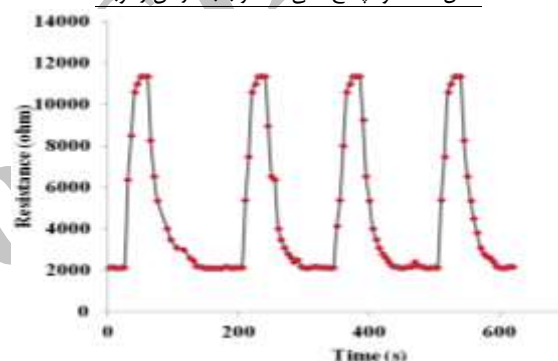
بررسی پایداری مکانیکی و شیمیایی حسگرها

از جمله عوامل اثر گذار دیگر در کیفیت و راندمان عمل یک حسگر، پایداری آن است. در صورتی که برای بررسی

آن کنار هم قرار گرفت و داده ها مورد پردازش قرار گرفت بررسی ها نشان می دهد که برگشت پذیری حسگر نسبت به رطوبت ۱۰۰٪ بوده و حسگر پاسخی تعادلی به رطوبت محیط دارد.



شکل ۵- نحوه پاسخ دهی حسگر با بالا رفتن رطوبت

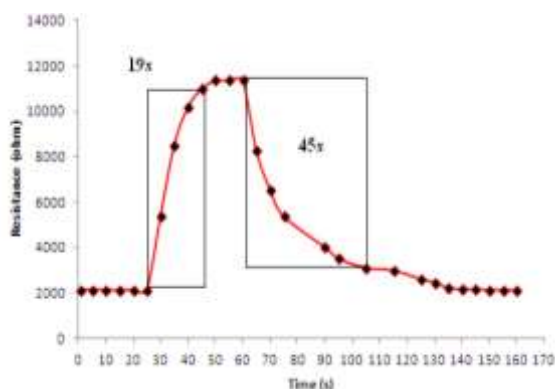


شکل ۶- بررسی برگشت پذیری حسگر

بررسی رابطه ضخامت لایه و عملکرد حسگر

حسگر های ساخته شده بر پایه فناوری لایه نازک بوده و معمولاً لایه های ساخته شده ضخامت در حدود ۱۰۰ نانومتر را دارد. میزان ضخامت لایه رابطه مستقیم با مقدار ماده اسپری شده دارد. افزایش مقدار ماده اسپری شده بر روی شیشه باعث افزایش ضخامت لایه حساس می شود. افزایش غلظت مواد اسپری علاوه بر تاثیر در تغییر ضخامت باعث تغییر مورفولوژی و ساختار اکسید قلع می شود به همین خاطر از یک متغیر جهت افزایش ضخامت استفاده شد. میزان حساسیت با افزایش ضخامت افزایش می یابد و می توان مقادیر کم رطوبت را تشخیص داد ولی معمولاً سنسورهای رطوبت ساخته شده برای اندازه گیری رطوبت محیط می باشد و حساسیت بیشتر برای اندازه گیری رطوبت محیطی کاربرد

همچنین این زمان برای برگشت به حالت اولیه ۱۷۰ ثانیه می باشد [۲۳].



شکل ۹- بررسی سرعت جذب و اجذب بخار آب توسط حسگر و زمان پاسخ آن

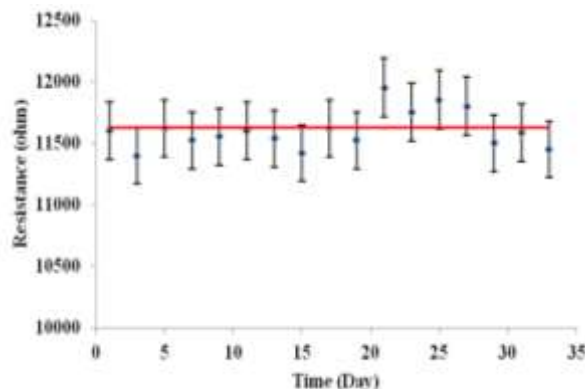
گزینه‌ی پذیری حسگر

گزینه‌ی پذیری حسگر یکی از فاکتورهای مهم برای ساخت حسگر می باشد. پاسخ حسگر فقط به یک آنالیت خاص باعث بالا رفتن پاسخ های حسگر می شود و می توان با درجه اطمینان بیشتری به داده های آن اعتماد کرد. برای بررسی گزینه‌ی پذیری پاسخ حسگر به رطوبت از چندین گاز در دمای اتاق استفاده شد و پاسخ حسگر نسبت به آنها با رطوبت مقایسه شد. گازهای مورد استفاده متانول، اتانول، ایزوپروپانول، آمونیاک و استون بودند که در آزمایشگاه بیشتر بصورت مایع بودند. این گاز در ظرف بسته تبخیر شده و بخارات آنها از یک مسیر که در راه بسته سیلیکاژل داشت عبور داده شد تا بخار آب آن گرفته شود. بخارات گازها از روی حسگر عبور داده و پاسخ خوانده شد. و نتایج با تغییرات جوابی که برای رطوبت ۲۳٪ آمده بود مقایسه شد. نتایج عبور ppm ۲۰۰۰۰۰ از گازها نشان داد که تغییر قابل محسوسی برای الکل ها و استون نداشت و حسگر نسبت به این گازها حساس نمی باشد ولی بررسی آمونیاک و فرمالدهید نشان می دهد که نوع جواب برای این گازها تغییر در مکانیسم پاسخ بوده و مقاومت پایه بیش از ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است.

مکانیسم پاسخ

اکسید های فلزی نیمه رسانا مانند ZnO, SnO₂ با تراز انرژی پهن رفتار نوع n دارند و زمانی که در معرض گازهای احیا کننده قرار می گیرند رسانایشان افزایش پیدا کرده و

پایداری مکانیکی و شیمیایی حسگر ساخته شده به مدت ۳۰ روز در درجه رطوبت های مختلف قرار داده شد. و تغییرات پاسخ دهی آنها بررسی شد. بررسی داده های بدست آمده نشان می دهد که حسگر ساخته شده از پایداری مکانیکی و شیمیایی مناسب برخوردار بوده و گذشت زمان تاثیری بر پاسخ حسگر ندارد. شکل ۸ نتایج حاصله از این بررسی را نشان می دهد. محدوده‌ی خطای تعریف شده برای منحنی تغییرات پاسخ ۲٪ بود.



شکل ۸- بررسی تغییرات پاسخ حسگر با گذشت زمان با خطای تعریف شده ۲٪

سرعت پاسخ دهی حسگر

برای بررسی سرعت پاسخ دهی حسگر تغییرات درصد رطوبت را با تغییر مقاومت بصورت نقطه به نقطه با فاصله زمانی تقریباً ۵ یا ۱۰ ثانیه یادداشت گردید. بررسی نمودار برگشت پذیری نشان می دهد که زمان پاسخ دهی حسگر بسیار سریع بوده و در کمتر از ۱۹ ثانیه به مقاومت ۹۰٪ پاسخ می رسد. زمان برگشت پذیری نسبتاً بالا بوده و نسب به زمان پاسخ مدت بیشتری لازم است و ۴۵ ثانیه طول می کشد تا به ۹۰٪ پاسخ پایه برسد. در شکل ۶ برگشت پذیری حسگر در چندین چرخه مورد بررسی قرار گرفته که فقط ۴ چرخه اینجا آورده شده است. در شکل ۹ چرخه برگشت پذیری را برای یک چرخه کامل آورده شده است که مدت زمان لازم برای رسیدن به پاسخ ۹۰٪ ۱۹ ثانیه و برای برگشت به حالت اولیه ۴۵ ثانیه می باشد. مقایسه رفتار حسگر نشان می دهد که حسگر از سرعت برگشت پذیری بسیار بالا در مقایسه با کارهای مشابه می باشد بطوری که نانوذرات اکسید قلع بدون گرافیت ۱۲۰ ثانیه زمان لازم دارد تا به پاسخ آن پایدار شود

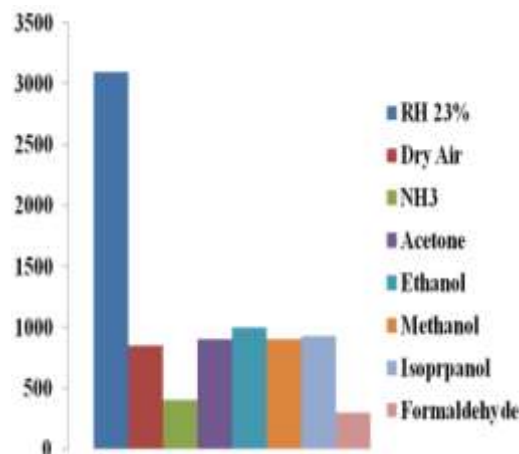
۴ نتیجه گیری

در این تحقیق کاربردی، با استفاده از نانو ذرات قلع بر روی ذرات گرافیت به کمک اسپری پیرولیز حسگری ساخته شد که تمام شرایط کاربردی برای تولید صنعتی حسگر رطوبت را داشت. حسگر ساخته شده نسبت به رطوبت بسیار حساس بوده و به ازای افزایش یک درصد رطوبت نسبی در دمای اتاق ۱۱۲,۲ اهم تغییر یافت. همچنین حسگرهای ساخته شده به علت اینکه از لایه های نازک نانومتری تشکیل شده بود سرعت جذب (۱۹ ثانیه) و واجذب (۴۵ ثانیه) بالایی داشته و سریع به تغییرات رطوبت محیطی پاسخ می دهد. همچنین وجود لایه های گرافیت باعث افزایش سطح و انتقالات سریع الکترونی شده و سرعت پاسخ و حساسیت را بسیار بالا می برد. حسگرهای ساخته شده با این روش ساده، سریع، ارزان و گزینشگر بوده و حتی می توان به راحتی در مقیاس صنعتی توسعه داد.

مراجع

- [1] E. Traversa, Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments, *Sens. Actuators B: Chem.* Vol. 23, 135–156, 1995.
- [2] B. Patissier, Humidity sensors for automotive, appliances and consumer applications, *Sens. Actuators B: Chem.* Vol. 59, 231–234, 1999
- [3] W.P. Tai, J.H. Oh, Fabrication and humidity sensing properties of nanostructured $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ thin films, *Sens. Actuators B*, vol. 85, 154–157, 2002
- [4] B. Bessais, N. Mliki, R. Bennaceur, Technological, structural and morphological aspects of screen-printed ITO used in ITO/Si

مقاومتشان کاهش مییابد. برای کاهش مقاومت دو مکانیسم ارائه شده است که مکانیسم نوع اول را می توان به همه گازها نسبت داد ولی مکانیسم دوم به گازهایی مثل رطوبت، آمونیاک و سولفید هیدروژن کاربرد دارد.



شکل ۱۰- بررسی میزان گزینش پذیری حسگر در پاسخ به سایر گازها

در مکانیسم نوع اول مولکول های آب در سطح اکسید قلع جذب شده و جایگزین اکسیژن جذب سطحی شده می شود چون اکسیژن جذب سطحی شده از سطح اکسید فلزی الکترون میگیرد و باعث کاهش رسانایی می شود با جایگزین شدن مولکولهای آب در سطح اکسید فلزی اکسیژن از سطح ماده آزاد شده و الکترون به داخل نانو ذره برمی گردد و باعث افزایش رسانایی می گردد در مکانیسم نوع دوم مولکولهای آب در بین ذرات میعان شده و انتقال پروتون آب باعث هدایت می شود. در این تحقیق بررسی رفتار حسگر نشان می دهد که افزایش میزان رطوبت باعث کاهش هدایت و افزایش مقاومت می شود. حسگر ساخته شده مقاومتی در حدود یک کیلو اهم در هوای خشک دارد و بدون دخالت آب هدایت بالایی دارد. آب مقطر مقاومتی در حدود ۱۸ مگا اهم دارد و زمانی که مولکولهای آب در سطح نانو ذرات جذب می شود باعث کاهش اتصال نانو ذره به سطح گرافیت شده و اتصال الکترونی از طریق مولکولهای آب انجام می شود. چون مقاومت مولکولهای آب بیشتر از خود حسگر می باشد افزایش رطوبت باعث افزایش مقاومت می شود.

conducting polymer and its nanocomposite, *Synthetic Metals* 151, 77–84. 2005.

[11] A. Tiwari, R. Kumar, M. Prabakaran, R.R. Pandey, P. Kumar, A. Chaturvedi, A.K. Mishra, Nanofibrous polyaniline thin film prepared by plasma-induced polymerization technique for detection of NO₂ gas, *Polymers for Advanced Technologies*, vol.21.615–620, 2010.

[12] R.G. Deshmukh, S.S. Badadhe, I.S. Mulla, Microwave-assisted synthesis and humidity sensing of nanostructured γ -Fe₂O₃, *Mater. Res. Bull.* vol. 44, 1179–1182, 2009.

[13] Z. Li, H. Zhang, W. Zheng, W. Wang, H. Huang, C. Wang, A.G. Macdiarmid, Y. Wei, Highly sensitive and stable humidity nanosensors based on LiCl doped TiO₂ electrospun nanofibers, *J. Am. Chem. Soc.* Vol.130,5036–5037 2008.

[14] Q. Qi, T. Zhang, Q. Yu, R. Wang, Y. Zeng, L. Liu, H. Yang, Properties of humidity sensing ZnO nanorods-base sensor fabricated by screen-printing, *Sens. Actuators B: Chem.* Vol.133 .638–643, 2008

[15] Q. Kuang, C. Lao, Z.L. Wang, Z. Xie, L. Zheng, High-sensitivity humidity sensor based on a single SnO₂ nanowire, *J. Am. Chem. Soc.* Vol.129,.6070–6071, 2007

[16] F. Yang Forrest, S R. Organic solar cells using transparent SnO₂-F anodes. *Adv Mater*, vol.18,. 2018–2022, 2006

[17] سالار آملی حسین- مظفری احمد- رساله تحقیقاتی تهیه لایه نازک نانو ساختار اکسید قلع اینییدیوم (ITO) آرایش شده

type structure. *Semicond.Sci. Technol.* vol 8, 116–121, 1993

[5] A.R. Bari, M.D. Shinde, V. Deo, L.A. Patil, Effect of solvents on the particle morphology of nanostructured ZnO, *Indian J. Pure Appl. Phys.* Vol. 47, 24–27 2009.

[6] N.G. Patel, K.K. Makhija, C.J. Panchal, D.B. Dave, V.S. Vaishnav, Fabrication of carbon tetrachloride gas sensors using indium tin oxide thin films, *Sens. Actuators B-Chem.* Vol. 23, 49–53, 1995

[7] I. Sayago, J. Gutiérrez, L. Arés, J.I. Robla, M.C. Horrillo, J. Getino, J. Rino, J.A. Agapito, The effect of additives in tin oxide on the sensitivity and selectivity to NO_x and CO, *Sensors and Actuators B*, vol. 26–27, 19–23 1995.

[8] A. Tischner, A. Köck, T. Maier, C. Edtmaier, C. Gspan, G. Kothleitner, Tin oxide nanocrystalline films and nanowires for gas sensing applications, *Microelectronic Engineering* vol.86 . 1258–1261, 2009.

[9] K. Vijayalakshmi, C. Ravidhas, V.V. Pillay, D. Gopalakrishna, Influence of deposition parameters and heat treatment on the NO₂ sensing properties of nanostructured indium tin oxide thin film, *Thin Solid Films*, vol. 519 .3378–3382, 2011.

[10] M.K. Ram, O. Yavuz, M. Aldissi, NO₂ gas sensing based on ordered ultrathin films of

Single SnO₂ Nanowire, J. AM. CHEM. SOC, vol. 129, 6070-6071. 2007

بر روی سطوح شیشه ای و پلیمری برای سلول های خورشیدی-

سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران- ۱۳۹۲

[18] B. V. Bergeron Marton A. Oskam G, et al. Dye-sensitized SnO₂ electrodes with iodide and pseudohalide redox mediators. J Phys Chem B, 2005, vol. 109,2 937-943

[19] R. Ferro, J.A. Rodriguez, P. Bertrand, Peculiarities of nitrogen dioxide detection with sprayed undoped and indium-doped zinc oxide thin films, Thin Solid Films, vol.516, . 2225-2230, 2008.

[20]T. Hyodo, H. Inoue, H. Motomura, K. Matsuo, T. Hashishin, J. Tamaki, Y. Shimizu, M. Egashira, NO₂ sensing properties of macroporous In₂O₃-based powders fabricated by utilizing ultrasonic spray pyrolysis employing polymethylmethacrylate microspheres as a template, Sensors and Actuators B, vol. 151, 265-273, 2010

[21] H. Salar Amoli, S. Shokatian and M. Abdous, Thermal annealing combination with pulse Nd-YAG laser treatment of ITO on polycarbonate using spin coating process, J. Sol-Gel. Sci. Technol, Vol. 62, 323. 2012,

[22] H. Salar Amoli and B. Fathi, Effect of pulse Nd-YAG laser beam interaction on annealing of nanopowder ITO using spin-on-glass, J. Sol-Gel Sci. Technol. Vol. 59, p32-35, 2011

[23] Qin Kuang, Changshi Lao, Zhong Lin Wang, Zhaoxiong Xie, and Lansun Zheng, High-Sensitivity Humidity Sensor Based on a

Arhive of SID