

Fabrication of Acetone Gas Sensor Based on Fe₂O₃ Decorated CNTs with Ag Interdigitated Electrodes on Al₂O₃ Substrate

Vahid Babaei^{1,2}, Hamid Reza Ansari^{1,2}, Zoheir Kordrostami^{1,2*}

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

² Research Centre for Design and Fabrication of Advanced Electronic Devices, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
E-mails: kordrostami@sutech.ac.ir

Short Abstract

In this article, a resistive acetone gas sensor with high sensitivity is fabricated. A two-stage thermal hydrolysis reaction has been used to synthesize the sensitive Carbon Nanotubes (CNTs) decorated with iron oxide nanoparticles (Fe₂O₃). Micro-scale silver Inter Digitated Electrodes (IDEs) made of silver have been deposited on alumina substrate which is resistant to high temperatures using optical lithography. The synthesis process includes functionalizing carbon nanotubes and then decorating them with iron oxide nanoparticles. The synthesized nanocomposite was characterized using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results show that iron oxide nanoparticles uniformly decorated the surface of carbon nanotubes. The synthesized nanostructures were tested under different concentrations of acetone gas and showed appropriate response and high sensitivity. The fabricated sensor showed excellent selectivity, good reproducibility, and satisfactory response and recovery times. Decorating carbon nanotubes with iron oxide nanoparticles increases the sensitivity and speed of the sensor. The proposed sensor exposed to 100 ppm of acetone gas at a temperature of 200 degrees Celsius results in a resistance change of nearly 38 times. The improved sensor performance is mainly related to the material structure and the p-n junction between the CNTs and the iron oxide nanoparticles.

Keywords

Gas sensor, Acetone gas, Carbon nanotubes, Fe₂O₃ nanoparticles, Interdigitated electrodes, Alumina substrate.

1- Short Introduction (4-5 lines)

More attention to environmental pollution and monitoring industrial greenhouse gas emissions has led to extensive research on gas sensors. These sensors can detect toxic, flammable, and explosive gases in a short time. Gas sensors based on metal oxide semiconductors have been widely investigated in research works due to their excellent sensitivity and cheap synthesis of the target gas-sensitive material [1, 2]. During the last few decades, although satisfactory results have been obtained for the performance of gas sensors based on metal oxide semiconductors, the fabrication of controllable and sensitive devices is still a challenge for the future of these oxides [3, 4]. The sensing mechanism for sensors that use metal semiconductor oxides is primarily the absorption and reaction of oxygen in the air with nanoparticles on the surface of the material, which leads to a change in the electrical resistance of the material and, as a result, a change in its electrical conductivity [5, 6].

2- Proposed Work and Methodology (including comparison, simulation/experimental results, and discussion)

In this work, a gas sensor based on Fe₂O₃ decorated CNTs for detecting acetone vapor has been fabricated. A thermal hydrolysis technique has been used to synthesize the gas sensing layer. After exposure to different concentrations of the target gas (acetone), the proposed sensor showed excellent characterizations and gas sensing properties such as good selectivity, excellent repeatability, reasonable response and recovery times, and high sensitivity. The response of the fabricated sensor toward 100 ppm of acetone is about 38 with the response and recovery times of 78 and 75 s, respectively. Also, the proposed gas sensor in this article is sensitive to low concentrations of acetone (response to 25 ppm acetone is about 10).

3- Conclusion (4-5 lines)

In this research, the proposed synthesized nanocomposite composed of carbon nanotubes and iron oxide nanoparticles could successfully improve the acetone gas sensor performance. The characterization results showed that by using the described method, the iron oxide nanoparticles are well covered on the surface of carbon nanotubes. This kind of decoration led to high sensitivity and good response and recovery time of the sensor. The developed sensor responds only to acetone and has a very good selectivity. Sensor results were reproducible. The characteristics of this sensor have made it a suitable option for making acetone sensors in industrial applications.

4- References (2-3 references)

- [1] K. Wetchakun, T. Samerjai, N. Tamaekong, C. Liewhiran, C. Siri-wong, V. Kruefu, A. Wisitsoraat, A. Tuantranont, and S. Phanichphant, "Semiconducting metal oxides as sensors for environmentally hazardous gases", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 160, no. 1, pp. 580–591, 2011.
- [2] B. Cao, J. Chen, X. Tang, and W. Zhou, "Growth of monoclinic WO₃ nanowire array for highly sensitive NO₂ detection", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 19, no. 16, pp. 2323–2327, 2009.
- [3] Y. Wang, X. Jiang, and Y. Xia, "A solution-phase, precursor route to polycrystalline SnO₂ nanowires that can be used for gas sensing under ambient conditions", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125, no. 52, pp. 16 176–16 177, 2003.
- [4] H.-J. Song, X.-H. Jia, H. Qi, X.-F. Yang, H. Tang, and C.-Y. Min, "Flexible morphology-controlled synthesis of monodisperse α-Fe₂O₃ hierarchical hollow microspheres and their gas-sensing properties", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 3508–3516, 2012.
- [5] N. Yamazoe, G. Sakai, and K. Shimano, "Oxide semiconductor gas sensors", *Catalysis Surveys from Asia*, vol. 7, no. 1, pp. 63–75, 2003.
- [6] D. E. Williams, "Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 57, no. 1-3, pp. 1–16, 1999.

ساخت حسگر گاز استون مبتنی بر نانولوله های کربنی تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن بر روی الکتروودندانه شانهای نقره و زیر لایه آلومینا

وحید بابایی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

حمیدرضا انصاری

دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

زهیر کردرستمی

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله یک حسگر گاز مقاومتی استون با حساسیت بالا ساخته شده است. از نانولوله های کربنی (عامل دار شده) تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن ($\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$) به عنوان لایه حساس به گاز استون استفاده شده است. کامپوزیت های $\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$ از طریق یک واکنش هیدرولیز حرارتی بدست آمدند. الکترووددهای دندان شانه ای از جنس نقره روی زیر لایه آلومینا لیتوگرافی شدند که مزیت آن مقاومت زیاد در دماهای بالا می باشد. کامپوزیت های $\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$ از طریق آنالیزهای پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری مشخصه یابی شدند که بیانگر توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید آهن روی سطح نانولوله های کربنی بود. حسگرهای ساخته شده مبتنی بر $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ و $\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$ در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون و در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب پاسخی برابر با ۱۶/۳ و ۳۸ داشتند. همچنین حسگر مبتنی بر $\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$ زمان پاسخ و بازیابی به ترتیب برابر با ۷۸ و ۷۵ ثانیه را نشان داد. لازم به ذکر است که پاسخ ۳۸ برابری حاصل شده بیشترین پاسخ حسگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد بوده و بدون مقایسه با کارهای پیشین بدست آمده است. همچنین نتایج آنالیزها نشان داد که حسگر ساخته شده مبتنی بر کامپوزیت های $\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$ دارای انتخابگری عالی، تکرارپذیری خوب، پاسخ زیاد و زمان پاسخ و بازیابی نسبتاً خوبی است. حسگر مبتنی بر نانولوله های کربنی تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن در مقایسه با حسگر مبتنی بر نانوذرات اکسید آهن خالص پاسخ و سرعت بالاتری دارد. نتایج نشان می دهند این بهبود عملکرد حسگر عمدتاً به ساختار منحصر به فرد و پیوند p-n بین نانولوله های کربنی و نانوذرات اکسید آهن مربوط می شود.

کلمات کلیدی

حسگر گاز، گاز استون، نانولوله های کربنی، نانوذرات اکسید آهن، الکتروودندانه شانهای، زیر لایه آلومینا.

نام نویسنده مسئول: دکتر زهیر کردرستمی

ایمیل نویسنده مسئول: kordrostami@sutech.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

۱- مقدمه

به گاز هدف، مورفولوژی سطح نانوساختارهای سنتز شده و انتخاب نوع اکسید فلزی برای تزئین روی سطح ماده اصلی از اهمیت به سزایی برخوردار است [۷-۱۰]. تحقیقات اخیر نشان داده است که کامپوزیت های متشکل از نیمه رسانا های اکسید فلزی مختلف با ساختارهای ناهمگن، عملکرد حسگری بهتری را در مقایسه با اکسیدهای فلزی خالص دارند [۱۱، ۱۲]. تشخیص گاز استون بدلیل استفاده از آن در صنایع مختلفی از جمله صنایع پزشکی، دارویی، پتروشیمی و پالایشگاه های نفتی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. از این رو ساخت حسگر گاز استون با حساسیت بالا و زمان پاسخ پایین حایز اهمیت می باشد. اکسیدهای فلزی مختلفی قابلیت حسگری و تغییر مقاومت در معرض ترکیبات آلی بخارشدنی از جمله گاز استون را دارند لکن نانومواد متشکل از اکسید های فلزی و نانوساختارهای کربنی بدلیل خواص حسگری عالی در معرض این گاز انتخاب بسیاری از محققان هستند. در نتیجه از این نانومواد بدلیل حساسیت عالی، هزینه ساخت کم، پایداری خوب و سازگاری با محیط زیست، به طور گسترده در زمینه های مختلف از جمله حسگرهای گاز استفاده شده است [۱۳].

توجه بیشتر به آلودگی محیطی و نظارت بر انتشار گازهای گلخانه ای صنعتی منجر به تحقیقات گسترده ای روی حسگرهای گاز شده است. این حسگرها می توانند گازهای سمی، قابل اشتعال و انفجاری را در زمان اندکی شناسایی کنند. حسگرهای گاز مبتنی بر نیمه رسانا های اکسید فلزی به دلیل حساسیت عالی و سنتز ارزان ماده حساس به گاز هدف، به طور گسترده ای در کارهای پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته اند [۱، ۲]. در طول چند دهه گذشته اگرچه نتایج رضایت بخشی برای عملکرد حسگرهای گاز مبتنی بر نیمه رسانا های اکسید فلزی به دست آمده است، اما ساخت افزاره های قابل کنترل و حساس هنوز یک چالش برای آینده این اکسیدها محسوب می شود [۳، ۴]. مکانیزم سنجش برای حسگرهایی که از اکسیدهای نیمه رسانای فلزی استفاده می کنند، در درجه اول جذب و واکنش اکسیژن موجود در هوا با نانوذرات موجود در سطح ماده است که منجر به تغییر در مقاومت الکتریکی ماده و در نتیجه تغییر هدایت الکتریکی آن می شود [۵، ۶]. بنابراین انتخاب عناصر تشکیل دهنده ماده حساس

گاز هدف است. همچنین پاسخ حسگر پس از گذشت ۲۵ روز تغییر چندانی نداشت که نشانگر پایداری خوب آن است. حسگر استون ساخته شده در سال ۲۰۲۱ توسط هان و همکاران [۲۱]، مبتنی بر هشت وجهی های توخالی Pt-Zn₂SnO₄ بود که قابلیت کاربرد در زمینه بیماری‌هایی همچون دیابت را داشت. حسگر ارائه شده در دمای بهینه ۳۵۰ درجه سانتیگراد انتخابگری، تکرارپذیری و پایداری عالی را نشان داد. همچنین این حسگر قابلیت تشخیص غلظت‌های پایین استون در تنفس انسان را داشت که منجر به کاربرد آن در زمینه‌های پزشکی می‌شود. این حسگر با تزئین بهینه پلاتین در مواجهه با ۵۰۰ ppm گاز استون پاسخ ۶۸۰ برابری داشت که در مقایسه با حالت خالص (بدون تزئین پلاتین) ۳۶/۹ برابر افزایش پاسخ در آن دیده می‌شود. در کار دیگری در سال ۲۰۲۱ ژو و همکاران [۲۲]، موفق به ساخت حسگر گاز استون مبتنی بر نانوتسمه های اکسید تیتانیوم بهینه سازی شده توسط نانوذرات نقره شدند. نتایج، پاسخ ۲۸/۲۵ برابری در مواجهه با ۵۰۰ ppm گاز استون را نشان دادند. همچنین زمان پاسخ و بازیابی به ترتیب برابر ۶ و ۸ ثانیه بدست آمد که نشان دهنده سرعت بالای حسگر حتی در تشخیص مقادیر بالای غلظت‌های استون (۵۰۰ ppm) می‌باشد. آزمایش‌ها بیانگر پایداری خوب ماده حساس به گاز پس از گذشت یک ماه بودند. در [۲۳]، نانوکامپوزیت‌های اکسید تیتانیوم دوپ شده با CdS ساخته شدند. حسگر ساخته شده در معرض غلظت‌های مختلفی (۵۰۰-۱۰۰۰ ppm) از گازهای استون، پروپانول و LPG قرار گرفت که بهترین پاسخ برابر با ۷۱٪ در معرض ۵۰۰ ppm گاز استون بود. زمان پاسخ و زمان بازیابی به ترتیب برابر با ۵۵ و ۱۱۵ ثانیه بدست آمد که در مقایسه با حسگر بدون آلاینش (۸۵ و ۱۹۰ ثانیه) برتری قابل توجهی داشت.

در این مقاله نانولوله‌های کربنی تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن طی دو مرحله سنتز شدند و با قرارگیری بر روی الکترودها و زیرلایه مناسب قابلیت حسگری غلظت‌های مختلفی از گاز استون در بازه ۲۵-۱۵۰ ppm و دمای بهینه ۲۰۰ درجه سانتیگراد را ایجاد نموده اند. حسگر ساخته شده در این پژوهش زمان پاسخ و بازیابی مطلوبی دارد که قابلیت کاربرد در صنایع مختلف را به آن می‌دهد.

۲- کار آزمایشگاهی

مواد FeCl₃، اسید نیتریک (HNO₃) و اسید سولفوریک (H₂SO₄) از شرکت Merck آلمان و MWCNTs از شرکت US Research Nanomaterials خریداری شدند و هیچ خالص سازی اضافی روی آن صورت نگرفته است.

۲-۱- عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی

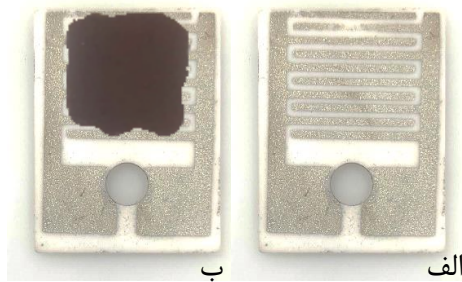
نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNTs) استفاده شده در این پژوهش از شرکت Merck آلمان خریداری شدند. طی یک روش مرسوم، در ابتدا ۱۰۰ میلی گرم از نانولوله های کربنی چند جداره با ۱۵ میلی لیتر اسید سولفوریک ۷۲٪ و ۵ میلی لیتر اسید نیتریک ۶۵٪ ترکیب شدند. محلول بدست آمده ۹ دقیقه در حالت عادی ترکیب شد و پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق در التراسونیک هم‌زده شد. در گام بعدی، محلول حاصل به مدت ۵ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند ریفلکس قرار گرفته و پس از آن برای یکنواخت‌تر شدن به مدت ۱۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شد. به منظور جداسازی ناخالصی‌ها، محلول بدست آمده طی ۷ سیکل متوالی و به مدت ۵ دقیقه و با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه با آب و اتانول شسته شد. در نهایت خروجی فرآیند شست و شو به مدت ۱۲ ساعت تحت دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا پودر نانولوله های کربنی بدست آید. پس از اتمام زمان مورد نظر پودر مشکلی رنگی بدست آمد [۲۴، ۲۵]. مراحل عامل‌دار کردن نانولوله های کربنی در شکل ۱ نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده در پژوهش‌های پیشین نشان داده است که نانولوله‌های کربنی در معرض گاز استون رفتار نیمه‌رسانا نوع p را از خود نشان می‌دهند. خواص حسگری نانولوله های کربنی حاصل برهمکنش مولکول‌های اکسیژن موجود در هوا با نانولوله‌های کربنی موجود در سطح حسگر است [۱۴].

یکی از مهمترین کاربردهای حسگر گاز استون در تشخیص بیماری دیابت می‌باشد. در تنفس انسان گازهای مختلفی از جمله کربن دی اکسید، بخار آب، هیدروژن و اکسیژن وجود دارد. برخی گازها مثل استون، اتانول و نیتروژن دی اکسید بر اثر وجود بیماری در بدن، در تنفس بوجود می‌آیند. یک فرد دیابتی مقدار بسیار اندکی از گاز استون (حدود ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ppb) را در تنفس خود دارد که بسته به شرایط مختلف از جمله سن، قد، وزن، جنسیت و میزان انسولین تزریق شده در ۲۴ ساعت گذشته این مقدار استون می‌تواند تغییر کند. ساخت یک دستگاه برای تشخیص دیابت از روی استون موجود در بازدم بدلیل موارد ذکر شده در بالا چالش‌های زیادی دارد. همچنین یکی دیگر از چالش‌های مهم این است که دستگاه ساخته شده توانایی تشخیص مقدار کم گاز استون را از مقادیر زیاد گازهای دیگر مثل اکسیژن و کربن دی اکسید داشته باشد. بنابراین حسگر ساخته شده باید از انتخابگری بسیار خوبی برخوردار باشد.

همچنین، این رفتار پایه و اساس ساخت حسگرهای گاز مبتنی بر نانولوله های کربنی به عنوان یک ماده حساس به گاز می‌باشد [۱۵]. تحقیقات بیشتر در این زمینه نشان داده است که نقص‌های سطحی، آلاینش نانو ذرات فلزات مختلف در نیمه‌رسانا اکسید فلزی، تزئین نانومواد مختلف روی سطح این نانوساختارها و آلاینده‌های باقی‌مانده به طور قابل توجهی بر عملکرد سنجش نانولوله‌های کربنی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، روش‌هایی مانند آلاینش، تزئین و کامپوزیت کردن نانولوله‌های کربنی با مواد مختلف به عنوان استراتژی‌های مؤثر برای تغییر ویژگی‌های شیمیایی و افزایش خواص سنجش گاز آن‌ها شناخته شده اند [۱۶]. به عنوان مثال در سال ۲۰۲۱ چنگ و همکاران یک حسگر گاز مبتنی بر میکرو کره‌های کامپوزیت SnO₂/ZnSnO₃ با ساختار دو پوسته توخالی را ساختند. قطر بهینه میکرو کره ها بطور میانگین ۵۰۰ نانومتر بدست آمد که منجر به حساسیت ۳۰ برابری در دمای ۲۹۰ درجه سانتیگراد و در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون گردید. علاوه بر این حسگر مذکور در معرض گازهای مختلفی از جمله اتانول، متانول، تولوئن، بنزن و فرمالدهید انتخابگری عالی و پایداری بلند مدتی را نشان داد [۱۷]. در سال ۲۰۲۱ حسگر مبتنی بر ترکیب rGO-CuO به منظور تشخیص غلظت‌های مختلف گاز استون ساخته شد. حسگر ارائه شده علاوه بر انعطاف‌پذیری، قابلیت حسگری در دمای اتاق را دارد. همچنین این حسگر در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون دارای پاسخ ۵۲/۹ درصدی و زمان پاسخ و بازیابی به ترتیب ۶/۵ و ۷/۵ ثانیه بود. نتایج بدست آمده بیانگر تکثیرپذیری و انتخابگری عالی در معرض ۵ گاز مختلف بودند [۱۸]. رضایی و همکاران [۱۹]، موفق به سنتز نانوساختارهای کامپوزیت ZnO و CuO برای تشخیص گاز استون شدند. هدف از ساخت حسگر مذکور سنجش میزان استون موجود در تنفس بیماران دیابتی بود. حساسیت، زمان پاسخ و زمان بازیابی حسگر در دمای بهینه ۹۰ درجه سانتیگراد و در معرض ۵ ppm از گاز استون به ترتیب ۷۰/۱۹ درصد، ۶/۷ و ۷/۲ ثانیه بدست آمد. نتایج بدست آمده نشان دهنده سرعت بالای حسگر ساخته شده در تشخیص غلظت‌های پایین از گاز استون بود. در سال ۲۰۲۲ کائو و همکاران [۲۰]، از نانوساختارهای اکسید تیتانیوم برای تشخیص غلظت‌های مختلفی از گاز استون استفاده کردند. این حسگر در حالت بهینه پاسخ ۱۲/۳ برابری در معرض ۱۰۰ ppm از گاز استون و در دمای ۳۲۰ درجه سانتیگراد را نشان داد. همچنین حسگر یاد شده قابلیت تشخیص غلظت‌های کمی از استون (۱ ppm) با زمان پاسخ کم را دارد. زمان پاسخ و بازیابی حسگر ساخته شده در شرایط عملیاتی به ترتیب برابر با ۳ و ۴۲۱ ثانیه بود که نشانگر سرعت در پاسخ و کند بودن در بازیابی در مواجهه با

پوشش‌دهی دورانی قرار گرفت. در ادامه زیرلایه به مدت ۲ دقیقه روی هات پلیت با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از آن بلافاصله ماسک الکترودهای دندان‌شانه‌ای روی زیرلایه قرار گرفت و با استفاده از دستگاه لیتوگرافی به مدت ۵۰ ثانیه نور فرابنفش به آن تابانده شد. در گام بعدی زیرلایه در محلول سدیم هیدروکسید و آب دیونیزه قرار گرفت تا الگوی الکترودهای دندان‌شانه‌ای از روی لایه فتورزیست حذف شود. پس از آن با استفاده از دستگاه کندوپاش و به روش DC یک لایه ۲۰۰ نانومتری از نقره روی فتورزیست لایه نشانی شد.



شکل ۳- الف) الکترودهای نقره ای لیتوگرافی شده روی زیرلایه آلومینا، ب) لایه‌نشانی ماده حساس به گاز روی زیرلایه

در گام نهایی نمونه بدست آمده درون محلول استون و حمام التراسونیک قرار داده شد تا الگوی الکترودهای دندان‌شانه‌ای روی زیرلایه آلومینا همانطور که در شکل ۳الف دیده می‌شود پدیدار شود.

۲-۴- لایه‌نشانی ماده حساس به گاز روی زیرلایه

به منظور ساخت این حسگر ابتدا ۳۰ میکرولیتر از محلول نانولوله های کربنی و نانوذرات اکسید آهن سنتز شده (توضیح فرآیند سنتز در بخش ۲-۲) با نسبت ۱۰ میلی گرم در ۱ میلی لیتر مخلوط شد و پس از آن بر روی الکترودها به روش قطره چکانی لایه نشانی گردید. سپس به مدت یک ساعت در دمای اتاق رها شد تا خشک شود. در گام بعدی حسگر ساخته شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا ماده حساس آماده شود و پایداری آن افزایش یابد. شکل ۳ب الکترودها را بعد از انجام لایه‌نشانی ماده حساس به گاز روی زیرلایه نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

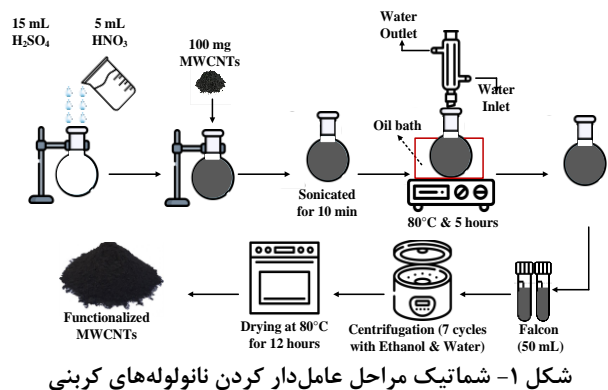
۳-۱- مشخصه‌یابی ماده حساس به گاز

ساختار و مورفولوژی سطح نمونه آماده شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, TESCAN-Vega3, Czech Republic) تجزیه و تحلیل شد. همچنین مطالعات فاز و ساختارهای کریستالی ماده حساس به گاز با استفاده از پراش پرتوی ایکس (X-ray powder diffraction, Bruker D8-X Advanced X-ray diffractometer, Germany) مورد ارزیابی قرار گرفت.

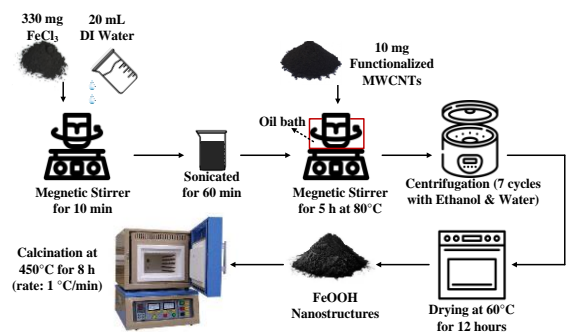
عکس SEM و TEM از نانولوله های کربنی تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن در شکل ۴الف و ۴ب دیده می‌شود. قطر نانولوله های کربنی حدود ۱۰۰ نانومتر و طول آنها تقریباً برابر با ۵۰۰ نانومتر می‌باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود نانوذرات اکسید آهن با رنگ شفاف‌تری نسبت به نانولوله ها، روی آن‌ها تزئین شده اند. با مشاهده شکل ۴الف و ۴ب می‌توان به ساختار متخلخل سطح نمونه آماده شده پی برد که منجر به نفوذ بیشتر گاز هدف در لایه های ماده می‌شود. با توجه به شکل ۵ که منحنی XRD نمونه سنتز شده را نشان می‌دهد می‌توان ترکیب‌های تشکیل دهنده ماده سنتز شده را تشخیص داد. پیک‌های ایجاد شده در زوایای ۲۴/۲، ۳۳/۱، ۳۵/۱، ۴۰/۹، ۴۹/۴، ۵۴، ۵۷/۵،

۲-۲- تزئین نانولوله‌های کربنی با نانوذرات اکسید آهن سنتز شده

در ابتدا ترکیب ۲۰ میلی لیتر آب دیونیزه شده با ۳۳۰ میلی گرم $FeCl_3$ به مدت ۱۰ دقیقه روی هات پلیت و تحت هم‌وزن مغناطیسی قرار گرفت. در گام بعدی ۱۰ میلی‌گرم از نانولوله‌های کربنی بدست آمده در مراحل قبل به محلول $FeCl_3$ اضافه شد تا نانو ساختارهای $FeOOH$ بدست آید. پس از آن برای یکنواخت‌تر شدن، محلول به مدت ۶۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شد. در مرحله بعدی محلول حاصل به مدت ۳ دقیقه با استفاده از پراب التراسونیک که دارای توان بالاتری است هم زده شد. در گام بعدی محلول سیاه و سفید رنگ بدست آمده به مدت ۵ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد درون یک وان روغنی تحت هم‌وزن مغناطیسی قرار داده شد. پس از آن مجدداً محلول بدست آمده به منظور خالص سازی بیشتر شسته شد (مانند مرحله قبل). در نهایت برای بدست آوردن پودر نانولوله های کربنی و اکسید هیدرواکسید آهن ($FeOOH$)، خروجی فرآیند به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می‌شود. در انتها پودر مشکی رنگ بدست آمده از فرآیند سنتز توضیح داده شده در فوق به مدت ۸ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد (با نرخ ۱ درجه بر دقیقه) قرار گرفت که این فرآیند منجر به تشکیل نانولوله های کربنی تزئین شده با نانوذرات اکسید آهن (پودر نارنجی رنگ) شد [۲۶، ۲۷]. مراحل فرآیند تزئین نانولوله های کربنی با نانوذرات اکسید آهن در شکل ۲ نشان داده شده است.



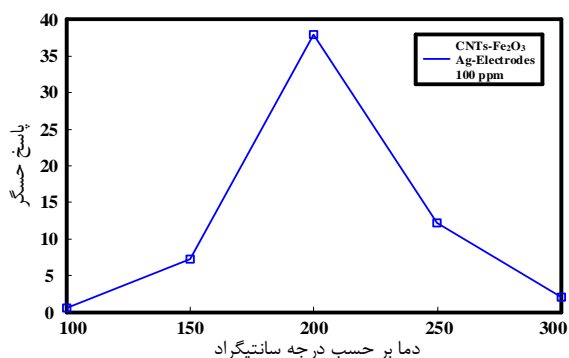
شکل ۱- شماتیک مراحل عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی



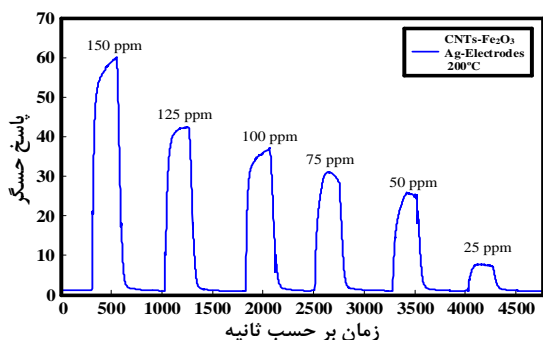
شکل ۲- شماتیک تزئین نانولوله‌های کربنی با نانوذرات اکسید آهن

۲-۳- طراحی و ساخت الکترودهای دندان‌شانه‌ای

در این پژوهش از الکترودهای دندان‌شانه‌ای استفاده شده است. برای تحمل دمای بالا توسط حسگر از زیرلایه آلومینا (Al_2O_3) استفاده گردید. در ابتدا سطح زیرلایه آلومینا آغشته از فتورزیست نوع مثبت شد. برای ایجاد یک لایه نازک و یکنواخت، زیرلایه به مدت ۶۰ ثانیه و ۳۵۰۰ دور بر دقیقه تحت

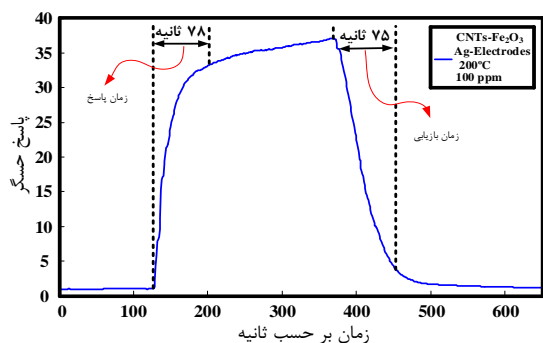


شکل ۶- پاسخ حسگر در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون در دماهای مختلف



شکل ۷- نمودار پویای پاسخ حسگر در معرض غلظت‌های مختلف گاز استون در دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتیگراد

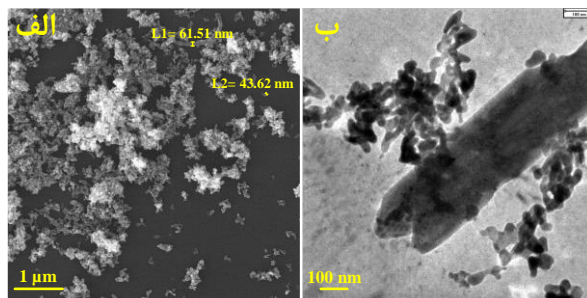
نتایج نشان می‌دهد بازایی حسگر بسیار تکرارپذیر بوده و مقاومت آن به خوبی به مقاومت اولیه باز می‌گردد. در شکل ۸ پاسخ پویای حسگر پیشنهادی در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون با جزئیاتی شامل زمان پاسخ و زمان بازایی نشان داده شده است. منظور از زمان پاسخ زمانی است که مقاومت حسگر از مقدار ثابت در معرض هوا به ۹۰ درصد مقدار نهایی در معرض گاز هدف می‌رسد و بالعکس. منظور از زمان بازایی زمانی است که مقاومت حسگر از مقدار نهایی در معرض گاز هدف به ۹۰ درصد مقدار اولیه در معرض هوا کاهش می‌یابد [۲۶-۲۸]. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود زمان پاسخ و زمان بازایی حسگر ساخته شده در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون و در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با ۷۸ و ۷۵ ثانیه است.



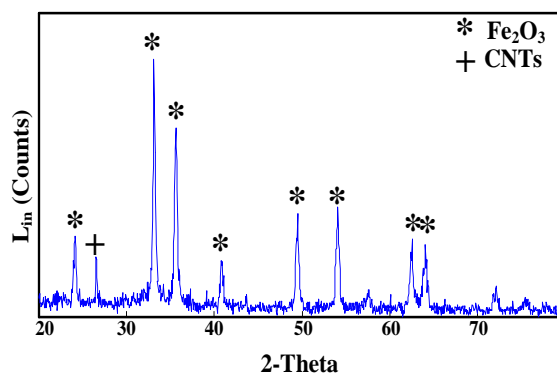
شکل ۸- نمایش زمان پاسخ و بازایی در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون در دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتیگراد.

همچنین اندازه گیری‌ها نشان می‌دهند حسگر ساخته شده از تکرارپذیری عالی و انتخابگری خوبی برخوردار می‌باشد. منظور از انتخابگری خوب این است که حسگر گاز ساخته شده تنها در معرض غلظت مشخصی از گاز هدف از پاسخ خوبی برخوردار باشد و در معرض دیگر گازها حساسیت چندانی نداشته باشد. همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود پاسخ پویای حسگر در معرض ۱۰۰ ppm

متعلق به نانوذرات اکسید آهن و پیک مشاهده شده در زاویه ۶۴، ۶۲/۳ و ۷۱/۹ مربوط به نانولوله‌های کربنی می‌باشد. پیک‌های بدست آمده از آنالیز XRD در شکل ۵ به خوبی تشکیل ساختار CNTs@Fe₂O₃ را تایید می‌نماید.



شکل ۴- (الف) عکس FESEM با بزرگنمایی ۱ میکرومتر، (ب) عکس TEM با بزرگنمایی ۱۰۰ نانومتر



شکل ۵- نمودار XRD نمونه نانولوله‌های کربنی تزیین شده با نانوذرات اکسید آهن

۲-۳- اندازه گیری پاسخ حسگر گاز

یکی از مهمترین نکات در آزمایش‌های حسگری گاز تعیین دمای بهینه عملیاتی حسگر مد نظر می‌باشد. بدین منظور در ابتدا حسگر ساخته شده مبتنی بر نانولوله‌های کربنی تزیین شده با نانوذرات اکسید آهن در معرض ۱۰۰ ppm از گاز استون در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد با گام‌های ۵۰ درجه ای مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود بیشترین پاسخ حسگر در دمای بهینه ۲۰۰ درجه سانتیگراد بدست آمد که برابر با ۳۸ بوده و نسبت به دمای قبلی (۷ برابر) و دمای بعدی (۱۲ برابر) افزایش قابل توجهی دارد. منظور از پاسخ حسگر، نسبت مقاومت حسگر در معرض گاز هدف به مقاومت حسگر در معرض هوا (برای رفتار نوع p) یا نسبت مقاومت حسگر در معرض هوا به مقاومت حسگر در معرض گاز هدف (برای رفتار نوع n) می‌باشد.

پس از تعیین دمای کاری، حسگر ساخته شده در معرض غلظت‌های مختلفی از گاز استون در بازه ۲۵ ppm تا ۱۵۰ ppm قرار گرفت. پاسخ پویای حسگر در معرض تمامی غلظت‌ها در شکل ۷ قابل مشاهده است. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش غلظت، پاسخ حسگر نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به پاسخ عالی حسگر در معرض ۲۵ ppm گاز استون می‌توان به حساسیت بالای حسگر و پاسخ مناسب آن نسبت به غلظت‌های پایین پی برد. همانطور که از شکل ۷ پیداست حسگر ارائه شده در این پژوهش در دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتیگراد در معرض غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، و ۱۵۰ ppm به ترتیب پاسخهایی برابر با ۷، ۲۵، ۲۸/۵، ۳۸، ۴۷ و ۵۰ دارد.

در این مقاله ۲۰۰ درجه سانتیگراد است که در مقایسه با تحقیقات انجام شده در منابع [15]، [18]، [19] و [20] که به ترتیب دارای دمای کاری ۲۹۰، ۳۲۰، ۳۵۰ و ۲۶۰ درجه سانتیگراد هستند، از مقدار کمتری برخوردار است. این مهم نشان دهنده کاهش تلفات توان و افزایش ذخیره انرژی در حسگر ساخته شده در این مقاله می‌باشد. از طرفی دمای کاری حسگر ارایه شده در مقایسه با منابع [17] و [21] (به ترتیب دارای دمای کاری ۹۰ و ۲۵ درجه سانتیگراد) از مقدار بیشتری برخوردار است. در منبع [17] و [21] غلظت گاز هدف و پاسخ به ترتیب برابر با (۳۰ ppm و ۰/۹) و (۱۰۰۰ ppm و ۰/۳) می‌باشد که نسبت به حسگر ساخته شده در این مقاله (۱۰۰ ppm و ۳۸) نتایج ضعیف‌تری را دارند. در نتیجه بالا بودن دمای کاری در این مقاله در مقایسه با منابع [17] و [21] نیز به این ترتیب توجیه می‌شود. با توضیحات فوق و مقایسه غلظت گاز هدف، پاسخ و دمای عملیاتی در حسگر ساخته شده در این مقاله با کارهای پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که حسگر ساخته شده با پاسخ ۳۸ برابری در معرض ppm ۱۰۰ گاز استون در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد گزینه مطلوبی برای استفاده به عنوان حسگر گاز استون در صنعت می‌باشد.

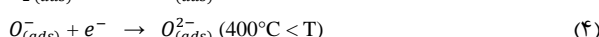
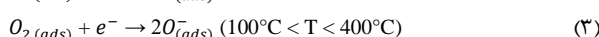
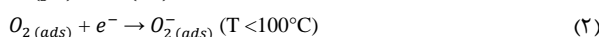
جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های حسگری حسگر ساخته شده با کارهای

پیشین

ماده حسگری	مورفولوژی	غلظت گاز (ppm)	پاسخ R_g/R_a or (R_a/R_g)	دمای عملیاتی (°C)	منبع
$\text{SnO}_2/\text{ZnSnO}_3$	double-shelled hollow microspheres	۱۰۰	۳۰	۲۹۰	[15]
ZnO/CuO	nanostuctures	۳۰	۰/۹	۹۰	[17]
TiO_2	nanostuctures	۱۰۰	۱۲/۳	۳۲۰	[18]
$\text{Pt-Zn}_2\text{SnO}_4$	hollow octahedra	۱۰۰	۹۰	۳۵۰	[19]
$\text{TiO}_2\text{-Ag}$	nanobelts	۱۰۰	۱۰	۲۶۰	[20]
CdS-TiO_2	nanocomposite	۱۰۰۰	۰/۳	۲۵	[21]
$\text{CNT@Fe}_2\text{O}_3$	nanorods	۱۰۰	۳۸	۲۰۰	این کار
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$			۱۶/۳		

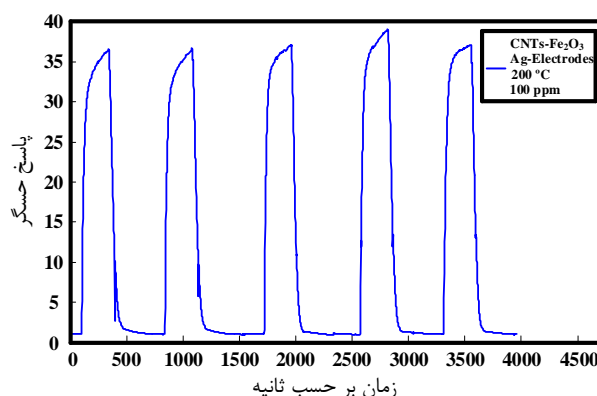
۳-۳- ساز و کار حسگری گاز

هنگامی که یک حسگر گاز مبتنی بر MOS در معرض هوا قرار می‌گیرد، مولکول‌های اکسیژن موجود در هوا روی سطح لایه حساس به گاز جذب می‌شوند. در مورد حسگر ارایه شده در این مقاله نیز سناریو می‌تواند مشابه باشد به طوری که مولکول‌های اکسیژن روی ماده حساس به گاز هدف جذب می‌شوند. به دلیل الکترون‌گاتئوی نسبتاً بالای مولکول‌های اکسیژن جذب شده، الکترون‌های نوار هدایت را از لایه حساس به گاز می‌گیرند و در نتیجه یون‌های اکسیژن تشکیل می‌شوند. همانطور که در معادلات (۱)-(۴) نشان داده شده است نوع یون اکسیژن غالب بسته به دمای کاری متفاوت خواهد بود:

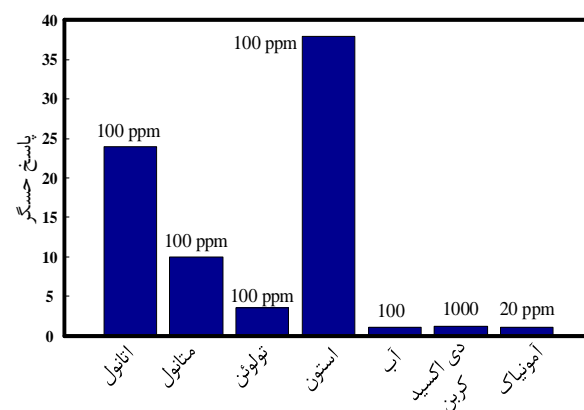


از آنجایی که در مواد نوع n، اکثر حامل‌ها الکترون هستند، از دست دادن الکترون‌ها منجر به افزایش عرض لایه تخلیه الکترون در تماس با ماده حساس به گاز می‌شود. هر چه الکترون بیشتر جذب شود، عرض لایه تخلیه در سطوح در معرض لایه حسگر بیشتر می‌شود. این پدیده منجر به افزایش مقاومت ماده حسگر می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که مقاومت سنسور به یک مقاومت پایدار برسد. وقتی گاز استون وارد محفظه می‌شود اکسیژنی که از قبل

گاز استون و در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای ۵ سیکل متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته است که هر بار با اختلاف کمی پاسخ ۳۸ برابری تکرار شده است. به منظور بررسی انتخابگری حسگر پیشنهادی، آن را در معرض بخارهای مختلفی از جمله اتانول، متانول، تولوئن، آب، دی اکسید کربن و آمونیاک قرار دادیم. به دلیل پایه الکلی ترکیبات آلی بخارشده (اتانول، متانول و ...) انتظار می‌رود پاسخ حسگر در برابر این دسته از گازها نسبت به گازهای دیگر از مقدار بالاتری برخوردار باشد. با این حال پاسخ حسگر ساخته شده به گاز استون در دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتیگراد در مقایسه با تعدادی دیگر از گازها از جمله آمونیاک، کربن دی اکسید (گازهایی که در کپسول وجود دارند و بصورت مایع در دسترس نیستند)، آب، اتانول، متانول و تولوئن (گازهای VOC یا ترکیبات آلی بخارشده که بصورت مایع در دسترس هستند) بسیار بهتر است (۳۸ برابر) که بیانگر حساسیت بالای حسگر ساخته شده و انتخابگری بسیار خوب آن است. نتایج آزمایش‌های انتخابگری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

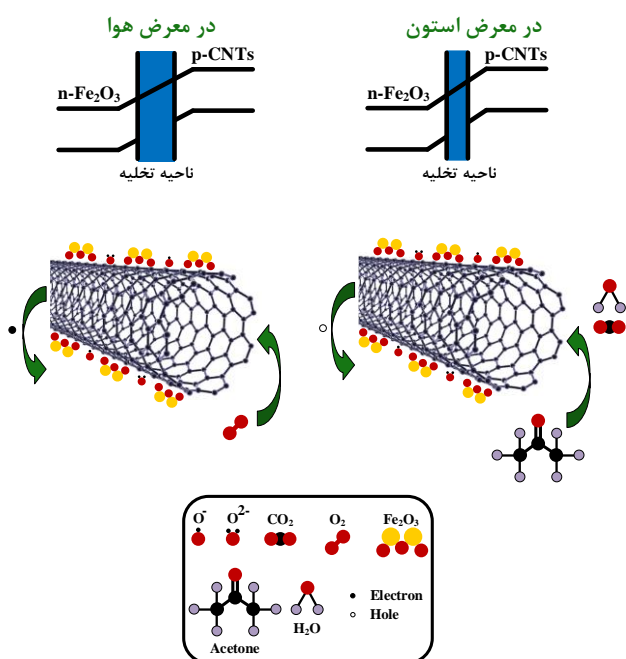


شکل ۹- تکرارپذیری حسگر در معرض ۱۰۰ ppm گاز استون و در دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۰- انتخابگری حسگر در معرض هفت گاز مختلف در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد

در جدول ۱ ویژگی‌های حسگری حسگر ساخته شده در این مقاله با حسگرهای ساخته شده در کارهای پیشین مقایسه شده است. با تحلیل نتایج بدست آمده و مقایسه آن با کارهای گذشته مشخص شد که حسگر ارایه شده نتایج بهتری را نسبت به کارهای پیشین دارد. در طراحی و ساخت یک حسگر گاز یکی از مهمترین پارامترها دمای کاری حسگر است. هرچه دمای کاری پایین‌تر باشد توان کمتری برای بهره‌گیری از حسگر تلف شده و در نتیجه انرژی بیشتری ذخیره می‌شود. همچنین در شرایط نرمال حسگری بهتر محسوب می‌شود که در معرض غلظت کمتری از گاز استون از پاسخ بیشتری برخوردار باشد. همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود دمای کاری حسگر ساخته شده



شکل ۱۱- شماتیک فرایند حسگری حسگر گاز استون در معرض هوا و استون

مراجع

- [1] K. Wetchakun, T. Samerjai, N. Tamaekong, C. Liewhiran, C. Siri-wong, V. Kruefu, A. Wisitsoraat, A. Tuantranont, and S. Phanichphant, "Semiconducting metal oxides as sensors for environmentally hazardous gases", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 160, no. 1, pp. 580–591, 2011.
- [2] B. Cao, J. Chen, X. Tang, and W. Zhou, "Growth of monoclinic WO_3 nanowire array for highly sensitive NO_2 detection", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 19, no. 16, pp. 2323–2327, 2009.
- [3] Y. Wang, X. Jiang, and Y. Xia, "A solution-phase, precursor route to polycrystalline SnO_2 nanowires that can be used for gas sensing under ambient conditions", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125, no. 52, pp. 16 176–16 177, 2003.
- [4] H.-J. Song, X.-H. Jia, H. Qi, X.-F. Yang, H. Tang, and C.-Y. Min, "Flexible morphology-controlled synthesis of monodisperse $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ hierarchical hollow microspheres and their gas-sensing properties", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 3508–3516, 2012.
- [5] N. Yamazoe, G. Sakai, and K. Shimanoe, "Oxide semiconductor gas sensors", *Catalysis Surveys from Asia*, vol. 7, no. 1, pp. 63–75, 2003.
- [6] D. E. Williams, "Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 57, no. 1-3, pp. 1–16, 1999.
- [7] C. Wang, X. Cheng, X. Zhou, P. Sun, X. Hu, K. Shimanoe, G. Lu, and N. Yamazoe, "Hierarchical $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{NiO}$ composites with a hollow structure for a gas sensor", *ACS applied materials & interfaces*, vol. 6, no. 15, pp. 12 031–12 037, 2014.
- [8] T. Waitz, T. Wagner, T. Sauerwald, C.-D. Kohl, and M. Tiemann, "Ordered mesoporous In_2O_3 : synthesis by structure replication and application as a methane gas sensor", *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 4, pp. 653–661, 2009.
- [9] پ. پورمحمدیان، م. ک. عدالتیان، "بررسی رفتار عایقی روغن معدنی در ولتاژ فرکانس قدرت با حضور نانو لوله‌های کربنی"، *مجله مهندسی برق تبریز*، دوره ۴۴ شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳.
- [10] م. جعفربلند، ب. مینایی، ب. جعفربلند، "طراحی و ساخت سنسور جریان کوآکسیال جریان زیاد پالسی تا مرتبه نانوثانیه"، *مجله مهندسی برق تبریز*، دوره ۵۲ شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱.
- [11] J. Chen, X. Pan, F. Boussaid, A. McKinley, Z. Fan, and A. Bermak, "Breath level acetone discrimination through temperature

جذب شده است با مولکول‌های سطح ماده حساس به گاز واکنش داده و CO_2 و H_2O تشکیل می‌شوند. در نتیجه این عمل، الکترونی که از لایه هدایت گرفته شده بود آزاد می‌شود و مجدداً مقاومت حسگر کاهش می‌یابد که این عمل منجر به ایجاد پاسخ حسگر به صورت تغییر مقاومت در معرض گاز استون می‌شود.

در این مقاله افزایش عملکرد حسگری گاز بر اساس کامپوزیت‌های $\text{CNTs@Fe}_2\text{O}_3$ را می‌توان به دلایل زیر نسبت داد:

اول، تشکیل یک پیوند p-n بین Fe_2O_3 و CNT که نقش اصلی را در بهبود عملکرد کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند. بندگانگ و تابع کار CNT های نوع p به ترتیب تقریباً $5/6$ الکترون‌ولت و $0/5$ الکترون‌ولت می‌باشد. از طرفی، میل الکترونی و بندگانگ Fe_2O_3 نوع n به ترتیب $4/78$ الکترون‌ولت و $2/2$ الکترون‌ولت است. از این رو، پس از پوشش Fe_2O_3 روی نانولوله‌های کربنی، پیوندهای ناهمگن p-n در سطح مشترک بین CNTs و Fe_2O_3 تشکیل می‌شود که منجر به خم شدن باند در لایه‌های تخلیه می‌شود. لایه تخلیه حفره‌ها در این فرآیند شکل می‌گیرد و جذب اکسیژن را افزایش می‌دهد. در نهایت، تعداد الکترون‌ها در Fe_2O_3 کاهش می‌یابد، که منجر به افزایش مقاومت کامپوزیت $\text{CNTs@Fe}_2\text{O}_3$ می‌شود. هنگامی که حسگر ساخته شده در دمای عملیاتی در معرض گاز استون قرار می‌گیرد، واکنش سطحی بین گاز هدف و انواع مختلف اکسیژن جذب شده (نام برده شده در بالا) رخ می‌دهد و الکترون‌ها را به کامپوزیت‌ها باز می‌گرداند که باعث کاهش شدید مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌ها می‌شود. بنابراین، پاسخ حسگر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، برای حسگرهای گاز، افزایش سطح فعال ماده حسگر یک روش موثر برای بهبود عملکرد است. کامپوزیت $\text{CNTs@Fe}_2\text{O}_3$ نسبت به Fe_2O_3 دارای مساحت سطح بزرگ‌تری است و سطح بزرگ‌تر مکان‌های فعال‌تری را برای جذب گاز فراهم می‌کند و در نتیجه پاسخ حسگر افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ساخت نانوکامپوزیت متشکل از نانولوله های کربنی و نانوذرات اکسید آهن منجر به بهبود مشخصات حسگر گاز استون سنتز شد. این بهبودها در زمینه افزایش حساسیت و کاهش زمان پاسخ و بازیابی انجام شده است به گونه‌ای که بیشترین پاسخ حسگر را در دمای 200 درجه سانتیگراد، 38 برابر و زمان پاسخ و بازیابی را به ترتیب برابر با 78 و 75 ثانیه تعیین کرده است. نتایج مشخصه‌یابی نشان داد که با استفاده از روش توضیح داده شده نانوذرات اکسید آهن به خوبی روی سطح نانولوله های کربنی پوشانده شده اند. استفاده از این نوع تزیین کردن باعث شد حسگر ساخته شده فقط به استون پاسخ دهد و انتخابگری خیلی خوبی داشته باشد. نتایج حسگر تکرارپذیر هستند. ویژگی‌های این حسگر آن را به گزینه مناسبی جهت ساخت حسگر استون در کاربردهای صنعتی تبدیل کرده است.

- [20] S. Cao, N. Sui, P. Zhang, T. Zhou, J. Tu, and T. Zhang, "TiO₂ nanostructures with different crystal phases for sensitive acetone gas sensors", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 607, pp. 357–366, 2022.
- [21] N. H. Hanh, L. Van Duy, C. M. Hung, C. T. Xuan, N. Van Duy, and N. D. Hoa, "High-performance acetone gas sensor based on pt-Zn₂SnO₄ hollow octahedra for diabetic diagnosis", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 886, p. 161284, 2021.
- [22] H. Zhu, A. A. Haidry, Z. Wang, and Y. Ji, "Improved acetone sensing characteristics of TiO₂ nanobelts with Ag modification", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 887, p. 161312, 2021.
- [23] A. K. Vishwakarma, A. K. Sharma, N. K. Yadav, and L. Yadava, "Development of CdS-doped TiO₂ nanocomposite as acetone gas sensor", *Vacuum*, vol. 191, p. 110363, 2021.
- [24] A. Mirzaei, H. R. Ansari, M. Shahbaz, J. Kim, H. W. Kim, and S. S. Kim, "Metal Oxide Semiconductor Nanostructure Gas Sensors with Different Morphologies", *Chemosensors*, vol. 10, p. 289, 2022.
- [25] H. R. Ansari, A. Mirzaei, H. Shokrollahi, R. Kumar, J. Kim, H. W. Kim, M. Kumar, and S. S. Kim, "Flexible/wearable resistive gas sensors based on 2D materials", *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 11, p. 6528-6549, 2023.
- [26] H. R. Ansari, Z. Kordrostami, and A. Mirzaei, "In-vehicle wireless driver breath alcohol detection system using a microheater integrated gas sensor based on Sn-doped CuO nanostructures", *Scientific Reports*, vol. 13, p. 7136, 2023.
- [27] M. Moayedi, H. R. Ansari, and Z. Kordrostami, "Highly Sensitive Isopropanol Gas Sensor based on SnO₂ Nano-Flowers on Gold, Silver, and Aluminum Interdigitated Electrodes", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 12, p. 057011, 2023.
- [28] H. R. Ansari, Z. Kordrostami, and A. Mirzaei, "Fabrication of a Handheld Gadget for Breath Alcohol Detection Based on CuO-Decorated Fe₂O₃ Nanoflakes", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023.
- modulation of a hierarchical ZnO gas sensor", *IEEE sensors letters*, vol. 1, no. 5, pp. 1–4, 2017.
- [12] M. Righettoni, A. Tricoli, and S. E. Pratsinis, "Si: WO₃ sensors for highly selective detection of acetone for easy diagnosis of diabetes by breath analysis", *Analytical chemistry*, vol. 82, no. 9, pp. 3581–3587, 2010.
- [13] Y. Cao, H. Luo, and D. Jia, "Low-heating solid-state synthesis and excellent gas-sensing properties of α -Fe₂O₃ nanoparticles", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 176, pp. 618–624, 2013.
- [14] F. Rigoni, S. Tognolini, P. Borghetti, G. Drera, S. Pagliara, A. Goldoni, and L. Sangaletti, "Enhancing the sensitivity of chemiresistor gas sensors based on pristine carbon nanotubes to detect low-ppb ammonia concentrations in the environment", *Analyst*, vol. 138, no. 24, pp. 7392–7399, 2013.
- [15] M. Penza, R. Rossi, M. Alvisi, G. Cassano, and E. Serra, "Functional characterization of carbon nanotube networked films functionalized with tuned loading of au nanoclusters for gas sensing applications", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 140, no. 1, pp. 176–184, 2009.
- [16] W.-D. Zhang, B. Xu, and L.-C. Jiang, "Functional hybrid materials based on carbon nanotubes and metal oxides", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, no. 31, pp. 6383–6391, 2010.
- [17] P. Cheng, L. Lv, Y. Wang, B. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, Z. Lei, and L. Xu, "SnO₂/ZnSnO₃ double-shelled hollow microspheres based high-performance acetone gas sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 332, p. 129212, 2021.
- [18] M. Liu, Z. Wang, P. Song, Z. Yang, and Q. Wang, "Flexible MXene/rGO/CuO hybrid aerogels for high performance acetone sensing at room temperature", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 340, p. 129946, 2021.
- [19] K. Rezaei and S. Nasirian, "A low-level acetone gas sensor based on n-type ZnO/p-type CuO composite nanostructure for the diagnosis of diabetes in dynamic situations", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 5199–5214, 2021.