

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

سنتز نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم و بررسی خواص حسگری آن به منظور تشخیص استونیتریل در مقادیر بسیار جزئی

حسین امامی^{۱*}، حمیدرضا ابراهیمی^۲

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
۲- مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
* h.emami@iaumajlesi.ac.ir

چکیده

در این مطالعه نانو ذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم با فرمول $Ni_{0.5}Cu_{0.5}Fe_2O_4$ (Cd Doped) که دارای ساختار اسپینلی است از طریق تکنیک هم رسوبی تولید شد. نانوذرات حاصل جهت ساخت بخش حساس نانوحسگر گاز استفاده گردید. برای تعیین ساختار نانوذرات مذکور از تکنیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD, X-ray diffraction)، فلورورسانس پرتو ایکس (XRF, X-ray fluorescence) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده گردیده است. حساسیت این نانوذرات نسبت به نمونه‌های گازی مختلف شامل استون، استونیتریل، آکریلونیتریل، فرمامید، کربن تتراکلرید، وینیل استات، اتانول، آمونیاک و متانول مورد بررسی قرار گرفت. گونه‌های گازی موردنظر با غلظت ۲۰۰ ppm در بازه دمایی ۵۰ تا ۳۰۰ °C در معرض نانوحسگر قرار داده شدند. بهترین رفتار حسگری برای گاز استونیتریل در دمای ۲۰۰ °C مشاهده شد. به‌علاوه، در دمای ۲۰۰ °C، غلظت‌های مختلفی از استونیتریل در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰ ppm مورد آزمایش واقع شدند. نتایج نشان داد نمونه‌های دارای غلظت‌های بالاتر، پاسخ حسگری بهتری داشتند.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

کلید واژگان:

نانوذرات

فریت نیکل مس دوپ شده با

کادمیم

روش هم‌رسوبی

نانوحسگر

استونیتریل

Synthesis of Cadmium Doped Nickel Copper Ferrite Nanoparticles and Investigation of Their Sensing Properties for the Detection of Acetonitrile in Little Accounts

Hossein Emami^{1,*}, Hamid Reza Ebrahimi²

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Center for Advanced Engineering Research, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

* h.emami@iaumajlesi.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.1908397.2011

Keywords:

Nanoparticles

Cadmium Doped Nickel Copper Ferrite

Co-Precipitation Method

Nanosensor

Acetonitrile

Abstract

In this study cadmium doped nickel copper ferrite $Ni_{0.5}Cu_{0.5}Fe_2O_4$ (cd doped) nanoparticles with spinel structure were synthesized using co-precipitation method. The nanoparticles were employed as a gas sensing material. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and transmission electron microscopy (TEM) techniques were used to characterize the nanoparticles structure. The sensing behavior of the nanoparticles was examined in the presence of different gases including. Acetone, acetonitrile, acrylonitrile, formamide, carbon tetrachloride, vinyl acetate, ethanol, ammonia, and methanol. The characterization process was performed for a concentration of a 200 ppm and within a temperature interval from 50 °C to 300 °C and the best sensing behavior was found to be at 200 °C. Furthermore, various concentrations of acetonitrile gas at 200 °C within a concentration interval of 20 to 200 ppm were tested and it is found that the higher concentrations will result in a better response.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hossein Emami, Hamid Reza Ebrahimi, Synthesis of Cadmium Doped Nickel Copper Ferrite Nanoparticles and Investigation of Their Sensing Properties for the Detection of Acetonitrile in Little Accounts, New Process in Material Engineering, 2021, 15(3), 17-22.

۱- مقدمه

نانوحسگرهای گازی از جمله ابزارهای ضروری هستند که امروزه در بخش‌های مختلف زندگی بشر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با پیشرفت بشر گونه‌های مواد شیمیایی مختلف هم در بخش خانگی و هم در بخش صنایع مورد استفاده قرار گرفته است. بعضی از این گونه‌های شیمیایی حتی در مقیاس بسیار کم هم باعث ایجاد عوارض و خطراتی برای انسان می‌شوند. این مسئله در گروه‌های پرخطر مثل کودکان و افراد سالمند از اهمیت بیشتری برخوردار است. به این ترتیب تشخیص و شناسایی مواد شیمیایی سمی در حجم‌های بسیار جزئی از جمله موضوعات روز و جدید در حوزه فناوری نانوحسگرها است [۱-۶].

نانوحسگرها وسایل کوچکی هستند که به‌عنوان نتیجه فرآیند شیمیایی بین گاز مورد تجزیه و نانوحساسه، اطلاعات شیمیایی را به‌صورت کمی یا کیفی به شکل یک سیگنال انتقال می‌دهند. از طرفی نانوحسگرها زمانی که در معرض یک ترکیب شیمیایی گازی قرار می‌گیرند یک یا چند خاصیت فیزیکی آن‌ها مانند جرم، هدایت الکتریکی و یا ظرفیت خازنی طوری تغییر می‌کند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم قابل اندازه‌گیری و بیان کردن باشد. در سیستم مورد استفاده در این پژوهش از خاصیت تغییر مقاومت نانوحسگر در اثر حضور گازهای مختلف استفاده شده است [۷-۱۶].

عموماً واکنش نانوحسگرهای گازی در دماهای بالا بین ۱۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد به همین دلیل برای این نوع نانوحساسه‌ها نیاز است برای بالا بردن راندمان از داخل گرم شوند تا دمای موردنیاز واکنش با گاز تأمین گردد [۱۷-۱۸].

نانوذرات فریت به علت دارا بودن خاصیت نیمه‌هادی گزینه مناسبی به‌منظور استفاده به‌عنوان بخش حساس در نانوحسگرها مطرح هستند. این نانوذرات به روش‌های مختلفی قابل تهیه هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش لایه نشانی، روش حرارتی، روش الکتروشیمیایی، روش سل-ژل و روش هم‌رسوبی اشاره کرد. در بین این روش‌ها، روش هم‌رسوبی از مزایای منحصر به فردی برخوردار است. از جمله این مزایا

می‌توان به سرعت بالای این روش، انعطاف‌پذیری و دامنه بالای انتخاب مواد اولیه اشاره کرد. در این روش از نمک‌های فلزی مختلف استفاده می‌شود. به این صورت که با انحلال این نمک‌ها در آب مقطر دیونیزه یک محلول همگن از فلزات می‌توان تهیه کرد. سپس با قلیایی کردن این محلول همگن محصول واکنش به‌صورت آب پوشیده از محلول خارج می‌شود و به‌صورت رسوب تیره‌رنگی قابل جداسازی است. در مرحله آخر با عملیات حرارتی این رسوب در دماهای بالا به نانوذرات فریت موردنظر به دست خواهد آمد.

در طراحی نانوحسگر مورد استفاده در این تحقیق از نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم استفاده شده است که در ادامه ابتدا به معرفی نحوه ساخت این ترکیب و سپس به شرح چگونگی بررسی رفتار حسگری آن پرداخته خواهد شد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- روش ساخت نانوذرات فریت نیکل مس دوپ

شده با کادمیم به روش هم‌رسوبی

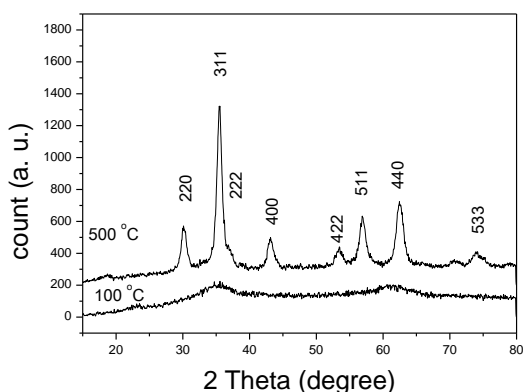
ابتدا نمک آهن نیترات ۹ آبه در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه حل گردید. سپس نیکل نیترات ۶ آبه حل شده در آب مقطر دیونیزه قطره قطره به آن اضافه شد. سپس مس نیترات ۳ آبه حل شده در آب مقطر دیونیزه قطره قطره اضافه گردید. در نهایت کادمیم نیترات ۲ آبه حل شده در آب مقطر دیونیزه قطره قطره به محلول حاصله اضافه شد. به این ترتیب در نهایت نسبت مولی آهن: نیکل: مس: کادمیم به ترتیب به‌صورت ۴:۲:۲:۱ خواهد بود. محلول نهایی فوق به‌منظور یکنواختی بیشتر به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی به هم زده خواهد شد. سپس pH محلول نهایی به افزودن محلول سدیم هیدروکسید غلیظ به ۱۲ رسید. در این مرحله نانوذرات فریت به‌صورت رسوب قهوه‌ای تیره رنگ از محلول خارج شدند. در ادامه جهت همگن شدن و تشکیل نانوذرات فریت پایدار، محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در حمام فراصوت تحت امواج قرار گرفت (از دستگاه حمام اولتراسونیک مدل D-78224 Singen/Htw برای همگن شدن نانوذرات استفاده شده است). به‌منظور خارج کردن نمک‌های اضافه تولید شده

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی فریت به دست آمده شامل آزمایش‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، آزمایش پراش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و آزمایش میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) است که در ادامه هر یک از این آزمایش‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD)

در شکل ۲، تصویر پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های ساخته شده در دو وضعیت مشاهده می‌گردد. در این شکل پراش پرتو ایکس محصول واکنش بعد عملیات حرارتی در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت (نمودار پایین در شکل ۲) و نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم تشکیل شده پس از عملیات حرارتی در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت (نمودار پایین در شکل ۲) تشکیل فاز فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم را به خوبی نمایش داده است.



شکل (۲): تصویر پراش پرتو ایکس محصول واکنش بعد عملیات حرارتی در ۱۰۰ °C و محصول نانوفریت تشکیل شده پس از عملیات حرارتی در ۵۰۰ °C.

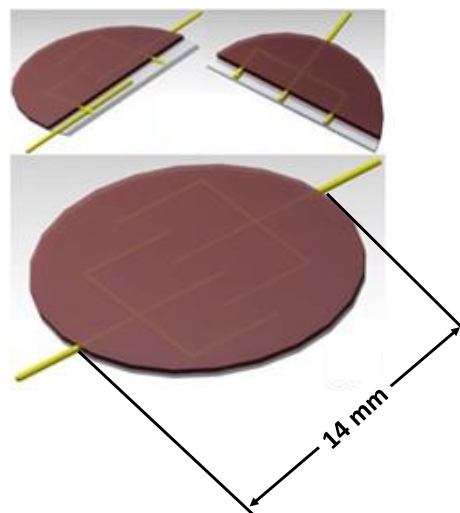
۳-۲- تکنیک پراش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

نتیجه بررسی نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم با تکنیک فلورورسانس پرتو ایکس (XRF) در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. نتیجه این بررسی حاکی از وجود عناصر آهن، نیکل، مس و کادمیم است که نسبت پیش‌بینی شده

در واکنش و به دست آوردن محصول خالص فریت، رسوب حاصله چندین مرتبه با آب مقطر دیونیزه شستشو داده شد. سپس جهت خشک کردن محصول و خروج آب موجود در ساختار آن رسوب حاصله به مدت ۲۴ ساعت در کوره در دمای ۱۰۰ °C قرار گرفت تا به طور کامل خشک شود. در نهایت برای اصلاح ساختار، پودر خشک شده مرحله قبل به مدت سه ساعت در دمای ۵۰۰ °C کلسینه شد.

۲-۲- ساخت قرص نانوحسگر

به منظور ساخت قرص نانوحسگر ابتدا یک صفحه دایره‌ای شکل از جنس میکای نسوز به قطر ۱۴ میلی‌متر تهیه شد. سپس الکترودهای مسی به شکل E را روی این صفحه نصب شدند به نحوی که دو طرف الکترودها به هم اتصال مستقیم نداشته باشند. در مرحله آخر هم پودر نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم تهیه شده از مرحله قبل را روی آن ریخته شد و به مدت ۳۰ دقیقه تحت فشار پرس دستی قرار گرفت. در شکل ۱ شمای قرص نهایی ساخته شده با این روش نمایش داده شده است. قطر قرص ۱۴ میلی‌متر می‌باشد. در شکل مذکور سطح مقطع قرص از دو نما نمایش داده شده است. در این شکل ورق پایه میکا به رنگ خاکستری، سیم‌های مسی به رنگ زرد و لایه حساس نانوفریت به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است.



شکل (۱): نمای قرص مورد استفاده جهت آزمایش‌های حسگری.

در ۳۰۰ درجه سانتی گراد در معرض نانوحسگر قرار گرفتند. در آزمایش‌های صورت گرفته بهترین پاسخ از مطالعه رفتار نانوحسگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد به دست آمد. به همین خاطر فقط نتایج رفتار نانوحسگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد نمایش داده شده است. به این ترتیب در شکل ۴ مقایسه حساسیت‌پذیری نانوحسگر به گازهای مختلف در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد ارائه شده است (اندازه‌گیری‌ها ۵ بار اجرا شده است).

در این نمودار می‌توان مشاهده کرد نانوحسگر ساخته شده به گازهای وینیل استات، فرمامید، کربن تتراکلرید، اکریلونیتریل، متانول و استن کم‌ترین حساسیت را نشان داده است. در مقابل به دو گاز اتانول و آمونیاک حساسیت بهتر و قابل توجهی داشته است. در نهایت نانوحسگر در تشخیص دو گاز اتانول و استونیتریل بسیار سریع و با دقت از خود واکنش نشان داده و بهترین حساسیت‌پذیری برای ستون استونیتریل نمایان است. به این ترتیب سامانه نانوحسگر در دمای ۲۰۰ °C بهترین پاسخ را به استونیتریل نشان داده است.

همان‌طور که بیان شد در دمای ۲۰۰ °C، بهترین عملکرد نانوحسگر برای گونه استونیتریل مشاهده می‌شود. به همین دلیل برای مطالعه دقیق‌تر، عملکرد نانوحسگر نسبت به گاز استونیتریل در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد در غلظت‌های مختلف از آن از ۲۰ ppm تا ۲۰۰ ppm مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که سامانه نانوحسگر در غلظت ۲۰ ppm پاسخ قابل مشاهده‌ای ارائه داده است. این بدین معنی است که نانوحسگر مذکور قابلیت تشخیص گونه استونیتریل را در غلظت‌های کم دارد؛ بنابراین، یک نانوحسگر با قابلیت حد تشخیص پایین برای گاز استونیتریل می‌باشد. به علاوه، با افزایش غلظت استونیتریل، پاسخ بهتری مشاهده می‌شود.

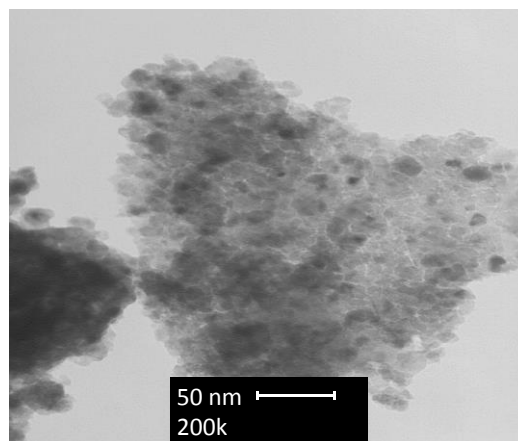
برای آن‌ها که به شکل تئوری به دست آمده با نتایج حاصل از آزمایش مطابقت دارد.

جدول (۱): نتایج تکنیک فلورورسانس پرتو ایکس (XRF) نانو ذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم

Compound	Concentration (%W/W)
Fe	54.92
Cu	17.48
Ni	14.90
Cd	12.70

۳-۳- تکنیک میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)

تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم ساخته شده در شکل ۳ با بزرگنمایی ۵۰ نانومتر نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود اندازه ذرات کمتر از ۵۰ نانومتر است و این مسئله با مقایسه نانوذرات با اسکیل بار داده شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل (۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم

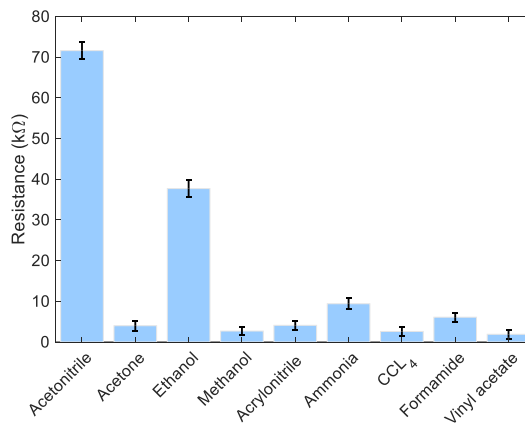
۳-۴- تفسیر نتایج آزمایش‌های حسگر با گازهای آزمو

با توجه به داده‌های به دست آمده از واکنش نانوحسگر نسبت به گازهای هدف، نتیجه بسیار مطلوبی برای نانوحسگر نسبت به گاز استونیتریل مشاهده شد. در این بخش، به تحلیل و چگونگی واکنش و داده‌ها پرداخته خواهد شد. گازهای استن، استونیتریل، اکریلونیتریل، فرمامید، کربن تتراکلرید، وینیل استات، اتانول، آمونیاک و متانول در بازه دمایی ۵۰ تا

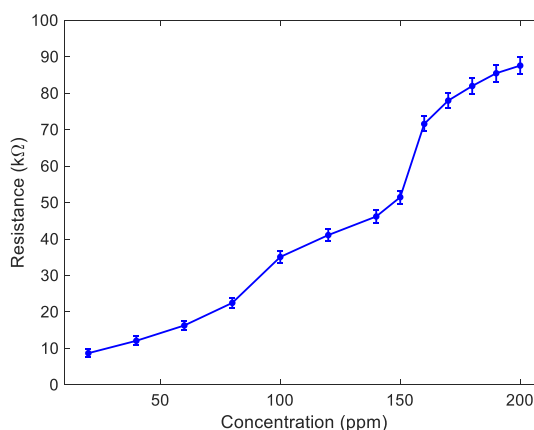
نانوحسگر بر اساس برهم کنش گاز استونیتریل با سطح نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم است. دلیل این مسئله تغییر خاصیت حسگری سامانه با تغییر دمای اینترفیس است. همان طور که مشاهده می شود در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد برهم کنش بهینه بین گاز و سطح نانوحسگر اتفاق می افتد. به همین دلیل در این دما بهترین پاسخ برای نانوحسگر مشاهده می شود. به منظور بررسی دقیق تر رفتار نانوحسگر مذکور پاسخ های آن نسبت به غلظت های مختلف استونیتریل مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور استونیتریل در محدوده غلظتی ۲۰ ppm تا ۲۰۰ ppm در معرض نانوحسگر قرار داده شد. نتایج نشان داد نانوحسگر ساخته شده جهت تشخیص استونیتریل در مقادیر بسیار ناچیز، بسیار مناسب و کارآمد می باشد. به علاوه، با افزایش غلظت استونیتریل پاسخ نانوحسگر نیز به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یافت. کاهش دمای حسگری از ۳۵۰ درجه سانتی گراد به ۲۰۰ درجه سانتی گراد نوآوری این تحقیق است. در مطالعه ای که توسط تیم تحقیقاتی ما در سال ۲۰۱۶ صورت گرفت [۱۹] دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد برای تشخیص گونه استونیتریل گزارش شده است.

۵- مراجع

- [1] P. B. Koli, K. H. Kapadnis & U. G. Deshpandem "Nanocrystalline-modified nickel ferrite films: an effective sensor for industrial and environmental gas pollutant detection," J. Nanostructures Chem, vol. 9, pp. 95-110, 2019.
- [2] Z. Adamyanyan, A. Sayunts, V. Aroutiounian, E. Khachaturyan, M. Vrnata, P. Fidl & J. Vlček, "Nanocomposite sensors of propylene glycol, dimethylformamide and formaldehyde vapors," J. Sens. Sens. Syst, vol. 7, pp. 31-41, 2018.
- [3] D. R. Patil & L. A. Patil, Room temperature chlorine gas sensing using surface modified ZnO thick film resistors, Sens. Actuators B, vol. 123, pp. 546- 553. 2007.
- [4] J. A. C. De Paiva, M. P. F. Grac, A. J. Monteiro, M. A. Macedo & M. A. Valente, "Spec troscopy studies of NiFe₂O₄ nanosized powders obtained using coconut water," J. Alloys Compd. Vol. 485, pp. 637-641, 2009.



شکل (۴): مقایسه حساسیت پذیری نانوحسگر به گازهای مختلف در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد در غلظت ۱۵۰ ppm.



شکل (۵): نمودار حساسیت پذیری نانوحسگر نسبت به غلظت های مختلف استونیتریل از ۲۰ ppm تا ۲۰۰ ppm.

۴- جمع بندی و پیشنهادات

در این مطالعه با استفاده از روش هم رسوبی نانوذرات فریت نیکل مس دوپ شده با کادمیم تهیه شد. نانوذرات مذکور با تکنیک های مختلف از جمله پراش پرتو ایکس (XRD)، فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد شناسایی قرار گرفتند.

حساسیت این نانوذرات نسبت به نمونه های گازی مختلف شامل استن، استونیتریل، آکریلونیتریل، فرمامید، کربن تتراکلرید، وینیل استات، اتانل، آمونیاک و متانل مورد بررسی قرار گرفت. گونه های گازی مورد نظر با غلظت ۲۰۰ ppm در بازه دمایی ۵۰ تا ۳۰۰°C در معرض نانوحسگر قرار داده شدند. بهترین رفتار حسگری برای گاز استونیتریل در دمای ۲۰۰°C مشاهده شد. مکانیسم حسگری در این

- [16] A. Sutka, J. Zavickis, G. Mezinskis, D. Jakovlevs & J. Barloti, "Ethanol monitoring by ZnFe₂O₄ thin film obtained by spray pyrolysis," *Sens. Actuators, B*, vol. 176, pp. 330–334, 2013.
- [17] K. Wua, J. Lib & Ch. Zhanga, "Zinc ferrite based gas sensors: A review," *Ceramics International*, vol. 45, no. 9, pp. 11143–11157, 2019.
- [18] A. Pathania, P. Thakur, A. V. Trukhanov, S. V. Trukhanov, L. V. Panina, Ulrike Lüders & A. Thakur, "Development of tungsten doped Ni-Zn nano ferrites with fast response and recovery time for hydrogen gas sensing application," *Results in Physics*, vol. 15, pp. 102531, 2019.
- [19] H. R. Ebrahimi, M. Parish, G. R. Amiri, B. Bahraminejad & S. Fatahian, "Synthesis, characterization and gas sensitivity investigation of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ nanoparticles," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 414, pp. 55–58, 2016.
- [5] S. Anjum, H. G. Jaffari, A. K. Rumaiz, S. M. Rafique & I. S. Shah, "Role of vacancies in transport and magnetic properties of nickel ferrite thin films," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, pp. 265–001, 2010.
- [6] A. Sutka, G. Mezinskis, S. Lagzdina & G. Bebris, "Effect of cooling conditions on nano-sized NiFe₂O₄ electrical properties," *Adv. Mater. Res.*, vol. 222, pp. 263–266, 2011.
- [۸] ف. عربلو نره بی، ر. معمارزاده، ف. پناهی، م. دوازده امامی، س. جوادپور و م. ح. شریعت، "سنسور دما پایین گاز منواکسید کربن بر پایه کامپوزیت لایه نازک Fe(II)(salen)/ PEDOT:PSS" مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، جلد ۱، شماره ۱۲، ۱۳۹۷.
- [9] A. A. Sagade & R. Sharma, "Copper sulphide (Cu_xS) as an ammonia gas sensor working at room temperature," *Sens. Actuators B*, vol. 133, pp. 135–143, 2012.
- [10] T. Sathitwitayakul, M. V. Kuznetsov, I. P. Parkin & R. Binions, "The gas sensing properties of some complex metal oxides prepared by self-propagating high-temperature synthesis," *Mat. Lett.*, vol. 75, pp. 36–38, 2012.
- [11] Z. Sun, L. Liu, D. Jia & W. Pan, "Simple Synthesis of CuFe₂O₄ nanoparticles as gas sensing materials," *Sensors and Actuators B*, vol. 125, pp. 144–148, 2007.
- [12] S. Tao, F. Gao, X. Liu & O. Sorensen, "Preparation and gas-sensing properties of CuFe₂O₄ at reduced temperature," *Materials Science and Engineering B*, vol. 77, pp. 172–176, 2000.
- [13] A. Sutka, M. Stingaciu, G. Mezinskis & A. Lulis, "An alternative method to modify the sensitivity of p-type NiFe₂O₄ gas sensor," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 2856–2863, 2012.
- [14] Y. Tang, O. Zhang, Y. Li & H. Wang, "Highly selective ammonia sensors based on Co_{1-x}Ni_xFe₂O₄/multi-walled carbon nanotubes nanocomposites," *Sens. Actuators, B*, vol. 169, pp. 229–234, 2012.
- [15] A. Sutka, M. Stingaciu, G. Mezinskis & A. Lulis, "Gas sensing properties of Zn doped p-type nickel ferrite," *Sens. Actuators, B*, vol. 171–172, pp. 354–360, 2012.