



Original Article

Fabrication of Solid and Hollow ZnSnO₃ Microcubes and Investigation of their Sensing Properties for Acetone Gas

Shiva Azizi¹, Iraj Kazeminezhad^{1,2*} 

¹ Physics Department, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

² Center for Research on Laser and Plasma, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 2024-12-11

Revised: 2025-01-16

Accepted: 2025-02-09

Abstract: In this study, solid and hollow microcubes of ZnSnO₃ were synthesized via the co-precipitation method. To investigate the structural properties of these microcubes, X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, field-emission scanning electron microscopy (FESEM), Nitrogen adsorption and desorption analysis was performed using the (BET) method, demonstrating the high purity of the ZnSnO₃ microcubes. Subsequently, to conduct sensing tests of the synthesized particles, a suitable solution was prepared and coated onto a gold-coated substrate, and gas sensing tests were performed for solid and hollow ZnSnO₃ microcubes. The results indicated that the hollow ZnSnO₃ microcube sensor exhibited a superior efficiency response at a temperature of 220 °C, with a response and recovery time of 16 and 17 s, efficiency response of 53 %, for acetone gas at a concentration of 100 ppm compared to the solid sample. also, this sensor displayed a better response to acetone gas compared to other gases such as ethanol, methanol, benzene, toluene, and NH₃.

Keywords: Co-precipitation, ZnSnO₃, semiconductor, gas sensor, acetone gas

*Corresponding Author. Email: i.kazeminezhad@scu.ac.ir


How to Cite This Article:

Azizi, S, Kazeminezhad, I, Fabrication of Solid and Hollow ZnSnO₃ Microcubes and Investigation of their Sensing Properties for Acetone Gas. Nanomeghyas. 2025; 12(3): 240-251. DOI: [10.22034/ns.2025.722234](https://doi.org/10.22034/ns.2025.722234)





ساخت میکرومکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ و بررسی خواص حسگری آن ها برای گاز استون

شیوا عزیزی^۱، ایرج کاظمی نژاد^{۱،۲*} 

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. مرکز تحقیقات لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

چکیده: در این تحقیق میکرومکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ به روش هم رسوبی ساخته شد. به منظور بررسی خواص ساختاری این میکرومکعب ها، از پراش اشعه ایکس (XRD)، تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (SEMFE) و آنالیز جذب و واجذب نیتروژن به روش (BET) استفاده گردید، که نتایج نشان می دهد میکرومکعب های $ZnSnO_3$ با خلوص بالایی ساخته شده اند، سپس برای انجام تست های حسگری ذرات سنتز شده محلول مناسبی را آماده و بر زیرلایه کوت شده با طلا لایه نشانی کرده و آزمون حسگری گاز برای میکرومکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ انجام گردید. نتایج نشان داد که حسگر میکرومکعب های توخالی $ZnSnO_3$ در دمای درجه سانتی گراد با پاسخ بازدهی ۵۳ درصد و زمان پاسخ و بازیابی (۱۶ و ۱۷ ثانیه) برای گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm بازدهی بهتری را نسبت به نمونه توپر از خود نشان داده است. همچنین این حسگر نسبت به گاز استون در مقایسه با گازهای دیگر از جمله: اتانول، متانول، بنزن، تولوئن و آمونیاک پاسخ بهتری دارد.

واژگان کلیدی: هم رسوبی، $ZnSnO_3$ ، نیم رسانا، حسگر گاز، گاز استون

* نویسنده مسئول. ایمیل: i.kazeminezhad@scu.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

عزیزی، شیوا، کاظمی نژاد، ایرج. ساخت میکرومکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ و بررسی خواص حسگری آن ها برای گاز استون. *نانو مقیاس*، ۲۰۲۵، ۱۲(۳)، ۲۴۰-۲۵۱.

DOI: [10.22034/ns.2025.722234](https://doi.org/10.22034/ns.2025.722234)



۱- مقدمه

با این حال حسگرهای جدید گاز با پاسخ دهی بالا، گزینش پذیری مناسب و ارزان کماکان تقاضای بالایی دارند.

انتخاب نیم رساناهای اکسید فلزی با نانوساختارهای توخالی گزینه مناسبی برای بهبود عملکرد حسگری گاز است. تاکنون از نیم رسانای $ZnSnO_3$ به شکل های مختلفی برای حسگری گاز استفاده شده است از جمله: ساخت میکروکره های جامد و توخالی $ZnSnO_3$ به روش آبی-حرارتی [۹]، ساخت چند وجهی توخالی $ZnSnO_3$ به روش آبی-حرارتی [۱۰]، ساخت کره های توخالی $ZnSnO_3$ با روش بارش درجا برای حسگری گاز اتانول [۱۱]. ساخت مکعب های توخالی $ZnSnO_3$ به روش آبی-حرارتی و بررسی خواص حسگری HCHO (فرمالدهید) [۱۲]. ساخت نانومکعب های توخالی $Ag/ZnSnO_3$ و بررسی خواص حسگری گاز [۱۳].

در پژوهش حاضر به منظور افزایش نتایج حسگری، میکرومکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ ساخته شد و آزمون های حسگری برای یافتن حسگر بهینه انجام گردید.

۲- بخش تجربی

۲-۱ مواد

پیش ماده های اولیه استفاده شده در این پژوهش شامل سدیم استانات تری هیدرات سیگما ($C_6H_5Na_3O_7$)، کلرید روی مرک ($ZnCl_2$)، کلرید قلع مرک ($SnCl_4 \cdot 5H_2O$)، سدیم هیدروکسید (NaOH) بودند.

۲-۲ ساخت مکعب های توپر $ZnSnO_3$

۰٫۱۴۷ گرم $ZnCl_2$ و ۰٫۱۴۷ گرم $C_6H_5Na_3O_7$ در ۱۰ میلی لیتر آب یون زدائی شده توسط هم زدن مغناطیسی در دمای اتاق هم زده شدند. ۵ میلی لیتر محلول اتانول و ۰٫۲۶۰ گرم $SnCl_4$ به محلول فوق

قدرت بویایی انسان بسیار بالاست و این سیستم پیچیده دارای چندین میلیون گیرنده است؛ بنابراین به راحتی قادر به تشخیص گستره ای از بوها و گازها در کسری از ثانیه است. اما برخی از گازها بدون بو، مزه و رنگ هستند و انسان نمی تواند آنها را تشخیص دهد. هنگامی که غلظت برخی از گازها بسیار کم است، انسان نمی تواند آنها را به موقع تشخیص دهد. همچنین، امکان داشتن حضور فیزیکی مداوم در تمام مکان ها برای انسان وجود ندارد تا بتواند حضور یک گاز سمی را تشخیص دهد. بنابراین، برای تشخیص سریع و به موقع گازها، نیاز به حسگرهایی است که بتواند حضور گاز را به سرعت و با دقت بالا تشخیص دهد [۱].

در میان حسگرهای مختلف، حسگرهای مقاومتی بر پایه اکسیدهای فلزی نیم رسانا به دلیل ویژگی هایی همچون سرعت پاسخ بالا، زمان پاسخ و بازیابی کوتاه، پایداری فیزیکی و شیمیایی بالا، قیمت ارزان، اصول ساده اندازه گیری و کارکرد نسبتاً ساده و در نهایت اندازه بسیار کوچک و قابلیت حمل و نقل، از محبوبیت بسیار بالایی برخوردارند [۲].

نیم رساناها خصوصیات منحصر به فردی دارند که می تواند در بسیاری از حوزه های علمی و صنعتی از جمله الکترونیک، پزشکی، سلول های خورشیدی، حسگرهای گازی و فوتوکاتالیستی مورد استفاده قرار گیرند [۳]. این ویژگی ها باعث شده است که نیم رساناها به عنوان یکی از محبوب ترین مواد در حوزه فناوری نانو شناخته شوند [۴].

$ZnSnO_3$ به عنوان یک ماده نیم رسانای با ساختار پروسکایت به دلیل کاربرد گسترده آن در زمینه های مختلف، مانند حسگرهای گاز، باتری ها، سلول های خورشیدی و ابرخازن ها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۵]. اگرچه پژوهش های متعددی از حسگرهای گاز مبتنی بر اکسیدهای دوتایی و یا سه تایی، مانند: $SrSnO_3$ [۲]، TiO_2 [۶]، In_2O_3 [۷] و Co_3O_4 [۸] گزارش شده است،

محلول سفید تشکیل شود. پس از هم زدن به مدت ۳۰ دقیقه، جهت تشکیل مکعب های توخالی ۱۵ میلی لیتر محلول آبی (۲مولار) از NaOH به آن اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شد. محلول به دست آمده سانتریفیوژ شد و سپس چندین بار با آب و اتانول شست و شو و مجددا سانتریفیوژ گردید. خشک شدن و قرار گرفتن در کوره، میکرومکعب های توخالی $ZnSnO_3$ تشکیل شده بودند [۱۳].

۳- خصوصیات

در این پژوهش، به منظور بررسی خواص ساختاری این ذرات از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD)، تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و آنالیز (BET) منحنی های هم دمای جذب و واجذب استفاده گردید.

۱-۳ XRD

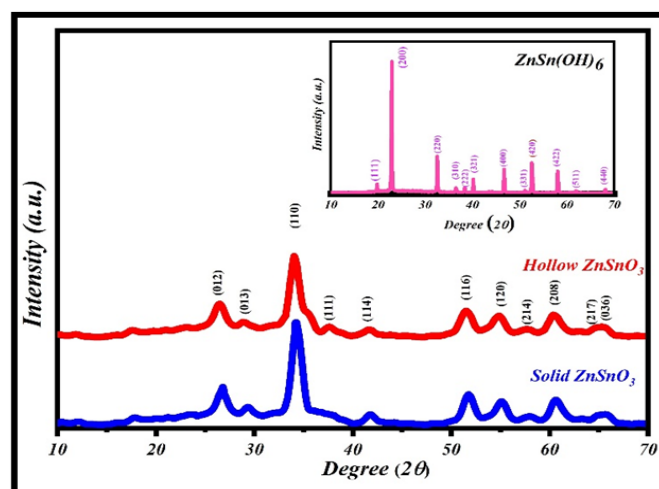
در شکل ۱ الگوی XRD حاصل از $ZnSn(OH)_6$ و $ZnSn(OH)_6$ نشان داده شده است. در الگوی $ZnSn(OH)_6$ تمام قله ها با الگوی استاندارد (JCPDS-732384) مطابقت دارد به طوری که هیچ ناخالصی مربوط به ZnO ، Zn ، Sn و SnO_2 مشاهده نشده است.

اضافه و ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس ۲۵ میلی لیتر از محلول آبی (۰٫۴۱ مولار) NaOH قطره قطره به محلول بالا چکانده شد تا یک محلول سفید تشکیل شود. محلول به دست آمده سانتریفیوژ شد و سپس چندین بار با آب و اتانول شست و شو و مجددا سانتریفیوژ گردید.

رسوب سفید حاصل شده جمع آوری شد و در دمای $60^\circ C$ به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. پودر به دست آمده مکعب های $ZnSn(OH)_6$ می باشند. برای به دست آوردن بلورهای مکعبی $ZnSnO_3$ پودر مذکور به مدت ۲ ساعت در کوره کلسینه گردید. با توجه به نتایج حاصل از آنالیزهای XRD و FE-SEM که در بخش های بعدی ارائه خواهند شد، پودر به دست آمده میکرو مکعب های توپر $ZnSnO_3$ می باشند [۱۲].

۲-۳ ساخت مکعب های توخالی $ZnSnO_3$

برای ساخت مکعب های توخالی $ZnSnO_3$ مانند بخش قبل، مقادیر معین از $ZnCl_2$ و $C_6H_5Na_3O_7$ در آب یون زدائی شده توسط هم زدن مغناطیسی در دمای اتاق هم زده شدند. محلول اتانول و $SnCl_4$ به محلول فوق اضافه و ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس ۲۵ میلی لیتر از محلول آبی (۰٫۴۱ مولار) NaOH قطره قطره به محلول بالا چکانده شد تا یک



شکل ۱: الگوی XRD حاصل از $ZnSn(OH)_6$ و $ZnSnO_3$ توپر و توخالی.

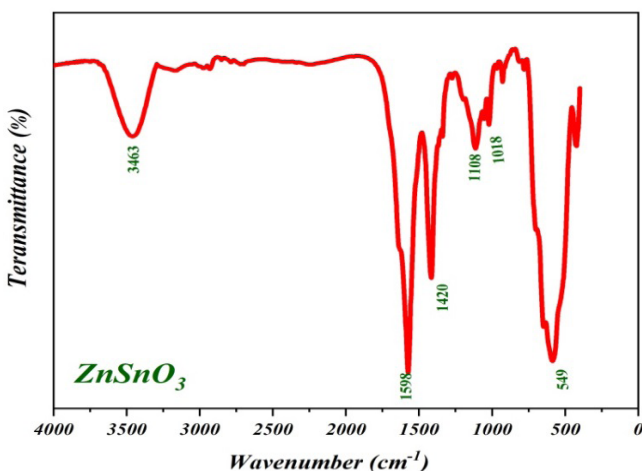
توخالی با اندازه میانگین ۲ میکرومتر به صورت تقریباً یکسانی توزیع شده اند. تصاویر TEM به وضوح توپر و توخالی بودن نمونه ها را نشان می دهد.

۳-۳ FT-IR

شکل ۳ نتایج حاصل از طیف مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) مربوط به میکرومکعب های توخالی ZnSnO₃ را نشان می دهد که با گزارش های پیشین از ساخت ZnSnO₃ مطابقت دارد. در شکل، دو قله در حوالی ۳۴۶۰ cm⁻¹ متناظر با ارتعاشات کششی O-H و عدم وجود حالت خمشی H-O-H مولکول آب در نزدیکی ۱۵۹۸ cm⁻¹ نشان می دهند که مولکول های آب به صورت تجزیه ای به سطح نمونه جذب می شوند و منجر به تشکیل گروه های هیدروکسیل جذب شده سطحی می شوند [۱۶]. قله های cm⁻¹ ۱۱۴۲۰ و ۱۱۰۸ مربوط به خمش های پیوند M-OH می باشد. قله های IR نزدیک به ۵۴۹ را می توان به حالت کششی اتم های O که به اتم های فلزی متصل شده اند و پیوند M-O را تشکیل داده اند، نسبت داد (M=Sn یا Zn) [۱۷].

۳-۴ BET (Brunauer-Emmett-Teller)

در شکل ۴ نتایج حاصل از آنالیز BET منحنی های همدمای جذب و واجذب N₂ برای ZnSnO₃ توپر و

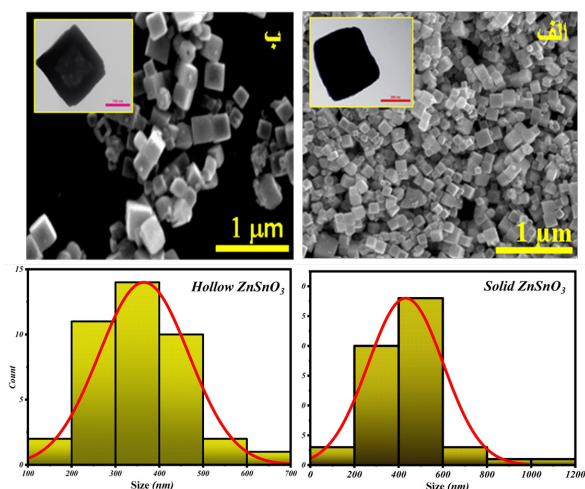


شکل ۳: آنالیز (FT-IR).

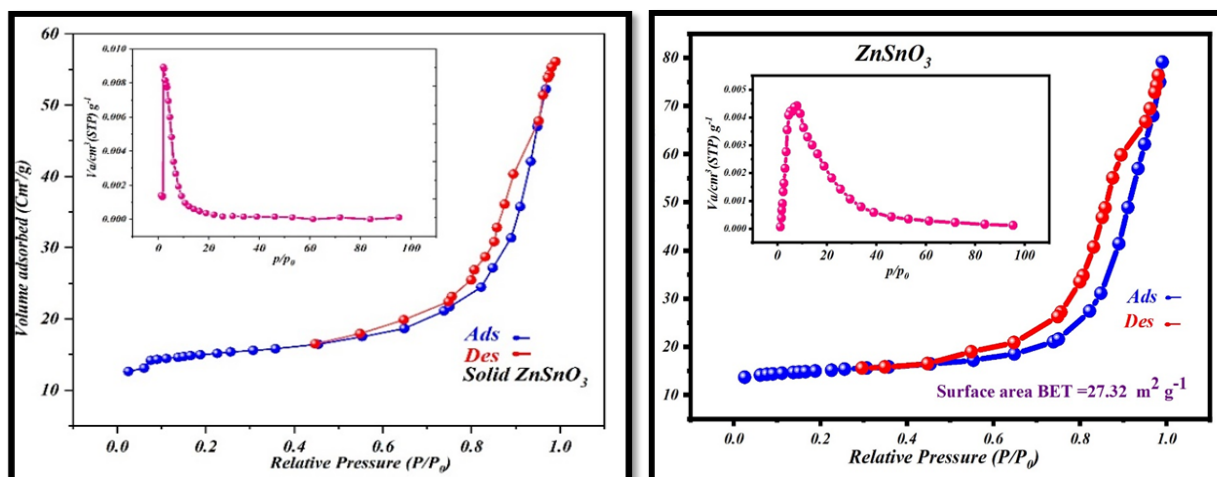
قله های پراش ZnSn(OH)₆ در زاویه های ۱۹٫۶۵ و ۲۲٫۷۵ و ۳۲٫۳۴ و ۳۶٫۴۵ و ۳۸٫۹۱ و ۴۰٫۰۱ و ۴۳٫۵ و ۴۶٫۵ و ۵۲٫۴ و ۵۵٫۱ و ۵۷٫۸۲ و ۶۱٫۸ و ۶۷٫۸۵ به ترتیب به صفحه هایی با شاخص میلر (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۳۲۱)، (۴۰۰)، (۳۳۱)، (۴۲۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰) مربوط می شوند [۱۴]. از نتایج پراش ZnSnO₃ های توپر و توخالی نیز می توان مشاهده کرد که تمام قله ها با الگوی استاندارد (JCPDS_281486) سازگار هستند، بنابراین بلورهای مکعبی شکل ZnSnO₃ با موفقیت ساخته شده اند و همچنین دارای بلورینگی و خلوص بالایی هستند. این قله ها به ترتیب در زوایای ۲۶٫۷ و ۲۹٫۷ و ۳۴٫۴ و ۳۷٫۴ و ۴۱٫۴۷ و ۵۱٫۸ و ۵۴٫۹ و ۵۷٫۶ و ۶۰٫۶ و ۶۴٫۸ و ۶۵٫۶ مربوط به صفحات بلوری (۰۱۲)، (۰۱۳)، (۱۱۰)، (۱۱۱)، (۱۱۴)، (۱۱۶)، (۱۲۰)، (۲۱۴)، (۲۰۸)، (۲۱۷) و (۰۳۶) هستند که ساختار ZnSnO₃ را تایید می کنند [۱۵].

۳-۲ TEM و FE-SEM

شکل ۲ نتایج حاصل از آنالیزهای FE-SEM و TEM و همچنین هیستوگرام میانگین ذرات را نشان می دهد. همان طور که در شکل (الف) مشاهده می شود میکرومکعب های ZnSnO₃ توپر با اندازه میانگین ۲٫۵ میکرومتر و در شکل (ب) ZnSnO₃



شکل ۲: TEM، FESEM و هیستوگرام میانگین ذرات حاصل از (الف) ZnSnO₃ توپر (ب) ZnSnO₃ توخالی.



شکل ۴: آنالیز ZnSnO₃ میکرومکعب‌های (BET) توپر و توخالی.

ریزترک‌ها، یکنواخت‌سازی لایه و چسبندگی بیشتر به زیرلایه، حسگر به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد. خواص حسگری گاز برای میکرومکعب‌های توخالی ZnSnO₃ با استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نسبت به گاز تزریقی ثبت شد.

به منظور انجام آزمون‌های حسگری از دستگاه نانوشات (ساخت ایران) استفاده گردید. حسگر در محفظه دستگاه قرار داده شد و یک اهم‌متر دیجیتالی متصل به کامپیوتر وصل شد. آون دستگاه در یک دمای معین تنظیم گردید و پس از متعادل شدن مقاومت الکتریکی و خوانش آن، گاز مورد نظر به درون محفظه دستگاه تزریق شد و سپس مقاومت الکتریکی نسبت به زمان توسط اهم‌متر تعیین و از طریق نرم‌افزار ثبت گردید.

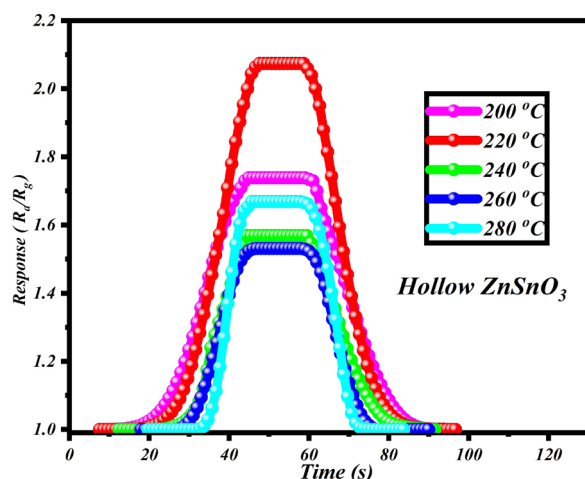
از معادله $S = R_a/R_g$ (که R_a مقاومت لایه در هوا و R_g نشان دهنده مقاومت لایه در محیط گاز است) برای مقایسه پاسخ حسگرهای گاز ساخته شده استفاده شد. زمان پاسخ، زمانی است که حسگر برای دستیابی به حداکثر جواب در مواجهه با گاز هدف صرف می‌کند و زمان بازیابی، حداکثر زمانی است که مقاومت به حالت اولیه خود بازگردد [۲۰].

برای به دست آوردن دمای بهینه، حسگر تهیه شده در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای پاسخ حسگر ZnSnO₃ توپر و توخالی

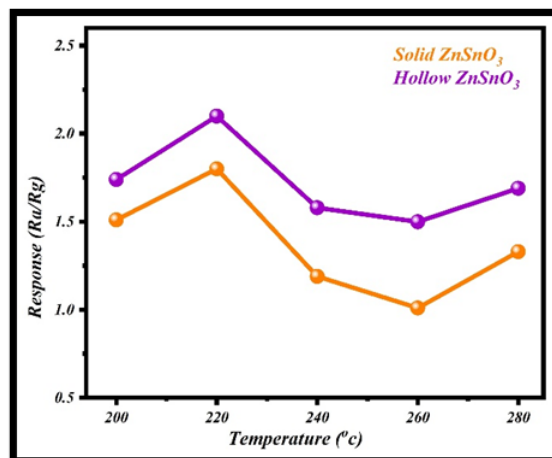
توخالی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود منحنی هم‌دمای ایزوترم‌های نوع IV با هیستریزس H₃ نشان دهنده این است که محصولات تولید شده مزومتخلخل هستند [۱۸]. سطح ویژه برای ZnSnO₃ توپر ۲۱ m²g⁻¹ و برای ZnSnO₃ توخالی ۳۲ m²g⁻¹ تعیین گردید. علاوه بر این نمودار حجم بر حسب فشار نسبی نشان می‌دهد که توزیع اندازه حفره‌ها یکنواخت است. ساختار متخلخل این ماده در مقایسه با ساختار توپر، نتایج حسگری بهتری را از خود نشان می‌دهد. زیرا نه تنها سطح بیرونی بلکه سطح داخلی مکعب‌ها نیز در فرآیند حسگری نقش دارند و الکترون‌های بیشتری مشارکت خواهند داشت که باعث کاهش بیشتر مقاومت و افزایش قابل توجه پاسخ حسگر می‌گردد [۱۹].

۳-۵ مشخصه یابی حسگری گاز

برای تهیه حسگرهای گاز مورد آزمایش، مقدار مشخصی از پودر تهیه شده ZnSnO₃ به همراه آب یون‌زدایی شده به وسیله آلتراسونیک و همزن مغناطیسی پراکنده و همگن‌سازی شد. سپس محلول با روش قطره‌چکانی بر روی یک زیرلایه شیشه‌ای که قبلاً توسط لایه طلا آماده‌سازی شده بود، لایه‌نشانی گردید. به منظور حذف آب مورد استفاده در فرآیند آماده‌سازی محلول و از بین رفتن

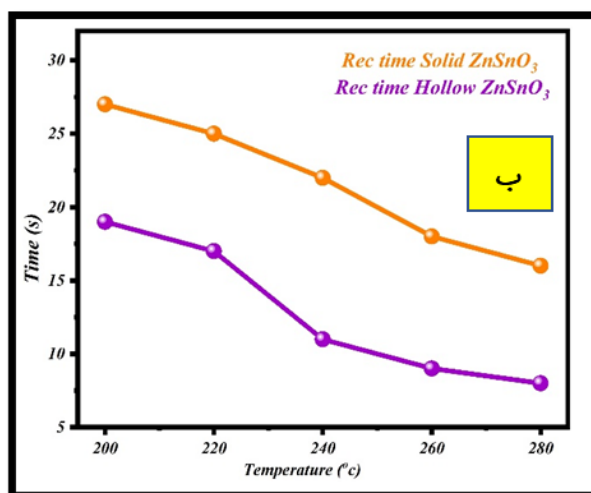


(ب)

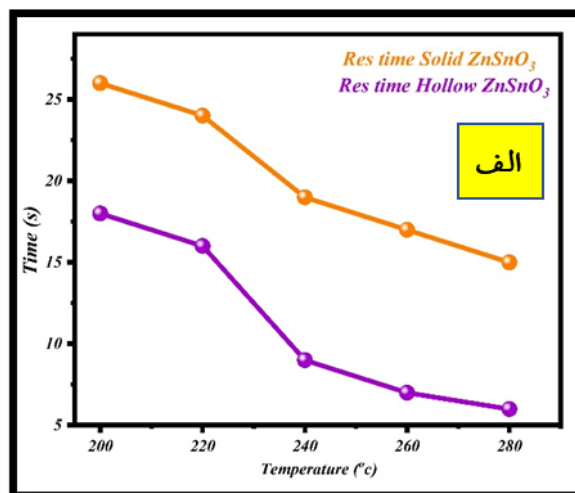


(الف)

شکل ۵: الف) پاسخ حسگرهای $ZnSnO_3$ توپر و توخالی نسبت به دماهای مختلف به گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm : ب) پاسخ حسگر $ZnSnO_3$ توخالی نسبت به دماهای مختلف به گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm.



ب



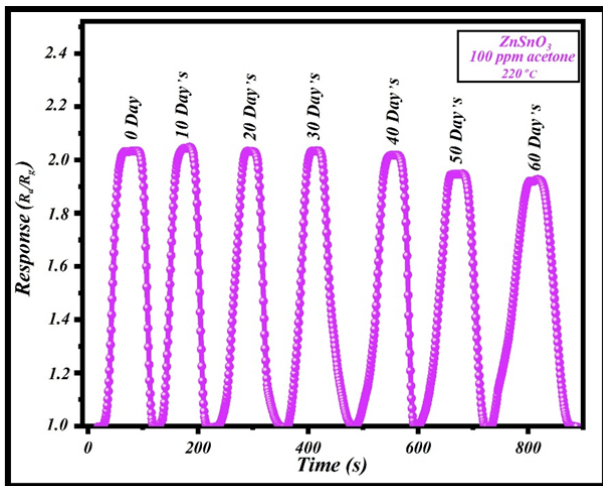
الف

شکل ۶: الف) زمان پاسخ و ب) زمان بازیابی حسگرهای $ZnSnO_3$ توپر و تو خالی نسبت به دماهای مختلف به گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm.

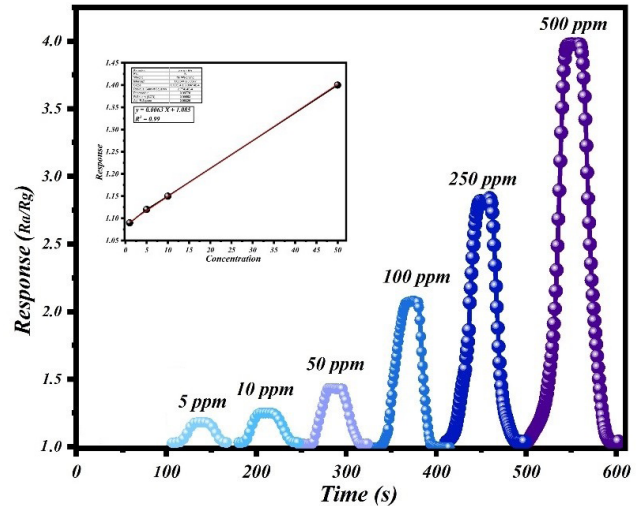
نمونه توپر داشته است. قابل ذکر است، به دلیل تزریق گاز احیا کننده به حسگر $ZnSnO_3$ که یک نیم رسانای نوع n است، مقاومت در برابر این نوع گاز کاهش می یابد (برای نیم رسانای نوع p عکس این قضیه رخ می دهد) [۲۱].

از دیگر مشخصه های مهم حسگرها، زمان پاسخ و زمان بازیابی آنها می باشد. شکل ۶ زمان های پاسخ و بازیابی حسگرهای تهیه شده با مکعب های توپر و توخالی $ZnSnO_3$ را در این پژوهش نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای کار زمان پاسخ و زمان بازیابی کاهش می یابد. همچنین نمونه توخالی با زمان پاسخ ۱۶ s و زمان

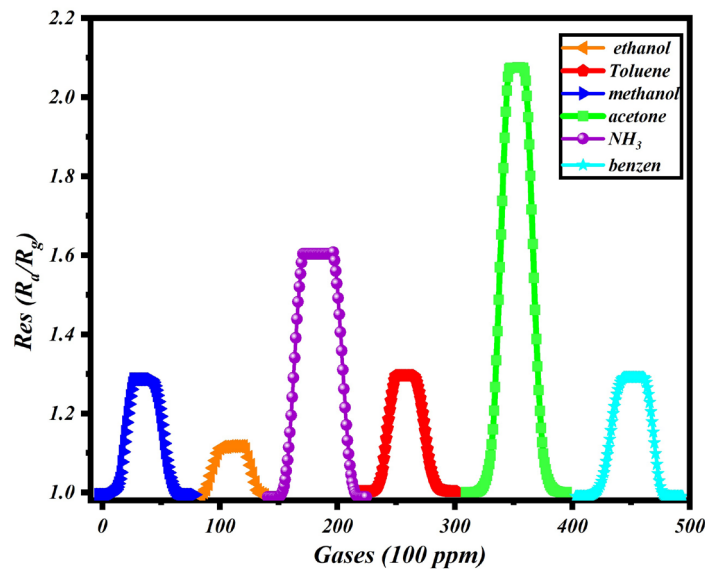
به گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm در دمای کاری از ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی گراد در شکل ۵ الف) نشان داده شده اند. با افزایش دما، مولکول های گاز انرژی گرمایی لازم را جهت غلبه بر سد انرژی و واکنش شیمیایی سطحی با اکسیژن جذب شده از سطح حسگر را به دست آورند. افزایش بیش از حد دما سبب ترک زود هنگام مولکول های گاز هدف از سطح حسگر پیش از واکنش با گونه های اکسیژن و کاهش میزان پاسخ حسگر می گردد همانطور که مشاهده می شود بیشترین پاسخ حسگر در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد است. همچنین در شکل ۵ ب) نمونه $ZnSnO_3$ توخالی پاسخ بیشتری نسبت به



شکل ۸: پایداری حسگر ZnSnO₃ توخالی نسبت به زمان.



شکل ۷: پاسخ حسگر ZnSnO₃ توخالی نسبت به غلظت های مختلف گاز استون در دمای بهینه ۲۲۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۹: گزینش پذیری حسگر گاز ZnSnO₃ توخالی.

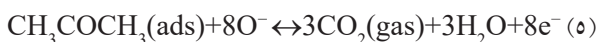
گاز و انباشت آن ها بر سطح حسگر زمان فرآیند جذب و واکنش شیمیایی حسگر طولانی تر می شود که این امر باعث افزایش زمان های پاسخ و بازیابی می گردد. [۲۲].

پایین ترین غلظت گاز که توسط حسگر تشخیص داده می شود حد تشخیص حسگر است. در شکل ۷، پاسخ متغیر حسگر گاز ZnSnO₃ توخالی نسبت به غلظت های مختلف گاز استون در دمای کار ۲۲۰ °C را نشان می دهد این تغییرات به صورت خطی با ضریب همبستگی نزدیک به یک رفتار می کند. در شکل ۸ جهت تعیین پایداری بلند مدت

بازیابی ۱۷ s، زمان کمتری نسبت به نمونه توپر در دمای بهینه ۲۲۰ درجه سانتی گراد را دارد. به همین دلیل در ادامه کار فقط مکعب های توخالی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در شکل ۷ حسگر ZnSnO₃ توخالی در غلظت های مختلف گاز استون، آزمون حسگری برای غلظت های ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ ppm در دمای کار ۲۲۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد که با افزایش غلظت گاز، پاسخ حسگر افزایش می یابد، که تاییدکننده توانایی حسگر در تعیین کمی و کیفی گاز استون تا غلظت ۵۰۰ ppm است. همچنین با بیشتر شدن غلظت

اکسیژنی که قبلاً توسط سطح جذب شده واکنش نشان می دهند. در واقع الکترون هایی که قبلاً توسط گونه های مختلف اکسیژن جذب شده به دام افتاده اند، آزاد شده و به نوار رسانش می روند. که باعث افزایش چگالی بار و در نتیجه آن، افزایش رسانندگی می شود (این اتفاق در گازهای اکسایند برعکس رخ می دهد). به بیانی دیگر مقاومت در برابر یک گاز احیاء کننده برای حسگر (نیم رسانای اکسید فلزی نوع n) کاهش می یابد. در مرز بین ذرات سد شاتکی دوگانه در حضور هوا تشکیل می شود. هنگامی که حسگر در معرض یک گاز قرار می گیرد، ارتفاع سد شاتکی ایجاد شده تغییر کرده و باعث تغییر در مقاومت حسگر می شود [۲۳]. شکل ۱۱ و همچنین واکنش های مربوطه را به صورت زیر می توان نوشت [۲۴]:



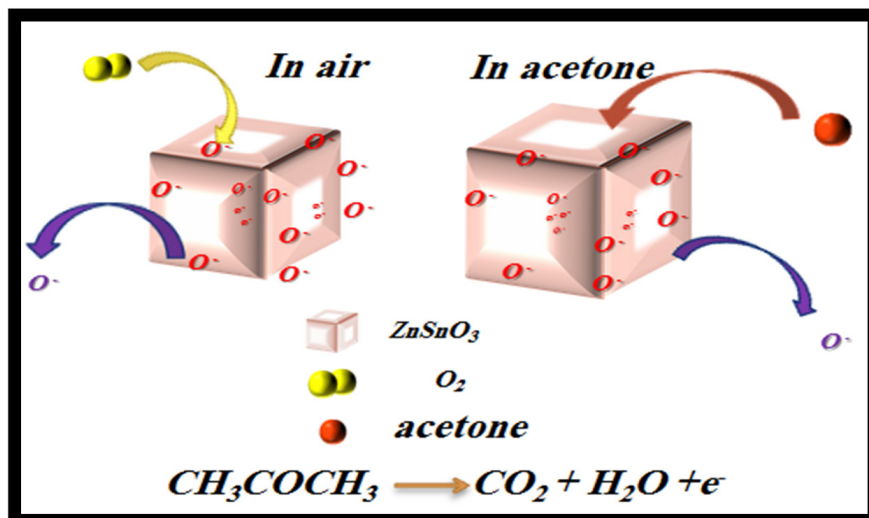
بسته به دمای کار و شرایط سطحی، هر یک از واکنش های بالا در یک محدوده دمایی خاص،

حسگرها، پاسخ حسگری به یک مقدار مشخص از گاز هدف (۱۰۰ ppm) در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد با زمان های مختلف تحت شرایط یکسان نشان داده شده است. مشاهده می شود که میزان پاسخ حسگر نسبت به پاسخ اولیه تقریباً یکسان است و پس از گذشت ۶۰ روز کاهش چشم گیری نداشته است که نشان دهنده این است که حسگر $ZnSnO_3$ پس از قرار گرفتن در معرض گاز و هوا تقریباً به حالت اولیه خود بازگشته و پایداری نسبتاً خوبی دارد.

شکل ۹ نتایج گزینش پذیری حسگر گاز $ZnSnO_3$ توخالی را نشان می دهد. پاسخ حسگر به گازهای متفاوتی از جمله: اتانول، متانول، استون، بنزن، تولوئن و آمونیاک در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد با غلظت ۱۰۰ ppm مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که حسگر $ZnSnO_3$ توخالی در برابر گاز استون پاسخ بیشتری نسبت به گازهای دیگر داشته است، در نتیجه گزینش پذیری بهتری نسبت به گاز استون دارد.

۳-۶ مکانیزم کار حسگر $ZnSnO_3$

بطور کلی آشکارسازی حسگر به میزان اکسیژن جذب شده روی سطح و دمای کار بستگی دارد. عوامل احیاء کننده مانند هیدروکربن ها یا منوکسیدکربن مستقیماً با نیم رساناها برهمکنش ندارند، بلکه با



شکل ۱۱: سازوکار عملکرد حسگر گاز نیم رسانای $ZnSnO_3$ توخالی در مجاورت هوا و گاز استون.

جدول ۱: مقایسه مشخصه های حسگر ZnSnO₃ با کارهای دیگران.

ساختار	گاز	غلظت (ppm)	پاسخ (%)	دما (°C)	زمان پاسخ (s)	زمان بازیابی (s)	مراجع
ZnSnO ₃ خالی	اتانول	۵۰	۲۷	۲۷۰	۰٫۹	۲٫۲	۱۱
مکعب های توخالی ZnSnO ₃	فرمالدهید	۲۰۰	۲۲٫۵	۲۷۰	-	-	۱۲
شش ضلعی های توخالی ZnSnO ₃	استون	۵۰	۱۲	۲۴۰	۱۷	۱۰	۱۰
نانومکعب های ZnSnO ₃	فرمالدهید	۵۰	۲۱	۲۱۰	-	-	۱۳
کره های تو خالی و توپر ZnSnO ₃	اتانول	۵۰۰	۴۴	۳۲۰	۷	۸	۲۴
مکعب های توخالی ZnSnO ₃	استون	۱۰۰	۵۳	۲۲۰	۱۶	۱۷	کار حاضر

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش میکرومکعب های توپر و توخالی ZnSnO₃ به روش هم رسوبی ساخته شدند و پس از بررسی توسط آنالیزهای (XRD)، (FT-IR)، (SEMFE) و (BET) مشخصه های حسگری گاز برای گازهای متفاوتی از جمله: اتانول، متانول، استون، بنزن، تولوئن و آمونیاک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حسگر میکرومکعب های توخالی ZnSnO₃ در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد با پاسخ بازدهی ۵۳ درصد و زمان پاسخ و بازیابی (۱۶ و ۱۷ ثانیه) برای گاز استون با غلظت ۱۰۰ ppm بازدهی بهتری را نسبت به نمونه توپر از خود نشان داده است. زیرا نه تنها از سطح بیرونی بلکه از سطح داخلی نیز الکترون ها کنده می شوند که مسئول کاهش بیشتر مقاومت و افزایش قابل توجه پاسخ حسگر می گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت های مالی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می کنند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین وسیله اعلام می دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

می تواند واکنش غالب باشد [۲۵]. مقادیر اکسیژن جذب شده بر روی سطح میکرومکعب های ZnSnO₃ کاهش و عرض آن لایه از حالت اولیه باریک تر و ارتفاع سد شاتکی کمتر می شود و از نظر ماکروسکوپی مقدار مقاومت نیز کمتر می شود. هنگامی که سطح آن از گاز استون پاک سازی می شود، الکترون های موجود در باند رسانش مجدداً توسط اکسیژن جذب شده و عرض لایه تخلیه شده گسترده تر و همچنین سد شاتکی بزرگتر و در نهایت افزایش مقدار مقاومت می شود.

۴- مقایسه با کار دیگران

در جدول ۱ مقادیر مشخصه های مهم حسگر ZnSnO₃ با بعضی از کارهای مشابه مقایسه گردیده است. نتایج نشان می دهد که حسگر ساخته شده در این پژوهش نسبت به ساختارهای مکعبی توخالی ZnSnO₃ مشابه با گازهای دیگر و ریخت های متفاوت گزارش شده دارای خواص حسگری بهتری می باشد. همان طور که در جدول ۱ دیده می شود، میکرومکعب هایی که برای گاز فرمالدهید خواص حسگری داشته، پاسخ کمتر و دمای کاری بالاتری نسبت به نمونه در این پژوهش داشته است. در بقیه موارد نیز مقایسه ها نشان می دهد که حسگر ساخته شده از میکرومکعب های توخالی ZnSnO₃ در پژوهش حاضر، خواص حسگری بیشتر و دمای کاری کمتری داشته است.

منابع

- of ZnSnO₃ hollow spheres and their n-butanol gas-sensing performance” *Ceramics International*, 47(2): p. 2471-2482, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.090>
- Dong, L. S. Cui, Zhang, W. Xia, L. Zhou, S. C. Russell, K.... & J. Sun, Double-shelled ZnSnO₃ hollow cubes for efficient photocatalytic degradation of antibiotic wastewater, *Chemical engineering journal*, 384, (2020) 123279. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123279>
 - Yin, Y. et al. “Improved gas sensing properties of silver-functionalized ZnSnO₃ hollow nanocubes” *Inorganic Chemistry Frontiers*, 5(9): p. 2123-2131, 2018. <https://doi.org/10.1039/C8QI00470F>
 - Lian, X. et al. “Enhancing the photocatalytic activity of ZnSn(OH)₆ achieved by gradual sulfur doping tactics” *Nanoscale*, 11(19): p. 9444-9456, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9NR01103J>
 - Xia, J. et al. “3D composites of ZnSnO₃ nanoplates/reduced graphene oxide aerogels as an advanced lithium-ion battery anode” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29: p. 5299-5306, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8495-9>
 - Y.H., et al., “Gas Sensors Based on Porous Ceramic Bodies of MSnO₃ Perovskites (M= Ba, Ca, Zn)” Formation and Sensing Properties towards Ethanol, Acetone, and Toluene Vapours” *Molecules*, 27(9): p. 2889, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27092889>
 - Wang, X. et al, “Broad-spectrum UV absorption and gas-sensing improvement of ZnSnO₃ cubic particles based on Al-doping and nano-TiO₂ decoration” *Sensors and Actuators B: Chemical*, 326: p. 129013, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129013>
 - Guo, F. Huang, X. Chen, Z. Sun, H., Shi, W. “Investigation of visible-light-driven photocatalytic tetracycline degradation via carbon dots modified porous ZnSnO₃ cubes, Mechanism and degradation pathway” *Separation and Purification Technology*, 253, 117518, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117518>
 - Sá, B. S., Zito, C. A., Perfecto, T. M., & Volanti, D. P. “Porous ZnSnO₃ nanocubes as a triethylamine sensor” *Sensors and Actuators B: Chemical*, 338, 129869, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129869>
 - Wang, D., et al. “Controlled preparation and gas sensitive properties of two-dimensional and cubic structure ZnSnO₃” *Journal of Colloid and Interface Science*, 608: p. 1074-1085, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.09.167>
 - Yan, S., Zhang, S. Z., Xie, W. F., Gai, L. Y., Yuan, H. M., Zhang, D., & Chi, Z. T. “Chemiresistive ethanol sensors based on In₂O₃/ZnSnO₃ nanocubes”
 - Feng, S, et al., “Review on smart gas sensing technology” *Sensors*, 19(17): p. 3760, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19173760>
 - Wei, M. et al., “Albumin assisted sol-gel synthesized SrSnO₃: Pr³⁺ red persistent phosphors for temperature sensing” *Journal of Luminescence*, 239: p. 118328, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118328>
 - Zhen, Y. X., et al., “Ultra-high response and low temperature NO₂ sensor based on mesoporous SnO₂ hierarchical microtubes synthesized by biotemplating process”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 363: p. 131852, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131852>
 - Fan, H., et al., “Hydrothermal synthesis and their ethanol gas sensing performance of 3-dimensional hierarchical nano Pt/SnO₂” *Journal of Alloys and Compounds*, 909. p. 164693, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164693>
 - Sharma, N., et al., “Fabrication of LaFeO₃ and rGO-LaFeO₃ microspheres based gas sensors for detection of NO₂ and CO” *RSC advances*. 10(3): p. 1297-1308, 2020. <https://doi.org/10.1039/C9RA09460A>
 - D. Rajkumar, H. Umamahesvari, P. Nagaraju, “Micro spherical anatase phase TiO₂ thin films for room temperature operated formaldehyde gas sensor applications”, Volume 5, January, 100946, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100946>
 - B. Jiang, T. Zhou, L. Zhang, W. Han, J. Yang, C. Wang, Y. Sun, F. Liu, P. Sun, G. Lu, “ Construction of mesoporous In₂O₃-ZnO hierarchical structure gas sensor for ethanol detection”, Volume 393, 15 October, 134203, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134203>
 - Liao, Z., et al. “Novel Co₃O₄-CuO-CuOH porous sheet for high sensitivity n-butanol gas sensor at low temperature” *Sensors and Actuators B: Chemical*, 384: p. 133619, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133619>
 - Wang, Y., et al. “One pot, two phases: individual orthorhombic and face-centered cubic ZnSnO₃ obtained synchronously in one solution”. *Inorganic Chemistry*, 53(23) p. 12289-12296, 2014. <https://doi.org/10.1021/ic5014126>
 - Chen, Q., et al., “Synthesis of novel ZnSnO₃ hollow polyhedrons with open nanoholes, Enhanced acetone-sensing performance” *Ceramics International*, 43(1): p. 1617-1621, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.094>
 - Feng, G., et al., “Morphology-controlled synthesis

- defect levels and surface potential barriers” Science of The Total Environment, 706, 135731, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135731>
24. Zhao, S. et al. “Complex-surfactant-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional ZnO nanorods for high-performance ethanol gas sensor” Sensors and Actuators B: Chemical, 286: p. 501-511, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.127>
25. Zhou, T. et al. “Highly sensitive sensing platform based on ZnSnO₃ hollow cubes for detection of ethanol” Applied Surface Science 400: p. 262-268, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.183>
- Sensors and Actuators Reports, 4, 100099, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2022.100099>
22. Wang, X. Lia, H. Zhu, X. Me. Xia, Tao, T. Ieng, B. Xu, W “Improving ethanol sensitivity of ZnSnO₃ sensor at low temperature with multi-measures: Mg doping, nano-TiO₂ decoration and UV radiation” Sensors and Actuators B: Chemical. 297- 126745, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126745>
23. Morandi, S., Amodio, A., Fioravanti, A., Giacomino, A., Mazzocchi, M., Sacerdoti, M., Skouloudis, A. N. “Operational functionalities of air-quality WS_n metal-oxide sensors correlating semiconductor