

Research Paper

Improving Performance of ZnO Nanorods Photodetectors with the Use of Au Nanoparticles¹

Zahra Sadat Hosseini^{*2}, Abdollah Mortezaali³ and Samaneh Sarvi⁴

Received: 2022.03.31

Revised: 2022.06.13

Accepted: 2022.07.13

Abstract

In this research, we try to improve the performance of ultraviolet (UV) photodetector based on ZnO nanorods through decoration with Au nanoparticles. One-dimensional ZnO nanorods were grown on the quartz substrates by the vapor phase transport (VPT) method. Then, Au nanoparticles by depositing a thin nanometric Au layer with thicknesses of 3, 6, 9, and 12 nm via sputtering technique and a heating process were coated on the ZnO nanorods. The morphology and structure of the samples were characterized by using a Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD). The results showed the formation of rather aligned ZnO nanorods with wurtzite hexagonal crystalline structure and preferred orientation along the c-axis which are coated with Au nanoparticles. The obtained data from measuring ultraviolet photoresponse shows that the decorated sample with 9 nm thick Au film possesses a higher on/off ratio (6.5), responsivity (568 ± 33 mA/W), and the faster rise and decay times. In addition, with the presence of Au nanoparticles, responsivity in the visible region ($\lambda = 520$ nm) increased from 6 ± 0.5 mA/W to 19 ± 1 mA/W. This improved detecting behavior results from Localized Surface Plasmons (LSPs) of the Au nanoparticles and the formation of localized Schottky barriers between Au nanoparticles and ZnO.

Keywords: Photodetector, Zinc Oxide 1D Nanorods, Au Nanoparticles, Enhanced Performance.

¹ DOI:10.22051/ijap.2022.39984.1272

² Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: zrhoseini@aeoi.org.ir

³ Professor, Faculty of Physics and Chemistry, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: mortezaali@alzahra.ac.ir

⁴ M. Sc. Graduated, Faculty of Physics and Chemistry, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: sarvi_samaneh@yahoo.com

<https://jap.alzahra.ac.ir>



بهبود عملکرد آشکارسازهای نوری نانومیله‌های ZnO با استفاده از نانوذرات طلا^۱

زهرا سادات حسینی*^۲، عبدالله مرتضی علی^۳ و سمانه سروی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال دوازدهم، پیاپی ۳۰، پاییز ۱۴۰۱

صص ۴۷ - ۶۱

چکیده:

در این پژوهش تلاش بر این است که عملکرد حسگر نور فرابنفش (UV) بر پایه نانومیله‌های اکسیدروی (ZnO) را از راه آرایش با نانوذرات طلا (Au) بهبود دهیم. نانومیله‌های یک بعدی ZnO بر بستر زیرلایه کوارتز به روش انتقال فاز بخار (VPT) رشد داده شدند. سپس، نانوذرات طلا با رسوب لایه نانومتری طلا با ضخامت‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نانومتر به روش کندوپاش همراه با فرآیند حرارت دهی بر روی نانومیله‌های اکسید روی ایجاد می‌گردند. ریخت‌شناسی و ساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس مشخصه‌یابی شدند. نتایج بدست آمده شکل‌گیری نانومیله‌های ZnO به نسبت عمود با فاز بلوری ورتسایت، ساختار بلوری هگزاگونال و جهت‌گیری برتر در راستای محور C را نشان دادند که با نانوذرات طلا پوشانده شده‌اند. داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری پاسخ نوری فرابنفش نشان می‌دهد که نمونه آرایش شده با لایه طلا با ضخامت ۹ نانومتر، نسبت جریان روشن به تاریک بیشتر (۶/۵)، پاسخ‌دهی بالاتر ($33 \pm 568 \text{ mA/W}$) و زمان‌های پاسخ و بازگشت سریع‌تری را فراهم می‌کند. همچنین با حضور نانوذرات طلا پاسخ‌دهی در ناحیه مرئی ($\lambda = 520 \text{ nm}$) از $0.5 \pm 6 \text{ mA/W}$ به $1 \pm 19 \text{ mA/W}$ افزایش یافت. این رفتار آشکارسازی اصلاح شده از پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (LSPs) به وجود آمده از نانوذرات طلا و شکل‌گیری سدهای شاتکی موضعی بین نانوذرات طلا و اکسیدروی نتیجه می‌شود.

واژگان کلیدی: آشکارساز نور، نانومیله‌های یک بعدی اکسیدروی، نانوذرات طلا، عملکرد افزایش یافته.

^۱ DOI:10.22051/ijap.2022.39984.1272

^۲ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

Email: zrhoseini@acoj.org.ir

^۳ استاد، دانشکده فیزیک و شیمی، دانشگاه الزهراء (س)، تهران، ایران. Email: mortezaali@alzahra.ac.ir

^۴ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک و شیمی، دانشگاه الزهراء (س)، تهران، ایران. Email: sarvi_samaneh@yahoo.com



۱. مقدمه

آشکارسازهای نور کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف همانند تشخیص و کالیبراسیون UV، تحلیل زیست‌شناختی و شیمیایی، مخبرات نوری، پزشکی و غیره دارند [۱, ۲]. اکسید روی (ZnO) به دلیل شکاف نواری مستقیم و پهن (۳/۳۷ الکترون ولت)، انرژی بستگی اکسایتون بزرگ (۶۰ میلی الکترون ولت) به عنوان یک گزینه مناسب برای آشکارسازی طول موج‌های کوتاه شناخته می‌شود. اکسید روی در ساختارهای متفاوتی شامل پیوندگاه‌های متجانس و نامتجانس p-n، دیودهای نوری بهمنی و فلز- نیمرسانا- فلز برای آشکارسازی نور به کار برده شده است [۳]. بیشتر ساختار فلز- نیمرسانا- فلز به دلیل سادگی ساخت و عملکرد برای آشکارساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختار تغییرات مقاومت الکتریکی با تابش نور اساس آشکارسازی می‌باشد. یک آشکارساز نور ایده‌آل باید پاسخ‌دهی بالا، جریان تاریک ناچیز و پاسخ‌دهی سریعی داشته باشد. بنابراین مطالعات زیادی برای اصلاح این پارامترهای مشخصه صورت گرفته است. هیبریداسیون با مواد و ساختارهای مناسب به عنوان یک روش مؤثر شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر طیف گسترده‌ای از نوساختارهای نیمرسانا دارای شکاف نواری پهن با نانوذرات فلز نجیب آغشته شده‌اند تا عملکرد آشکارسازی فرابنفش‌شان افزایش یابد. نانوذرات طلا، پلاتین، نقره و پالادیوم اغلب به عنوان فلزات نجیب برای کاربرد در آشکارسازهای نور به کار می‌روند [۴, ۵]. برای مثال آشکارساز نانوسیم ZnO خالص با استفاده از Ag و شکل‌گیری پیوندگاه نامتجانس Ag/ZnO پاسخ سریع‌تر و پایداری نشان داد و جریان نوری آن 10^3 برابر افزایش یافت [۶]. در مطالعه دیگری عملکرد آشکارساز نور بر پایه نانوسیم ZnO با حضور نانوذرات طلا مورد مطالعه قرار گرفت و کاهش جریان تاریک تا دو مرتبه بزرگی و افزایش نسبت جریان روشن به تاریک پس از پوشش با نانوذرات طلا بدست آمد [۱]. مزایای استفاده از نانوذرات فلز نجیب در اصلاح عملکرد افزاره‌های نوری تایید شده است اما بهینه‌سازی آن‌ها با توجه به نیمرسانای موردنظر مهم می‌باشد [۶]. Hsu و همکاران افزایش پاسخ به تابش فرابنفش و مرئی نانوسیم‌ها و نانوپوسته‌های ZnO ناخالص شده با پتاسیم را پس از آرایش با نانوذرات طلا گزارش دادند. بیشینه پاسخ زمانی بدست آمد که قطر نانوذره طلا حدود ۵ تا ۳۵ نانومتر بود [۵]. بنابراین پوشش بهینه از نانوذرات فلز نجیب برای یک نیمرسانا بر اساس ساختار و ریخت‌شناسی متفاوت می‌باشد. ویژگی‌های نوساختارهای نیمرسانا به روش فرآیند سنتز بستگی دارد. به عنوان مثال مقدار ماده بدست آمده از روش‌های ساخت شیمیایی نسبت به روش‌های فیزیکی اغلب بیشتر است اگرچه دارای کیفیت بلوری پایین‌تری است. در منبع [۱] افزایش عملکرد آشکارساز تابش فرابنفش بر پایه تک نانوسیم ZnO که به روش فیزیکی رسوب



بخار شیمیایی رشد داده شده و به روش شیمیایی با استفاده از نانوذرات طلا آرایش شده، گزارش شده است. توزیع نانوذرات طلای رسوب داده شده به این روش یکنواخت نمی‌باشد و برای ایجاد پوششی از نانوذراتی با اندازه‌هایی غیر از ۳۰ نانومتر باید محلول‌های شامل نانوذرات با اندازه مورد نظر تهیه کرد. به عبارت دیگر پایش اندازه و توزیع ذرات افزودنی برای دستیابی به عملکرد بهینه به سادگی صورت نمی‌گیرد. از آنجایی که توزیع و همگنی هر افزودنی بر عملکرد دستگاه افزاره اثر می‌گذارد [۷]، ما روش رسوب کندوپاش را برای آرایش نانومیله‌ها انتخاب کردیم. برخلاف روش‌های شیمیایی، در این روش نه تنها توانایی پایش بیشتری بر رسوب نانوذرات فراهم است، بلکه موجب ورود غیرقابل پایش ناخالصی به ساختار نیز نمی‌شود. از روش کندوپاش برای آرایش نانوسیم‌های ZnO عمودی سنتز شده به روش شیمیایی گرمایی با نانوذرات طلا استفاده شده است و پوشش‌های متفاوتی از نانوذرات طلا با تنظیم پارامتر زمان کندوپاش ایجاد شده است [۳]. برای این ساختار، حضور نانوذرات طلا سبب کاهش پاسخ‌دهی در ناحیه فرابنفش و بالعکس افزایش آن در ناحیه مرئی شده است. روش رشد به کار رفته در این مقاله، [۳]، نانوسیم‌های ZnO با غلظت قابل توجهی از نقص‌ها را تولید می‌کند که به تابش مرئی پاسخ دارند و پوشش‌های بررسی شده از نانوذرات طلا کاهش سطح در معرض تابش و در نتیجه افت پاسخ فرابنفش را نتیجه می‌دهد.

در این پژوهش مجموعه‌ای از نانومیله‌های یک بعدی اکسید روی^۱ که به نسبت عمود هستند و به روش فیزیکی انتقال فاز بخار رشد داده شده اند، برای ساخت آشکارساز استفاده شده است. در این حالت جریان از مرتبه بالاتری نسبت به تک نانوسیم گزارش شده در منبع [۱] می‌باشد که اندازه‌گیری را راحت‌تر می‌نماید و زمینه کاربرد عملی آشکارساز را فراهم می‌سازد. به منظور بررسی نقش طلا در آشکارسازی، پوشش‌های متفاوتی از نانوذرات طلا^۲ بر روی نانومیله‌ها به روش کندوپاش رسوب داده شدند. اصلاح عملکرد در قالب افزایش پاسخ‌دهی و آشکارسازی، کاهش زمان پاسخ و بازگشت و افت جریان تاریک پس از آرایش با نانوذرات طلا با ابعاد میانگین ۳۰ نانومتر که از کندوپاش لایه نازک طلا به ضخامت اولیه ۹ نانومتر ایجاد شده بود، بدست آمد. در کار دیگری از نانوفیبرهای منظم ZnO به عنوان ساختار پایه استفاده کردیم [۸]. در این پژوهش، نانوفیبرها ساختار دانه‌ای دارند و در مسیر یک بعدی قرار گرفته‌اند. در نتیجه مرز دانه‌های بسیاری وجود دارند و از دیدگاه شکل‌گیری صفحات بلوری، بلورینگی و حضور نقص‌ها با نانومیله‌هایی که به طور فیزیکی

¹ One Dimensional ZnO Nanorods (ZnO NRs)

² Au Nanoparticles (Au NPs)



رشد داده شده‌اند، متفاوت هستند و در نتیجه بهینه پاسخ نوری‌شان از پوشش متفاوتی از نانوذرات طلا به دست آمد.

۲. بخش تجربی

فرآیند سنتز نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی به روش انتقال فاز بخار^۱ انجام گرفت. مخلوطی از ۰/۵ گرم پودرهای اکسیدروی (99% LOBachemie) و ۰/۵ گرم گرافیت (99% Merck) که با یکدیگر به نسبت وزنی مساوی ترکیب شده‌اند، به عنوان ماده چشمه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مخلوط را درون بوتله ریخته و آن را به گونه‌ای درون لوله کوارتز کوره استوانه‌ای قرار می‌دهیم که همواره در مرکز قرار گیرد و زیرلایه در فاصله معینی از آن واقع شود. دمای مرکز کوره با آهنگ ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه افزایش یافته و به ۱۰۶۰ درجه سانتیگراد می‌رسد و در این دما به مدت یک ساعت می‌ماند. سپس کوره خاموش می‌شود و نمونه سرد می‌شود. انتقال بخار تولید شده با استفاده از شارش گاز آرگون انجام می‌گیرد. در کوره افقی به واسطه شیب دمایی ذاتی کوره، با فاصله گرفتن از مرکز کوره دما کاهش می‌یابد به صورتی که دمای رشد نمونه ۷۰۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. برای آرایش نانوساختارهای رشد داده شده، لایه نازک طلا با ضخامت‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نانومتر (اندازه‌گیری شده با استفاده از یک ضخامت‌سنج بلور کوارتز) به روش کندوپاش با تنظیم پارامترهای مؤثر لایه‌نشانی شد. به عنوان مثال؛ برای ضخامت ۹ نانومتر، جریان مستقیم ۱۰ میلی‌آمپر و زمان رسوب ۱۸۰ ثانیه تنظیم شد. سپس در هوا در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد پخت داده شدند تا نانوذرات طلا شکل بگیرند. پس از رسوب لایه نازک طلا نمونه‌ها از سفید به رنگ خاکستری متمایل شدند و پس از پخت و شکل‌گیری نانوذرات به رنگ بنفش در آمدند. ریخت شناسی و ساختار نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مدل FEI-Quanta 200 FEG و دستگاه پراش پرتو ایکس^۳ مدل Philips X'Pert MPD با تابش $\text{Cu K}\alpha_1$ (آنگستروم ۱/۵۴۰۵۶) بررسی شدند.

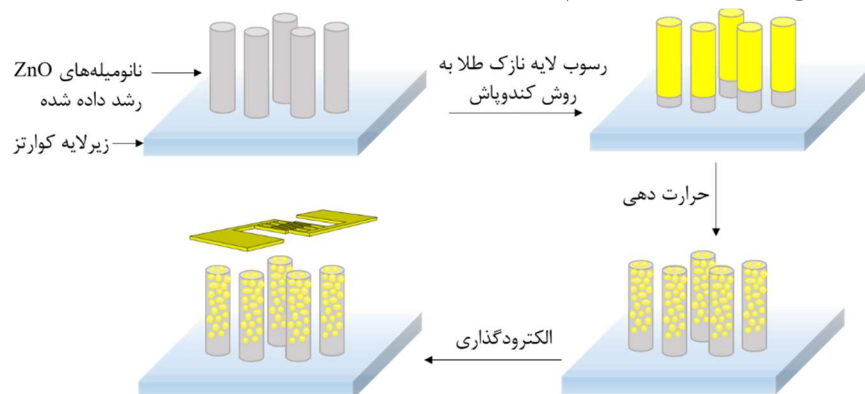
¹ Vapor Phase Transport (VPT)

² Scanning Electron Microscope (SEM)

³ X-Ray Diffraction (XRD)



برای بررسی ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌ها الکترودهایی از جنس طلا با ضخامت ۲۰۰ نانومتر و شانه‌ای شکل با پهنای انگشت ۲۰۰ میکرومتر و مسافت ۱۵۰ میکرومتر به روش تبخیر حرارتی بر روی نمونه‌ها لایه‌نشانی شد. در شکل ۱ شماتیک مراحل آرایش نانومیله‌ها با نانوذرات طلا و سپس الکتروگذاری نمایش داده شده است. پاسخ الکتریکی نمونه‌ها در حضور نور و در تاریکی با اعمال ولتاژ مستقیم ثابت و اندازه‌گیری جریان با استفاده از مولتی‌متر (Sanwa (pc 5000 متصل به رایانه ثبت شد. تابش از راه یک لامپ رشته‌ای فرابنفش که شدت آن در مسافت‌های مختلف با استفاده از یک نورسنج فرابنفش (Lutron:UV-340) اندازه‌گیری شد و دارای بیشینه شدت در طول موج ۳۶۵ نانومتر است، انجام گرفت.



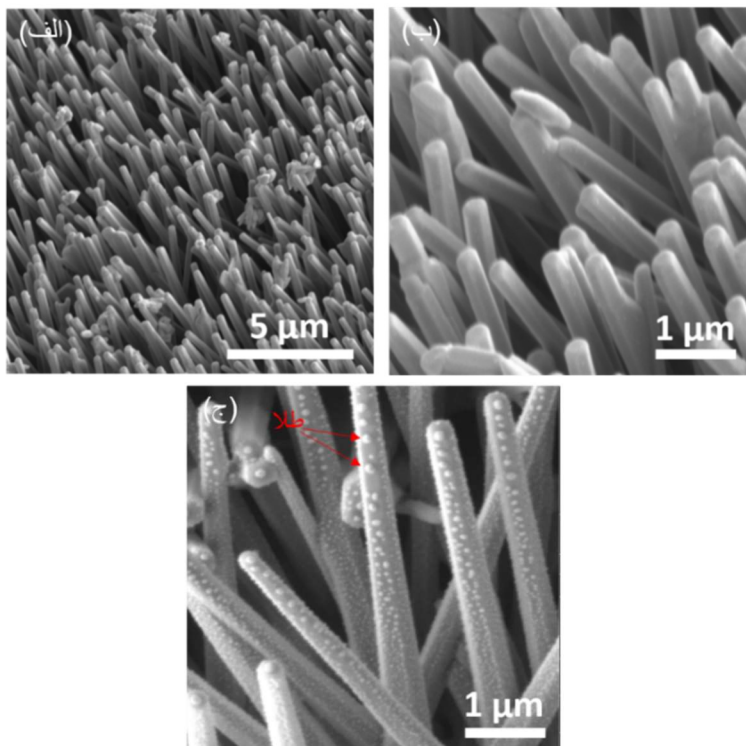
شکل ۱ شماتیک مراحل آرایش نانومیله‌های ZnO با نانوذرات طلا و الکتروگذاری.

۳. نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر SEM از نمونه‌های خالص و حساس شده با نانوذرات طلا، که از لایه طلا با ضخامت ۹ نانومتر بدست آمده است، را نمایش می‌دهد. نانومیله‌های کمابیش منظم ZnO با میانگین قطر و طول به ترتیب ۲۲۰ نانومتر و ۱۰ میکرومتر مشاهده می‌شوند (شکل ۱ الف) و (ب)) که پس از آرایش با نانوذرات طلا، توزیع یکنواختی از نانوذرات با ابعاد میانگین ۳۰ ~ نانومتر سطح‌شان را می‌پوشاند (شکل ۱ ج)). در فرآیند انتقال فاز بخار (VPT)، پودر گرافیت و ZnO در دمای بیشتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد با هم واکنش می‌دهند [۹] و بخارهای شامل گونه‌های رشد شامل ZnO_x و Zn به همراه گازهای CO و CO₂ را تولید می‌کنند. گونه‌های رشد از راه گاز حامل به سطح نمونه انتقال می‌یابند و در آن‌جا با اکسیژن موجود واکنش می‌دهند و چگالش می‌یابند. در نتیجه هسته‌های اولیه شکل می‌گیرد و ساختارهای یک بعدی از این هسته‌ها به عنوان جایگاه‌های برتری داده شده،



رشد می‌بایند. در نمونه‌های حساس شده با طلا اندازه و چگالی سطحی نانوذرات طلا روند روبه رشدی با افزایش مدت زمان کندوپاش و در نتیجه ضخامت لایه طلا دارد. به صورت کلی نقطه ذوب طلا حدود ۱۰۶۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. وقتی طلا به صورت لایه نازک با ضخامت‌هایی در مقیاس نانومتری درمی‌آید، نقطه ذوب آن به دلیل آثار نانویی کاهش می‌یابد. بنابراین حرارت‌دهی در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد لایه طلا را به ذرات طلا تبدیل می‌کند. همچنین چسبندگی بین ZnO و طلا با فرآیند حرارت‌دهی افزایش می‌یابد [۳].



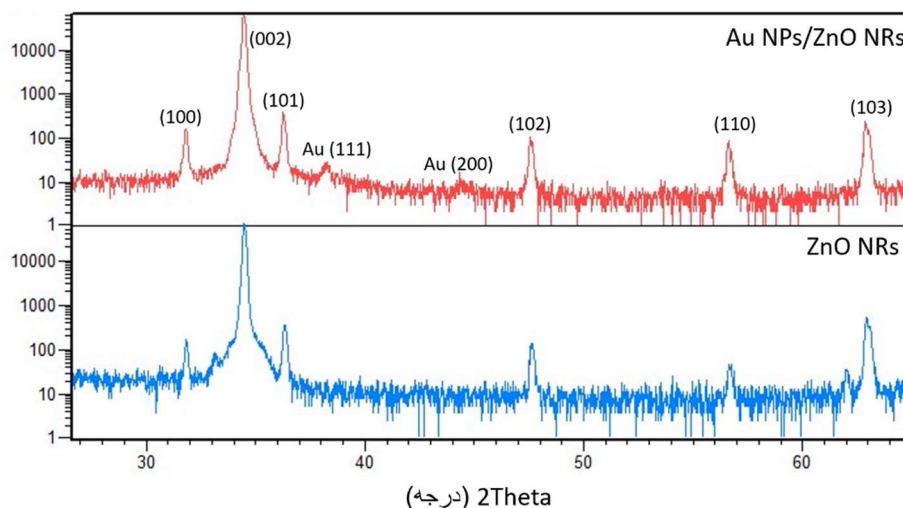
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانومیله‌های کمابیش عمود اکسیدروی الف و ب) بدون نانوذرات طلا با دو بزرگنمایی ج) آرایش شده با نانوذرات طلا بدست آمده از لایه نازک طلا با ضخامت ۹ نانومتر.

ساختار بلوری نمونه‌ها با استفاده از طیف پراش پرتو ایکس، که در شکل ۳ نمایش داده شده است، مورد بررسی قرار گرفت. پیک‌های پراش به فاز ورتسایت ساختار بلوری هگزاگونال اکسیدروی برابر کارت استاندارد با شماره ۰۶۶۴-۰۰۵ (JCPDS card 005-0664) با ثابت‌های شبکه $a=3/245$ و $c=5/198$ آنگستروم نسبت داده می‌شوند. شدت بالاتر پیک (۰۰۲) نشان دهنده رشد جهت یافته در راستای محور C به عنوان سریع‌ترین جهت گیری رشد در ZnO و کیفیت بلوری بالای



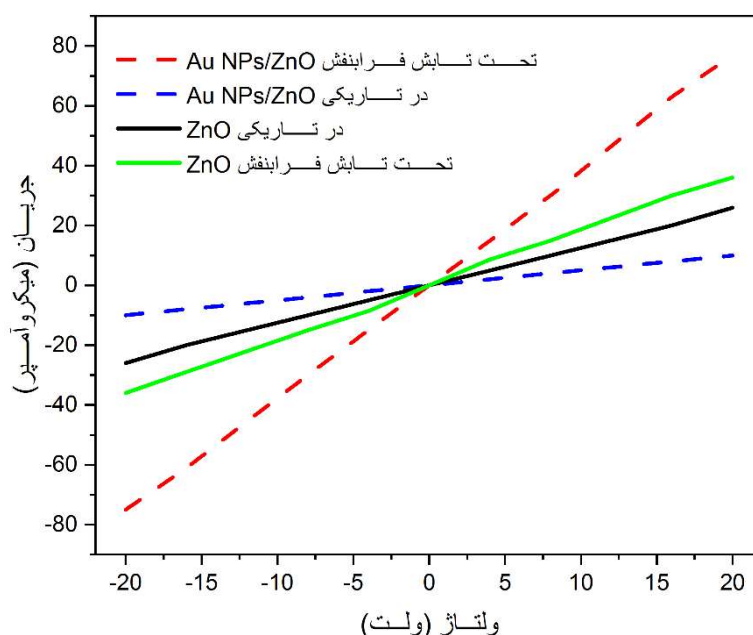
نمونه سنتز شده می‌باشد. این راستا با توجه به تصاویر SEM، که رشد میله‌های کمابیش عمود بر سطح زیرلایه را نشان می‌دهد، عمود بر سطح است. نمونه حساس شده با طلا پیک‌های مشابهی با نمونه خالص دارد. پیک‌های مربوط به طلا برابر با کارت استاندارد شماره ۰۷۸۴-۰۰۴ بسیار ضعیف هستند، که به دلیل مقدار کم طلا می‌باشد.

برای اندازه‌گیری عملکرد آشکارساز، مشخصه‌های جریان-ولتاژ افزاره‌ها در تاریکی و تحت تابش فرابنفش ثبت شدند. شکل ۴ رفتار جریان بر حسب ولتاژ آشکارساز بر پایه نانومیله‌های ZnO خالص و حساس شده با نانوذرات طلا را در تاریکی و تحت تابش فرابنفش با شدت ۳۱۰ میکرووات/ سانتی‌متر مربع به صورت نمونه نمایش می‌دهد. رفتار خطی جریان-ولتاژ نمایانگر شکل‌گیری اتصالات اهمی می‌باشد. یکی از اتصالات بین الکترودهای طلا و ماده حسگری در حالت بایاس معکوس می‌باشد اما به دلیل بالا بودن مقاومت لایه حسگری نسبت به مقاومت اتصال، نمی‌تواند سبب یکسوسازی رفتار جریان-ولتاژ شود. مشاهده می‌شود که هدایت نانومیله‌های ZnO در تاریکی پس از آرایش با نانوذرات طلا کاهش می‌یابد و تحت تابش فرابنفش افزایش کمتری نسبت به نمونه حساس شده با نانوذرات طلا دارد. بنابراین در ولتاژ ۵ ولت نسبت جریان روشن به تاریک (I_{ph}/I_d) نمونه خالص ۱/۳ و پس از پوشش با نانوذرات طلا به ۶/۵ افزایش یافت.



شکل ۳ طیف پراش پرتو ایکس نانومیله‌های خالص اکسیدروی و آرایش شده با نانوذرات طلا.





شکل ۴ منحنی جریان- ولتاژ نمونه خالص و آرایش شده با نانوذرات طلا در تاریکی و تحت تابش نور فرابنفش.

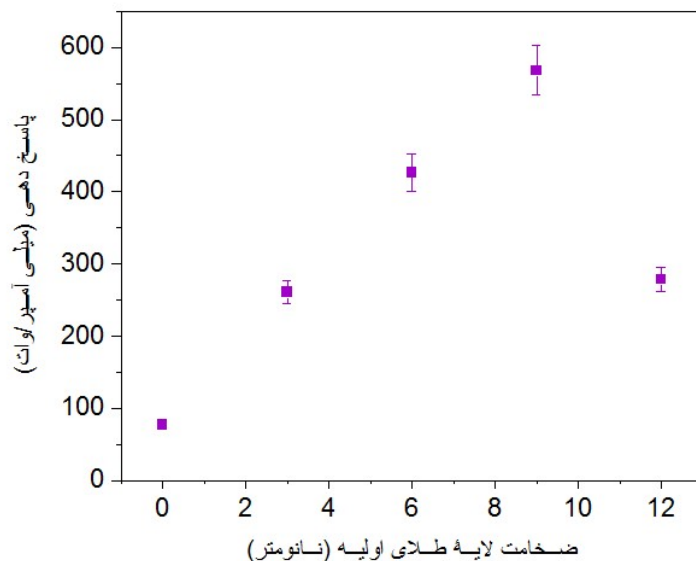
برای تعیین تأثیر پوشش طلا بر عملکرد آشکارساز ZnO، پاسخدهی (R) که یک شاخص مهم برای تعیین کارایی آشکارساز نور به شمار می‌رود را محاسبه کردیم [۸]:

$$R = \frac{\Delta I}{PA} = \frac{I_{ph} - I_d}{PA} \quad (1)$$

جایی که I_{ph} و I_d به ترتیب نمایانگر جریان نوری و تاریکی می باشند.

شکل ۵ تغییر در پاسخدهی نانومیله‌های ZnO را به عنوان تابعی از ضخامت اسمی لایه طلا نمایش می‌دهد. بیشترین پاسخدهی به تابش فرابنفش (568 ± 34 میلی آمپر/وات) برای ضخامت ۹ نانومتر با افزایشی در حدود ۷ برابر نسبت به نمونه خالص بدست آورده شد که نشان دهنده مناسب بودن پوشش نانوذرات طلای به وجود آمده از این ضخامت برای افزایش عملکرد آشکارسازی نانومیله‌های رشد داده شده می‌باشد.



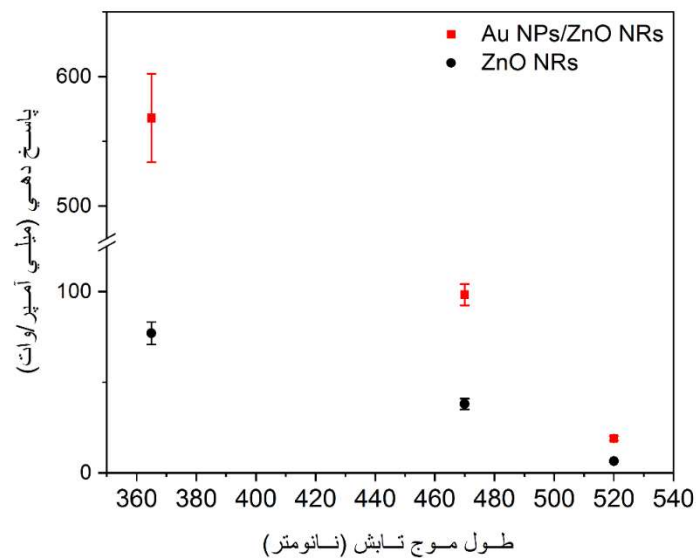


شکل ۵ تغییر پاسخ دهی آشکارساز به عنوان تابعی از ضخامت‌های مؤثر لایه طلا تحت تابش فرابنفش با شدت ۳۱۰ میکرووات/ سانتی متر مربع.

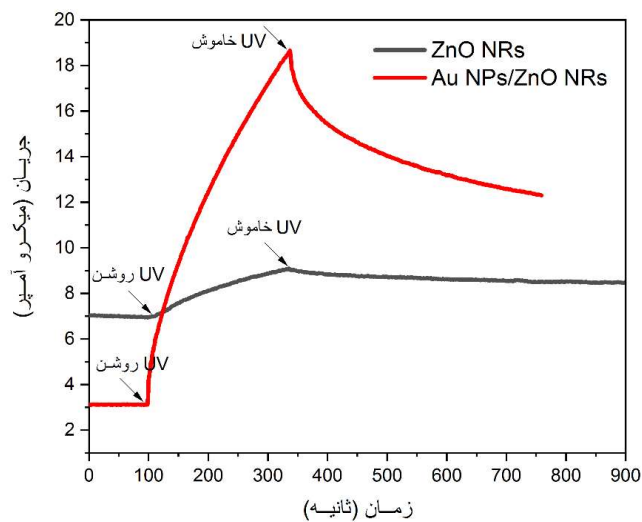
در شکل ۶ پاسخ دهی نمونه خالص و حساس شده با ذرات طلا برای ضخامت ۹ نانومتر به تابش با طول موج‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود هر دو نمونه بالاترین پاسخ دهی را به تابش فرابنفش دارند و مقدار این پاسخ دهی برای نمونه آرایش شده با نانو ذرات طلا (34 ± 568 میلی آمپر/ وات) از نمونه خالص ($77 \sim$ میلی آمپر/ وات) بیشتر است.

شکل ۷، منحنی جریان بر حسب زمان نمونه خالص و آرایش شده با نانوذرات طلا را با اعمال ولتاژ ۵ ولت نمایش می‌دهد. کاهش زمان پاسخ و بازگشت آشکارساز ZnO با حضور نانوذرات طلا دیده می‌شود.





شکل ۶ نمودار پاسخ‌دهی بر حسب طول موج نور تابشی برای نانومیله‌های اکسیدروی خالص (ZnO NRs) و آرایش‌شده با نانوذرات طلا (Au NPs/ZnO NRs).



شکل ۷ نمودار جریان نوری بر حسب شدت تابش فرابنفش برای نمونه خالص و آرایش‌شده با نانوذرات طلا.



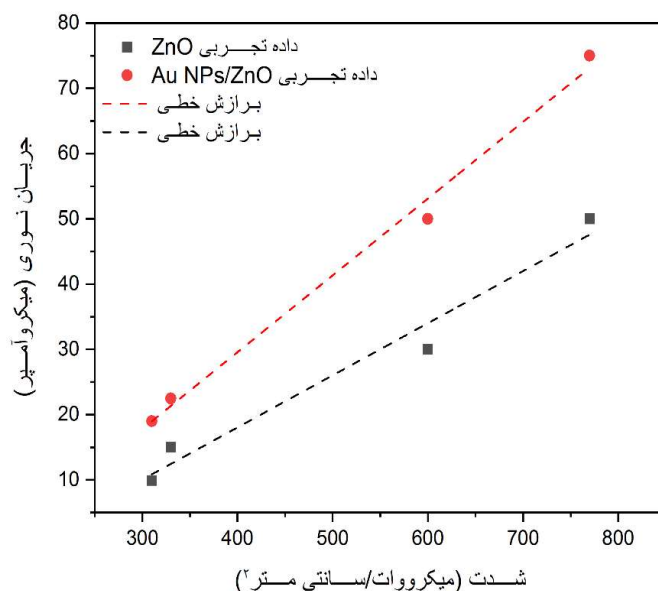
جدول ۱ مقایسه پارامترهای مشخصه آشکارسازهای نور بر پایه ZnO.

منبع	پاسخ‌دهی (آمپر/وات)	جریان نوری	جریان تاریک	چشمه نور	آشکارساز
این کار	$0/568 \pm 0/034$ $0/019 \pm 0/001$	۱۸ میکروآمپر ۲/۵۵ میکروآمپر	۲/۲ میکروآمپر	(۳۶۵ نانومتر) فرابنفش (۵۲۰ نانومتر) سبز	نانومیله‌های ZnO آرایش شده با ۹ نانومتر از نانوذرات طلا
این کار	$0/077 \pm 0/006$ $\pm 0/0005$ ۰/۰۰۶	۹/۹ میکروآمپر ۵/۴۵ میکروآمپر	۵/۳ میکروآمپر	(۳۶۵ نانومتر) فرابنفش (۵۲۰ نانومتر) سبز	نانومیله‌های ZnO
[۱۰]	-	۰/۲۸ نانوآمپر	~۱۵ پیکوآمپر	فرابنفش	نانوسیم ZnO
[۳]	۱/۹۰ ~ ۰/۰۰۹	۷/۷ میکروآمپر ۸۸ نانوآمپر	۵۳ نانوآمپر	(۳۶۷ نانومتر) فرابنفش (۵۳۹ نانومتر) سبز	نانوسیم‌های ZnO با نانوذرات طلا
[۱]	-	۰/۶۵ میکروآمپر	۰/۱۳ پیکوآمپر	۳۵۰ نانومتر، ۱/۳ میلی وات/سنتی متر مربع	نانوسیم ZnO با ۳۰ نانومتر از نانوذرات طلا
[۷]	-	-	۳۳۵ نانوآمپر	۳۵۰ نانومتر، ۲۰ میلی وات/سنتی متر مربع	تک نانوسیم ZnO آرایش شده با نانوذرات طلا
[۱۱]	-	۸۱/۳ میکروآمپر	۳/۲۴ نانوآمپر	۳۶۰ نانومتر، لامپ زنون ۱۵۰ وات	نانومیله‌های ZnO / طلا

در جدول ۱ مقایسه‌ای بین عملکرد آشکارساز ساخته شده در کار حاضر و سایر پژوهش‌ها انجام شده است. همان‌طور که دیده می‌شود پس از آرایش با نانوذرات طلا، عملکرد آشکارساز نسبت به نمونه خالص بهبود می‌یابد. جریان نوری میکروآمپری به تابش‌هایی از ناحیه فرابنفش و مرئی با شدت کم (۳۱۰ و ۳۵۰ میکرووات بر سانتی‌متر مربع به ترتیب برای فرابنفش و نور سبز) مزیت این آشکارساز در مقایسه با سایر آشکارسازهای گزارش شده می‌باشد. از طرفی با توجه به این که اندازه‌گیری جریان در مقیاس پایین (چند نانوآمپر یا کمتر) ابزارهای اندازه‌گیری دقیق یا طراحی تقویت کننده را برای کاربرد عملی می‌طلبد، جریان نوری و تاریک کم تعدادی از آشکارسازها، یک نقص برای آن‌ها محسوب می‌شود. از این دیدگاه، کاربرد عملی تعدادی از آشکارسازهای گزارش شده با جریان‌هایی در حد پیکو یا نانوآمپر یک مسئله چالش برانگیز است.



رفتار جریان نوری بر حسب شدت نور فرودی برای نمونه خالص و آرایش شده با نانوذرات طلا با اعمال ولتاژ ثابت ۵ ولت در شکل ۸ ارائه شده است. ارتباط خطی بین جریان نوری و شدت تابش (در بازه اندازه گیری شده) دیده می شود. به طور معمول برازش پاسخ نوری بر حسب شدت با یک تابع توانی به صورت $I_p = AP^\alpha$ انجام می گیرد. در این رابطه A ثابت تناسب، P شدت نور تابیده به سطح افزاره و α یک ضریب تجربی است [۱۲-۱۴]. در شدت های تحریک پایین (کمتر از ۱۰۰۰ میکرووات/سانتی متر مربع) مقدار یک دارد و رفتار جریان بر حسب شدت تابش خطی است. انحراف از حالت خطی در تابش های با شدت بالا رخ می دهد و در نتیجه فرود شار زیادی از فوتون ها می باشد. در این حالت توان α کوچک تر از یک است و نمایانگر فرآیندهای پیچیده تولید نوری، به دام افتادن و باز ترکیب می باشد [۱۲, ۱۵]. در این جا با توجه به کمی شدت های تابش (کمتر از ۱۰۰۰ میکرووات/سانتی متر مربع) یک برازش خطی بر روی داده های تجربی انجام شده است.



شکل ۸ رفتار زمانی جریان آشکارساز با تابش فرابنفش برای نمونه خالص و آرایش شده با نانوذرات طلا در ولتاژ بایاس ۵ ولت.



سازوکار اصلاح عملکرد آشکارساز ZnO بدین ترتیب بیان می‌شود که در تاریکی، مولکول‌های اکسیژن روی سطح نانومیله‌های ZnO جذب می‌شوند و الکترون‌های آزاد را در نیم‌رسانا ZnO نوع n به دام می‌اندازند $[O_2 + e \rightarrow O_2^-]$ [۷]. در نتیجه، یک لایه تهی با رسانایی کم در نزدیکی سطح ایجاد می‌شود. پس از پوشش با نانوذرات Au، حالت‌های سطح و جذب سطحی مولکول‌های اکسیژن تغییر نمی‌کنند چرا که نانوذرات Au کل سطح نانومیله را نمی‌پوشانند و منطقه تماس بین Au و ZnO بسیار کوچک است. افزون بر این، از آن‌جا که تابع کار ZnO ($\phi_{ZnO} = 4.1 \text{ eV}$) کوچک‌تر از تابع کار Au ($\phi_{Au} = 5.1 \text{ eV}$) است، الکترون‌ها از ZnO به Au جریان می‌یابند و در محل اتصال، انرژی فرمی (E_F) به تعادل در می‌آید و در نتیجه یک سد شاتکی شکل می‌گیرد که عرض لایه تهی به ارتفاع سد بستگی دارد [۷]. بنابراین ناحیه تهی با حضور نانوذره Au بزرگ‌تر از ناحیه تهی حالت خالص است. شکل‌گیری ناحیه تهی بزرگ، دلیل اصلی کاهش جریان تاریک پس از پوشش با نانوذرات Au است. تحت تابش نور UV جفت‌های الکترون-حفره در نانومیله‌های ZnO تولید می‌شوند $[h\nu \rightarrow h^+ + e^-]$. حفره‌های برپا شده با استفاده از نور، به سطح نانومیله ZnO می‌روند و پس از آن یون‌های اکسیژن منفی با حفره‌ها خنثی می‌شوند $[h^+ + O_2^- \rightarrow O_2]$. الکترون‌های تولیدی با استفاده از نور، رسانایی نانومیله‌های ZnO را افزایش می‌دهند. با حضور نانوذرات Au تعدادی از حفره‌ها در محل اتصال Au-ZnO به دام می‌افتند و تعدادی از حفره‌ها از سد شاتکی عبور می‌کنند. حفره‌های عبوری از سد، بازترکیب الکترون-حفره را ایجاد می‌کنند. کاهش بار منفی موجب اختلاف در سطح فرمی خواهد شد که پهنای لایه تهی را کاهش می‌دهد. افزون بر این، سد شاتکی در محل اتصال نانوذرات Au و نانومیله ZnO، می‌تواند به دام اندازی بیشتری برای حفره‌ها را نشان دهد که به الکترون‌های بیشتری اجازه می‌دهد که بتوانند به الکترودها شارش یابند. از این رو، شکل‌گیری اتصال‌های شاتکی (بین نانوذرات Au و نانوسیم ZnO) را می‌توان دلیل بهبود پاسخ نوری آشکارساز ZnO با نانوذرات طلا دانست. از سوی دیگر الکترون‌های نوار d در Au ممکن است با کمک تابش فرابنفش تحریک شده و به ZnO حرکت کنند تا غلظت حامل‌ها افزایش یابد [۱۰]. با توجه به سازوکار بیان شده، پاسخ کمتر آشکارساز برای لایه‌های نازک‌تر طلا (کمتر از ۹ نانومتر) می‌تواند به کمبود ذرات طلا نسبت داده شود (نمودار پاسخ‌دهی بر حسب ضخامت لایه طلا در شکل ۵). کاهش پاسخ‌دهی نمونه حساس شده با ضخامت مؤثر ۱۲ نانومتر به شکل‌گیری کانال‌های هدایت (افزایش جریان تاریک) و کاهش مساحت سطحی مؤثر آشکارساز، که در آشکارسازی از راه فرآیند جذب و واجذب اکسیژن شرکت می‌کند، در



نتیجه افزایش تعداد و اندازه ذرات طلا ارتباط داده می‌شود [۳]. پس از خاموشی تابش فرابنفش، باز ترکیب الکترون-حفره و جذب مجدد اکسیژن روی می‌دهد. فرآیند جذب اکسیژن بسیار کند است و ممکن است زمان زیادی طول بکشد که پس از تابش نور فرابنفش حالت ابتدایی را دوباره بازیابی کند، بنابراین زمان افت جریان نوری پس از خاموشی تابش فرابنفش، بسیار طولانی است. اثر تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده^۱ نانوذرات Au هم می‌تواند دلیل دیگر بهبود آشکارسازی باشد [۳]. تحت تابش نور مرئی الکترون‌های آزاد نانوذرات طلا با یک نوسان هماهنگ جمعی تولید میدان مغناطیسی نوسانی می‌کنند که سبب جدایش بار و نوسان دو قطبی در سطح نانوذرات طلا می‌گردد که این سبب برانگیخته شدن الکترون‌های طلا و شارش آن‌ها به نوار رسانش ZnO و در نتیجه افزایش جریان نوری خواهد شد.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش بهبود عملکرد آشکارسازی نانومیله‌های اکسیدروی از راه آرایش با نانوذرات طلا بررسی شد. برای تعیین پوشش بهینه، ضخامت‌های متفاوتی از لایه نازک طلا در بازه ۳ تا ۱۲ نانومتر بر سطح نانومیله‌های ZnO رسوب داده شد. برای همه ضخامت‌ها افزایش پاسخدهی به تابش فرابنفش نسبت به نمونه خالص بدست آمد و بیشترین پاسخدهی برای ضخامت ۹ نانومتر (۳۴ ± ۵۶۸ میلی آمپر/وات) بدست آورده شد. این امر نشان دهنده مناسب بودن پوشش نانوذرات طلای به وجود آمده از این ضخامت برای افزایش عملکرد آشکارسازی نانومیله‌های رشد داده شده می‌باشد. در نمونه آرایش شده با لایه نازک ۹ نانومتری، جریان تاریک حدود ۲ برابر از ۷ میکروآمپر به ۳ میکروآمپر کاهش دارد که به دلیل تهی سازی بیشتر حامل‌ها نزدیک سطح اکسیدروی و افزایش پهنای لایه تهی است. علاوه بر این، نانوذرات طلا پراکندگی نور را افزایش می‌دهند و به دلیل اثر پلاسمون سطحی که تحت تابش نور مرئی دارند، جذب مؤثرتر نور و تولید حامل بیشتر را سبب می‌شوند. بنابراین افزایش حدود ۷ و ۳ برابری پاسخدهی به ترتیب به تابش فرابنفش (طول موج=۳۶۵ نانومتر) و مرئی (طول موج=۵۲۰ نانومتر) با حضور نانوذرات طلا نتیجه می‌گردد.

۵. تقدیر و تشکر

از سرکار خانم نیک‌خصال که پوشش لایه‌های نازک طلا را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

^۱ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)



منابع

- [1] Liu K., Sakurai M., Liao M., Aono M., Giant Improvement of the Performance of ZnO Nanowire Photodetectors by Au Nanoparticles, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 19835-19839, 2010.
- [2] Lin H., Jiang A., Xing S., Li L., Cheng W., Li J., Miao W., Zhou X., Tian L., Advances in Self-Powered Ultraviolet Photodetectors based on p-n Heterojunction Low-Dimensional Nanostructures, *Nanomaterials*, **12**, 910, 2022.
- [3] Hsu C.-L., Chang L.-F., Hsueh T.-J., A Dual-Band Photodetector based on ZnO Nanowires Decorated with Au Nanoparticles Synthesized on a Glass Substrate, *Rsc Advances*, **6**, 74201-74208, 2016.
- [4] Selamneni V., Raghavan H., Hazra A., Sahatiya P., MoS₂/Paper Decorated with Metal Nanoparticles (Au, Pt, and Pd) based Plasmonic-Enhanced Broadband (Visible-NIR) Flexible Photodetectors, *Advanced Materials Interfaces*, **8**, 2001988, 2021.
- [5] Hsu C.L., Lin Y.H., Wang L.K., Hsueh T.J., Chang S.P., Chang S.J., Tunable UV- and Visible-Light Photoresponse based on p-ZnO Nanostructures/N-ZnO/Glass Peppared with Au Nanoparticles, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 14935-14944, 2017.
- [6] Viter R., Balevicius Z., Abou Chaaya A., Baleviciute I., Tumenas S., Mikoliunaite L., Ramanavicius A., Gertnere Z., Zalesska A., Vataman V., Smyntyna V., Erts D., Miele P., Bechelany M., The Influence of Localized Plasmons on the Optical Properties of Au/ZnO Nanostructures, *J. Mater. Chem. C*, **3**, 6815-6821, 2015.
- [7] H. Ding, J. Shao, Y. Ding, W. Liu, H. Tian, X. Li, One-Dimensional Au-ZnO Heteronanostructures for Ultraviolet Light Detectors by a Two-Step Dielectrophoretic Assembly Method, *ACS Appl Mater Interfaces*, **7**, 12713-12718, 2015.
- [8] Hosseini Z.S., Bafrani H.A., Naseri A., Moshfegh A.Z., High-Performance UV-Vis-NIR Photodetectors Based on Plasmonic Effect in Au Nanoparticles/ZnO Nanofibers, *Applied Surface Science*, **483**, 1110-1117, 2019.
- [9] Omran M., Fabritius T., Heikkinen E.-P., Vuolio T., Yu Y., Chen G., Kacar Y., Microwave Catalyzed Carbothermic Reduction of Zinc Oxide and Zinc Ferrite: Effect of Microwave Energy on the Reaction Activation Energy, *Rsc Advances*, **10**, 23959-23968, 2020.
- [10] Gogurla N., Sinha A.K., Santra S., Manna S., Ray S.K., Multifunctional Au-ZnO Plasmonic Nanostructures for Enhanced UV Photodetector and Room Temperature on Sensing Devices, *Sci. Rep.*, **4** 6481-6489, 2014.
- [11] M. Mahanti, D. Basak, Enhanced Ultraviolet Photoresponse in Au/ZnO Nanorods, *Chem. Phys. Lett.*, **612**, 101-105, 2014.
- [12] Ning Y., Zhang Z., Teng F., Fang X., Novel Transparent and Self-Powered UV Photodetector Based on Crossed ZnO Nanofiber Array Homo Junction, *Small*, **14**, 1703751-1703759, 2018.
- [13] Gao T., Zhang Q., Chen J., Xiong X., Zhai T., Performance-Enhancing Broadband and Flexible Photodetectors based on Perovskite/ZnO-Nanowire Hybrid Structures, *Advanced Optical Materials*, **5**, 1700201-1700208, 2017.
- [14] Mukherjee B., Cai Y., Tan H.R., Feng Y.P., Tok E., Sow C., NIR Schottky Photodetectors Based on Individual Single-Crystalline GeSe Nanosheet, *ACS applied materials & interfaces*, **5**, 9594-9604, 2013.
- [15] Liu X., Gu L., Zhang Q., Wu J., Long Y., Fan Z., All-Printable Band-Edge Modulated ZnO Nanowire Photodetectors with Ultra-High Detectivity, *Nat. Commun.*, **5**, 4001-4009, 2014.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

