

بررسی اثر هندسه‌ی الکترودها بر پاسخ آشکارساز تابش فرابنفش مبتنی بر نانومیله‌های اکسیدروی

زهرا سادات حسینی^{۱*}، عبدالله مرتضی علی^۲

۱. پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۲۶-۱۴۳۹۵، تهران- ایران
۲. گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهراء (س)، کدپستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳، تهران- ایران

*Email: zrhoseini@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۱۷ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۷/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۹

چکیده

در این پژوهش، آشکارسازهای تابش فرابنفش با پاسخ قابل کنترل بر پایه‌ی لایه نازک متشکل از نانومیله‌های نسبتاً عمود اکسید روی (ZnO) ساخته شدند. نانومیله‌های عمودی به روش حمام شیمیایی بر روی زیرلایه‌های شیشه دانه‌گذاری شده رشد داده شدند. سپس با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی فوتولومینسانس (PL) و پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) مشخصه‌یابی شدند. اثر تغییر محیط و مساحت الکترودهای شانه‌ای درهم تنیده بر پاسخ‌دهی و جریان تاریک آشکارساز تابش UV بر پایه‌ی نانومیله‌های ZnO بررسی شد. پاسخ‌دهی آشکارساز با کاهش محیط الکترود و ثابت نگه داشتن مساحت ناحیه فعال روند نزولی نشان داد. با ثابت نگه داشتن محیط الکترود در مقدار بیشینه دیده می‌شود که پاسخ آشکارساز با افزایش گاف بین انگشت‌های الکترودها افزایش می‌یابد به طوری که در فاصله گاف $160 \mu\text{m}$ به مقدار بیشینه‌اش به بزرگی 105 AW^{-1} با اعمال ولتاژ بایاس ۲ V می‌رسد. سازوکار حاکم بر تغییر پاسخ‌دهی با تغییر هندسه‌ی الکترودها بر اساس تغییر مساحت نواحی تهی حاصله از سدهای شاتکی بین طلا و اکسیدروی و سدهایی که در مرز بین میله‌های ZnO به سبب جذب و واجذب گونه‌های اکسیژن شکل می‌گیرد، پیشنهاد می‌شود. این پژوهش روشی ساده برای بهینه‌سازی پاسخ‌دهی افزاره‌های آشکارسازی به منظور کاربردهای عملی ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز تابش فرابنفش، هندسه الکترود، نانومیله‌های عمود، اکسید روی، الکترودهای شانه‌ای درهم تنیده

Investigation the effect of electrode geometry on the response of the UV photodetector based on ZnO nanorods

Z.S. Hosseini^{*1}, A. Mortezaali²

1. Photonic and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran
2. Department of Condensed Matter, Faculty of Physics, Alzahra University, Postal Code: 1993893973, Tehran - Iran

Research Article

Received: 8.7.2023, Revised: 26.9.2023, Accepted: 1.10.2023

Abstract

In this research, ultraviolet (UV) photodetectors based on aligned ZnO nanorods thin films with controllable responsivity were fabricated. Aligned nanorods were grown on seeded glass substrates by the chemical bath method. Then, they were characterized using a Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), photoluminescence (PL), and Energy Dispersive X-ray Analysis (EDAX). The effect of perimeter and area variation of interdigitated electrodes on the responsivity of UV ZnO nanorods-based photodetector was investigated. With a decreasing electrode perimeter and maintaining the same area, the responsivity decreases. By keeping the perimeter constant at the maximum value, it is observed that the response of the photodetector is increased with increasing the gap between the fingers of the electrode so that the gap of $160 \mu\text{m}$ reaches the maximum as high as 105 AW^{-1} at 2 V bias voltage. The dominant mechanism for change of responsivity with electrode geometry is variation in the area of depletion regions resulting from Schottky barriers between ZnO and Au and the formed barriers between ZnO nanorods due to adsorption and desorption of oxygen species. This research demonstrates a simple way of optimizing photodetector devices' responsivity for practical applications.

Keywords: UV photodetector, Electrode geometry, Aligned nanorods, Zinc Oxide, Interdigitated comb-like electrodes



۱. مقدمه

آشکارسازهای تابش فرابنفش (UV) به طور گسترده در کاربردهای نظامی و تجاری همانند مخابرات نوری، پایش محیط، آشکارسازی شعله و تابش، استرلیزاسیون آب و مطالعات فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. تمامی این کاربردها نیازمند افزاره‌هایی^۱ فوق‌العاده حساس با پاسخ‌دهی بالا و سریع هستند [۲]. آشکارسازهای فلز-نیمه‌هادی-فلز^۲ (MSM) صفحه‌ای متداول‌ترین و ساده‌ترین نوع آشکارساز می‌باشند که با فناوری نیمه‌هادی موجود هم‌خوانی دارند و عملکرد قابل‌توجهی از خود نشان داده‌اند [۳، ۴].

اصلاح ماده نیمه‌هادی و الگوی الکترودهای فلزی دو راهکار اصلی برای بهینه‌سازی عملکرد آشکارسازهای فلز-نیمه‌هادی-فلز به شمار می‌روند. مرسوم‌ترین نیمه‌هادی برای ساخت آشکارساز سیلیکون (Si) می‌باشد. اگرچه فناوری Si در این حوزه به خوبی تثبیت شده است، گاف نواری کوچک Si ($\sim 1.1 \text{ eV}$) سبب محدودیت‌هایی می‌شود. به عنوان مثال برای آشکارسازی UV فیلترهای گران‌قیمت نیاز است و عملکرد افزاره تحت تأثیر دمای محیط قرار می‌گیرد که منجر به بازده کمتر می‌شود [۱]. با ظهور دانش نانو مواد نیمه‌هادی با خواص اپتیکی و الکترونیکی منحصر به فردی برای ساخت افزاره‌های اپتوالکترونیکی به کار گرفته شده‌اند که برای اصلاح عملکرد افزاره نتیجه‌بخش بوده‌اند.

در میان مواد با گاف نواری پهن که مناسب برای آشکارسازی تابش UV باشند، اکسید روی (ZnO) به ویژه به صورت نانو ساختارهای یک بعدی به عنوان گزینه خوبی برای ساخت آشکارسازهای UV پدیدار شده است [۵]. در کنار گاف نواری پهن (3.37 eV)، انرژی بستگی اکسایشیونی بالا ($\sim 60 \text{ eV}$)، سختی در برابر تابش و سازگاری با محیط زیست از دیگر ویژگی‌های مطلوب ZnO برای آشکارسازی به شمار می‌روند. نانو ساختارهای یک بعدی علاوه بر ابعاد مناسب‌شان برای کوچک‌سازی افزاره، مساحت بالا، حالات سطحی فراوان و مسیر سریع برای ترابرد حامل‌ها را فراهم می‌آورند [۶]. همچنین حالات سطحی سبب انحنای قابل‌توجه نوار انرژی می‌شوند. این پدیده سبب جدایش الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده نوری شده که طول عمر حامل‌ها را به طور چشمگیری طولانی می‌کند و منجر به افزایش بازده جریان نوری می‌گردد.

اکثر مطالعات اساساً بر اصلاح ماده نیمه‌هادی در قالب افزایش کیفیت بلوری، آلیش با عناصر فلزی، هیبریداسیون با

سایر نیمه‌هادی‌ها و اکسیدهای فلزی و بررسی اثر ولتاژ اعمالی متمرکز شده‌اند [۷، ۸]. به عنوان مثال در مرجع [۹] نقش غلظت‌های متفاوتی از عنصر کمیاب یورومیم (Eu) برای آلیش نانومیله‌های ZnO به منظور اصلاح عملکرد آشکارسازی UV بررسی شده است. نتایج نشان دادند که بالاترین پاسخ آشکارسازی برای آلیش با ۱ at.% از Eu حاصل می‌شود.

اما گزارش‌های اندکی درباره‌ی اثر ساختار فیزیکی الکترودهای شانه‌ای جفت شده (IDTs) به عنوان متداول‌ترین ساختار الکترودهای تناوبی، بر پاسخ‌دهی آشکارسازهای UV وجود دارد. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۲۳ انتشار یافته، تأثیر شفافیت الکترودهای شانه‌ای نامتقارن (aIDTs) از جنس طلا بر پاسخ UV آشکارساز مبتنی بر ZnO بررسی شده است و بیشترین پاسخ‌دهی در حدود 4.86 mA/W با اعمال ولتاژ 1 V گزارش شده است [۱۰]. Pallavolu و همکاران از طریق آلیش ZnO با وانادیم (V) موفق به ساخت آشکارساز UV خودتوان با عملکرد خوب شدند [۱۱].

Gu و همکاران افزایش پاسخ‌دهی آشکارسازهای UV بر پایه‌ی نانوفیبرهای ZnO را با کاهش فاصله‌ی بین الکترودهای شانه‌ای گزارش کردند [۱۲]. پس از آن‌ها، Zhang و همکاران موضوع را از نقطه نظر دیگری بررسی کردند و اثر تعداد جفت‌های الکترودهای درون مرتبط را بر ویژگی‌های آشکارساز UV مبتنی بر لایه‌ی MgZnO را گزارش کردند. آن‌ها تنها سه هندسه‌ی متفاوت برای الکترودها در نظر گرفتند [۳].

در این پژوهش اثر تعداد انگشت‌های الکترودهای شانه‌ای (محیط یک وجه) درهم‌تنیده و فاصله‌ی بین انگشت‌های الکترودها (مساحت پوشانده نشده با الکترودها) بر پاسخ آشکارساز تابش UV بر پایه‌ی نانومیله‌های ZnO بررسی و مقایسه شده است که مطابق با جستجوهای انجام شده، تاکنون گزارش نشده است. این پژوهش یک رهیافت مؤثر برای اصلاح قابلیت عملکرد افزاره‌های اپتوالکترونیکی متداول ارائه می‌دهد و اطلاعات گزارش شده برای طراحی آشکارسازها با کاربرد عملی مفید می‌باشد. همچنین تنظیم خروجی‌های الکتریکی آشکارساز بدون نیاز به ادوات تقویت‌کننده که مناسب برای کاربرد در مدارهای مجتمع الکترونیکی و فوتونیک است از اهمیت دیگر این پژوهش محسوب می‌شود.

۲. بخش تجربی

نانومیله‌های ZnO به روش ساده‌ی حمام شیمیایی بر روی زیرلایه‌های شیشه سنتز شدند. پیش از رشد آرایه‌ای از نانومیله‌ها، دانه‌گذاری بر روی زیرلایه‌ها با استفاده از محلول

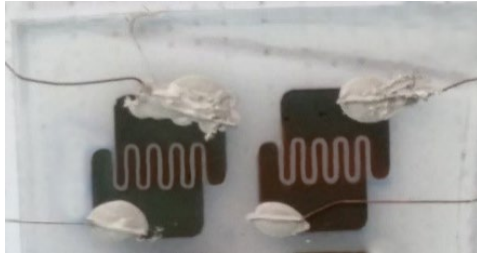
1. Devices

2. Metal-Semiconductor-Metal (MSM)



جدول ۱. مشخصات الکترودها آشکارسازها

نام‌افزاره	P-۰۱	P-۰۲	P-۰۳	P-۰۴	P-۰۵	P-۰۶
محیط (mm)	۱۹,۳۶	۱۲,۹۰	۹,۶۸	۷,۷۴	۶,۴۵	۵,۵۳
مساحت (mm ^۲)	۱,۵۴	۱,۵۴	۱,۵۴	۱,۵۴	۱,۵۴	۱,۵۴
گاف (μm)	۸۰	۱۲۰	۱۶۰	۲۰۰	۲۴۰	۲۸۰
نام‌افزاره	P1=P-۰۱	P2	P3	P4	P5	P6
محیط (mm)	۱۹,۳۶	۱۹,۳۶	۱۹,۳۶	۱۹,۳۶	۱۹,۳۶	۱۹,۳۶
مساحت (mm ^۲)	۱,۵۴	۲,۳۲	۳,۰۹	۳,۸۷	۴,۶۴	۵,۴۲
گاف (μm)	۸۰	۱۲۰	۱۶۰	۲۰۰	۲۴۰	۲۸۰



شکل ۱. تصویری از دو آشکارساز ساخته شده.

۳. نتایج و بحث

تصاویر SEM و آنالیز EDAX که در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند برای مطالعه‌ی ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها به کار برده شدند. مشاهده می‌شود که نانومیله‌ها با سطح مقطع شش‌گوشی با قطر میانگین ~ 270 nm و طول ~ 1.4 μm به طور نسبتاً عمود رشد یافته‌اند. همچنین آنالیز EDAX وجود عناصر اصلی Zn و O را نمایش می‌دهد به طوری که مقدار O از Zn بیشتر است لیکن درصد‌های وزنی تقریباً یکسانی دارند که به دلیل بیشتر بودن جرم اتمی Zn از O است. نتایج به دست آمده با پژوهش‌های دیگران در تطابق است [۱۶]. قله‌های طلای مشاهده شده ناشی از رسوب لایه‌ی طلا بر سطح نمونه به منظور ثبت تصاویر SEM است.

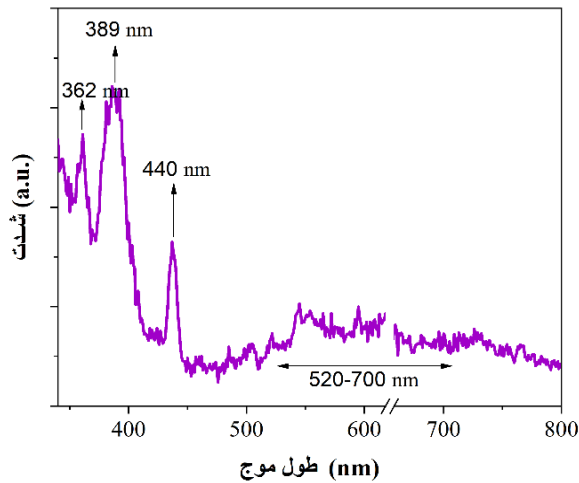
ساختار بلوری نانومیله‌های ZnO سنتز شده با طیف پراش پرتو ایکس که در شکل ۳ نمایش داده شده است بررسی شد. قله‌های پراش نشان می‌دهند که ZnO به فاز بلوری شش‌گوشی ورتسایت شکل یافته و ساختاری چندبلور دارد که با کارت استاندارد با شماره ۱۴۵۱-۰۳۶ مطابقت دارد. قله ارجح (۰۰۲) نشان می‌دهد نانومیله‌ها جهت‌گیری غالب در راستای محور C دارند که با عمود بودن نسبی نانومیله‌ها بر سطح زیرلایه (طبق تصاویر SEM شکل ۱) هم‌خوانی دارد. قله پهنی که در زوایای قبل از 30° مشهود است از آمورف بودن زیرلایه شیشه نشات می‌گیرد [۶]. عنصر طلای مشاهده شده به دلیل لایه‌نشانی نمونه با فلز طلا برای ثبت تصاویر SEM می‌باشد. البته قله ضعیف در انرژی 1.74 eV می‌تواند ناشی از فلورسانس ثانویه آشکارساز Si سیستم EDAX به کار برده شده نیز باشد.

دی‌هیدرات‌استات‌روی و مونواتانول‌آمین به نسبت ۱:۱ با روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت 3500 rpm به مدت 30 s و پنج مرتبه تکرار فرایند لایه‌نشانی، انجام شد. فرایند پخت دو مرحله‌ای در دمای 100°C به مدت 1 ساعت در آون و در کوره در دمای 500°C به مدت دو ساعت انجام شد. سپس زیرلایه‌های دانه‌گذاری شده در محلول رشد حاوی استات‌روی و هگزامتیلن‌تتراآمین به نسبت ۱:۱ در دمای 80°C به مدت 2 ساعت قرار گرفتند [۱۳-۱۵]. پس از فرایند رشد، نمونه‌ها از محلول خارج شدند و با آب یون‌زدایی شده شستشو داده شدند. سپس فرایند پخت مشابه مرحله دانه‌گذاری، در آون در دمای 100°C به مدت 1 ساعت و در کوره در دمای 500°C به مدت دو ساعت انجام شد.

برای بررسی اثر مساحت و محیط الکترودها بر عملکرد آشکارساز، الگوهای شانهای با تغییر تعداد انگشت‌ها و فاصله بین الکترودها به طوریکه در جدول ۱ ارائه شده‌اند، طراحی شدند. سپس با استفاده از باریکه‌ی لیزر بر روی ورقه‌های فلزی حکاکی شده و به عنوان ماسک برای لایه‌نشانی الکترودهای طلا مورد استفاده قرار گرفتند.

ریخت‌شناسی و ساختار بلوری نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM; VEGA³ TESCAN) و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD; Panalytical X'Pert Pro MPD, $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) مطالعه شدند. طیف فوتولومینسانس (PL) برای مطالعه خواص اپتیکی در دمای اتاق با طول موج تحریک 325 nm با استفاده از طیف‌سنج Cary Eclipse-Fluorescence اندازه‌گیری شد. عناصر تشکیل‌دهنده و غلظت‌شان با استفاده از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) تعیین شدند. برای اندازه‌گیری پاسخ الکترونیکی، لایه نازک طلا با ضخامت 80 nm با استفاده از ماسک‌های ساخته شده بر روی نمونه‌ها به روش رسوب بخار فیزیکی رسوب داده شد. برای قرارگیری نمونه در مدار اندازه‌گیری، سیم‌های مسی با چسب نقره به الکترودها متصل شدند و به مدت 24 ساعت در خشکانه قرار گرفتند تا خشک شوند و اتصالات‌های مهمی شکل گیرد. شکل ۱ تصویری از آشکارسازهای ساخته شده به همراه اتصالات را نمایش می‌دهد. پاسخ آشکارساز با اعمال ولتاژ بایاس 2 V به الکترودها و اندازه‌گیری جریان الکتریکی با استفاده از مولتی‌متر Sanwa متصل به رایانه در تاریکی و تحت تابش UV (شدت $480 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ و طول موج ارجح ~ 365 nm) انجام گرفت [۷، ۱۳].



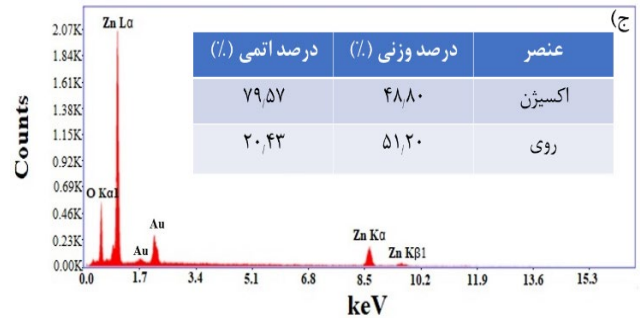
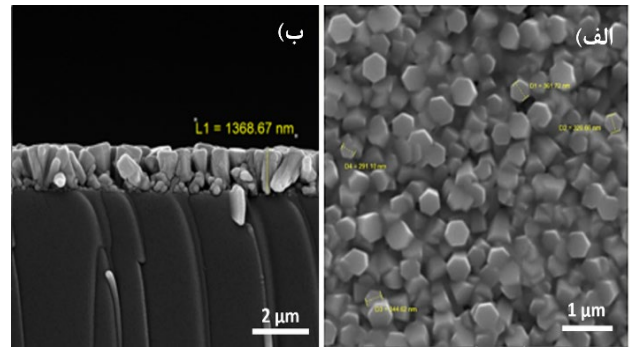


شکل ۴. طیف فوتولومینسانس نانومپله‌های ZnO با طول‌موج تحریک ۳۲۵ nm.

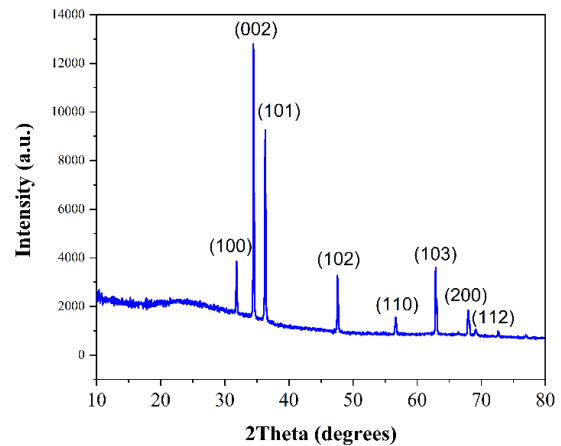
برای اندازه‌گیری عملکرد آشکارسازی تابش UV، منحنی‌های جریان-ولتاژ (I-V) افزاره‌های ساخته شده در تاریکی و تحت تابش UV مطابق شکل ۵ ثبت شدند. خطی بودن مشخصه I-V در مورد افزاره‌های ۶-۱۱ نشان‌دهنده یک رفتار مقاومتی خالص در بازه‌ی اندازه‌گیری است. برای افزاره‌های ۲-۶ یک انحراف از رفتار خطی دیده می‌شود که از سدهای شاتکی بین الکتروود طلا و اکسید روی ناشی می‌شود. در این افزاره‌ها که الکتروودهایشان از تعداد انگشت‌های کمتری برخوردارند، سدهای شاتکی نقش محسوس‌تری در یکسوسازی جریان دارند. در یک بایاس معین، جریان تاریک با کاهش فاصله بین انگشت‌های الکتروود و افزایش تعداد انگشت‌ها افزایش می‌یابد که برای هر جزء مقاومتی مورد انتظار است [۱۸]. پاسخ‌دهی به عنوان شاخص کلیدی آشکارساز محاسبه شد که عبارت است از:

$$R = I_{ph} / PA \quad (1)$$

I_{ph} جریان نوری، P شدت تابش و A مساحت مؤثر بین الکتروودهای شانه‌ای است. نتایج برای الکتروودها با هندسه‌های مختلف در شکل ۶ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح الف) رویی، ب) جانبی نانومپله‌های ZnO، ج) آنالیز EDAX.



شکل ۳. طیف پراش پرتو ایکس (XRD) از نانومپله‌های ZnO.

از آنجا که نقایص ماده نقش مهمی را در سازوکار آشکارسازی ایفا می‌کنند، طیف نورتایی برای تعیین حضور نقایص اندازه‌گیری شد. مطابق شکل ۴ قله‌های محدوده‌ی UV قرار گرفته در ۳۶۲ nm و ۳۸۹ nm ناشی از بازترکیب اکسایتون‌ها در محدوده‌ی گاف نواری ZnO می‌باشند. قله گسیل آبی در ۴۴۰ nm و گسیل پهن در ناحیه‌ی سبز تا قرمز به ترتیب به بازترکیب حفره‌های تولید شده‌ی نوری با الکترون‌ها در Zn بین شبکه‌ای و تهی‌جای اکسیژن نسبت داده می‌شوند [۱۷].

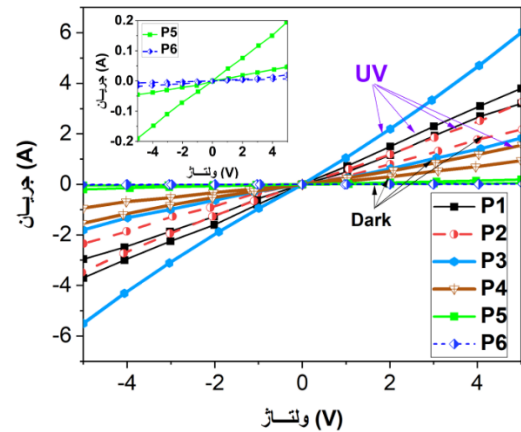
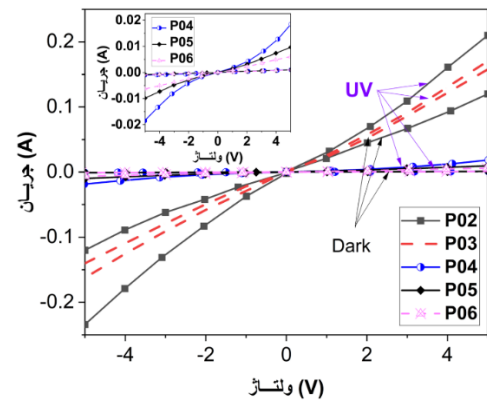


منحنی جریان برحسب زمان برای آشکارسازی که بالاترین پاسخ را داراست در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ آشکارساز و بازگشت آن به حالت اولیه رفتاری نمایی دارد. این رفتار تأییدی بر حاکمیت سازوکار جذب و واجذب گونه‌های اکسیژن از سطح می‌باشد. در این سازوکار بر روی سطح ZnO مولکول‌های اکسیژن با به دام‌اندازی الکترون‌ها جذب می‌شوند ($O_2 + e \rightarrow O_2^-$) و در نتیجه انحناى نواری به وجود می‌آید. با تابش UV که انرژی فوتون بزرگتر از گاف نواری ZnO حفره‌های تولید شده‌ی نوری می‌توانند یون‌های اکسیژن جذب شده را واجذب و الکترون‌های به دام افتاده را به نوار هدایت ZnO برگردانند و غلظت حامل‌های آزاد را افزایش دهند $[h^+ + O_2^- \rightarrow O_2]$.

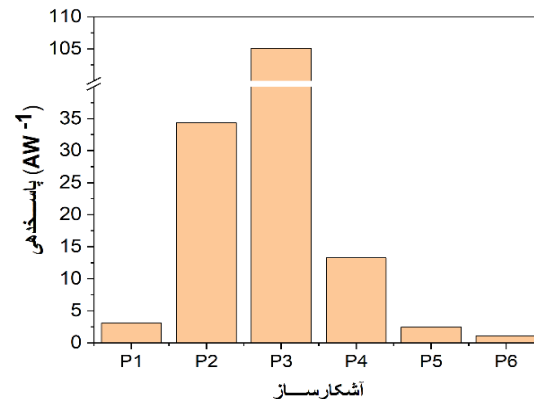
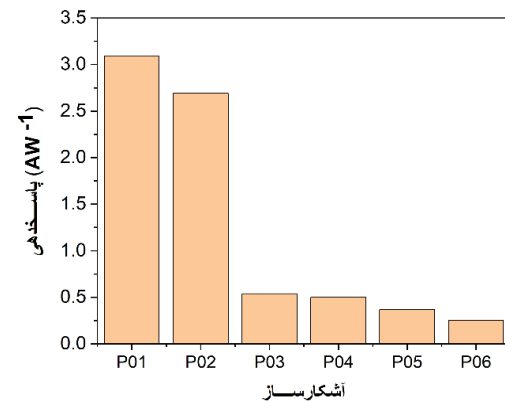
حال اگر زوج‌های الکترون-حفره تولید شده‌ی نوری قبل از جمع شدن توسط الکترودها بازترکیب نکنند در واجذب یون‌های اکسیژن و تولید جریان نوری مشارکت می‌کنند. با توجه به طول پخش نوعی حامل در ZnO که برابر ۳۰ nm است [۱۹]، اگرچه نواحی مرکزی بین الکترودها بخش عمده‌ای از مساحت تحت تابش قرار گرفته را شکل می‌دهند لیکن زوج‌های تولید شده نوری که در حد فاصل طول پویا از الکترودها قرار می‌گیرند در تولید جریان نوری نقش اصلی را ایفا می‌کنند. بنابراین همان‌طور که نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند با افزایش فاصله‌ی الکترودها جریان‌های تاریک و نوری کاهش می‌یابند که مجموعاً کاهش حساسیت را سبب می‌شوند. از طرفی پاسخ‌دهی روند نزولی دارد زیرا طبق رابطه‌ی (۱)، با جریان نوری نسبت مستقیم و با مساحت مؤثر جذب نور نسبت عکس دارد. این نتایج در توافق با سایر گزارش‌ها می‌باشند. می‌دانیم که مقاومت یک عنصر به ماده تشکیل‌دهنده و شکل آن بستگی دارد و برای حالت ساده‌ی یک مقاومت استوانه‌ای به طول L و سطح مقطع A از رابطه‌ی:

$$R = \rho L / A \quad (2)$$

به دست می‌آید. بنابراین با افزایش فاصله‌ی بین الکترودها، درحالی‌که محیط و تعداد انگشت‌ها ثابت است مقاومت افزایش و در نتیجه جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۵. مشخصه جریان-ولتاژ آشکارسازهای مختلف در تاریکی و تحت تابش فرابنفش.



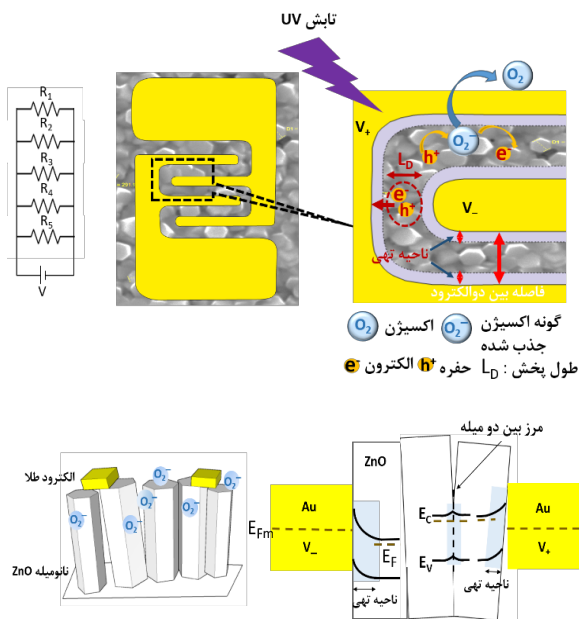
شکل ۶. پاسخ‌دهی آشکارسازهای تابش فرابنفش مختلف (ولتاژ بایاس اعمالی ۲ V).



جدول ۲. پاسخ‌دهی آشکارسازهای ساخته شده برحسب هندسه‌ی

الکترودها‌پشان

پاسخ‌دهی (A/W)	محیط = ۱۹,۳۶ mm ^۲		پاسخ‌دهی (A/W)	مساحت = ۱,۵۴ mm ^۲	
	مساحت (mm ^۲)			محیط (mm)	
۳,۰۹	۱,۵۴		۳,۰۹	۱۹,۳۶	
۳۴,۳۴	۲,۳۲		۲,۶۹	۱۲,۹۰	
۱۰۵,۱۲	۳,۰۹		۰,۵۴	۹,۶۸	
۱۳,۲۹	۳,۸۷		۰,۵۰	۷,۷۴	
۲,۴۶	۴,۶۴		۰,۳۷	۶,۴۵	
۱,۱۳	۵,۴۲		۰,۲۵	۵,۵۳	

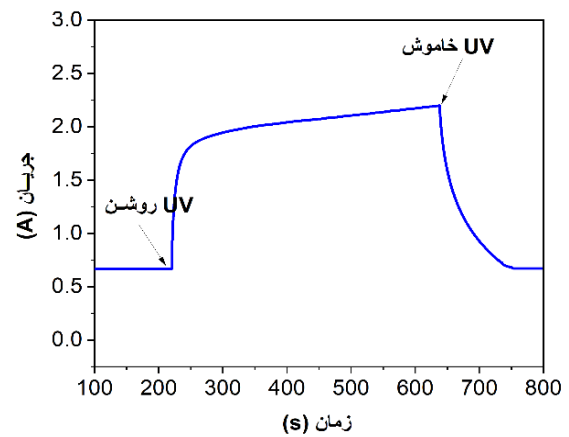


شکل ۸. شماتیک یکی از آشکارسازهای ساخته شده و سازوکار آشکارسازی تابش فرابنفش حاکم.

برای جریان نوری، سدهای شاتکی در اتصالات بین الکترودهای Au و نانومیله‌های ZnO نقش اصلی را ایفا می‌کنند. رفتار غیرخطی مشخصه‌ی I-V نمونه‌ها تحت تابش UV که در شکل ۵ ارائه شده است نشان‌دهنده‌ی حضور این سدها در سازوکار پاسخ نوری است. پهنای نواحی تهی از حامل (W) در محل سدهای شاتکی ایجاد شده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۲]:

$$W = \frac{2\epsilon_0 \epsilon (\psi_0 + V_1)}{qN_d} \exp^{1/2} \quad (4)$$

که ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ، ϵ ثابت دی‌الکتریک نسبی ماده، ψ_0 پتانسیل سد شاتکی، V_1 پتانسیل اعمالی به ناحیه‌ی تهی، q بار الکترون و N_d غلظت اتم‌های دهنده است. وقتی تعداد انگشت‌ها افزایش می‌یابد طول ناحیه‌ی تهی بیشتر می‌شود. ثابت ماندن مساحت و افزایش تعداد انگشت‌ها، کاهش فاصله‌ی بین



شکل ۷. منحنی جریان برحسب زمان آشکارساز P3 با روشن و خاموش شدن تابش UV.

با زیاد شدن تعداد انگشت‌ها (محیط یک وجه) در حالتی که مساحت بین الکترودها ثابت است هم جریان تاریک و هم جریان نوری افزایش می‌یابد در نتیجه رشد پاسخ‌دهی نوری حاصل می‌شود. جدول ۲ نتایج به‌دست آمده برای پاسخ‌دهی برحسب هندسه‌ی الکترودها را ارائه می‌کند.

برای توصیف این رفتار آشکارساز یک مدل ساده در نظر می‌گیریم. می‌توان با تقریب خوبی پیکربندی الکترودهای شانهای درون مرتبط را به زوج‌هایی از انگشت‌ها که یک مدار موازی را شکل می‌دهند تجزیه کرد (شکل ۸). در این حالت از مقاومت اتصالات به دلیل خطی بودن منحنی I-V در تاریکی صرف می‌شود و معکوس مقاومت معادل با جمع عکس هر یک از مقاومت‌ها تقریب زده می‌شود [۲۰]:

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N \quad (3)$$

با افزایش تعداد انگشت‌ها مقاومت کل کاهش می‌یابد که منجر به رشد جریان تاریک خواهد شد. جریان تاریک آشکارساز P3 با اعمال ولتاژ ۲ V مقدار ۰,۶۴ A حاصل شده که از مقادیر جریان تاریک گزارش شده برای نانوساختارهای ZnO در سایر مقالات بزرگ‌تر است [۳، ۱۰، ۲۱، ۲۲]. با توجه به این‌که اندازه‌گیری جریان در مقیاس‌های کم (از مرتبه nA) نیازمند وسایل اندازه‌گیری دقیق و یا طراحی مدارهای تقویت‌کننده می‌باشد [۵]، بزرگ بودن جریان تا حدی که از سیگنال قابل تشخیص باشد یک مزیت برای کاربردهای عملی محسوب شود.



مراجع

1. Sang L, Liao M, Sumiya M. A comprehensive review of semiconductor ultraviolet photodetectors: from thin film to one-dimensional nanostructures. *Sensors*. 2013;13:10482-10518.
2. Liu K, Sakurai M, Aono M. ZnO-based ultraviolet photodetectors. *Sensors*. 2010;10:8604-8634.
3. Zhang W, Jiang D, Guo Z, Yang X, Hu N, Duan Y, Gao Sh, Liang Q, Zheng T, Lv J. Controlling responsivity depends on change of interdigital electrodes in planar MgZnO UV photodetectors. *Superlattices Microstruct*. 2018;115:177-182.
4. Cao Y, Cai K, Hu P, Zhao L, Yan T, Luo W, Zhang X, Wu X, Wang K, Zheng H. Strong enhancement of photoresponsivity with shrinking the electrodes spacing in few layer GaSe photodetectors. *Sci. Rep*. 2015;5:1-7.
5. 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. *Appl. Surf. Sci*. 2019;483:1110-1117.
6. 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*. 2014;5:4007.
7. Boruah B.D. Zinc oxide ultraviolet photodetectors: rapid progress from conventional to self-powered photodetectors. *Nanoscale Adv*. 2019;1:2059-2085.
8. Hu J, Chen J, Ma T, Li Z. Research advances in ZnO nanomaterials-based UV photodetectors: A Review. *Nanotechnology*. 2023;34:232002.
9. Babamoradi M, Sadeghi H, Azimirad R, Safa S. Enhancing photoresponsivity of ultraviolet photodetectors based on ZnO/ZnO: Eu (x= 0, 0.2, 1, 5 and 20 at.%) core/shell nanorods. *Optik*. 2018;167:88-94.
10. Huang J, Yang L, He S. High-performance low-voltage transparent metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on ultrathin gold asymmetric interdigitated electrodes. *Micromachines*. 2023;14:1447.
11. Pallavolu M.R, Maddaka R, Viswanath S.K, Banerjee A.N, Kim M.D, Joo S.W. High-responsivity self-powered UV photodetector performance of pristine and V-doped ZnO nano-flowers. *Opt. Laser Technol*. 2023;157:108776.
12. Gu X, Zhang M, Meng F, Zhang X, Chen Y, Ruan S. Influences of different interdigital spacing on the performance of UV photodetectors based on ZnO nanofibers. *Appl. Surf. Sci*. 2014;307:20-23.
13. Shasti M, Dariani R. Study of growth time and post annealing effect on the performance of ZnO nanorods ultraviolet photodetector. *J. Appl. Phys*. 2017;121:064503.
14. Akgun M.C, Kalay Y.E, Unalan H.E. Hydrothermal zinc oxide nanowire growth using zinc acetate dihydrate salt. *J. Mater. Res*. 2012;27:1445-1451.

الکترودها را در پی خواهد داشت. همچنین مقاومت معادل ماده‌ی بین الکترودها طبق رابطه‌های (۲) و (۳) کاهش می‌یابد. در نتیجه سهم بیشتری از پتانسیل کل V به ناحیه‌ی تهی اعمال می‌شود (V_1 بزرگتر می‌شود) که با توجه به رابطه‌ی (۴) پهنای ناحیه‌ی تهی افزایش می‌یابد. بنابراین بخش بزرگتری از مساحت تحت تابش که در اینجا برای همه‌ی الکترودها یکسان است، توسط ناحیه‌ی تهی پوشش داده می‌شود. میدان الکتریکی ناحیه‌ی تهی به جدایش زوج‌های تولید شده‌ی نوری کمک کرده و منجر به افت نرخ بازترکیب و افزایش جریان نوری می‌گردد [۵]. از سوی دیگر الکترون‌های نوار d طلا با تابش UV می‌توانند برانگیخته شوند و به سمت ZnO شارش یابند و سبب افزایش غلظت الکترون‌ها شوند [۲۳]. بنابراین افزایش فصل مشترک طلا و ZnO رشد جریان نوری را به همراه خواهد داشت. شکل ۸، اثر الکترودها بر پاسخ آشکارساز را به طور شماتیک توصیف می‌نماید.

۴. نتیجه‌گیری

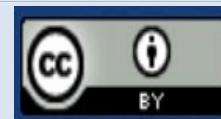
در این پژوهش، اثر هندسه‌ی الکترودها بر عملکرد آشکارسازی تابش فرابنفش نانومیله‌های اکسیدروی به طور سیستماتیک بررسی شد. برای این منظور الکترودهای شانه‌ای درون مرتبط از جنس طلا با مساحت و محیط متفاوت بر روی نمونه‌ها ایجاد شدند. نتایج نشان داد که پاسخ‌دهی به عنوان یک پارامتر مهم آشکارساز با کاهش محیط الکترودها در حالی که مساحت ثابت است، روند نزولی دارد. با ثابت نگه داشتن محیط الکترودها در مقدار بیشینه، برای مساحتی مربوط به فاصله گاف $160 \mu\text{m}$ بیشترین مقدار پاسخ‌دهی برابر با $1.05 \times 10^5 \text{ AW}^{-1}$ به دست می‌آید. در این حالت گاف کوچکتر جریان تاریک کمتری دارد اما مساحت تحت تابش کمتری نیز خواهد داشت. با توجه به ساختار لایه حسگری که متشکل از سدهایی است که به سبب شکل‌گیری گونه‌های اکسیژن در مرز بین نانومیله‌ها شکل می‌گیرند و در پاسخ به تابش و جدایش مؤثر زوج‌های الکترون-حفره نقش دارند، کمترین گاف بیشترین پاسخ‌دهی را نتیجه نخواهد داد. در نتیجه تنها با کنترل هندسه‌ی الکترودها در آشکارساز، افزایش دو مرتبه‌ای در پاسخ‌دهی حاصل شده است. الکترودهای شانه‌ای متداول‌ترین نوع برای ساخت افزارها از جمله آشکارسازها هستند. بنابراین این پژوهش می‌تواند برای طراحی افزاره‌هایی با عملکرد بالا مورد استفاده قرار گیرد.



15. Greene L.E, Law M, Tan D.H, Montano M, Goldberger J, Somorjai G, Yang P. General route to vertical ZnO nanowire arrays using textured ZnO seeds. *Nano lett.* 2005;5:1231-1236.
16. Yang C, Tang L, Li Q, Bai A, Wang Y, Yu Y. Preparation of monodisperse colloidal ZnO nanoparticles and their optical properties. *Nano.* 2015;10:1550074.
17. Damberg D, Viter R, Fedorenko V, Iatsunskyi I, Coy E, Graniel O, Balme S, Miele P, Bechelany M. Photoluminescence study of defects in ZnO-coated polyacrylonitrile nanofibers. *J. Phys. Chem. C.* 2020;124:9434-9441.
18. Ferrer J.C, Alonso J.L, De Ávila S.F. Electrical characterization of photodetectors based on Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diy) layers. *Sensors.* 2014;14:4484-4494.
19. Brillson L.J. *Semiconductors and Semimetals.* 1th ed. (Elsevier, Amsterdam). 2013;105-157.
20. Ewen N.S.D, Gundersen E. *Appl. Phys.* 11th ed. (Pearson, U.S.) 2016).
21. Chen M, Hu L, Xu J, Liao M, Wu L, Fang X. ZnO hollow-sphere nanofilm-based high-performance and low-cost photodetector. *Small.* 2011;7:2453-2449.
22. Weng W, Chang S, Hsu C, Hsueh T, Chang S. A lateral ZnO nanowire photodetector prepared on glass substrate. *J. Electrochem. Soc.* 2009;157:K30.
23. Gogurla N, Sinha A.K, Santra S, Manna S, Ray S.K. Multifunctional Au-ZnO plasmonic nanostructures for enhanced UV photodetector and room temperature NO sensing devices. *Sci. Rep.* 2014;4:6483.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

حسینی، زهرا سادات، مرتضی علی، عبدالله. (۱۴۰۳)، بررسی اثر هندسه‌ی الکترودها بر پاسخ آشکارساز تابش فرابنفش مبتنی بر نانومیل‌های اکسیدروی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹(۳)، ۱۵۶-۱۶۳. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1604>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1604.html

