



اثرات نمک‌های اکسید روی و شرایط مختلف رشد بر نانومیله‌ها و پارامترهای آشکارساز فرابنفش فوتودیودی

محدثه پاسدار، روح‌الله عظیمی‌راد*، فاطمه دهقان نیری

مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

واژگان کلیدی:

پارامترهای مختلفی که می‌توانند بر جریان تاریکی و حساسیت آشکارسازهای فرابنفش فوتودیودی نانومیله‌های اکسید روی اثرگذار باشند در این کار بررسی می‌گردد. ساختار این آشکارساز مبتنی بر پیوندهای ناهمگون نانومیله‌های اکسید روی و سیلیکون نوع p است. اثر تغییر شرایط رشد، نمک‌های اکسید روی و مشخصات سطح بر جریان تاریکی و حساسیت آشکارساز تحلیل گردید. برای مشاهده و بررسی بیشتر از آنالیزهای مختلفی مانند SEM، PL و مشخصه‌های I-V استفاده شد. در این کار نیز افزاره‌ای با کوچک‌ترین قطر، نمونه بهینه از نظر دارا بودن حداقل جریان تاریکی (۱/۱۸۳ میکروآمپر) و حداکثر حساسیت (۴۵/۱۳) تعیین شد. از طرفی نمونه S₃ با بیشترین قطر (۴۰۰ نانومتر) و سطح خاص آن سبب شد تا جریان تاریکی بر خلاف انتظار به شدت کاهش یابد و به مقدار ۲۵/۴۱ میکروآمپر برسد و در نتیجه حساسیت آن به مقدار ۳۸/۰۱ رسید که در بین نمونه‌ها پس از نمونه S₁ بیشینه مقدار حساسیت را داراست. کاهش محسوس جریان تاریکی و افزایش چشمگیر حساسیت آشکارساز تنها با تغییر مورفولوژی ساختار و انتخاب نمک روی مناسب به دست آمد.

آشکارساز فرابنفش

فوتودیود

نانوساختار اکسید روی

شرایط رشد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۰

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2070506.1661

Effects of zinc oxide salts and different growth conditions on nanorods and photodiode ultraviolet detector parameters

Abstract

In this work, various parameters that can affect the dark current and sensitivity of photodiode ultraviolet detectors of ZnO nanorods are investigated. The structure of this detector is based on heterojunctions of zinc oxide nanorods and p-type silicon. The effect of changing growth conditions, zinc oxide salts, and surface characteristics on dark current and detector sensitivity was analyzed. Various analyses such as SEM, PL, and I-V characteristics were used for further observation and investigation. In this work, a device with the smallest diameter was determined as the optimal sample in terms of having the minimum dark current (1.183 \square A) and maximum sensitivity (45.13). On the other hand, the S₃ sample with the largest diameter (400 nanometers) and its specific surface area caused the dark current, contrary to expectations, to decrease significantly to 25.41 \square A, and consequently its sensitivity reached 38.01, which, among the samples, has the highest sensitivity after sample S₁. Only by changing the morphology of the structure and choosing the appropriate zinc salt, a significant reduction in the dark current and a significant increase in the sensitivity of the detector were achieved.

Keywords: Ultraviolet detector, Photodiode, Zinc oxide nanostructure, Growth conditions.

* Corresponding author E-mail: azimirad@mut.ac.ir

۱- مقدمه

رفتار یکسوکنندگی از خود نشان داد و پاسخ آن به نور فرابنفش (۳۶۵ نانومتر) حدود ۰/۰۷ آمپر بر وات بود که این افزاره در حالت نوردی تحت بایاس معکوس ۲۰ ولت قرار داشت. در سالهای بعد، با فرایند پایین به بالا سنسورهای فرابنفش مبتنی بر نانومیله‌های اکسید روی مجتمع ساخته شد [۶]. آشکارسازهای فرابنفش خودتغذیه‌ای ساخته شدند که دارای پایداری بالا در طول زمان و حساسیت زیادی بودند [۷]. انواع دیگری از این نوع آشکارسازها گزارش شده است که محدوده آشکارسازی آنها بین ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر بود [۸].

در این کار، آشکارسازهای فرابنفش فوتودیودی مبتنی بر پیوندهای ناهمگون n-ZnO NRs/p-Si معرفی می‌شوند که نانومیله‌ها با روش رشد (گرماپی) و حلال یکسان بر سطح بستر سیلیکونی ایجاد می‌شوند، در حالی که مشخصات سطح، نوع نمک پیش‌ساز، دمای محلول، مدت زمان رشد و غلظت پیش‌سازها متغیر است. در پژوهش پیش‌رو، به بررسی اثرات پارامترهای بیان شده بر جریان تاریکی و حساسیت افزاره خواهیم پرداخت. در این کار سعی شده است تا با روش آسان و بسیار کم هزینه و مؤثر در رشد مورفولوژی‌های مختلف اکسید روی، به بهبود قابل توجهی در پارامترهای اساسی افزاره دست یابیم.

۲- مواد و روش آزمایش‌ها

برای ساخت آشکارساز فرابنفش در آزمایشگاه، ابتدا بسترهای سیلیکونی نوع p در حلال‌های استون و الکل ایزوپروپیل تمیز شدند. در پایان، پس از غوطه‌وری بسترهای سیلیکونی در آب یون زدایی شده، با گاز نیتروژن خشک شدند.

برای دانه‌دار کردن سطح بستر سیلیکونی، از روش کند و پاش فرکانس رادیویی استفاده گردید. با این روش، لایه بسیار نازک و با کیفیتی از اکسید روی بر سطح بستر لایه‌نشانی شد. انجام این فرایند بستر را برای رشد بهینه نانومیله‌های اکسید روی

کاربرد آشکارسازهای فرابنفش بسیار گسترده است و در حوزه‌های مختلفی مورد توجه و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. فراگیر بودن آن به اندازه‌ای است که نه تنها در پژوهش‌های فضایی و آشکارسازهای راه‌انداز موشک از آنها استفاده می‌شود، بلکه در حوزه‌هایی چون پیش محیط زیست و تصویربرداری بیولوژیکی نیز کاربرد دارد [۱ و ۲]. اکسید روی به دلیل خواص جذاب و منحصر به فرد، از گذشته نیز مورد توجه متخصصان و پژوهشگران قرار داشته است، به خصوص که به دلیل ماهیت ذاتی این ماده و جذب عالی آن در ناحیه فرابنفش، انتخاب مناسبی برای ساخت آشکارسازهای فرابنفش در نظر گرفته می‌شود [۱ و ۳]. همچنین اکسید روی انرژی اتصال اکسایشی نسبتاً بزرگ ۶۰ میلی‌الکترون ولت و گاف انرژی مستقیم و وسیع ۳/۳۷ الکترون‌ولت در دمای اتاق، انتخابی امیدوارکننده برای LEDهای فرابنفش و افزاره‌های لیزر در نظر گرفته می‌شود. اخیراً نانو ساختارهای اکسید روی به علت کاربردهای متعدد و منحصر به فرد آنها در فیزیک و شیمی مروسکوپی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴]. خواص نانو ساختارهای اکسید روی به شدت به اندازه و شکل آنها وابسته است. مورفولوژی‌های نانومقیاس زیادی را می‌توان به صورت‌های گوناگون مانند سیم‌ها، میله‌ها، حلقه‌ها و شانه‌ها رشد داد. نانومیله‌ها و نانوسیم‌های اکسید روی برای ساخت آشکارسازهای نور فرابنفش، ترانزیستورهای اثر میدان شفاف، LEDها و سلول-های خورشیدی استفاده می‌شوند. با رشد نانوسیم‌های اکسید روی بر سطح بستر سیلیکونی می‌توان آشکارسازهای فوتودیودی نور فرابنفش و مرئی با ساختارهای ناهمگون n-ZnO/p-Si ساخت [۴].

بر اساس نتایج آزمایشگاهی گزارش شده برای آشکارساز فرابنفش فوتودیودی مبتنی بر پیوندهای ناهمگون نانومیله‌های اکسید روی و سیلیکون [۵]، مشخصه جریان-ولتاژ افزاره،

نمونه‌ها با یکدیگر، پیش‌سازها و شرایط رشد شش نمونه ساخته شده در جدول ۱ آمده است.

مشخصات ساختاری و ریخت نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, VEGA3, TESCAN)، مشخصه-های نوری توسط مشخصه‌یابی PL و با استفاده از دستگاه Perkin-Elmer LS55 و تحت طول موج تحریک ۳۳۰ nm و مشخصه‌های الکتریکی افزاره‌های ساخته شده تحت تابش لیزر UV، توسط دستگاه 4145B SEMICONDUCTOR PARAMETER ANALYZER, HP حاصل گردید. منبع تحریک فرابنفش استفاده شده در این پژوهش، لیزر UV با توان ۱۳ mW در طول موج ۲۰۰ nm و ۵ mW در طول موج ۳۲۵ nm بود که در فاصله ۵ cm از نمونه و تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به آن قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر SEM مربوط به سطح شش نمونه را نشان می‌دهد. تغییرات متوسط قطر نانومیله‌های نمونه‌ها در بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر است. به منظور تعیین دقیق‌تر قطر نانومیله‌های کوچک‌تر برخی نمونه‌ها، گراف توزیع نانومیله-های سه نمونه در شکل ۲ قابل دسترسی است. مقادیر متوسط قطر نانومیله‌ها و نسبت قطر به طول در هر نمونه از نتایج مندرج در شکل ۱ و ۳ استخراج گردید که در جدول ۲ آمده است. طبق گراف‌های توزیع شکل ۲، بیشینه نانومیله‌های سطح نمونه S₁، بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ نانومتر قطر دارند که مقادیر متوسط قطر آن‌ها در جدول ۲ آمده است. همچنین این بیشینه تعداد نانومیله برای نمونه‌های S₂ بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ نانومتر، و برای نمونه S₅ بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ نانومتر به دست آمده است. سطح نمونه S₁ در شکل ۱، نشان می‌دهد که بخش‌هایی از سطح نمونه عاری از نانومیله هستند و در نواحی دیگر و به طور پراکنده، تجمع نانومیله‌ها دیده می‌شود. نواحی عاری از

آماده نمود. سپس بسترها در محلول شامل پیش‌سازها غوطه-ور شدند و تحت شرایط رشد مندرج در جدول ۱، نانومیله-های اکسید روی بر بستر سیلیکونی دانه‌دار شده رشد نمودند. پس از طی مدت زمان رشد مطابق جدول ۱، بسترها از محلول خارج شده و با آب یون زدایی شده شستشو داده شدند و در مجاورت گاز نیتروژن خشک گردیدند.

جدول ۱. انواع پیش‌سازها و شرایط رشد نانومیله‌ها

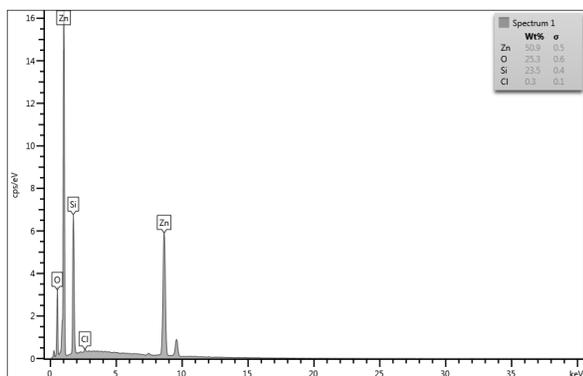
شماره نمونه	نوع پیش‌سازها و نسبت آن‌ها	غلظت پیش-ساز (mM)	زمان رشد (ساعت)	دما (°C)
S ₁	ZnAc/HMT (۱:۱)	۳/۵	۳	۸۰
S ₂	Zn(NO ₃) ₂ /HMT (۱:۱)	۵	۴	۹۵
S ₃	ZnAc/HMT (۱:۱)	۲۰	۴	۹۰
S ₄	Zn(NO ₃) ₂ /HMT (۱:۱)	۲۵	۶	۹۳
S ₅	ZnCl ₂ /HMT (۱:۲)	۳۰	۳	۹۳
S ₆	Zn(NO ₃) ₂ /HMT (۱:۱)	۲۵	۴	۹۵

در این کار، رشد نانومیله‌های اکسید روی به روش گرمایی صورت پذیرفت. به منظور وضوح بیشتر و مقایسه آسان‌تر

جدول ۲. شماره نمونه، قطر و نسبت قطر به طول نانو ساختار

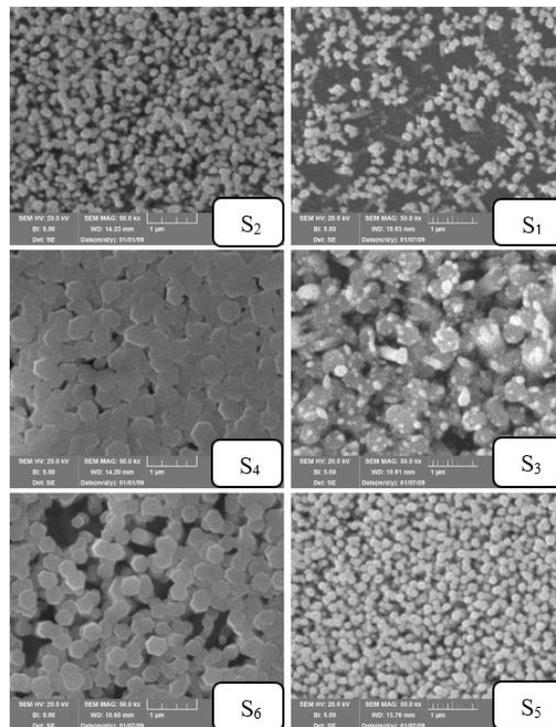
شماره نمونه	قطر نانومیلها (نانومتر)	نسبت قطر به طول
S ₁	۱۰۵	۰/۱۸
S ₂	۱۱۰	۰/۱۱
S ₃	۴۰۰	۰/۵۰
S ₄	۳۷۰	۰/۲۰
S ₅	۱۳۰	۰/۲۱
S ₆	۳۵۰	۰/۱۴

استفاده از نمک کلرید روی می‌تواند جریان تاریکی را افزایش دهد. به دلیل ادغام یون‌های کلر باقیمانده در ساختار، مسیرهای جدیدی ایجاد شده و در نتیجه جریان تاریکی افزایش می‌یابد. از طرفی نمک‌های استات و نیترات روی، چنین اثری نداشته و این آنیون‌ها عناصری را در ساختار باقی نمی‌گذارند. البته ممکن است نیترات روی موجب افزایش نقص‌ها در ساختار گردد. نتایج به دست آمده نیز این شواهد علمی را تأیید می‌کند.



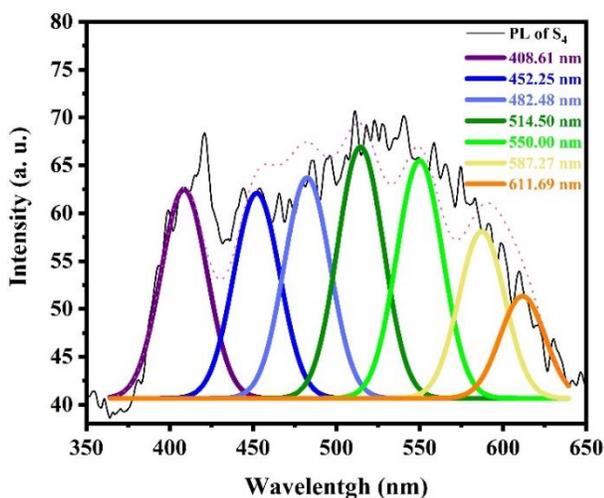
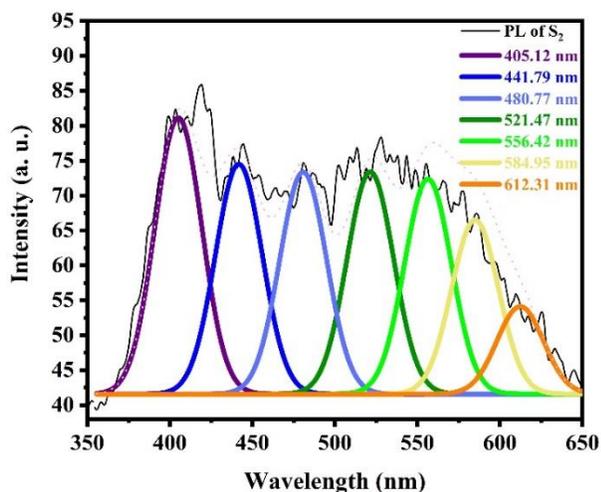
شکل ۲. آنالیز EDS برای نمونه S₅ و تأیید وجود اتم‌های کلر در ساختار.

نانومیلها می‌تواند سطح تماس مؤثر اکسید روی و سیلیکون را تغییر دهد و در نتیجه جریان عبوری از سطح کاهش خواهد یافت.



شکل ۱. تصاویر SEM مربوط به سطح شش نمونه S₁, S₂, S₃, S₄, S₅ و S₆.

همچنین سطح خاص یکی دیگر از نمونه‌ها، ویژگی جالبی از خود نشان داده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است. سطح نمونه S₃ دارای نانومیل‌های کوچکی است که بر سطح نانومیل‌های اصلی رشد نموده‌اند. اندازه این قطرها در محدوده‌ای بین ۵۰ تا ۱۸۰ نانومتر است. تشکیل نانومیل‌های ثانویه بر روی نانومیل‌های اصلی اکسید روی می‌تواند ویژگی‌های الکتریکی و فوتوالکتریکی ساختار را تغییر دهد. به دلیل افزایش سطح تماس بین نانومیل‌ها، سدهای انرژی جدیدی تشکیل می‌شود و همچنین می‌تواند تله‌های سطحی اضافی ایجاد کند و در نتیجه موانع پتانسیل را تغییر می‌دهند.



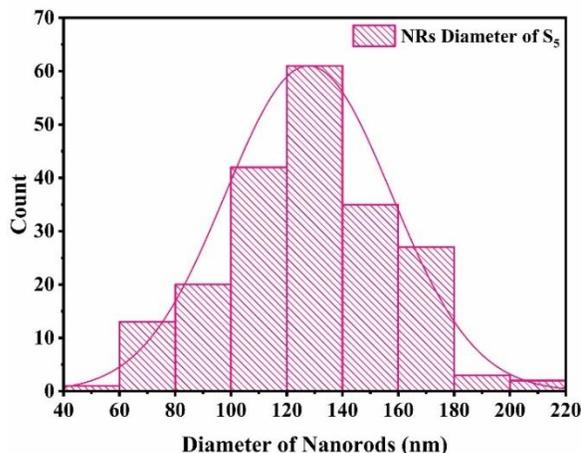
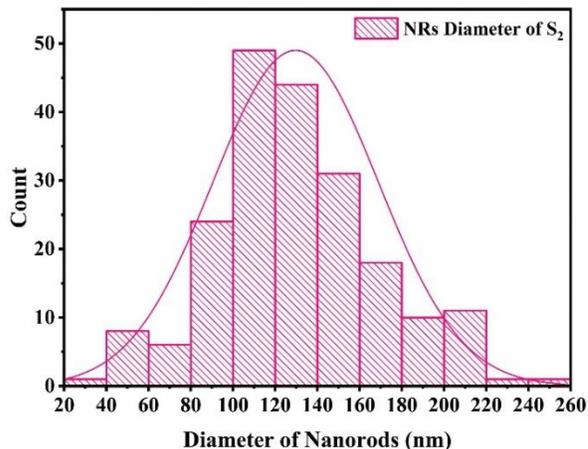
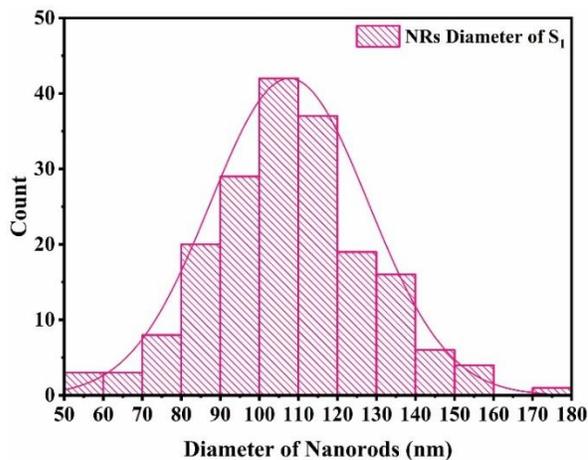
شکل ۴. مشخصه PL و برازش طیف مربوط به نمونه S₂ و S₄.

نتایج حاصل از طیف‌سنجی PL مربوط به این دو نمونه، خواص نورتایی نانومیله‌های اکسید روی را نمایان می‌سازد. در منحنی این نمونه، قله‌هایی با شدت‌های مختلف برازش شد و قله در ناحیه UV به دلیل فرایند بازترکیب اکسایتونی ایجاد می‌شود و در ناحیه مرئی نیز باند وسیعی که ناشی از نقص‌های موجود در نانوساختارهای اکسید روی هستند مشاهده گردید.

پس از برازش طیف، قله گسیل بنفش در ناحیه UV برای نمونه S₂ و S₄ مشخص شده است که طول موج ۴۰۵ نانومتر و ۴۰۸ نانومتر را نشان می‌دهد.

گسیل بنفش نانومیله‌های اکسید روی در طول موج های UV به دلیل بازترکیب اکسایتونی رخ می‌دهد [۹ و ۴] و این ویژگی ذاتی

شکل ۲، آنالیز EDS برای نمونه S₅ است که با نمک کلرید روی رشد داده شد و طبق نتیجه وجود اتم‌های کلر در ساختار تأیید گردید. شکل ۴ مشخصه PL دو نمونه S₂ و S₄ را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. گراف‌های توزیع نانومیله‌ها مربوط به سطح نمونه S₁، S₂ و S₅.

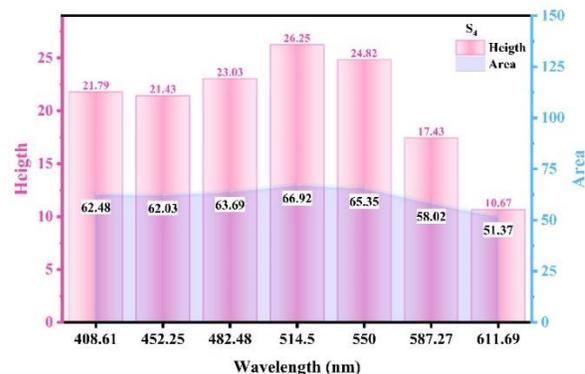
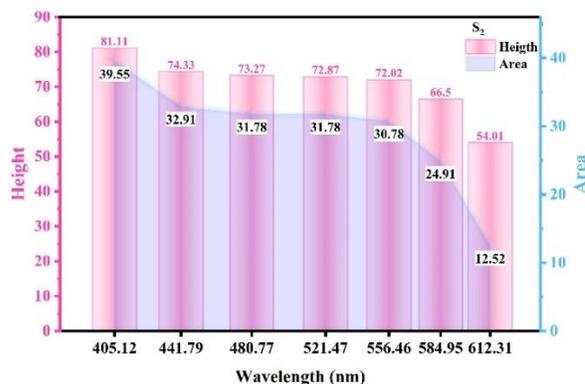
قله چهارم و پنجم نیز با رنگ سبز مشخص شده است که این قله‌ها برای هر دو نمونه، نشان دهنده گسیل سبز است و اغلب تغییرات آن می‌تواند در بازه‌ای بین ۵۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر دیده شود. منشا این گسیل به نقص‌هایی مانند تهی‌جای اکسیژن یونیزه و یا تهی‌جای اکسیژن و اتم‌های بینابینی روی وابسته است [۱۶و۱۴و۱۵].

ششمین و هفتمین قله برازش شده با رنگ نارنجی مربوط به گسیل زرد-نارنجی است که به طور معمول در محدوده ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود و اغلب مربوط به سایت‌های بینابینی اکسیژن است [۱۳]. البته در گزارشی [۱۷] گسیل نارنجی با مرکزیت حدود ۵۸۰ نانومتر نیز گزارش شده است.

در شکل ۵، ارتفاع قله‌های برازش شده در طیف PL مربوط به دو نمونه S₂ و S₄ و همچنین مساحت قله‌ها مشاهده می‌گردد. نمودارها نشان می‌دهند که در نمونه S₂، شدت گسیل در قله ابتدایی (بنفش) بسیار بیشتر از سایر قله‌های برازش شده در این نمونه و نمونه S₄ است که این امر گویای افزایش بازترکیب اکسایتونی و نقص‌های مرتبط با ایجاد گسیل بنفش است. از جمله این نقص‌ها می‌توان به نقایص بینابینی روی اشاره کرد که گسیل بنفش در این طول موج می‌تواند ناشی از گذار بین ترازهای تله مرتبط با نقایص بینابینی روی و باند ظرفیت اکسید روی باشد. با بررسی شدت سایر قله‌ها در گسیل‌های دیگر هر دو نمونه، مشاهده می‌گردد که در مجموع، شدت گسیل‌های مختلف در نمونه S₂ بیش از نمونه S₄ و حدوداً ۴ برابر است که نشان‌دهنده افزایش نقص‌های مرتبط با هر گسیل در این نمونه است که قبلاً به تفصیل بیان گردید.

مشخصه‌های I-V نمونه‌ها در حالت تاریکی و نوردهی اندازه‌گیری شد که نتایج جالبی حاصل گردید و در ادامه به بررسی بیشتر این نتایج و ارتباط آن با پیش‌سازها، شرایط رشد و خصوصیات سطح نمونه‌ها پرداخته می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، طبق شکل ۱، تراکم نانومپله‌ها در سطح نمونه

و بارز اکسید روی و نانوساختارهای آن است که این ماده را برای کاربردهای آشکارسازی طیف UV جذاب و کاربردی نموده است. همچنین این قله می‌تواند به اتم‌های بینابینی روی نیز مرتبط باشد [۱۰ و ۱۱].



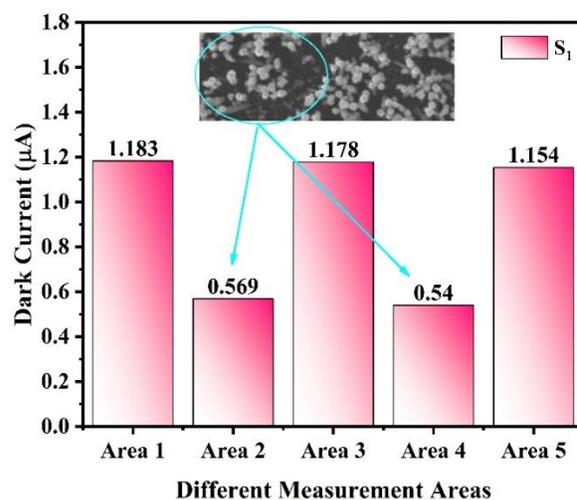
شکل ۵. ارتفاع قله‌های برازش شده و مساحت آن‌ها برای نمونه S₂ و S₄.

قله دوم و سوم در نمونه S₂ و نمونه S₄ که با رنگ آبی مشاهده می‌شود، گسیل آبی را در طیف مربوطه برای هر دو نمونه نشان می‌دهد و می‌تواند ناشی از بازترکیب بین ترازهای تله مربوط به نقایص بینابینی روی با تهی‌جای اکسیژن ایجاد شود و یا می‌تواند ناشی از گذار بین باند هدایت و آنتی-سایت‌های اکسیژن باشد [۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴]. قله سوم در طیف برازش شده برای نمونه‌ها نیز مرتبط با گسیل آبی است با این تفاوت که این گسیل ناشی از گذار بین اتم‌های بینابینی روی یونیزه و باند ظرفیت اکسید روی است [۱۵].

در شکل ۷ تغییرات قطر و جریان تاریکی نمونه‌ها رسم شده است. کار قبلی ما [۱۸] مشخص کرد در صورتی که تمام شرایط رشد، روش رشد و پیش‌سازها یکسان باشند، می‌توان تنها با تغییر غلظت پیش‌ساز، ابعاد نانومیله‌ها را کنترل نمود و جریان تاریکی نمونه‌هایی با کمترین قطر، حداقل خواهد بود. در بین این شش نمونه نیز S_1 ، S_2 و S_5 با متوسط قطر حدود ۱۰۵ تا ۱۳۰ نانومتر، کمترین قطر را دارا هستند و طبق نتایج کار قبلی ما باید حداقل جریان تاریکی را داشته باشند. تغییرات جریان تاریکی در دو نمونه S_1 و S_2 با قطر مشابه بسیار کم است. با توجه به سطح خاص S_1 و نواحی عاری از نانومیله‌ها، مقاومت کل افزاره افزایش یافته و در نتیجه جریان تاریکی آن اندکی کمتر شده است. اثرگذاری غالب نیز اثر سطح بوده است (طبق شکل ۱، فراوانی نانومیله‌های موجود روی سطح در محدوده‌های مشخص خیلی کمتر از فراوانی آن‌ها برای S_2 و S_5 است). به دلیل سطح خاص S_1 ، از مقایسه آن با نمونه S_2 و S_5 اجتناب می‌شود چراکه علیرغم تشابه و نزدیکی متوسط قطر نانومیله‌های آن با نمونه دوم و پنجم، تراکم سطح آن با سطح این دو نمونه بسیار متفاوت است. نمودارهای توزیع قطر نانومیله‌های دو نمونه S_2 و S_5 ، نزدیکی متوسط قطر نانومیله‌های آن‌ها را به وضوح نشان می‌دهد و شکل ۱ نیز تراکم مشابه سطح دو نمونه را آشکار می‌کند. با این حال، جریان تاریکی نمونه S_2 بسیار کمتر از جریان تاریکی نمونه S_5 است. لذا اثر سطح و قطر نانومیله‌ها نمی‌توانند تعیین‌کننده این اختلاف زیاد در جریان تاریکی دو نمونه باشند، بلکه اثرات نمک‌های پیش‌ساز می‌تواند عامل این تغییرات باشد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

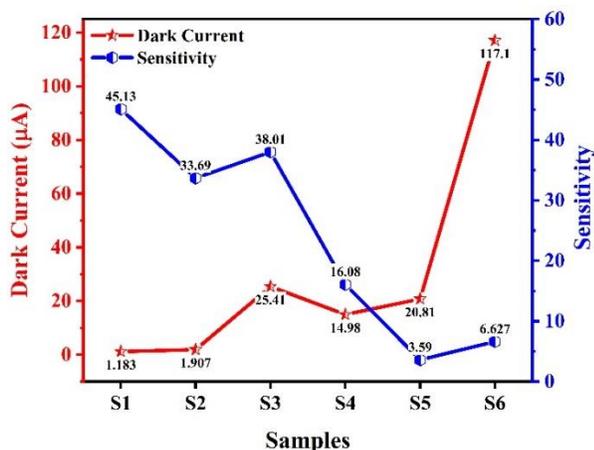
در کار فعلی، از روش رشد و حلال یکسان برای رشد نانومیله‌های همه نمونه‌ها استفاده گردید، در حالی که نمک‌های مختلف اکسید روی به کار رفته است. هدف ما بررسی اثر کوچک شدن قطر بر جریان تاریکی و حساسیت آشکارساز فرابنفش در حالت کلی‌تر بود و اینکه نمک‌های

S_1 یکنواخت نبوده و نواحی تهی از نانومیله‌ها به وضوح قابل رؤیت است.



شکل ۶. اثر کلاسترها و نواحی عاری از نانومیله‌ها در سطح نمونه S_1 .

مطابق این نمودارها، در نمونه S_1 فضاهای عاری از نانومیله در سطح، کاملاً مشهود است که این مسأله به لحاظ الکتریکی هم اثبات گردید. در نمودار شکل ۶، نتایج حاصل از اندازه‌گیری جریان تاریکی پس از ۵ بار تکرار برای نمونه S_1 مشاهده می‌گردد. در هر بار اندازه‌گیری محل پروب بر روی سطح نمونه جابه‌جا شد تا اثر تراکم کم نانومیله‌ها و حالت کلاستری آن‌ها در سایر نواحی سطح بیشتر نمایان گردد. نتایج حاصل گویای این واقعیت است که در حالت‌هایی که تعداد نانومیله‌ها در واحد سطح کاهش داشته و یا نوک پروب در نواحی از سطح قرار گرفته است که تراکم نانومیله‌ها کم بوده است، مقدار جریان اندازه‌گیری شده نیز کاهش چشمگیری داشته و تقریباً نصف شده است. این پدیده در حالت نوردهی همان ناحیه‌ای که در هر مرحله، جریان تاریکی آن اندازه‌گیری شده بود نیز مشاهده گردید. علت کاهش جریان تاریکی و توضیحات مبسوط درباره این پدیده در کار قبلی ما [۱۸] بیان شده است.



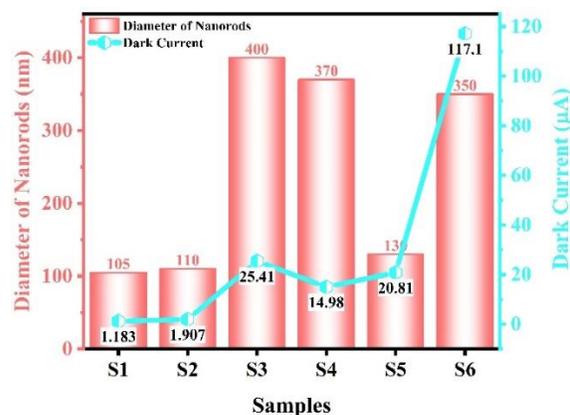
شکل ۸. تغییرات جریان تاریکی و حساسیت نمونه‌ها.

حال به بررسی اثر مدت زمان رشد بر پارامترهای آشکارساز فرابنفش فوتودیودی می‌پردازیم. در شکل ۷ مشاهده می‌گردد که قطرهای دو نمونه S4 و S6 بسیار به هم نزدیک هستند (۳۷۰ و ۳۵۰ نانومتر)، ولی جریان تاریکی و حساسیت آن‌ها اختلاف زیادی دارند. این دو نمونه با یک نوع نمک پیش‌ساز یعنی نیترات روی، غلظت یکسان پیش‌سازها و دمای محلول تقریباً مشابه (۹۳ و ۹۵ درجه سانتیگراد) رشد نمودند. تنها تفاوت در مدت زمان رشد نانومیله‌ها

بود که برای دو نمونه S4 و S6 به ترتیب برابر ۶ و ۴ ساعت در نظر گرفته شد. تحت شرایط ذکر شده برای این دو نمونه، افزایش ۲ ساعته مدت زمان رشد توانسته است جریان تاریکی را از ۱۱۷/۱ (S6) میکروآمپر به مقدار ۱۴/۹۸ (S4) میکروآمپر کاهش دهد که بسیار جالب توجه است. از طرفی حساسیت نمونه S4 نسبت به نمونه S6 تقریباً ۲/۵ برابر شده است. به نظر می‌رسد که این افزایش زمان رشد موجب بهبود بلورینگی در نانو ساختار نمونه S4 شده است [۱۹] چرا که حساسیت نیز بهبود یافته است. در شکل ۹، طیف XRD مربوط به نمونه S6 نشان داده شده است که در قله (۰۰۲) بیشترین شدت را دارد و نشان دهنده رشد نانومیله‌های اکسید روی است. از طرفی ممکن است نانومیله‌ها به خوبی تخلیه نشوند و در نتیجه جریان تاریکی افزایش یابد.

گوناگون اکسید روی نیز می‌توانند روی این پارامترها اثرگذار باشند یا خیر. برای پاسخ به این سوال مجدداً به شکل ۷ رجوع نموده و دو نمونه S2 و S5 با متوسط قطرهایی تقریباً یکسان و حدود ۱۱۰ و ۱۳۰ نانومتر و تراکم سطح تقریباً مشابه انتخاب می‌گردند. مدت زمان رشد (۴ و ۳ ساعت) و دمای رشد (۹۳ و ۹۵ درجه سانتیگراد) نیز تقریباً مشابه هستند، ولی برای رشد نانومیله‌های نمونه S2 از نیترات روی و برای نمونه S5 از کلرید روی استفاده گردید.

تغییر نمک پیش‌ساز سبب شده تا جریان تاریکی S5 نزدیک به یازده برابر بزرگتر از جریان تاریکی S2 شود. همچنین مطابق شکل ۸، مقادیر حساسیت نیز تفاوت زیادی داشت و حساسیت نمونه S2 حدوداً ۹/۵ برابر حساسیت نمونه S5 به دست آمد که نشان می‌دهد نانومیله نمونه‌هایی که با نیترات روی رشد نمودند، پارامترهای آشکارساز را بهبود داده‌اند.



شکل ۷. تغییرات جریان تاریکی و قطر شش نمونه.

ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که حساسیت طبق رابطه زیر تعریف شده است: حساسیت برابر است با نسبت جریان افزاره در حالت نوردهی با لیزر UV، به جریان افزاره در حالت عدم نوردهی (جریان تاریکی).

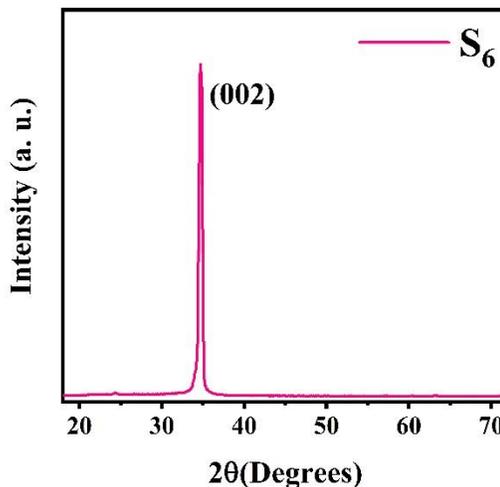
کاهش جریان تاریکی می‌تواند منجر به افزایش حساسیت گردد که منحنی‌های شکل ۸، این امر را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثرات نمک‌های پیش‌ساز، تغییرات اعمالی تحت شرایط رشد گوناگون و مشخصه‌های سطح افزاره بر پارامترهای اصلی آشکارسازهای فرابنفش فوتودیودی بررسی گردید. با در نظر گرفتن تفاوت‌ها و بررسی جریان تاریکی و حساسیت افزاره‌ها، مشخص شد که آن‌ها نسبت به هر تغییر در مدت زمان رشد، نمک‌های پیش‌ساز روی و تغییرات سطح (نمونه S_1 و S_3 به دلیل سطح منحصر به فرد، کاهش جریان تاریکی به پایین‌ترین مقادیر و حساسیت به بالاترین مقدار نسبت به سایر نمونه‌ها)، واکنش نشان داده و در حالاتی اختلاف بین پارامترهای آشکارساز فرابنفش بسیار زیاد و چشمگیر است. در بین نمک‌های روی، کلرید روی به دلیل باقی گذاشتن و ادغام اتم‌های کلر در ساختار، جریان تاریکی را افزایش داده است. نمونه S_1 با کوچکترین قطر نانومیله اکسید روی، دارای کمترین جریان تاریکی و بیشترین حساسیت بود که در بین این نمونه‌ها و نمونه‌های کار قبلی ما، نمونه بهینه محسوب می‌شود. تغییرات در سطح مؤثر عامل این بهبود است.

مراجع

- [1] Zahedi, F., Dariani, R.S. and Rozati, S.M., 2013. Ultraviolet photoresponse properties of ZnO: N/p-Si and ZnO/p-Si heterojunctions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 199, pp.123-128.
- [2] Ozel, Kenan. "Strain-induced photoresponsivity in gallium-doped ZnO thin film based UV photodetectors." *Sensors and Actuators A: Physical* 366 (2024): 114953.



شکل ۹. طیف XRD مربوط به نمونه S6.

در شرایط رشد، روش رشد و نمک پیش‌ساز یکسان، افزایش مدت زمان رشد موجب بهبود پارامترهای آشکارساز گردیده است. طبق موارد مطرح شده انتظار می‌رفت که نمونه S_3 با بیشترین قطر (۴۰۰ نانومتر)، بیشترین جریان تاریکی را داشته باشد یا لاقط مقداری نزدیک به نمونه S_6 مشاهده گردد. زیرا زمان رشد این دو نمونه ۴ ساعت بود. پس عامل مدت زمان رشد در این شرایط حذف می‌گردد. در نمونه‌های قبلی نشان داده شد که نمک استات روی نسبت به نمک نترات روی ممکن است اثرگذاری بیشتری بر بهبود پارامترهای آشکارساز داشته باشد (نمونه S_1 و S_2) ولی اختلاف آن علی‌الخصوص در مورد جریان تاریکی آن‌ها خیلی کم و در حدود ۰/۷ میکروآمپر بود. پس در نمونه‌ای با بیشترین قطر (۴۰۰ نانومتر) قطعاً باید عامل دیگری اثرگذار باشد. با مراجعه به شکل ۱ و بررسی تصاویر SEM سطح نمونه S_3 ، مشخص گردید که بر سطح میله‌های اصلی و قطور آن، نانومیله‌هایی با ابعاد بسیار کوچک‌تر و با قطرهای مختلفی در همان راستا رشد نموده‌اند. قطر این نانومیله‌ها بین ۵۰ تا ۱۸۰ نانومتر متغیر بود. این عامل به راحتی می‌تواند بر کاهش جریان تاریکی اثر بسزایی داشته باشد. زیرا کاهش قطر نانومیله‌ها در سطح نمونه، مقاومت کل افزاره را زیاد نموده و در نتیجه جریان تاریکی کاهش می‌یابد.

- [12] Wang, D. F., and T. J. Zhang. "Study on the defects of ZnO nanowire." *Solid state communications* 149.43-44 (2009): 1947-1949.
- [13] Djurišić, A.B., Leung, Y.H., Tam, K.H., Ding, L., Ge, W.K., Chen, H.Y. and Gwo, S., 2006. Green, yellow, and orange defect emission from ZnO nanostructures: Influence of excitation wavelength. *Applied Physics Letters*, 88(10).
- [14] Zeng, H., Duan, G., Li, Y., Yang, S., Xu, X. and Cai, W., 2010. Blue Luminescence of ZnO nanoparticles based on non-equilibrium processes: defect origins and emission controls. *Advanced functional materials*, 20(4), pp.561-572.
- [15] Kumari, L. and Kar, A.K., 2022. Solvent-dependent tuning of blue–green emission of chemically synthesized ZnO nanomaterials with high colour purity and electroluminescence efficiency. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(12), pp.9101-9115.
- [16] Zhao, J.H., Liu, C.J. and Lv, Z.H., 2016. Photoluminescence of ZnO nanoparticles and nanorods. *Optik*, 127(3), pp.1421-1423.
- [17] Tay, C.B. and Chua, S.J., 2008. Investigation of morphology and photoluminescence of hydrothermally-grown ZnO nanorods grown on substrates pre-coated with ZnO nanoparticles. *Advanced Materials Research*, 31, pp.199-201.
- [18] Pasdar, M., Azimirad, R. and Nayeri, F.D., 2025. Improving the performance of UV photodiode detectors by changing the dimensions of ZnO nanorods. *Optics Communications*, 584, p.131681.
- [19] Benramache, S., Chabane, F., Benhaoua, B. and Lemmadi, F.Z., 2013. Influence of growth time on crystalline structure, conductivity and optical properties of ZnO thin films. *Journal of Semiconductors*, 34(2), p.023001.
- [3] Mane, Shreya. "Theoretical Aspects on Photodiodes System: Mechanism, Modes and Types." *International Journal of Multidisciplinary Innovation and Research Methodology*, ISSN: 2960-2068 3.1 (2024): 52-60.
- [4] Ishiyama, T., Fujii, T. and Nakane, T., 2015. Structural and optical characterizations of ZnO Nanowire Arrays Grown on Si substrate. *Sensors and materials*, 27(10), pp.907-915.
- [5] Luo, L., Zhang, Y., Mao, S.S. and Lin, L., 2006. Fabrication and characterization of ZnO nanowires based UV photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 127(2), pp.201-206.
- [6] Bai, S., Wu, W., Qin, Y., Cui, N., Bayerl, D.J. and Wang, X., 2011. High-performance integrated ZnO nanowire UV sensors on rigid and flexible substrates. *Advanced Functional Materials*, 21(23), pp.4464-4469.
- [7] Hassan, J.J., Mahdi, M.A., Kasim, S.J., Ahmed, N.M., Abu Hassan, H. and Hassan, Z., 2012. High sensitivity and fast response and recovery times in a ZnO nanorod array/p-Si self-powered ultraviolet detector. *Applied Physics Letters*, 101(26).
- [8] Witkowski, B.S., Pietruszka, R., Gieraltowska, S., Wachnicki, L., Przybylinska, H. and Godlewski, M., 2017. Photoresistor based on ZnO nanorods grown on a p-type silicon substrate. *Opto-Electronics Review*, 25(1), pp.15-18.
- [9] Musa, I., Qamhieh, N. and Mahmoud, S.T., 2017. Synthesis and length dependent photoluminescence property of zinc oxide nanorods. *Results in physics*, 7, pp.3552-3556.
- [10] Willander, Magnus, et al. "Luminescence from zinc oxide nanostructures and polymers and their hybrid devices." *Materials* 3.4 (2010): 2643-2667.
- [11] Alvi, N. H., et al. "The origin of the red emission in n-ZnO nanotubes/p-GaN white light emitting diodes." *Nanoscale research letters* 6 (2011): 1-7.