

# تهیه لایه نازک منعطف نانوکامپوزیتی (ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn) و مطالعه خواص مکانیکی و نورتابی

صادق آزادمهر<sup>۱</sup> | مجید جعفر تفرشی<sup>۱\*</sup> | ساناز علمداری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

**چکیده:** این مطالعه بر سنتز نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn متمرکز است و خواص ساختاری، نوری و مکانیکی آن را بررسی می‌کند. نانوکامپوزیت از طریق روش رسوب همزمان با استفاده از پیش سازهای استات روی و سدیم تنگستات سنتز شد، در حالی که اکسید گرافن (GO) با روش هامر تهیه شد. لایه نازک نانوکامپوزیت با استفاده از تکنیک پوشش اسپین اسپری همراه با تابش اولتراسونیک (۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰ وات) بر روی یک بستر PET نهشته شد. تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) تشکیل فاز کریستالی ZnWO<sub>4</sub> چهارضلعی و حضور GO را تایید کرد. تصاویر TEM و SEM نانوذرات مکعبی ZnWO<sub>4</sub> را با قطر متوسط ۲۰۰ نانومتر بر روی ورقه‌های GO همراه با تجمع ذرات به دلیل نیروهای بین ذره‌ای با توزیع یکنواخت نشان دادند. تجزیه و تحلیل لومینسانس تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتر، تابش آبی قوی در محدوده (۴۰۰-۵۰۰ نانومتر) را نشان داد که به انتقال الکترونیکی در ZnWO<sub>4</sub> و اثر دوپینگ Mn<sup>2+</sup> نسبت داده می‌شود. GO با تعدیل مسیرهای نوترکیبی بار، نقش مهمی در افزایش کارایی نوری ایفا کرد. منحنی تنش-کرنش لایه نازک رفتار الاستیک در کرنش‌های کم و سخت شدن کرنش در تغییر شکل‌های بالاتر نشان داد. این نتایج گامی مهم به سوی پیشبرد کاربردهای نوری و فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر ZnWO<sub>4</sub> است.

**واژگان کلیدی:** تنگستات روی؛ نانوکامپوزیت؛ لومینسانس؛ ناخالصی منگنز

\* [mtafreshi@semnan.ac.ir](mailto:mtafreshi@semnan.ac.ir) ; [s.alamdari@semnan.ac.ir](mailto:s.alamdari@semnan.ac.ir)

پوشیدنی و تصویربرداری زیست‌پزشکی توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده‌اند [۱-۳]. در میان مواد مختلف شب تاب، تنگستات روی (ZnWO<sub>4</sub>) به دلیل خواص نوری عالی، پایداری حرارتی بالا و راندمان لومینسانس قوی به عنوان یک نامزد امیدوارکننده ظاهر شده است [۴-۶]. ترکیب ناخالصی‌های فلزات

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

زمستان ۱۴۰۳ | شماره ۴ | سال یازدهم

## ۱- مقدمه

حسگرهای فلورسنت انعطاف‌پذیر و شفاف در سال‌های اخیر به دلیل کاربردهای بالقوه‌شان در الکترونیک نوری، دستگاه‌های

واسطه مانند منگنز (Mn) می‌تواند عملکرد درخشان  $ZnWO_4$  را با معرفی سطوح انرژی جدید که نوترکیبی کارآمد حامل بار را تسهیل می‌کند، افزایش دهد. برای افزایش انعطاف‌پذیری و شفافیت حسگرهای شب تاب، نانوکامپوزیت‌های حاوی مواد دو بعدی مانند اکسید گرافن (GO) به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. GO دارای استحکام مکانیکی عالی، مساحت سطح بالا و خواص نوری قابل تنظیم است که آن را به یک جزء ایده آل برای نانو ساختارهای هیبریدی تبدیل می‌کند. ادغام  $ZnWO_4$  دوپ شده با منگنز با GO می‌تواند منجر به یک اثر هم افزایی شود که هم خواص درخشندگی و هم خواص مکانیکی حسگر را افزایش می‌دهد و در عین حال انعطاف‌پذیری و شفافیت آن را حفظ می‌کند. شبکه لانه زنبوری دو بعدی یک لایه از اتم‌های کربن که با هیبریداسیون  $sp^2$  به هم متصل شده‌اند، گرافن است، یک ماده جایگزین بالقوه با چندین مزیت. اولاً، ساختار نواری غیرمعمول آن قابلیت‌های الکتریکی استثنایی به آن می‌دهد. یک نیمه هادی شکاف باند صفر با نقطه دیراک در محل اتصال باندهای ظرفیتی و رسانایی مخروطی شکل متقارن به طور یکنواخت در اطراف سطح فرمی پراکنده شده است. از آنجایی که گرافن را می‌توان با تغییر ولتاژ گیت از نوع n (تسلط بر الکترون) به شارژ خنثی و نوع p (حفره دار) تنظیم کرد، انتقال الکترون کارآمد است [۷-۱۰]. این قابلیت تنظیم اجازه می‌دهد تا نوع حامل بار خوب و کنترل غلظت، ویژگی‌های حمل و نقل مواد را بهبود بخشد. دوم، ویژگی‌های سد گاز و مایع گرافن، مساحت سطح بزرگ و زیست سازگاری، پایداری را حفظ می‌کند و بار بالاتری از گیرنده‌های بیولوژیکی را پشتیبانی می‌کند و قابلیت سنجش را افزایش می‌دهد [۱۱]. با توجه به قابلیت تنظیم شیمیایی، گرافن ممکن است چندین مشتق تولید کند که تغییرات شیمیایی را ممکن می‌سازد [۱۲]. طراحی رابط سفارشی، انتخاب حسگر زیستی مبتنی بر گرافن را افزایش می‌دهد و کاربردهای تشخیص بیومتریکی آن‌ها را به شدت گسترش می‌دهد. در نهایت، ویژگی‌های مکانیکی گرافن، دستگاه‌های هوشمند پوشیدنی و کاشتنی را امیدوارکننده می‌سازد [۱۲، ۱۳]. ترانزیستورهای اثر میدانی گرافن انعطاف‌پذیر (FGFET) نوآوری‌های فناوری حسگر انعطاف‌پذیر انقلابی هستند که مزایای بسیاری از حسگر زیستی، از جمله سهولت کار، پاسخ سریع، نظارت در زمان واقعی، ویژگی

و حساسیت بالا، محدودیت‌های تشخیص کم، محدوده تشخیص گسترده، و یکپارچه‌سازی میکروسیال را ارائه می‌دهند. بنابراین، حسگرهای بیولوژیکی انعطاف‌پذیر با استفاده از FGFET محبوبیت پیدا می‌کنند. بر اساس یک جستجوی متون، اکثر ارزیابی‌های الکترونیکی ترانزیستور اثر میدانی انعطاف‌پذیر بر روی مواد آلی تمرکز دارند [۳]. انتشارات معدودی در مورد مدارهای GFET انعطاف‌پذیر منسوخ شده اند و به درستی ساخت و کاربردهای آنها را در سنجش بیولوژیکی انعطاف‌پذیر توضیح نمی‌دهند [۵۶، ۵۷]. با توجه به مزایای GFET های انعطاف‌پذیر در الکترونیک انعطاف‌پذیر، علاقه عمومی به حسگرهای انعطاف‌پذیر و پیشرفت‌های قابل توجه اخیر در این زمینه، بررسی تخصصی FGFET ها و کاربردهای آنها در سنجش زیست پزشکی انعطاف‌پذیر مورد نیاز است. این بررسی برای متخصصان الکترونیک/نیمه هادی، شیمی مواد، علم ماده نرم و فناوری حسگر و همچنین تازه واردان مفید خواهد بود. او و همکاران [۱۴] ترانزیستورهای لایه نازک rGO با الکترودهای درمان شده با محلول و کانال‌های میکروالگو ایجاد کرد. این گجت الکترونیکی با انعطاف‌پذیری، شفافیت و ویژگی‌های دوقطبی خود، به طور موثر پروتئین‌ها را در بافرهای فیزیولوژیکی با حساسیت بالا تشخیص می‌دهد. کاغذ ساخته شده از اکسید گرافن. هوانگ و همکاران [۱۵] مواد هیبریدی سه بعدی را با استفاده از لایه‌های متناوب GO و هگزلامین (kaغذ GO/hexylamine) ایجاد کردند. ساختار سوپرنشکه لایه به لایه این ماده، قابلیت‌های پایدار الکتریکی و اثر میدانی را تحت تنش مکانیکی تضمین می‌کند. ژانگ و همکاران [۱۶] از لایه برداری مایع اصلاح شده برای تولید جوهر گرافن (شکل e۴) استفاده کرد و آن را با فرآیند نوشتن جوهر مستقیم اکستروود شده (DIW) جفت کرد تا ترانزیستورهای اثر میدان گرافن گیت مایع را بر روی بسترهای PI ایجاد کند. در مقایسه با روش لایه برداری سنتی فاز مایع مبتنی بر اتانول [۱۰۳]، افزودن الکل کاج جوهر گرافن را با افزایش ویسکوزیته با تبادل حلال اتانول با الکل کاج، سازگارتر با فرآیندهای چاپ می‌کند. در این مطالعه، ما سنتز و توصیف یک حسگر بسیار درخشان انعطاف‌پذیر و شفاف بر اساس نانوکامپوزیت  $ZnWO_4/GO$  با منگنز را گزارش می‌کنیم. خواص ساختاری، مورفولوژیکی و نوری نانوکامپوزیت سنتز شده

به طور سیستماتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رفتار لومینسانس تحت شرایط مختلف تحریک مورد بررسی قرار گرفت تا پتانسیل آن برای کاربردهای حسگر با کارایی بالا ارزیابی شود. یافته های ما امکان استفاده از ناخالصی Mn را برجسته می کند.

## ۲- روش انجام آزمایش

### ۲-۱- تهیه مواد و روش تجربی

ZnWO<sub>4</sub> از طریق روش رسوب همزمان با استفاده از استات روی و تنگستات سدیم (۹۹.۹۹ درصد خلوص) سنتز شد. اکسید گرافن به روش هامر از پودر گرافیت (۹۹/۹۹ درصد) تهیه شد. مخلوطی از ۲۰ سی سی H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>، ۰/۵ گرم گرافیت و ۰/۳ گرم نیترات سدیم تهیه شد و به دنبال آن ۱/۵ گرم KMnO<sub>4</sub> به تدریج در یک حمام یخ اضافه شد. برای سنتز نانوکامپوزیت، تنگستات سدیم در آب دیونیزه حل شد و به محلول روی اضافه شد.

### ۲-۲- تهیه لایه نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO آلاییده به منگنز

یک بستر PET با اتانول و آب دیونیزه تمیز شد، سپس با نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn با استفاده از روش پوشش اسپری اسپری همراه با تابش اولتراسونیک (۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰ وات) برای پراکندگی یکنواخت پوشش داده شد. محلول (۲ سی سی) بر روی بستر PET در حال چرخش (۸۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۰ ثانیه) در حالی که امواج اولتراسونیک اعمال می شد، رسوب داده شد. پوشش اسپری در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد با سرعت جریان ۲ میلی لیتر در دقیقه انجام شد. لایه های نازک به دست آمده (۲۰۰ نانومتر) برای افزایش چسبندگی تحت تیمار UV/ازون قرار گرفتند و در دمای ۶۰-۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت پخت شدند.

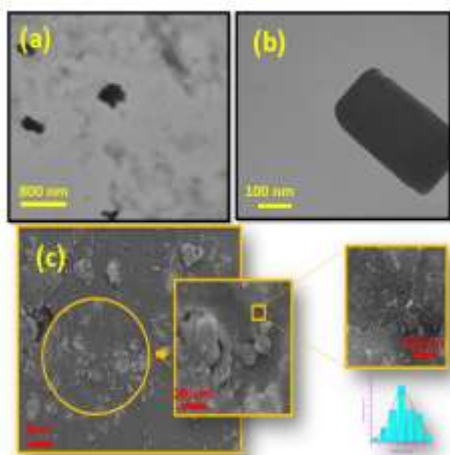
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)

لایه نازک ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn روی بستر PET

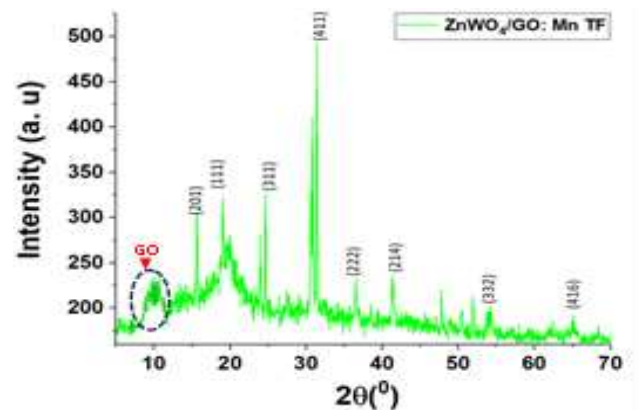
الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) لایه نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn که بر روی بستر PET قرار گرفته است، قله های پراش متمایز مربوط به فاز کریستالی ZnWO<sub>4</sub> را نشان می دهد. قله های مشاهده شده به خوبی با فاز استاندارد چهارضلعی -۰۱۵-۰۰ (JCPDS No. ZnWO<sub>4</sub>) (۰۷۷۴) همسو می شوند، که شکل گیری موفقیت آمیز ساختار تنگستات را بدون هیچ فاز ناخالصی ثانویه تایید می کند. این نشان می دهد که فرآیند دوپینگ منگنز به طور قابل توجهی یکپارچگی کریستالی ZnWO<sub>4</sub> را تغییر نداده است. علاوه بر این، یک مشخصه اوج گسترده اکسید گرافن (GO) مشاهده می شود که معمولاً در حدود ۱۰-۱۲ درجه (2θ) ظاهر می شود که مربوط به صفحه (۰۰۱) GO است. وجود این قله ترکیب موفقیت آمیز GO را در کامپوزیت تایید می کند و نشان می دهد که ساختار لایه ای GO در داخل لایه نازک دست نخورده باقی می ماند. تعامل بین ZnWO<sub>4</sub> و GO ممکن است بر رفتار کلی تبلور تأثیر بگذارد و به طور بالقوه خواص الکترونیکی کامپوزیت را تغییر دهد. یک پیک با شدت کم مربوط به بستر PET در محدوده زاویه کم (۱۰-۲۰ درجه) ظاهر می شود که مشخصه فاز آمورف PET است. وجود این قله نشان می دهد که پرتو اشعه ایکس از لایه نانوکامپوزیت نفوذ کرده و به لایه PET زیرین می رسد. با این حال، غلبه قله های ZnWO<sub>4</sub> و GO نشان می دهد که لایه رسوب شده به اندازه ای ضخیم است که بیشتر سهم بستر PET در الگوی پراش را مورد توجه قرار دهد. اوج انبساط مشاهده شده در بازتاب های ZnWO<sub>4</sub> نشان دهنده ماهیت نانوبلوری است که با اندازه ذرات کوچک مشاهده شده در آنالیزهای TEM و SEM مطابقت دارد. اختلاط ناخالص منگنز همچنین ممکن است به تغییرات جزئی اوج به دلیل اثرات جایگزینی یونی، اصلاح پارامترهای شبکه و ایجاد کرنش در چارچوب ZnWO<sub>4</sub> کمک کند. این تجزیه و تحلیل XRD رسوب موفقیت آمیز ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn را بر روی بستر PET تایید می کند و کریستالی بودن ZnWO<sub>4</sub> را حفظ

ذرات قابل توجهی را نشان می دهند، جایی که اکثر نانوساختارهای ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn به شکل کروی هستند و به طور متراکم روی ماتریس GO جمع شده اند. این تراکم را می توان به برهمکنش های بین ذره ای، از جمله نیروهای واندروالس و پیوند هیدروژنی بین گروه های عاملی GO و ZnWO<sub>4</sub> نسبت داد. وجود صفحات GO مشهود است که به عنوان بستری برای نانوبلورها عمل می کند که به شدت به سطح می چسبند. این آرایش ساختاری نشان می دهد که GO نقش مهمی در لنگر انداختن نانوذرات ZnWO<sub>4</sub>، ترویج پراکندگی و تأثیر بالقوه بر فرآیندهای انتقال بار مربوط به کاربردهای فوتوکاتالیستی و اپتوالکترونیک ایفا می کند. تغییرات مورفولوژیکی مشاهده شده در هر دو تصویر TEM و SEM نشان دهنده یک نانوساختار سلسله مراتبی است، که در آن ذرات ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn شبکه های یکپارچه ای را با ماتریس گرافن تشکیل می دهند. حضور منگنز به عنوان یک ناخالص ممکن است به اصلاح پویایی هسته و رشد کمک کرده باشد، که منجر به تبلور کنترل شده با اندازه و افزایش تعامل با بستر GO شده است. این تجزیه و تحلیل ریزساختاری بینش های مهمی را در مورد مورفولوژی و پراکندگی ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn در کامپوزیت ارائه می دهد و پتانسیل آن را برای کاربردهای کاربردی پیشرفته در دستگاه های مبتنی بر لومینسانس و سیستم های فوتوکاتالیستی برجسته می کند. علاوه بر این، تصویر مقطعی SEM لایه رسوب شده تأیید می کند که ضخامت فیلم تقریباً ۱۵ میکرومتر است.



شکل ۲ (الف، ب) تصاویر TEM و (ج) تصاویر FESEM از ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn تهیه شده: پودرهای نانوکامپوزیت منگنز و (د) تصویر FESEM از سطح مقطع از تهیه شده: فیلم نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn

می کند و در عین حال یکپارچگی ساختاری GO را حفظ می کند. وجود هر دو قله پراش ZnWO<sub>4</sub> و GO ماهیت ترکیبی فیلم را برجسته می کند، که انتظار می رود خواص عملکردی آن را به ویژه در کاربردهای لومینسانس و فوتوکاتالیستی افزایش دهد.



شکل ۱: الگوی XRD نانوکامپوزیت تهیه شده: لایه نازک ZnWO<sub>4</sub>/GO آلوده به منگنز

## ۳-۲- تجزیه و تحلیل ریزساختاری: نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn

تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn با بزرگنمایی های مربوط به میله های مقیاس ۸۰۰ نانومتر و ۱۰۰ نانومتر گرفته شد. تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی نشان می دهد که نانوساختارها عمدتاً یک شکل مکعبی و کروی را نشان می دهند، با صفحات اکسید گرافن (GO) قابل تشخیص که در داخل کامپوزیت پراکنده شده اند. در مقیاس بزرگتر (۸۰۰ نانومتر)، ذرات به خوبی بر روی صفحات GO توزیع شده اند و مرزهای مشخصی را حفظ می کنند. با بررسی دقیق تر (مقیاس ۱۰۰ نانومتر)، نانوذرات مکعبی شکل دراز با قطر متوسط تقریباً ۲۰۰ نانومتر مشهود است. این ساختارهای مکعبی احتمالاً مربوط به نانوبلورهای ZnWO<sub>4</sub> هستند که دارای فاز چهارضلعی مشخصه هستند. برهمکنش بین دوپینگ منگنز و ماتریس ZnWO<sub>4</sub> ممکن است بر مورفولوژی ذرات تأثیر گذاشته باشد و به طور بالقوه در رشد ناهمسانگرد مشاهده شده نقش داشته باشد. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سازمان ساختاری کامپوزیت را بیشتر روشن می کند. تصاویر SEM تجمع

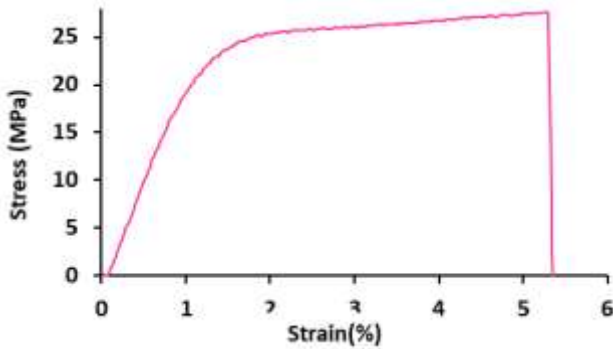
## ۳-۳- تجزیه و تحلیل لومینسانس نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتر

شکل ۳ (a, b) آنالیز لومینسانس نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO:Mn را نشان می‌دهد. تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتر در دمای اتاق نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn آماده شده است. خواص لومینسانس نانوکامپوزیت های مبتنی بر ZnWO<sub>4</sub> به دلیل کاربردهای بالقوه آنها در اپتوالکترونیک، حسگرها و تصویربرداری زیست پزشکی توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. در این مطالعه، پاسخ فوتولومینسانس (PL) لایه‌های نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn که بر روی بسترهای پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) قرار گرفته‌اند، تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با PET خالی برای ارزیابی سهم نانوکامپوزیت در انتشار مشاهده شده مقایسه شد. لایه‌های نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn در اثر تحریک مادون قرمز نزدیک (NIR) درخشندگی آبی قوی را نشان دادند. انتشار به انتقال های الکترونیکی در ماتریس ZnWO<sub>4</sub> نسبت داده می‌شود که با دوپینگ Mn<sup>2+</sup> و حضور اکسید گرافن (GO) اصلاح شده است. در مقابل، بستر PET برهنه در شرایط تحریک یکسان، درخشندگی قابل توجهی نشان نمی‌دهد و تأیید می‌کند که انتشار مشاهده شده از نانوکامپوزیت سرچشمه می‌گیرد. ZnWO<sub>4</sub> به دلیل انتقال الکترونیکی بین باندهای رسانایی و ظرفیت خود، دارای یک پاسخ شب تاب ذاتی است. تحت تحریک، الکترون ها به حالت های انرژی بالاتر ارتقا می‌یابند و به صورت تشعشی دوباره ترکیب می‌شوند و به انتشار کلی کمک می‌کنند. حضور Mn<sup>2+</sup> مراکز لومینسانس اضافی را معرفی می‌کند و انتشار را در ناحیه آبی (~۴۰۰-۵۰۰ نانومتر) افزایش می‌دهد. یون‌های منگنز انتقال انرژی را تسهیل می‌کنند و به انتشار از طریق انتقال‌های الکترونیکی d-d کمک می‌کنند. GO نقش مهمی در تغییر دینامیک انتقال شارژ در کامپوزیت ایفا می‌کند. توانایی آن در تعدیل مسیرهای نوترکیبی الکترون-حفره می‌تواند بسته به غلظت و توزیع آن، لومینسانس را افزایش یا خاموش کند. انتشار آبی قوی مشاهده شده تعادل بهینه را نشان می‌دهد که در آن GO جداسازی بار موثر را در

حالی که نرخ نوترکیبی تابشی بالا را حفظ می‌کند، ترویج می‌کند. خود بستر PET هیچ گونه درخشندگی را از خود نشان نمی‌دهد و هر گونه سهم فلورسانس ذاتی را رد می‌کند. چسبندگی قوی بین نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn و بستر PET، که از طریق روش پوشش اسپین اسپری با کمک اولتراسونیک به دست می‌آید، تشکیل لایه نازک یکنواخت را تضمین می‌کند. تکنیک رسوب‌گذاری به طور قابل توجهی بر خواص نوری با کاهش عیوب مانند ترک‌ها یا حفره‌ها و افزایش پراکندگی نانوذرات تأثیر می‌گذارد که منجر به بهبود بازده لومینسانس می‌شود.

لومینسانس آبی مشاهده شده از مکانیسم پیشنهادی پیروی می‌کند:

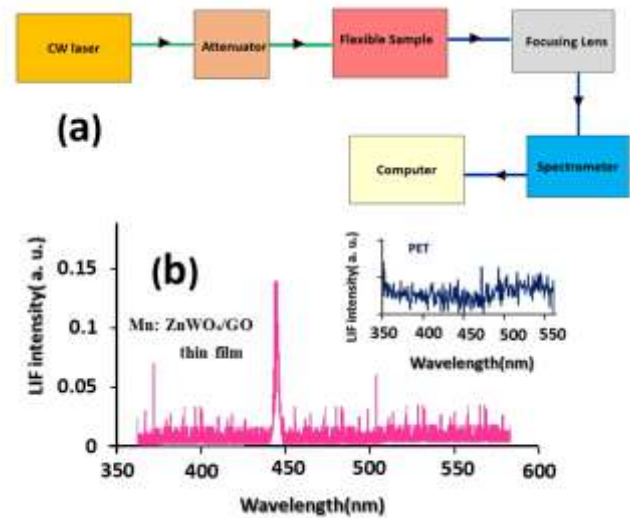
- تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتری الکترون ها را به نوار رسانایی ZnWO<sub>4</sub> ارتقا می‌دهد.
- انتقال انرژی به یونهای Mn<sup>2+</sup> باعث تحریک آنها به حالت‌های الکترونیکی بالاتر می‌شود.
- نوترکیبی تشعشی در مراکز Mn<sup>2+</sup> منجر به انتشار نور آبی می‌شود.
- GO به انتقال بار کمک می‌کند، از نوترکیب غیر تشعشی جلوگیری می‌کند و شدت انتشار بالا را حفظ می‌کند.
- همچنین ذکر تأثیر پارامترهای رسوب مهم است:
- پوشش اسپری همراه با تابش اولتراسونیک (۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰ وات) یکنواختی فیلم را افزایش داده و عیوب را کاهش می‌دهد.
- رسوب در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، چسبندگی نانوکامپوزیت به بستر PET را بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش درخشندگی می‌شود.
- فعال سازی سطح UV/Ozone پیوند سطحی را بیشتر تقویت می‌کند، اثرات خاموش کننده را به حداقل می‌رساند و شدت انتشار را افزایش می‌دهد.



شکل ۴. منحنی تنش-کرنش تهیه شده: لایه نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn با موفقیت سنتز و به عنوان یک لایه نازک بر روی یک بستر PET پوشانده شد. آنالیزهای ساختاری (SEM، TEM، XRD) تشکیل فاز کریستالی ZnWO<sub>4</sub>، توزیع یکنواخت نانوذرات و نقش GO به عنوان داربست برای لنگر انداختن ذرات را تایید کردند. دوپینگ Mn<sup>2+</sup> انتشار آبی قوی را تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتری با معرفی مراکز انتقال انرژی افزایش داد، در حالی که GO با کاهش بازترکیب غیر تشعشعی، کارایی لومینسانس را بهبود بخشید. پارامترهای فرآیند مانند پوشش اسپین اسپری با کمک اولتراسونیک و فعال سازی سطح UV/ازون یکنواختی فیلم و چسبندگی قوی به بستر PET را تضمین می کند. آزمایش مکانیکی رفتار الاستوپلاستیک را نشان داد و کامپوزیت را برای دستگاههای انعطاف پذیر مناسب ساخت. این مطالعه پتانسیل نانوکامپوزیت های ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn را در کاربردهای نوری (به عنوان مثال، حسگرها، LED) و فتوکاتالیستی برجسته می کند. مطالعات بهینه سازی بیشتر در مورد غلظت GO و دمای پخت توصیه می شود. لایه نازک نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn درخشندگی آبی قوی را تحت تحریک ۹۸۰ نانومتر نشان می دهد که به انتقال انرژی کارآمد بین ناخالصی های ZnWO<sub>4</sub> و Mn<sup>2+</sup> نسبت داده می شود و GO جداسازی بار را تسهیل می کند. عدم انتشار از بستر PET لخت تأیید می کند که لومینسانس صرفاً از نانوکامپوزیت منشاء می گیرد. تکنیک رسوب گذاری نقش مهمی در بهینه سازی مورفولوژی فیلم و عملکرد لومینسانس دارد. این



شکل ۳ (a, b) آنالیز لومینسانس را نشان می دهد: نانوکامپوزیت ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn تحت تحریک لیزر ۹۸۰ نانومتر در دمای اتاق.

شکل ۴ منحنی تنش-کرنش لایه نازک نانوکامپوزیت منگنز ZnWO<sub>4</sub>/GO را نشان می دهد. مقادیر اولیه تنش منفی هستند، احتمالاً به دلیل خطاهای اندازه گیری یا اعمال نیروی اولیه. در کرنش های کوچک، تنش به آرامی افزایش می یابد که نشان دهنده رفتار کشسانی ماده است. در این منطقه، مدول یانگ (EE) قابل محاسبه است. با افزایش کرنش، تنش افزایش یافته و روند رشد آن غیرخطی می شود. این ناحیه نشان دهنده تغییر شکل دائمی در PET است. به نظر می رسد نقطه تسلیم در حدود کرنش ۰.۰۷۲۶ تا ۰.۰۸۷۰ باشد، زیرا از این ناحیه به بعد تنش با سرعت بیشتری افزایش می یابد. پس از تسلیم، ماده به مقاومت در برابر کرنش ادامه می دهد و تنش به مقادیر بالاتر افزایش می یابد که نشان دهنده سخت شدن کرنش است. مقادیر تنش از حدود ۵۵ به ۲۵۲۵ افزایش می یابد که مشخصه نرمی شدن مواد است. داده ها نشان می دهد که تنش به حداکثر مقدار حدود ۲۵۲۵ می رسد و سپس کاهش می یابد. این کاهش معمولاً نشان دهنده وقوع شکستگی در نمونه است.

applications', *Nano-Micro Letters*, 14, p. 141. doi: 10.1007/s40820-022-00874-w.

7. Arefian, N. & Rahmani, Z. (2025) 'About Tunable Ternary Warm Magnetized Plasma Photonic Crystals', *Progress in Physics of Applied Materials*, 5(1), pp. 39–45. doi: 10.22075/ppam.2024.35727.1119.
8. Karbaschi, H. & Rashedi, G. (2024) 'Electronic and spintronic transport in gapped graphene-based FG/SG/FG junctions', *Progress in Physics of Applied Materials*, 4(2), pp. 115–121. doi: 10.22075/ppam.2024.34105.1100.
9. Memarian, N., Farahi, E., Tobeiha, N. & Concina, I. (2022) 'Effect of precursor on physical properties and photocatalytic activity of 2D g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets', *Progress in Physics of Applied Materials*, 2(2), pp. 183–194. doi: 10.22075/ppam.2022.29345.1049.
10. Almadari, S., Mansoorian, M. & Mousavi-Kamazani, M. (2025) 'Biosafe Chitosan Films Reinforced with Zinc Oxide/Graphene Oxide: Comprehensive Multifunctional Properties', *BioNanoScience*, 15, p. 196. doi: 10.1007/s12668-025-01808-7.
11. Moradi, D., Hosseini, M., Hajiebrahimi, M., Alamdari, S. & Mirzaee, O. (2024) 'Optical Properties of Flexible Nanocomposites Synthesized as Powders via the Hydrothermal Method Under Ionizing Excitations', *Advanced Ceramics Progress*, 10(3), pp. 15–22. doi: 10.30501/acp.2024.486443.1166.
12. Hosseinpour, M., Mirzaee, O., Alamdari, S., Menéndez, J.L. & Abdoos, H. (2023) 'Development of a novel flexible thin PWO(Er)/ZnO(Ag) nanocomposite for ionizing radiation sensing', *Journal of Alloys and Compounds*, 967, p. 171678.
13. Alamdari, S., Majles Ara, M.H. & Jafar Tafreshi, M. (2022) 'Synthesize and optical

یافته‌ها پتانسیل لایه‌های نازک ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn را برای کاربرد در پوشش‌های درخشان، حسگرها و تصویربرداری زیستی برجسته می‌کنند. مطالعات بیشتر، از جمله طیف‌های PL دقیق، لومینسانس با زمان حل شده، و تجزیه و تحلیل ساختاری، برای درک کامل دینامیک انتشار زیرین توصیه می‌شود.

## مراجع

1. Sun, M., Wang, S. & Liang, Y. (2025) 'Flexible Graphene Field-Effect Transistors and Their Application in Flexible Biomedical Sensing', *Nano-Micro Letters*, 17, p. 34. doi: 10.1007/s40820-024-01534-x.
2. Xiao, B., Mu, G., Cao, Y., Yang, M. & Wang, X. (2022) 'Flexible battery-free wireless electronic system for food monitoring', *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7, p. 100430. doi: 10.1016/j.jsamd.2022.100430.
3. Mondal, R., Al Mahadi Hasan, M., Zhang, R., Olin, H. & Yang, Y. (2022) 'Nanogenerators-based self-powered sensors', *Advanced Materials Technologies*, 7, p. 2200282. doi: 10.1002/admt.202200282.
4. Liu, K., Ouyang, B., Guo, X., Guo, Y. & Liu, Y. (2022) 'Advances in flexible organic field-effect transistors and their applications for flexible electronics', *npj Flexible Electronics*, 6, p. 1. doi: 10.1038/s41528-022-00133-3.
5. Meng, K., Xiao, X., Wei, W., Chen, G. & Nashalian, A. (2022) 'Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring', *Advanced Materials*, 34, p. 2109357. doi: 10.1002/adma.202109357.
6. Shi, Z., Meng, L., Shi, X., Li, H. & Zhang, J. (2022) 'Morphological engineering of sensing materials for flexible pressure sensors and artificial intelligence

- response of ZnO/CdWO<sub>4</sub>: Ce nanocomposite with high sensitivity detection of ionizing radiations', *Optics & Laser Technology*, 151, p. 107990.
14. He, Q., Wu, S., Gao, S., Cao, X. & Yin, Z. (2011) 'Transparent, flexible, all-reduced graphene oxide thin film transistors', *ACS Nano*, 5, pp. 5038–5044. doi: 10.1021/nn201118c.
  15. Huang, Y., Yin, S., Huang, Y., Zhang, X. & Zhang, W. (2021) 'Graphene oxide/hexylamine superlattice field-effect biochemical sensors', *Advanced Functional Materials*, 31, p. 2010563. doi: 10.1002/adfm.202010563.
  16. Zhang, R. & Jia, Y. (2021) 'A disposable printed liquid gate graphene field-effect transistor for a salivary cortisol test', *ACS Sensors*, 6, pp. 3024–3031. doi: 10.1021/acssensors.1c00949.
  17. Azadmehr, S., Fadavieslam, M.R., Tafreshi, M.J. et al. (2024) 'Substrate and Cu concentration-dependent physical properties of spray-deposited Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films: a comparative study', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35, p. 855. doi: 10.1007/s10854-024-12499-3.
  18. Azadmehr, S., Jafar Tafreshi, M. & Alamdari, S. (2022) 'Synthesis, Characterization and Scintillation Response of ZnWO<sub>4</sub>-GO Nanocomposite', *Journal of Composites and Compounds*, 4(12), pp. 158–162. doi: 10.52547/jcc.4.3.5.
  19. Alamdari, S., Sasani Ghamsari, M. & Jafar Tafreshi, M. (2025) 'Novel thermo-luminescent ceramics', in *M.S. Ghamsari & H.-H. Park (eds.) Luminescent Ceramics*, Elsevier Series in Advanced Ceramic Materials. Elsevier, pp. 211–263.



# Preparation of a flexible nanocomposite thin film (ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn) and study of mechanical and luminescence properties

S. Azadmehr<sup>1</sup>; M. Jafar Tafreshi<sup>1, \*</sup>; S. Alamdari<sup>2, \*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

**Abstract:** This study focuses on the synthesis of ZnWO<sub>4</sub>/GO: Mn nanocomposite and investigates its structural, optical and mechanical properties. The nanocomposite was synthesized via a co-deposition method using zinc acetate and sodium tungstate precursors, while graphene oxide (GO) was prepared by the Hammer method. The nanocomposite thin film was deposited on a PET substrate using a spin-spray coating technique coupled with ultrasonic irradiation (40 kHz, 100 W). X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of a tetragonal ZnWO<sub>4</sub> crystalline phase and the presence of GO. TEM and SEM images showed cubic ZnWO<sub>4</sub> nanoparticles with an average diameter of 200 nm on the GO sheets with particle aggregation due to interparticle forces with uniform distribution. Luminescence analysis under 980 nm laser excitation revealed a strong blue emission in the range (400-500 nm) attributed to the electronic transport in ZnWO<sub>4</sub> and the Mn<sup>+2</sup> doping effect. GO played an important role in enhancing the optical efficiency by modulating the charge recombination pathways. The stress-strain curve of the thin film showed elastic behavior at low strains and strain hardening at higher strains. These results are an important step towards advancing the optical and photocatalytic applications of ZnWO<sub>4</sub>-based nanocomposites.

**Keywords:** Zinc tungstate; Nanocomposite; Luminescence; Mn dopant