

ساخت و مطالعه نانو ساختار 7 ZnS-Mg و ۹ درصد آلاییده با روش چرخشی

سل-ژل مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی مادون قرمز دور

مهدی غلام پور^۱، مهدی سیمپاری^۲، سبحان کاظم پور ایشکاء^۳

چکیده

از آنجایی که اهمیت جنگ‌های الکترواپتیکی بر کسی پوشیده نیست، افزایش کارایی دوربین‌های حرارتی فرو سرخ دور بطور غیر مستقیم توان رزمی و دفاعی نیروهای مسلح را افزایش می‌دهد. همچنین می‌دانیم که دوربین‌های حرارتی فرو سرخ دور در دو محدوده طیفی 3-5 و 8-12 میکرومتر حساس هستند. در واقع آنها دو پنجره و روزنه اصلی در طیف عبور مادون قرمز را دارا هستند. این سامانه‌ها هم باید در مقابل آسیب ناشی از تابش شدید و فرسایش محافظت شوند و هم باید پرتوهای با طول موج‌های یاد شده را که توان کمی دارند، عبور دهند. در این پژوهش سعی بر این بوده است که با آلایش ZnS علاوه بر حفظ خاصیت پنجره‌ای آن، معایب استفاده از ZnS که فرسایش مکانیکی بالای آن است، از بین برده شود و یا کاهش داده شود. در این راستا، با نهشت Mg بر ZnS هم خواص پنجره‌ای آن حفظ گردیده و ارتقا داده می‌شود و همچنین فرسایش مکانیکی بالای مربوطه در ZnS با خواص مربوط در Mg رفع می‌گردد. در این پژوهش، بهترین شرایط ساخت سل شفاف و پایدار ZnS-Mg و بهترین شرایط ساخت لایه‌های نازک ZnS-Mg با درصدهای آلاییدگی ۷ و ۹ درصد ارائه گردیده است. در واقع، سعی شده است که بهترین شرایط و فرآیند ساخت ZnS-Mg به روش سل-ژل چرخشی مورد بررسی قرار گیرد. با بررسی‌ها و مشخصه‌یابی‌های صورت گرفته پیوند شیمیایی، ویژگی‌های میکروسکوپی، مورفولوژی و خواص اپتیکی پنجره‌ای عبور مادون قرمز مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی فرو سرخ دور، مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: سولفور روی، منزیوم، سل-ژل، مادون قرمز

^۱ استادیار گروه فیزیک دانشگاه افسری امام علی (ع). تهران. ایران.

^۲ استادیار گروه فیزیک دانشگاه افسری امام علی (ع). تهران. ایران.

^۳ محقق پسا دکترا دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: sobhan.kazempour1989@gmail.com

مقدمه

از آنجایی که همه اجسام در دمای بالاتر از صفر مطلق دارای تابش مادون قرمز هستند و از این طریق می‌توان دمای اجسام را اندازه‌گیری کرد. بنابراین، می‌توان اهداف نظامی را نیز در میدان جنگ شناسایی و مورد هدف قرار داد. به عنوان نمونه موشک‌های جستجوگر فرو سرخ یا حرارت یاب از امواج مادون قرمز تابش شده از جسم مورد نظر جهت رهگیری آن استفاده می‌نمایند. پر اهمیت‌ترین موضوع در اینجا در واقع کاربردهای گسترده دوربین‌های حرارتی مادون قرمز دور و رفع ایرادات ساختاری مربوط به ترکیبات با خواص پنجره‌ای برای عبور امواج مادون قرمز است. دوربین‌های مادون قرمز در دو محدوده امواج با طول موج بلند و متوسط در زمینه‌های مختلف همچون، موشک‌های رهگیر گرمایی، تانکها، هواپیماها، پهبادها و ابزارهای نظارتی و تشخیصی کاربرد دارند (کریستین^۱ و همکاران، ۱۹۹۹؛ ویلسون^۲ و همکاران، ۱۹۹۷؛ گبی^۳ و همکاران، ۱۹۵۱).

دوربین مادون قرمز دور در دو محدوده طیفی 3-5 و 8-12 میکرومتر حساس است. در واقع آنها دو پنجره و روزنه اصلی در طیف عبور مادون قرمز را دارا هستند. این سیستم‌ها هم باید در مقابل آسیب ناشی از تابش شدید محافظت شوند و هم باید پرتوهای با طول موجهای یاد شده را که توان کمی دارند، عبور دهند [کریستین و همکاران، ۱۹۹۹]. پژوهش‌های زیادی با بررسی جنبه‌های ترکیبات معدنی مورد استفاده در ساخت این نوع از دوربین‌ها انجام گرفته است. بطور خلاصه ZnS یکی از پرکاربردترین ترکیبات مورد استفاده می‌باشد که می‌توان به جدیدترین مطالعات انجام گرفته اشاره نمود [تیانژاو و همکاران، ۲۰۲۲؛ ساوتاو و همکاران، ۲۰۲۲؛ فان ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰].

در ساخت دوربین‌های حرارتی فرو سرخ دور از خاصیت پنجره‌ای مواد، جهت تفکیک امواج فرو سرخ در بازه‌های مشخص استفاده می‌شود. یکی از بهترین ترکیبات مورد استفاده در ساخت این نوع از دوربین‌ها ZnS یا سولفید روی می‌باشد. اما به علت وجود مقاوت مکانیکی کم ZnS،

^۱ Christian

^۲ Willrdson

^۳ Gebbie

انگیزه لازم جهت بهبود آن با در نظر گرفتن خاصیت Mg بوجود آمده است. در واقع با ترکیب ZnS با یک فلز سبک که در اینجا Mg است که دارای انرژی ارتعاشی زیاد و پیوند شیمیایی قوی است، باعث افزایش مقاومت مکانیکی آن می شود [هریس^۱، ۱۹۹۸؛ تمپل^۲، ۱۹۸۵؛ شلت^۳، ۱۹۹۲]. در واقع، سعی می شود که کنار حفظ خاصیت پنجره ای مورد نظر، مقاومت مکانیکی در مقابل فرسایش نیز افزایش یابد. با توجه به در نظر گرفتن روش سل-ژل جهت ساخت ماده مورد نظر باید ذکر کرد که روش سل-ژل می تواند قابلیت های همچون کنترل آسان ضخامت لایه ها، امکان تهیه لایه در دمای پایین و مصرف کم انرژی، قابلیت تولید لایه های همگن با خلوص بالا، امکان نهشت اشکال پیچیده و سطوح بزرگ، عدم نیاز به خلاء، قابلیت تولید لایه با اندازه ذرات بسیار ریز و ارزان بودن را در اختیار ما قرار دهد. بررسی هایی از این نوع نهایتا می توانند به روند استفاده و ساخت این ترکیبات جهت ساخت دوربین های فرو سرخ کمک شایانی کند.

با انتخاب نسبت مولی ۱ به ۲ برای Zn به S و تهیه سل مربوطه بصورت ترکیب تیوره، استات روی، اتانول آمین و دومتوکسی اتانول در یک محلول به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی تحت دمای ۶۰ درجه سل مربوطه تهیه شد. علاوه بر این محلول به مدت ۶۰ دقیقه در دمای اتاق با همزن مغناطیسی آماده شد. محلولی شفاف حاصل شد. سل نهایی، بعد از ۲۴ ساعت استراحت کاملاً شفاف و قابل قبول بود. ابتدا دو متوکسی اتانول با منزیوم سترات در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی تهیه شدند. سپس سل ZnS بدست آمده از مرحله قبل با محلول مربوطه مخلوط شده و در دمای اتاق به مدت ۶۰ دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شده است. بعد از ۲۴ ساعت استراحت دادن به سل ZnS-Mg، سل پایدار شفاف آماده می شود. به همین ترتیب سل ZnS-Mg با درصد های ۷ و ۹ تهیه شدند.

4 Harris

۲ Temple

۳ Schlecht

در روش چرخشی با سرعت 3000 RPM لایه نشانی انجام گرفته است. فیلم‌های مربوطه بعد از هر بار نهشت به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد تحت عملیات خشک سازی قرار گرفتند. همچنین برای رسیدن به ضخامت دلخواه این روند ۸ مرتبه تکرار شد. قابل ذکر است که مدت زمان لایه نشانی در روش چرخشی نیز برای هر بار ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در انتها نیز فیلم‌های ساخته شده در کوره تحت دماهای مختلف تحت بازپخت قرار گرفتند.

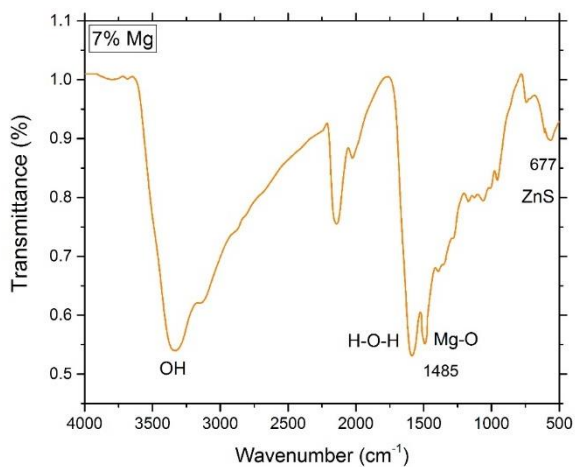
اما بهترین نمونه‌ها از منظر ظاهری در دمای باز پخت ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸۰ دقیقه حاصل شدند. البته باید ذکر شود که زمانی که نمونه‌ها تحت هوا، باز پخت می‌شدند در نمونه‌های تحت مشخصه‌یابی XRD قرار گرفته به جای ZnS، پیک‌های ZnO مشاهده می‌شد. بنابراین، در نهایت برای رسیدن به نتیجه مورد نظر بازپخت نمونه‌ها تحت گاز آرگون با دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸۰ دقیقه انجام گرفته است. برای ساخت و تهیه فیلم‌های ZnS و ZnS-Mg، سل‌های مربوط ساخته شدند. در گام بعد به روش لایه نشانی چرخشی با در نظر گرفتن بهترین شرایط بدست آمده جهت ساخت فیلم‌ها، لایه نشانی برای ZnS-Mg با درصدهای ۷ و ۹ انجام گرفت.

نتایج مطالعات فیزیکی

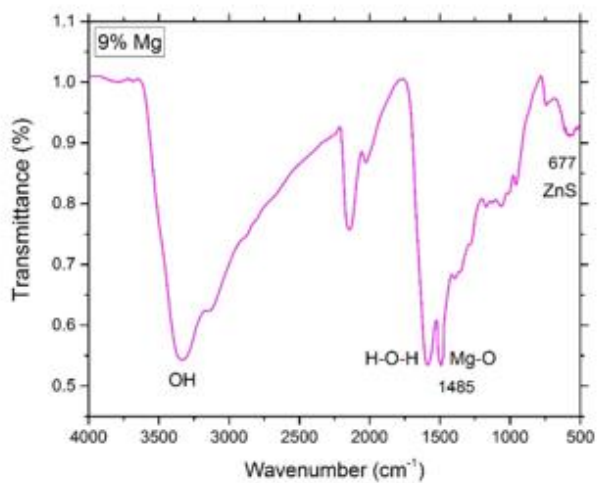
آنالیز FTIR

برای مطالعه و تایید پیوندهای شیمیایی برای سل‌های ZnS-Mg، از طیف تبدیل فوریه فروسرخ استفاده شده است. در شکل‌های زیر، طیف FTIR برای سل‌های ZnS-Mg با درصدهای مختلف Mg در محدوده $4000-500\text{ cm}^{-1}$ قرار داده شده است. در واقع، سل‌های ZnS-Mg را طی فرآیندی به ژل تبدیل کرده و سپس طیف تبدیل فوریه فروسرخ از این نمونه‌ها تهیه شده است. نتایج طیف تبدیل فوریه فروسرخ برای نمونه‌های ZnS خالص، نمونه‌های ۷، و ۹ درصد آلاییده با Mg بصورت زیر نمایش داده می‌شود،

ساخت و مطالعه نانو ساختار ZnS-Mg و ۹ درصد آلاینده با روش چرخشی سل-ژل مورد ... / ۷۵



شکل ۱: طیف FTIR برای نمونه ۷ درصد آلاینده با Mg.



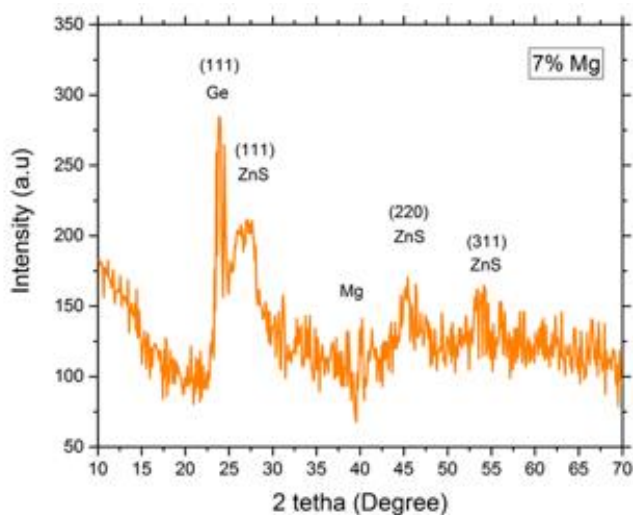
شکل ۲: طیف FTIR برای نمونه ۹ درصد آلاینده با Mg

آنالیز XRD

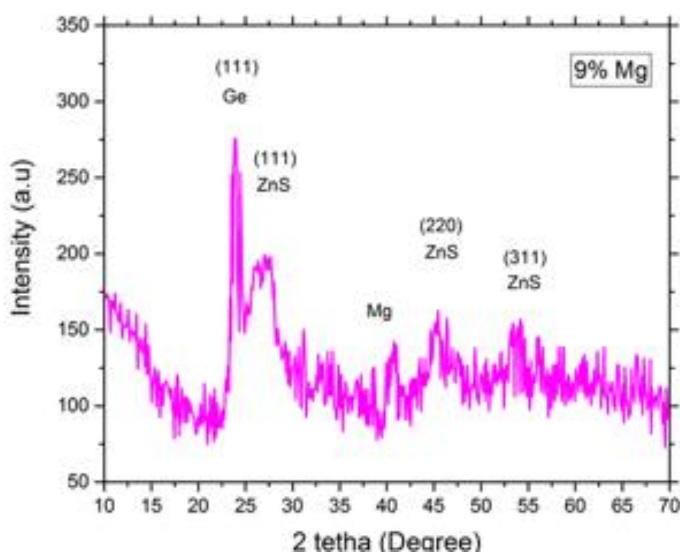
جهت مطالعه ویژگی‌های میکروسکوپی و کیفیت رشد ساختار بلوری فیلم‌های نازک ZnS-Mg بر بستر ژرمانیوم Ge، از طیف سنجی پراش پرتو اشعه ایکس استفاده شده است. نتایج طیف سنج پراش پرتو اشعه ایکس برای نمونه‌های ۷ و ۹ درصد آلاینده با Mg بر بستر ژرمانیوم Ge بصورت زیر نشان داده شده است. از شکل‌های بالا می‌توان دریافت که منیزیم در ZnS گنجانده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده است یک نوار پهن در ناحیه 1 cm^{-1} ۳۶۱۰-۳۲۹۰ مربوط به مد ارتعاشات کششی یک گروه هیدروکسیل است. قله‌ها در محدوده 1 cm^{-1} ۱۶۹۰ مربوط به ارتعاشات خمشی H-O-H در شبکه ZnS هستند که می‌توان آنها را به وجود رطوبت در محیط نسبت داد [نیلکار و همکاران، ۲۰۱۵]. در نمودارهای ZnS آلاینده شده با Mg نوارهای گسترده در 1 cm^{-1} ۱۴۸۰-۱۵۴۲ مربوط به ارتعاش کششی Mg-O می‌باشد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است با افزایش آلاینده‌گی Mg دره ارتعاشات کششی Mg-O افزایش می‌یابد. همچنین باید ذکر کرد که دره موجود در 1 cm^{-1} ۶۷۷ مرتبط به ارتعاشات ZnS می‌باشد که این دره با افزایش آلاینده‌گی Mg ضعیف شده و به سمت فرکانس‌های کوچکتر میل می‌کند. با توجه به اینکه اتم‌های منیزیم از اتم‌های روی سبکتر هستند، این دره در نمونه‌های آلاینده به نسبت نمونه غیر آلاینده ضعیف‌تر شده‌اند که در واقع نشان دهنده ورود Mg به شبکه ZnS است [ردی^۱، ۲۰۱۵؛ راجا^۲ و همکاران، ۲۰۱۴].

^۱ Reddy

^۲ Raja



شکل ۳: طیف XRD برای نمونه ۷ درصد آلاینده با Mg.



شکل ۴: طیف XRD برای نمونه ۹ درصد آلاینده با Mg

در شکل‌های بالا، طیف پراش پرتو اشعه ایکس فیلم‌های نازک ZnS-Mg با درصدهای ۷ و ۹ درصد آلاینده شده با Mg بر بستر ژرمانیوم Ge به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشخص شده است، راستاهای ارجح (۱ ۱ ۱)، (۲ ۲ ۰) و (۳ ۱ ۱) قله‌های پراش

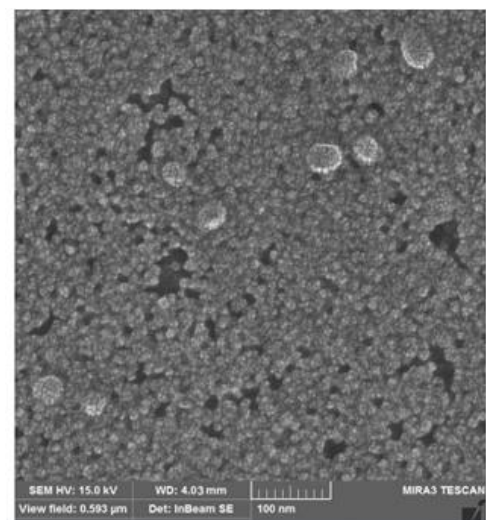
مربوط به ZnS هستند. در تمامی نمونه‌ها قله مربوطه به $2\theta=28.5^\circ$ که با راستای ترجیحی (۱ ۱ ۱) برای ZnS نشان داده شده است، از جمله قویترین قله‌ها را تشکیل می‌دهند. همچنین، راستای ارجح مربوط به ژرمانیوم Ge بصورت (۱ ۱ ۱) در شکل‌های بالا نشان داده شده است که قویترین قله را در بین همه قله‌ها دارا است. با افزایش درصد آلیاژگی Mg، قله‌های استاندارد ZnS با راستای ارجح (۱ ۱ ۱)، (۲ ۲ ۰) و (۳ ۱ ۱) پهن تر شده و کاهش می‌یابند که نشان دهنده کاهش بلورینگی لایه‌های نازک است. علت این امر جایگزینی Mg با Zn در لایه‌ها می‌باشد. علاوه بر این، نکته قابل توجه این است که در حین تبخیر نمونه‌ها با درصد آلیاژگی بیشتر، اتم‌ها زمان کافی برای ایجاد لایه یکنواخت را ندارند. همچنین در نمونه‌های آلیاژده، تغییرات در الگوهای XRD ممکن است ناشی از نانو ذرات تبخیر شده با سرعت بالا در طول فرآیند پوشش دهی باشد. در واقع، افزایش غلظت ناخالصی باعث کاهش اندازه بلورک می‌شود که این امر خود را بصورت افزایش پهنای قله با افزایش Mg، نشان می‌دهد. اما در نمونه آلیاژده شده با ۹ درصد Mg در محدود $2\theta=40^\circ$ قله مربوط به Mg خود را در شکل طیف پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد.

آنالیز FESEM

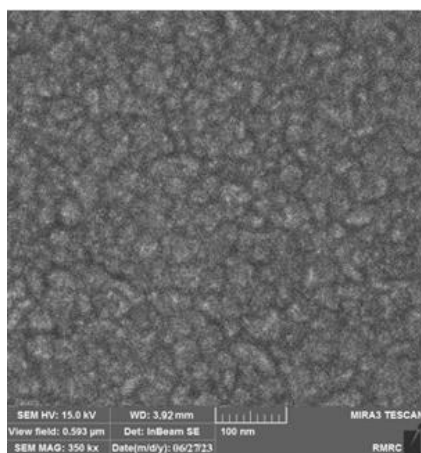
در شکل‌های ۵ و ۶ مورفولوژی سطح نمونه ZnS و ZnS-Mg توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی FESEM مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق تصویر فیلم ZnS، سطح نمونه تقریباً همگن و بدون ترک خوردگی است. همچنین دانه‌های کروی در قالب خوشه‌های بزرگتر بطور پراکنده در نمونه شکل گرفته‌اند. اما در شکل ۶ مورفولوژی سطح فیلم ZnS آلیاژده با Mg (۷ درصد آلیاژده) نشان داده شده است. مطابق شکل، مورفولوژی فیلم نازک نانو ساختار با وارد سازی Mg تحت تاثیر قرار گرفته است. وارد شدن Mg به شبکه بلوری سولفید روی ZnS باعث بزرگ شدن اندازه دانه‌ها شده است که این نتیجه مطابقت خوبی با پژوهش مشابه دارد [آشوکومار^۱ و همکاران، ۲۰۱۷].

^۱ Ashokkumar

ساخت و مطالعه نانو ساختار 7 ZnS-Mg و ۹ درصد آلاینده با روش چرخشی سل-ژل مورد ... / ۷۹



شکل ۵: طیف FESEM برای نمونه خالص ZnS

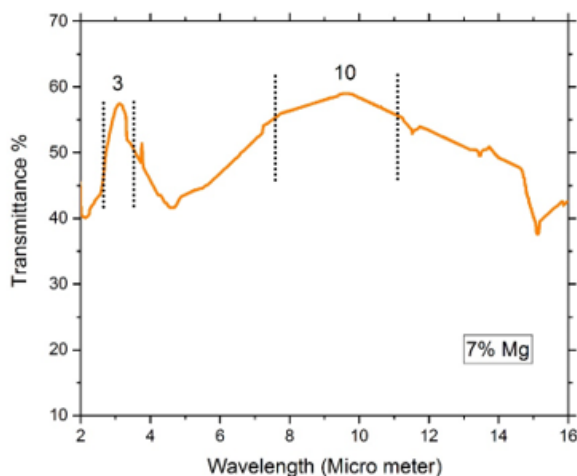


شکل ۶: طیف FESEM برای نمونه ۷ درصد آلاینده با Mg

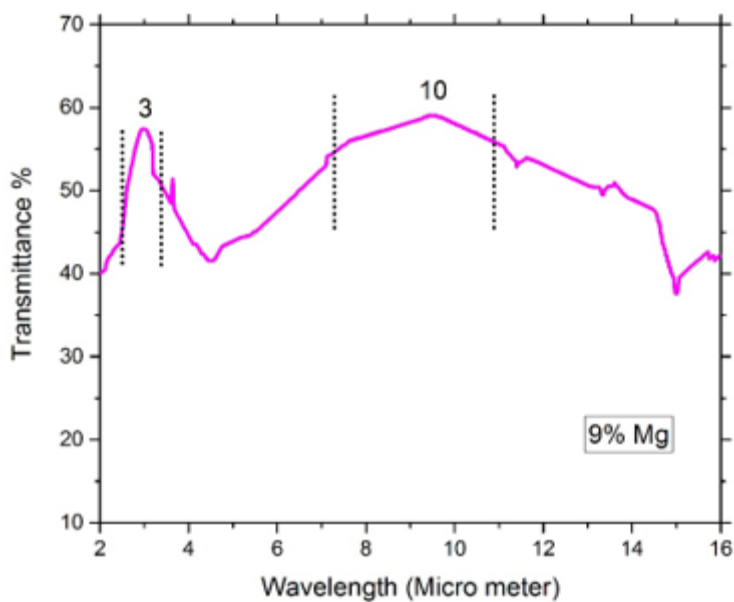
آنالیز UV

طیف‌های تراگسیل فیلم‌های نازک ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاینده نهشت شده بر بستر ژرمانیوم Ge مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع، طیف عبوری مربوط به ساختار ZnS-Mg با

درصدهای ۷ و ۹ برای Mg مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قله‌های طیف عبوری لایه‌های مربوطه، نشان دهنده خاصیت پنجره‌ای در بازه‌های مشخص هستند.



شکل ۷: طیف UV برای نمونه ۷ درصد آلاییده با Mg



شکل ۸: طیف UV برای نمونه ۹ درصد آلاییده با Mg

مطابق شکل‌های بالا، طیف عبوری برای لایه مربوط به ZnS-Mg با ۷ و ۹ درصد آلاییدگی بر بستر Ge، وجود دو قله عبوری قوی در ۳ میکرومتر و ۱۰ میکرومتر مشخص است. به عبارت دیگر، در بازه‌های بین ۲,۵ تا ۴ میکرومتر و ۸ تا ۱۲ میکرومتر دو پنجره عبوری شکل گرفته است که بعنوان روزنه‌هایی برای عبور نور با طیف مشخص را فراهم می‌نماید. اما مشخص است که با افزایش آلاییدگی با Mg، میزان طیف عبوری به مقدار کمی کاهش می‌یابد. اما بازه‌های طیف عبوری و قله‌های عبوری جا به جا نمی‌شوند و فقط ارتفاع قله‌های مربوطه با افزایش آلاییدگی ۹ درصد Mg کمی کاهش می‌یابند. بنابراین، لایه‌های نازک ZnS-Mg خاصیت پنجره‌ای در بازه مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی را دارا هستند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه علمی خواص فیزیکی و اپتیکی فیلم‌های نازک ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاییده لایه نشانی شده بر بستر Ge، که به روش سل-ژل چرخشی ساخته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع هدف اصلی، بررسی روش تهیه سل شفاف و پایدار مربوط به ZnS-Mg و ارائه روش ساخت لایه‌های نازک جهت ارزیابی خاصیت پنجره‌ای عبور طیف فروسرخ مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی، بوده است.

همانطور که پیشتر ذکر کردیم با استفاده از دوربین‌های فروسرخ می‌توان اهداف نظامی را در میدان جنگ شناسایی و مورد هدف قرار داد. از جمله این کاربردهای می‌توان به موشک‌های رهگیر گرمایی، تانک‌ها، هواپیماها، پهبادها و ابزارهای نظارتی و تشخیصی که همگی از امواج فروسرخ تابش شده از جسم مورد نظر جهت رهگیری آن استفاده می‌نمایند، اشاره نمود. با توجه به اینکه از نظر نظامی جنبه‌های نظارتی و تشخیصی دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. پیدا کردن هدف‌های نظامی در میدان جنگ و رصد این اهداف در شرایط جوی و محیطی متفاوت و سخت، نقش تعیین کننده‌ای را دارا هستند. یکی از مهمترین بخش‌ها، بررسی خواص مواد و ترکیبات معدنی در راستای استفاده و بهبود این تجهیزات است. ضرورت این گونه از بررسی‌ها تا جایی است که در صورت عدم وجود مطالعات کافی ما هرگز نمی‌توانیم در ساخت اینگونه از تجهیزات پیشرفته پشتناز باشیم. تمرکز اصلی ما در این پژوهش کمک به رفع ایرادات ساختاری مربوط به ترکیبات با خواص پنجره‌ای برای عبور امواج فروسرخ بوده

است. بررسی‌هایی از این نوع نهایتاً می‌توانند به روند استفاده و ساخت این ترکیبات جهت ساخت دوربین‌های فروسرخ جهت استفاده در تجهیزات نظامی کمک شایانی نماید. بهترین شرایط مربوط به ساخت سل شفاف و پایدار ZnS-Mg بیان شده و بهترین ترکیبات و شرایط حاصله جهت ساخت این سل‌ها ذکر شده است. به عبارت دیگر، بهترین نسبت مولی مواد، بهترین دما هم‌زدن و بهترین حلال جهت تهیه سل‌های پایدار و شفاف ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاییده ارائه گردیده است. علاوه بر این، بهترین روش و شرایط جهت ساخت و لایه نشانی فیلم‌های نازک ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاییده به روش چرخشی نشان داده شده است. بطور خلاصه، مولفه‌های موثر در ساخت و تهیه سل و لایه نشانی به روش چرخشی از جمله؛ مواد و ترکیبات مورد استفاده در ساخت سل، روش ترکیب مواد مورد نظر، دمای مورد استفاده در ساخت سل، روش لایه نشانی، دفعات لایه نشانی، سرعت لایه نشانی، دمای بازپخت، محیط بازپخت و دیگر مولفه‌ها ارائه گردیده است. بهترین نمونه‌ها از منظر ظاهری در دمای باز پخت ۲۵۰ درجه سانتی گراد تحت گاز آرگون به مدت ۸۰ دقیقه حاصل شدند.

به منظور بررسی پیوندهای شیمیایی ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاییده و ارزیابی خلوص آنها از طیف تبدیل فوریه فروسرخ FTIR برای سل تبدیل به ژل شده، استفاده شده است. در آن بخش نشان داده شده است که نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با نتایج مشابه در دیگر مطالعات دارد [سناپاتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳]. همچنین به خوبی ساختار مدهای ارتعاشی کششی نشان داده شده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که Mg به خوبی در شبکه به جای Zn گنجانده شده است. جهت بررسی کیفیت رشد و ویژگی‌های میکروسکوپی از جمله؛ جهت گیری بلوری، ساختار بلوری و شکل گیری بلوری فیلم‌های نازک ZnS-Mg ۷ و ۹ درصد آلاییده از طیف پراش پرتو اشعه ایکس XRD استفاده شده است. همچنین، در آن بخش نشان داده شده است که جهت گیری ترجیحی در بلورهای لایه‌های نازک و وابستگی آنها به بستر به چه شکلی است. مطالعات مشابه انجام شده صحت این بخش از کار را نیز نشان می‌دهد [فیروززیر^۲ و همکاران، ۲۰۱۳]. در بررسی طیف عبوری UV-VIS فیلم‌های نازک ZnS-Mg

^۱ Senapati^۲ Firoozifar

۷ و ۹ درصد آلاینده بر بستر ژرمانیوم Ge محدوده طیف عبوری پرتو فروسرخ مطالعه شده است. در واقع، قله‌های مربوطه در طیف عبوری فیلم‌های نازک نشان دهنده وجود خاصیت پنجره‌ای در نمونه‌ها هستند. مطابق شکل‌های مربوطه، وجود دو قله در دو محدوده طیف عبوری ۲٫۵-۵ میکرومتر و ۸-۱۲ میکرومتر منطبق با هدف اصلی طرح پژوهشی است. در واقع آنها دو پنجره و روزنه اصلی در طیف عبور فروسرخ هستند. نتایج پژوهش‌های مشابه صحت نتایج بدست آمده را نیز نشان می‌دهند [فیروزیزفر و همکاران، ۲۰۱۳]. بنابراین، حفظ خاصیت پنجره‌ای عبوری پرتو نور در طول موج‌های مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی فروسرخ دور در فیلم‌های نازک ZnS-Mg بر بستر Ge نشان داده شده است.

فهرست منابع

- Christian E. Torgersen, David M. Price, Hiram W. Li, Bruce A. McIntosh. (1999). "Multiscale thermal refugia and stream habitat associations". Ecological Applications. 9: 301.
- Willardson, R. K., Weber, E. R., Skatrud, D. D., & Kruse, P. W. (1997).
- H. A. Gebbie, W.R. Harding, C. Hilsum, A. W. Pryce and V. Roberts, 1951.
- "Atmospheric Transmission in the 1 to 14 Region", Proc. Roy. Soc, A206.
- Tianhong Z. et. al. (2022). "Self-recoverable near-infrared mechanoluminescence from ZnS:Mn by controlling manganese clusterization". Materials and Design. 224. 111407.
- Suotao D. et al. (2022). "Research on 5.5 μm Infrared Filter Applied to Infrared Thermometer". IEEE 7th Optoelectronics Global Conference. Doi: 10.1109/OGC55558.2022.10051024.

Zhang F. et.al. (2020). "Direct femtosecond laser writing of inverted array for broadband antireflection in the far-infrared". Optics and Lasers in Engineering. 129. 106062.

D. C. Harris, "Durable 3-5 micro meter-Infrared Transmitting Window Materials", (1998). Infrared Phys. Technol., 39, 185-201.

P. A Temple, (1985). "Thin-Film Absorptance Measurement Using Laser Calorimetry", in Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando, Florida.

R. G Schlecht, C. I. Zanelli, A. M. Schecht, P. F. Bordui, C. D. Bird and R. Blachman, (1992). Single Crystal Growth Optimization of Magnesium-Doped Lithium Niobate, Army Materials Technology Laboratory Report MTL.

M. Nilkar, F. Ghodsi, A. Abdolazadeh Ziabari, (2015). Applied Physics A, 118, 1377-1386.

D.A. Reddy, C. Liu, R. Vijayalakshmi, B. Reddy, (2014). Journal of alloys and compounds, 582, 257-264.

K. Raja, P. Ramesh, D. Geetha, (2014). Spectrochimica acta part A: molecular and biomolecular spectroscopy, 131, 183-188.

M. Ashokkumar, A. Boopathyraja, (2017). "Structural and optical properties of Mg doped ZnS quantum dots and biological applications", Superlattices and Microstructures, YSPMI 5340.

U. Senapati, D. Jha, D. Sarkar, (2013). Research Journal of Physical Sciences, ISSN, 2320, 4796.

S. Firoozifar, A. Behjat, E. Kadivar, S. Ghorashi, M.B. Zarandi, (2011). Applied surface science, 258. 818-821