



## بررسی فیلم‌های نازک ZnS-Mg تهیه شده با روش سل-ژل

مهدی غلام‌پور، مهدی سیمیری، و سبحان کاظم‌پور ایشکاء

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران

پست الکترونیکی: sobhan.kazempour1989@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰)

### چکیده:

در این مقاله، جنبه‌های مختلف جهت ساخت لایه‌های نازک ZnS و ZnS-Mg لایه نشانی شده بر بستر ژرمانیوم Ge به روش سل-ژل مورد مطالعه قرار گرفت. هدف اصلی، بررسی حفظ خاصیت پنجره‌ای فیلم‌های ZnS-Mg بود که می‌تواند جهت استفاده در سامانه‌های تصویربرداری حرارتی فرورسرخ مورد استفاده قرار بگیرد. در ابتدا روش ساخت سل‌های شفاف و پایدار ZnS و ZnS-Mg مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، بهترین نسبت مواد، بهترین دما و بهترین شرایط تهیه سل‌های ZnS و ZnS-Mg ارائه شد. سپس مؤلفه‌های مؤثر در لایه نشانی فیلم‌های نازک بر بستر ژرمانیوم Ge به روش چرخشی مورد بررسی قرار گرفت. این مؤلفه‌ها شامل بهترین سرعت چرخش، بهترین دمای خشک‌سازی و بهترین دمای بازپخت تحت گاز آرگون بوده است. در ادامه با انجام روش‌های مشخصه‌یابی همچون طیف‌سنجی تبدیل فوری FTIR، طیف‌سنجی پرتوایکس XRD و طیف سنج عبوری UV-VIS به بررسی پیوند شیمیایی، ساختار بلوری، خواص اپتیکی و پنجره‌ای عبور طیف فرو سرخ فیلم‌های نازک ZnS-Mg لایه نشانی شده بر بستر ژرمانیوم Ge، پرداخته شده است. نهایتاً، حفظ و وجود خاصیت پنجره‌ای طیف عبوری فرورسرخ در فیلم‌های نازک ZnS-Mg نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** نانوساختار، فیلم نازک، سولفور روی، منزیوم، سل-ژل، فرو سرخ

### ۱. مقدمه

دوربین‌های فرورسرخ در دو محدوده طیفی ۳-۵ و ۸-۱۲ میکرومتر حساس هستند. در واقع آنها دو پنجره و روزنه اصلی در طیف عبور فرورسرخ دارند. این سامانه‌ها 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 [۱]. محدوده طول موج فرورسرخ با محدوده طول موج دید در شب که در بازه ۴/۰-۱ میکرومتر است، متفاوت است [۲-۵]. از آنجایی که در ساخت دوربین‌های حرارتی فرورسرخ دور از خاصیت پنجره‌ای مواد، جهت تفکیک امواج فرورسرخ در بازه‌های مشخص استفاده می‌شود، یکی از بهترین ترکیبات مورد استفاده در ساخت این نوع از دوربین‌ها ZnS

تمامی اجسام در دمای بالاتر از صفر مطلق تابش فرورسرخ دارند. از طریق این تابش‌ها می‌توان دمای اجسام را اندازه‌گیری کرد. دوربین‌های فرورسرخ در دو محدوده امواج با طول موج بلند و متوسط در زمینه‌های مختلف در ابزارهای نظارتی و تشخیصی کاربرد دارند. بررسی خواص مواد و ترکیبات معدنی در راستای استفاده و بهبود این تجهیزات یکی از مهم‌ترین موارد است. همچنین، با توجه به خواص متعدد ZnS و Mg در زمینه‌های اپتیکی، این مواد به طور مستقیم و جداگانه نیز خاصیت پنجره‌ای عبور امواج فرورسرخ را دارند [۱].

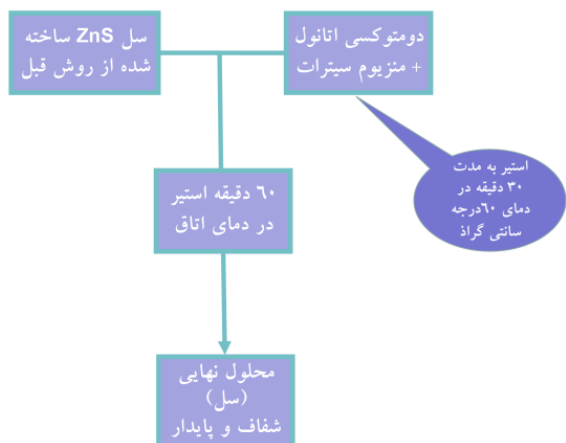
لوله‌ها، نانو تسمه‌های یک بعدی و نانو صفحات دو-بعدی به دلیل خواص ویژه‌ای که در این مقیاس در مقایسه با حالت کپه‌ای دارند، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۳-۱۵]. علاوه بر این، با کاهش ابعاد یک ماده در مقیاس نانومتری، درصد زیادی از اتم‌ها در سطح قرار می‌گیرند که به طور قابل توجهی خواص ساختاری و اپتیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در میان تمام نیمه رساناهای معدنی، ZnS یکی از مواد الکترونیکی و نوری مهم با کاربردهای برجسته در حسگرهای نوری-UV، حسگرهای گاز، تولید کننده انرژی پیزوالکتریک، تصویر برداری زیستی، فوتوکاتالیست در حذف آلاینده‌های محیطی، سلول‌های خورشیدی، دستگاه‌های نوری، لیزرها، دیودها، ترانزیستورها و پنجره‌های فرسرخ است [۱۶-۱۹]. همچنین جالب است که به خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری ZnO، ZnS، Mg-ZnO و ZnS-Mg از جنبه‌های مختلف و کاربردی پیشرفته در اپتوالکترونیک و ذخیره‌سازی انرژی که در پژوهش‌های متعدد نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اشاره کنیم [۶ و ۲۷-۲۰].

تاکنون روش‌های ساخت مختلفی برای تولید لایه‌های نازک ZnS مانند پلاسمای حرارتی، روش رسوب همزمان، روش هیدروترمال و روش سل-ژل توسعه داده شده است. اما در این میان، روش سل-ژل از این جهت که میزان دسترسی به تجهیزات آزمایش آن راحت‌تر است و هزینه‌های آن نیز در مقایسه با روش‌های دیگر کمتر است، مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۲۸-۳۱]. استفاده از خاصیت پنجره‌ای ZnS در عبور و تفکیک امواج فرسرخ در ساخت دوربین‌های حرارتی فرسرخ بسیار مورد توجه است [۹-۶]. اما به علت مقاومت مکانیکی پایین ZnS، تلاش برای افزایش مقاومت مکانیکی آن ادامه دارد. آلایش ZnS توسط Mg می‌تواند باعث افزایش مقاومت مکانیکی آن شود [۳۲-۳۵]. در واقع، در این پژوهش سعی بر این است که با آلایش ZnS با Mg که موجب افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌شود [۳۲-۳۵]، خاصیت پنجره‌ای آن حفظ شود و حفظ این خاصیت را در لایه‌های نازک ZnS-Mg لایه نشانی شده بر بستر ژرمانیوم Ge از جنبه‌های فیزیکی و اپتیکی مورد بررسی قرار گیرد.

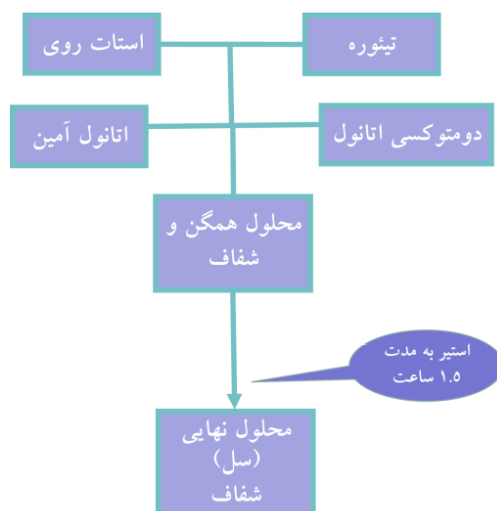
یا سولفید روی است. البته طیف وسیع از مواد و ترکیبات دیگر در ساخت این نوع از دوربین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله آنها می‌توان به ترکیباتی شامل Mg، ZnS و دیگر ترکیبات که در پژوهش‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اشاره کرد [۹-۶]. در موادی که خاصیت پنجره‌ای دارند و تابش‌هایی با طول موج‌های مشخص را از خود عبور می‌دهند، حالت تک بلوری با ساختار مکعبی در مقایسه با بلورهای غیر مکعبی ترجیح داده می‌شوند تا با عبور نور از پنجره، تصاویر متعددی ایجاد نشود. به عبارت دیگر ساختار بلوری مکعبی برای کاهش پراکندگی نوری ترجیح داده می‌شود [۱۰].

از طرف دیگر باید توجه کرد که تابش فرسرخ در برخورد با موادی که خاصیت پنجره‌ای دارند طی فرایندی که باعث تحریک ارتعاشات اتم‌ها می‌شود، در بازه‌ای به طور حداکثری جذب می‌شوند. ناحیه‌ای که نشان دهنده خاصیت پنجره‌ای در مواد است بین دو ناحیه با جذب قوی قرار دارد. در واقع روزه‌ای شکل می‌گیرد که نور فرسرخ را در طول موجی مشخص از خود عبور می‌دهد. به عنوان مثال، برای سولفید روی یا همان ZnS خاصیت پنجره‌ای در حدود ۱۱ میکرومتر است [۱۱]. اگر به دنبال موادی هستیم که خاصیت پنجره‌ای با طول موج بلند دارند، باید به دنبال ترکیباتی با اتم‌های سنگین بگردیم. اما مشکل اینجاست که پیوندهای شیمیایی درون بلور برای اتم‌های سنگین‌تر، ضعیف‌تر هستند. بنابراین مواد ساخته شده از عناصر سنگین‌تر، خواص مکانیکی ضعیف‌تری نسبت به مواد ساخته شده از اتم‌های سبک‌تر دارند. موادی که خاصیت انتقال امواج با طول موج بلند را دارند، عموماً ضعیف‌تر و نرم‌تر از مواد با خاصیت انتقال امواج با طول موج میانی هستند. تقریباً همیشه بین به دست آوردن خاصیت انتقال امواج با طول موج بلند و از دست دادن خواص مکانیکی مطلوب یک رابطه معکوس وجود دارد [۱۲].

در سال‌های اخیر، توسعه بسیار زیادی در نانو ساختارهای بسیار نازک نیمه رسانا رخ داده است. انواع نانو ساختارهای بسیار نازک از جمله، نانوذرات صفر-بعدی، یک-بعدی، نانو سیم‌ها، نانو



شکل ۲. روش ساخت سل شفاف و پایدار ZnS-Mg.



شکل ۱. روش ساخت سل شفاف و پایدار ZnS.

## ۲. روش ساخت سل‌های ZnS و ZnS-Mg

در ابتدا سعی شده است که شرایط ساخت بهترین سل شفاف و پایدار ZnS و ZnS-Mg مشخص شود. در واقع مطابق شکل ۱ با انتخاب نسبت مولی ۱ به ۲ برای Zn به S و تهیه سل مربوطه به صورت ترکیب تیوره به عنوان منبع سولفور، استات روی به عنوان روی، اتانول آمین به عنوان پایدارساز و دومتوکسی اتانول به عنوان حلال اقدام شده است. این محلول به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی تحت دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده شده است. همچنین، این محلول بار دیگر به مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق با همزن مغناطیسی هم زده شده است. محلولی شفاف حاصل شد. سل نهایی، بعد از ۲۴ ساعت استراحت کاملاً شفاف و قابل قبول بود. این سل به دست آمده، سل نهایی است که برای ساخت لایه‌های نازک ZnS بر بستر Ge از آن استفاده شده است.

سپس جهت ساخت سل ZnS-Mg اقدام شده است. پس از انجام آزمایش‌های متعدد و کار با مواد مختلف، نهایتاً ترکیب زیر حاصل شده است. مطابق شکل ۲، ابتدا دو متوکسی اتانول با منزیوم سیترات در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی مخلوط شده است. سپس سل ZnS به دست آمده از مرحله قبل با محلول مربوطه مخلوط شده است. همچنین 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 می‌شود. به همین ترتیب سل ZnS-Mg با درصد‌های آلییدگی ۳ و ۵ تهیه شده است.

همچنین، لایه نشانی برخی از فلزات واسطه می‌تواند تا حد زیادی خواص ساختاری، نوری و مکانیکی ZnS را اصلاح کند [۳۲-۳۴]. در این راستا، می‌توان به پژوهش‌های مشابهی که به بررسی خواص ساختاری، الکتریکی، نوری و اپتوالکتریکی نانو ساختارهای ZnO و ZnS آلییده شده با آلومینیم یا آهن انجام گرفته است، اشاره کرد [۳۶ و ۳۷]. از آنجایی که شعاع یونی Mg در حدود ۵۷٪/۰ انگستروم و بسیار نزدیک به شعاع یونی Zn که در حدود ۶۰٪/۰ انگستروم است، Mg به راحتی می‌تواند در شبکه ZnS به جای Zn قرار بگیرد. در این پژوهش سعی بر این است که خواص پنجره‌ای ZnS-Mg مورد بررسی قرار بگیرد. در این راستا، به لایه نشانی ZnS-Mg بر بستر Ge به روش سل-ژل پرداخته خواهد شد. علاوه بر این، با بررسی‌های اپتیکی و فیزیکی حفظ خاصیت پنجره‌ای عبور فرورسرخ که می‌تواند در دوربین‌های حرارتی فرورسرخ دور مورد استفاده قرار بگیرد، نشان داده خواهد شد.

در ابتدا، به روش ساخت سل‌های ZnS و ZnS-Mg پرداخته خواهد شد. سپس، بهترین شرایط لایه نشانی لایه‌های نازک ZnS-Mg بر بستر ژرمانیوم Ge ارائه خواهد شد. در گام بعد، با تحلیل روش‌های مشخصه یابی FTIR، XRD و طیف عبوری UV-VIS به بررسی خواص فیزیکی و اپتیکی لایه‌های ساخته شده پرداخته خواهد شد. در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

محدوده  $500-4000 \text{ cm}^{-1}$  قرار داده شده است. در واقع، سل ZnS-Mg را طی فرایندی به ژل تبدیل کرده و سپس طیف تبدیل فوری<sup>۱</sup> فرورسرخ از این نمونه تهیه شده است.

جهت بررسی و مشخصه‌یابی ترکیبات شیمیایی و ارزیابی خلوص سل ZnS-Mg، طیف تبدیل فوری<sup>۱</sup> فرورسرخ FTIR مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مقادیر قله‌های به دست آمده مطابقت خوبی با مقادیر گزارش شده دارد [۳۸ و ۳۹]. از شکل ۳ می‌توان دریافت که تغییرات واضحی در موقعیت و اندازه قله‌های FTIR به وجود آمده است. این امر نشان می‌دهد که منیزیم Mg در ZnS گنجانده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده است یک نوار پهن در ناحیه  $3290-3610 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به مد ارتعاشات کششی یک گروه هیدروکسیل است [۴۰]. قله‌ها در محدوده  $1690 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات خمشی H-O-H در شبکه ZnS هستند که می‌توان آنها را به وجود رطوبت در محیط نسبت داد [۴۱]. در نمودارهای ZnS آلاینده شده با Mg نوارهای گسترده در  $1542-1480 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی Mg-O است؛ در حالی که در نمونه ZnS بدون آلاینش این نوارهای گسترده وجود ندارد. همچنین باید ذکر کرد که دره موجود در  $677 \text{ cm}^{-1}$  مرتبط به ارتعاشات ZnS است. این دره با افزایش آلاینش Mg ضعیف شده و به سمت بسامدهای کوچک‌تر میل می‌کند. با توجه به این که 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 [۴۲ و ۴۳].

#### ۲.۴. طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس XRD

برای بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی و کیفیت رشد ساختار بلوری فیلم‌های نازک ZnS و ZnS-Mg بر بستر ژرمانیوم Ge، از طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس استفاده شده است.

### ۳. روش ساخت فیلم‌های لایه نازک ZnS- و ZnS-Mg

بعد از بررسی‌های فراوان جهت پیدا کردن بهترین روش و شرایط برای تهیه فیلم‌های نازک ZnS و ZnS-Mg بر بستر Ge به روش سل-ژل، روش چرخشی حاصل شده است. در روش چرخشی با سرعت  $3000 \text{ RPM}^1$  لایه نشانی صورت گرفته است. فیلم‌های مربوطه بعد از هر بار لایه نشانی به مدت ۲۰ دقیقه در دمای  $150^\circ$  درجه سانتی‌گراد 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 شده است. در انتها نیز فیلم‌های ساخته شده در کوره تحت دماهای مختلف تحت بازپخت قرار گرفتند.

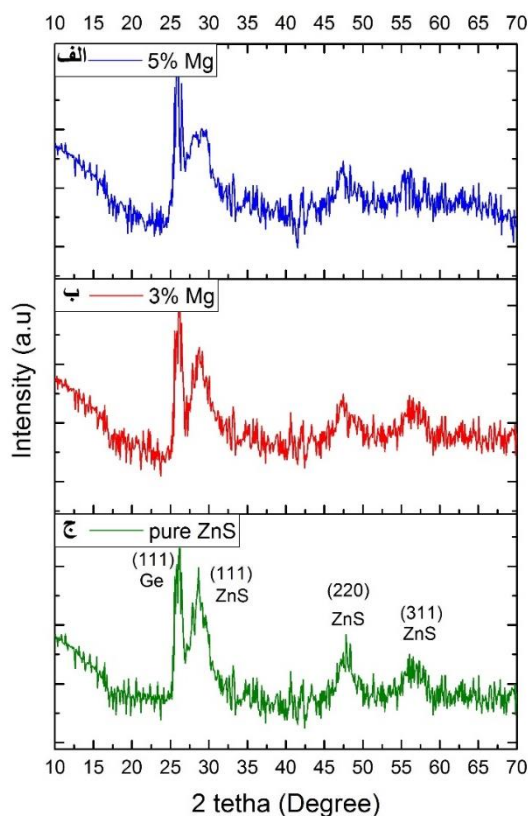
بهترین نمونه‌ها از منظر ظاهری در دمای باز پخت  $250^\circ$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۰ دقیقه حاصل شدند. البته در مشخصه‌یابی XRD نمونه‌هایی که تحت هوا باز پخت شده بودند، به جای ZnS، قله‌های ZnO مشاهده شده است. بنابراین، در نهایت برای رسیدن به قله‌های ZnS مجبور به بازپخت نمونه‌ها تحت گاز آرگون با دمای  $250^\circ$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۰ دقیقه شدیم. جهت ساخت و تهیه فیلم‌های نازک ZnS و ZnS-Mg بر بستر ژرمانیوم Ge، ابتدا سل‌های مربوطه آماده شده است. در گام بعد، با در نظر گرفتن بهترین شرایط به دست آمده که در بالا اشاره کردیم، به روش لایه نشانی چرخشی پرداختیم. جهت ساخت فیلم‌های مربوطه، لایه نشانی را برای ZnS و ZnS-Mg با درصدهای ۳ و ۵ بر بستر Ge انجام گرفته است. فیلم‌های تهیه شده از کیفیت ظاهری خوبی برخوردار بودند.

### ۴. نتایج بررسی ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی

#### ۴.۱. طیف‌سنجی تبدیل فوری<sup>۱</sup> فرورسرخ FTIR

جهت تشخیص و تأیید پیوندهای شیمیایی برای سل ZnS-Mg، از طیف تبدیل فوری<sup>۱</sup> فرورسرخ استفاده شده است. در شکل ۳، طیف FTIR برای سل ZnS-Mg با درصدهای مختلف Mg در

<sup>1</sup> RPM: Round Per Minute

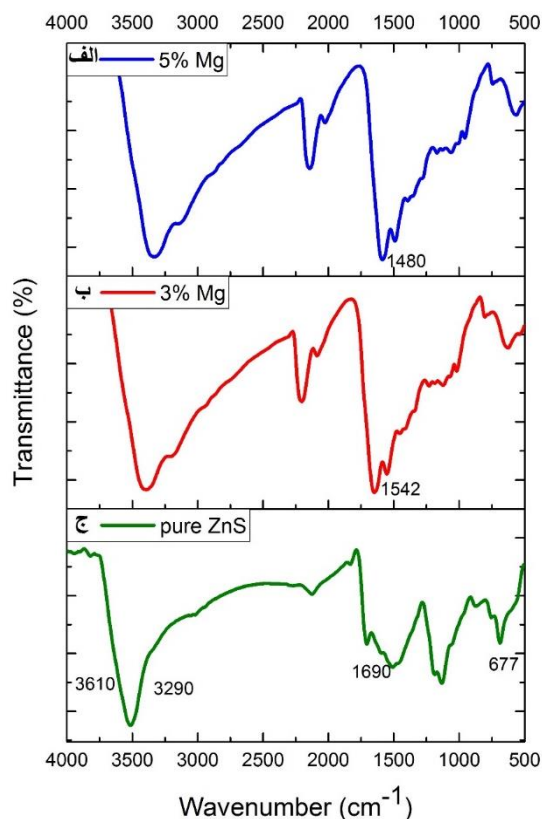


شکل ۴. طیف XRD برای لایه نازک ZnS-Mg بر بستر Ge (الف) ZnS خالص، (ب) نمونه ۳ درصد آلیاژده با Mg، و (ج) نمونه ۵ درصد آلیاژده با Mg.

از آنجایی که هیچ قله‌ای که نشان دهنده ناخالصی Mg است، مشخص نشده است، این امر نشان دهنده وجود یک تک فاز و جایگزینی Mg با Zn در شبکه بلوری است. باید توجه کرد که آلیاژ Mg باعث کند شدن رشد بلورکها می‌شود. این امر ناشی از بی نظمی و تنش وارده بر شبکه به علت واردسازی یون‌های Mg در شبکه ZnS است. در واقع، افزایش غلظت ناخالصی باعث کاهش اندازه بلورک می‌شود که این امر خود را به صورت افزایش پهنای قله با افزایش Mg، نشان می‌دهد.

#### ۳.۴. طیف سنج عبوری UV-VIS

در این بخش، طیف‌های عبوری فیلم‌های نازک ZnS-Mg لایه نشانی شده بر بستر ژرمانیوم Ge مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع، طیف عبوری مربوط به ساختار ZnS و ZnS-Mg با درصدهای ۳ و ۵ برای Mg مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قله‌های طیف عبوری لایه‌های مربوطه، نشان دهنده خاصیت پنجره‌ای در بازه‌های مشخص است.



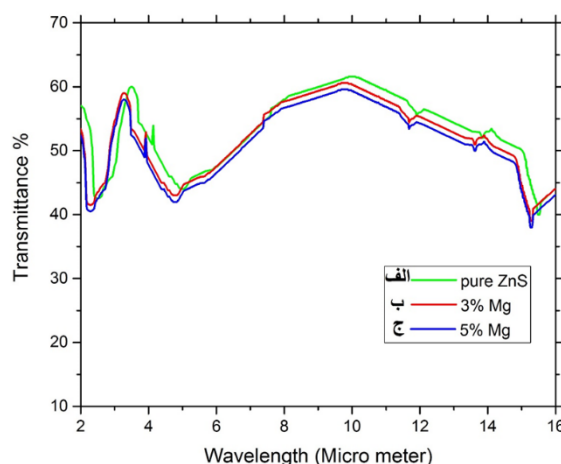
شکل ۳. طیف FTIR برای ZnS و ZnS-Mg (الف) ZnS خالص، (ب) نمونه ۳ درصد آلیاژده با Mg، و (ج) نمونه ۵ درصد آلیاژده با Mg.

در شکل ۴، طیف پراش پرتو ایکس فیلم‌های نازک ZnS-Mg در درصدهای ۳ و ۵ آلیاژده شده با Mg بر بستر ژرمانیوم Ge به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده است، راستاهای ارجح (۱ ۱ ۱)، (۰ ۲ ۰) و (۳ ۱ ۱) قله‌های پراش مربوط به ZnS هستند. در تمامی نمونه‌ها، قله مربوطه به  $2\theta = 28.5^\circ$  است 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 به صورت (۱ ۱ ۱) در شکل ۴ نشان داده شده است که قوی‌ترین قله را در بین همه قله‌ها دارد [۷ و ۴۴]. با افزایش درصد آلیاژده Mg، قله‌های استاندارد ZnS با راستای ارجح (۱ ۱ ۱)، (۰ ۲ ۰) و (۳ ۱ ۱) پهن‌تر شده و کاهش می‌یابند که نشان دهنده کاهش بلورینگی لایه‌های نازک است. علت این امر جایگزینی Mg با Zn در لایه‌ها است. علاوه بر این، در حین تبخیر نمونه‌ها با درصد آلیاژده بیشتر، اتم‌ها زمان کافی برای ایجاد لایه یکنواخت را ندارند. همچنین در نمونه‌های آلیاژده، تغییرات در الگوهای XRD ناشی از نانوذرات تبخیر شده با سرعت بالا در طول فرایند پوشش دهی هستند.

پنجره‌ای عبور طیف فروسرخ مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی، بوده است.

در ابتدا، به بیان انگیزه‌ها، اهمیت و کاربرد نانوساختارهای ZnS و Mg در زمینه‌های مختلف از جمله ابرازهای اپتیکی به خصوص خاصیت پنجره‌ای عبور طیف فروسرخ پرداخته شده است. سپس بهترین شرایط مربوط به ساخت سل شفاف و پایدار ZnS و ZnS-Mg را بیان کرده و بهترین ترکیبات و شرایط حاصله جهت ساخت این سل‌ها ذکر شده است. به عبارت دیگر، بهترین نسبت مولی مواد، بهترین دمای هم زدن و بهترین حلال جهت تهیه سل‌های پایدار و شفاف ZnS و ZnS-Mg ارائه شده است. علاوه بر این، بهترین روش و شرایط جهت ساخت و لایه نشانی فیلم‌های نازک ZnS-Mg به روش چرخشی نشان داده شده است. به طور خلاصه، مؤلفه‌های مؤثر 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 مؤلفه‌ها ارائه شده است. بهترین نمونه‌ها از منظر ظاهری در دمای باز پخت ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت گاز آرگون به مدت ۸۰ دقیقه حاصل شدند.

به منظور بررسی پیوندهای شیمیایی ZnS و ZnS-Mg و ارزیابی خلوص آنها از طیف تبدیل فوریه فروسرخ FTIR (بخش ۴.۱) برای سل تبدیل به ژل شده، استفاده شده است. در آن بخش نشان داده شده است که نتایج به دست آمده مطابقت خوبی با نتایج مشابه در دیگر مطالعات دارد [۳۸ و ۳۹]. 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 و ZnS-Mg از طیف پراش پرتو 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



شکل ۵. طیف عبوری برای لایه نازک ZnS-Mg بر بستر Ge (الف) ZnS خالص، (ب) نمونه ۳ درصد آلییده با Mg و (ج) نمونه ۵ درصد آلییده با Mg.

مطابق شکل ۵، طیف عبوری برای لایه مربوط به ZnS بر بستر Ge، وجود دو قله عبوری قوی در ۳/۵ میکرومتر و ۱۰ میکرومتر را مشخص کرده است. به عبارت دیگر، در بازه‌های بین ۳ تا ۴ میکرومتر و ۸ تا ۱۲ میکرومتر دو پنجره عبوری شکل گرفته است که به عنوان روزنه‌هایی برای عبور نور با طیف مشخص را فراهم می‌کند. مطابق همین شکل، برای لایه‌های آلییده شده با Mg نیز این قله‌های عبوری در بازه‌های ذکر شده وجود دارند. یعنی طیف عبوری لایه‌های ZnS-Mg بر بستر Ge نیز همان قله‌های عبوری را دارند. اما مشخص است که با آلییده شدن با Mg، میزان طیف عبوری به مقدار کمی کاهش می‌یابد؛ اما بازه‌های طیف عبوری و قله‌های عبوری جابه‌جا نمی‌شوند و فقط ارتفاع قله‌های مربوطه با افزایش آلییدگی ۳ درصد و ۵ درصد Mg کمی کاهش می‌یابند. بنابراین، لایه‌های نازک ZnS-Mg خاصیت پنجره‌ای در بازه مورد استفاده در دوربین‌های حرارتی را دارند.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص فیزیکی و اپتیکی فیلم‌های نازک ZnS-Mg 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

میکرومتر منطبق با هدف اصلی مقاله است. در واقع آنها دو پنجره و روزنه اصلی در طیف عبور فرسوخ هستند. نتایج پژوهش‌های مشابه صحت نتایج به دست آمده را نیز نشان می‌دهند [۸-۶ و ۴۴]. بنابراین، حفظ خاصیت پنجره‌ای عبوری پرتو نور در طول موج‌های مورد استفاده در دوربین‌های فرسوخ در فیلم‌های نازک ZnS-Mg نشان داده شده است.

نشان می‌دهد [۷ و ۴۴]. در بررسی طیف عبوری UV-VIS فیلم‌های نازک ZnS و ZnS-Mg بر بستر ژرمانیوم Ge، محدوده طیف عبوری پرتو فرسوخ مطالعه شده است. در واقع، قله‌های مربوطه در طیف عبوری فیلم‌های نازک نشان دهنده وجود خاصیت پنجره‌ای در نمونه‌ها هستند. مطابق شکل ۵، وجود دو قله در دو محدوده طیف عبوری ۳-۴ میکرومتر و ۸-۱۲

## مراجع

1. CE Torgersen, DM Price, HW Li, and BA McIntosh, *Ecological Applications* **9** (1999) 301.
2. BF Andresen, GF Fulop, CM Hanson, and PR Norton, *Infrared Technology and Applications XLI, Proceedings of SPIE, Pts 1 and 2, vol no 9451* (2015).
3. RK Willardson, ER Weber, DD Skatrud, and PW Kruse, *Uncooled infrared imaging arrays and systems, Academic press*, (1997).
4. H Gebbie, W Harding, C Hilsun, A Pryce, and V Roberts, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **206** (1951) 87.
5. RD Hudson, "Infrared system engineering", *Wiley-Interscience New York* (1969).
6. Z Deng, Y Su, W Gong, X Wang, and R Gong, *Optical Materials* **121** (2021) 111564.
7. S Firoozifar, A Behjat, E Kadivar, S Ghorashi, and MB Zarandi, *Applied surface science* **258** (2011) 818.
8. Z Deng, Y Su, W Qin, T Wang, X Wang, and R Gong, *ACS Applied Nano Materials* **5** (2022) 5119.
9. P Sakthivel, G Prasanna Venkatesan, K Subramaniam, and P Muthukrishnan, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **30** (2019) 11984.
10. WJ Tropf and ME Thomas, *Window and Dome Technologies and Materials III, SPIE* (1992) 318.
11. ME Thomas, *Window and Dome Technologies and Materials, SPIE* (1989) 260.
12. D Harris, *Infrared Physics and Technology* **39** (1998) 185.
13. ZL Wang, *Journal of Physics: Condensed Matter* **16** (2004) R829.
14. X Fang, T Zhai, UK Gautam, L Li, L Wu, Y Bando, and D Golberg, *Progress in Materials Science* **56** (2011) 175.
15. X Fang, L Hu, C Ye, and L Zhang, *Pure and Applied Chemistry* **82** (2010) 2185.
16. X Fang, L Wu, and L Hu, *Advanced Materials* **23** (2011) 585.
17. X Fang, Y Bando, M Liao, T Zhai, UK Gautam, L Li, Y Koide, and D Golberg, *Advanced Functional Materials* **20** (2010) 500.
18. R Xing, Y Xue, X Liu, B Liu, B Miao, W Kang, and S Liu, *CrystEngComm* **14** (2012) 8044.
19. M Geszke-Moritz, H Piotrowska, M Murias, L Balan, M Moritz, J Lulek, and R Schneider, *Journal of Materials Chemistry B* **1** (2013) 698.
20. M Alqadi, A Migdadi, F Alzoubi, H Al-Khateeb, and AA Almasri, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **103** (2022) 319.
21. V Ganesh, T AlAbdulaal, M AlShadidi, M Hussien, A Bouzidi, H Algarni, H Zahran, M Abdel-wahab, and M. Mohammed, *I Yahia, s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published* (2022).
22. HW Cheng, P Raghunath, KI Wang, P Cheng, T Haung, Q Wu, J Yuan, YC Lin, HC Wang, and Y Zou, *Nano Letters* **20** (2019) 715.
23. R Vishwakarma, *Ukrainian Journal of Physics* **62** (2017) 422.
24. SMandal, SI Ali, and AC Mandal, *Applied Physics A* **129** (2023) 219.
25. A Jogi, A Ayana, and B Rajendra, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **34** (2023) 624.
26. T Ivanova, A Harizanova, T Koutzarova, B Vertruyen, and R Closset, *Materials* **15** (2022) 8883.
27. DA Reddy, DH Kim, SJ Rhee, BW Lee, and C Liu, *Nanoscale research letters* **9** (2014) 1.
28. S Qadri, E Skelton, A Dinsmore, J Hu, W Kim, C Nelson, and B Ratna, *Journal of Applied Physics* **89** (2001) 115.
29. S Acharya, N Maheshwari, L Tatikondewar, A Kshirsagar, and S Kulkarni, *Crystal growth & design* **13** (2013) 1369.
30. M Chitkara, K Singh, IS Sandhu, and HS Bhatti, *Nanoscale Research Letters* **6** (2011) 1.
31. L Wang, J Dai, X Liu, Z Zhu, X Huang, and P Wu, *Ceramics International* **38** (2012) 1873.
32. T Thi Quynh Hoa, S McVitie, N Hoang Nam, L Van Vu, T Dinh Canh, and NN Long, *Optical Materials* **33** (2011) 308.
33. S Kim, T Lim, M Jung, KJ Kong, KS An, and S Ju, *Journal of luminescence* **130** (2010) 2153.
34. S Muthukumar, *Materials letters* **93** (2013) 223.
35. ZQ Yu, ZM Xu, and XH Wu, *Chinese Physics B* **23** (2014) 107102.
36. H Saadi, Z Benzarti, P Sanguino, Y Hadouch, D Mezzane, K Khirouni, N Abdelmoula, and H Khemakhem, *Applied Physics A* **128** (2022) 691.

37. A Es-Smairi, N Fazouan, EH Atmani, M Khuili, and E Maskar, *Applied Physics A* **127** (2021) 698.
38. U Senapati, D Jha, and D Sarkar, *Research Journal of Physical Sciences*, ISSN 2320 (2013) 4796.
39. P Bandyopadhyay, A Dey, R Basu, S Das, and P Nandy, *Current Applied Physics* **14** (2014) 1149.
40. D Raj, A Dhayal Raj, AA Irudayaraj, R Josephine, M Senthil Kumar, and M Thambidurai, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **26** (2015) 659.
41. M Nilkar, F Ghodsi, and A Abdolazadeh Ziabari, *Applied Physics A* **118** (2015) 1377.
42. K Raja, P Ramesh, and D Geetha, *Spectrochimica acta part A: molecular and biomolecular spectroscopy* **131** (2014) 183.
43. DA Reddy, C Liu, R Vijayalakshmi, and B Reddy, *Journal of alloys and compounds* **582** (2014) 257.
44. A Karaca, S Sağlam, E Bacaksiz, and Özçelik, *Eurasian Journal of Science Engineering and Technology* **3** (2022) 36.