



Research Paper;



Investigating the role of complexing agent in changing the ratio of copper selenide alloy semiconductor for infrared generation in aerospace systems

Semiyeh Chobin¹, Nader Ghobadi², mahmad sadegh abdi moghsudelo³

¹.Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Malayer University, Malayer, Iran

². Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Article Information

Abstract

Accepted:
2025/08/05

Received:
2025/11/16

Keywords:

*CuSe Chemical Bath
Deposition Complex
Agent*

Corresponding Author:
Nader Ghobadi

Email:
nader.ghobadi@gmail.com

Abstract

In this work, nanostructured copper selenide (CuSe) thin films were fabricated using a simple solution-based chemical bath deposition method, which is attractive due to its low cost, readily available precursors, and scalability for potential aerospace sensing applications. In the chemical bath deposition process, growth parameters play a crucial role in determining the physical and electronic properties of the final product. In addition to the concentration of selenium ions, the complexing agent is a key factor affecting film formation and properties. The complexing agent controls the release rate of metal ions in the solution and consequently influences the stoichiometry and electronic structure of the deposited films. It was observed that variations in the concentration of the complexing agent significantly modify the band gap energy. Specifically, increasing the concentration of the complexing agent leads to a reduction in the band gap energy. This behavior can be attributed to the corresponding increase in the effective concentration of free copper ions in the solution, which alters the growth mechanism and electronic structure of CuSe thin films. Therefore, the complexing agent, through its influence on the concentration of metal ions during deposition, plays a fundamental role in tuning the band gap energy, which is important for optimizing these thin films for aerospace sensing applications

Semiyeh Chobin , Nader Ghobadi , mahmad sadegh abdi moghsudelo.(2025). Investigating the role of complexing agent in changing the ratio of copper selenide alloy semiconductor for infrared generation in aerospace systems. *Journal of Aerospace Defense*, Vol4(Issue3), Page89-101.



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۴۰۴
صفحات ۱۰۱-۸۹



مقاله پژوهشی؛

بررسی نقش عامل کمپلکس ساز در تغییر نسبت نیمه‌رسانای آلیاژی سلنید مس

برای آشکارسازی مادون قرمز در سامانه‌های هوافضایی

سمیه چوبین^۱، نادر قبادی^۲، محمدصادق عبدی مقصدلو^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر ایران.

^۳ گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر.

چکیده

اطلاعات مقاله

چکیده

در این کار، لایه‌های نازک نانوساختار سلنید مس (CuSe) با استفاده از یک روش ساده رسوب‌گذاری حمام شیمیایی مبتنی بر محلول ساخته شدند که به دلیل هزینه کم، پیش‌سازهای در دسترس و قابلیت توسعه‌پذیری، از نظر تجاری و نیز برای کاربردهای آشکارسازی هوافضایی جذاب است. در فرآیند رسوب‌گذاری حمام شیمیایی، پارامترهای رشد نقش مهمی در تعیین خواص فیزیکی و الکترونیکی محصول نهایی دارند. علاوه بر غلظت یون‌های سلنیوم، عامل کمپلکس ساز نیز یک عامل کلیدی مؤثر بر تشکیل و خواص فیلم است. عامل کمپلکس ساز، سرعت آزادسازی یون‌های فلزی در محلول را کنترل می‌کند و در نتیجه، بر استوکیومتری، ریزساختار و ساختار الکترونیکی فیلم‌های رسوب‌شده تأثیر می‌گذارد. مشاهده شد که تغییرات در غلظت عامل کمپلکس ساز، انرژی شکاف نواری را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. به طور خاص، افزایش غلظت عامل کمپلکس ساز منجر به کاهش انرژی شکاف نواری می‌شود. این رفتار را می‌توان به افزایش متناظر در غلظت مؤثر یون‌های مس آزاد در محلول نسبت داد که مکانیسم رشد و ساختار الکترونیکی فیلم‌های نازک CuSe را تغییر می‌دهد. بنابراین، عامل کمپلکس ساز از طریق تأثیر خود بر غلظت یون فلزی در طول رسوب‌گذاری، نقش اساسی در تنظیم انرژی شکاف نواری ایفا می‌کند؛ موضوعی که می‌تواند در بهینه‌سازی این لایه‌ها برای کاربردهای آشکارسازی هوافضایی حائز اهمیت باشد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۲۵

کلیدواژه‌ها:

سلنید مس، رسوب‌گیری
حمام شیمیایی، عامل
کمپلکس ساز

نویسنده مسئول:

نادر قبادی

ایمیل:

nader.ghobadi@gmail.com

استناد: نادر قبادی، سمیه چوبین، محمدصادق عبدی مقصدلو. بررسی نقش عامل کمپلکس ساز در تغییر نسبت نیمه‌رسانای آلیاژی سلنید مس برای آشکارسازی مادون قرمز در سامانه‌های هوافضایی، مجله علمی پژوهشی دفاع

هوافضایی سال اول، دوره ۴ (شماره ۳)، صفحه ۱۰۱-۸۹.

۱- مقدمه

خواص نوری نیمه رساناهای نانو ساختار تابع اندازه ذرات است، به عبارتی گاف انرژی نوری این مواد با تغییر اندازه ذرات، تغییر می کند یا به اصطلاح، محدودیت کوانتومی وجود دارد. ویژگی مهم نانوذرات نیمه رسانا، نسبت بالای سطح به حجم و تعداد اتمهای نسبتا کم است. در این کار نشان داده می شود که گاف انرژی نوری در نیمه رساناهای دوتائی با تغییر استوکیومتری فلز و غیرفلز، به شدت تغییر می کند. مشاهده شده است با افزایش درصد اتمی فلز، گاف انرژی نوری کاهش می یابد. این واقعیتی است که تا کنون نادیده گرفته شده است که کوچک تر شدن اندازه گاف انرژی نواری می تواند به دلیل افزایش مقدار یونهای فلزی تشکیل دهنده ترکیب سلیند مس باشد. در کارهای گذشته اغلب کوچک تر شدن اندازه گاف انرژی، به بزرگتر شدن اندازه ذرات نسبت داده می شد ولی کاهش گاف انرژی نواری تا مقدار گاف انرژی مقدار توده ای امکان پذیر است. باید این واقعیت در نظر گرفته شود که استوکیومتری نقش بزرگی در اندازه گذارهای نوری بازی می کند مواد نیمه رسانای کالکوژنیدی مانند سلیند مس به دلیل خواص اپتوالکترونیکی قابل تنظیم و شکاف نواری مناسب، توجه زیادی را برای کاربرد در حسگرها و آشکارسازهای نوری جلب کرده اند در سالهای اخیر، توسعه لایه های نازک با قابلیت تنظیم شکاف نواری برای کاربرد در سامانه های آشکارسازی و حسگری در حوزه هوافضا اهمیت فزاینده ای پیدا کرده است. مواد نانوساختار با قابلیت کنترل خواص الکترونیکی می توانند نقش مهمی در بهبود عملکرد آشکارسازهای نوری و مادون قرمز مورد استفاده در سامانه های هوافضایی ایفا کنند. در این میان، سلیند مس به دلیل ویژگی هایی مانند ضریب جذب بالا، قابلیت تنظیم شکاف نواری و امکان سنتز با روش های کم هزینه، گزینه ای مناسب برای توسعه مواد فعال در آشکارسازهای نوری محسوب می شود [۱-۵].

تکنیک های رسوب فیلم نازک اساس اکثر فرایندهای ساخت قطعات را تشکیل می دهند و از این رو موضوع علاقه مداوم و تحقیقات شدید هستند. قطعات فیلم نازک دارای کاربردهای گسترده ای در زمینه های مختلف مانند ساخت ارایه های فوتودیود منطقه بزرگ، سلول های خورشیدی، فوتورساناتورها، سنسورها و اجزای الکترونیکی (هر دو گسسته و یکپارچه) هستند. مانند روش های تبخیری، فن اوری های تخلیه درخشش، فرایندهای شیمیایی فاز گاز و تشکیل شیمیایی فاز مایع برای تولید فیلم های نازک یکنواخت با ضخامت متغیر از نانومتر تا محدوده میکرون در انواع بسترها بهینه شده است. روش های رسوب محلول فرایندهای نسبتا کم هزینه هستند، اغلب با کیفیت فیلم قابل مقایسه. در میان این روش های شیمیایی، رسوب محلول شیمیایی (CD) که همچنین به عنوان رشد محلول یا رسوب حمام شیمیایی شناخته می شود، از نظر راه اندازی تجربی ساده ترین است [۵-۸].

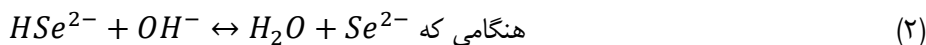
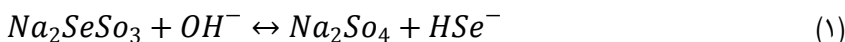
در سال های اخیر، نیمه رساناهای نانومقیاس به دلیل ویژگی های فیزیکی و الکترونیکی متمایز نسبت به مواد حجمی، توجه قابل توجهی در پژوهش ها و کاربردهای فناوری محور به خود جلب کرده اند [۹]. کاهش ابعاد به مقیاس نانو، محدودیت کوانتومی برای حرکت حامل های بار ایجاد می کند که باعث

جابه‌جایی گاف نواری به انرژی‌های بالاتر و تغییر خواص نوری و الکتریکی ماده می‌شود [۱۰]. در سال‌های اخیر، لایه‌های نازک نانوساختار از نیمه‌رساناهای مختلف با گاف نواری قابل تنظیم ساخته شده‌اند. با تغییر پارامترهای رشد، می‌توان بدون تغییر ترکیب شیمیایی اصلی، طیف وسیعی از گاف‌های انرژی را به دست آورد. در فرآیند لایه‌نشانی حمام شیمیایی، شکل‌گیری لایه عمدتاً از طریق رشد نانوذرات در فاز محلول و استقرار آن‌ها روی زیرلایه صورت می‌گیرد. بنابراین با کنترل شرایط سنتز، می‌توان اندازه، شکل و مورفولوژی نانوساختارها را به دلخواه تنظیم کرد. سلنید مس نانوساختار به عنوان یکی از نیمه‌رساناهای پرکاربرد، خصوصاً در حوزه اپتوالکترونیک و سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی، مورد توجه است. این ماده به دلیل تولید اکسایتون‌های چندگانه، شعاع بزرگ بوهر اکسایتونی و قابلیت تنظیم دقیق گاف نواری، پتانسیل بالایی در بهبود تبدیل انرژی نوری به الکتریکی دارد [۱۵-۱۱]. گاف انرژی سلنید مس در محدوده طیف مرئی قرار دارد و با کنترل اندازه نانوذرات می‌توان آن را با طول موج‌های مختلف ناحیه مرئی تطبیق داد؛ قابلیت‌هایی که در بسیاری از سلول‌های خورشیدی آلی-معدنی متداول به راحتی قابل دستیابی نیست. ویژگی‌های نوری و ساختاری لایه‌های نازک CuSe تهیه‌شده به روش حمام شیمیایی، به شدت به شرایط رشد وابسته است. پارامترهایی مانند غلظت پیش‌ماده‌ها، مقدار pH و دمای فرآیند، نقش مهمی در ضخامت لایه، اندازه نانوذرات و مقدار گاف انرژی نواری ایفا می‌کنند. به طور کلی، سامانه‌های نانومقیاس به دلیل اثرات محدودیت کوانتومی، تغییرات چشمگیر در گاف انرژی و پاسخ نوری را نشان می‌دهند که آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای پیشرفته الکترونیک و فوتونیک تبدیل کرده است. [۱۶].

۲- مواد و روش‌ها

فهم درخوری از روش لایه‌نشانی به کنترل رشد از نانوذرات به لایه نازک نانوساختار دلخواه کمک می‌کند. لایه‌های نازک کادمیم سلنید بر روی زیرلایه‌های ایندیوم تین اکسید (ITO) به ابعاد $۲۶ \times ۷/۶ \times ۲$ میلی‌متر مکعب رشد داده شدند. تمیزی زیرلایه نقش مهمی در لایه‌نشانی لایه‌های نازک ایفا می‌کند. از این رو، قبل از لایه‌نشانی، زیرلایه‌ها با پاک‌کننده شست و شو داده شدند و با آستون آبکشی شدند سپس توسط دستگاه التراسونیک با محلول آب دیونیزه و اتانول شست و شو و در نهایت با آب دیونیزه آبکشی شدند و زیرلایه‌ها در خلأ نگه داشته شدند. به منظور تولید یون‌های مس (Cu^{2+})، 25 میلی‌لیتر از نیترات مس ۰۰۷ مولار در بشری شیشه‌ای با گنجایش ۱۰۰ میلی‌لیتر تحت چرخش ثابت ریخته شد و سپس آمونیاک به عنوان عامل کمپلکس ساز به تدریج و قطره قطره وارد محلول شد. در ابتدا محلول نیلی رنگ شد و با اضافه کردن آمونیاک محلول شفاف‌تر شد. سپس، ۲۵ میلی‌لیتر از محلول سلنو سولفات سدیم (Na_2SeSO_3) تازه تهیه شده به عنوان چشمه یون‌های سلنیوم (Se^{2-}) به تدریج به محلول اضافه شد. زیرلایه‌ها به طور قائم درون محلول لایه‌نشانی قرار گرفت. به منظور کنترل نرخ رشد لایه، دمای حمام در مقدار دلخواه ثابت، در دمای اتاق نگه داشته شد. به منظور بررسی pH های

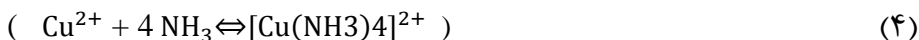
مختلف مقادیر متفاوتی از آمونیاک با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها به محلول وارد شد. در انتهای فرآیند لایه نشانی، زیرلایه ها از حمام شیمیایی در بازه های زمانی مناسب برداشته شدند و با آب دیونیزه و متانول به منظور کنده شدن نانو ذرات کمتر چسبیده شده به زیرلایه شسته شدند. پوشش در طرف پشت لایه ها با پنبه آغشته به اسید هیدروکلریک رقیق شده برداشته شد. سپس لایه ها در هوا خشک شدند و سرانجام در دسیکاتور قرار گرفتند. شکل گیری لایه نازک سلنیدمس بر اساس رها شدن آهسته یون های مس و سلنیوم در محیط آبی و سپس چگالش متوالی بر زیرلایه است. مکانیسم واکنش در لایه نشانی لایه نازک سلنید کادمیم به صورت زیر پیشنهاد شده است [17]:



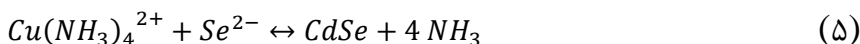
فراتر $Cu(OH)_2$ محلول آمونیاک به محلول نمک مس اضافه می شود، اگر حاصل ضرب حلالیت شروع به تشکیل می شود، یعنی: $Cu(OH)_2$ باشد، رسوب شیری رنگ هیدروکسید کادمیم



رسوب $Cu(OH)_2$ در محلول آمونیاک اضافی حل می شود و کمپلکس یونی تترا-آمین کادمیم $Cu(NH_3)_4^{2+}$ شکل می گیرد.



و سرانجام شکل گیری لایه نازک سلنید کادمیم رخ می دهد:



ضخامت لایه نشانی شده sensitive microbalance با استفاده از رابطه $t = \frac{m}{\rho A}$ اندازه گیری شد، به طوریکه m جرم لایه نشانی شده، A ناحیه نشانی شده لایه و ρ چگالی ماده لایه نشانی شده در شکل حجمی (سلنید مس = 5/۹۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است. انتخاب این غلظت ها براساس به هم پیوستگی لایه ها انتخاب شده است در غلظت های گزارش شده لایه ها پیوستگی و یکنواختی بهتری نسبت به سایر غلظت ها از خود به نمایش می گذاشتند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱ جذب اپتیکی

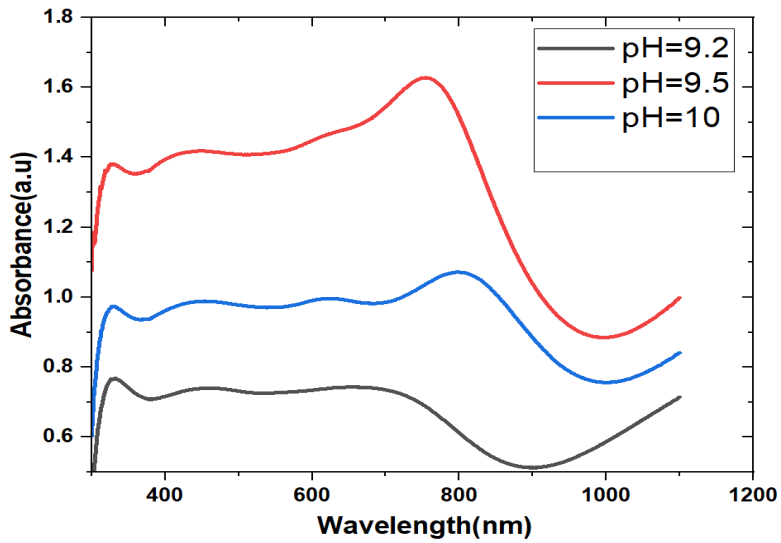
برای بررسی خواص اپتیکی لایه های نازک مس سلنید با استفاده از دستگاه اسپکتروسکوپی UV-Vis، (Perkin Elmer, Lambda25, USA) دردمای اتاق در بازه طول موجی ۱۱۰۰-۱۹۰ نانومتر به منظور نشان دادن تغییرات گاف انرژی نواری نوری با غلظت های مختلف عامل کمپلکس ساز (pH) بررسی شد. داده های جذب با استفاده از معادله معروف زیر برای لبه جذب اپتیکی نزدیک نیمه رساناها آنالیز شدند [18]:

$$\alpha = \frac{B(h\nu - E_g)^n}{h\nu} \quad (6)$$

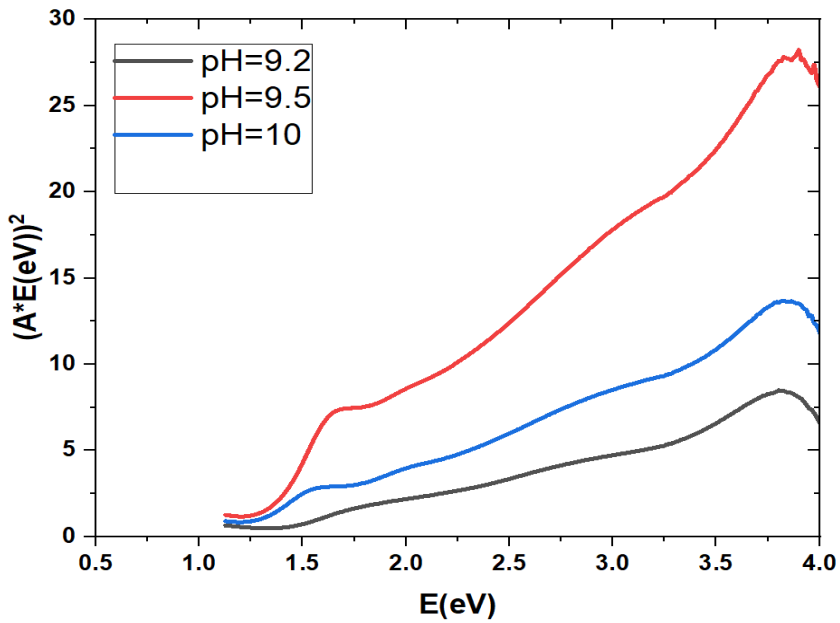
به طوریکه $h\nu$ انرژی فوتون، B ثابت، E_g گاف انرژی نواری نوری و n عددی ثابت است که برای نیمه رساناها با گاف مجاز مستقیم معادل $1/2$ و برای نیمه رساناهای با گاف مجاز غیر مستقیم 2 است. α ضریب جذب است که بوسیله قانون بیر-لمبرت تعریف می شود:

$$\alpha(\lambda) = (2.303 \times A(\lambda))/d \quad (7)$$

در این رابطه d و A به ترتیب ضخامت و جذب لایه هستند [19]. در پژوهش های پیشین، نشان داده شده است که هر لایه گاف انرژی نواری نوری منحصر به فردی دارد و گاف نواری با ضخامت های مختلف فرضی تغییری نمی کند [20-24]. اسپکتروسکوپی جذب اپتیکی رایجترین روش برای جست و جوی اثرات کوانتومی در نیمه رساناهای نانوساختار است. با استفاده از روش ITM نتایج گاف نواری اپتیکی برآورد شدند و نمودار $(A_{\text{hv}})^2$ بر حسب $(h\nu)$ در شکل (۱) نشان داده شده است. برای لایه های نازک کادمیم سلنید به ازای مقادیر مختلف یون غیرفلزی سلنید بهترین برازش خطی با n برابر $1/2$ بدست آمد. کنترل گاف انرژی نوری در این قسمت مربوط به تغییرات غلظت یون کمپلکس ساز است که با تغییر pH نمایش داده شده است. این نکته باید توضیح داده شود که بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شده است. نتیجه مهم این است با توجه به ثابت بودن همه پارامترهای تهیه، افزایش غلظت یون کمپلکس ساز به طور مستقیم گاف انرژی نواری را کاهش می دهد. نکته مهم دیگر این است که لایه ها بر روی ITO نشانده شده است.



شکل ۱. نمودار جذب در مقابل طول موج و برای شرایط درج شده.



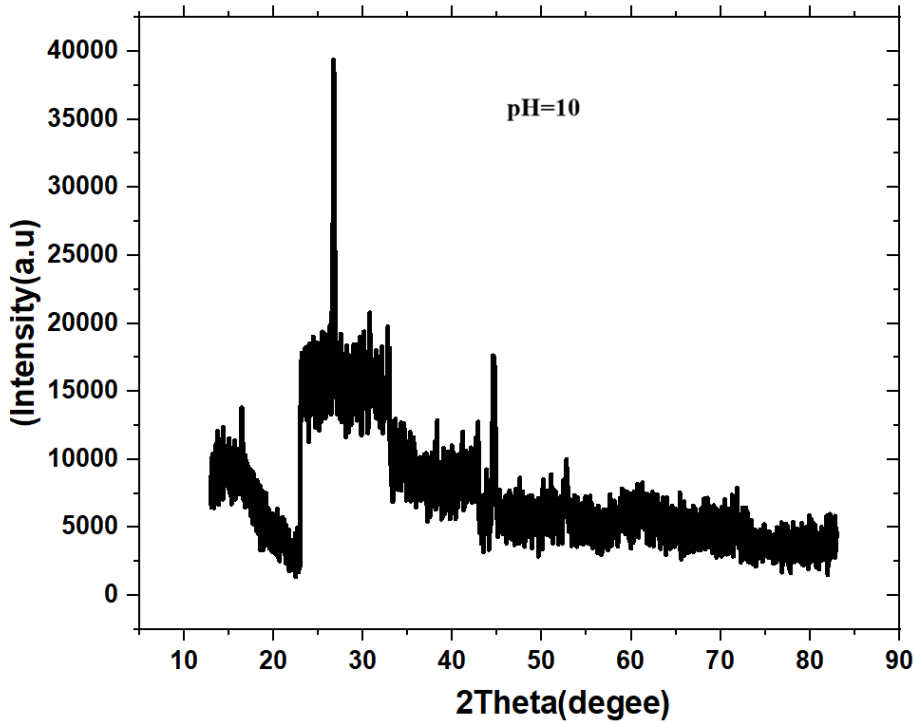
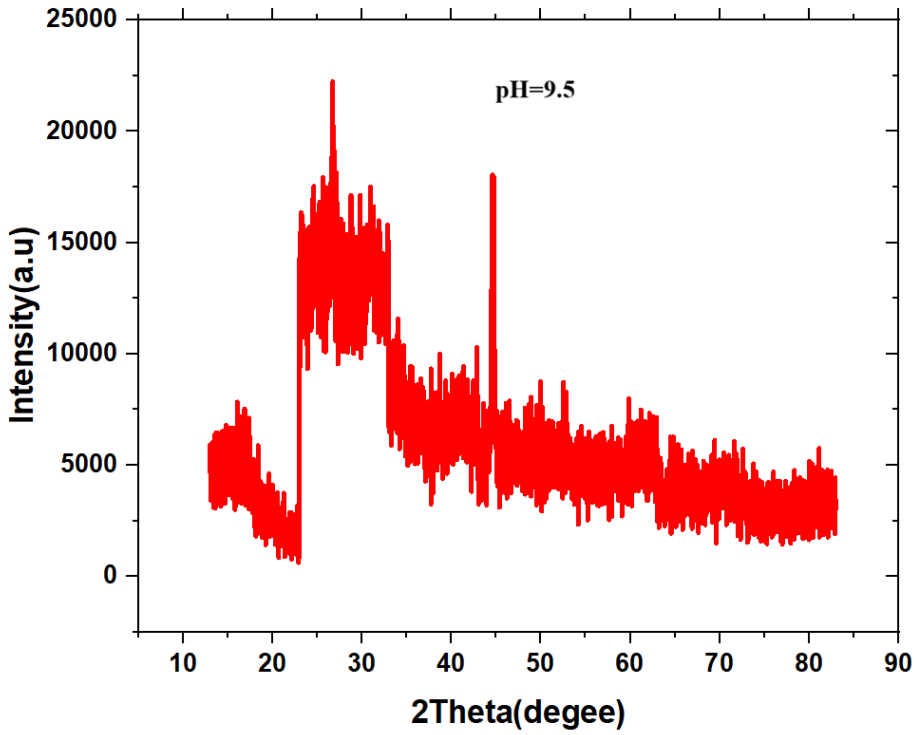
شکل ۲. نمودار جذب در مقابل طول موج و $(A * E(h\nu))^2$ در مقابل $E(eV)$ برای شرایط درج شده.

جدول ۱: گاف انرژی نواری در pHهای متفاوت

	pH=9.2	pH=9.5	pH=10
گاف انرژی نواری	1.29eV	1.24eV	1.17eV

۳-۲- خواص ساختاری و مطالعه XRD

سلنید مس ساختارهای بلوری متنوعی دارد. سلنید مس (CuSe) معروفترین ساختار آن می باشد. نمونه های تهیه شده دارای پیک های مربوط به فاز CuSe هگزاگونا (گروه فضایی: P63/mmc) با ثابت سلول $a=b=0.394$ و $c=0.174$ نانومتر هستند که با JCPDS 00-006-0427 مطابقت دارد. نمونه با pH بالاتر کیفیت بلوری بهتری دارد چون شدت پیکها به مراتب بیشتر است. در pH بالا هسته های تشکیل شده، خوشه های بزرگتری را تشکیل می دهند و ذرات بزرگتر می شوند، مشاهده می شود که با افزایش pH شدت پیکها بیشتر شده است و کیفیت بلوری افزایش پیدا کرده است و این پدیده با کوچک شدن گاف انرژی نواری تطابق دارد زیرا با افزایش اندازه ذرات، گاف انرژی نواری کاهش پیدا کرده است.

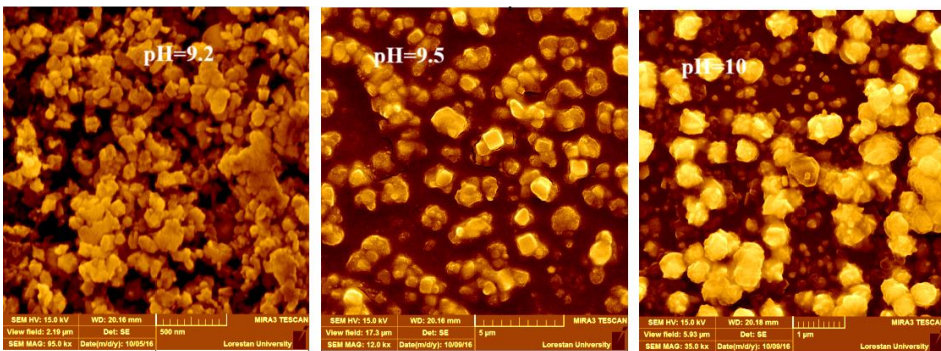


شکل ۳. الگوهای XRD برای CuSe با pH ۹.۵ و ۱۰.

۳-۳- ریخت شناسی و مطالعه SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سلنید مس نانوساختار نشان می‌دهد که مورفولوژی و اندازه ذرات به طور قابل توجهی تحت تأثیر غلظت یون کمپلکس ساز قرار دارد. در غلظت‌های پایین‌تر، ذرات با ابعاد کوچک‌تر و توزیع نسبتاً یکنواخت مشاهده می‌شوند که بیانگر هسته‌زایی سریع‌تر و رشد محدودتر بلورها است. با افزایش مقدار یون کمپلکس ساز، فرآیند رشد بلوری تسهیل شده و ذرات تمایل به بزرگ‌تر شدن و تجمع نسبی نشان می‌دهند. همچنین بهبود مرزدهانه‌ها و افزایش میزان بلورینگی در تصاویر قابل تشخیص است که نشان‌دهنده رشد ساختار منظم‌تر در شرایط غلظت بالاتر کمپلکس ساز می‌باشد.

این تغییرات مورفولوژیکی تأثیر مستقیمی بر خواص نوری نمونه‌ها دارد، به طوری که با افزایش اندازه ذرات و کاهش اثر محدودشدگی کوانتومی، مقدار گاف انرژی کاهش می‌یابد. بزرگ‌تر شدن نانوذرات سبب هم‌پوشانی بیشتر ترازهای انرژی و در نتیجه باریک‌تر شدن گاف انرژی می‌شود. بنابراین، نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی به خوبی با داده‌های اپتیکی همخوانی داشته و نشان می‌دهد که افزایش یون کمپلکس ساز از طریق کنترل رشد بلوری، موجب کاهش گاف انرژی در سلنید مس نانوساختار شده است.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای لایه‌های نازک با یون عامل کمپلکس ساز (pH).

۴- نتیجه‌گیری

در فرایند رسوب شیمیایی از محلول آبی (CD)، کنترل دقیق پارامترهای رشد از جمله pH، دما، غلظت پیش‌سازها و به‌ویژه حضور عامل کمپلکس ساز، برای دستیابی به فیلمی یکنواخت و با کیفیت بالا ضروری است. عامل کمپلکس ساز با برهم‌کنش با کاتیون‌های فلزی و تشکیل کمپلکس‌های پایدار، غلظت یون آزاد فلزی را در محلول کاهش می‌دهد و از آزادسازی ناگهانی آن جلوگیری می‌کند. این آزادسازی تدریجی موجب کنترل سرعت واکنش، جلوگیری از بارش فله‌ای (bulk precipitation) و فراهم شدن شرایط مناسب برای رشد کنترل‌شده فیلم روی بستر می‌شود. کنترل سینتیک آزادسازی یون‌های فلزی، به‌طور مستقیم بر فرایند جوانه‌زنی و رشد بلورها اثر می‌گذارد.

هنگامی که یون‌های فلزی به آرامی آزاد می‌شوند، هسته‌زایی به صورت یکنواخت‌تری رخ می‌دهد و رشد بلوری کنترل‌شده‌تری حاصل می‌شود. این موضوع منجر به کاهش عیوب ساختاری، کاهش تخلخل، بهبود چسبندگی فیلم به بستر و افزایش نظم بلوری می‌گردد. در مقابل، در صورت نبود یا عملکرد نامناسب عامل کمپلکس‌ساز، افزایش ناگهانی یون‌های فلزی آزاد می‌تواند موجب تشکیل ذرات در حجم محلول، رشد نامنظم، افزایش عیوب و ناهمگنی در ساختار فیلم شود. از دیدگاه ساختار الکترونیکی، گاف انرژی نواری ماده به عواملی مانند اندازه دانه‌ها، درجه بلورینگی، تنش شبکه‌ای و میزان عیوب وابسته است. تغییر در اندازه بلورها می‌تواند اثر محبوس‌شدگی کوانتومی (quantum confinement) ایجاد کند که به جابه‌جایی گاف انرژی نواری منجر می‌شود. نتایج نشان داد که کنترل غلظت عامل کمپلکس‌ساز در فرآیند رسوب‌گذاری حمام شیمیایی می‌تواند به عنوان روشی مؤثر برای تنظیم انرژی شکاف نواری و بهبود خواص الکترونیکی لایه‌های نازک CuSe مورد استفاده قرار گیرد. این قابلیت تنظیم خواص اپتوالکترونیکی، پتانسیل استفاده از این لایه‌ها را در کاربردهای آشکارسازی و حسگری در سامانه‌های هو فضایی افزایش می‌دهد.

۵- تشکر و قدردانی

به پاس الطاف بی‌دریغ و همت والایان، صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم می‌دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستیم.

۶- تعارض-منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۷- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۸- منابع

- [1] Optical Properties of Materials and Their Applications. Edited by Jai Singh. John-Wiley & Sons Inc. (1e, 2006)
- [12] Tauc, J, Menth, A: States in the gap. J Non-Cryst Solids 569, (1972) 8–10.
- [2] C. Burda, X. Chen, R. Narayanan and M.A. El-Sayed, Chemistry and Properties of Nanocrystals of Different Shapes, Chem. Rev. 105 (2005) 1025-1102.
- [3] A.L. Efros, M. Rosen, Ann. Rev. Mater. Sci. 30 (2000)475.
- [4] L.E. Brus, Appl. Phys. A. 53 (1991) 465.
- [5] M. Kranjčec, I.P. Studenyak, M.V. Kurik, On the Urbach rule in non-crystalline solids, J. Non-Cryst. Solids, 355 (2009) 54-57.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.03.05>
- [6] K. Tanaka, Minimal Urbach energy in non-crystalline materials, J. Non-Cryst. Solids, 389 (2014) 35-37.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.02.004>
- [7] P.P. Hankare, P.A. Chate, S.D. Delekar, M.R. Asabe, I.S. Mulla, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 67 (2006) 2310-2315.
- [8] C.D. Lokhande, P.M. Gondkar, R.S. Mane, V.R. Shinde, S.-H. Han, Journal of Alloys and Compounds, 475 (2009) 304-311.
- [9] Moradi, S. A. H., Ghobadi, N., & Namvar, F. (2025). Influence of Reduced Graphene Oxide Loading on the Structure, Morphology and Magnetic Properties of Co_{0.5}Mn_{0.3}Cu_{0.2}Fe₂O₄ Nanocomposites. Journal of the Indian Chemical Society, 101868.
- [10] Alborznia, H., Hosseini Moradi, S. Calculation of Reflection Coefficient of Radar Absorbing Composite Lattice Grids Using Silica and Carbon Nanofibers. Aerospace Defense, 2025; 4(1): 121-129.
- [11] Hosseini Moradi S. A., Amirzadeh M. A Comparative Investigation of Caraway and Synthesized Activated Carbon as Highly Effective Adsorbent for Acid Dye. Iranian Chemical Engineering Journal, 2025; 24(140): 53-70. doi: 10.22034/ijche.2024.448444.1407
- [12] Moradi, S. A. H., & Ghobadi, N. (2024). Fabrication of composite GO/NiFe₂O₄MnFe₂O₄- CoFe₂O₄ anode material: Toward high performance hybrid supercapacitors. Microscopy Research and Technique, 87(10), 2459-2474.
- [13] A.K. Dutta, S.K. Maji, D.N. Srivastava, A. Mondal, P. Biswas, P. Paul, B. Adhikary, ACS Applied Materials & Interfaces, 4 (2012) 1919-1927.
- [14] S.H. Mohamed, Journal of Physics D: Applied Physics, 43 (2010) 035406.
- [15] Y. Chen, G.-F. Huang, W.-Q. Huang, L.-L. Wang, Y. Tian, Z.-L. Ma, Z.-M. Yang, Materials Letters, 75 (2012) 221-224.
- [16] G. Poongodi, P. Anandan, R.M. Kumar, R. Jayavel, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 148 (2015) 237-243.

- [17] A.K. Dutta, S.K. Maji, D.N. Srivastava, A. Mondal, P. Biswas, P. Paul, B. Adhikary, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4 (2012) 1919-1927.
- [18] A.R. Patil, V.N. Patil, P.N. Bhosale, L.P. Deshmukh, *Materials Chemistry and Physics*, 65 (2000) 266-274.
- [19] N. Ghobadi. Derivation of ineffective thickness method for investigation of the exact behavior of the optical transitions in nanostructured thin films. *J Mater Sci: Mater Electron.* (2015), DOI 10.1007/s10854-016-4925-3
- [20] N. Ghobadi, M. Ganji, C. Luna, A. Arman, A. Ahmadpourian, Effects of substrate temperature on the properties of sputtered TiN thin films, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 27, 2800–2808 (2016).
- [21] Sahar Rezaee, Nader Ghobadi. Synthesis of Ag-Cu-Pd alloy thin films by DC-magnetron sputtering: Case study on microstructures and optical properties. *Results in Physics* 9 (2018) 1148–1154.
- [22] N. Ghobadi, E. Gholami Hatam, Surface studies, structural characterization and quantity determination of PbSe nanocrystals deposited by chemical bath deposition technique. *J. Cryst. Growth* 418, 111–114 (2015).
- [23] P Sohrabi, N Ghobadi. Optical and photocatalytic behaviors of iron selenide thin films grown by chemical bath deposition versus deposition time and annealing temperature. *Applied Physics A* 125 (9), 620.
- [24] M. Alijani, B. K. Kaleji, S. Rezaee. Highly visible-light active with Co/Sn co-doping of TiO₂ nanoparticles for degradation of methylene blue *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. October 2017, Volume 28, Issue 20, pp 15345–15353.
- [25] Majid Amirzade, Nader Ghobadi, Seyed Ali hosseini Moradi, M. (2023). Synthesis of Mn₂V₂O₇ hollow microsphere as a high performance electrode material for supercapacitors. *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, 11(4), 35-45 .