

Research Paper

Influence of low temperature annealing on structural, optoelectrical and morphological properties of In_2S_3 thin films grown by thermal evaporation method with Bk7 substrate

Heydar Izadneshan¹

1. Department of solid state physics, Marv.C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

Received: 2023/05/04

Revised: 2023/08/19

Accepted: 2023/08/20

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31857.1995](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31857.1995)

Keywords:

Thin films, Indium sulfide, Thermal annealing, Raman spectroscopy, Thin films solar cell.

Abstract

Introduction: In thin-film solar cells based on multi-component semiconductors like $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{x-1}\text{Se}_2$ (CIGS), the buffer layer between the p-type absorber and low-resistance n-type layer plays a crucial role. Typically, n-conductive buffer layers employ wide-bandgap semiconductors such as cadmium sulfide (CdS) deposited from chemical solutions. Chemically vapor-deposited CdS layers (40-100 nm thick) in CIGS solar cells have achieved ~21% conversion efficiency. However, due to CdS toxicity, researchers are seeking alternative materials. Current investigations focus on B^3_2C^6_3 semiconductor compounds (where $\text{B}^3_2 = \text{Al/Ga/In}$ and $\text{C}^6_3 = \text{S/Se/Te}$) for developing radiation-resistant, high-efficiency thin-film solar cells. Among these, the binary compound In_2S_3 has shown particular promise. This study aims to obtain new data on the microstructure and optical properties of In_2S_3 thin films as functions of deposition methods, with potential implications for advancing thin-film photovoltaic technology.

Methods: In this study, In_2S_3 thin films of varying thicknesses were deposited on BK7 glass substrates via thermal evaporation at 250°C, with a pressure of 5.2×10^{-4} and a deposition rate of 5.2 Å/s. Post-deposition annealing was performed at 300–400°C for 30–60 minutes. The crystalline structure and phase composition were analyzed using XRD (DRON-3M, $\text{CuK}\alpha$ radiation, $2\theta = 15\text{--}100^\circ$), while surface morphology and elemental composition were examined via SEM (JEOL 6400) and AES (PHI-660). AFM (NT-206) revealed surface topography, and optical properties were characterized using UV-Vis-NIR spectroscopy (Cary-500, 400–2500 nm). Raman spectroscopy (Nanofinder, 532 nm laser) identified active modes (9A_1 and 14E), with spectral shifts and bandwidth changes indicating annealing effects. XRD and Raman results confirmed a phase transition from tetragonal to cubic at higher annealing temperatures. Data analysis was performed using Origin software, demonstrating the significant impact of thermal treatment on the structural and optical properties of In_2S_3 thin films.

Findings: This study developed a thermal evaporation technique for producing In_2S_3 thin films (40-1500 nm) on substrates at 200-240°C, followed by thermal annealing (300-400°C, 30-60 min). XRD analysis revealed as-deposited films were amorphous, while annealing at 330°C induced a tetragonal phase (peaks at 103, 214, 324, 303), and 400°C annealing produced mixed tetragonal/cubic phases. AFM and SEM showed optically homogeneous films with grain size increasing from.

Citation: Heydar Izadneshan, The effect of annealing on the microstructure and optical properties of In_2S_3 thin films prepared by thermal evaporation method, Quarterly Journal of New Materials. 2024

*Corresponding author: Heydar Izadneshan

Address: Department of solid state physics, Marv.C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Tell: +989177102596

Email: izadneshan@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

In thin-film solar cells based on multi-component semiconductor materials such as $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{x-1}\text{Se}_2$, the formation of a buffer layer between the p-type absorber layer and the low-resistance n-type layer plays a crucial role. The buffer layer material typically consists of n-type conductive layers based on wide-bandgap semiconductor compounds, such as cadmium sulfide (CdS), which are deposited from salt solutions. The use of CdS layers prepared by chemical vapor deposition with a thickness of 40 to 100 nanometers in $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{x-1}\text{Se}_2$ -based solar cells has led to an efficiency of approximately 21% for thin-film photovoltaic converters. Due to the toxicity of cadmium sulfide, researchers are seeking alternatives for this material in electronic components. Currently, B_3C_6 -type semiconductor compounds (where B_3 represents Al, Ga, or In, and C_6 represents S, Se, or Te) are being extensively studied for use in high-efficiency, radiation-resistant thin-film solar cells. Among these compounds, the binary compound In_2S_3 has attracted significant attention. Therefore, the aim of this article is to obtain new data on the microstructure and optical properties of In_2S_3 thin films depending on their fabrication methods. The results of this work could contribute to the advancement and development of thin-film solar cell technology.

Findings and Discussion

Scientific findings of this research include determination of microstructural characteristics (crystalline structure, phase and elemental composition, surface morphology,

crystallite size) and optical properties of In_2S_3 thin films, along with establishing their correlation with layer preparation and formation conditions such as substrate temperature, layer thickness, and annealing temperature/duration.

Among the most significant achievements of this work is the identification of a phase transition from tetragonal to cubic crystal structure depending on the annealing conditions applied to the thin films, which was confirmed by X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy results.

Furthermore, the experimental data regarding variations in the optical bandgap of In_2S_3 thin films based on their fabrication and annealing conditions are of particular importance in this study for predicting the physical properties of thin-film solar cells based on these layers.

Conclusion

The findings of present article indicate that the physical and structural characteristics of In_2S_3 thin films are strongly influenced by deposition conditions and thermal processing parameters such as temperature and time.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design experiments and perform: heydar Izadneshan

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تاثیر عملیات حرارتی در دماهای پایین بر خواص ساختاری، اپتوالکترونیکی و مورفولوژی لایه‌های نازک In_2S_3 رشد یافته به روش تبخیر حرارتی با زیرلایه Bk7 حیدر ایزدشاهان^{۱*}

۱. استادیار، گروه فیزیک حالت جامد، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده

مقدمه: در سلول‌های خورشیدی لایه نازک مبتنی بر مواد نیم رسانای چند جزئی مانند CuInxGax-1Se2 ، تشکیل یک لایه بافر بین لایه جاذب نوع p و نوع n با مقاومت کم نقش مهمی ایفا می‌کند. ماده لایه بافر معمولاً لایه‌هایی با رسانایی نوع n است که بر اساس ترکیبات نیمه‌هادی با شکاف باند وسیع، مانند سولفید کادمیوم (CdS)، که از محلول‌های نمکی رسوب داده شده‌اند، ساخته می‌شوند. استفاده از لایه‌های CdS تهیه شده به روش تبخیر شیمیایی با ضخامت ۴۰ تا ۱۰۰ نانومتر در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر ترکیبات CuInxGax-1Se2 منجر به بازده حدود ۲۱٪ برای مبدل‌های نوری لایه نازک شد. به دلیل سمی بودن سولفید کادمیوم محققین به دنبال جایگزین‌هایی برای این ماده در قطعات الکترونیک می‌باشند. در حال حاضر، ترکیبات نیمه‌هادی از نوع $\text{B}^{3-2}\text{C}^6_3$ که در آن B^{3-2} معادل Al ، Ga ، In ، C^6_3 معادل S ، Se ، Te (است) به طور گسترده برای استفاده در ایجاد سلول‌های خورشیدی لایه نازک مقاوم در برابر تابش با راندمان بالا مورد مطالعه قرار می‌گیرند. از این دسته از ترکیبات، ترکیب دوتایی In_2S_3 مورد توجه قابل توجهی است. بنابراین هدف از این مقاله به دست آوردن داده‌های جدید در مورد ریزساختار و خواص نوری لایه‌های نازک In_2S_3 بسته به روش‌های تولید آنها می‌باشد. نتایج این کار می‌تواند باعث پیشرفت و توسعه فناوری سول‌های خورشیدی لایه نازک گردد.

یافته‌ها: یافته‌های علمی این تحقیق شامل تعیین ویژگی‌های ریزساختاری (ساختار کریستالی، ترکیب فازی و عنصری، مورفولوژی سطح، اندازه کریستالیت‌ها) و خواص نوری لایه‌های نازک In_2S_3 و تعیین رابطه آنها با شرایط تهیه و آماده سازی تشکیل لایه‌ها مانند دمای زیرلایه، ضخامت لایه و دما و زمان عمایات حرارتی می‌باشد. همچنین از بهترین دستاوردهای این مقاله تعیین گذار فاز از ساختار کریستالی تراگونال به ساختار کریستالی مکعبی بر حسب شرایط عملیات حرارتی انجام شده بر روی لایه‌های نازک می‌باشد که بوسیله آنالیز پراش پرتو ایکس و نتایج طیف‌سنجی رامان تأیید شده است. همچنین داده‌های تجربی در مورد تغییرات پهنای باند اپتیکی لایه‌های نازک In_2S_3 بسته به شرایط تولید و بازپخت نیز برای پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی سلول‌های خورشیدی لایه نازک مبتنی بر آنها در این تحقیق دارای اهمیت می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق به صورت خلاصه بیانگر وابستگی مشخصات فیزیکی و ساختاری فیلم‌های لایه نازک In_2S_3 به شرایط تهیه و آماده سازی و شرایط مختلف دمایی و زمانی عملیات حرارتی بر روی آنها می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31857.1995](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31857.1995)

واژه‌های کلیدی:

فیلم‌ها لایه نازک، سولفید ایندیوم، عملیات حرارتی، طیف‌سنجی رامان، سلول خورشیدی لایه نازک

* نویسنده مسئول: حیدر ایزدشاهان

نشانی: گروه فیزیک حالت جامد، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

پست الکترونیکی: izadneshan@ahoo.com

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۰۲۵۹۶

مقدمه

در سالهای اخیر فیلم های لایه نازک به صورت گسترده ای در سلول های خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرند. فیلم های لایه نازک به روشهای مختلف مانند واکنش های اتمی، یونی، مولکولی، استفاده از لیزر و روش های شیمیایی و فیزیکی بر روی زیرلایه ها تهیه می شوند. خواص ساختاری، شیمیایی، متالورژیکی و فیزیکی این قبیل مواد به پارامترهای لایه نشانی و ضخامت وابستگی زیادی دارد. فیلم های لایه نازک، محدوده ی ضخامت چند نانومتر تا ده میکرومتر را در برمی گیرد که برحسب مورد استفاده این فیلم های لایه نازک بهترین ضخامت انتخاب می شود. (۱)

از همین جهت بررسی خواص متعدد فیلم های نازک مورد نیاز برای سلول خورشیدی کارآمد، مستلزم داشتن اطلاعات دقیق از مواد و همین طور بازبینی طیف وسیعی از امکانات تحلیلی می باشد. همچنین حساسیت بالای خواص فیلم به پارامترهای لایه نشانی می تواند بسیاری از نتایج نامطلوب را حاصل نماید؛ بنابراین جهت رسیدن به شرایط ایده آل تهیه سلول های خورشیدی لایه نازک انتخاب مواد و روش های لایه نشانی و همچنین شناسایی پارامترهای ساختاری و فیزیکی اهمیت ویژه ای دارد (۲).

افزایش عملکرد سلول های خورشیدی لایه نازک تا حد زیادی وابسته به کیفیت و ضخامت لایه بافر است. در سلول های استاندارد CIS بهینه سازی ضخامت لایه بافر بین لایه جاذب و لایه تماس با رسانای شفاف ضروری می باشد. انتقال فوتو حامل های تولیدی در پیوندگاه با کمینه تلفات حامل ها، برای به دست آوردن بازده بالا در سلول های خورشیدی کارآمد الزامی است. سلول های خورشیدی ناهمگون لایه نازک نور بیشتری در پیوندگاه جذب می کنند زیرا لایه بافر گاف بزرگ تر و ضخامت کمی نسبت به آن دارد. این قابل اطمینان ترین روش برای افزایش بهره وری سلول را فراهم می کند. اثرات سودمند دیگر لایه بافر اصلاح شیمی سطح جذب است که منجر به حفاظت فصل مشترک حساس در حین لایه نشانی لایه ی بعد می شود. خواص مطلوب فصل مشترک، شامل تطابق بین پارامترهای شبکه مربوط می شود (۳).

از این رو گزینه های انتخابی برای لایه بافر باید دارای گاف انرژی بزرگ تری برای جذب نور داشته باشند. همچنین فرایند لایه نشانی نیز باید این قابلیت را داشته باشد که از دید میکروسکوپی دارای یکنواختی با سطح لایه جاذب بوده و ایجاد یک هم ترازوی نوار رسانش با ماده جاذب بازده بهتری را تهیه خواهد کرد. سولفیدهای دوتایی، اکسیدها و اکسی سولفیدها غالباً به عنوان گزینه های لایه ی بافر بدون کادمیوم در نظر گرفته می شوند.

لایه های بافر همچنین پایداری سلول را افزایش می دهند، جاذب های نوری معمولاً حساس اند و نیاز به حفاظت در طول لایه نشانی و هنگام تماس با لایه های اکسید رسانای شفاف را دارند و به همین خاطر وجود لایه بافر می تواند به پایداری جاذب در سلول خورشیدی

کمک نماید. علاوه بر این، لایه جاذب زمانی که توسط یک لایه بافر محافظت می شود، پایداری بیشتری در مجاورت هوا دارد (۴).

ممنوعیت استفاده از کادمیوم در تجهیزات الکتریکی یا الکترونیکی به دلیل سمی بودن این ماده توسط مقررات قانونی در کشورهای مختلف اجرا شده است که می تواند یک مشکل فنی برای سلول های نازک CIS بر پایه سولفید کادمیوم باشد (۵). از این رو گزینه های جایگزین برای مواد بافر باید دارای چهار خاصیت مشترک زیر باشند:

- جنس ماده باید نوع n باشد برای اینکه یک پیوندگاه به شکل P-N با لایه جاذب تنظیم شود.
- گاف گسترده ای برای جذب نور محدود داشته باشد.
- فرایند لایه نشانی باید کم هزینه و مناسب برای یک سطح بزرگ باشد. علاوه بر این روش قابلیت اثر ناپذیر ساختن حالت های سطح لایه جاذب را دارا باشد.
- در فرایند و انتخاب ماده لایه بافر باید هم ترازوی نوار رسانش با جاذب $Cu(In,Ga)Se_2$ با EC از ۰ تا ۰.۴ فراهم شود.

سولفید ایندیم ماده ای مهم برای کاربردهای اپتوالکترونیک و فتوولتائیک است و به دلیل پایداری آن، گاف انرژی بزرگ، رفتار رسانای حساس به نور (نور رسان) و خواص فوتولومینسانس (نورتایی) گزینه ای امیدوارکننده برای کاربردهای اپتوالکترونیک می باشد و به عنوان جایگزین غیر سمی مناسب برای سولفید کادمیوم در سلول های خورشیدی بر اساس $Cu(In,Ga)Se_2$ مطرح می باشد. علاوه بر زیست سازگار بودن با توجه به داشتن گاف بزرگ تر از سولفید کادمیوم انتقال نور بیشتری در ناحیه طول موج آبی دارد (۶).

علاقه به In_2S_3 به دلیل شرایط زیر است: الف) مقادیر شکاف باند این ترکیب نزدیک به مقدار بهینه برای توسعه مبدل های تابش خورشیدی است. ب) ضریب جذب نوری، در محدوده طیفی تابش خورشیدی، به مقادیر بزرگی ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) می رسد که ظرفیت جذب بالای تابش فرودی در لایه های نازک را تضمین می کند. ج) امکان جایگزینی با CdS سمی در تولید سلول های خورشیدی (۷).

آر. اس مین ۳ و سی. دی. لکاند ۴ با استفاده از روش چندبعدی و ساده جذب و واکنش لایه یونی متوالی لایه های نازک سولفید ایندیم را به دست آورده بودند (۸). گاف انرژی نوری لایه های سولفید ایندیم ۲.۳ eV بوده و مقاومت ویژه از مرتبه $10^5 \Omega \text{ cm}$ بوده است. استفاده از تری اتانول آمین و هیدرات هیدرازین کمپلکس سولفات ایندیم و سولفید سدیم به عنوان ماده های اولیه نیز منجر به لایه های نازک سولفید ایندیم شده و گاف انرژی نوری ۲.۷ eV شد. اثرات بازپخت در

1 Photoconductive

2 Photoluminescence

3 R. S. Mane

4 C. D. Lokhande

لایه‌های نازک سولفید ایندیم با استفاده از روش جذب و واکنش لایه یونی متوالی رسوب شده توسط آر.انجیس^۵ و همکاران بررسی شده. نمونه‌ها توسط غوطه‌ورسازی و زمان شستشوی مختلف تهیه شدند و دارای فاز آمورف بودند.^(۹)

برای همکارانش فیلم‌های نازک سولفید ایندیم با استفاده از روش اسپری تف‌کافت را آماده کرده‌اند. فرایند لایه نشانی را بر روی شیشه‌ی پیرکس با اسپری محلول کلرید ایندیم 3×10^{-3} M و تیورا 3×10^{-3} M انجام دادند. در حین لایه نشانی دمای زیرلایه در 340°C درجه سانتی گراد نگه‌داشته شد. آن‌ها نیتروژن را به‌عنوان «گاز حامل» نگه‌دارنده محلول و میزان جریان گاز در $2\text{ cm}^3/\text{min}$ و 4 l/min استفاده کردند. رشد لایه‌های بلوری در فاز بتای-سولفید ایندیم در جهت ترجیحی (۴۰۰) می‌باشد. میکرو آنالیز نوک‌دار لایه‌ها کسری از کالکوزن (۴۶٪) را نشان داده و با استفاده از تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس نیز تأیید شده است^(۱۰).

همچنین مطالعات دیگر نشان می‌دهد که ساختار کریستالی و فاز این ماده بستگی زیادی به مراحل لایه نشانی، آماده سازی و عملیات حرارتی پس از آن دارد^(۱۱).

در این مقاله نتایج حاصل از لایه نشانی و مشخصه یابی فیلم‌های لایه نازک سولفید ایندیم، و وابستگی ساختاری و مشخصه‌های طیفی فیلم‌های نازک سولفید ایندیم در شرایط مختلف لایه نشانی و عملیات حرارتی پس از آن بررسی می‌شود. همچنین طیف پراش پرتو ایکس، جذب نوری و پراکندگی رامان به عنوان روشی قابل اعتماد برای تجزیه و تحلیل و تست غیرمخرب ساختار فیلم‌های نازک استفاده می‌شود که تاکنون با این شرایط آماده سازی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از سوی دیگر این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنمای مدل سازی جهت استفاده در دستگاه‌های الکترونیک نوری و سلول‌های هورشیدی بر مبنای فیلم‌های لایه نازک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق فیلم‌های لایه نازک In_2S_3 با ضخامت‌های مختلف با استفاده از روش تبخیر حرارتی در دمای 250°C درجه ساتیگراد و فشار 5.2×10^{-4} و آهنگ 5.2 Å/s بر روی زیرلایه‌های شیشه BK7 لایه نشانی شدند. سپس بر روی فیلم‌های لایه نازک تهیه شده پس از لایه نشانی، عملیات حرارتی در دمای 300°C – 400°C درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه انجام گرفت.

ساختار بلوری و ترکیب فازی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی دستگاه DRON-3M در طرح براگ-برنتانو

با تابش $\lambda = 1.5418\text{ Å}$ ($\text{CuK}\alpha$) با اندازه‌گیری زاویه 2θ در محدوده 15° تا 100° درجه و گام 0.01° درجه مورد مطالعه قرار گرفت. ترکیب فازی با استفاده از پایگاه داده کمیته مشترک استانداردهای پراش پودر (JCPDS) تجزیه و تحلیل شد. ریزساختار و مورفولوژی لایه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی JEOL 6400 با سیستم آنالیز عنصری LINK مورد مطالعه قرار گرفت. ترکیب عنصری نمونه‌های لایه با استفاده از طیف‌سنجی اوژه الکترونی روبشی بر روی دستگاه PHI-660 (Perkin Elmer Physical Electronics) تجزیه و تحلیل شد. محل و حساسیت کاوش با پرتو یون آرگون به ترتیب 100 nm و 0.1 nm اتمسفر درصد بود. میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای مطالعه توپولوژی سطح لایه‌های سولفید ایندیم استفاده شد که امکان دستیابی به داده‌هایی در مورد برجستگی‌های ریز لایه‌ها را فراهم می‌کند. اندازه‌گیری‌ها بر روی یک میکروسکوپ نیروی اتمی NT-206 از شرکت Microtestmachines انجام شد. طیف‌های عبوری نمونه‌های آزمایشی در محدوده طول موج 400 nm تا 2500 nm نانومتر با وضوح 1.0 nm نانومتر بر روی یک اسپکتروفتومتر اسکن (Cary-500 Varian) اندازه‌گیری شدند که به عنوان داده‌های تجربی مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های نوری لایه‌های به‌دست‌آمده عمل کرد. طیف‌های پراکندگی رامان بر روی یک طیف‌سنج (Nanofinder High End LOTIS TII) که بر اساس یک میکروسکوپ کانفوکال پیاده‌سازی شده است، در طول موج 532 nm ، توان تابش لیزر 60 mW تا 3000 mW میکرووات در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. همچنین برای تجزیه و تحلیل نتایج، از نرم‌افزار Origin برای ارائه تجزیه و تحلیل آماری تصاویر به‌دست‌آمده استفاده شد.

ما از طیف‌سنجی رامان و پراش پرتو ایکس برای ارزیابی تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار لایه‌ها استفاده کردیم. مدهای فعال رامان که می‌توانند به عنوان مدهای $9A_1$ و $14E$ طبقه‌بندی شوند، در طیف‌های رامان لایه‌های نازک In_2S_3 مشاهده شده‌اند. تغییرات در جابجایی رامان و پهنای باند لایه‌های نازک مختلف In_2S_3 ، تأثیر اثر بازپخت را نشان می‌دهد. نتایج طیف‌سنجی رامان و XRD نشان داد که اثر بازپخت، فاز تبلور را در دماهای بالا از تراگونال به مکعبی تغییر می‌دهد.

نتایج

۱-طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج طیف پراش پرتو ایکس ساختار بلوری و ترکیب فازی پلی‌کریستال‌های In_2S_3 مورد استفاده برای تولید لایه‌ها، و همچنین ریزساختار لایه‌های In_2S_3 تولیدشده با روش لایه‌نشانی حرارتی تحت خلأ و عملیات حرارتی بعدی ارائه شده است. مشخص شد که ماده پلی‌کریستالی سنتز شده In_2S_3 تک‌فازی با ساختار چهارگوشه‌ای و پارامترهای سلول واحد $a = 7.62 \pm 0.01\text{ Å}$ و $c = 32.25 \pm 0.01\text{ Å}$ است. ساختار بلوری ماده تولیدشده مطابق با استاندارد بوده که نشان‌دهنده کارایی روش سنتز انتخاب‌شده برای تهیه ماده

⁵ R. Ranjith

⁶ L. Bhira

پلی کریستالی In_2S_3 و مناسب بودن نمونه‌های تولیدشده برای استفاده به عنوان ماده تبخیرشونده در تولید لایه‌های In_2S_3 با روش لایه‌نشانی حرارتی تحت خلاء است

شکل ۱ طیف‌های پرتو ایکس و تصاویر SEM لایه‌های نازک In_2S_3 را نشان می‌دهد که با روش تبخیر حرارتی تحت خلاء روی زیرلایه شیشه‌ای لایه‌نشانی شده و در دماها و زمان‌های مختلف عملیات حرارتی شده‌اند. عدم وجود پیک‌های مشخص در نوار پهن در محدوده زوایای ۰ تا ۱۰۰ درجه نشان می‌دهد که لایه‌ها بی‌شکل هستند و با افزایش ضخامت نیز بی‌شکل باقی می‌مانند (شکل 1D). با این حال، باید توجه داشت که نتایج XRD نمی‌توانند به‌طور کامل وجود مقدار کمی بلور در حجم لایه‌ها را رد کنند. روش XRD نمی‌تواند پراش در بلورهایی که اندازه آنها در محدوده نانومتر است و مقدار آنها کمتر از سطح بحرانی است، یا اگر نانوذرات بلوری اندازه‌ها و جهت‌های رشد ترجیحی متفاوتی دارند، را تشخیص دهد. تحلیل ترکیب شیمیایی نشان داد که عناصر اصلی نمونه‌های لایه‌ای ایندیم (In) و گوگرد (S) هستند، اما ترکیب عنصری پوشش‌ها با افزایش ضخامت تغییر می‌کند. اگرچه در لایه‌های مجاور سطح لایه‌ها، نمونه‌ها نسبت $S/\text{In}=1.5$ را نشان دادند که مشخصه ترکیب استوکیومتری In_2S_3 است، اما در ناحیه لایه نازک مجاور زیرلایه، نسبت S/In تقریباً برابر با ۱ مشاهده شد که نشان‌دهنده کمبود گوگرد در این لایه‌هاست. انتظار می‌رود که مقداری ایندیم به صورت In ، In_2O_3 و $\text{In}(\text{OH})_x$ وجود داشته باشد (که با طیف‌سنجی اوزه قابل تشخیص نیست).

عملیات حرارتی بر روی فیلم‌های لایه نازک تهیه شده در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه منجر به تشکیل فاز تتراگونال In_2S_3 شد (شکل 1E). طیف‌های پرتو ایکس فیلم‌های لایه نازک عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه (شکل 1F) پیک‌هایی را نشان می‌دهد که مربوط به فاز مکعبی In_2S_3 هستند (JCPDS. 05-0731). این نتایج با داده‌های لایه‌های In_2S_3 رشدیافته با روش رسوب شیمیایی مطابقت دارد (۸). پارامترهای سلول واحد برای لایه‌های نازک In_2S_3 پس از عملیات حرارتی $a = 7.61 \pm 0.01 \text{ \AA}$ و $c = 32.31 \pm 0.01 \text{ \AA}$ بود. مورفولوژی لایه‌ها بر اساس شرایط تشکیل در شکل ۱ (A,B,C) نشان می‌دهد که در همه موارد، لایه‌ها عاری از ریزترک‌ها تشکیل شده‌اند. همچنین این تصاویر نشان می‌دهد که اندازه دانه‌های بلوری با افزایش دمای عملیات حرارتی افزایش می‌یابد.

۲- بررسی آنالیز AFM

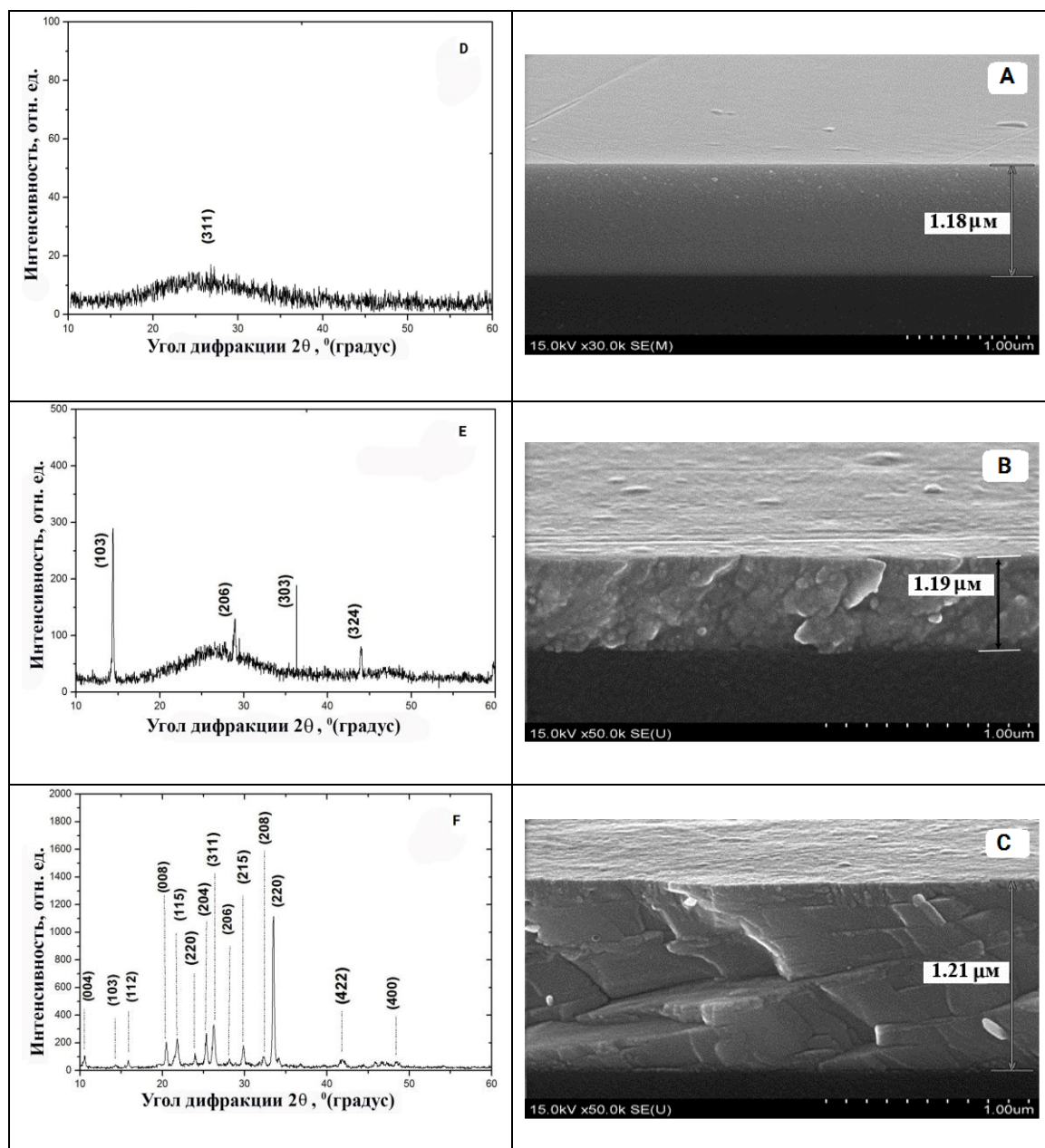
بررسی‌های AFM مورفولوژی نانوگراولی همه نمونه‌های لایه‌ای را تأیید کرد. شکل ۲ تصاویر معمول AFM دوبعدی و سه‌بعدی لایه‌های نازک In_2S_3 با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر را بر اساس شرایط

تولید نشان می‌دهد. لایه‌های نازک In_2S_3 پیوسته و یکنواخت هستند. نتایج تحلیل AFM لایه‌های In_2S_3 با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر بر اساس شرایط تشکیل در جدول ۱ ارائه شده است که برای لایه‌های با ضخامت‌های مختلف نیز ویژگی‌های مشابهی دارند. لایه‌های نازک In_2S_3 پیوسته و یکنواخت هستند. به عنوان نمونه نتایج تحلیل AFM لایه‌های In_2S_3 با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر بر اساس شرایط مختلف آماده سازی به عنوان نمونه در جدول ۱ ارائه شده است که برای لایه‌های با ضخامت‌های مختلف نیز ویژگی‌های مشابهی دارند.

نتایج آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد که زبری متوسط (R_a) و زبری میانگین مربعات (R_{rms}) با افزایش دمای عملیات حرارتی افزایش می‌یابد. افزایش R_a و R_{rms} با افزایش دمای عملیات حرارتی ناشی از افزایش اندازه دانه‌های بلوری است. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی AFM درک کامل‌تری از تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر مورفولوژی سطح لایه‌های In_2S_3 مطابق با نیازهای سطحی برای ساخت سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک ارائه می‌دهد.

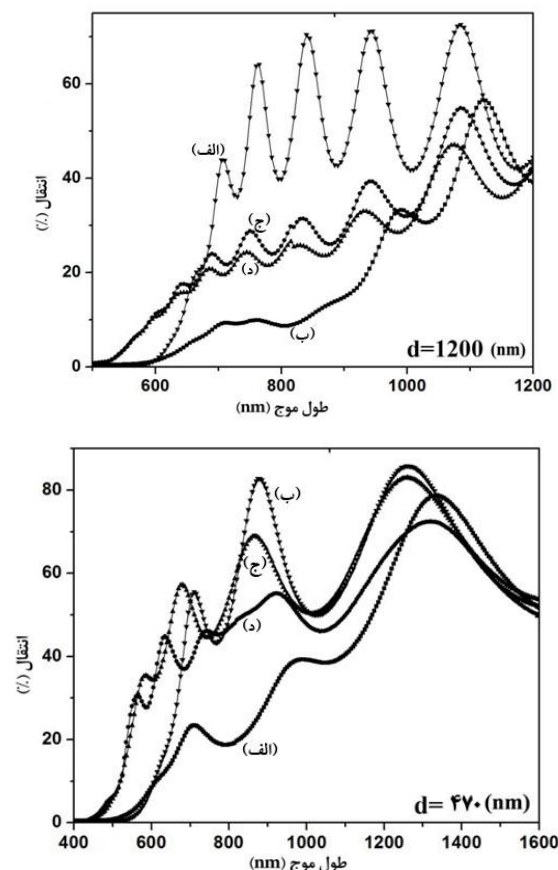
می‌توان مشاهده کرد که مورفولوژی سطحی فیلم‌های In_2S_3 با تغییر دمای بازپخت، تغییر می‌کند. در تمام موارد، فیلم‌های پیوسته‌ای متشکل از دانه‌های بلوری به‌دست آمد. فیلم‌های نازک رشد یافته در حالت اولیه، مورفولوژی یکنواختی با بلورک‌هایی در اندازه‌های بسیار کوچک نشان دادند که با تحلیل الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) مطابقت دارد. با افزایش دمای بازپخت به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، فیلم دارای دانه‌های صفحه‌ای شکل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما دانه‌های کوچک به ذرات بزرگتری تبدیل می‌شوند. فیلم‌های بازپخت شده، تراکم بالایی داشته و عاری از حفره‌های ریز و ترک‌های میکروسکوپی هستند. این فیلم‌ها ساختار لایه‌ای دارند که بیشتر لایه‌ها موازی با سطح زیرلایه هستند. همچنین حجم قابل توجهی از فیلم با دانه‌های بزرگ (در حدود چند میکرومتر) پر شده است.

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) روی لایه‌ها، وابستگی شدید ساختار سطحی فیلم‌های نازک In_2S_3 به دمای بازپخت را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که دانه‌های رشد یافته به‌صورت نامتراکم در کنار هم قرار گرفته و سطحی با زبری بالا تشکیل داده‌اند. دانه‌ها از نظر الکتریکی اتصال خوبی به یکدیگر دارند که برای ایجاد پیوند p-n امری ضروری است. چگالی فیلم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا از نفوذ اتم‌ها در طول رشد لایه‌های بافر و لایه‌های پنجره‌ای برای تولید سلول‌های خورشیدی فیلم نازک جلوگیری می‌کند.



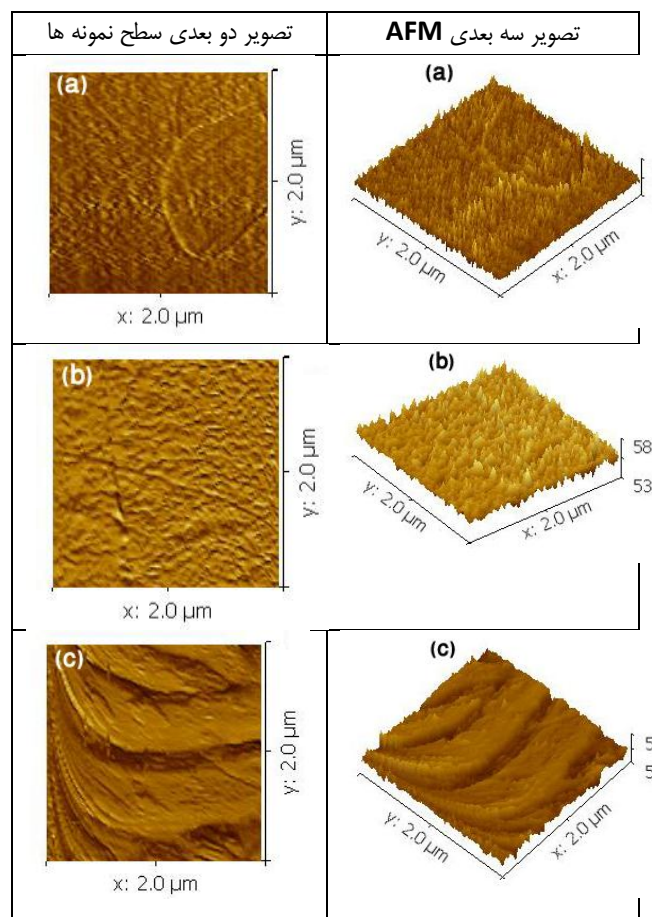
شکل ۱- تصاویر SEM (A,B,C) لایه‌های نازک In_2S_3 و طیف پراش پرتو ایکس (D,E,F) بر اساس شرایط آماده سازی؛ (A,D) - قبل از عملیات حرارتی؛ (B,E) - عملیات حرارتی در 330°C به مدت ۶۰ دقیقه؛ (C,F) - عملیات حرارتی در 400°C به مدت ۶۰ دقیقه.

در دمای اتاق نشان داده شده است. همه لایه‌های بررسی شده با ضرایب عبور بالا ($T \sim 60-85\%$) در محدوده طول موج ۸۰۰-۲۰۰۰ نانومتر و لبه جذب مشخص مشخصه‌گذاری شدند. بررسی طیف‌های عبور نشان داد که با افزایش دمای عملیات حرارتی، لبه نوار جذب ذاتی به ناحیه طول موج کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود، افزایش عبور مشاهده می‌شود و الگوی تداخل با کاهش ضخامت لایه‌ها واضح‌تر می‌شود. این موضوع، مانند داده‌های پرتو ایکس، نشان‌دهنده بهبود ساختار بلوری لایه‌های نازک In_2S_3 با افزایش دمای عملیات حرارتی است.



شکل ۳- طیف‌های عبور فیلم‌های لایه نازک In_2S_3 با ضخامت ۴۷۰ و ۱۲۰۰ نانومتر: (الف) - قبل از عملیات حرارتی، (ب) - عملیات حرارتی در ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه، (ج) - عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، (د) - عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه .

همچنین تحلیل طیف‌های عبور و مشتق اول مقدار عبور نسبت به طول موج امکان تشخیص گذارهای نوری مستقیم و غیرمستقیم لایه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۴ دو نوع گذار به صورت دو پیک پهن در ناحیه طیفی ۵۰۰-۷۰۰ نانومتر دیده می‌شود. موقعیت این پیک‌ها به ضخامت لایه‌های In_2S_3 و شرایط تشکیل بستگی دارد.



شکل ۴- تصاویر آنالیز AFM دوبعدی و سه‌بعدی لایه‌های نازک In_2S_3 با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر: (a) - قبل از عملیات حرارتی، (b) - عملیات حرارتی در ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه، (c) - عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه.

جدول ۱- نتایج تحلیل AFM لایه‌های In_2S_3 با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر بر اساس شرایط مختلف آماده سازی

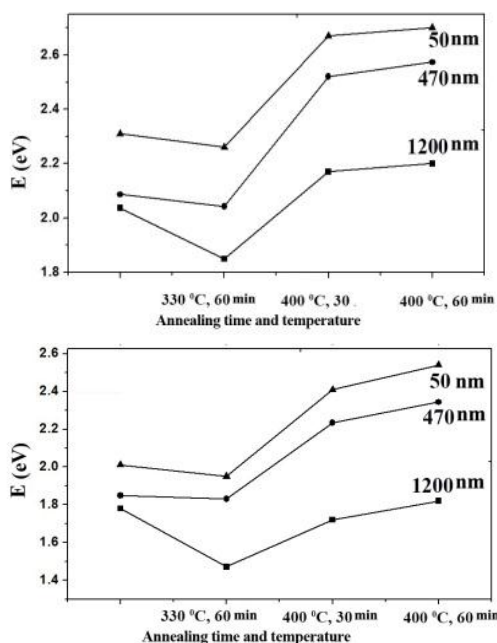
پارامتر	قبل از عملیات حرارتی	330 °C (60 min)	400 °C (60 min)
مینیمم زبری	547.24 nm	534.83 nm	529.38 nm
ماکزیمم زبری	566.79 nm	581.36 nm	591.98 nm
Ra میانگین زبری	1.30 nm	3.74 nm	3.97 nm
زبری میانگین R _{rms} مربعات	1.68 nm	4.76 nm	5.06 nm

۳- خواص اپتیکی فیلم‌های لایه نازک In_2S_3

در شکل ۳ طیف‌های عبور فیلم‌های لایه نازک In_2S_3 با ضخامت ۴۷۰ و ۱۲۰۰ نانومتر به عنوان نمونه در محدوده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر

ضریب جذب در نزدیکی لبه جذب حدود $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-1}$ بود. تحلیل توابع $(\alpha E)^n = f(E)$ در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های جداگانه نقاط بدست آمده در نمودارهای $(\alpha E)^2 - E$ مربوط به گذارهای نوری مستقیم و $(\alpha E)^{1/2} - E$ مربوط به گذارهای نوری غیرمستقیم خطی می‌شوند.

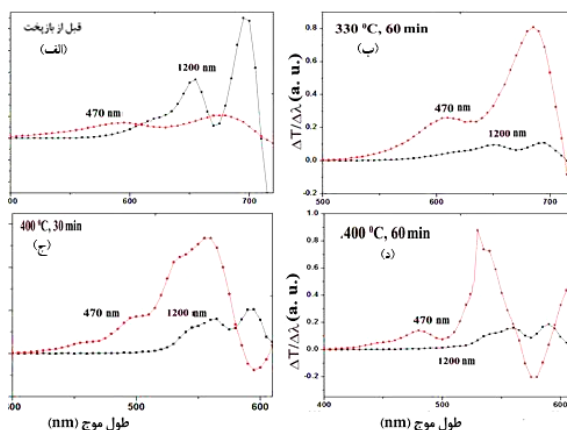
در شکل ۶ وابستگی انرژی عرض ممنوعه مستقیم (الف) و غیرمستقیم (ب) لایه‌های نازک In_2S_3 با ضخامت‌های مختلف به شرایط تشکیل ترسیم شده است. دمای عملیات حرارتی 330°C درجه سانتی‌گراد، که در آن لایه‌های نازک In_2S_3 کمترین مقدار انرژی عرض ممنوعه را دارند، مطابق با مطالعات انجام شده مربوط به گذار فازی از ساختار چهارگوشه‌ای به مکعبی است. افزایش عرض ممنوعه با کاهش ضخامت لایه‌ها را می‌توان به وجود ترکیب‌های مختلف دانه‌های بلوری و/یا تغییرات ساختاری آنها نسبت داد. این نتیجه را می‌توان با وجود اکسیژن در لایه‌ها، اثر اندازه کوانتومی و اکسیداسیون که در لایه‌های نازک In_2S_3 رخ می‌دهد، توضیح داد (۱۱).



شکل ۶ - وابستگی انرژی (الف) باند ممنوعه مستقیم و (ب) باند ممنوعه غیرمستقیم به شرایط تشکیل برای لایه‌های نازک In_2S_3 با ضخامت‌های مختلف.

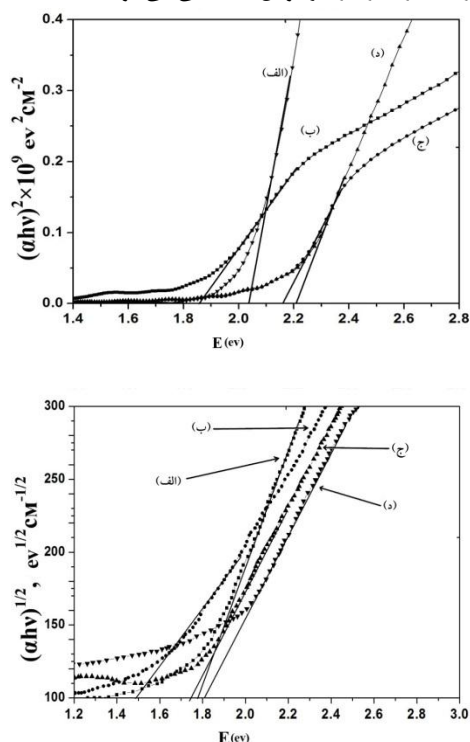
۵- طیف سنجی رامان

طیف‌سنجی پراکندگی رامان^۷ که ابزاری مهم در فیزیک حالت جامد است، امکان توصیف مدهای ارتعاشی فونون‌ها در نمونه‌های مورد بررسی، به‌دست آوردن اطلاعات درباره ترکیب شیمیایی ماده، وجود فازهای خارجی و نواحی با نظم بلوری موضعی را فراهم می‌کند. در مقایسه با روش کلاسیک تحلیل فازی پرتو ایکس، این روش برای بررسی شبکه بلوری ماده امیدوارکننده‌تر است زیرا امکان ثبت مقادیر بسیار کم فازهای مختلف را فراهم می‌کند. در شکل ۷ به عنوان نمونه



شکل ۴ - مشتق اول مقدار طیف عبور برای لایه‌های In_2S_3 با ضخامت 470 nm و 1200 nm

این نتایج با داده‌های موجود در پژوهشهای قبل برای فیلم‌های لایه نازک تولیدشده با روش رسوب شیمیایی مطابقت خوبی دارد. بررسی‌های پرتو ایکس، مورفولوژی سطح وجود دو نوع گذار نوری بر اساس دمای عملیات حرارتی نشان می‌دهد که عملیات حرارتی منجر به گذار ساختاری از فاز تتراگونال به مکعبی می‌شود.



شکل ۵ - (I) - وابستگی طیفی $(\alpha E)^{1/2}$ به انرژی فوتون E و (II) وابستگی طیفی $(\alpha E)^2$ به انرژی فوتون E برای لایه‌های In_2S_3 با ضخامت 1200 nm : (الف) - قبل از عملیات حرارتی، (ب) - عملیات حرارتی در 330°C ، 60 دقیقه، (ج) - عملیات حرارتی در 400°C ، 30 دقیقه، (د) - عملیات حرارتی در 400°C ، 60 دقیقه

⁷ Raman spectroscopy

به مدت ۳۰ دقیقه، (د) - عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه

مکعبی In ₂ S ₃ (Cm ⁻¹)	تراگونال In ₂ S ₃ (Cm ⁻¹)	تراگونال In ₂ S ₃ (Cm ⁻¹)	بلوری In ₂ S ₃ (Cm ⁻¹)	(د) (Cm ⁻¹)	(ج) (Cm ⁻¹)	(ب) (Cm ⁻¹)	(الف) (Cm ⁻¹)
42							
57							
61							
70					70	70	
102					102	102	102
127					126(F _{2g})	126(F _{2g})	
137					139	136	131
165					166(F _{2g})	166(F _{2g})	166(F _{2g})
180					179		
196					198		
217							
245					244	252	
266					266(E _g)	266(E _g)	
306					305	306	306
325						325(F _{2g})	
366					366(A _{1g})		

نتایج مشابهی در بررسی تأثیر اثر عملیات حرارتی بر ساختار بلوری و ترکیب فازی لایه‌های In₂S₃ با ضخامت‌های مختلف به دست آمد. مشخص شد که شدت و تعداد پیک‌ها با ضخامت افزایش می‌یابد و بازتاب‌های مشاهده شده در طیف‌های رامان را می‌توان به عنوان مدهای A_{1g} و E_{1g}، که مشخصه طیف‌های بلورهای In₂S₃ هستند، طبقه‌بندی کرد. عملیات حرارتی لایه‌های In₂S₃ منجر به تغییر شکل بازتاب‌ها می‌شود و گذار فازی از ساختار بلوری چهارگوشه‌ای به مکعبی مشاهده می‌شود که با بررسی‌های پرتو ایکس تأیید می‌شود.

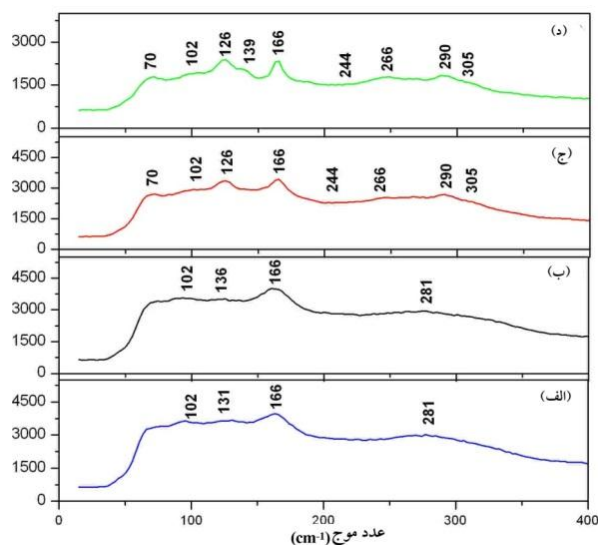
نتیجه گیری

۱- در این تحقیق تکنیکی برای تولید لایه‌های نازک In₂S₃ با ضخامت ۴۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر با استفاده از تبخیر حرارتی در خلأ (دمای زیرلایه ۲۰۰ تا ۲۴۰ درجه سانتیگراد) و به دنبال آن عملیات حرارتی در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه ارائه داده شده است که از نظر ترکیب عنصری و ساختار کریستالی با کریستال‌های حجمی مطابقت دارند.

۲- مشخص شده است که لایه‌های نازک قبل از عملیات حرارتی آمورف هستند. پس از عملیات حرارتی لایه‌های In₂S₃ در دمای ۳۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، بازتاب‌های ۱۰۳، ۲۱۴، ۳۲۴ و ۳۰۳ در الگوهای پراش پرتو ایکس ظاهر می‌شوند که مربوط به فاز تتراگونال کریستالی In₂S₃ است. عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه منجر به ظهور فازهای تتراگونال و مکعبی در لایه‌ها می‌شود که با داده‌های موجود در مقالات پیشین سازگار است.

۳- مطالعات مورفولوژی سطح نشان داد که لایه‌های نازک از نظر ساختاری همگن و بدون حفره و ریز ترک هستند. اندازه دانه با افزایش

طیف‌های پراکندگی رامان لایه‌های In₂S₃ با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر بر اساس شرایط تشکیل نشان داده شده است.



شکل ۷ - طیف‌های رامان فیلم‌های لایه نازک In₂S₃ با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر: (الف) - قبل از عملیات حرارتی، (ب) - عملیات حرارتی در ۳۳۰، ۳۰ دقیقه، (ج) - عملیات حرارتی در ۴۰۰، ۳۰ دقیقه، (د) - عملیات حرارتی در ۴۰۰، ۶۰ دقیقه.

قبل از عملیات حرارتی و پس از عملیات حرارتی در دمای ۳۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، در طیف‌های رامان بازتاب‌هایی در ۷۰، ۱۰۲، ۱۳۱ و ۱۵۴ cm⁻¹ مشاهده می‌شود که مربوط به ساختار تتراگونال (فاز β) ترکیب In₂S₃ است. پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه، بازتاب‌های اضافی در ۱۲۶، ۲۴۴ و ۲۶۶ cm⁻¹ در طیف‌ها ظاهر می‌شود که مربوط به ساختار مکعبی (فاز γ) In₂S₃ است. همچنین مشاهده شد که شکل و شدت بازتاب‌های به دست آمده به دما و زمان عملیات حرارتی لایه‌ها بستگی دارد.

در جدول ۲ نتایج مقایسه فرکانس‌های مشاهده شده تجربی در طیف‌های رامان لایه‌ها In₂S₃ (ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر) بر اساس شرایط تشکیل با داده‌های موجود در مطالعات قبل برای بلورهای حجمی در محدوده ۴۰۰-۴۰۰ cm⁻¹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در دمای عملیات حرارتی بالاتر از ۳۳۰ درجه سانتیگراد، گذار فازی $\beta\text{-In}_2\text{S}_3 \rightarrow \gamma\text{-In}_2\text{S}_3$ رخ می‌دهد که با نتایج تحلیل پراش پرتو ایکس لایه‌ها بر اساس شرایط عملیات حرارتی مطابقت دارد (۱۱).

جدول ۲. مقایسه فرکانس‌های مشاهده شده تجربی در طیف‌های رامان لایه‌های In₂S₃ با ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر با تحقیقات قبل: (الف) - قبل از عملیات حرارتی، (ب) - عملیات حرارتی در ۳۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه، (ج) - عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتیگراد

۷- با استفاده از طیف‌سنجی رامان (طیف‌های پراکندگی رامان)، تأثیر اثر بازپخت حرارتی بر ساختار بلوری و ترکیب فازی لایه‌های نازک In_2S_3 با ضخامت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. بازتاب‌های مشاهده‌شده را می‌توان به عنوان حالت‌های ۹ A1 و E۱۴، که مشخصه طیف‌های بلورهای In_2S_3 هستند، طبقه‌بندی کرد. مشخص شد که تغییرات در جابجایی و پهنایی بازتاب‌ها برای لایه‌ها به دلیل دما و زمان عملیات حرارتی است. نتایج مطالعات نشان داد که بازپخت حرارتی لایه‌های نازک In_2S_3 منجر به گذار فاز از ساختار بلوری تتراگونال به مکعبی می‌شود که توسط داده‌های اشعه ایکس تأیید شده است.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها و نتایج، و نگارش نهایی توسط حیدر ایزدشان انجام شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

دما و زمان عملیات حرارتی از ۵۰ نانومتر به ۷۵ نانومتر افزایش می‌یابد. چگالی نابی‌ها با افزایش دمای عملیات حرارتی از ۳۳۰ درجه سانتیگراد (۶۰ دقیقه) به ۴۰۰ درجه سانتیگراد (۶۰ دقیقه) از $4 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ تا $1.7 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ تغییر می‌کند.

۴- تجزیه و تحلیل فیلم‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داد که با افزایش دما و زمان بازپخت، زبری متوسط و جذر میانگین مربعات به ترتیب از ۱,۳۰ نانومتر، ۱,۶۸ نانومتر به ۳,۹۷ نانومتر، ۵,۰۶ نانومتر افزایش می‌یابد. این نتایج درک کامل‌تری از تأثیر پارامترهای بازپخت بر ویژگی‌های مورفولوژیکی فیلم‌های نازک In_2S_3 مطابق با الزامات سطح برای ایجاد دستگاه‌های اپتوالکترونیکی ارائه می‌دهد.

۵- ماهیت گذارهای نوری در فیلم‌های In_2S_3 بسته به حالت‌های تولید مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که فیلم‌ها دارای ضریب جذب نوری $\alpha = 10^3 - 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ هستند و گذارهای نوری مستقیم و غیرمستقیم دارند. ویژگی‌های گذارهای نوری به‌دست‌آمده در ناحیه لبه جذب اساسی با نتایج تحلیل نظری ساختار نواری تک بلورهای حجمی سازگار است.

۶- نشان داده شده است که ویژگی‌های نوری لایه‌های نازک In_2S_3 به شرایط تشکیل آنها بستگی دارد. بر اساس الگوهای تعیین‌شده، شرایط برای به‌دست آوردن لایه‌هایی با ضخامت ۴۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر با شکاف نواری در محدوده ۱,۴۷ تا ۲,۷۰ الکترون‌ولت بهینه شده و الزامات استفاده از آنها به عنوان لایه‌های بافر و جاذب در ایجاد سلول‌های خورشیدی لایه نازک بر اساس آنها را برآورده می‌کند.

References

1. Reddy KK, Reddy PR, Reddy PS. Annealing temperature induced phase transformation in In_2S_3 thin films and its impact on optical and electrical properties. Journal of Alloys and Compounds.* 2020;831:154788.
2. Souilah M, Lafane S, Abdelli-Messaci S, Kerdja T. Structural and optical properties of thermally evaporated In_2S_3 thin films: Effect of annealing

in sulfur atmosphere. Materials Science in Semiconductor Processing. 2019;101:32–39.

3. Ouerghi A, Ben Nasr T, Turki-Kamoun N. Effect of post-deposition annealing on the properties of In_2S_3 thin films for photovoltaic applications. Thin Solid Films. 2021;732:138780.

4. Mariappan R, Ponnuswamy V, Ragavendar M, Chandra Bose A. Thermal annealing

induced enhancement in the optical and electrical properties of In_2S_3 thin films deposited by thermal evaporation. Journal of Materials Science: Materials in Electronics.

2018;29(12):10296–10304.

5. Gedi S, Reddy VRM, Pejjai B, Park C. Impact of annealing on the microstructural and optoelectronic properties of thermally evaporated In_2S_3 thin films for buffer layer applications. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016;157:28–36.

6. Nguyen TKT, Le HT, Dao VA, Choi J, Yi J. Tuning the optical bandgap and microstructure of In_2S_3 thin films through post-deposition annealing for solar cell applications. Applied Surface Science. 2022;571:151324.

7. Moutinho HR, Dhere RG, Jiang CS, Al-Jassim MM. Effects of annealing on the properties of In_2S_3 thin films grown by thermal evaporation. Journal of Vacuum Science & Technology A. 2015;33(2):021502.

8. Pathan, H.M., Lokhande, C.D., Kulkarni, S.S., Amalnerkar, D.P., Seth, T. and Sung-Hwan, Han. (2005). Materials Research Bulletin, 40(6), 1018.

9. Ranjith, R., Teny Theresa John, Sudha Kartha, C., Vijayakumar, K.P., Abe, T. and Kashiwaba, Y. (2007). "Post-deposition annealing effect on In_2S_3 thin films deposited using SILAR technique", Materials Science in Semiconductor Processing, 10(1), 49.

10. Bhira, L., Essaidi, H., Belgacem, S., Couturier, G., Salardenne, J., Barreau, N. and Bernede, J. C. (2000). Phys. Status Solidi A. 181, 427.

11. Izadneshan H, Gremenok VF. Influence of annealing on the optical parameters of In_2S_3 thin films produced by thermal evaporation. Journal of Applied Spectroscopy. 2014;81(2):297-300.