Summer (2024) 6(4): 51-58
DOI: 10.30473/JPHYS.2024.71638.1197
Received: 23 Jun 2024 Accepted: 11 Aug 2024

Optoelectronic

Open Access

ORIGINAL ARTICLE

Effect of Fe Impurity on Optical and Structural Properties of CuSe Thin Films

Fatemeh Samadi[1], Nader Ghobadi[2], Pouyan Ghiasi[3*]

1 Ph.D. Student, Department of Physics, Malayer University, Malayer, Iran.
2 Associate Professor, Department of Physics, Malayer University, Malayer, Iran.
3 Assistant Professor, Department of Physics, Malayer University, Malayer, Iran.

Correspondence
Pouyan Ghiasi
Email: pouyanghiasiph@gmail.com

ABSTRACT
In this work, the effect of Fe impurity on CuSe nanostructured thin films during the deposition process has investigated. The Fe impurity introduced into the CuSe nanostructure with different concentrations of 0.01, 0.02, and 0.03 mol was made by a simple chemical solution precipitation method. The introduction of Fe impurity with different concentrations into CuSe creates new transitions related to FeSe, in which several band gaps can observed in the sample. FESEM and EDX methods have used for elemental analysis for absorption spectrum to determine energy band distance. In many samples, there are two transitions, due to the role of iron in CuSe, therefore, the band gap transitions related to FeSe and CuSe. A realistic method to determine the band gap energy without considering the assumptions related to the semiconductor structure is necessary, and the Tauc model is a suitable method for determining the band gap distance. Also, from the absorption spectrum of the samples, the Urbach energy can determined without the need to determine the absorption coefficient, given the thickness of the layersl.

KEYWORDS
Fe Doping, Chemical Solution Deposition, Energy Band Gap, Tauc Model, Urbach Energy.

How to cite
Samadi, F. Ghobadi, N. Ghiasi, P. (2024). Mechanical Stability, Effect of Fe Impurity on Optical and Structural Properties of CuSe Thin Films, Optoelectronic, 6(4), 51-58.

© 2024, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

سال ششم، شماره چهارم، تابستان 1403 (51-58)

تاریخ دریافت: 1403/04/03 تاریخ پذیرش: 1403/05/21

DOI: 10.30473/JPHYS.2024.71638.1197

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

اثر ناخالصی آهن بر خواص اپتیکی و ساختاری لایه‌های نازک مس سلنید

فاطمه صمدی[1]، نادر قبادی[2]، پویان غیاثی[3*]

1 دانشجو دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

2 دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

3 استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

نویسنده مسئول:

پویان غیاثی

رایانامه: pouyanghiasiph@gmail.com

چکیده

در این کار، اثر ناخالصی Fe بر لایه‌های نازک نانوساختار CuSe در طی فرآیند رسوب‌گذاری بررسی شده است. ناخالصی Fe واردشده در نانوساختار CuSe با غلظت‌های مختلف 0/01، 0/02 و 0/03 مول به روش رسوب‌گذاری محلول شیمیایی ساده ساخته شده است. با وارد کردن ناخالصی Fe با غلظت‌های مختلف به CuSe باعث ایجاد گذارهای جدیدی مربوط به FeSe در آن می‌شود؛ که گاف نواری متعددی در نمونه می‌توان مشاهده نمود. طیف جذبی برای تعیین فاصلهٔ باند انرژی روش FESEM و EDAX برای آنالیز عنصری استفاده شده است. در بسیاری از نمونه‌ها دو انتقال به دلیل نقش آهن در CuSe وجود دارد بنابراین؛ انتقال‌های نوری و گاف نواری مربوط به FeSe و CuSe هستند. یک روش واقعی برای تعیین انرژی شکاف نواری بدون در نظر گرفتن مفروضات مربوط به ساختار نیمه‌رسانا ضروری است؛ که مدل Tauc روشی مناسب برای تعیین فاصله گاف نواری است. همچنین از طیف جذبی نمونه‌ها می‌توان انرژی اورباخ را بدون نیاز به تعیین ضریب جذب با توجه به ضخامت لایه‌ها مشخص کرد.

واژه‌های کلیدی

آلایش آهن، رسوب حمام شیمیایی، گاف نواری انرژی، مدل Tauc، انرژی اورباخ.

استناد به این مقاله:

فاطمه صمدی، نادر قبادی، پویان غیاثی (1403). اثر ناخالصی آهن بر خواص اپتیکی و ساختاری لایه‌های نازک مس‌سلنید. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(4)، 51-58.

مقدمه

لایه‌های نازک کالکوژنید دارای کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف از جمله برای ساخت آرایه‌های فوتودیود با مساحت بزرگ، انرژی خورشیدی، پوشش‌های انتخابی خورشیدی، حسگرها، رساناهای نوری و... هستند [1] که اهمیت لایه‌های نازک کالکوژنید را نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر خواص مختلف سلنیدهای فلزی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. با توجه به ظرفیت ترکیبات استوکیومتری و غیراستوکیومتری جالب سلنید مس، سلنید مس به عنوان مادهٔ انتخابی در بین سلنیدهای فلزی در نظر گرفته شده است. علاوه براین، رسانایی سلنید مس از نوع p است، بنابراین سلنید مس یک نیمه‌رسانای ایده‌آل در ساخت سلول‌های خورشیدی و دستگاه‌های نوری در نظر گرفته می‌شود [2-5]. تنظیم گاف نواری تقریبا برای همهٔ نیمه‌رساناها اهمیت دارد اما به دلیل نسبت سطح به حجم پایین در لایه‌های نازک، برای نیمه‌رساناهای نانوساختار لایه نازک، تنظیم گاف انرژی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. تغییرات در سطوح انرژی، یک پارامتر مهم در مهندسی گاف نواری است که در آن یون‌های فلزات واسطه به عنوان یک ناخالصی باعث ایجاد حالت‌های میانی جدیدی می‌شوند؛ بنابراین سطوح مختلف فرمی، تاثیر بر فرایند نو ترکیبی و انتشار رنگی حامل اولیه را شاهد هستیم [6-8].

یکی از مهم‌ترین ابزارها برای درک و شناخت ساختار الکترونیکی جامدات در حالت‌های مختلف آمورف، کریستالی و نانوساختارها اندازه‌گیری و محاسبهٔ طیف جذب اپتیکی است. گذار اپتیکی نقش مهمی را در ویژگی‌های نیمه‌هادی‌ها ایفا می‌کند. برای جذب نوری لبه نزدیک نیمه‌رساناها مدل معروف Tauc است که به صورت زیر بیان می‌شود [9،7]:

$$\alpha = {C(h\upsilon - E_g)^n}/{h\upsilon}$$

که در آن n شاخص گذار است و به گذار طبیعی (انتقال مستقیم یا غیر مستقیم) بستگی دارد. پژوهشگران مقادیر گاف نواری را با استفاده از مقادیر مختلف به‌دست آمده از $\alpha h\upsilon$ بر حسب $h\upsilon(eV)$ و برون‌یابی به انرژی فوتون صفر، نشان می‌دهند. برای مشخص کردن مقادیر گاف، مناسب‌ترین قسمت خطی از نمودار، انتخاب می‌شود. دوپینگ نیمه‌رساناها (وارد کردن ناخالصی) یکی از نقش‌های اصلی و اساسی در مواد است، به طوری که با وارد کردن ناخالصی‌ها، خواص الکترونیکی و نوری نیمه‌رساناها به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد [7]؛ بنابراین تعیین غلظت حامل مورد نظر فراهم می‌شود. علاوه براین به‌دست آوردن ویژگی‌هایی مانند انتشار، جذب، انتقال و گاف نواری ممکن می‌شود، همچنین جذب بالا و گاف نواری مناسب از مهم‌ترین ویژگی‌های سلنید مس است و دوپینگ CuSe با برخی فلزات می‌تواند بعضی از خواص آن را تغییر دهد تا برای استفاده در دستگاه‌های اپتوالکترونیک مفیدتر شود [11، 10].

وارد کردن ناخالصی‌هایی مانند آهن به مقدار بسیار کم در محلول اصلی، خواص اپتیکی لایه‌های نازک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. نیمه‌رساناهایی مانند سلنید مس در حالت نانوساختار می‌تواند به جای مس، فلزاتی مانند Fe، Co و Ni در غلظت‌های بسیار کوچک جایگزین گردد تا مقادیر گذار اپتیکی مورد نظر ایجاد شود. با جایگزینی فلزات دیگر، به وضوح قابل مشاهده است که طیف جذب لایه‌های نازک، در مادهٔ اصلی نوار جدیدی را ایجاد می‌کند [12-17].

روش آزمایشگاهی

تمامی مواد شیمیایی از شرکت مرک خریداری شده و به عنوان ماده اولیه برای تهیه لایه‌های نازک مس سلنید آلاییده شده با آهن به روش رسوب‌دهی حمام شیمیایی استفاده شدند.

برای تهیه نانوساختار لایه نازک مس سلنید با ناخالصی آهن، پودر سلنیوم، نیترات مس و نیترات آهن به عنوان مواد اولیه و منبع ناخالصی استفاده شد که در آن آمونیاک به عنوان عامل کمپلکس ساز در نظر گرفته می‌شود.

محلول حاوی سدیم سولفات و پودر سلنیم در حمام آب 80 درجه سانتیگراد به مدت 8 ساعت بهم زده شد تا محلولی شفاف و همگن به دست آید. از طرفی محلول نیترات مس تهیه شد و این دو محلول با هم مخلوط و تحت همزن مغناطیسی همزده شدند. سپس نیترات آهن به عنوان ناخالصی با غلظت‌های مختلف به محلول اضافه و PH محلول اندازه‌گیری شد.

در نهایت محلول به لایه‌هایی که با زاویه 20 درجه داخل بشر قرار دارند اضافه شد و در آون با دمای 38 درجه سانتیگراد به مدت 16 ساعت قرار گرفت تا لایه‌نشانی انجام شود.

لایه‌های مس سلنید آلاییده شده با آهن روی بسترهای شیشه‌ای به منظور بررسی تاثیر ناخالصی آهن بر خواص ساختاری و اپتیکی آنها رسوب داده شد.

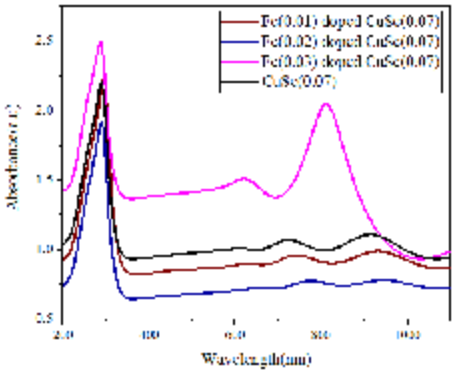
ترکیب اتمی لایه‌ها با استفاده از طیف‌سنج پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDX) تجزیه و تحلیل شد. الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) لایه‌های نازک مس سلنید آلاییده شده با آهن اندازه‌گیری شد. مرفولوژی سطح لایه‌های نازک مس سلنید با ناخالصی آهن با میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FESEM) مشاهده شد. طیف UV-Visible در محدوده طیفی 200 تا 1100 نانومتر ثبت شد. تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شده است.

نتایج و بحث

جذب اپتیکی

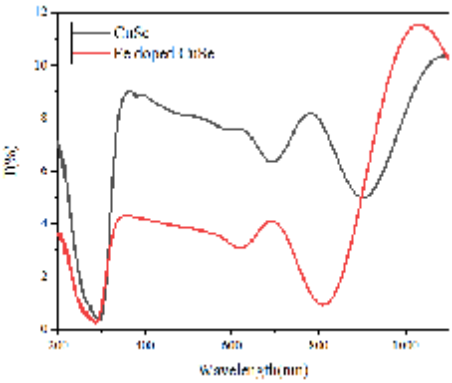
شکل 1 طیف جذب UV-Vis نقاط کوانتومی مس سلنید خالص و آلاییده به آهن در دمای 38 درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد.

برای آشکار کردن نقش ناخالصی آهن بر مرفولوژی و خصوصیات ساختاری نانو ساختارها، طیف جذب مس سلنید خالص و آلاییده شده به آهن با غلظت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. بررسی طیف UV-Vis نشان می‌دهد که اضافه کردن آهن به عنوان ناخالصی با غلظت‌های 0/01 و 0/02 مولار میزان جذب لایه‌ها، نسبت به مس سلنید خالص کاهش پیدا کرده است اما با افزایش ناخالصی آهن به 0/03 مولار جذب به میزان چشمگیری افزایش یافته است،که نشان دهنده کاهش گاف انرژی است، همچنین ماهیت نیم‌رسانایی لایه‌های نازک مس سلنید را تأیید می‌کند.



شکل 1. طیف جذبی CuSe خالص و CuSe آلاییده به آهن

شکل 2 منحنی‌های عبور اپتیکی لایه‌های نازک CuSe خالص و CuSe آلاییده به آهن را نشان می‌دهد. میزان عبور اپتیکی با اضافه شدن ناخالصی آهن کاهش می‌یابد که این امر اثر ناخالصی آهن بر لایه‌های نازک سلنید مس را نشان می‌دهد.



شکل 2. طیف عبور اپتیکی CuSe خالص و CuSe آلاییده به آهن

مطالعهٔ پدیده‌های جذب نوری، روشی ساده را برای مطالعات ساختار نواری، شکاف نواری انرژی و سایر پارامترهای نوری ارائه می‌دهد.

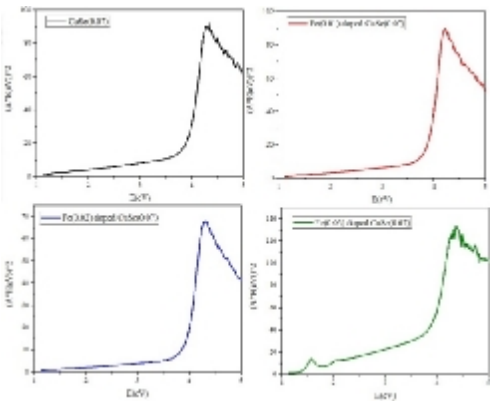
محاسبهٔ گاف انرژی به روش ITM[1]

شکاف نوار انرژی لایه‌های نازک سلنید مس خالص و سلنید مس آلاییده به آهن با استفاده از روش تاک ارزیابی می‌شود [18].

$$(ah\nu) = A(h\nu - E_g)^m$$

که در رابطهٔ فوق A مقداری ثابت است، E_g شکاف نوار انرژی، hν انرژی فوتون فرودی و m پارامتری است که به نوع انتقال بستگی دارد. پارامتر m می‌تواند دارای مقادیر 0/5 و 2 باشد که به ترتیب بیانگر انتقال شکاف نوار مستقیم و غیر مستقیم است. تغییرات $(ah\nu)^2$ برحسب hν از یک رفتار خطی در منطقه جذب بالا پیروی می‌کند که نشانگر انتقال مستقیم است، که در شکل 3 مشاهده می‌شود. مقدار شکاف انرژی لایه‌های نازک از برون‌یابی ناحیه خطی منحنی‌ها در جذب صفر، مشاهده می‌گردد. با اضافه کردن آهن در لایه‌های نازک CuSe گذارهای جدیدی مربوط به FeSe مشاهده می‌شود و به این معنی است که غلظت کم آهن یک گذار جدیدی در CuSe ایجاد می‌کند و نمونه، شامل شکاف انرژی اپتیکی است. با افزایش غلظت آهن به دلیل رشد نانو ذرات، شکاف انرژی کاهش می‌یابد؛ بنابراین با اضافه نمودن آهن با غلظت 0/03 مولار، مقدار گاف انرژی از 3/8 الکترون ولت به 1/5 الکترون ولت کاهش می‌یابد.

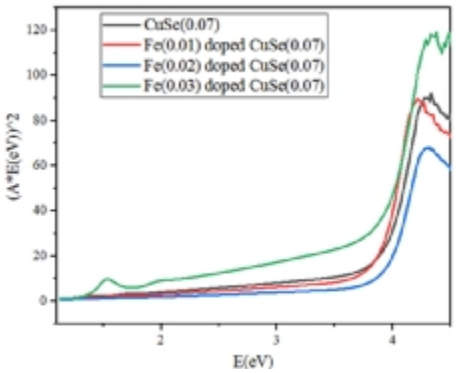
1 Ineffective Thickness Method



شکل 3. نمودار تغییرات $(ah\nu)^2$ برحسب hν برای مس سلنید خالص و آلاییده به آهن با غلظت‌های مختلف

این نمونه دارای شرایط بهینه‌ای است زیرا یون‌های آهن شکاف نواری را به 1/5 الکترون ولت کاهش می‌دهند و می‌توان نتیجه گرفت که ناخالصی، ساختارهای جدیدی پدید می‌آورد.

شکل 4، تغییرات گاف انرژی برای سلنید مس خالص و سلنید مس با ناخالصی 0/01، 0/02 و 0/03 را نشان می‌دهد.

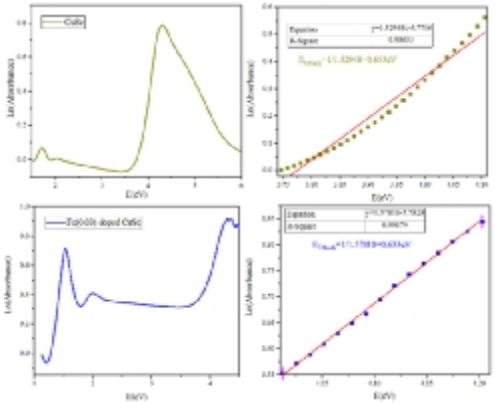


شکل 4. مقایسهٔ تغییرات $(ah\nu)^2$ برحسب hν مس سلنید خالص و آلاییده به آهن

با توجه به شکل‌های 3 و 4 مشاهده می‌کنیم که با افزایش غلظت ناخالصی آهن، گاف انرژی سلنید مس کاهش می‌یابد؛ بنابراین گاف انرژی با غلظت ناخالصی رابطهٔ عکس دارد.

تعیین انرژی اورباخ

انرژی اورباخ از طریق مطالعه جذب نوری در بلور به دست می‌آید که در نزدیکی لبه شکاف نوار انرژی در امتداد لبه



شکل 5. طیف انرژی اورباخ مس سلنید خالص و با ناخالصی آهن

جذب، یک قسمت نمایی به نام دنباله اورباخ وجود دارد. این حالت زمانی رخ می‌دهد که مواد، تبلور ضعیفی دارند، چون در نزدیکی نوار ظرفیت و نوار رسانش که بالای لبه تحرک قرار دارد، حالت کشیده‌ای وجود دارد و همچنین، لبه جذب تیز نیست [19].

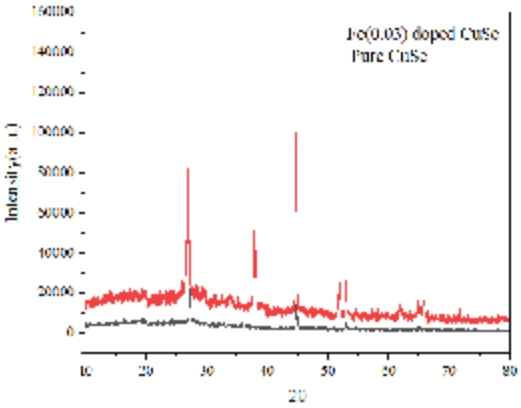
با توجه به شکل 5، انرژی اورباخ با رسم نمودار Ln(A) برحسب انرژی فوتون فرودی، به دست می‌آید. مقدار انرژی اورباخ محاسبه شده با ناخالصی 0/03 آهن نسبت به مس سلنید خالص کاهش یافته است که مقادیر آن در جدول 1 گزارش شده است، بنابراین لایه‌ها با افزودن ناخالصی نظم بیشتری را به خود می‌گیرند و در نتیجه کیفیت لایه‌ها بهبود یافته و به ساختارهای بلوری نزدیک‌تر می‌شوند. در جدول 1، مقادیر اندیس گذار برای سلنید مس خالص 0/61 و برای سلنید مس آلاییده به آهن با غلظت 0/03 مولار 0/52 الکترون ولت گزارش شده است و با توجه به اینکه مقادیر گزارش شده نزدیک به عدد 0/5 هستند، بنابراین گاف مستقیم برای نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

جدول 1. طیف انرژی اورباخ مس سلنید خالص و آلاییده به آهن

نمونه	گاف (eV)	انرژی اندیس گذار (m)	انرژی اورباخ (eV)
سلنید مس	3/8	0/61 (مستقیم)	0/653
سلنید مس آلاییده به آهن (0/03مولار)	1/5	0/52 (مستقیم)	0/633

مطالعات ساختاری (XRD)

خواص ساختاری لایه‌های نازک مس سلنید خالص و آلاییده به آهن با غلظت 0/03 مولار به وسیله طیف‌سنج اشعه ایکس اندازه‌گیری شدند. شکل 6، الگوی XRD[1] مربوط به لایه‌های سلنید مس خالص و آلاییده به آهن با غلظت 0/03 مولار را نشان می‌دهد. در الگوی XRD، یک قله پراش قوی در صفحه (111) در موقعیت 26/934 برای لایه‌های مس سلنید مطالعه‌شد مشاهده می‌شود که به ساختار بلوری مکعبی مس سلنید بسیار نزدیک است. افزایش غلظت آهن باعث تغییر در موقعیت 26/934 شده است (از 26/934 به 26/750). همچنین یک قله در صفحه (022) نیز وجود دارد که تغییر غلظت آهن باعث تغییر در موقعیت قله از 44/705 به 44/600 شده است.

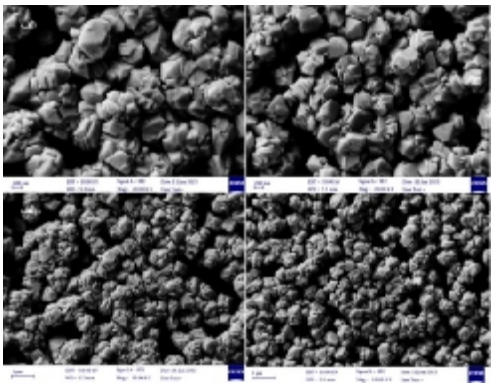


شکل 6. الگوی XRD لایه‌های نازک مس سلنید خالص و آلاییده به آهن با غلظت 0/03 مولار

بررسی ریخت‌شناسی سطحی لایه‌ها

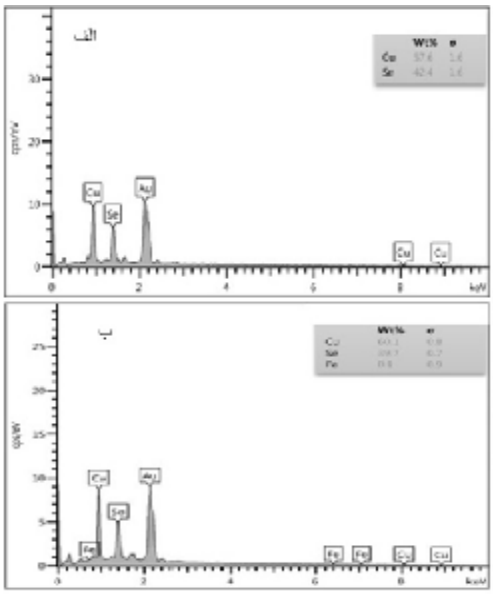
در این بخش آنالیز سطحی FESEM[2] و EDX[3] از لایه‌های نازک سلنید مس خالص و آلاییده به آهن بررسی می‌گردد. شکل 7 تصاویر FESEM از سطح الف) سلنید مس خالص و ب) سلنید مس آلاییده به آهن در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت را نشان می‌دهد که با اضافه شده آهن به عنوان ناخالصی سطح لایه صاف‌تر به نظر می‌رسد. به طور کلی کیفیت مرفولوژی سطح با حضور آهن به عنوان ناخالصی بهبود یافته است.

آنالیز و تحلیل عنصری لایه‌های نازک سلنید مس خالص و با ناخالصی آهن که بر یک بستر شیشه‌ای لایه‌نشانی شده‌اند با استفاده از روش EDX، در نقاط مختلف بحث و اندازه‌گیری شده است.



شکل 7. تصاویر FESEM از سطح الف) مس سلنید خالص و ب) مس سلنید آلاییده به آهن در بزرگنمایی‌های متفاوت

همان طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود عناصر Cu و Se در شکل الف و عناصر Cu، Se و Fe در قسمت ب وجود دارند که حضور عنصر آهن در لایه‌های نازک سلنید مس را تایید می‌کند.



شکل 8. طیف و مشخصات به‌دست آمده از آنالیز عنصری EDX برای لایه‌های نازک الف) CuSe خالص و ب) CuSe آلاییده به آهن

1 X-Ray Diffraction
2 Field Emission Scanning Electron Microscopy
3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

نتیجه‌گیری

CuSe آلاییده شده به آهن با غلظت‌های 0/01، 0/02 و 0/03 مول می‌تواند برای تنظیم گذار اپتیکی اهداف مورد نظر، به ما کمک کند. اضافه کردن آهن به روش رسوب‌دهی محلول شیمیایی بسیار ساده و مقرون به صرفه‌تر از روش‌های ساخت دیگر است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که یون‌های آهن دوپینگ شده در طی فرایند رسوب‌گذاری نقش مهمی را ایفا می‌کند که این نقش در کنترل انتقال نوری، استوکیومتری، تغییر رنگ و ایجاد فاز جدید (FeSe) به وضوح قابل مشاهده است. دو گذار اپتیکی در بسیاری از نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که این امر به دلیل اضافه کردن آهن در CuSe است؛ بنابراین انتقالات نوری با دو شکاف انرژی به مس سلنید با ناخالصی آهن مربوط می‌شود. باتوجه به نتایج به‌دست آمده انرژی اورباخ را بدون نیاز به تعیین ضریب جذب می‌توان از طیف جذبی نمونه‌ها و با استفاده از تعیین ضخامت آنها، مشخص نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزودن ناخالصی میزان جذب لایه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته است که این امر نشان دهندهٔ کاهش گاف انرژی است و علاوه بر این ماهیت نیمه‌رسانایی لایه‌های نازک مس سلنید را تایید می‌کند.

منابع

[1] R. Mane and C. Lokhande, "Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films," Materials Chemistry and physics, vol. 65, no. 1, pp. 1-31, 2000.S. H. Tan, B. I. Erkmen, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, S. Pirandola, J. H. Shapiro, Quantum illumination with Gaussian states, Phys. Rev. Lett. **101**, 253601 (2008).

[2] L. Sun et al., "Ultrahigh discharge efficiency and improved energy density in rationally designed bilayer polyetherimide–BaTiO 3/P (VDF-HFP) composites," Journal of Materials Chemistry A, vol. 8, no. 11, pp. 5750-5757, 2020S.

[3] X.-T. Yin, J. Li, D. Dastan, W.-D. Zhou, H. Garmestani, and F. M. Alamgir, "Ultra-high selectivity of H2 over CO with a pn nanojunction based gas sensors and its mechanism," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 319, p. 128330, 2020

[4] L. Tao et al., "CO2 capture and separation on charge-modulated calcite," Applied Surface Science, vol. 530, p. 147265, 2020.

[5] A. Hermann and L. Fabick, "Research on polycrystalline thin-film photovoltaic devices," Journal of Crystal Growth, vol. 61, no. 3, pp. 658-664, 1983.

[6] Capper, Peter, Arthur Willoughby, and Safa O. Kasap. Optical properties of materials and their applications. John Wiley & Sons, 2020.

[7] Burda, Clemens, et al. "Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes." Chemical reviews 105.4 (2005): 1025-1102.

[8] Tauc, J., and A. Menth. "States in the gap." Journal of non-crystalline solids 8 (1972): 569-585.

[9] N. Ghobadi, S. Chobin, S. Rezaee, and R. Shakoury, "Tuning the optical and photocatalytic features of copper selenide prepared by chemical solution deposition method," Surfaces and Interfaces, vol. 21, p. 100706, 2020.

[10] A. Haufe, R. Schwabe, H. Feiseler, and M. Ilegems, "The luminescence lineshape of highly doped direct-gap III-V compounds," Journal of Physics C: Solid State Physics, vol. 21, no. 15, p. 2951, 1988.

[11] B. Poornaprakash, U. Chalapathi, and S. P. Vattikuti, "Compositional, morphological, structural, microstructural, optical, and magnetic properties of Fe, Co, and Ni doped ZnS nanoparticles," Applied Physics A, vol. 123, pp. 1-10, 2017.

[12] Montes-Monsalve, J. I., R. Bernal Correa, and A. Pulzara Mora. "Optical and structural study of CuSe and CuSe/in thin films." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 480. No. 1. IOP Publishing, 2014.

[13] Dutta, Amit Kumar, et al. "Synthesis of FeS and FeSe nanoparticles from a single source precursor: a study of their photocatalytic activity, peroxidase-like behavior, and electrochemical sensing of H2O2." ACS applied materials & interfaces 4.4 (2012): 1919-1927.

[14] Mohamed, S. H. "Photocatalytic, optical and electrical properties of copper-doped zinc sulfide thin films." Journal of physics D: applied physics 43.3 (2010): 035406.

[15] Poongodi, G., et al. "Studies on visible light photocatalytic and antibacterial activities of nanostructured cobalt doped ZnO thin films prepared by sol–gel spin coating method." Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 148 (2015): 237-243.

[16] Chen, A. J., et al. "Structure and photoluminescence properties of Fe-doped ZnO thin films." Journal of Physics D: Applied Physics 39.22 (2006): 4762.

[17] Dutta, Amit Kumar, et al. "Synthesis of FeS and FeSe nanoparticles from a single source precursor: a study of their photocatalytic activity,

peroxidase-like behavior, and electrochemical sensing of H2O2." ACS applied materials & interfaces 4.4 (2012): 1919-1927.

[18] Kaur, Jagdish, and S. K. Tripathi. "Pb dopant induced changes in structural, optical and electrical properties of CdSe thin films." Journal of Alloys and Compounds 622 (2015): 953-959.

[19] Kranjčec, Mladen, I. P. Studenyak, and M. V. Kurik. "On the Urbach rule in non-crystalline solids." Journal of Non-Crystalline Solids 355.1 (2009): 54-57.