نشریه علمی

تحقیقات در علوم مهندسی سطح و نانو مواد

سال ۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱

مطالعه مروری کوتاه بر روش های مختلف اصلاح سطحی نانوساختارهای سولفیدقلع جهت کاربردهای مختلف

محسن چراغی زاده[۱]، فرید جمالی شینی*[۲]

[۱] مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

[۲] مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

در این مطالعه مروری کوتاه به بررسی انواع روش های مورد استفاده در اصلاح سطحی نانوساختارهای سولفیدقلع پرداخته شده است. اصلاح سطحی یکی از روش های موثر جهت مهندسی خواص فیزیکی و شیمیایی نانوساختارهای نیم رسانا جهت استفاده در کاربردهای مختلف می باشد. اصلاح سطحی نانومواد بواسطه اینکه بسیاری از خواصی مشاهده شده از آنها ناشی از ویژگی های میکروسکوپیکی سطحی آنها می باشد، می تواند رهیافت مهمی در جهت بالابردن بازدهی آنها باشد. لذا با مطالعه گزارش های ارائه شده در بازه زمانی گذشته از قرن میلادی حاضر روش های پلاسمای سرد، گازهای بی و با اثر، استفاده از پوشش پوسته، افزودن آلاینده و استفاده از لایه های تقویت کننده که گزارش شده است، مورد مطالعه و مرور قرار گرفته است. تکیه این مطالعه بر تاثیر این اصلاح بر خواص فیزیکی شامل شبکه بلوری، خواص ریختی، نوری، الکتریکی و لکترونیک نوری می باشد. در انتها نیز نتیجه گیری و چشم اندازی برای آینده این زمینه تحقیقی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: *اصلاح سطحی، خواص فیزیکی، کاربردهای نوین، نانو ساختارهای سولفید قلع*

تاریخ دریافت : ۱۴۰۰/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

A short review on surface modification of tin sulfide (SnS) nanostructures for novel applications

Mohsen Cheraghizade [1], Farid Jamali-Sheini [*2]

[1] Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

[2] Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Physics, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this short review study, the various methods used in surface modification of tin sulfide (SnS) nanostructures as novel applications are investigated. Surface modification is one of the effective methods for engineering the physical and chemical properties of semiconductor nanostructures for use in various applications. Surface modification of nanomaterials can be an important approach to increase their performance and efficiency due to the fact that many of the observed properties are due to their microscopic surface properties. Therefore, by studying the reports, the methods of cold plasma, inert and effective gases, using shell coating, adding dopants, and using the buffering layers that have been reported, are studied and reviewed. The focus of this study is on the effect of this modification on physical properties including crystal lattice, morphological, optical, electrical, and optoelectronic properties. Finally, conclusions and perspectives for the future of this field of research for surface modification of the SnS nanostructures are presented.

Keywords: Novel applications; Physical properties; SnS nanostructures; Surface modification

Received: 2022/01/21
Accepted: 2022/04/27

* نویسنده مسئول: فرید جمالی شینی

نشانی : اهواز ، مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: faridjamali2003@yahoo.com, faridjamali@iauahvaz.ac.ir

۱. مقدمه

گذار در استفاده از مواد در مقیاس توده‌ای به ابعاد میکرو و نانو قابلیت آن‌ها را در کاربردهای مختلف به مراتب بهبود و افزایش داده است. با پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری مرتبط با علم مواد، کنترل ویژگی‌های آن‌ها در ابعاد میکروسکوپی ممکن شده و به دنبال آن بازدهی و کارایی بهتری حاصل شده است. کنترل ویژگی‌های مواد هنگام ساخت (رشد) مهم‌ترین ابزار در کنترل و دسترسی به وضعیت مورد نظر در خواص مختلف مواد در ابعاد پایین می‌باشد. لذا فرآیندهایی که منجر به چنین کنترلی در ابعاد میکروسکوپی می‌شوند بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از میان روش‌های مختلف مورد استفاده در این راستا، اصلاح سطحی[1] بسیار مهم است؛ زیرا بسیاری از خواص مواد ناشی از ویژگی‌های سطحی آن‌ها بوده و علاوه بر این، اندرکنش مواد با محیط پیرامون در ابتدا و به‌صورت غالب از سطح آن‌ها صورت می‌گیرد. لذا کنترل و مهندسی سطح این مواد می‌تواند تأثیر مهمی در به دست آوردن خواص مطلوب از آن‌ها داشته باشد. اصلاح سطحی مواد در مقیاس نانو با توجه به بالا رفتن قابل‌ملاحظه نسبت سطح به حجم می‌تواند بسیار تأثیرگذارتر و مؤثرتر باشد[٤-١]. تحقیق، توسعه و استفاده از نانو مواد نیم‌رسانا نسل سوم امروزه بسیار رایج و رو به فزونی است. دلایل آن را می‌توان ملاحظات زیست‌محیطی، غیر سمی بودن، قیمت تمام‌شده، فراوانی و روش‌های ساده‌تر عمل‌آوری و... دانست. امروزه کاربردهای این مواد از جمله در صنایع مرتبط با الکترونیک نوری همچون سلول‌های خورشیدی، حسگرهای نوری و مواد فوتوکاتالیست بسیار مورد توجه صنعتگران و دانشگاهیان می‌باشد[٨-٥]. سولفید قلع[2] یکی از این مواد نیم‌رسانای نسل سوم می‌باشد که با داشتن ویژگی مناسب فیزیکی و شیمیایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [١١-٩]. تاکنون روش‌های متعددی جهت بهبود و اصلاح خواص مختلف سولیفدقلع در کاربردهای متعددی مورد توجه قرار گرفته است [١٣, ١٢]. در این مطالعه مروری کوتاه بر روش‌های مختلف اصلاح سطحی نانو ساختارهای سولفیدقلع طی قرن حاضر میلادی مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها شامل استفاده از پلاسمای سرد[3]، گازهای بی و با اثر، استفاده از پوشش پوسته، استفاده از آلاینده[4] و لایه‌های تقویت کننده[5] می‌باشد. تمرکز و نگاه اصلی در این مطالعه مروری خواص فیزیکی شامل ویژگی شبکه بلوری، ریختی، نوری، الکتریکی و الکترونیک نوری می‌باشد. این عملیات که از آن‌ها با عنوان اصلاح سطحی نام برده می‌شود، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطح نانو ساختارهای سولفیدقلع را دچار تغییر کرده که در اغلب موارد موجب بهبود خواص مورد اشاره، شده است. در انتها نیز نتیجه‌گیری و چشم‌انداز اصلاح سطحی نانو ساختارهای سولفیدقلع با تکیه بر کاربردهای الکترونیک نوری ارائه شده است.

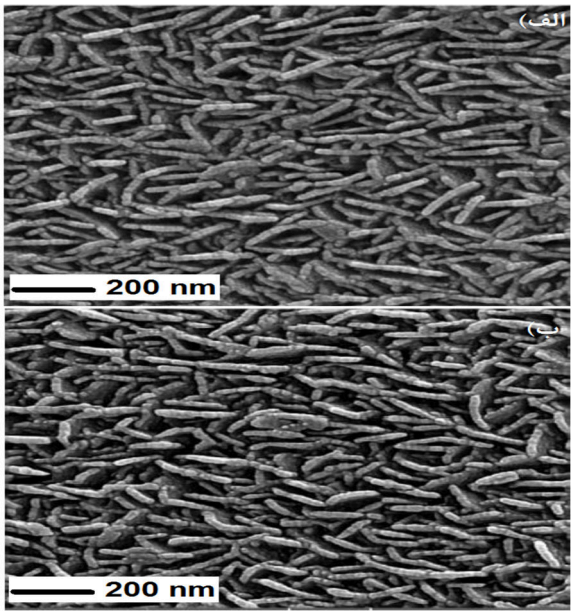
۲. روش‌های مختلف اصلاح سطحی نانو ساختارهای سولفید قلع

۲. ۱. استفاده از پلاسمای سرد

لایه‌های نازک سولفید قلع با کمک روش انباشت الکتروشیمیایی[6] توسط خدائیر و همکاران[7] جهت کاربرد به‌عنوان پوشش‌های آبگریز[8] و ضد باکتری[9] لایه نشانی و توسط فرآیند پلاسمای سرد مورد اصلاح سطحی قرار گرفت [١٤]. آن‌ها خواص بلوری، ریختی، نوری و آب‌گریزی لایه‌نازک سولفید قلع را قبل و بعد از اصلاح سطحی مورد مطالعه و بررسی قراردادند. نتایج به دست آمده نشان داد که اصلاح سطحی لایه سولفید قلع با کمک پلاسمای سرد اندازه بلورک‌های[10] سولفید قلع را کاهش و تراکم نانو ورقه‌های رشد یافته روی سطح لایه شکل ۱ را کاهش می‌دهد. همچنین عملیات پلاسمایی اندازه متوسط این نانو ورقه‌ها شکل ۱ را افزایش داده است. علاوه بر این مشخص شد که

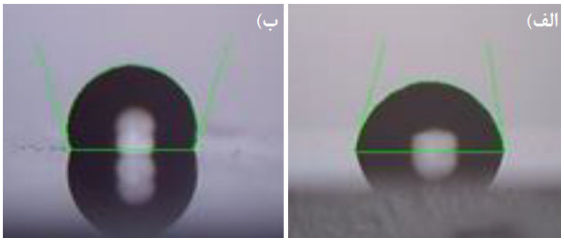
[1] Superficial modification
[2] Tin sulfide (SnS)
[3] Cold plasma
[4] Doping
[5] Buffering layers
[6] Electrodeposition
[7] Khadayeir et al.
[8] Hydrophobic coatings
[9] Anti-bactrial
[10] Crystallite size

عملیات پلاسمای سرد طول عمر جفت حامل‌های الکتریکی تولید شده در اثر تحریک نوری را افزایش می‌دهد.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] لایه‌های سولفید قلع (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات پلاسمای سطحی [۱٤].

آزمایش سنجش زاویه تماس قطره آب[2] شکل ۲ نشان داد که عملیات پلاسمای سطحی خاصیت آبگریزی سطح لایه سولفید قلع را افزایش می‌دهد که بررسی‌ها علت آن را تغییر در خواص سطحی لایه و بلوری نمونه‌ها نشان می‌دهند. خاصیت ضد باکتری لایه‌های سولفید قلع قبل و بعد از عملیات پلاسمایی با کمک باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس[3] و اشرشیاکلی[4] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال پلاسمای سرد فعالیت ضد باکتری لایه سولفید قلع را حدود ۵ برابر بیشتر می‌کند.



شکل ۲- تصویر زاویه تماس قطره آب لایه سولفید قلع (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات پلاسمای سطحی [۱٤].

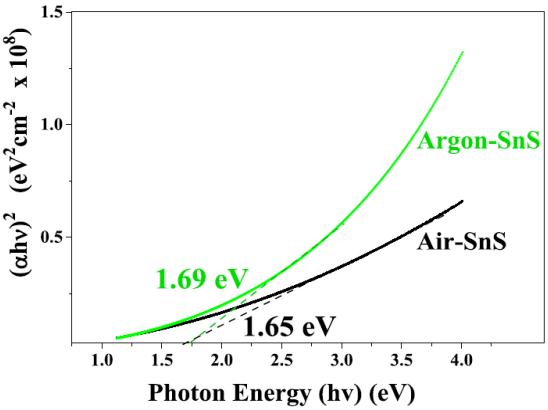
۲.۲. استفاده از گاز بی‌اثر

آندراده آرویزو و همکاران[5] تأثیر اصلاح سطحی با کمک گاز بی‌اثر آرگون را بر روی لایه نازک سولفید قلع برای استفاده به عنوان لایه جاذب در سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. آن‌ها این مطالعه را با لایه نشانی لایه‌های نازک سولفید قلع بس بلور با روش انتقال بخار در فاصله نزدیک[6] در یک محفظه خلاء کنترل شده انجام دادند. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این لایه‌ها را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهد اصلاح سطحی با کمک گاز بی‌اثر، پکیدگی را افزایش و اندازه ساختار رشد یافته در سطح را کاهش می‌دهد.

شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی‌های مختلف از سطح لایه‌های سولفیدقلع (الف و ب) بدون و (ج و د) با دمش گاز آرگون [۱۵].

شکل ٤ نمودار تاک[7] این لایه‌ها را جهت تخمین انرژی شکاف باند نوری نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، اصلاح سطحی با کمک گاز بی‌اثر آرگون انرژی شکاف باند نوری لایه‌های سولیفدقلع را افزایش داده است. علاوه بر این اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی نشان داد که دمش گاز آرگون چگالی حامل‌های الکتریکی[8] و قابلیت تحرک پذیری[9] آن‌ها را به ترتیب افزایش و کاهش می‌دهد.

[1] Scanning electron microscopy (SEM)
[2] Water contact angle (WCA)
[3] Staphylococcus aureus
[4] Escherichia coli
[5] Andrade-Arvizu et al.
[6] Close-spaced vapor transport (CSVT)
[7] Tauc plot
[8] Carrier concentration
[9] Mobility



شکل ٤- نمودار تاک جهت تخمین انرژی شکاف باند نوری لایه‌های نازک سولیفدقلع برای بررسی تأثیر دمش گاز آرگون [١٥].

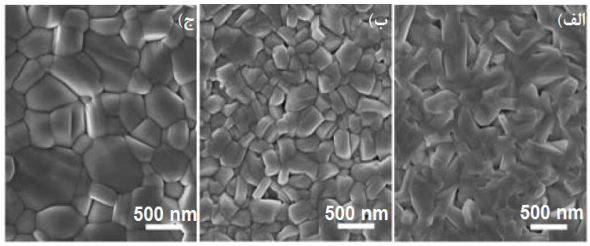
٢. ٣. استفاده از گاز با اثر

در مطالعه‌ای دیگر سینسرمسوکساکول و همکاران[1] تأثیر اصلاح سطحی با کمک گاز با اثر سولفید هیدروژن[2] را بر روی خواص فیزیکی لایه‌نازک سولیفدقلع جهت استفاده به عنوان لایه جاذب در سلول‌های خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند [١٦]. آن‌ها سه نمونه را در شرایط مختلف (بدون دمش گاز، با دمش گاز بی‌اثر نیتروژن و با دمش گاز با اثر سولفید هیدروژن) در شرایط کنترل شده با کمک روش لایه نشانی اتمی[3] آماده و مورد مطالعه قرار دادند. شکل ٥ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اصلاح سطحی با کمک گاز سولفید هیدروژن ساختارهای سطح فیلم را درشت نموده است. علاوه بر این اندازه‌گیری ویژگی‌های الکتریکی لایه‌ها که در جدول ١ آمده است نشان می‌دهد که دمش گاز سولفید هیدروژن مقاومت سطحی لایه‌های سولفیدقلع را کاهش می دهد. چگالی حامل‌های الکتریکی و قابلیت تحرک پذیری آن‌ها با اصلاح سطحی توسط گاز سولفید هیدروژن به ترتیب افزایش و کاهش‌یافته است. افزایش چگالی حامل‌های الکتریکی می‌تواند مرتبط با کاهش جاهای خالی سولفور[4] در شبکه بلوری سولفید قلع با دمش گاز سولفید هیدروژن باشد.

جاهای خالی سولفور که می‌توانند ایجاد سطوح دهنده[5] در ساختار باند الکترونیکی سولفید قلع می‌نمایند، می‌توانند به‌عنوان مراکز تله‌ای[6] جهت به دام اندازی حامل‌های اکثریت (حفره[7]) نقش بازی کنند. علاوه بر این جاهای خالی سولفور طول عمر[8] حامل‌های اقلیت (الکترون[9]) را کاهش می‌دهند و احتمال شرکت آن‌ها در جریان الکتریکی را کاهش می‌دهند. لذا کاهش آن‌ها می‌تواند عامل تعیین کننده‌ای در بهبود خواص الکتریکی لایه‌های سولیفدقلع داشته باشد.

جدول ١- ویژگی الکتریکی لایه‌های نازک سولفید قلع جهت بررسی تأثیر دمش گاز با اثر سولفید نیتروژن [١٦].

Atmosphere	Temp. [°C]	Resistivity [Ω•cm]	Hole density [cm^{-3}]	Mobility [cm^2/Vs]
As-dep SnS	200	657±7	$(1.8\pm0.1)\times10^{15}$	5.2±0.5
H_2S	400	280±11	$(5.7\pm0.5)\times10^{15}$	4.0±0.2



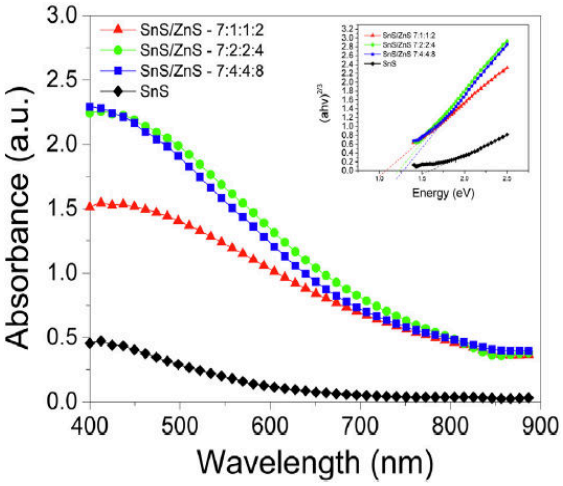
شکل ٥- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح لایه‌های سولفیدقلع (الف) بدون دمش گاز و با دمش گاز (ب) نیتروژن و (ج) سولفیدهیدروژن [١٦].

٢. ٤. استفاده از پوشش پوسته

چنگ و همکاران[10] از پوشش سولفید روی[11] بر روی نقاط کوانتومی[12] سولفید قلع به عنوان پوسته جهت اصلاح سطحی آن تحت عنوان ساختارهای هسته-پوسته[13] استفاده کردند [١٧]. این اصلاح سطحی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی خواص نوری آن‌ها نشان داد. شکل ٦ طیف جذبی و نمودار تاک این نمونه را نشان می‌دهد. ساختارهای هسته-پوسته در غلظت‌های مختلفی از سولیفدقلع و سولفید روی

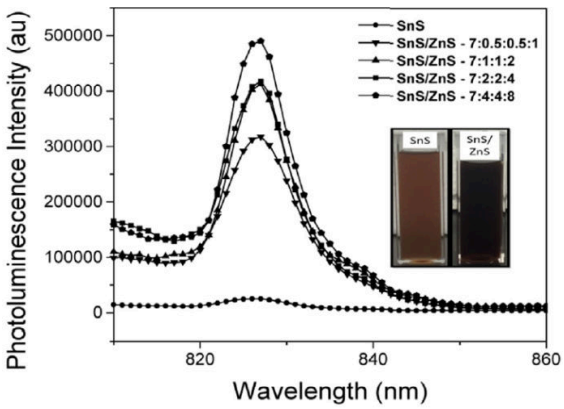
[1] Sinsermsuksakul et al.
[2] H_2S
[3] Atomic layer deposition (ALD)
[4] Sulfur vacancy (S_V)
[5] Donor levels
[6] Trap sites
[7] Hole
[8] Carrier lifetime
[9] Electron
[10] Cheng et al.
[11] Zinc sulfide (ZnS)
[12] Quantum dots (QDs)
[13] Core-Shell

آماده و مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان دادند که افزودن پوشش سولفید روی توانایی جذب نقاط کوانتومی سولفید قلع را افزایش می‌دهد. علاوه بر این افزودن پوسته سولفید روی انرژی شکاف باند نقاط کوانتومی سولفید قلع را کاهش می‌دهد.



شکل ٦- طیف جذب و نمودار تائوک جهت مطالعه خواص نوری ساختارهای هسته-پوسته سولفید قلع-سولفید روی در غلظت‌های مختلف [۱۷].

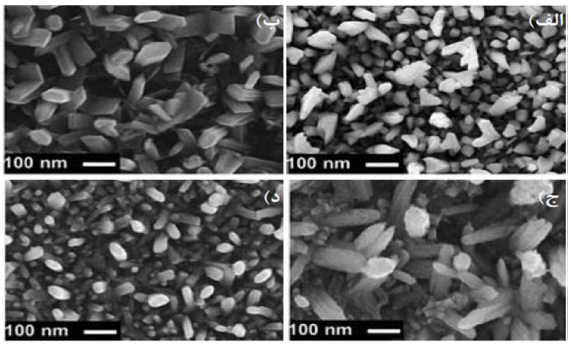
اندازه‌گیری قابلیت نور تابناکی[1] نمونه‌ها در شکل ۷ نیز نشان داد که این اصلاح سطحی نقاط کوانتومی سولفید قلع با کمک پوسته سولفید روی شدت طیف نور تابناکی آن‌ها را افزایش می‌دهد. گروه‌های پژوهشی دیگری نیز با کمک پوسته‌هایی همانند اکسیدسیلیکن و سولفید ایندیم به اصلاح سطحی نانو ساختارهای سولفید قلع پرداختند [۱۹, ۱۸].



شکل ۷- طیف نور تابناکی ساختارهای هسته-پوسته سولفید قلع-سولفید روی در غلظت‌های مختلف جهت مطالعه خواص نوری [۱۷].

۲. ۵. استفاده از آلاینده

افزودن آلاینده‌های مختلف یکی از دیگر روش‌های رایج اصلاح سطحی در نانو مواد می‌باشد. جمالی شینی و همکاران[2] با افزودن آلاینده سلنیم به لایه‌های نازک و نانو ساختار سولفید قلع به مطالعه تأثیر آن بر خواص فیزیکی از جمله ویژگی‌های سطحی لایه‌ها پرداختند [۲۰]. این لایه‌ها در سه غلظت مختلف از سلنیوم با کمک روش انباشت الکتروشیمیایی رشد داده شده و با نمونه بدون آلایش (مرجع) مقایسه شدند. الگوهای پراش پرتوایکس برای همه نمونه تشکیل فاز اورتورومبیک بس بلور سولفید قلع را تائید کردند. افزودن آلاینده سلنیوم ریخت سطحی لایه‌ها (شکل ۸) را تغییر نداده است، اما قطر متوسط آن‌ها را در دو غلظت اول افزایش و در غلظت بیشینه کاهش داده است.



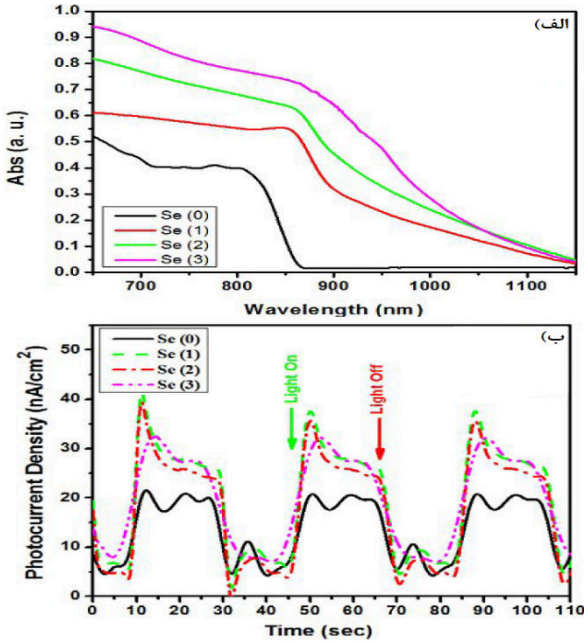
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های سولفید قلع خالص الف) در مقایسه با نمونه‌های آلاییده با سلنیوم در غلظت‌های مختلف ب) غلظت کمینه، ج) غلظت متوسط و د) غلظت بیشینه [۲۰].

شکل ۹ الف طیف جذبی این لایه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است افزودن آلاینده سلنیم میزان جذب را افزایش داده است. به‌طوری‌که نمونه با بیشترین غلظت از آلاینده دارای بیشترین شدت جذب می‌باشد. شکل ۹ ب نیز جریان دهی نوری نمونه را در پاسخ به تابش متناوب نور زنون (به دون اعمال بایاس) نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده این است که آلاینده سلنیم قابلیت تولید جریان نوری را در مقایسه با نمونه خالص افزایش داده است.با توجه به اینکه فوتون‌ها از طریق سطح لایه جذب‌شده و حامل‌های الکتریکی تولید می‌کنند، اصلاح ویژگی‌های سطحی لایه‌های سولفید قلع توسط آلاینده

[1] Photoluminescence (PL)

[2] Jamali-Sheini et al.

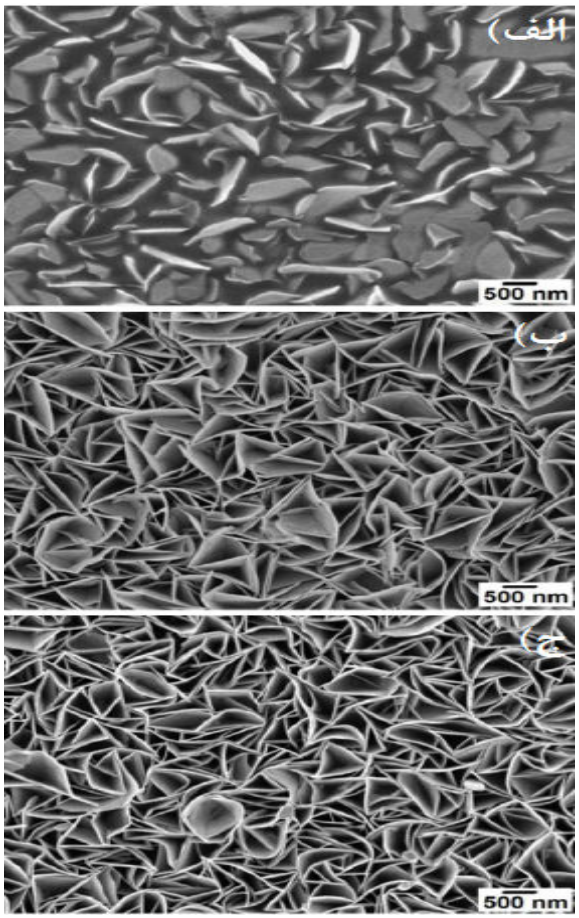
سلنیوم می‌تواند نقش مهمی در این بهبود جریان دهی نوری داشته باشد. آلاینده‌های دیگر نیز جهت اصلاح خواص سطحی نانو ساختارهای سولفید قلع نیز توسط دیگر گروه‌های پژوهشی گزارش شده است [٢٤-٢١].



شکل ٩- الف) طیف جذبی و ب) جریان دهی نوری لایه‌های سولفید قلع (Se0: نمونه خالص، Se1: نمونه آلاییده با غلظت کمینه، Se2: نمونه آلاییده با غلظت متوسط و Se3: نمونه آلاییده با غلظت بیشینه) [٢٠].

٢. ٦. استفاده از لایه‌های تقویت‌کننده

جمالی شینی و همکاران با کمک لایه‌های تقویت کننده طلا و نقره به بررسی و اصلاح خواص سطحی لایه‌های سولفید قلع که توسط روش تبخیر حرارتی شیمیایی[1] لایه نشانی شده بودند، پرداختند [٢٥]. لایه‌های مذکور بر روی بستر شیشه‌ای در یک کوره افقی تحت خلاء کنترل شده و با دمش گاز آرگون رشد داده شدند. شکل ١٠ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این لایه‌ها را در مقایسه با نمونه بدون لایه تقویت کننده نشان می‌دهد.این تصاویر بیانگر این است که لایه‌های تقویت کننده طلا و نقره تراکم نانو ورقه‌های تشکیل شده بر روی سطح لایه‌ها را افزایش و ضخامت آن‌ها را کاهش می‌دهند. این تغییر در ریخت سطحی لایه‌ها می‌تواند توانایی جذب فوتون در واحد سطح را افزایش داده و کارایی الکترونیک نوری آن‌ها را افزایش دهد. با کمک این لایه‌ها سلول خورشیدی ساخته شده و مورد مشخصه یابی قرار گرفت.

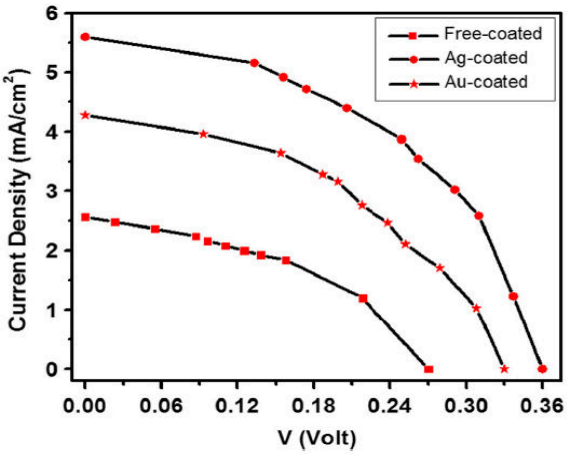


شکل ١٠- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه سولفید قلع الف) بدون لایه تقویت کننده و با لایه‌های تقویت کننده ب) نقره و ج) طلا [٢٥].

شکل ١١ منحنی سلول خورشیدی را برای آن‌ها نشان می دهد. این نمودارها نشان می‌دهند که لایه‌های تقویت کننده طلا و نقره کارایی سلول خورشیدی لایه‌های سولفید قلع را افزایش می‌دهند. این افزایش در نمونه با لایه تقویت کننده نقره در مقدار بیشینه ٠٫٩٧٪ در مقایسه با سایر نمونه‌ها خود را نشان می‌دهد. خواص الکتریکی لایه نیز با کمک مشخصه یابی موت-شاتکی[2] اندازه‌گیری و مشخص شد که این ویژگی‌ها نیز با افزودن لایه‌های تقویت کننده طلا و نقره بهبود می‌یابند.

[1] Chemical vapor deposition (CVD)

[2] Mott-Schottky



شکل ۱۱: منحنی سلول خورشیدی لایه سولفید قلع با و بدون لایه‌های تقویت کننده طلا و نقره تحت تابش استاندارد نور خورشید[۲۵].

۳. نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

گزارش‌های مرور شده در مطالعه حاضر نشان می‌دهند که اصلاح سطحی نانو ساختارهای سولفید قلع با استفاده از روش‌هایی همچون پلاسمای سرد، دمش گازهای بی‌اثر و با اثر، استفاده از پوشش‌های پوسته، افزودن آلاینده و همچنین استفاده از لایه‌های تقویت‌کننده مانند طلا و نقره، تغییر قابل توجه و معناداری در خواص فیزیکی دارد. به‌طور خاص این اصلاح سطحی خاصیت جذب و گسیل نور را افزایش می دهد، مقاومت صفحه‌ای را کاهش و چگالی حامل‌های الکتریکی را افزایش می‌دهد. این تغییرات ناشی از فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی ناشی از اصلاح سطحی می باشد. با توجه به تأثیر قابل ملاحظه و همچنین سادگی و در دسترس بودن روش‌های اصلاح سطحی برای نانو ساختارهای سولفید قلع، می‌توان فرآیندهای دیگر همچون استفاده عملیات تابش‌دهی نوری با پرتوهای مختلف همانند فرابنفش و مادون‌قرمز، استفاده از لایه‌های یونی معدنی و غیرمعدنی، عملیات حرارتی سطحی، پلاسمای گرم و ... را برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و همچنین مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز در پشتیبانی و حمایت را اعلام می‌دارند.

مرجع‌ها

[۱] م. رستمی، ر. امینی، بررسی اثر اصلاح سطحی نانو ذرات آلومینا با وینیل سیلان بر خواص فیزیکی مکانیکی رزین وینیل استر، *علوم و فناوری رنگ*، **۱۰** (۱۳۹۵) ۲۳۳-۲٤٦.

[۲] م. ترابی انگجی، ل. اصغرنژاد، ف. ملکی، و. گودرزی، بررسی تاثیر اصلاح سطحی نانوذرات TiO_2 بر روی خواص نانوکامپوزیت UP/TiO_2، *نانومواد*، **۳** (۲۰۱۱) ۱-۷.

[3] C.R. Vandenabeele, S. Lucas, Technological challenges and progress in nanomaterials plasma surface modification – A review, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **139** (2020) 100521.

[4] C. geor malar, M. Seenuvasan, K.S. Kumar, A. Kumar, R. Parthiban, Review on surface modification of nanocarriers to overcome diffusion limitations: An enzyme immobilization aspect, *Biochemical Engineering Journal*, **158** (2020) 107574.

[5] M. Cheraghizade, F. Jamali-Sheini, P. Shabani, Annealing temperature of nanostructured SnS on the role of the absorber layer, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **90** (2019) 120.

[6] D.G. Moon, S. Rehan, D.H. Yeon, S.M. Lee, S.J. Park, S. Ahn, Y.S. Cho, *A review on binary metal sulfide heterojunction solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells*, **200** (2019) 109963.

[7] T. Lange, S. Reichenberger, S. Ristig, M. Rohe, J. Strunk, S. Barcikowski, R. Schlögl, Zinc sulfide for photocatalysis: White angel or black sheep?, *Progress in Materials Science,* **124** (2022) 100865.

[8] M. Mohl, A.-R. Rautio, G.A. Asres, M. Wasala, P.D. Patil, S. Talapatra, K. Kordas, 2D Tungsten Chalcogenides: Synthesis, Properties and Applications, *Advanced Materials Interfaces*, n/a (2020) 20000.

[9] [۹] M. Cheraghizade, F. Jamali-Sheini, Photovoltaic behavior of SnS solar cells under temperature variations, *Optik*, **254** (2022) 168635.

[10] R.E. Banai, M.W. Horn, J.R.S. Brownson, A review of tin (II) monosulfide and its potential as a photovoltaic absorber, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **150** (2016) 112-129.

[11] N. Koteeswara Reddy, M. Devika, E.S.R. Gopal, Review on Tin (II) Sulfide (SnS) Material: Synthesis, Properties, and Applications, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **40** (2015) 359-398.

[۱۲] ف. جمالی شینی، سولفید قلع، *خواص پایه و کاربردها*، سوره تماشا، ۱۳۹۸.

[13] J.A. Andrade-Arvizu, M. Courel-Piedrahita, O. Vigil-Galán, SnS-based thin film solar cells: perspectives over the last 25 years, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **26** (2015) 4541-4556.

[14] A.A. Khadayeir, F.A. Najim, A.H. Wanas, Modification in morphological, structural, photoluminescence and antibacterial properties of SnS and CdS thin films by cold plasma treatment, *Chalcogenide Letters*, **18** (2021).

[15] J. Andrade-Arvizu, M. Courel, M. García-Sánchez, R. González, D. Jimenez, I. Becerril-Romero, A. Ramirez, O. Vigil-Galán, Argon vs. air atmosphere in close spaced vapor transport deposited tin sulfide thin films, *Solar Energy*, **208** (2020) 335.

[16] P. Sinsermsuksakul, L. Sun, W. Lee Sang, H. Park Helen, B. Kim Sang, C. Yang, G. Gordon Roy, Overcoming Efficiency

Limitations of SnS-Based Solar Cells, *Advanced Energy Materials,* **4** (2014) 1400496.

[17] H.-Y. Cheng, O. Acar, W.Y. Shih ,W.-H. Shih, Enhancing the photoluminescence of SnS quantum dots by ZnS treatment, *Chemical Physics Letters*, **754** (2020) 137696.

[18] W. Yang, J. Liu, X. Lai, Z. Zhang, B. Du, J. Wu, J. Jian, Self-confined vapour-liquid-solid growth of SnS/SiO_x core/shell nanowires, *Journal of Crystal Growth*, **548** (2020) 125839.

[19] C. Prastani, M. Nanu, D. Nanu, R.E.I. Schropp, J.K. Rath, Synthesis of SnS/In_2S_3 core–shell nanoparticles, *Chemical Physics Letters*, **612** (2014) 306.

[20] F. Jamali-Sheini, F. Niknia, M. Cheraghizade, R. Yousefi, R. Mahmoudian Mohammad, Broad Spectral Response of Se-Doped SnS Nanorods Synthesized through Electrodeposition, *ChemElectroChem*, **4** (2017) 1478.

[21] S. Lavanya, T.R. Kumar, A.V. Juliet, J. Hakami, I.M. Ashraf, M. Shkir, Noticeable photo-sensing properties of SnS:Cu thin films fabricated by thermal evaporation technique, *Solid State Sciences*, **128** (2022) 106889.

[22] X. Guo, Y. Wang, A. Elbourne, A. Mazumder, C.K. Nguyen, V. Krishnamurthi, J. Yu, P.C. Sherrell, T. Daeneke, S. Walia, Y. Li, A. Zavabeti, Doped 2D SnS materials derived from liquid metal-solution for tunable optoelectronic devices, *Nanoscale*, **14** (2022) 6802.

[23] J.F. Serrano-Claumarchirant, A.M. Igual-Muñoz, M. Culebras, M.N. Collins, A. Cantarero, C.M. Gómez, Electrochemical Synthesis of Hybrid Layered Thermoelectric Materials Based on PEDOT/SnS Doped with Ag, *Advanced Materials Interfaces*, **8** (2021) 2100951.

[24] S.L. Mousavi, F. Jamali-Sheini, M. Sabaeian, R. Yousefi, Correlation of Physical Features and the Photovoltaic Performance of P3HT:PCBM Solar Cells by Cu-Doped SnS Nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry* C, **125** (2021) 15841.

[25] F. Jamali-Sheini, M. Cheraghizade, R. Yousefi, SnS nanosheet films deposited via thermal evaporation: The effects of buffer layers on photovoltaic performance, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **154** (2016) 49.