

مطالعه اثر آلایش Zn بر خواص فیزیکی نانوساختارهای اکسید قلع و تاثیر آن بر عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه ای

سحر خواجهی و نفیسه معماریان*

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این پژوهش، نانوذرات دی اکسید قلع به روش آب گرمایی تهیه شد، سپس، به روش دکتر بلید روی FTO لایه نشانی شد و سلول خورشیدی DSSC با فوتوآند اکسید قلع ساخته شد. برای افزایش و بهبود بازدهی سلول‌ها، فوتوآند ساخته شده با روی آلاییده شد. آنالیزهای XRD، FESEM، BET و DRS برای شناسایی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های ساخته شده از قبیل ویژگی ساختاری، ریخت‌شناسی نانوذرات ساخته شده، اندازه گیری سطح ویژه و میزان تخلخل نمونه‌ها و بررسی ویژگی نوری و تعیین گاف نمونه‌ها، گرفته شد. در نهایت از نمونه‌های تهیه شده، سلول خورشیدی DSSC ساخته شد و آنالیز جریان-ولتاژ گرفته شد. نتایج نشان داد که آلایش Zn روی نوع ایزوترم جذب- و جذب نمونه تاثیر گذاشته و میزان سطح ویژه را به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد. همچنین، باعث کاهش اندازه گاف نواری می شود. پس از بررسی نتایج حاصل شده، بهترین بازدهی سلول خورشیدی متعلق به نمونه آلایش یافته با روی و با زمان بارگذاری رنگ ۲ ساعت بود، که افزایش بازدهی حدود ۴/۵ برابر نسبت به فوتوآند SnO_2 خالص را از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه، نانوذرات دی اکسید قلع، آب گرمایی، آلایش با روی

ایمیل نویسنده مسئول: n.memarian@semnan.ac.ir

۱-مقدمه

تأمین انرژی یکی از مهم ترین مسائل بشر در قرن حاضر است. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و بدون کربن است که تقریباً در همه جا در دسترس است. با استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌توان انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل کرد [۱]. امروزه بیشتر تحقیقات بر روی سلول‌های خورشیدی نسل سوم متمرکز شده است که مبتنی بر فناوری نانو هستند.

از بین انواع سلول‌های خورشیدی نانوساختار می‌توان به سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه (DSSC) اشاره کرد. هزینه پایین تولید، تنوع رنگ و شکل، انعطاف‌پذیری و وزن سبک از ویژگی‌های مثبت DSSC است. یکی از مهمترین اجزای یک DSSC، فوتوآند (یا الکترود کار) آن است معمولاً از یک نیم‌رسانای با گاف پهن به عنوان فوتوآند استفاده می‌شود. اکسید تیتانیم [۲]، اکسید روی [۳]، اکسید نئوبیم [۴] و اکسید قلع [۵] از متداولترین نیم‌رساناهای مورد استفاده به عنوان فوتوآند در DSSC‌ها هستند. همچنین نانوساختارهای ترکیبی نظیر هیبریدها یا آلایش لایه نیز استراتژی‌هایی برای افزایش بازده سلول خورشیدی هستند [۶].

در یک پژوهش میلان و همکارانش، برای بهبود بخشیدن به عملکرد سلول خورشیدی از فوتوآند چند لایه‌ای با لایه‌های متناوب SnO و ZnO استفاده کردند [۷]. نتایج نشان داد که استفاده از این چندسازه تا ۴ برابر بازده سلول خورشیدی را بیشتر می‌کند. عمده دلیل این افزایش قابل توجه در ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول چندسازه‌ای به اثر هم افزایی نکات مثبت این دو ماده نسبت داده شده است. به این صورت که موبیلیتی بالا و مقاومت بازترکیب پایین اکسید روی مانع از انتقال معکوس الکترون از نوار رسانش اکسید قلع به رنگدانه می‌شود. همچنین، پایداری شیمیایی اکسید قلع در برابر نور ماورابنفش به بهبود عملکرد سلول کمک می‌کند. در یک پژوهش دیگر در سال ۲۰۱۹ ابراری و همکارانش، نانوساختارهای چندسازه‌ای SnO_2/ZnO را به روش الکتروشیمیایی سنتز کردند [۸]. سپس با روش داکتر بلید فوتوآند ترکیبی ساخته شده و آنالیزهای سلول خورشیدی گرفته شد. تاثیر درصدهای مختلف این چندسازه بر عملکرد DSSC حاصله بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیب حاصل شامل هر دو فاز اکسید روی و اکسید قلع بود و بازده از ۱/۴۶ درصد به ۳/۶۴ درصد افزایش یافت.

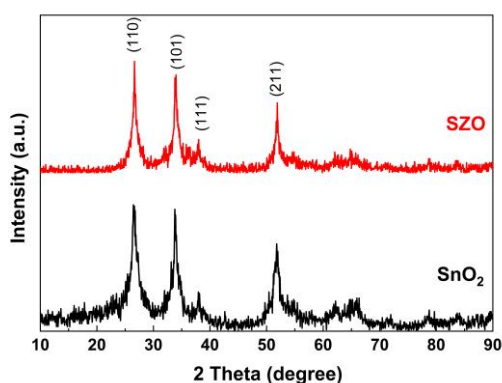
بستن پلاتین (به عنوان کاتد) و با استفاده از پلیمر سرلین، سلول‌ها آب‌بندی شده و الکترولیت یدید/تری دید تزیق شد و سلول های خورشیدی DSSC تهیه شده برای آنالیز I-V آماده شد.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

شکل ۱، الگوی پراش پرتو X (XRD) نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. از روی الگوی پراش نمایش داده شده و با توجه به پهنای قله‌ها، مشاهده می‌شود که نمونه‌ها از بلورک‌های بسیار ریز تشکیل شده‌اند. آنالیز الگوی XRD نمونه SnO_2 با نرم افزار Xpert مشخص می‌کند که این نمونه دارای فاز اکسید قلع خالص با ساختار بلوری چهاروجهی است و با شماره کارت مرجع ۰۱-۰۷۲-۱۱۴۷ با گروه فضایی $p42/mnm$ منطبق است. همچنین، طیف پراش پرتو ایکس نمونه SZO هیچ قله اضافی مربوط به ترکیبات Zn را نشان نمی‌دهد و به نظر می‌رسد که اتمهای روی جانشین اتم‌های قلع در ساختار SnO_2 شده‌اند. اندازه بلورک‌ها با استفاده از روش دبای - شرر و فرمول زیر محاسبه شد [۱۲ و ۱۳]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

در معادله (۱) k یک مقدار ثابت است (در اینجا ۰/۹ در نظر گرفته شده است)، λ طول موج پرتو X (۰/۵۴ آنگستروم)، β پهنای قله در نیمه بیشینه ارتفاع (FWHM) و θ زاویه قله پراش است. اندازه بلورک محاسبه شده برای نمونه SnO_2 و SZO به ترتیب ۶/۲ nm و ۷/۴ nm بدست آمد. به نظر می‌رسد که حضور روی در ساختار باعث شده است که اندازه بلورک‌ها اندکی افزایش پیدا کند.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو X نمونه های اکسید قلع خالص و آلایش یافته با روی

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) ساختارهای اکسید قلع خالص و اکسید قلع آلایش یافته با روی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه SnO_2 دارای ریخت‌شناسی نانوکره است. توزیع اندازه نانوکره‌ها تقریباً یکنواخت است. در تصویر ۲(ب)، با آلایش Zn، ظهور نانوکره‌های مشاهده می‌شود که بیانگر

یک فوتوآند مناسب باید سطح ویژه بزرگی برای جذب بهتر رنگدانه داشته باشد و همچنین، فوتوالکتردها را به خوبی جداسازی کرده و انتقال دهد. از طرف دیگر، ساختار نواری آن باید طوری باشد که بازترکیب فوتوالکتردها در سطح رنگدانه و حرکت معکوس آنها به سمت الکترولیت جلوگیری کند [۹].

در این مقاله، نانوذرات دی اکسید قلع به روش آب‌گرمایی تهیه شد، سپس، به روش داکتر بلید روی FTO لایه نشانی شد. برای افزایش و بهبود بازدهی سلول ها سطح لایه با ترکیب روی آلایش یافت و همچنین، زمان‌های متفاوت بارگذاری رنگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

ابتدا، با استفاده از ۰/۴۶۶۸ گرم از ماده اولیه $\text{Na}_2\text{SnO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (محصول شرکت مرک) ۷۰ cc محلول از آب دیونیزه و اتانول با نسبت حجمی ۷۵/۲۵ تهیه شد و به مدت ۳۰ دقیقه روی هم‌زن قرار گرفت. پس از آن محلول شیری رنگ حاصل را داخل تفلون اتوکلاو ریخته به مدت ۲۰ ساعت با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون می‌گذاریم تا فرایند آب‌گرمایی انجام شود. سپس رسوب باقی مانده ۴ بار با آب مقطر و اتانول شسته شده و سانتریفیوژ شد. بعد از این مرحله رسوب باقی مانده به مدت ۷۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد درون آون قرار داده شد و پس از خشک سازی، درون کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت کلسینه شد.

۲-۲- تهیه فوتوآند

از پودر ساخته شده (۰/۶ گرم) با استفاده از آب دیونیزه (۵ ml)، اتانول خالص (۵ ml)، آلفا تریپینیل (۵ ml) و اتیل سلولز (۲۵ ml)، خمیری برای لایه نشانی فوتوآند بر روی زیرلایه FTO تهیه شد [۱۰ و ۱۱]. خمیر به مدت نیم ساعت اولتراسونیک شد و پس از آن ۲۴ ساعت روی هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت. سپس به روش داکتر بلید لایه نشانی انجام شد و فوتوآند اکسید قلع تهیه شد.

۳-۲- آلایش فوتوآند با روی

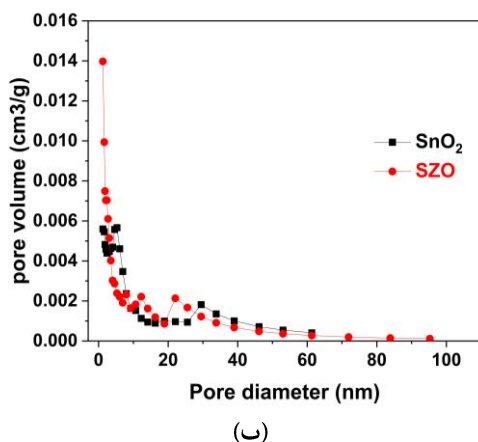
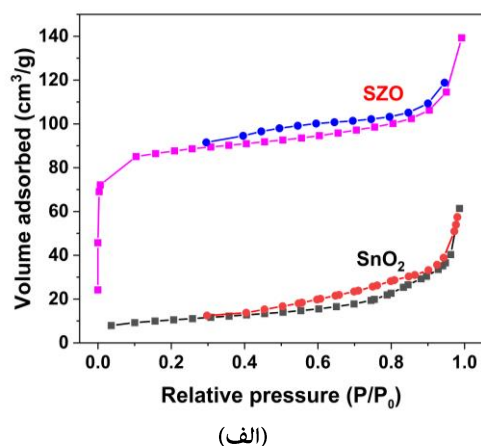
در این روش، فوتوآندها را کف بشر چیده و مقدار ۳۰ CC محلول زینک استات ۰/۰۵ مولار را روی آن‌ها ریخته و بشر را داخل حمام آب ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت قرار می‌دهیم. پس از آن به منظور تثبیت و کلسینه شدن آلایش، فوتوآندها را به مدت یک ساعت در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهیم. نمونه اکسید قلع خالص و نمونه آلایش یافته با روی به ترتیب SnO_2 و SZO نامگذاری شدند.

۲-۲- ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه (DSSC)

در نهایت، فوتوآندها در دو زمان متفاوت ۲ ساعت و ۲۴ ساعت درون رنگدانه N719 (۰.۵ mM) قرار گرفتند. در ادامه، با

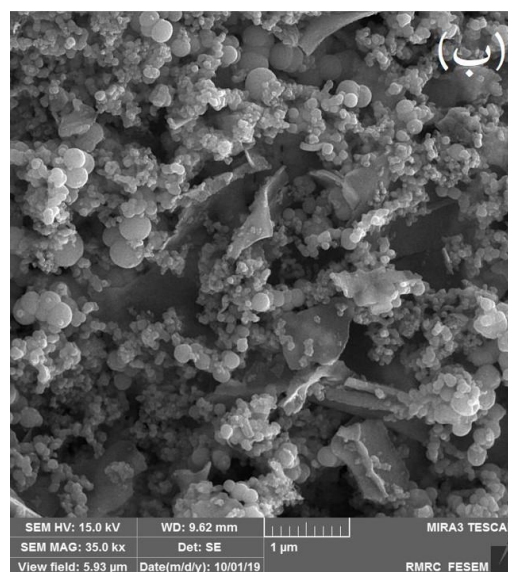
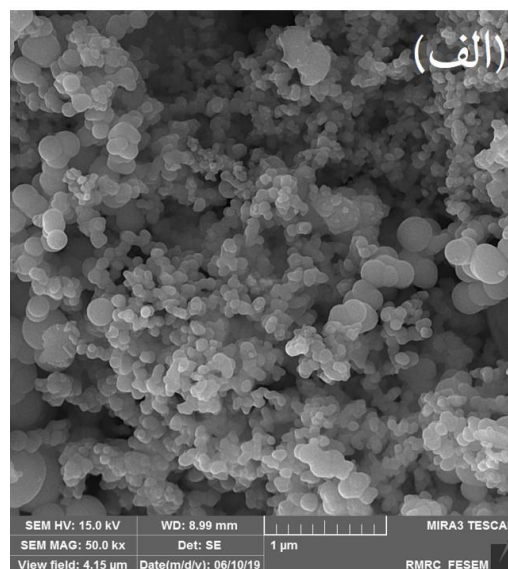
بندی IUPAC [۱۴] نوع ایزوترم برای نمونه SnO_2 ایزوترم شبه IV است و برای نمونه SZO نوع ایزوترم تغییر کرده و بیشتر با ایزوترم نوع II همخوانی دارد. این تغییر در نوع ایزوترم به طور دقیق با نتایج تصاویر FESEM همخوانی دارد. هیسترسیس هر دو نمونه از نوع H4 است که بیانگر حفره‌های روزنه‌ای باریک به شکل بشقابی هستند.

با محاسبه مساحت سطح ویژه نمونه‌ها، ملاحظه می‌شود که سطح ویژه نمونه‌ها با آلایش روی افزایش چشمگیری یافته است. به طوری که مساحت سطح ویژه از $36/23 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ برای نمونه SnO_2 به $310/45 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ برای نمونه SZO افزایش پیدا کرده است. همچنین، حجم کل حفره‌ها از $0/0945 \text{ cm}^3/\text{g}$ به $0/2132 \text{ cm}^3/\text{g}$ افزایش یافته است که موید افزایش میزان تخلخل در نمونه SZO است. افزون بر این میانگین اندازه حفره‌ها از $10/49$ به $2/75$ نانومتر برای نمونه آلایش یافته کاهش یافته است. این افزایش سطح ویژه و میزان تخلخل در فوتوآند می‌تواند منشاء افزایش جذب رنگ بر سطح فوتوآند و در نتیجه افزایش تولید فوتوالکترتون و افزایش جریان ایجاد شده در سلول خورشیدی باشد.



شکل ۳. (الف) ایزوترم جذب - واجذب نمونه اکسید قلع و اکسید قلع آلایش یافته با روی. (ب) توزیع اندازه حفرات نمونه‌ها.

تغییر مورفولوژی نمونه با آلایش روی است. وجود این نانو ورقه‌ها بر اندازه مساحت سطح موثر نمونه تاثیر دارد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

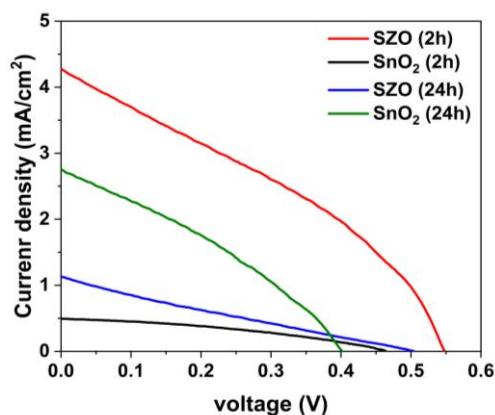


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نمونه SnO_2 و (ب) نمونه SZO

شکل ۳ (الف)، ایزوترم جذب - واجذب نمونه‌ها در آنالیز BET و شکل ۳ (ب) توزیع اندازه حفره‌ها بدست آمده از آنالیز BJH را نشان می‌دهد. هر دو نمونه حلقه هیسترسیس (پسماند) نشان می‌دهند. با توجه به اینکه شاخه واجذب در فشارهای نسبی پایین به شاخه جذب منحنی وصل شده است، حفرات در هر دو نمونه به سمت میکروحفره تمایل دارند. یعنی براساس دسته بندی اندازه حفره‌ها، در این نمونه‌ها اندازه حفره‌ها در محدوده میکرومتخلخل و زیر ۲ نانومتر است. بر اساس طبقه

گاف انرژی محاسبه شده برای نمونه اکسید قلع 3.42 eV و برای نمونه آلایش یافته با روی 3.23 eV بدست آمد. این کاهش گاف به معنی تغییر لبه‌های انرژی نیز است. با کاهش گاف و تغییر موقعیت لبه نوار رسانش و ظرفیت انتقال الکترون راحت تر صورت می‌گیرد و این عامل می‌تواند بر روی عملکرد سلول خورشیدی تاثیر داشته باشد.

در نهایت آنالیز جریان-ولتاژ از سلول‌های خورشیدی DSSC گرفته شد. شکل ۵، منحنی ولتاژ - جریان برای سلول‌های خورشیدی ساخته شده را نشان می‌دهد. زمان بارگذاری رنگ یک پارامتر مهم در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای است. اگر این زمان کوتاه باشد امکان جذب سطحی رنگ کاهش پیدا می‌کند. با این حال زمان طولانی برای بارگذاری رنگ نیز معایبی دارد. به خصوص برای ترکیبات حاوی Zn به نظر می‌رسد که قرارگیری بیش از حد فوتوآنود در محلول رنگدانه باعث انحلال اتم‌های سطحی Zn و تشکیل کمپلکس $\text{Zn}^{2+}/\text{dye}$ می‌شود که این کمپلکس برای انتقال بار از رنگدانه به نیم‌رسانا مضر است [۱۹]. به همین جهت دو زمان متفاوت (۲ و ۲۴ ساعت) برای غوطه‌وری فوتوآندها در رنگدانه N719 بررسی شد. نتایج بدست آمده در جدول ۱ نمایش داده شده است. همانطور که به وضوح دیده می‌شود، آلایش روی هم باعث افزایش جریان اتصال کوتاه و هم باعث افزایش ولتاژ مدار باز در سلول خورشیدی شده است. افزایش ولتاژ مدار باز در نمونه آلایش یافته با روی را میتوان به تغییر میزان گاف نواری در نمونه SZO و جابه جایی لبه های نوار انرژی نسبت داد.



شکل ۵. منحنی جریان- ولتاژ سلول خورشیدی ساخته شده با فوتوآندهای اکسید قلع و اکسید قلع آلایش یافته با روی در زمانهای بارگذاری رنگ متفاوت

در سلول خورشیدی با فوتوآنود اکسید قلع خالص با کاهش زمان غوطه‌وری در رنگدانه، افزایش ولتاژ مدار باز مشاهده می‌شود، اما J_{sc} کاهش یافته است که علت آن می‌تواند جذب سطحی کمتر مولکول‌های رنگدانه بر سطح فوتوآنود و در نتیجه کاهش تولید فوتوالکترون باشد. در نهایت برای حالت اکسید قلع خالص زمان بارگذاری رنگ ۲۴ ساعت مناسبتر به نظر می‌رسد. اما در نمونه آلایش یافته با روی با کاهش زمان غوطه وری

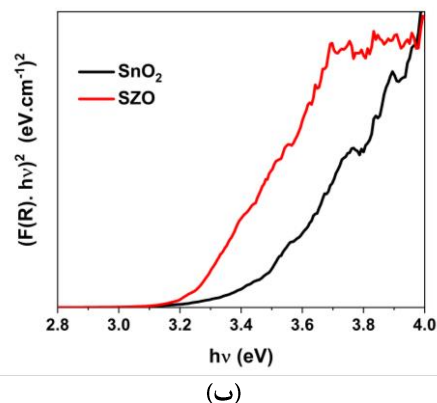
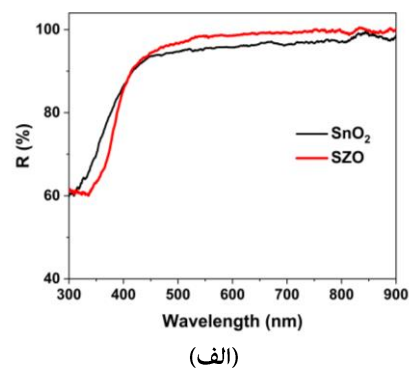
شکل ۴ (الف)، منحنی بازتاب پخشی (DRS) نمونه‌های سنتز شده را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که هر دو نمونه دارای بازتاب بالایی در ناحیه مرئی و NIR هستند. با استفاده از طیف DRS و منحنی بازتاب نمونه‌ها می‌توان ضریب جذب نمونه‌ها را به کمک رابطه کوبلیکا - مونک بدست آورد [۱۵]:

$$F(R) = \frac{\alpha}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2)$$

که در آن $F(R)$ ، α ، S و R به ترتیب تابع کوبلیکا-مونک، ضریب جذب، فاکتور پراکندگی و میزان بازتاب نمونه هستند. از آنجایی که S یک پارامتر ثابت است و با طول موج تغییر نمی‌کند، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و $F(R)$ را به طور مستقیم متناسب با ضریب جذب فرض کرد [۱۷]. سپس، با استفاده از رابطه تاک اندازه گاف نواری نمونه را بدست آورد [۱۸]، به طوری که:

$$F(R) \cdot h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (3)$$

که در آن A یک ثابت است و توان n به نوع گذار بستگی دارد. برای گذارهای مجاز مستقیم $n=1/2$ و برای گذارهای غیر مستقیم $n=2$ است. با توجه به اینکه اکسید قلع به عنوان یک نیم‌رسانای با گاف مستقیم شناخته می‌شود، در شکل ۴ (ب) منحنی تاک برای آن رسم شده است. پس از رسم این منحنی، با برون یابی قسمت خطی آن به محور انرژی، مقدار انرژی گاف نواری بدست می‌آید.



شکل ۴. (الف) طیف بازتاب پخشی و (ب) نمودار تاک برای محاسبه گاف نوری نمونه‌های سنتز شده.

[9] X. Miao, K. Pan, Y. Liao, W. Zhou, Q. Pan, G. Tian, G. Wang, J. Mater. Chem. A: Mater. Energ. Sustain, 1, 9853-9861, (2013).

[10] G.S. Selopal, N. Memarian, R. Milan, I. Concina, G. Sberveglieri, A. Vomiero, ACS Applied Materials & Interfaces 6, 11236-11244, (2014).

[11] S. Ito, P. Chen, P. Comte, M.K. Nazeeruddin, P. Liska, P. Pechy, M. Gratzel, Prog. Photovolt: Res. Appl. 15, 603-612 (2007).

[12] E. Farahi, N. Memarian, The European Physical Journal Plus 137, 463, (2022).

[13] U. Holzwarth, N.J.N. Gibson, Nat. Nanotechnol. 6, 534-534, (2011).

[14] M. Kruk, M. Jaroniec, Chem. Mater. 13, 3169-3183 (2001).

[15] S. Khajuee, N. Memarian, The European Physical Journal Plus, 136, 1-12, (2021).

[16] P. Makuła, M. Pacia, W. Macyk, J. Phys. Chem. Lett. 9, 6814-6817, (2018).

[17] R. Köferstein, L. Jäger, S.G. Ebbinghaus, Solid State Ionics, 249-250, 1-5, (2013).

[18] E. Farahi, N. Memarian. Chemical Physics Letters, 730, 478-484, (2019).

[19] N. Memarian, I. Concina, A. Braga, S.M. Rozati, A. Vomiero, G. Sberveglieri, Angew. Chem. Int. Ed. 50, 12321-12325, (2011).

فوتوآند در محلول رنگدانه، Jsc افزایش چشمگیری داشته است که علت آن در بالا توضیح داده شد.

جدول ۱: نتایج آنالیز سلول های خورشیدی.

sample	Dye loading time (h)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF	Efficiency (%)
SnO ₂	24	2.52	0.24	0.30	0.19
SnO ₂	2	0.49	0.46	0.37	0.08
SZO	24	1.13	0.50	0.23	0.13
SZO	2	4.27	0.54	0.34	0.81

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، نانوذرات SnO₂ به روش هیدروترمال سنتز شد. سپس، فوتوآندهای ساخته شده با روی آلاییده شد. نتایج آنالیز XRD نمونه‌ها نشان داد که نانوساختارهای اکسید قلع بدون هیچگونه فاز ناخالصی تشکیل شده است. تصاویر FESEM حاکی از تشکیل نانوذرات کروی برای SnO₂ و تشکیل نانوساختاری از ترکیب نانوذرات کروی و نانو ورقه‌ها در نمونه SZO است. آنالیز BET نمونه‌ها افزایش چشمگیر میزان مساحت سطح ویژه در نمونه آلایش یافته با روی را تایید کرد. در آنالیز I-V گرفته شده از سلول های خورشیدی DSSC ساخته شده از نمونه‌ها، مشاهده شد که برای حالت ۲ ساعت زمان غوطه وری فوتوآند در محلول رنگدانه، جریان اتصال کوتاه از ۰/۴۹ به ۴/۲۷ (mA/cm²) و بازدهی از ۰/۰۸ % به ۰/۸۱ % افزایش یافت.

۵. منابع

- [1] J.A. Castillo-Robles, E. Rocha-Rangel, J.A. Ramírez-de-León, F.C. Caballero-Rico, E.N. Armendáriz-Mireles. Journal of Composites Science, 5, 288, (2021).
- [2] A. Omar, M.S. Ali, N. Abd Rahim. Solar Energy, 207, 1088-1121, (2020).
- [3] M. Salem, N. Memarian, Journal of Coupled Systems and Multiscale Dynamics 5, 27-32, (2017).
- [4] M. Memari, N. Memarian, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 31, 2298-2307, (2020).
- [5] A. Zatirostami, Materials Science in Semiconductor Processing, 135, 106044, (2021).
- [6] H.A. Shittu, I. T. Bello, M. A. Kareem, M. K. Awodele, Y. K. Sanusi, O. Adedokun. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 805, 012019, (2020).
- [7] R. Milan, G.S. Selopal, M. Epifani, M.M. Natile, G. Sberveglieri, A. Vomiero, I. Concina, Scientific reports 5, 1-12, (2015).
- [8] M. Abrari, M. Ahmadi, M. Ghanaatshoar, H. R. Moazami, S. S. Hosseiny Davarani, Journal of Alloys and Compounds, 784, 1036-1046, (2019).

Study the effect of Zn doping on the physical properties of tin oxide nanostructures and its effect on dye sensitized solar cell performance

S.Khajues,N.Memarian*

Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract:

In this study, tin dioxide nanoparticles were prepared by hydrothermal method, then deposited on FTO glass by Dr. Blade method and DSSC solar cell was fabricated with tin oxide photoanode. To improve cell efficiency, the prepared photoanode was doped with zinc. XRD, FESEM, BET and DRS analysis were carried out to identify the physical properties of the fabricated samples such as structural and morphological properties, specific surface area, and the optical properties of the samples. Finally, DSSC solar cell were constructed from prepared photoanodes and current-voltage analysis was performed. The results showed that Zn doping affects the adsorption-desorption isotherm of the sample and increases the specific surface area significantly. It also reduces the size of the tape gap. It was found that the best solar cell performance belonged to the sample doped with zinc with 2 hours of dye loading time, which showed an increase in efficiency of about 4.5 times compared to the pure SnO_2 photoanode.

Keywords: Dye sensitized solar cell, Tin dioxide nanoparticles, Hydrothermal, Zinc doping.