

Research Paper

Fabrication of Tin Selenide/Carbon Black Composite Counter through the Hydrothermal Method to Replace Platinum in Solar Cells¹

Ahmad Zatirostami*², Khikmat Muminov³, Alimakhmad Kholov⁴
and Farshid Mofidnakhaei⁵

Received:2020.10.07

Revised:2020.12.29

Accepted:2021.02.08

Abstract

Platinum is an expensive material that is widely used in dye sensitized solar cells (DSSCs) due to its excellent electrocatalytic and conduction features. In order to achieve economical affordability in DSSCs, we require to introduce new lower cost materials to replace the current expensive component. In this research, we propose the composite of low-cost carbon black and tin selenide materials to replace the platinum in DSSCs' counter electrodes. We study different ratios of carbon black and tin selenide composites and find out the optimized ratio which is later used in fabrication of DSSCs. Our best DSSC showed an efficiency of ~5% that is comparable to the cells fabricated from platinum counter electrodes. The results of this paper, can pave the way for economic feasibility of DSSCs.

Keywords: *Carbon Black, Tin Selenide, Dye Sensitized Solar Cell, Efficiency.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.33428.1176

² Assistant Professor, Faculty of Science and Engineering, Department of Physics, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. (Corresponding Author). Email: Ahmad.zati@gmail.com

³ Professor, S. U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan Bogolubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Moscow Region, Russia.

Email: muminov.khikmat@mail.ru

⁴ Assistant Professor, S. U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan. Email: alikholov@mail.ru

⁵ Assistant Professor, Faculty of Science and Engineering, Department of Physics, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran .Email: farshidnakhaei@yahoo.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹

مقاله پژوهشی

ساخت الکتروود مقابل کامپوزیتی کربن سیاه و سلنید قلع به روش هیدروترمال جهت جایگزینی پلاتین در یاخته خورشیدی^۱

احمد ذاتی رستمی^{۲*}، حکمت مؤمن اف^۳، علی محمد خالوف^۴ و فرشید مفیدنخعی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

پلاتین عنصری گران است که به دلیل خواص الکتروکاتالیستی و رسانندگی فوق العاده آن به صورت گسترده در یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ به کار می‌رود. برای دست‌یابی به صرفه اقتصادی یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، باید اجزای گران آن را با مواد ارزان‌تر تعویض کرد. به همین دلیل، در این تحقیق پیشنهاد می‌شود که از کامپوزیت دو ماده ارزان کربن سیاه و سلنید

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.33428.1176

^۲ استادیار، دانشکده علوم و مهندسی، دانشکده فیزیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران. (نویسنده

مسئول). Email: Ahmad.zati@gmail.com

^۳ استاد، دانشکده فیزیک تکنیکال اِس-یو عمرف، آکادمی علوم جمهوری تاجیکستان، دوشنبه، تاجیکستان.

Email: muminov.khikmat@mail.ru

^۴ استادیار، دانشکده فیزیک تکنیکال اِس-یو عمرف، آکادمی علوم جمهوری تاجیکستان، دوشنبه، تاجیکستان.

Email: alikholov@mail.ru

^۵ استادیار، دانشکده علوم و مهندسی، دانشکده فیزیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.

Email: farshidnakhaci@yahoo.com

قلع به جای پلاتین در یاخته‌های خورشیدی استفاده شود. ما نسبت‌های گوناگون این دو ماده را با هم ترکیب می‌کنیم تا به حالت بهینه دست یابیم. سپس، الکتروود مقابل بهینه را در ساخت یاخته‌رنگدانه‌ای استفاده کردیم و به بازده مطلوبی در حدود ۵٪ دست یافتیم که کاملاً نزدیک به الکتروود مقابل از جنس پلاتین بود. نتایج این پژوهش را می‌توان به عنوان تسهیل‌کننده در تولید یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ به کار برد.

واژگان کلیدی: کربن سیاه، سلنید قلع، یاخته‌خورشیدی حساس شده با رنگ، بازده.

۱. مقدمه

یاخته‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSC) از جمله نسل‌های جالب یاخته‌های خورشیدی هستند که نیاز به تحقیقات بیشتری دارند. در DSSC ها و صنعت الکتروودهای شمارنده کنونی، پلاتین (Pt) استفاده می‌شود که گران است و باید مواد ارزان تر جایگزین آن شود [۱]. همچنین، دسته‌ای از یاخته‌های خورشیدی نانوساختاری هستند که با وجود بازده خوب، هنوز نتوانسته‌اند به مرحله تجاری‌سازی و توجیه اقتصادی دست یابند [۲]. یکی از عوامل این عدم توفیق، وجود اجزای گران در ساختار یاخته‌های رنگدانه‌ای است. پلاتین عنصری بسیار گران است که به دلیل خواص فوق‌العاده الکتروکاتالیستی و رسانندگی به عنوان الکتروود مقابل در یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ استفاده می‌شود [۳]. شکی نیست که یاخته‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSCs) دارای نقش اساسی به عنوان تأمین‌کننده انرژی آینده با چشم‌اندازی روشن و در حکم الکتروود شمارنده ترکیبی الکتروشیمیایی تهیه شده برای یاخته‌های خورشیدی حساس به رنگ عمل می‌کنند [۴]. تعویض این ماده با مواد ارزان‌تر در یاخته‌های خورشیدی باعث کاهش هزینه تجهیزات و صرفه اقتصادی می‌شود. تاکنون جایگزین‌های مختلفی از جمله پلیمرهای رسانا، مواد کربنی، اکسیدها و کاربیدهای فلزی برای پلاتین در یاخته‌های حساس با رنگ پیشنهاد شده‌اند اما هنوز نتوانسته‌اند به بازده و قابلیت‌های پلاتین دست یابند [۵-۹]. در یاخته‌های خورشیدی حساس با رنگ، ترکیب جدید در رابط الکتروود/نانوذرات مشکلی است که باعث کاهش عملکرد فتوولتائیک آن می‌شود. بهترین روش برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از یک لایه مسدودکننده متراکم است که جداسازی الکتریکی و شیمیایی بین الکتروود و نانوذرات را فراهم می‌کند. استفاده از یک لایه TiO_2 و ZnO تهیه‌شده توسط کندوپاش آ.راف به عنوان لایه مسدودکننده، قابلیت افزایش بازده DSSC را از ۴,۹٪ و ۵,۷٪ برای یاخته‌های بدون لایه

مسدودکننده و DSSC با یک لایه واحد مسدودکننده TiO_2/ZnO تا ۷,۱٪ را دارد [۱۰]. در تحقیق حاضر، از کامپوزیت دو ماده سلنید قلع ($SnSe$) و کربن سیاه لایه‌نشانی شده بر زیرلایه ITO به عنوان الکتروود مقابل یاخته‌های خورشیدی حساس با رنگ استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا نانوذرات $SnSe$ با استفاده از روش هیدروترمال سنتز می‌شود. سپس این نانوذرات با نسبت‌های مختلف وزنی با کربن سیاه تجاری ترکیب و بر روی ITO لایه‌نشانی می‌شود. از این لایه‌های نازک در ساخت یاخته‌های خورشیدی حساس با رنگ مبتنی بر اکسید تیتانیوم استفاده شده و بهترین حالت الکتروودهای مقابل گزارش می‌شود.

۲. روش‌های تجربی

در این تحقیق، جهت ساخت نانوذرات سلنید قلع از روش هیدروترمال استفاده کردیم. برای این منظور، ابتدا ۲,۵ گرم کلرید قلع ($SnCl_2$) و یک گرم سلنیوم (Sn) را در ۸۰ میلی لیتر اتیلن دی‌آمین حل کرده و ۲ گرم سدیم به آن افزودیم. محلول حاصل را در یک اتوکلاو به حجم ۲۰۰ میلی لیتر ریخته و برای مدت ۵ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار دادیم. پس از خنک سازی در دمای اتاق، مواد جامد حاصل را با استفاده از سانتریفیوژ خالص کردیم. سپس، این ماده را چندین بار با آب مقطر خالی از یون و اتانول شستشو داده و در کوره خلأ با دمای ۸۰ درجه سلسیوس و به مدت یک ساعت گذاشتیم تا نانوذرات $SnSe$ حاصل شود. جهت دستیابی به نسبت بهینه کربن سیاه در کامپوزیت با سلنید قلع، این ماده را با نسبت‌های وزنی $CB/SnSe$ ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد با آن مخلوط کردیم. برای ساخت خمیر قابل لایه‌نشانی، مقادیر ۵ میلی لیتر اتیل سلولز و ۰,۵ میلی لیتر آلفا تریپنول و یک میلی لیتر اتانول را با ترکیب قبلی در یک بشر ریخته و با همزن مغناطیسی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه هم زدیم. خمیر حاصل را به روش دکتر بلید بر زیرلایه ITO لایه‌نشانی کردیم و جهت بازپخت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس در کوره خلأ قرار دادیم تا الکتروودهای مقابل حاضر شود.

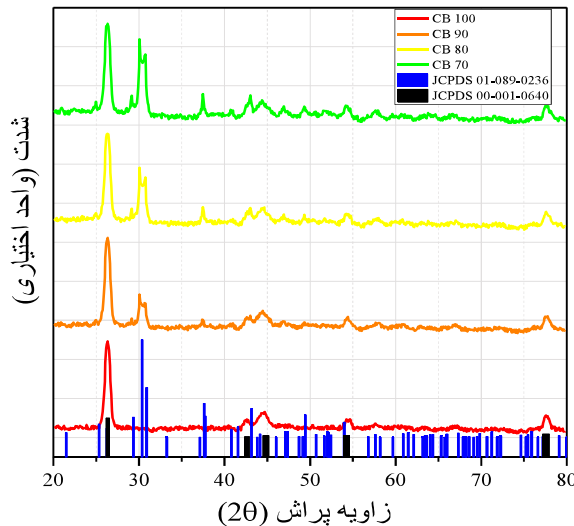
جهت ساخت فوتوآند، از نانوذرات TiO_2 خریداری شده با خلوص عالی و اندازه ذره کوچک‌تر از ۲۵ نانومتر استفاده کردیم. ابتدا زیرلایه‌های FTO را به وسیله دستگاه فراصوت و با استفاده از استون و اتانول و آب مقطر شستشو دادیم. سپس خمیر لایه‌نشانی را آماده کردیم که شامل ریختن نانوذرات TiO_2 در اتانول خالص و به هم زدن آن به مدت یک ساعت بر روی همزن مغناطیسی بود. سپس چند قطره تریتون X100 و آلفا تریپنول و اتیلن سلولز به آن افزودیم تا چسبندگی بیشتری پیدا کند و برای مدت ۱ ساعت دیگر روی همزن مغناطیسی در دمای اتاق به هم زدیم. پس از آن، دمای این ترکیب را تا ۸۰ درجه سلسیوس افزایش دادیم تا خمیر مناسب لایه

۸ / ساخت الکتروود مقابل کامپوزیتی کربن سیاه و سلنید قلع به روش هیدروترمال جهت جایگزینی پلاتین ...

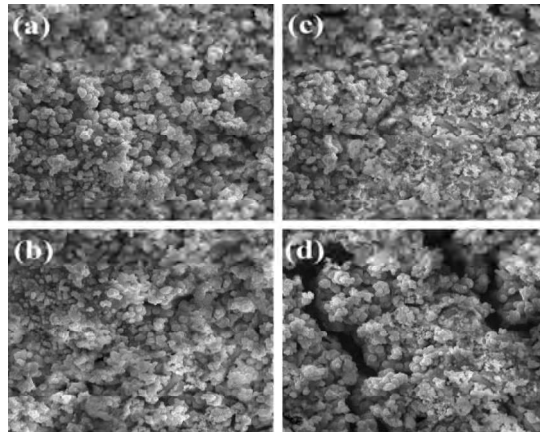
نشانی حاصل شود. این خمیر را به روش دکتر بلید روی FTOهای شسته شده لایه نشانی کردیم و سپس جهت سینتر شدن در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه قرار دادیم. رنگ آمیزی فوتوآنها با استفاده از محلول استاندارد رنگدانه N719 و به مدت ۲۴ ساعت صورت گرفت. برای ساخت یاخته خورشیدی حساس با رنگ، فوتوآنها و الکترودهای مقابل ساخته شده را در ساختار ساندویچی روی هم قرار داده و الکترولیت زوج ید (I^-/I_3^-) بین آنها تزریق کردیم. این یاخته ها با استفاده از عایق ساز سرلین (Surlyn) عایق بندی شدند و یاخته های خورشیدی آماده شد. یاخته های ساخته شده با توجه به نسبت کربن سیاه به سلنید قلع به کاررفته در ساخت الکتروود مقابل آنها به ترتیب CB70، CB80، CB90 و CB100 نام گذاری شد. جهت مشخصه یابی مواد و ابزارهای ساخته شده از آنالیزهای پراش پرتوی ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM)، طیف نگاری در بازه مرئی و فرابنفش، ولت متری چرخه ای (CV)، طیف نگاری رهنبدی الکتروشیمیایی (EIS) و آنالیز جریان ولتاژ استفاده کردیم.

۳. نتایج و بحث

جهت بررسی خواص بلوری مواد ساخته شده از XRD استفاده کردیم. طیف XRD الکترودهای مقابل ساخته شده در شکل ۱ به نمایش در آمده است.



شکل ۱ نتایج XRD الکترودهای مقابل ساخته شده به همراه خطوط طیف مرجع



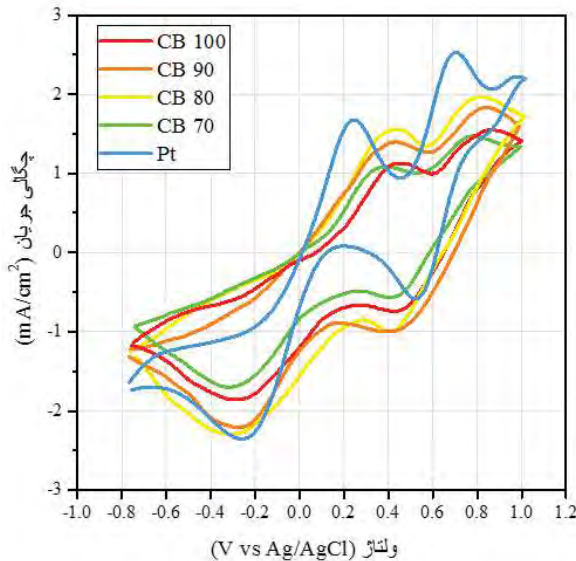
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ روبشی اثر میدانی از (الف) CB100 (ب) CB90 (ج) CB80 و (د) CB70

نمودارهای میله‌ای زیر این شکل دو الگوی پراش مرجع با کدهای 00-001-0640 و 01-089-0236 به نمایش می‌گذارند که بیان‌گر فازهای بلوری کربن سیاه و سلنید قلع است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، نمونه CB100 که کربن سیاه خالص است، کاملاً دارای تطابق فازی با طیف مرجع بوده و بیانگر شکل‌گیری آن به صورت بلوری است. در طیف‌های پراش نمونه‌های CB70، CB80، و CB90 قله‌های کوچکتري به چشم می‌خورد که نمایش‌دهنده فاز ارتورومبیک سلنید قلع است. ارتفاع این قله‌ها با افزایش نسبت سلنید قلع به کربن سیاه در ماده افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج XRD می‌توان نتیجه گرفت که مواد از نظر بلوری و حتی عنصری دارای خلوص بالایی هستند.

برای بررسی ساختار شکل گرفته بر روی الکتروود مقابل از آن‌ها تصاویر FESEM تهیه کردیم که این تصاویر را می‌توانید در شکل ۲ ببینید. شکل‌های ۲ (الف)-(د) به ترتیب نشان‌دهنده سطح فوقانی الکتروودهای مقابل CB/SnSe با نسبت‌های ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد است. ریخت شناسی همه الکتروودهای مقابل به صورت نانوذرات کروی است که به طور یکنواختی بر سطح توزیع شده‌اند. همانطور که می‌بینید نانوذرات CB را می‌توان به صورت مجزا از نانوذرات SnSe که ظاهراً ابعاد مختلفی دارند متمایز کرد. همچنین به صورت تقریبی می‌توان گفت با افزایش سهم SnSe در الکتروود مقابل، لایه‌ها از ذرات ترکیبی با اندازه‌های ریز بیشتری تشکیل می‌شوند. البته قابل ذکر است که در نمونه‌های با SnSe بیشتر، شکاف‌های درشتی دیده می‌شود، که احتمالاً به دلیل افزایش مقدار SnSe رخ می‌دهند که مانع از تشکیل لایه یک‌دست کربن سیاه می‌شوند.

در بررسی نقش الکتروود مقابل در یاخته‌های حساس با رنگ شاید مهمترین آنالیز ولتاژمتری چرخه‌ای (CV) باشد. در این آنالیز که بیانگر نحوه برهمکنش بین الکتروود مقابل و یون‌های

الکتروولیت است از الکتروودهای مقابل تهیه شده با نسبت های مختلف کربن سیاه و سلنید قلع به عنوان الکتروود کار استفاده کردیم. در مقابل، یک الکتروود قلمی پلاتین به عنوان الکتروود مقابل استفاده شد و همچنین از یک الکتروود استاندارد کالومل جیوه به عنوان الکتروود مرجع استفاده کردیم. این مجموعه از ۳ الکتروود در الکتروولیتی شامل 50 mM LiI و 10 mM I₂ و 0.5m LiClO₄ که حاوی زوج یون های I⁻/I₃⁻ استفاده شده در یاخته خورشیدی حساس با رنگ است، قرار می گیرد و تشکیل یک یاخته استاندارد ۳ الکتروودی برای آنالیز CV می دهد. سپس با استفاده از دستگاه اوتولب و با نرخ مرور ۵۰ mV/s نمودار منحنی تغییرات جریان بر اساس ولتاژ اعمالی در محدوده منفی ۰/۸ تا مثبت ۱ ولت به صورت رفت و برگشتی اندازه گیری می شود. نمودار CV مربوط به الکتروودهای مقابل تهیه شده با نسبت های مختلف کربن و سلنید قلع در شکل ۳ دیده می شود. در این نمودارها دو قله اکسایشی و دو دره کاهش می مربوط به واکنش های رفت و برگشتی $3I^- \leftrightarrow I_3^- + 2e^-$ و $2I_3^- \leftrightarrow 3I_2 + 2e^-$ دیده می شود که به احیا و اکسایش گونه یون های یدید تری یدید اشاره دارند. به صورت عمومی می توان گفت که با افزایش جریان هر یک از قله ها می توان انتظار داشت که گونه ها بیشتر و سریع تر کاهش یا اکسایش بیابند و بدین صورت نقش الکتروود در احیا یا اکسایش گونه الکتروولیت سودمندتر است. همان طور که در شکل ۳ می بینید، الکتروود مقابل پلاتین با داشتن بیشترین جریان کاهش و همچنین بیشترین جریان اکسایش دارای بزرگ ترین فعالیت الکتروکاتالیتی است و می توان انتظار داشت در احیای گونه I₃⁻ بهتر از سایر الکتروودها عمل کند. البته، قله کاهش الکتروود CE80 در مقایسه با الکتروود پلاتین تا حد مطلوبی به آن نزدیک است و امیدبخش آن است که در عملکرد یاخته حساس شده با رنگ، رفتاری شبیه به پلاتین از خود نشان دهد. گذشته از الکتروود پلاتین، در مقایسه سه الکتروود با نسبت های مختلف کربن و سلنید قلع، الکتروود CB80 بزرگ ترین قله را دارد و در مقام بعدی به ترتیب CB100 و CB90 و CB70 قرار دارند. همچنین، ولتاژ قله تا قله واکنش $3I^- \leftrightarrow I_3^- + 2e^-$ که در الکتروود مقابل یاخته رنگدانه ای اتفاق می افتد معرف نواخت انجام واکنش هاست و هر چه این مقدار کمتر باشد الکتروود از عملکرد بهتری برخوردار است. همانطور که می بینید اگرچه الکتروود پلاتین کمترین میزان ΔE_p را دارد، الکتروودهای دیگر از این لحاظ تقریباً شبیه به هم رفتار می کنند و سهم اصلی در بهبود خواص الکتروکاتالیتی را افزایش مقدار جریان دارد. با توجه به این نتایج می توان از پیش متصور شد که الکتروود مقابل CB80 به نسبت سایر الکتروودهای ترکیبی کربن و سلنید قلع می تواند عملکرد بهتری در احیای گونه های الکتروولیت داشته باشد.

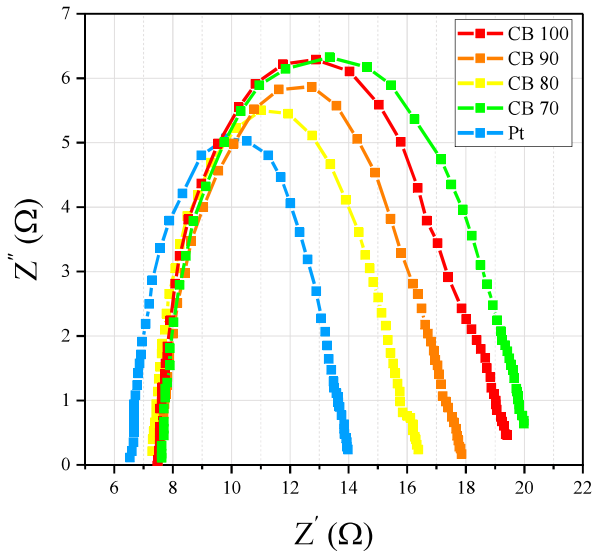


شکل ۳ نتایج ولتامتری چرخه‌ای برای الکترودهای مقابل ساخته شده و پلاتین

به منظور مطالعه و بررسی خواص ترابرد الکترونی و الکتروکاتالیتی الکترودهای ساخته شده از کربن سیاه و سلنید قلع ترکیبی، از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی که یکی از بهترین آنالیزها در این زمینه است، استفاده کردیم. آنالیز EIS قادر است به ما در پیش‌بینی مقاومت‌های انتقال بار بین سطوح و فازهای مختلف مواد کمک کند و به این سبب می‌تواند آنالیز سودمندی برای ارزیابی کارایی الکتروود مقابلی باشد که نقش انتقال الکترون را به گونه‌های الکترولیت در یاخته رنگدانه‌ای دارد. به این منظور، به جای تهیه آنالیز EIS از یاخته خورشیدی، تنها از الکتروود مقابل تهیه شده در این پژوهش به منظور آنالیز استفاده کردیم، تا اثرات ناشی از سطوح و فازهای دیگر از بین برود و معیار آزمایش تنها ارزیابی الکتروود مقابل باشد. برای دستیابی به چنین هدفی، از یاخته متقارن با چیدمان: ITO/CE/electrolyte (I-M3-)/CE/ITO استفاده کردیم. این یاخته توسط یک ولتاژ اختلالی 10 mV بین بسامدهای 0/1 تا 10000 هرتز تحت شرایط خاموش جاروب شد تا نتایج آن به صورت نمودارهای نایکوئیست در شکل ۴ پدیدار شود. این منحنی‌ها تنها شامل یک نیم‌دایره است، که البته به دلیل متقارن بودن سیستم و نبودن لایه TiO₂ نیم‌دایره دومی در آن دیده نمی‌شود. به صورت معمول، آنالیز EIS از یک یاخته خورشیدی رنگدانه‌ای دارای سه نیم‌دایره در محدوده‌های بسامدی مختلف است که به علت نوع نقل و انتقال‌های مختلف در سطوح و فازهای مختلف رخ می‌دهد. اما، در این تحقیق نیم‌دایره مشاهده شده در نمودارهای

نایکویست تنها بر انتقال بار بین سطح الکتروود مقابل و گونه الکتروولیت دیدید-۳- دیدید دلالت دارند. البته در اکثر نمونه‌ها رد پایی از دایره بسیار کوچک در بسامدهای کم دیده می‌شود که ناشی از سهم انتقال الکترون توسط پخش گونه‌های الکتروولیت است و به امیدانس واربورگ سیستم باز می‌گردد. این نیم‌دایره را می‌توان با انتخاب غلظت‌های مختلف الکتروولیت کوچک‌تر یا بزرگ‌تر کرد. همچنین قطر دایره‌های مربوط به انتقال الکترون بین الکتروود مقابل و الکتروولیت (Rct) بیانگر مقدار مقاومت انتقال بار بین دو سطح است. به این ترتیب در حالت خاموش کوچک‌تر بودن نیم‌دایره به معنی مقاومت انتقال بار کمتر و در نتیجه انتقال ساده‌تر الکترون است. علاوه بر این، طول از مبدأ این نمودارها با مقاومت متوالی RS هر چیدمان برابر است. مقادیر مقاومت انتقال بار و مقاومت متوالی برای الکتروودهای مقابل مختلف با استفاده از برآزش در نرم افزار Zview محاسبه شده است، که می‌توانید این نتایج را در جدول ۱ مشاهده کنید. همانطور که از جدول ۱ و شکل ۴ مشخص است الکتروود پلاتین با داشتن کمترین میزان مقاومت انتقال الکترونی Rct بین الکتروود مقابل و الکتروولیت به اندازه ۷,۳۸ اهم، خیر از عملکرد مناسب آن در یاخته خورشیدی دارد. همچنین، مقاومت متوالی RS این لایه به دلیل رسانندگی بهتر لایه Pt کمتر از سایر نمونه‌هاست. نمونه الکتروود مقابل سلنید قلع و کربن سیاه ترکیبی به دلیل اینکه به روش دکتر بلید لایه‌نشانی شده‌اند همگی تقریباً به یک اندازه ضخامت داشتند و مقاومت سری آنها چنانکه از جدول ۱ قابل درک است تقریباً در یک اندازه هستند. الکتروود ترکیبی CB80 با داشتن مقاومت انتقال بار ۸,۹۰ اهم کمترین میزان مقاومت انتقال بار را بین الکتروودهای ترکیبی دارد و الکتروودهای CB90، CB100 و CB70 به ترتیب با داشتن مقاومت‌های ۱۰,۲۱ و ۱۱,۶ و ۱۲,۵۴ اهم در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. می‌توان میزان مقاومت انتقال الکترونی کمتر الکتروود CB80 را تا حدودی به ریخت‌شناسی آن نسبت داد. در الکتروودهای کربن سیاه خالص سائز ذرات چیزی بین ۵۰ تا ۱۵۰ نانومتر بودند، اما با اضافه شدن فاز اضافه SnSe به آنها سائز نانوذرات کمتر شده و ذراتی در ابعاد ۲۰ تا ۵۰ نانومتر به آنها با نسبت‌های مختلف اضافه شده است. این کار باعث می‌شود نسبت سطح به حجم بیشتری در اختیار الکتروود قرار بگیرد و از این منظر اندرکنش الکتروود با الکتروولیت می‌تواند بیشتر و مؤثرتر اتفاق بیفتد. البته با افزایش میزان سهم SnSe چنانکه در تصاویر FESEM مشاهده شد، ترک‌های ریز و درشتی در لایه حاصل آمده که احتمالاً ناشی از عدم تطابق مواد تشکیل‌دهنده است. این ویژگی با اینکه در وهله اول می‌تواند امیدوارکننده باشد اما با نگاه عمیق‌تر به این مسئله می‌توان حدس زد که باعث کم شدن برهمکنش های بین الکتروولیت و الکتروود مقابل می‌شود. روی هم رفته می‌توان پیش بینی کرد که با توجه به

نتایج همسوی دو آنالیز CV و EIS، الکترودهای پلاتین و ترکیبی CB80 می‌توانند در ساخت یاخته حساس شده با رنگ بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته باشند.



شکل ۴ نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای الکترودهای مقابل ساخته‌شده و پلاتین

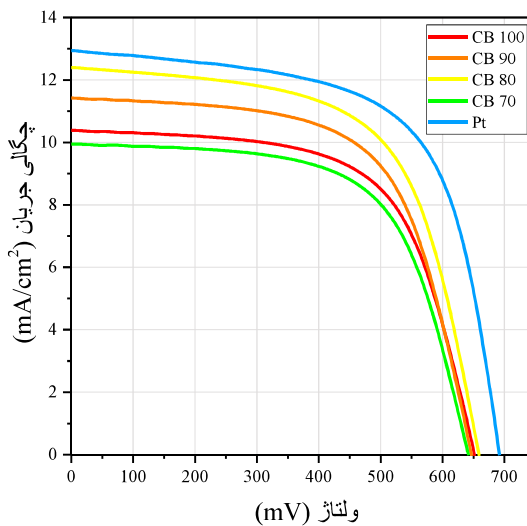
جدول ۱ پارامترهای آنالیز EIS

Cell	R_s	R_{CT}
CB100	7.48	11.61
CB90	7.49	10.21
CB80	7.30	8.90
CB70	7.61	12.54
Pt	6.53	7.38

نمودارهای شکل ۵ رفتار جریان را بر حسب اختلاف پتانسیل برای یاخته‌های ساخته‌شده از فوتوآند TiO_2 و الکتروود مقابل ترکیبی CB/SnSe با نسبت‌های ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد و همچنین الکتروود مقابل Pt نشان می‌دهد. علاوه بر آن پارامترهای فوتولتائیک مربوط به این یاخته‌ها با استفاده از این نمودار استخراج شده و در جدول ۲ مشاهده می‌شود. یاخته خورشیدی بسته‌شده با الکتروود مقابل پلاتین با داشتن ولتاژ مدار باز 690 mV ، جریان اتصال کوتاه $12/9\text{ mA/cm}^2$ و ضریب پرشدگی 64% دارای بیشترین بازده برابر $5/7\%$ است. پس از آن یاخته خورشیدی با الکتروود مقابل CB80 با داشتن ولتاژ مدار باز 660 mV ، جریان اتصال کوتاه $12/4\text{ mA/cm}^2$ و ضریب پرشدگی 62% بیشترین بازدهی را دارد. یاخته‌های CB100 و CB90

۱۴ / ساخت الکتروود مقابل کامپوزیتی کربن سیاه و سلنید قلع به روش هیدروترمال جهت جایگزینی پلاتین ...

و CB70 از لحاظ بازده با مقادیر ۴/۶، ۴/۲ و ۴/۰٪ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. اگرچه یاخته ترکیبی ما در این تحقیق بازده کمتری به نسبت یاخته با الکتروود مقابل پلاتین از خود نشان می‌دهد، نزدیکی بازده این یاخته به یاخته کنترل پلاتین و در نظر گرفتن اینکه از مواد بسیار ارزان تر و وافرتری تشکیل شده است این نزدیکی را موجه‌تر می‌کند. با توجه به جدول ۲ و نمودار مشخصه جریان-ولتاژ یاخته‌های ترکیبی می‌توان تشخیص داد که سهم عمده افزایش بازده در یاخته‌های ترکیبی مربوط می‌شود به افزایش جریان عبوری در یاخته. زیرا میزان پرشدگی در اکثر یاخته‌ها با دقت بسیار خوبی به یکدیگر نزدیک هستند و در درجه اول عامل افزایش جریان و در درجه دوم افزایش ولتاژ مدار باز باعث افزایش بازده در یاخته CB80 شده است. افزایش جریان عبوری از یاخته را می‌توان مستقیماً به نقش اثر الکتروود مقابل مربوط دانست، زیرا در تمام موارد فوتوآنها از جنس TiO_2 یکسان و شبیه هم هستند و تغییرات الکتروود مقابل با توجه به نواخت جریان و همچنین نواخت احیا و اکسایش گونه‌های الکتروولیت به طور مستقیم اثرگذار باشد. همانطور که پیش‌تر در آنالیزهای CV و EIS دیدیم، فعالیت الکتروکاتالیتی و تراپردی الکتروود مقابل CB80 به نسبت سایر الکتروودهای مقابل ترکیبی بیشتر و مؤثرتر بود که این نتیجه در نهایت به صورت افزایش جریان در یاخته رنگدانه‌ای و نهایتاً افزایش بازده، خود را نشان داده است. همچنین بررسی ولتاژ مدار باز حاکی از آن است که یاخته Cb80 پس از الکتروود مقابل Pt با مقدار ۶۶۰ میلی‌ولت دارای بیشترین ولتاژ مدار باز است.



شکل ۵ منحنی جریان-ولتاژ برای یاخته‌های خورشیدی ساخته‌شده از الکتروودهای مقابل ساخته‌شده و پلاتین

جدول ۲ پارامترهای فوتولتائیک یاخته‌های ساخته شده

Cell	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)
CB100	652	10.4	63
CB90	647	11.4	63
CB80	660	12.4	62
CB70	642	9.9	63
Pt	690	12.9	64

نتایج پژوهش حاضر دارای رقابت‌پذیری و حتی بهبود چشم‌گیری نسبت به پژوهش‌های پیشین است. برای مثال، می‌توان به مطالعه گولاس و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ اشاره کرد که با استفاده از الکتروود مقابل طلا تنها به بازده ۴٫۲٪ دست یافتند، یا در کار دیگری، چن و همکاران با استفاده از الکتروود مقابل کربن سیاه به بازده ۳٫۷٪ رسیدند [۱۲]. در یاخته‌های با الکتروود مقابل مشابه و حتی با استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز رسانی و همکاران به بازده مشابه ۴٫۹ درصدی دست یافتند [۱۳].

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد الکتروود مقابل ترکیبی سلنید قلع و کربن سیاه را در یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ بررسی کردیم. نشان دادیم که این نوع الکتروود مقابل با نسبت ترکیب کربن سیاه به سلنید قلع ۸۰٪ بهترین عملکرد را در میان یاخته‌های دیگر از خود به نمایش می‌گذارد که حتی با الکتروود مقابل پرهزینه پلاتین نیز درخور مقایسه است. این عملکرد فوق‌العاده مرهون خواص الکتروکاتالیستی این دو ماده و همچنین نسبت سطح به حجم بالای حالت ترکیبی آن-هاست. به این ترتیب، می‌توان با جایگزینی الکتروودهای فعلی مورد استفاده در یاخته‌های خورشیدی با نمونه‌های پیشنهاد شده در این تحقیق، گام مهمی در کاهش قیمت ساخت یاخته‌های خورشیدی حساس شده با رنگ برداشت.

منابع

- [1] Zatirostami A., 2020, Electro-deposited SnSe on ITO: A low-cost and high-performance counter electrode for DSSCs, *Journal of Alloys and Compounds*, 844 156151 (2020).
- [2] Freitag, M., et al., Dye-sensitized solar cells for efficient power generation under ambient lighting, *Nature Photonics*, 11(6), 372-378 (2017).
- [3] Demir, E., Sen, B. and Sen, F., "Highly efficient Pt nanoparticles and f-MWCNT nanocomposites based counter electrodes for dye-sensitized solar cells", *Nano-Structures & Nano-Objects*, 11, 39-45 (2017).

- [4] Zatirostami Ahmad, "A new electrochemically prepared composite counter electrode for dyesensitized solar cells", *Thin Solid Films* 701 137926 (2020).
- [5] Al-Mamun, M., *et al.*, "Pt and TCO free hybrid bilayer silver nanowire-graphene counter electrode for dye-sensitized solar cells", *Chemical Physics Letters*, 561, 115-119 (2013).
- [6] Huang, Y. J., *et al.*, "Structural Engineering on Pt-Free Electrocatalysts for Dye-Sensitized Solar Cells", In *Nanostructures*. IntechOpen (2019).
- [7] Karim, N. A., Mehmood, U., Zahid, H. F., and Asif, T. "Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)", *Solar Energy*, 185, 165-188 (2019).
- [8] Chu, Z., Wang, Y., Jiao, L., and Zhang, X., "Laser-scribed reduced graphene oxide as counter electrode for dye-sensitized solar cell", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 27(12), 914-919 (2019).
- [9] Saranya, K., Subramania, A., Sivasankar, N., and Mallick, S., "Electrospun TiC embedded CNFs as a low cost platinum-free counter electrode for dye-sensitized solar cell", *Materials Research Bulletin*, 75, (2016).
- [10] Zatirostami Ahmad, "Increasing the efficiency of TiO₂-based DSSC by means of a double layer RF-sputtered thin film blocking layer", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 207 164419 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164419> 83-90.
- [11] Gullace, S., *et al.*, "A platinum-free nanostructured gold counter electrode for DSSCs prepared by pulsed laser ablation", *Applied Surface Science*, vol. 506, p. 144690 (2020).
- [12] Chen, P. W., *et al.*, "Dye-sensitized solar cells with low-cost catalytic films of polymer-loaded carbon black on their counter electrode", *RSC advances*, Vol. 3, no. 17, pp. 5871-5881 (2013).
- [13] Ramasamy, P., Manivasakan, P., and Kim, J., "Phase controlled synthesis of SnSe and SnSe₂ hierarchical nanostructures made of single crystalline ultrathin nanosheets", *Cryst. Eng. Comm.*, Vol. 17, no. 4, pp. 807-813 (2015).