

ساخت الکتروود مقابل SnSe به روش کندوپاش بسامد رادیویی به منظور کاربری در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ بر پایه اکسید قلع

احمد ذاتی رستمی*

دانشکده علوم و مهندسی، گروه فیزیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

مومن اف حکمت^۱، خالوف علی محمد

انستیتوی مشترک پژوهش‌های هسته‌ای، دینا، مسکو، روسیه

چکیده: امروزه توجه ویژه‌ای به سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ (DSSCs) معطوف شده است. از مهم‌ترین قسمت‌های DSSCs الکتروود مقابل است که معمولاً از عنصر پلاتین در ساخت آن استفاده می‌شود. از آن جایی که پلاتین جزو مواد گران قیمت محسوب می‌شود، در این مطالعه پیشنهاد می‌شود که از الکتروود مقابل SnSe به جای پلاتین استفاده شود. به این ترتیب با سلنایز کردن یک لایه قلع لایه نشانی شده روی شیشه به روش کندوپاش، لایه نازک SnSe ساخته شده و از این لایه به عنوان الکتروود مقابل در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ استفاده خواهد شد. همچنین فوتوآند مورد استفاده در این سلول از جنس اکسید قلع خواهد بود تا سلول به طور کامل مبتنی بر قلع ساخته شود. با تغییر دمای سلنایز کردن، ویژگی‌های تراپردی و الکتروکاتالیتی لایه، بهینه‌سازی شده و سلول خورشیدی بهینه تولید می‌شود. در این پژوهش، ویژگی‌های ریخت‌شناسی لایه‌ها با تصویرهای FESEM بررسی شده و از آنالیزهای CV و EIS برای محک و ویژگی‌های تراپردی و الکتروکاتالیتی استفاده می‌شود. همچنین منحنی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده عیان ساخت که سلول ساخته شده از لایه سنتز شده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس با داشتن بازده ۴/۹٪ بهترین عملکرد را به دست می‌دهد.

واژگان کلیدی: ساخت، سلول خورشیدی، نانو ساختار، کندوپاش، فوتوآند، اکسید قلع

KEYWORDS: Fabrication, Solar Cell, Nanostructure, sputtering, Photo anode, Tin oxide

*Email: Ahmad.zati@gmail.com

* عهده‌دار مکاتبات

• آدرس دیگر: دانشکده فیزیک فناوریال اس - او عمر افه آکادکی علوم جمهوری تاجیکستان، دوشنبه، تاجیکستان

مقدمه

را در معرض دماهای گوناگون قرار دادیم تا با بررسی اثر دما بر روی الکتروود مقابل به بهترین نتیجه دست یابیم.

روش‌های تجربی**ساخت الکتروود مقابل از لایه SnSe**

نخست با استفاده از روش کندوپاش به لایه نشانی قلع خالص به ضخامت ۵۰۰ نانومتر بر روی شیشه لام پرداخته شد. برای این منظور از روش کندوپاش بسامد رادیویی با توان ۸۰ وات و در فشار ۰/۰۳ میلی‌بار لایه نازک مورد نظر ساخته شد. سپس لام‌های لایه نشانی شده برای مرحله سلنایز کردن به درون کوره خلا منتقل شده و در این حالت لام لایه نشانی شده با قلع در محفظه گرافیتی به همراه ۲۵۰ میلی‌گرم Se خالص قرار گرفت و تحت گاز حامل N₂ در فشار ۶۰۰ میلی‌بار در دماهای گوناگون گرما دید. از گاز نیتروژن معمولاً در فرایند سلنایز کردن به منظور توزیع مناسب گرما و به عنوان حامل سلیوم استفاده شد. گاز نیتروژن به عنوان گاز حامل و همچنین برای توزیع یکنواخت گرما در کوره در فرایند سلنایز کردن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این مطالعه نیز از نتیجه‌های مطالعه‌های پیشین استفاده شد. به منظور بررسی اثر گرما بر روی الکتروود مقابل و همچنین سلول خورشیدی ساخته شده با آن، دماهای بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه با گام‌های ۵۰ درجه سلسیوس انتخاب شدند. به این ترتیب، نمونه‌های سنتز شده که هر یک به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه ساخته شدند، به ترتیب SnSe450، SnSe500، SnSe550 و SnSe600 نام گرفتند.

ساخت فوتوآند

به منظور ساخت فوتوآند از نانوذره‌های سنتز شده اکسید قلع استفاده و برای سنتز نانوذره‌های اکسید قلع از روش متداول انحلال آندی بهره‌برداری شد. این روش به تفصیل در مقاله‌های دیگر توضیح داده شده است [۱۵]. در این روش با استفاده از یک الکتروود فلزی قلع در نقش آند و یک الکتروود پلاتین در نقش کاتد و سلول الکتروشیمیایی دو الکتروودی، سنتز نانوذره‌های اکسید قلع صورت می‌گیرد. الکتروولیت سلول الکتروشیمیایی محلول آبی، تترامیتل آمونیوم کلرید در نظر گرفته شد و سنتز نانوذره‌های اکسید قلع در دمای اتاق و اختلاف پتانسیل ۱۰ V در مدت زمان ۳۰ دقیقه

امروزه بحث انرژی‌های تجدید پذیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مبحث انرژی تبدیل شده است. سوخت‌های فسیلی که تا چندین سال دیگر رو به اتمام هستند هم از لحاظ آلودگی زیست محیطی مشکل ساز بوده و هم مسئله‌ای حیاتی در زمینه گرمایش جهانی محسوب می‌شوند [۱]. از این رو روی آوردن به انرژی‌های تجدیدپذیری همچون انرژی خورشیدی مسئله‌ای ضروری و بسیار مهم تلقی می‌شود. در میان سلول‌های خورشیدی، سلول‌های حساس شده با رنگ به علت مقرون به صرفه و غیر سمی بودن و سادگی ساخت بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲،۳]. با این حال در ساختار سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ در الکتروود مقابل آن‌ها معمولاً از پلاتین استفاده می‌شود که ماده‌ای گران قیمت است. برای رفع این معضل پیشنهاد شده است از مواد دیگری همچون ساختارهای کربنی [۴]، گرافنی [۵]، مواد غیر آلی اکسیدی [۶] و یا سولفیدی [۷] استفاده شود [۸-۱۱]. در واقع یک الکتروود مقابل مناسب باید از ویژگی‌های رسانندگی و ترابرد الکترونی خوبی برخوردار باشد و همچنین در تقابل با یون‌های الکتروولیت در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ ویژگی‌های الکتروکاتالیتی مناسبی داشته باشد تا بتواند به خوبی الکترون‌ها را به الکتروولیت منتقل کند. با این حال پیشنهاد ما برای این کار استفاده از قلع سلناید است که ممکن است تا به حال توجه زیادی را به خود جلب نکرده باشد. علی‌رغم ویژگی‌های مناسب و قیمت ارزان این ماده مقاله‌های اندکی در این زمینه منتشر شده است. رماسامی و همکاران با استفاده از لایه‌نشانی SnSe به روش پاشش قطره‌ای توانستند به بازدهی ۹/۳۴ درصدی دست یابند [۱۲]. در گزارش دیگری، لیو و همکاران از روش لایه‌نشانی دورانی برای تولید SnSe بهره جستند و بازدهی ۵/۷۶ درصدی را امکان‌پذیر کردند [۱۳]. همچنین، کومار و همکاران از روش لایه‌نشانی چاپ سیلک برای تولید الکتروود مقابل SnSe استفاده کردند و به بازدهی ۵/۷۶ درصدی رسیدند [۱۴].

در این کار، ما با استفاده از لایه نشانی قلع خالص به روی شیشه توسط روش کندوپاش و سپس سلنایز کردن آن به ساخت قلع سلناید پرداختیم. سپس از لایه این قلع سلناید به عنوان الکتروود مقابل در سلول حساس شده با رنگ N719 بر پایه اکسید قلع استفاده کردیم. با این حال برای رسیدن به نتیجه‌ای قابل قبول و بهبود ویژگی‌های الکتروود مقابل SnSe در مرحله سلنایز کردن، آن

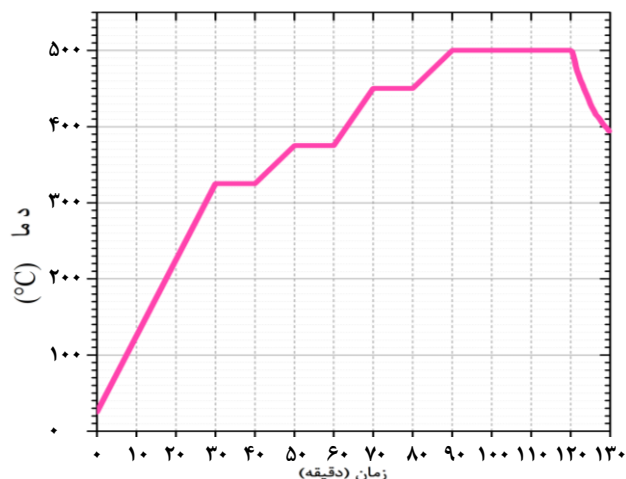
مولار $TiCl_4$ غوطه ور کردیم و به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نگاه داشتیم. سپس آن‌ها را بیرون کشیده و با آب و اتانول شستشو داده تا $TiCl_4$ اضافی از بین برود و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس گرمادهی کردیم. پس از خنک سازی به روش طبیعی، نمونه‌ها از کوره بیرون آورده شدند و در محلول رنگدانه N719 قرار گرفتند تا رنگ آمیزی شوند. این رنگ آمیزی در شرایط بدون نور و به مدت ۲۴ ساعت به طول انجامید. پس از این مدت نمونه‌های فوتوآند از درون رنگدانه بیرون آمده و با استفاده از غوطه‌وری در محلول اتانول، رنگدانه‌های اضافی موجود در فوتوآند شستشو داده شدند تا فوتوآنها حاضر شوند.

ساخت سلول

پس از تهیه فوتوآندهای یکسان اینک از لایه‌های متفاوت SnSe به شکل الکتروود مقابل استفاده شد. در این مرحله، فوتوآنها توسط فاصله انداز سرلین پوشانده می‌شوند و الکتروود مقابل SnSe که از پیش توسط یک دریل بسیار ریز سوراخ شده است بر روی آن قرار می‌گیرد. از سرلین به این دلیل استفاده می‌شود که دو الکتروود با هم اتصال برقرار نکنند. این مجموعه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس گرما می‌بیند تا با ذوب شدن سرلین دو الکتروود به خوبی متصل شوند. سپس الکتروود دارای یون‌های I/I_3^- به روش سوراخ به درون سلول تزریق می‌شود و سوراخ با سرلین پوشانده و ایزوله می‌شود.

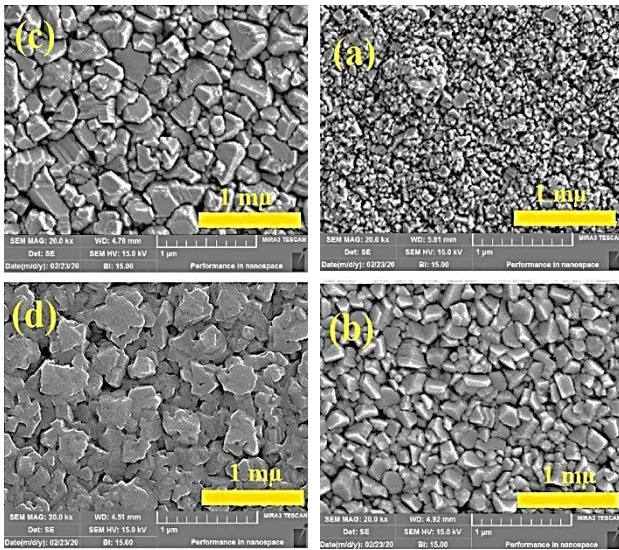
نتیجه‌ها و بحث

برای بررسی لایه SnSe ساخته شده به روش سلناز کردن قلع کندوپاش شده و مطالعه ویژگی‌های بلوری و ساختاری آن، از لایه‌های گوناگون سنتز شده، طیف XRD تهیه کردیم. شکل ۲ طیف پراش پرتو X را برای الکترودهای مقابل SnSe450 الی SnSe600 نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۲ پیداست، این طیف تطابق بسیار خوبی با شماره کارت JCPDS 00-014-0159 که پیک‌های آن با استوانه‌های سیاه نشان داده شده است، دارد. این شماره کارت به قلع سلناز ارتورومبیک با گروه فضایی Pnma مربوط می‌شود. همچنین پیک‌های ظاهر شده در زاویه‌های 2θ ، $26/47$ ، $29/39$ ، $30/45$ ، $31/03$ ، $37/79$ ، $43/34$ ، $44/34$ ، $47/25$ ، $49/68$ ، $52/02$ و $54/45$ متعلق هستند به صفحه‌های 201 ، 210 ، 111 ، 111 ، 400 ، 311 ، 020 ، 501 ، 302 ، 511 و 420 قلع سلناز ارتورومبیک. البته همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان نسبی شدت پیک ۱۱۱ به ۴۰۰ کاهش پیدا می‌کند،



شکل ۱ - برنامه گرمایی اعمال شده به فوتوآندهای SnO_2

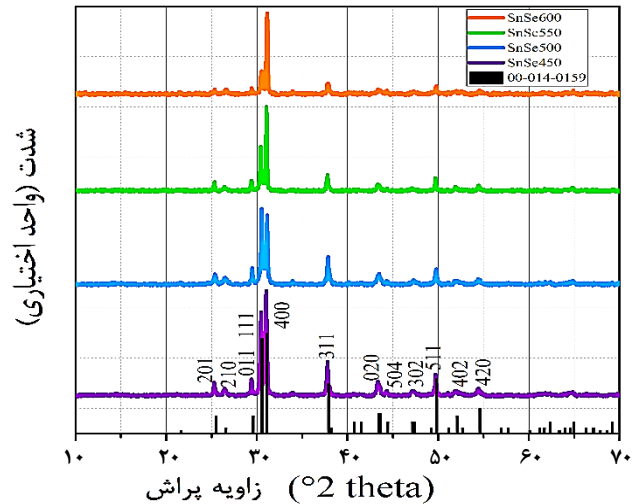
انجام پذیرفت. پس از سانتریفیوژ کردن محصول‌های به دست آمده آن‌ها را در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت گرما داده تا نانو پودر اکسید قلع با کیفیت مناسب تولید شود. سپس از یک زیرلایه FTO برای لایه نشانی اکسید قلع استفاده شد. به این منظور، نخست زیرلایه FTO به مدت ۲۰ دقیقه در محلول آب و اتانول در دستگاه فراصوت به خوبی شستشو داده شده و در مرحله بعد با استفاده از فشار گاز نیتروژن خشک شد. سپس یک لایه بلاک از جنس TiO_2 به ضخامت ۱۰۰ نانومتر با استفاده از روش کندوپاش روی FTO لایه نشانی کرده و خمیر اکسید قلع به روش دکتر بلید بر روی این لایه، لایه نشانی شد. شرح ساخت خمیر اکسید قلع به این صورت است که نخست مقدار معینی از اکسید قلع سنتز شده به درون بشر کوچکی به همراه اتانول خالص منتقل شدند و به مدت ۶۰ دقیقه به شدت هم خوردند. سپس چند قطره Triton-X100 به همراه تریپتول و اتیلن سلولز به محلول اضافه شد و به مدت ۶۰ دقیقه دیگر محلول هم خورد. پس از آن دمای محلول را تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس با استفاده از یک گرم‌کن برقی رساندیم و هم‌زدن محلول را به مدت تقریبی ۲ ساعت ادامه دادیم تا سرانجام خمیری چسبناک و مناسب برای لایه نشانی تهیه شود. پس از لایه نشانی خمیر بر روی FTO آن‌ها را به درون کوره هوا منتقل کردیم و با استفاده از یک برنامه گرمای مناسب آن را به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس گرما دادیم. نمودار شکل ۱ بیانگر رفتار گرمای ما در قبال این زیرلایه است. تجربه نشان داده است که این برنامه گرمایی می‌تواند چسبندگی مناسبی برای فوتوآند به همراه داشته باشد [۱۶]. پس از این مرحله فوتوآنها را در معرض $TiCl_4$ قرار دادیم. برای این منظور، فوتوآنها را درون محلول $0/2$



شکل ۱ - تصویرهای FESEM از لایه‌های الکتروود مقابل (a) SnSe600 (b) SnSe500 (c) SnSe550 و (d) SnSe600.

سطح الکتروود بزرگ و بزرگ‌تر شده است. این پدیده به علت سینتر شدن ساختارهای بلوری درون یکدیگر امری طبیعی محسوب می‌شود [۱۷]. اگر چه تفاوت ماهیتی بین اندازه دانه‌ها و بلورک‌های یک ساختار جامد وجود دارد اما همچنان این روند مانند روند رشد بلورینگی با افزایش دما همراه است که در نتیجه‌های بحث XRD شاهد آن بودیم. علاوه بر این اگر چه در تصویرهای FESEM شاهد ساختارهای به تقریب فشرده لایه‌ها هستیم، اما همچنان می‌توان حضور درزها و سازوکار خالی را مشاهده کنیم که برای نفوذ الکتروولیت و برهمکنش آن با الکتروود ضروری است. همچنین یکدستی سطوح و حفظ یکپارچگی آن در سرتاسر لایه‌ها نشان از ساخت لایه‌هایی با کیفیت می‌دهند. به صورت کلی می‌توان اندازه ذره‌ها را در نمونه‌های SnSe450، SnSe500، SnSe550 و SnSe600 به ترتیب ۱۰۰، ۱۷۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ نانومتر تخمین زد.

یکی از مهم‌ترین آنالیزها در بررسی ویژگی‌های الکترووکاتالیتی و تراپردی الکتروودهای مقابل در سلول‌های حساس شده با رنگ، آنالیز ولتامتری چرخه‌ای (CV) است. به منظور بررسی این ویژگی‌ها از نمونه‌های SnSe450 تا SnSe600 آنالیز CV تهیه کردیم. نمودار جریان-ولتاژ این آنالیزها را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. در این آنالیز از یک سلول استاندارد سه الکتروود با الکتروود کار SnSe استفاده شد و با استفاده از نرخ جاروب ۵۰ mV/s منحنی CV در یک سیکل اندازه‌گیری و ضبط شد. همچنین برای بررسی اثر الکتروود مقابل با واکنش‌های الکتروولیتی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای،

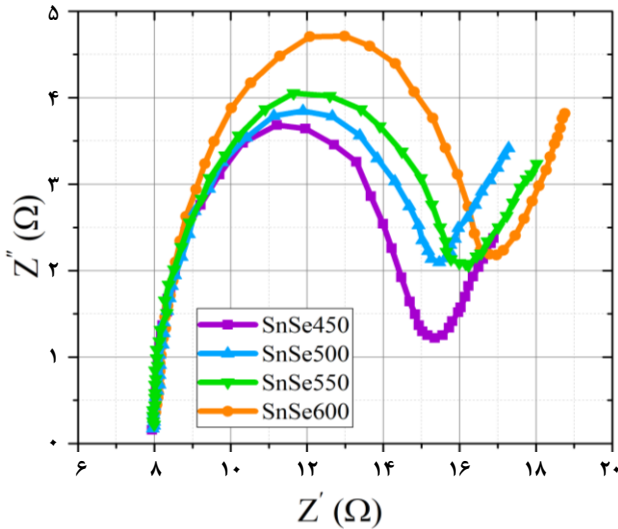


شکل ۲ - طرح پراش پرتو X از نمونه‌های مختلف الکتروود مقابل

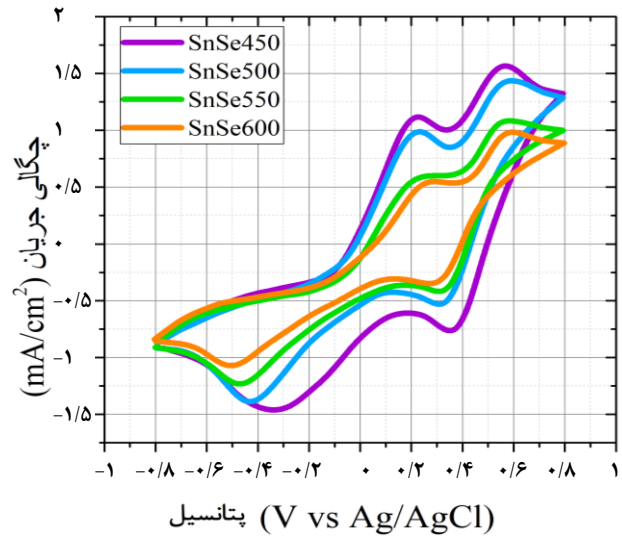
به این معنی که در نمونه SnSe600 پیک ۴۰۰ به مراتب از پیک ۱۱۱ بلندتر است در حالی که در SnSe450 این دو پیک به تقریب هم اندازه هستند. این مسئله نشان می‌دهد که با افزایش دما راجحیت راستای تبلور ۴۰۰ نسبت به ۱۱۱ بیش‌تر می‌شود. همچنین با استفاده از معادله دبای شرر:

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

که در آن k ضریب شکل و به تقریب برابر ۰/۸۹، λ طول موج پرتو X و برابر با ۰/۱۵۴ nm، β FWHM هر پیک و θ زاویه پراش است می‌توان اندازه بلورک‌ها را در هر راستا پیدا کرد. به صورت میانگین اندازه بلورک‌ها برای راستاهای گوناگون به تقریب برابر ۳۰ nm است. همچنین با توجه به تطابق خوب طیف پراش با نمونه استاندارد کارت PDF2 می‌توان گفت لایه ساخته شده از خلوص بسیار بالایی برخوردار است و فازهای اضافی نیز در آن دیده نمی‌شود. همچنین قابل ذکر است که با کم‌تر کردن دمای کوره سلائز در تشکیل SnSe عملاً فاز SnSe تشکیل نمی‌شود و به این دلیل از بررسی نمونه‌هایی که در کم‌تر از ۴۵۰ درجه سلسیوس بوده عاجز هستیم. برای بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی سطحی نمونه‌های الکتروود مقابل SnSe از آن‌ها تصویرهای FESEM تهیه کردیم. نمای بالایی الکتروودهای مقابل SnSe ساخته شده در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل ۳ دیده می‌شوند. در این شکل، تصویرهای a، b، c و d به ترتیب سطح بالای الکتروودهای مقابل SnSe450، SnSe500، SnSe550 و SnSe600 را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشخص است با افزایش دما، اندازه قطعه‌های تشکیل دهنده روی



شکل ۵ - منحنی‌های نایکوئست برای الکترودهای مقابل مختلف

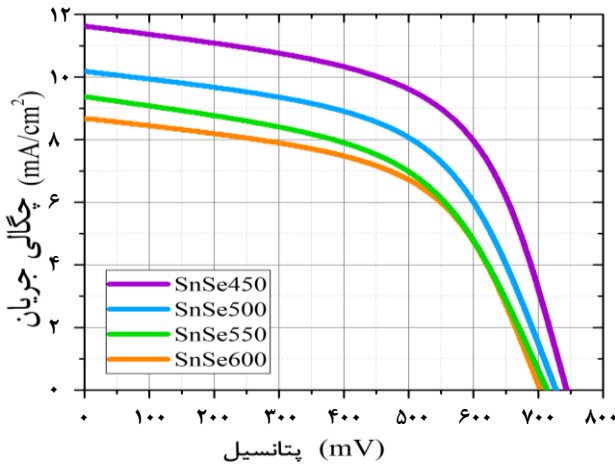


شکل ۴ - منحنی ولتامتری چرخه‌ای برای الکترودهای مقابل مختلف

الکترولیت به دست می‌دهد. این برهمکنش بیش‌تر عامل اصلی افزایش فعالیت الکتروکاتالیتی است.

برای بررسی خاصیت الکتروکاتالیتی و ویژگی‌های انتقالی الکترودهای مقابل SnSe از آن‌ها آنالیز امیدانس الکتروشیمیایی، EIS، تهیه کردیم. برای این منظور از الکترودهای کار SnSe بهره جستیم و چیدمان مقارن را برای این کار انتخاب کردیم. به این ترتیب یک سلول الکتروشیمیایی استاندارد با ساختار $\text{ITO} \backslash \text{CE} \backslash (\text{I}^- / \text{I}_3^-) \backslash \text{CE} / \text{ITO}$ تشکیل می‌دهد و بدون اثرهای الکتروده فوتوآند است. با اعمال ولتاژ اختلالی ۱۰ mV آنالیز EIS بین فرکانس‌های ۰/۱ Hz تا ۱۰ kHz در شرایط خاموش صورت گرفت. نتیجه‌های این آنالیز به صورت منحنی‌های نایکوئست در تصویر ۵ قابل رویت است. در این منحنی‌ها تنها یک نیم دایره دیده می‌شود که به علت انتقال بار بین الکتروده مقابل و الکترولیت است. چون هر دو الکتروده در این آنالیز از یک جنس هستند، اثرها به علت انتقال بار بین الکترولیت و سطوح دیگر که معمولاً در آنالیزهای EIS سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای در فرکانس‌های میانی اتفاق می‌افتد مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این یک دنباله خطی در همه نمونه‌ها دیده می‌شود که به دلیل اثرها به علت پخش گونه‌های الکترولیت است و به امیدانس وارپورگ مربوط می‌شود. با توجه به قطر نیم دایره‌ها می‌توان مقدار R_{ct} یعنی مقاومت انتقال بار بین الکتروده مقابل را با الکترولیت تخمین زد. مقدار R_{ct} برای نمونه‌های SnSe450، SnSe500، SnSe550، SnSe600 به ترتیب برابر است با ۶/۷۹، ۷/۵۴، ۸/۲۳ و ۹/۱۰ اهم. آن چنان که می‌دانیم بزرگ‌تر بودن مقدار R_{ct} بین الکتروده مقابل و الکترولیت در

از الکترولیت دارای یون‌های $\text{I}^- / \text{I}_3^-$ یعنی ۵۰ mM LiI، ۱۰ mM I_2 و ۰.۵ M LiClO_4 استفاده کردیم. در این نمودارها دو قله اکسایشی و دو دره کاهش مشاهده می‌شود که بیانگر واکنش‌های $3\text{I}^- \leftrightarrow \text{I}_3^- + 2\text{e}^-$ و $2\text{I}_3^- \leftrightarrow 3\text{I}_2 + 2\text{e}^-$ هستند [۱۸]. در روش عملکرد سلول حساس شده به رنگ چون انتظار می‌رود نقش الکتروده مقابل احیای گونه‌های الکترولیت باشد تا در سمت دیگر (فوتوآند) مولکول‌های رنگدانه را احیا کنند، بنابراین دره‌های کاهش اهمیت ویژه‌ای دارند. به این ترتیب چون در سلول حساس شده به رنگ واکنش کاهش در سطح الکتروده مقابل رخ می‌دهد، شدت این پیک می‌تواند معیار مناسبی برای عملکرد بهتر سلول باشد [۱۹]. همان‌گونه که از منحنی‌های CV پیداست میزان پیک کاهش الکتروده SnSe450 نسبت به الکترودهای SnSe500 و SnSe550 و SnSe600 بیشتر است. همچنین میزان اختلاف ولتاژ قله تا قله، E_{pp} ، در این الکتروده به روشنی از الکترودهای دیگر کم‌تر بوده و در نتیجه می‌توان گفت این الکتروده مقابل فعالیت الکتروکاتالیتی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این الکتروده در انتقال الکترون به گونه‌های الکترولیت بهتر عمل می‌کند. البته دلیل این امر را می‌توان به روشنی به میزان سطح مؤثر این الکتروده مربوط دانست، چنان‌چه از تصویرهای FESEM دیدیم تفاوت معنی‌داری بین اندازه‌های ذره‌های تشکیل دهنده الکترودهای مقابل گوناگون دیده می‌شود، که برای الکتروده SnSe450 این مقدار به کم‌ترین حالت می‌رسد و می‌توان نتیجه گرفت سطح مؤثر بیش‌تری برای برهمکنش با



شکل ۶ - نمودار مشخصه جریان-ولتاژ برای سلول‌های ساخته شده از الکترودهای مقابل مختلف

کمتر و کمتر می‌شود و در نتیجه بازده سلول تا مقدار ۳/۳۵٪ برای سلول SnSe600 افت می‌کند. اگر چه عامل اصلی افزایش بازدهی سلول SnSe450 نسبت به سلول‌های دیگر افزایش جریان اتصال کوتاه است، با این حال افزایش مقدار بسیار کم در ولتاژ مدار باز نیز به این امر کمک کرده است. با همه این وجود مقدار FF برای سلول‌ها در یک بازه مشخص بین ۵۳ تا ۵۷٪ قرار گرفته است. در واقع این نتیجه با توقعات ما از پیش سازگاری کامل داشته است. چنان که انتظار می‌رود، داشتن یک الکتروده مقابل با سطح مؤثر بیشتر از SnSe می‌تواند مؤثرتر واقع شود و بدین دلیل از پیش هم شاید انتظار می‌رفت سلول SnSe450 که سطح مؤثر بیشتری داشت عملکرد بهتری در نتیجه‌های فوتولتائیک داشته باشد.

نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش دارای رقابت پذیری و حتی بهبود چشمگیری نسبت به پژوهش‌های پیشین است. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه گولاس و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۰ میلادی اشاره کرد که با استفاده از الکتروده مقابل طلا تنها به بازدهی ۴/۲٪ دست یافتند یا در کار دیگری، چن و همکاران با استفاده از الکتروده مقابل کربن سیاه به بازدهی ۳/۷٪ رسیدند [۲۲]. در سلول‌های با الکتروده مقابل همانند و حتی با استفاده از نانوذره‌های دی اکسید تیتانیوم نیز رسانی و همکاران به بازدهی همانند ۴/۹ درصدی دست یافتند [۱۲] که با توجه به ارزاتر بودن دی اکسید قلع از تیتانیوم مجدداً تاییدی بر اهمیت این کار است. در ضمن با افزایش دما میزان بلورینگی SnSe افزایش یافته است و به صورت معمول این پدیده کمک می‌کند ترابرد الکتروده (electron transport) بهتر انجام شود. اما در الکترودهای مقابل

جدول ۱ - مشخصه‌های فوتولتائیک سلول‌های ساخته شده با الکترودهای مقابل گوناگون

نمونه ساخته شده با الکتروده مقابل	V_{oc} (mV)	J_{sc} ($\frac{mA}{cm^2}$)	FF	η (%)
SnSe450	۷۴۳	۱۱/۶۲	۵۷	۴/۹۰
SnSe500	۷۲۷	۱۰/۱۸	۵۵	۴/۱۰
SnSe550	۷۱۳	۹/۳۸	۵۳	۳/۵۴
SnSe600	۷۰۲	۸/۶۸	۵۵	۳/۳۵

حالت خاموش به معنی مقاومت انتقال بار بیشتر در برابر انتقال الکترون‌ها است [۲۰]. با توجه به این حقیقت و شکل ۵ می‌توان این گونه متصور شد که مقاومت انتقال بار بین الکترولیت و الکتروده مقابل با افزایش دما، افزایش یافته است. یعنی مقاومت انتقال بار در الکتروده مقابل SnSe600 بیشتر تر و در الکتروده مقابل SnSe450 کمتر است. کم‌تر بودن مقاومت انتقال بار باعث می‌شود انتقال الکترون‌ها از الکتروده مقابل به الکترولیت راحت‌تر و سریع‌تر انجام پذیرد. نتیجه‌های آنالیز EIS را می‌توان در تطابق خوبی با تصویرهای FESEM الکترودهای مقابل دانست. در واقع با توجه به تصویرهای FESEM دریافتیم که نمونه SnSe450 دارای سطح مؤثر بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها بود و با افزایش دما این سطح مؤثر کمتر و کم‌تر شده است. از آن جایی که سطح مؤثر بیشتر فعالیت بیشتری را در اختیار انتقال بار بین الکترولیت و الکتروده مقابل می‌گذارد، در نتیجه سطح مؤثر بیشتر الکتروده SnSe450 طبیعتاً انتقال الکترونی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها خواهد داشت که نمود آن را در آنالیز EIS شاهد هستیم. همچنین همان‌گونه که در آزمون CV دیدیم فعالیت الکتروکاتالیستی الکتروده SnSe450 نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بود که ارتباط مستقیمی با سطح مؤثر نمونه‌ها داشت. به این ترتیب تطابق بسیار خوبی همچنین بین نتیجه‌های EIS و CV برقرار است.

شکل ۶ نمودار مشخصه جریان-ولتاژ برای سلول‌های ساخته شده با الکترودهای گوناگون بر اساس فوتولتائیک قلع است. همچنین مشخصه‌های فوتولتائیک این سلول‌ها را می‌توانید به صورت خلاصه در جدول ۱ مشاهده کنید. همان‌گونه که از جدول ۱ مشخص است، سلول SnSe450 با داشتن ولتاژ مدار باز ۷۴۳ mV، جریان اتصال کوتاه ۱۱/۶۲ mA/cm² و ضریب پرشدگی ۵۷٪ دارای بیش‌ترین بازدهی در میان سلول‌ها برابر با ۴/۹٪ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان دمای ساخت الکتروده مقابل در سلول‌های گوناگون، جریان گذرنده از سلول‌ها

به SnSe شدند و با بررسی اثر دمای این فرایند به ساخت سلول خورشیدی از آن‌ها پرداخته شد. تصویرهای FESEM نشان دادند که با افزایش دما میزان اندازه ذره‌های تشکیل دهنده سطوح الکتروودهای مقابل رشد یافته و ساختاری یکنواخت‌تر را تشکیل می‌دهند. آنالیزهای CV و EIS به ما کمک کردند تا ویژگی‌های تراپردی و الکتروکاتالیستی نمونه‌های الکتروود مقابل را بررسی کنیم. در این اندازه‌گیری‌ها چنانچه مشاهده شد، الکتروود مقابل SnSe450 با داشتن ویژگی‌های تراپردی و الکتروکاتالیستی بهتر نوید بخش ساخت الکتروود مقابل بهتری بود. نمودار مشخصه جریان ولتاژ سلول‌های ساخته شده از الکتروودهای مقابل گوناگون نمایان کردند که سلول SnSe450 بیش‌ترین بازده را برای ما به ارمغان می‌آورد و این افزایش بازدهی را می‌توان به افزایش جریان اتصال کوتاه این سلول مربوط دانست. در واقع با توجه به ویژگی‌های مورفولوژیکی و تراپردی و الکتروکاتالیستی الکتروود مقابل SnSe450 این الکتروود مقابل عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است.

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ تنها تراپرد الکترونی نیست که مهم است، بلکه فعالیت الکتروکاتالیستی سهم مهم‌تری دارد. این فعالیت بیش از همه به مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی سطح الکتروود مقابل بستگی دارد. سهم این فعالیت به صورت انتقال الکترون (electron transfer) در سطح مشترک الکتروود مقابل و الکتروولیت خود را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در متن مقاله نیز به آن اشاره شده است با کاهش دما سطح مؤثر الکتروود مقابل افزایش یافته است و این سطح مؤثر بیش‌تر فرصت بیش‌تری را برای انتقال الکترون از الکتروود مقابل به الکتروولیت فراهم می‌کند. از این رو فعالیت الکتروکاتالیستی می‌تواند با وجود پایین بودن رسانندگی الکتروود افزایش یابد. همچنین در آنالیز EIS مقاومت انتقال بار RCT بیانگر سهم انتقال الکترون از سطح الکتروود است و نه تراپرد الکترونی از میان ضخامت الکتروود مقابل. بنابراین عملاً تناقضی بین نتیجه‌های FESEM، CV و EIS وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر دما بر روی الکتروود مقابل SnSe سلول خورشیدی پرداخته شد. الکتروودهای مقابلی که توسط روش کندوپاش با قلع لایه نشانی شده بودند متعاقباً توسط فرایند سلناز کردن تبدیل

تاریخ دریافت: ۲۳/۰۷/۱۳۹۹؛ تاریخ پذیرش: ۲۰/۱۰/۱۴۰۰

مراجع

- [1] Jiang S., Klingan K., Pasquini C., Dau H.J.T.J.O.C.P., New Aspects of Operando Raman Spectroscopy Applied to Electrochemical Co₂ Reduction on Cu Foams, **150(4)**: 041718 (2019).
- [2] Junger I.J., Tellioglu A., Ehrmann A.J.O., Refilling DSSCs as a Method to Ensure Longevity, **160**: 255-258 (2018).
- [3] Moradi A., Abrari M., Ahmadi M., Efficiency Enhancement in Dye-Sensitized Solar Cells through the Decoration of Electro-Spun TiO₂ Nanofibers with Ag Nanoparticles, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31(19)**: 16759-16768 (2020).
- [4] Chou J.-C., Ko C.-C., Chang J.-X., Nien Y.-H., Lai C.-H., Kuo P.-Y., Chen H.-H., Hsu H.-H., Hu G.-M., Photovoltaic Properties of an RgO/Pt Counter Electrode with Azo Photoanode for Dye-Sensitized Solar Cells under Low Light Intensity, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **33(1)**: 121-127 (2019).
- [5] Suriani A., Nurhafizah M., Mohamed A., Mamat M., Malek M., Ahmad M., Pandikumar A., Huang N., Enhanced Photovoltaic Performance Using Reduced Graphene Oxide Assisted by Triple-Tail Surfactant as an Efficient and Low-Cost Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells, *Optik*, **139**: 291-298 (2017).

- [6] Xu S., Cheng N., Yin H., Cao D., Mi B., Electrospray Preparation of CuInS₂ Films as Efficient Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells, *Chemical Engineering Journal*, **397**: 125463 (2020).
- [7] Kung C.-W., Chen H.-W., Lin C.-Y., Huang K.-C., Vittal R., Ho K.-C., Cos Acicular Nanorod Arrays for the Counter Electrode of an Efficient Dye-Sensitized Solar Cell, *ACS nano*, **6(8)**: 7016-7025 (2012).
- [8] Sun K.C., Arbab A.A., Sahito I.A., Qadir M.B., Choi B.J., Kwon S.C., Yeo S.Y., Yi S.C., Jeong S.H.J.R.a., A PvdF-Based Electrolyte Membrane for a Carbon Counter Electrode in Dye-Sensitized Solar Cells, *7(34)*: 20908-20918 (2017).
- [9] Tang B., Yu H., Huang W., Sun Y., Li X., Li S., Ma T.J.R.A., Three-Dimensional Graphene Networks and Rgo-Based Counter Electrode for Dsscs, *9(28)*: 15678-15685 (2019).
- [10] Mutta G.R., Popuri S.R., Maciejczyk M., Robertson N., Vasundhara M., Wilson J.I., Bennett N.S.J.M.R.E., V₂O₅ as an Inexpensive Counter Electrode for Dye Sensitized Solar Cells, *3(3)*: 035501 (2016).
- [11] Cui X., Xu W., Xie Z., Wang Y.J.J.O.M.C.A., High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells Based on Ag-Doped SnS₂ Counter Electrodes, *4(5)*: 1908-1914 (2016).
- [12] Ramasamy P., Manivasakan P., Kim J., Phase Controlled Synthesis of Snse and SnS₂ Hierarchical Nanostructures Made of Single Crystalline Ultrathin Nanosheets, *CrystEngComm*, **17(4)**: 807-813 (2015).
- [13] Liu F., Zhu J., Xu Y., Zhou L., Li Y., Hu L., Yao J., Dai S., Snx (X= S, Se) Thin Films as Cost-Effective and Highly Efficient Counter Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells, *Chemical Communications*, **51(38)**: 8108-8111 (2015).
- [14] Kumar D.K., Popuri S.R., Swami S.K., Onuoha O.R., Bos J.-W.G., Chen B., Bennett N., Upadhyaya H., Screen Printed Tin Selenide Films Used as the Counter Electrodes in Dye Sensitized Solar Cells, *Solar Energy*, **190**: 28-33 (2019).
- [15] Abrari M., Ghanaatshoar M., Moazami H.R., Davarani S.S.H.J.J.o.E.M., Synthesis of SnO₂ Nanoparticles by Electrooxidation Method and Their Application in Dye-Sensitized Solar Cells: The Influence of the Counterion, *48(1)*: 445-453 (2019).
- [16] Abrari M., Ahmadi M., Ghanaatshoar M., Moazami H.R., Davarani S.S.H., Fabrication of Dye-Sensitized Solar Cells Based on SnO₂/ZnO Composite Nanostructures: A New Facile Method Using Dual Anodic Dissolution, *Journal of Alloys and Compounds*, **784**: 1036-1046 (2019).
- [17] Mittemeijer E.J., "Fundamentals of Materials Science: The Microstructure–Property Relationship Using Metals as Model Systems", Springer Science & Business Media, (2010).
- [18] Wu C.-S., Chang T.-W., Teng H., Lee Y.-L., High Performance Carbon Black Counter Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells, *Energy*, **115**: 513-518 (2016).

- [19] He B., Tang Q., Liang T., Li Q., Efficient Dye-Sensitized Solar Cells from Polyaniline–Single Wall Carbon Nanotube Complex Counter Electrodes, *Journal of Materials Chemistry A*, **2(9)**: 3119-3126 (2014).
- [20] Zatirostami A., Electro-Deposited Snse on Ito: A Low-Cost and High-Performance Counter Electrode for Dsscs, *Journal of Alloys and Compounds*, **844**: 156151 (2020).
- [21] Gullace S., Nastasi F., Puntoriero F., Trusso S., Calogero G., A Platinum-Free Nanostructured Gold Counter Electrode for Dsscs Prepared by Pulsed Laser Ablation, *Applied Surface Science*, **506**: 144690 (2020).
- [22] Chen P.-W., Lee C.-P., Chang L.-Y., Chang J., Yeh M.-H., Lin L.-Y., Vittal R., Lin J.-J., Ho K.-C., Dye-Sensitized Solar Cells with Low-Cost Catalytic Films of Polymer-Loaded Carbon Black on Their Counter Electrode, *RSC advances*, **3(17)**: 5871-5881 (2013).