



بررسی تاثیر ضخامت لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 تهیه شده به روش هایدروترمال بر عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS

فرزانه آهنگرانی فراهانی | مازیار مرندی*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک

چکیده: در این مقاله دو ضخامت مختلف از لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 در ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به کار گرفته می‌شود. نانوذرات TiO_2 به روش هایدروترمال سنتز شده و در دو ضخامت مختلف 4 ± 0.5 و 10 ± 0.5 میکرومتر بر سطح زیر لایه شیشه/هادی شفاف جایگذاری می‌گردند. به منظور حساس سازی فوتوآند، نقاط کوانتومی CdS به روش جذب متوالی لایه های یونی و انجام واکنش (سیلار) بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. هم چنین به منظور یافتن بهینه چرخه لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS فرآیند لایه نشانی در چرخه های ۷-۲ ادامه پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که بهترین سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در طی ۶ دوره لایه نشانی بر لایه ۱۰ میکرومتری از نانوذرات TiO_2 بدست آمد. این سلول خورشیدی دارای پارامترهای فوتوولتایی جریان مدار کوتاه (J_{sc}) $6/93$ میلی آمپر/سانتی متر مربع، ولتاژ مدار باز 610 (V_{oc}) میلی ولت و بازدهی تبدیل انرژی $76/1\%$ (η) می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج آنالیز EIS، در مورد بهینه سلول خورشیدی میزان C_{μ} به مقدار 240 میکرو فاراد افزایش یافت که این نشان دهنده افزایش میزان بار الکتریکی در لایه فوتوآند و هم چنین افزایش انتقالات الکترونی است. هم چنین طول عمر حامل‌های بار در این سلول برابر 9 میلی ثانیه بود.

واژگان کلیدی: نانوذرات TiO_2 ، روش هایدروترمال، سلول خورشیدی، نقاط کوانتومی CdS

m-marandi@araku.ac.ir

۱- مقدمه

صورت می‌گیرد [۳]. از نظر تئوری بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی با توجه به اثر MEG نقاط کوانتومی حتی به مقدار 42% نیز می‌رسد [۴]. هرچند بازدهی آزمایشگاهی این دسته از سلول‌ها نسبت به سلول‌های خورشیدی رنگدانه ای دسته دیگر از سلول‌های خورشیدی نانو ساختاری، پایین تر است، اما در چند سال اخیر بازدهی آن‌ها رو بهبود بوده است. در همین راستا به منظور افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی قسمت‌های مختلف سلول خورشیدی از جمله فوتوآند، الکترولیت و الکترو

سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به عنوان یکی از انواع سلول‌های خورشیدی نانو ساختاری توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱]. در این نوع سلول‌ها، نقاط کوانتومی جاذب‌های نور هستند و تولید زوج الکترون حفره با جذب فوتون‌ها انجام می‌گیرد. این نقاط کوانتومی به روش‌های ساده و کم هزینه نسبت به سیلیکون موجود در سلول‌های خورشیدی مرسوم تهیه می‌شوند [۲]. در این ادوات فوتوولتایی انتقال الکترون از نقاط کوانتومی به فوتوآند انجام می‌شود و احیای نقاط کوانتومی نیز بوسیله الکترولیت

$(\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2)$ ، سدیم سولفید ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)، مس (II) سولفید، گوگرد، پتاسیم کلراید (KCl) استفاده شد. تمامی این مواد ساخت شرکت مرک آلمان بودند. در این تحقیق طیف سنجی‌های اپتیکی با اسپکتروفوتومتر Optizen Pop انجام گرفت. اندازه‌گیری مشخصه I-V سلول نهایی با سطح موثر 0.16 سانتی متر مربع با دستگاه (Sharif Solar I-V Tracer) و در شرایط تابش نور خورشید Am 1.5 انجام شد. هم چنین اندازه‌گیری‌های امپدانس الکترو شیمیایی (EIS) با دستگاه پتانسیو استات اتولب (Eco Chemie Autolab Potentiostat) انجام گرفت.

روش آزمایش

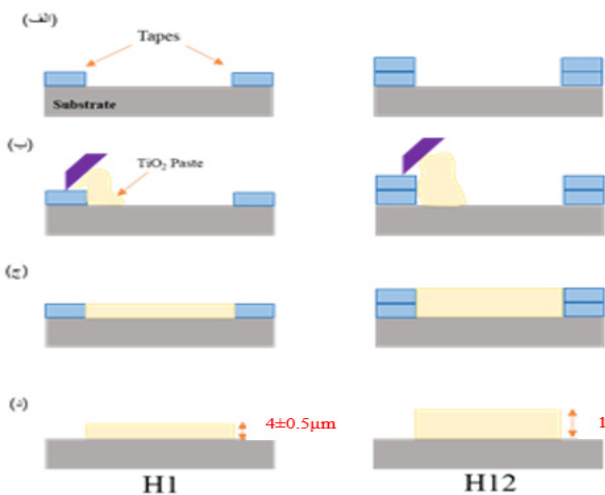
در این مقاله نانوذرات TiO_2 به روش هایدرومال و در یک محیط اسیدی سنتز شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای سنتز نانوذرات، ابتدا 0.2 مول از استیک اسید به 0.2 مول تیتانیوم تترا ایزوپروپوکساید (TTIP) اضافه می‌شود و هم می‌خورد. سپس با افزودن آب، فرآیند هیدرولیز انجام می‌گیرد که منجر به ایجاد رسوب سفید TiO_2 می‌گردد. در ادامه 0.26 میلی لیتر اسید نیتریک به محلول رسوب سفید رنگ اضافه شده و فرآیند حرارت دهی به مدت 75 دقیقه در دمای 80 سانتیگراد انجام می‌گیرد. محلول بدست آمده پس از این مرحله لخته زدایی در اتوکلاو ریخته شده و به مدت 12 ساعت در دمای 230 درجه حرارت دهی می‌شود. نانوذرات TiO_2 تهیه شده در این مرحله پس از انجام فرآیند سانتریفیوژ و شستشو با اتانول در تهیه خمیر TiO_2 مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تهیه خمیر شامل نانوذرات TiO_2 ، مقداری مشخص از پلیمر اتیل سلولز و تریپتئول محلول در اتانول را به محلول اتانولی شامل نانوذرات TiO_2 اضافه می‌شود و در حمام آب 40 سانتیگراد قرار می‌گیرد تا خمیر 18% وزنی از نانوذرات آماده شود. شکل ۱ تصویری از این نانوذرات و خمیر متشکل از آن را نشان می‌دهد. قبل از لایه نشانی نانوذرات TiO_2 بر سطح شیشه رسانا FTO به منظور ایجاد یک لایه سدی، زیرلایه‌ها با لایه‌ای بسیار نازک از TiO_2 با ضخامتی حدود 200 نانومتر پوشش داده می‌شوند [۱۵]. این لایه سدی به روش حمام شیمیایی با استفاده از محلول آبی TiCl_4 با غلظت 40 میلی مولار به مدت 30 دقیقه در دمای 70 درجه جایگذاری می‌شود.

شمارنده صورت گرفته است. نانوذرات نیمه رسانا TiO_2 با شکاف انرژی غیر مستقیم $3/2$ الکترون ولت و میزان بازترکیب پایین یکی از مناسب ترین گزینه‌ها برای استفاده در ساختار فوتوآند می‌باشد [۵ و ۶]. این نانوذرات سطح موثر بالایی برای جذب بیشتر نقاط کوانتومی ایجاد می‌کنند که این، افزایش جذب نور و در نتیجه آن افزایش بازدهی سلول خورشیدی را در پی دارد [۷]. از آن جایی که فوتوآند نقش مهمی را در جداسازی و انتقال بار در سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی ایفا می‌کند، استفاده از ساختارهای مختلف TiO_2 (مثل نانو لوله‌ها و نانو میله‌ها) و انتخاب مناسب آن، می‌تواند در انتقال سریع تر حامل‌های بار تاثیر داشته باشد [۸-۱۰]. ساختارهای تک بعدی مسیر مستقیم‌تری برای انتقال الکترون‌ها نسبت به نانوذرات ایجاد می‌کنند که این سرعت انتقال الکترون‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین نانوساختارهای تک بعدی با انتقال سریع تر الکترون احتمال بازترکیب را کاهش و بازده تبدیل انرژی را افزایش می‌دهند. از جمله راه کارهای بهبود جذب نور، استفاده از نانوساختارهای پراکننده نور مانند کره‌های توخالی در فوتوالکتروود می‌باشد [۱۱-۱۳]. این ساختارها با پراکنده کردن نور، مانع خروج مستقیم نور ورودی به فوتوآند می‌شوند و نور در فوتوآند به تله می‌افتد و با افزایش میزان جذب نور بازده تبدیل انرژی را افزایش می‌دهند. در پژوهش‌های اخیر، با استفاده از نانوذرات TiO_2 20 نانومتری و حساس سازی لایه متشکل از آن با نقاط کوانتومی CdS بازدهی این سلول‌های خورشیدی را به مقداری در حدود 2 درصد بهبود داده‌اند [۱۴]. در این تحقیق تلاش می‌شود با افزایش ضخامت لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 و هم چنین حساس سازی آن با نقاط کوانتومی CdS و بهینه کردن ضخامت این لایه حساس کننده بازدهی تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی مرتبط را افزایش داد. در نهایت نشان داده می‌شود که بازدهی تبدیل انرژی به مقدار $1/76\%$ با حساس سازی فوتوآند متشکل از نانوذرات TiO_2 به ضخامت 10 میکرومتر با نقاط کوانتومی CdS در 6 چرخه لایه نشانی بدست می‌آید.

۲- بخش تجربی

مواد و تجهیزات

در این پژوهش از تیتانیوم تترا ایزوپروپوکساید (TTIP)، استیک اسید (CH_3COOH)، اسید نیتریک (HNO_3)، کادمیوم استات



شکل ۲. لایه نشانی نانوذرات TiO_2 در دو ضخامت مختلف به روش دکتر بلید طی مراحل (الف) چسباندن چسب فاصله دهنده بر سطح FTO، (ب) و (ج) قرار دادن خمیر متشکل از نانوذرات بر سطح آن و انجام لایه نشانی با کشیدن تیغه و (د) برداشتن چسب‌ها.

در ابتدا شیشه/هادی شفاف در محلول $0.5/1$ مولار از $Cu(NO_3)_2$ در اتانول به مدت یک دقیقه قرار می‌گیرد و با اتانول شستشو داده می‌شود. سپس زیرلایه به مدت یک دقیقه دیگر در محلول $0.5/1$ مولار از Na_2S در اتانول و آب یون زدایی شده قرار داده می‌شود و در ادامه دوباره با اتانول شستشو می‌گردد. ساخت الکترولیت پلی سولفید نیز با تهیه محلولی $1/1$ مولار از Na_2S ، $0.2/1$ مولار از KCl و $2/1$ مولار از S در آب و اتانول به نسبت $3/7$ تهیه می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۳ (الف) و (ب) تصاویر SEM سطح لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۳ (ج) و (د) نیز تصاویر مشابه تهیه شده از فوتوآند متشکل از نانوذرات TiO_2 و حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در بزرگنمایی‌های مختلف را ارائه می‌کند. می‌توان دید که نانوذرات TiO_2 در لایه به شکلی فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند. هیستوگرام آورده شده در ضمیمه شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که نانوذرات TiO_2 با ابعادی در حدود 20 نانومتر سنتز شده‌اند. با حساس سازی فوتوآند با نقاط کوانتومی CdS ، این نقاط کوانتومی سطح نانوذرات را می‌پوشانند و میزان تخلخل لایه را کاهش می‌دهند. این بدان علت است که نقاط کوانتومی که اندازه ی آنها در مقایسه با نانوذرات TiO_2 -

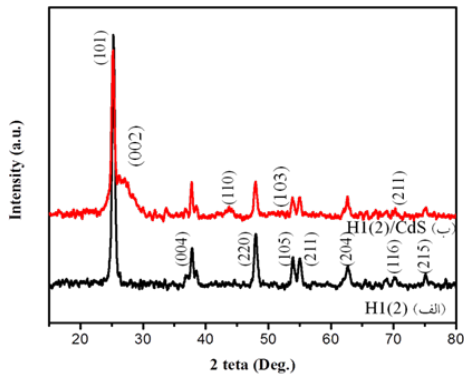


شکل ۱. (الف) رسوب نانوذرات TiO_2 تهیه شده به روش هایدروترمال و (ب) خمیر متشکل از آن

لایه سدی از جنس TiO_2 دو مزیت عمده دارد. مزیت اول این است که کیفیت تماس الکتریکی و مکانیکی ساختار نانوذره ای TiO_2 با FTO را افزایش می‌دهد و ترابرد الکترون در فصل مشترک این دو لایه را بهبود می‌بخشد. مزیت دیگر این است که همانند مانعی در مقابل بازترکیب های ناخواسته الکترون ها با الکترولیت در هنگام کارکرد سلول خورشیدی عمل می‌کند. در مرحله بعد خمیر شامل نانوذرات TiO_2 به روش دکتر بلید بر سطح شیشه رسانا FTO لایه نشانی می‌شود. برای ایجاد ضخامت های مختلف، از یک چسب و دو چسب اسکاچ به منظور فاصله دهنده استفاده می‌گردد. شکل ۲ مراحل لایه نشانی نانوذرات TiO_2 به روش دکتر بلید در دو ضخامت مختلف را نشان می‌دهد. نامگذاری لایه ها به صورت H1 لایه متشکل از نانوذرات با ضخامت 4 میکرومتر و H1(2) لایه متشکل از نانوذرات با ضخامت 10 میکرومتر می باشد. لازم به ذکر است که نام نقاط کوانتومی CdS در چرخه های مختلف لایه نشانی در ادامه آن آورده می‌شود.

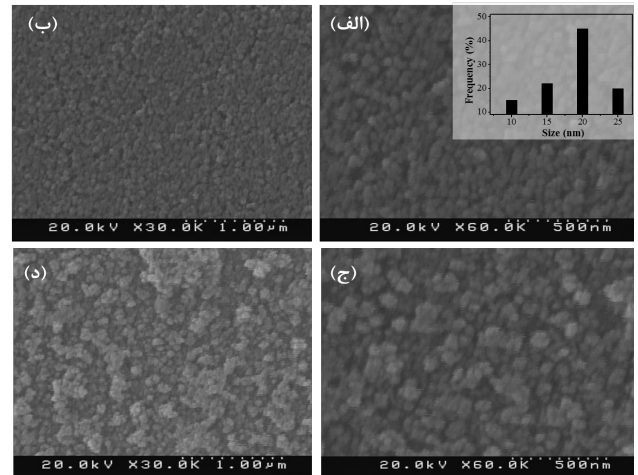
به منظور حساس سازی فوتوآند در این دسته از سلول‌های خورشیدی، نقاط کوانتومی CdS به روش سیلار بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. در این فرآیند ابتدا فوتوآند را در محلول $0.1/1$ مولار از $Cd(CH_3COO)_2$ در متانول به مدت یک دقیقه قرار می‌دهیم. سپس فوتوآند را در متانول کاملاً شسته و در محلول $0.1/1$ مولار از Na_2S در متانول و آب یون زدایی شده به مدت یک دقیقه دیگر قرار می‌گیرد. در نهایت نیز شستشوی مجدد در محلول متانول انجام می‌شود. این فرآیند در چرخه های $7-2$ لایه نشانی برای هر دو ضخامت لایه ها انجام می‌گیرد.

برای آماده سازی الکتروود شمارنده (کاتد) نیز از روش لایه نشانی سیلار استفاده می‌شود. آماده سازی الکتروود شمارنده CuS است. در این فرآیند نیز از روش لایه نشانی سیلار استفاده می‌گردد.



شکل ۵. طیف‌های پراش پرتو ایکس تهیه شده از فوتوآندهای (الف) H1(2) و (ب) H1(2)/CdS

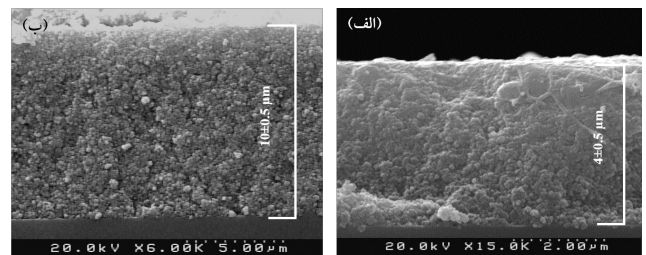
شکل ۵ (الف) و (ب) طیف‌های پراش پرتو ایکس تهیه شده از فوتوآندهای H1(2) و H1(2)/CdS را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج بدست آمده از شکل ۵ (الف) پیک‌های پراش پرتو ایکس در مکان‌های 2θ 30.25° ، 37.3° ، 48.2° ، 53.9° ، 55.1° ، 62.7° قرار دارند. این پیک‌ها ی پراش براساس فایل استاندارد JCPDS شماره ۷۱/۱۱۶۷ متعلق به دسته صفحات (۱۰۱)، (۰۰۴)، (۲۲۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۲۰۴)، (۱۱۶) و (۲۱۵) فاز کریستالی آنتاز تیتانیوم دی اکسید می‌باشند. همان طور که در شکل ۵ (ب) دیده می‌شود علاوه بر پیک‌های پراش پرتو ایکس که متعلق به نانوذرات TiO_2 با فاز کریستالی آنتاز هستند، پیک‌های دیگری در مکان‌های 2θ 26.65° ، 43.98° ، 52.25° و 70.38° قرار دارند. این پیک‌ها ی پراش توجه به فایل استاندارد ICSD شماره ۸۰۰۰۰۶ متعلق به دسته صفحات (۰۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۲۱۱) ساختار هگزاگونال نانوکریستال های CdS می‌باشند. بنابراین به روش سیلار نقاط کوانتومی CdS بر سطح فوتوآند شامل نانوذرات TiO_2 جایگذاری شده‌اند. شکل ۶ (الف) و (ب) منحنی‌های عبور اپتیکی مربوط به فوتوالکترودهای H1 و H1(2) با چرخه های سیلار CdS ۲-۷ را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود میزان عبور نور از لایه های H1 و H1(2) در طول موج ۶۰۰ نانومتر به ترتیب برابر ۸۳٪ و ۸۰٪ می باشد. می توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لایه ی H می‌تواند پراکنندگی نور را افزایش می‌دهد [۱۶].



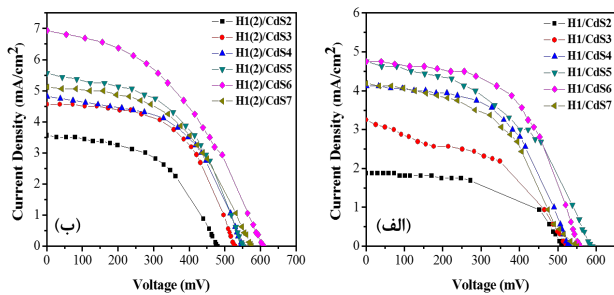
شکل ۳. تصاویر SEM از سطح (الف) و (ب) لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 و (ج) و (د) فوتوآند متشکل از نانوذرات TiO_2 و حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در بزرگنمایی های متفاوت. هیستوگرام سایز نانوذرات TiO_2 در ضمیمه شکل ۳ (الف) آورده شده است.

کوچکتر است به درون تخلخل های لایه تیتانیوم دی اکسید نفوذ کرده‌اند. با این وجود لایه ی متشکل از نانوذرات TiO_2 و حساس شده با نقاط کوانتومی CdS همچنان متخلخل است و امکان نفوذ الکترولیت به عمق آن وجود دارد. هرچه تعداد چرخه‌های لایه نشانی بیشتر باشد میزان تخلخل لایه کاهش می‌یابد و نقاط کوانتومی روی سطح لایه بیشتر انباشته شده و مانع نفوذ الکترولیت به عمق لایه می‌گردد.

شکل ۴ تصاویر از مقطع عرضی لایه های متشکل از نانوذرات TiO_2 در دو ضخامت مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که در این تصاویر نیز مشخص است، نانوذرات TiO_2 به شکلی فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۴ (الف)، لایه H1 دارای ضخامتی در حدود ۴ میکرومتر می‌باشد. هم چنین با توجه به شکل ۴ (ب)، لایه H1(2) ضخامتی در حدود ۱۰ میکرومتر را دارا می‌باشد.



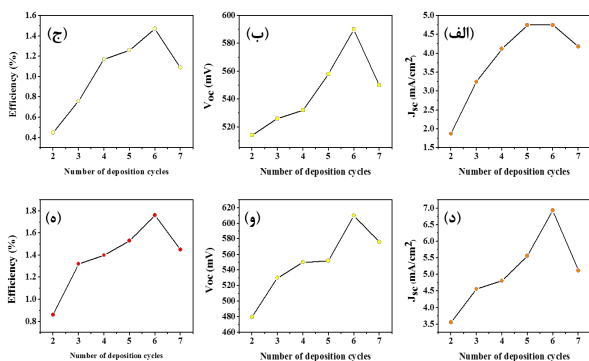
شکل ۴. تصاویر SEM مقطع عرضی از لایه‌های (الف) H1 و (ب) H1(2)



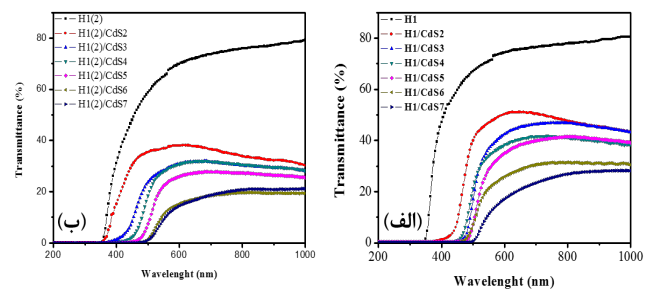
شکل ۷. منحنی های I-V سلول های خورشیدی ساخته شده با فوتوآند های H1(2) (ب) و H1 (الف) حساس شده با چرخه های مختلف لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS

افزایش چرخه های سیلار نقاط کوانتومی CdS و افزایش جذب های نور، جریان و ولتاژ آن ها نیز افزایش می یابد که افزایش جریان و ولتاژ، افزایش بازدهی را در چرخه های بالاتر CdS در پی دارد.

در تعداد چرخه های بالاتر سیلار جایگذاری بسیار زیاد نقاط کوانتومی باعث پر شدن حفره ها در لایه TiO₂ می شود واز نفوذ الکترولیت به عمق لایه جلوگیری می کند. با کاهش تبدلات الکترونی مناسب در داخل سلول، جریان اتصال کوتاه سلول کاهش یافته است [۱۷]. جدول ۱ و ۲ مشخصات فوتوولتاییک مربوط به سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با فوتوآند H1(2) و H1 در تعداد چرخه های لایه نشانی ۲-۷ لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS را نشان می دهد. براساس نتایج برای فوتوآند های H1(2) و H1 بهینه تعداد چرخه سیلار CdS در ۶ چرخه اتفاق می افتد.



شکل ۸. منحنی های تغییرات (الف) جریان اتصال کوتاه، (ب) ولتاژ مدار باز و (ج) بازدهی نسبت به تعداد چرخه های سیلار CdS برای فوتوآند H1/CdS و (د) جریان اتصال کوتاه، (ب) ولتاژ مدار باز و (ج) بازدهی نسبت به تعداد چرخه های سیلار CdS برای فوتوآند H1(2)/CdS

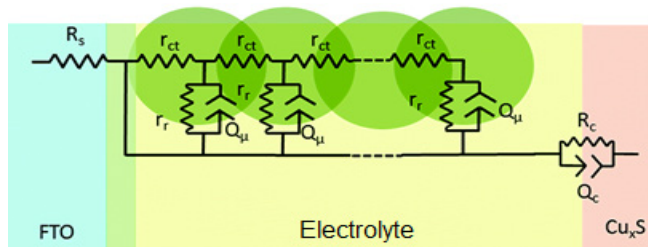


شکل ۶ منحنی های عبور اپتیکی نور فوتوآند های (الف) H1/CdS و (ب)

پس از جایگذاری نقاط کوانتومی CdS بر سطح فوتوآند ها میزان عبور نور به دلیل جذب نور بوسیله نقاط کوانتومی کاهش می یابد. در ادامه با افزایش تعداد چرخه های سیلار نقاط کوانتومی CdS، میزان عبور نور در محدوده ی طول موج های ۳۵۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر کاهش می یابد. هم چنین لبه جذب فوتوآند H1/CdS و H1(2)/CdS در حدود ۵۰۰ نانومتر می باشد که نسبت به لبه جذب لایه متشکل از نانوذرات TiO₂ که در حدود ۳۵۰ نانومتر می باشد، به طول موج های بالاتر جابجا شده است.

شکل ۷ (الف) و (ب) منحنی های جریان-ولتاژ سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با ضخامت های مختلف لایه متشکل از نانوذرات TiO₂ و در چرخه های ۲-۷ لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS را نشان می دهد. مشخصات فوتوولتاییک هر دو دسته از سلول های خورشیدی ساخته شده در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود در هر دو دسته از سلول های خورشیدی با افزایش تعداد چرخه های سیلار CdS ابتدا بازده افزایش و سپس کاهش می یابد. در تعداد چرخه های کمتر سیلار، سطح لایه نانو ذره ای TiO₂ به خوبی با نقاط کوانتومی پوشش داده نشده است و میزان جذب نور توسط فوتوآند و در نتیجه ولتاژ کم می باشد. بنابراین بازده تبدیل انرژی سلول خورشیدی ساخته شده کم است. با افزایش تعداد چرخه های سیلار CdS نقاط کوانتومی بیشتری بر سطح نانوذرات جایگذاری می شوند در نتیجه میزان جذب نور افزایش یافته و بازده تبدیل انرژی نیز افزایش می یابد. شکل ۸ نیز منحنی های تغییرات جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازدهی به صورت مجزا نسبت به چرخه های سیلار CdS برای فوتوآند های H1/CdS و H1(2)/CdS را نشان می دهد. همان طور که از این منحنی ها نیز مشخص است، با

بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی سلول‌های خورشیدی به کار می‌رود. این روش این امکان را فراهم می‌آورد تا فرآیندهای مختلفی که بین فصل مشترک محیط‌های متفاوتی که درون سلول خورشیدی حساس شده، از جمله فصل مشترک بین الکترولیت و الکترودها، به طور جداگانه بررسی شود. برای یک سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی فصل مشترک‌های زیادی وجود دارد که همانند شکل ۱۰ می‌توان با مدارهای معادل نمود. پارامترهای مختلفی از این مدل‌سازی استخراج می‌شود که شامل مقاومت سری سلول (R_s)، طول عمر الکترون (τ_{eff})، مقاومت انتقال بار در فصل مشترک TiO_2 الکترولیت (R_{ct}) و ظرفیت شیمیایی فوتوآند (C_{μ}) می‌باشد. در این روش ابتدا سلول تحت تاثیر

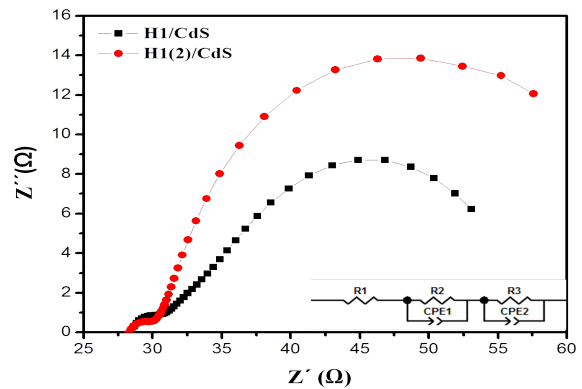


شکل ۱۰. شماتیکی از ساختار داخلی سلول خورشیدی و فصل مشترک بین محیط‌های مختلف در آن

یک ولتاژ متناوب قرار می‌گیرد، سپس در فرکانس‌های مختلف جریان متناوب خوانده می‌شود. در مرحله بعد با معادل سازی داده‌ها با المان‌های مداری، می‌توان پارامترهای انتقال الکترون در سیستم را بدست آورد. برای تحلیل داده‌ها از نرم افزار z-view بهره گرفته می‌شود [۱۸]. نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزار z-view در جدول ۳ آورده شده‌است. بر طبق این نتایج، با افزایش ضخامت لایه فوتوآند و افزایش جذب نقاط کوانتومی، میزان جذب‌های نور افزایش یافته و به همین دلیل فوتوآند $H1(2)/CdS6$ دارای ظرفیت شیمیایی بیشتری نسبت به فوتوآند $H1/CdS6$ می‌باشد. هم چنین در این حالت طول عمر الکترون نیز به مقدار ۹ میلی ثانیه افزایش یافته است.

جدول ۳. نتایج بدست آمده از شبیه سازی داده های امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از نرم افزار z-view برای سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با فوتوآند های $H1(2)$ و $H1$

فوتوآند	R_s (Ω)	R_{ct} (Ω)	C_{μ} (μF)	τ_{eff} (ms)
$H1/CdS6$	28.3	28	130	4
$H1(2)/CdS6$	28.7	36	240	9



شکل ۹. منحنی‌های نیکوئست (Nyquist) سلول‌های خورشیدی با فوتوآندهای $H1(2)$ و $H1$ حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در ۶ چرخه لایه نشانی

جدول ۱. مشخصات فوتولتاییک سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS ساخته شده با فوتوآند $H1(2)$ و در تعداد چرخه های لایه نشانی ۲-۷ نقاط کوانتومی CdS

فوتوآند	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
$H1/CdS2$	1.87	514	0.47	0.45
$H1/CdS3$	3.25	526	0.44	0.76
$H1/CdS4$	4.12	532	0.53	1.17
$H1/CdS5$	4.75	558	0.45	1.26
$H1/CdS6$	4.75	590	0.55	1.47
$H1/CdS7$	4.18	550	0.47	1.09

جدول ۲. مشخصات فوتولتاییک سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS ساخته شده با فوتوآند $H1(2)$ و در تعداد چرخه های لایه نشانی ۲-۷ نقاط کوانتومی CdS

فوتوآند	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
$H1(2)/CdS2$	3.56	480	0.5	0.86
$H1(2)/CdS3$	4.56	530	0.54	1.32
$H1(2)/CdS4$	4.81	550	0.53	1.4
$H1(2)/CdS5$	5.56	552	0.5	1.53
$H1(2)/CdS6$	6.93	610	0.42	1.76
$H1(2)/CdS7$	5.12	576	0.48	1.45

همان طور که دیده می‌شود، بیشترین بازدهی مربوط به سلول خورشیدی ساخته شده با استفاده از فوتوآند $H1(2)/6 CdS$ و برابر ۱/۷۶٪ می‌باشد که در حدود بازدهی گزارش شده در مقالات مشابه می‌باشد.

شکل ۹ نتایج آنالیز EIS را برای سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با دو فوتوآند $H1/CdS$ و $H1(2)/CdS$ در $-0.75V$ و در شرایط تاریکی مطلق را نشان می‌دهد. مدار معادلی که برای سلول خورشیدی در نظر گرفته شده‌است در ضمیمه شکل نشان داده شده‌است. این آنالیز به منظور

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، لایه ای از نانوذرات TiO_2 تهیه شده به روش هایدروترومال با ضخامت‌های مختلف در حدود ۴ و ۱۰ میکرو متر بر سطح زیرلایه شیشه/هادی شفاف FTO تهیه شدند. سپس حساس سازی فوتوآند با نقاط کوانتومی CdS انجام گرفت. بر اساس نتایج طیف سنجی های اپتیکی لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS باعث بهبود فرآیند جذب نور می شود. هم چنین نتایج آنالیز های فوتوولتایی نشان داد که بازدهی سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در بهینه حالت و در ضخامت ۱۰ میکرومتر به میزان ۱۷٪ نسبت به سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS و در ضخامت ۵ میکرومتر از نانوذرات TiO_2 افزایش یافته است. این سلول خورشیدی دارای چگالی جریان ۶/۹۳ میلی آمپر/سانتی متر مربع، ولتاژ مدار باز ۰/۶۱ میلی ولت و بازدهی تبدیل انرژی ۱/۷۶٪ بود. با توجه به نتایج آنالیز EIS، لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 با ضخامت ۱۰ میکرومتر، میزان C_{μ} به مقدار ۲۴۰ میکرو فاراد افزایش می یافت که این نشان دهنده افزایش میزان بار الکتریکی در لایه فوتوآند و هم چنین افزایش انتقالات الکترونی است. هم چنین طول عمر حامل‌های بار در بهترین سلول با این فوتوآند برابر ۹ میلی ثانیه بود.

مراجع

- [1] I. Hod, A. Zaban, "Materials and interfaces in quantum dot sensitized solar cells: challenges, advances and prospects", *Langmuir*, 30, 7264–7273, 2014.
- [2] A.J. Nozik, "Exciton multiplication and relaxation dynamics in quantum dots: applications to ultrahigh-efficiency solar photon conversion", *Inorganic Chem.*, 44, 6893–6899, 2005.
- [3] C.H. Chang, Y.L. Lee, "Chemical bath deposition of CdS quantum dots onto mesoscopic TiO_2 films for application in quantum-dot-sensitized solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 91, 053503-1–053503-3, 2007.
- [4] J. Tian and G. Cao, "Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells", *Nano reviews*, 4, 2013.

[5] I. Robel, V. Subramanian, M. Kuno and P. V. Kamat, "Quantum Dot Solar Cells. Harvesting Light Energy with CdSe Nanocrystals Molecularly Linked to Mesoscopic TiO_2 Films", *J. Am. Chem. Soc.*, 128, 2385–2393, 2006.

[6] S. Lee, H. Jin, D. Kim, K. Song, S. Oh, S. Kim, "Enhanced power conversion efficiency of quantum dot sensitized solar cells with near single-crystalline TiO_2 nanohelices used as photoanodes", *Optics Express*, vol.22, pp.867-879, 2014.

[7] P. V. Kamat, K. Tvrdy, D. Baker, J. Radich, "Beyond photovoltaics: semiconductor nan architectures for liquid-junction solar cells", *Chem. Rev*, 110, 6664-6688, 2010.

[8] W. Jingyang, Z. Tianjin, W. Qingqing, W. Duofa, P. Ruikun, X. Hanming, "Composite Semiconductor Quantum Dots CdSe/CdS Co-sensitized TiO_2 nanorod Array Solar Cells", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 27, 876-880, 2012.

[9] Y. Lai, Z. Lin, D. Zheng, L. Chi, R. Du, Ch. Lin, "CdSe/CdS quantum dots co-sensitized TiO_2 nanotube array photoelectrode for highly efficient solar cells", *Electrochimica Acta*, 79, 175–181, 2012.

[10] G. Xiuquan, S. Duanming, Zh. Yulong, Q. Yinghuai, *Rare Metal Materials and Engineering*, 43, 0525-0529, 2014.

[11] Y. Lee and Y. Lo, "Highly Efficient Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell Based on Co-Sensitization of CdS/CdSe", *Adv. Funct. Mater.*, 19, 604–609, 2009.

[12] C. Justin Raj, S.N, K.V. Hemalatha, S.K. Kim, K. Prabakar, H. Kim, "Improved photovoltaic performance of CdSe/CdS/PbS quantum dot sensitized ZnO nanorod array solar cell", *Journal of Power Sources*, 248, 439-446, 2014.

[13] C. Cui, Y. Qiu, J. Zhao, B. Lu, H. Hu, Y. Yang, N. Ma, Sh. Xu, L. Xu, X. Li, "A comparative study on the quantum-dot-sensitized, dye-sensitized and co-sensitized solar cells based on hollow spheres embedded porous TiO_2 photoanodes", *Electrochimica Acta*, 173, 551-558, 2015.

- [14] M. Abdul Muthalif, Y. Lee, Ch.D. Sunesh, H. Kim, Y. Choe," Enhanced photovoltaic performance of quantum dot-sensitized solar cells with a progressive reduction of recombination using Cu-doped CdS quantum dots", Applied Surface Science, 396, 582-589, 2017.
- [15] L. Vesce, R. Riccitelli, G. Soscia, T. M. Brown, A.D. Carlo, A. Reale," Optimization of nanostructured Titania photoanodes for dye-sensitized solar cells: Study and experimentation of $TiCl_4$ treatment", Journal of Non-Crystalline Solids, 356, 1958-1961, 2010.
- [16] M. Marandi, S. Feshki, M. Naeimi Sani Sabet, Z. Anajafi and N.Taghavinia," Synthesis of TiO_2 hollow spheres using titanium tetraisopropoxide: Fabrication of high efficiency dye sensitized solar cells with photoanodes of different nanocrystalline TiO_2 sub-layers", RSC Advances, 4, 58064-58076, 2014.
- [17] M. Marandi, E. Rahmani, F. Ahangarani Farahani," Optimization of the Photoanode of CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells Using Light-Scattering TiO_2 Hollow Spheres", Journal of Electronic Materials, 1-15, 2017.
- [18] M. Adachi, M. Sakamoto, J. Jiu, Y. Ogata, S. Isoda," Determination of Parameters of Electron Transport in Dye-Sensitized Solar Cells Using Electrochemical Impedance Spectroscopy", Journal of Physics Chemistry B, 28, 13872-13880, 2006.



Investigation About the Effect of Hydrothermally TiO₂ Nanocrystal layer Diameter on Performance of CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cell

F. Ahangarani Farahani, M. Marandi*

Physics department, Faculty of Science, Arak University, Arak

Abstract: In this research two different diameter of TiO₂ nanocrystal layer were employed in quantum dot sensitized solar cells. Hydrothermally TiO₂ nanoparticles in different diameters 4 ± 0.5 and 10 ± 0.5 μm were deposited on FTO glass substrate as the photoanode scaffold. For sensitizing the photoanodes, CdS QDs were grown on the surface of photoanode through the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method. The results demonstrated that the maximum efficiency was achieved for the cell with a photoanode made of 6 cycles of CdS deposition on 10 μm layer of TiO₂ nanoparticles. The photovoltaic parameters of this cell were measured as Jsc of 6.93 mA/cm², Voc of 610 mv and energy conversion efficiency of 1.76%.

Keywords: TiO₂ nanoparticles, Hydrothermal method, Solar cell, CdS quantum dot.