

حساس سازی همزمان سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی متشکل از فوتوآند نانوبلوری TiO_2 با نانوذرات CdS و PbS و بررسی تأثیر نقاط کوانتومی PbS بر عملکرد سلول خورشیدی

فرزانه آهنگرانی فراهانی و مازیار مرندی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک

پست الکترونیکی: m-marandi@araku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰)

چکیده

در این مقاله از نقاط کوانتومی CdS و PbS به عنوان حساس کننده در سلول‌های خورشیدی نانوساختاری مبتنی بر TiO_2 استفاده شده است. نقاط کوانتومی PbS با شکاف انرژی در حدود ۰/۴۱ الکترون ولت تقریباً تمام گستره انرژی خورشید را می‌پوشاند، به همین دلیل استفاده از این نانوذرات در سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS باعث افزایش جذب نور خورشید می‌شود. نانوذرات TiO_2 تهیه شده به روش گرمایی به عنوان فوتوآند بر سطح زیرلایه شیشه/هادی شفاف جایگذاری می‌گردند. به منظور حساس سازی فوتوآند، نقاط کوانتومی PbS به روش جذب متوالی لایه‌های یونی و انجام واکنش (سیلار) بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. سپس نقاط کوانتومی CdS نیز به روش سیلار بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. نتایج نشان داد که سلول خورشیدی تهیه شده با حساس سازی فوتوآند با نقاط کوانتومی CdS در طی ۶ دوره لایه‌نشانی، نقاط کوانتومی PbS طی ۲ دوره لایه‌نشانی به دست می‌آید. این سلول خورشیدی دارای پارامترهای فوتوولتایی جریان مدار کوتاه J_{sc} ۱۰/۸۱ میلی آمپر/سانتی متر مربع، ولتاژ مدار باز V_{oc} ۵۹۰ میلی‌ولت و بازدهی تبدیل انرژی η ۲/۷۵±۰/۲٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی، نقاط کوانتومی PbS ، نانوذرات TiO_2

۱. مقدمه

اثر فوتوولتاییک به جریان الکتریسته تبدیل می‌کنند. سلول‌های خورشیدی در سه نسل دسته‌بندی می‌شوند. در این میان، نسل سوم سلول‌های خورشیدی شامل تمامی دستگاه‌های فوتوولتایی است که از انواع ساختارهای نانومتری استفاده می‌کنند. از مهمترین انواع این دسته از سلول‌های خورشیدی می‌توان به سلول‌های خورشیدی

محدود بودن منابع انرژی فسیلی و مشکلات ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضرورت توجه بیش از پیش به انرژی‌های تجدید پذیر را نمایان می‌سازد. از میان انرژی‌های تجدید پذیر انرژی خورشیدی یکی از بزرگترین منابع انرژی در جهان است. سلول‌های خورشیدی ابزاری هستند که نور خورشید را بر طبق

رنگدانه‌ای، پلیمری و نقاط کوانتومی اشاره کرد. ایده اولیه سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای توسط شخصی به نام گراتزل^۱ در سال ۱۹۹۱ مطرح شد [۱]. ساده بودن و هزینه پایین ساخت و بازدهی تبدیل انرژی مناسب این سلول‌ها در مقایسه با انواع دیگر سلول‌های خورشیدی از مهم‌ترین مشخصه‌های این نوع سلول‌هاست. در سال‌های اخیر سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده‌اند. نکته قابل توجه در مورد سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی، روند رو به رشد و سریع افزایش بازدهی این سلول‌ها در سال‌های اخیر می‌باشد که نقش مؤثری در افزایش میزان تحقیقات علمی در این زمینه داشته است. نانوذرات نیمه رسانا یا نقاط کوانتومی با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان، تحقیقات زیادی را در زمینه پیشرفت سلول‌های خورشیدی به خود جلب کرده‌اند. این ویژگی‌ها شامل، جذب اپتیکی وابسته به بزرگی نقاط کوانتومی، ضریب جذب بالا (در حدود مولار/سانتی‌متر 10^5-10^6) و تولید بیش از یک جفت الکترون-حفره در انرژی‌های بالا می‌باشد [۲ و ۳]. حساس سازی فیلم مزومتخلخل TiO_2 با استفاده از نقاط کوانتومی CdS [۴-۶]، CdSe [۷ و ۸] و PbS [۹-۱۱] گزارش شده است. نقاط کوانتومی به عنوان حساس کننده در سلول‌های خورشیدی به دو روش عمده شامل روش جذب متوالی لایه‌های یونی و انجام واکنش^۲ و روش لایه‌نشانی حمام شیمیایی^۳، سنتز می‌شوند [۱۲]. از میان این نقاط کوانتومی، نانوذرات CdS تنها نور مرئی با گستره انرژی بزرگتر از $2/4$ الکترون‌ولت را می‌تواند جذب کند [۱۳]. برای بر طرف کردن این موضوع، نانوذرات PbS به عنوان یک ماده مناسب در سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به کار گرفته می‌شود و با شکاف انرژی در حدود $0/41$ الکترون‌ولت تقریباً تمام گستره انرژی خورشید را می‌پوشاند [۱۴]. بنابراین ترکیب نانوذرات CdS به عنوان انتقال دهنده سریع الکترون‌ها با تحرک الکترونی^۴ در حدود 340 سانتی‌متر مربع/ولت ثانیه [۱۵] و همچنین نانوذرات PbS با گستره جذب نور وسیع می‌تواند بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی

حساس شده با نقاط کوانتومی را در پی داشته باشد. در این تحقیق تلاش می‌شود با استفاده از حساس سازی لایه نانو ساختاری TiO_2 با نقاط کوانتومی PbS و CdS و بهینه کردن ضخامت این لایه‌های حساس کننده بازدهی تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی مرتبط را افزایش داد. در ابتدا سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی ساخته و بهینه چرخه لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS به دست آورده می‌شود. سپس بهینه چرخه لایه‌نشانی CdS در ساخت سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS به کار گرفته می‌شود. در نهایت نشان داده می‌شود که بازدهی تبدیل انرژی به مقدار $0/2 \pm 0/2\%$ با حساس سازی فوتوآند متشکل از نانوذرات TiO_2 با نقاط کوانتومی CdS در ۶ چرخه لایه‌نشانی و نقاط کوانتومی PbS در ۲ چرخه لایه‌نشانی به دست می‌آید.

۲. روش آزمایش

ساخت سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی در چهار مرحله انجام می‌گیرد. این مراحل شامل آماده سازی فوتو الکتروود، آماده سازی الکتروود شمارنده، تهیه الکتروولت پلی سولفید و بستن سلول خورشیدی هستند. در این پژوهش از نقاط کوانتومی CdS و PbS به عنوان حساس کننده در سلول‌های خورشیدی نانو ساختاری TiO_2 استفاده می‌شود. عملیات بهترسازی^۵ با استفاده از TiCl_4 قبل از لایه‌نشانی بر سطح زیرلایه شیشه/هادی شفاف انجام می‌گیرد. نانوذرات TiO_2 به روش گرمایی و در یک محیط اسیدی تهیه می‌شود. برای سنتز نانوذرات TiO_2 ، $0/2$ 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 $0/26$ میلی‌لیتر اسید نیتریک به محلول رسوب سفید رنگ اضافه شده و فرآیند حرارت دهی به مدت ۷۵ دقیقه در دمای 80°C درجه انجام می‌گیرد. محلول به دست آمده پس از این مرحله لخته‌زدایی در اتوکلاو ریخته شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای 230°C درجه حرارت دهی می‌شود. نانوذرات TiO_2 تهیه شده

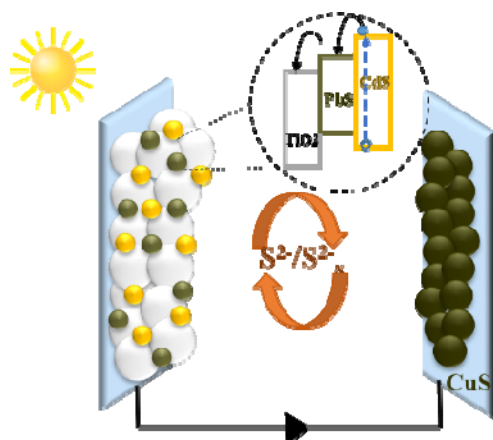
۱. Grätzel

۲. Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR)

۳. Chemical Bath Deposition (CBD)

۴. Electron mobility

۵. Post treatment

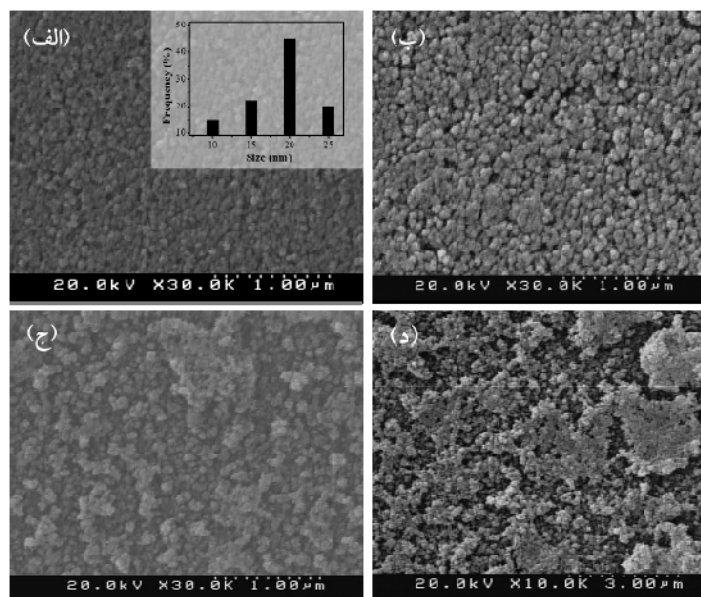


شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایی از شکاف انرژی و انتقال‌های الکترونی نقاط کوانتومی PbS و CdS در یک سلول خورشیدی.

CuS است. در این فرآیند نیز از روش لایه‌نشانی سیلار استفاده می‌شود. در ابتدا شیشه/هادی شفاف در محلول ۰/۵ مولار از $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ در اتانول به مدت یک دقیقه قرار می‌گیرد و با اتانول شستشو داده می‌شود. سپس زیرلایه به مدت یک دقیقه دیگر در محلول ۰/۵ 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 ۱ مولار از Na_2S ، ۰/۲ مولار از KCl و ۲ مولار از S در آب و اتانول به نسبت ۷/۳ تهیه می‌گردد.

شکل ۱ نمایی از شکاف انرژی نقاط کوانتومی PbS و CdS را در سلول خورشیدی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ و به منظور انتقال‌های بهتر الکترونی، برای ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS ابتدا نقاط کوانتومی PbS به روش سیلار بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. برای این منظور، ابتدا فوتوآند در محلول ۰/۰۲ مولار از $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ در آب یون زدایی شده به مدت ۳۰ ثانیه قرار می‌دهیم. سپس فوتوآند در آب یون‌زدایی شده کاملاً شسته شده و در محلول ۰/۰۲ مولار از Na_2S در آب یون‌زدایی شده به مدت ۳۰ ثانیه دیگر قرار می‌گیرد. در نهایت نیز شستشوی دوباره با آب یون‌زدایی شده انجام می‌گیرد. به منظور یافتن بهینه چرخه لایه‌نشانی این فرآیند در چرخه‌های ۱ تا ۳ ادامه پیدا می‌کند. در ادامه نقاط کوانتومی CdS در بهینه چرخه لایه‌نشانی بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شود. در این تحقیق تصاویر SEM با استفاده

در این مرحله پس از انجام فرآیند سانتیفریوژ 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 شده و در حمام آب ۴۰ درجه قرار می‌گیرد تا خمیر ۱۸٪ وزنی از نانوذرات آماده شود. در نهایت با استفاده از این خمیر یک لایه از این نانوذرات با ضخامت 10 ± 0.5 میکرومتر با استفاده از دو لایه چسب اسکاچ به عنوان فاصله‌دهنده به روش دکتر بلید بر روی شیشه هادی شفاف FTO (با مقاومت سطحی ۱۵ اهم بر سانتی‌مترمربع) لایه‌نشانی می‌شود [۱۶]. لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 لایه‌نشانی شده به صورت $\text{H}^+(2)$ نامگذاری و نام نقاط کوانتومی در ادامه آن آورده می‌شود. در ابتدا به منظور یافتن بهینه چرخه لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS، سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی ۴-۷ ساخته شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور حساس سازی فوتوآند در این سلول‌های خورشیدی، نقاط کوانتومی CdS به روش سیلار بر سطح فوتوآند رشد داده می‌شوند. در این فرآیند ابتدا فوتوآند را در محلول ۰/۱ مولار از $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ در متانول به مدت یک دقیقه قرار می‌دهیم. سپس فوتوآند را در متانول کاملاً شسته و در محلول ۰/۱ 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 [۱۷]. فرآیند بعدی، آماده‌سازی الکتروود شمارنده



شکل ۲. تصاویر SEM از سطح فوتوآندهای (الف) $H_1(2)$ ، (ب) $H_1(2)/PbS$ ، (ج) $H_1(2)/CdS$ و (د) $H_1(2)/PbS/CdS$. (هیستوگرام توزیع ذرات TiO_2 در ضمیمه شکل ۲ (الف) آورده شده است).

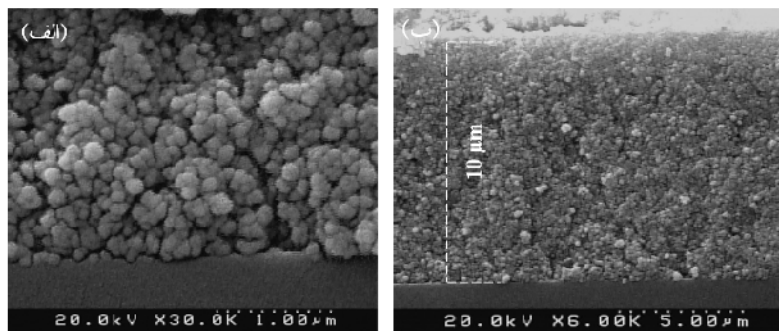
از میکروسکوپ الکترونی T-Scan گرفته شده است. طیفسنجی‌های اپتیکی با اسپکتروفتومتر Optizen Pop انجام گرفت. اندازه‌گیری‌های پراش پرتوی ایکس نیز با استفاده از دستگاه Philips Xpert-pro و توسط نمونه $Cu K\alpha$ (با طول موج ۱/۵۴ انگستروم) صورت گرفت. اندازه‌گیری مشخصه I-V سلول نهایی با سطح مؤثر ۰/۱۶ سانتی‌متر مربع با دستگاه Sharif Solar I-V (Tracer) و در شرایط تابش نور خورشید ۱/۵ Am (و توان ۱۰۰ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع) انجام شد. همچنین اندازه‌گیری‌های امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با دستگاه پتانسیو استات اتولب (Eco Chemie Autolab Potentiostat) انجام گرفت.

۳. نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر SEM از سطح فوتوآندهای $H_1(2)$ ، $H_1(2)/PbS$ ، $H_1(2)/CdS$ و $H_1(2)/PbS/CdS$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود، نانوذرات TiO_2 به‌طور کاملاً یکنواخت بر سطح زیرلایه رشد پیدا کردند و با توجه به هیستوگرام اندازه نانوذرات، نانوذرات TiO_2 کروی

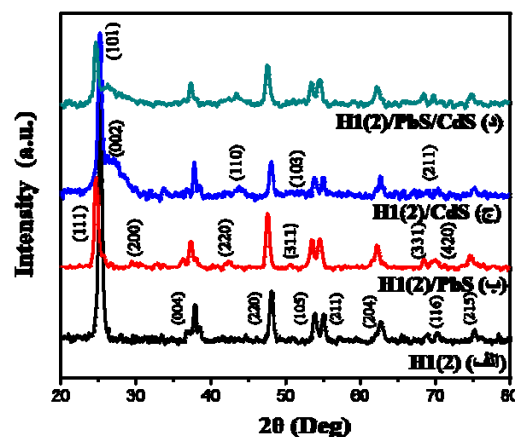
شکل دارای اندازه‌ای در حدود ۲۰ نانومتری می‌باشند. این تصویر همچنین نشان می‌دهد که سطح پوشیده با نانوذرات TiO_2 دارای تخلخل‌هایی نانومتری می‌باشد. شکل ۲ (ب) تصویر SEM از سطح نانوذرات PbS لایه‌نشانی شده بر سطح فوتوآند $H_1(2)$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این تصویر مشخص است، با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS بزرگی نانوذرات TiO_2 کمی افزایش یافته است که این نشان‌دهنده رشد نانوذرات PbS می‌باشد. همچنین با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS کمی از میزان تخلخل‌ها کاسته شده اما همچنان این تخلخل‌ها بر سطح فوتوآند دیده می‌شود. تصویر ۲ (ج) لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS بر سطح فوتوآند $H_1(2)$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این تصویر مشخص است، با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS سطح فوتوآند ناهموارتر شده است و این نشان‌دهنده شکل‌گیری نانوذرات CdS بر سطح فوتوآند $H_1(2)$ می‌باشد. شکل ۲ (د) نیز تصویر SEM از سطح فوتوآند $H_1(2)/PbS$ پس از لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS و ناهموار شدن سطح را نشان می‌دهد.

شکل ۳ تصاویر SEM از مقطع عرضی فوتوآند



شکل ۳. تصاویر SEM از مقطع عرضی فوتوآند $H1(2)/PbS/CdS$ در بزرگنماییهای مختلف.

مکانهای 25.3° ، 37.8° ، 48.2° ، 53.9° ، 55.1° ، 62.7° ، 68.7° و 75° قرار دارند. این قلههای پراش براساس پوشه JCPDS شماره ۷۱/۱۱۶۷ متعلق به دسته صفحات (۱۰۱)، (۰۰۴)، (۲۲۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۲۰۴)، (۱۱۶) و (۲۱۵) فاز بلوری آناتاز تیتانیوم دی اکسید می باشند. همان طور که در شکل ۴ (ب) دیده می شود علاوه بر قلههای پراش پرتوی ایکس که متعلق به نانوذرات TiO_2 با فاز بلوری آناتاز هستند، قلههای دیگری در مکانهای 24.6° ، 30.1° ، 43° ، 51.02° ، 68.95° و 71° قرار دارند. این قلههای پراش بر اساس پوشه ICSD شماره ۷۸۱۹۰۱، متعلق به دسته صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۳۳۱) و (۴۲۰) ساختار مکعبی^۱ نانوبلورهای PbS می باشند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که به روش سیلار نانوبلورهای PbS بر سطح نانوذرات TiO_2 جایگذاری شده اند. شکل ۴ (ج) طیف پراش پرتوی ایکس مربوط به نانوذرات CdS می باشد که دارای قلههایی در مکانهای 26.65° ، 43.98° ، 52.25° و 70.38° می باشد که متعلق به دسته صفحات (۰۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۲۱۱) ساختار هگزاگونال^۲ نانوبلورهای CdS می باشند. شکل ۴ (د) نیز علاوه بر قلههای مربوط به نانوذرات CdS، قلههای مربوط به نانوذرات PbS را نیز نشان می دهد. شکل ۵ منحنیهای عبور اپتیکی (الف) فوتوآندهای $H1(2)/CdS$ در چرخه های لایه نشانی ۴-۷ و (ب) فوتوآندهای $H1(2)/PbS/CdS$ در چرخه های لایه نشانی ۱-۳ نقاط کوانتومی PbS و چرخه ۶ لایه نشانی نقاط کوانتومی CdS را نشان



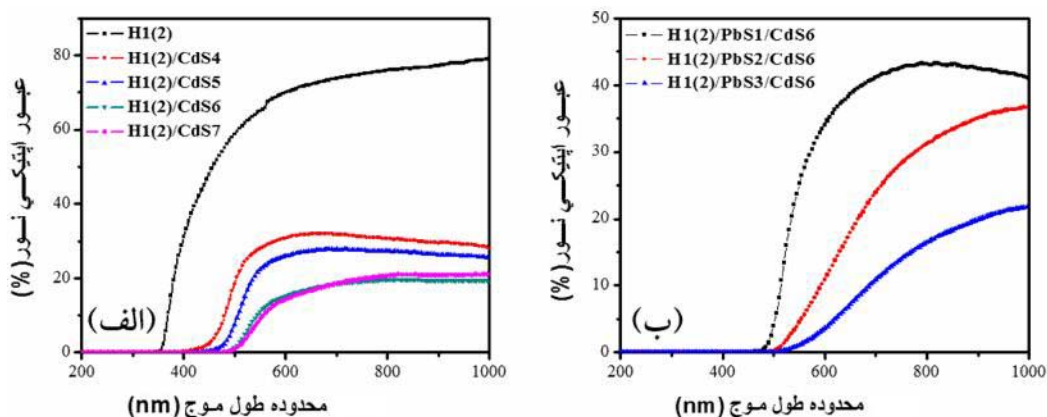
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف پراش پرتوی ایکس تهیه شده از فوتوآندهای (الف) $H1(2)$ ، (ب) $H1(2)/PbS$ ، (ج) $H1(2)/PbS/CdS$ و (د) $H1(2)/CdS$.

$H1(2)/PbS/CdS$ را نشان می دهد. در این تصاویر نیز شکل گیری نقاط کوانتومی بر سطح فوتوآند به وضوح دیده می شود. افزایش بزرگی نانوذرات و همچنین کاهش میزان تخلخل ها نیز در این تصاویر مشخص است. همچنین با توجه به شکل ۳ (ب) یک لایه از نانوذرات CdS و PbS بر سطح کل و در کل ضخامت می نشیند و یک ضخامت مجزا بر سطح لایه TiO_2 نخواهیم داشت و بنابراین ضخامت فوتوآند $H1(2)/PbS/CdS$ در این حالت حدود 10 ± 0.5 میکرومتر می باشد.

شکل ۴ (الف)، (ب)، (ج) و (د) طیفهای پراش پرتوی ایکس تهیه شده از فوتوآندهای $H1(2)$ ، $H1(2)/PbS$ ، $H1(2)/PbS/CdS$ و $H1(2)/CdS$ را نشان می دهد. بر طبق نتایج به دست آمده قلههای پراش پرتوی ایکس، طیف (الف) در

۱. Cubic

۲. Hexagonal

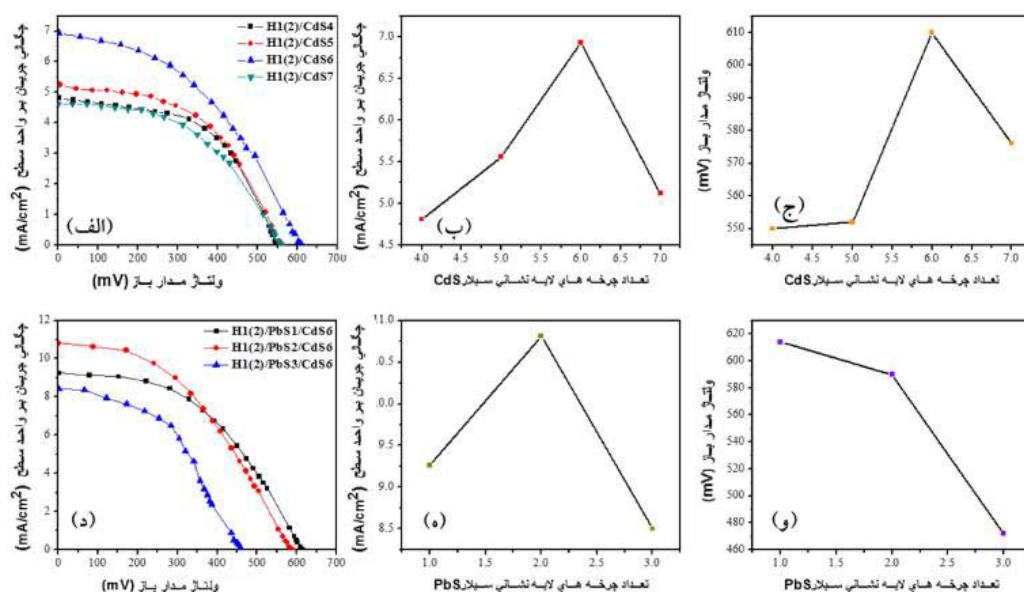


شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی‌های عبور اپتیکی فوتوآندهای (الف) $H1(2)/CdS$ در چرخه‌های لایه‌نشانی ۴ تا ۷ نقاط کوانتومی CdS و (ب) $H1(2)/PbS/CdS$ در چرخه‌های ۱-۳ لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS و چرخه ۶ لایه‌نشانی نانوذرات CdS .

در این وضعیت می‌توان دید که در چرخه ۳ لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS لبه جذب اپتیکی به طول موج‌هایی در حدود ۷۰۰ نانومتر افزایش داشته است. این افزایش لبه جذب نسبت به نقاط کوانتومی CdS منطبق بر شکاف انرژی نانوذرات PbS (در حدود ۰/۴۱ الکترون ولت) می‌باشد.

شکل ۶ (الف) منحنی‌های جریان-ولتاژ فوتوآندهای $H1(2)/CdS$ در چرخه‌های مختلف نقاط کوانتومی CdS را نشان می‌دهد. مشخصات فوتوولتائیک مربوط به این سلول‌ها در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به شکل، با افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS هم جریان و هم ولتاژ افزایش می‌یابد. شکل ۶ (ب) و (ج) منحنی‌های تغییرات جریان و ولتاژ را به طور جداگانه نسبت به تعداد چرخه‌های سیلار نقاط کوانتومی CdS نشان می‌دهد. همان طور که در این منحنی‌ها نیز مشخص است، با افزایش تعداد چرخه‌ها هم جریان و هم ولتاژ و به دنبال آن نیز بازدهی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این منحنی‌ها بهینه چرخه لایه‌نشانی در چرخه ۶ می‌باشد. بعد از این چرخه لایه‌نشانی، هم جریان و هم ولتاژ کاهش می‌یابد و این به علت افزایش میزان نقاط کوانتومی و جاذب‌های نوری بر سطح فوتوآند می‌باشد که مانع از نفوذ الکتروولت به داخل نانوذرات TiO_2 می‌شود. در ادامه با توجه با این داده‌ها، تنها بهینه چرخه لایه‌نشانی نانوذرات CdS ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی

می‌دهد. همان طور که از شکل ۵ (الف) مشخص است، لایه متشکل از نانوذرات TiO_2 از شفافیت بالایی برخوردار است و در حدود ۸۰٪ نور را از خود عبور می‌دهد و دارای لبه جذبی در حدود ۳۵۰ نانومتر می‌باشد. با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی CdS بر سطح فوتوآند، میزان عبور نور کاهش یافته است و این نشان دهنده جذب نور توسط نقاط کوانتومی CdS می‌باشد. همچنین با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی لبه جذب به سمت طول موج‌های بزرگتر جابه‌جایی داشته است که این جابه‌جایی لبه جذب نشان دهنده جذب نور توسط لایه نانوذرات CdS و منطبق بر شکاف انرژی (در حدود ۲/۵ الکترون ولت) آن هاست. با افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی از ۴ به ۷ چرخه، میزان جذب نور نیز افزایش یافته است و لبه جذب در محدوده ۵۵۰-۴۵۰ نانومتر جابه‌جایی داشته است. شکل ۵ (ب) منحنی‌های عبور اپتیکی مربوط به فوتوآند‌های $H1(2)/PbS/CdS$ در چرخه‌های لایه‌نشانی ۱-۳ نقاط کوانتومی PbS و بهینه چرخه لایه‌نشانی نانوذرات CdS یعنی ۶ چرخه را نشان می‌دهد. با مقایسه این منحنی و منحنی (الف) و با توجه به جذب بیشتر نور توسط نقاط کوانتومی PbS میزان عبور نور نسبت به نمونه $H1(2)/CdS$ کاهش یافته است. همچنین این منحنی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی PbS میزان جذب نور نیز افزایش یافته است و لبه جذب به سمت طول موج‌های بزرگتر جابه‌جایی داشته است.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی‌های جریان-ولتاژ فوتوآندهای (الف) $H1(2)/CdS$ در چرخه‌های ۴ تا ۷ نقاط کوانتومی CdS و (د) $H1(2)/PbS/CdS$ در چرخه‌های ۱-۳ نقاط کوانتومی PbS و منحنی‌های تغییرات جریان و ولتاژ نسبت به چرخه‌های مختلف (ب) و (ج) نقاط کوانتومی CdS ، (ه) و (و) نقاط کوانتومی PbS .

جدول ۱. مشخصات فوتوولتاییک سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS در تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی ۴ تا ۷.

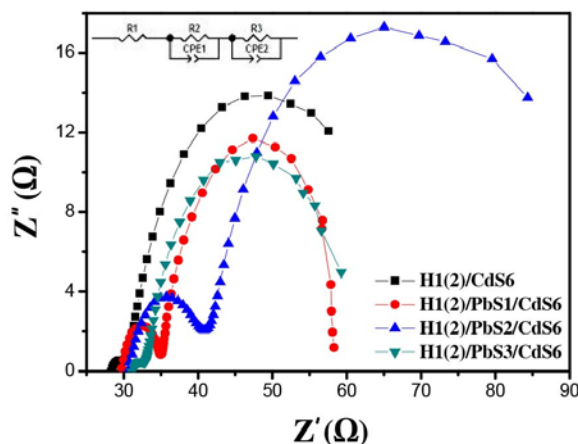
فوتوآند	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
$H1(2)/CdS4$	۴٫۸۱	۵۵۰	۰٫۵۳	$۱٫۴ \pm ۰٫۲$
$H1(2)/CdS5$	۵٫۵۶	۵۵۲	۰٫۵	$۱٫۵ \pm ۰٫۲$
$H1(2)/CdS6$	۶٫۹۳	۶۱۰	۰٫۴۲	$۱٫۸ \pm ۰٫۲$
$H1(2)/CdS7$	۵٫۱۲	۵۷۶	۰٫۴۸	$۱٫۴ \pm ۰٫۲$

جدول ۲. مشخصات فوتوولتاییک سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS در تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی ۱-۳ نقاط کوانتومی PbS .

فوتوآند	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
$H1(2)/PbS1/CdS6$	۹٫۲۶	۶۱۴	۰٫۴۳	$۲٫۶ \pm ۰٫۲$
$H1(2)/PbS2/CdS6$	۱۰٫۸۱	۵۹۰	۰٫۴۶	$۲٫۷ \pm ۰٫۲$
$H1(2)/PbS3/CdS6$	۸٫۵	۴۷۲	۰٫۴۷	$۱٫۸ \pm ۰٫۲$

هم ولتاژ افزایش می‌یابد. شکل (ه) و (و) نیز منحنی‌های تغییرات جریان و ولتاژ را به طور جداگانه بر حسب تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی نانوذرات PbS نشان می‌دهد. همان طور که در این منحنی‌ها نیز مشخص است، افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی، افزایش جریان و ولتاژ و به دنبال آن افزایش بازدهی را در پی دارد. بهینه چرخه لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS در چرخه ۲ لایه‌نشانی می‌باشد و بعد از آن با افزایش تراکم سطحی جاذب‌های نوری و افزایش احتمال بازترکیب

PbS/CdS به کار گرفته می‌شود. شکل ۶ (د) منحنی‌های ساخت سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS به کار گرفته می‌شود. شکل ۶ (د) منحنی‌های جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS در چرخه‌های ۱-۳ لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS را نشان می‌دهد. مشخصات فوتوولتاییک مربوط به این سلول‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این منحنی‌ها، با افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS هم جریان و



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی‌های نیکوئست سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS و PbS/CdS.

جدول ۳. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از نرم‌افزار z-view برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS و PbS/CdS.

فوت‌آند	$R_s (\Omega)$	$R_{ct} (\Omega)$	$C_\mu (\mu F)$	$\tau_{eff} (ms)$
H1(2)/CdS6	۲۹	۳۵	۲۵۰	۹
H1(2)/PbS1/CdS6	۳۰	۲۵	۳۴۰	۱۰
H1(2)/PbS2/CdS6	۳۰	۴۵	۳۹۰	۱۸
H1(2)/PbS3/CdS6	۳۱	۲۹	۲۴۰	۸

بهترین حالت حدود ۵۵ درصد نسبت به سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS افزایش یافته است که این افزایش بازدهی ناشی از افزایش جذب نور و به دنبال آن افزایش جریان تولید شده می‌باشد. شکل ۷ نتایج آنالیز طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) را برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS و PbS/CdS را نشان می‌دهد. مدار معادلی که برای سلول خورشیدی در نظر گرفته شده است در ضمیمه شکل ۷ نشان داده شده است. آنالیز EIS برای بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی سلول‌های خورشیدی به کار گرفته می‌شود. این آنالیز به بررسی فرآیندهای مختلف در فصل مشترک آند و الکترولیت و همچنین کاتد و الکترولیت می‌پردازد. مدار معادلی با توجه به تبادل الکترون‌ها در این فصل مشترک‌ها در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مختلفی از این مدل‌سازی استخراج می‌شود که شامل مقاومت سری سلول (R_s)، طول عمر الکترون (τ_{eff})، تفاوت انتقال بار در فصل مشترک TiO_2

الکترون‌ها، هم جریان و هم ولتاژ کاهش می‌یابد. جدول ۱ مشخصات فوتولتاییک مربوط به سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS را نشان می‌دهد. با توجه به این داده‌ها، بیشترین بازدهی مربوط به سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با ۶ چرخه لایه‌نشانی سیلار و برابر $0.2 \pm 0.1\%$ می‌باشد. در این سلول خورشیدی جریان اتصال کوتاه ۶/۹۳ میلی‌آمپر/سانتی‌متر مربع و ولتاژ مدار باز آن ۶۱۰ میلی‌ولت است. جدول ۲ مشخصات فوتولتاییک مربوط به سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS را نشان می‌دهد. با توجه به این داده‌ها، بیشترین بازدهی برابر $0.2 \pm 0.2\%$ و مربوط به فوت‌آند H1(2)/PbS/CdS است که نقاط کوانتومی PbS و CdS طی ۲ و ۶ چرخه لایه‌نشانی شده‌اند. در این حالت، جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی برابر 10.81 میلی‌آمپر/سانتی‌متر مربع و ولتاژ مدار باز آن برابر ۵۹۰ میلی‌ولت است. بازدهی سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS در

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، لایه‌ای از نانوذرات TiO_2 تهیه شده به روش هایدروترومال با ضخامت 10 ± 0.5 میکرومتر بر سطح زیر لایه شیشه/ هادی شفاف FTO تهیه شد. سپس حساس سازی فوتوآند با نقاط کوانتومی CdS و PbS انجام گرفت. بر اساس نتایج طیف‌سنجی‌های اپتیکی لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS باعث بهبود فرآیند جذب نور می‌شود. همچنین نتایج آنالیزهای فوتوولتایی نشان داد که بازدهی سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS/CdS در بهترین حالت به میزان ۵۵ درصد نسبت به سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdS افزایش یافته است. این سلول خورشیدی دارای چگالی جریان 10.81 میلی‌آمپر/ سانتی‌متر مربع، ولتاژ مدار باز 0.59 میلی‌ولت و بازدهی تبدیل انرژی $2.7 \pm 0.2\%$ بود. با توجه به نتایج آنالیز EIS، با لایه‌نشانی نقاط کوانتومی PbS بر سطح فوتوآند، میزان C_{μ} به مقدار 390 میکروفاراد افزایش می‌یافت که این نشان دهنده افزایش میزان بار الکتریکی در لایه فوتوآند و همچنین افزایش انتقالات الکترونی است. همچنین طول عمر حامل‌های بار در بهترین سلول با فوتوآند $\text{H}1(2)/\text{PbS}2/\text{CdS}6$ برابر 18 میلی‌ثانیه بود.

الکتروولت (R_{ct}) و ظرفیت شیمیایی فوتوآند (C_{μ}) می‌باشد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی داده‌های تجربی با استفاده نرم‌افزار z-view در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این نتایج، ظرفیت شیمیایی فوتوآند $\text{H}1(2)/\text{CdS}$ برابر 250 میکروفاراد و طول عمر الکترون آن نیز 9 میلی‌ثانیه می‌باشد. بر طبق این نتایج و همان طور که در مقدمه آورده شد، جذب نور نقاط کوانتومی PbS نسبت به نانوذرات CdS بیشتر است. به همین دلیل با افزایش جذب نور، ظرفیت شیمیایی فوتوآند نیز برای ساختار $\text{H}1(2)/\text{PbS}/\text{CdS}$ نسبت به ساختار فوتوآند $\text{H}1(2)/\text{CdS}$ افزایش یافته و به مقدار 390 میکروفاراد رسیده است. هرچه C_{μ} زیادتر باشد یا به عبارتی بار الکتریکی بیشتر باشد، الکترون بیشتر و سریع‌تر به نوار رسانش TiO_2 می‌رسد. طول عمر الکترون نیز در فوتوآند $\text{H}1(2)/\text{PbS}2/\text{CdS}6$ افزایش یافته است. از طرفی با افزایش تعداد چرخه‌های لایه‌نشانی به ۳، امکان باز ترکیب و از بین رفتن الکترون در ساختار فوتوآند نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل در فوتوآند $\text{H}1(2)/\text{PbS}3/\text{CdS}6$ طول عمر الکترون به مقدار 8 میلی‌ثانیه کاهش یافته است.

مراجع

- Meng, *Electrochemistry Communications* **20** (2012) 97.
- V. González-Pedro, C Sima, G Marzari, P P Boix, S Giménez, Q Shen, T Dittrich, and I Mora-Seróe, *Physical Chemistry Chemical Physics* **15** (2013) 4283
- S R hle, M Shalom, and A Zaban, *Chem. Phys. Chem.* **11** (2010) 2290.
- Y Zhu, R Wang, W Zhang, and H Ge, *Applied Surface Science* **315** (2014) 149.
- S Acharya, B Das, U Thupakula, K Ariga, D D Sarma, J Israelachvili, and Y Golan, *Nano Lett.* **13** (2013) 409.
- D Dimitrakopoulos and R L Malenfant, *Advanced Materials* **14** (2002) 99.
- M Marandi, S Feshki, M Naeimi Sani Sabet, Z Anajafia, and N Taghavinia, *RSC Advances* **4** (2014) 58064.
- R Zhou, Q Zhang, E Uchaker, J Lan, M Yin, and G Cao, *Journal of Materials Chemistry A* **2** (2014) 2517.
- B O'Regan and M Grätzel, *Nature* **353** (1991) 353.
- R Ross and A Nozik, *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 3813.
- A Nozik, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **52** (2001) 193.
- M Eskandari, V Ahmadi, M Yousefi Rad, and S Kohnepoushi, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **14** (2014) 1386.
- J Kim, H Choi, CH Nahm, J Moon, CH Kim, S Nam, D R Jung, and B Park, *Journal of Power Sources* **196** (2011) 10526.
- Y Zhang Shen, L Wei Zhang, Y Zhang Fuyuan, Q Shuyao Wu, Q Ting Feng, and X Ming Song, *Electrochimica Acta* **150** (2014) 167.
- H Shang Rao, W QiangWu, Y Liu, Y F Xu, B X Chen, H Y Chen, D B Kuang, and C Y Su, *Nano Energy* **8** (2014) 1.
- Y Lai, Z Lin, D Zheng, L Chi, R Du, and C Lin, *Electrochimica Acta* **79** (2012) 175.
- J W Lee, D Y Son, T K Ahn, H W Shin, Y Kim, S Hwang, M Ko, S Sul, H Han, N G Park, *Scientific Reports* **3** (2013) 1050.
- N Zhou, G Chen, X Zhang, L Cheng, Y Luo, D Li, Q