

محدود کردن فرایند بازترکیب در سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقطه کوانتومی PbS با استفاده از تعداد چرخه‌های مختلف پوشش دهی لایه‌های ZnS

مسعود مهرابی^۱ و سعید بیگ‌زاده^۲

۱. دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه

۲. گروه اپتیک و لیزر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب

پست الکترونیکی: masood.mehrabian@maragheh.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷)

چکیده

بازده تبدیل نسبتاً کم انرژی (PCE) سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی (QDSSCs) به بازترکیب بار در سطوح مشترک مربوط می‌شود. فرایند بازترکیب بار را می‌توان با پوشاندن لایه نقطه کوانتومی با یک نیمه‌هادی شکاف پهن مانند ZnS، که به عنوان یک لایه مسدود کننده بین QD ها و مواد انتقال حفره (HTM) عمل می‌کند، متوقف کرد. در مطالعه حاضر، برای بهبود PCE از سلول‌های خورشیدی حساس به نقطه کوانتومی PbS، لایه مسدود کننده ZnS بر روی (QDs) PbS با استفاده از روش جذب و واکنش متوالی لایه یونی (SILAR) در دمای اتاق و فشار محیط، با موفقیت ساخته شد. اثر ضخامت لایه ZnS بر خواص فتوولتائیک با تغییر تعداد چرخه‌های پوشش دهی (n) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که لایه مسدود کننده ZnS عملکرد فتوولتائیکی QDSSC های PbS را با جلوگیری از فرایند بازترکیب بار بهبود می‌بخشد. سلول خورشیدی حاوی ZnS با $n=6$ لایه برای ضرایب چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، عامل پرشدگی (FF) و PCE، به ترتیب مقادیر بیشینه $11/11 \text{ mA.cm}^{-2}$ ، $60/37\%$ و $3/93\%$ را نشان داد. ما دلایل این بهبود را کشف کرده و نشان دادیم که این امر بخاطر کاهش بازترکیب الکترون‌های تزریق شده نوری با حفره‌های HTM میسر شده است. اثر چرخه‌های پوشش دهی توسط طیف UV-Vis و تحلیل چگالی جریان-ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت

واژه‌های کلیدی: لایه مسدود کننده ZnS، نقاط کوانتومی، بازترکیب بار، عملکرد فتوولتائیکی

۱. مقدمه

مانند سلول‌های خورشیدی، آشکارسازهای مادون قرمز، دستگاه‌های الکترونیکی و سوئیچ‌های نوری دارد [۱ و ۲]. شکاف نواری مستقیم و باریک PbS آن را یک ماده جاذب نوبدبخش برای بسیاری از سلول‌های فتوولتائیک بسیار کارآمد

سولفید سرب PbS یک ترکیب غیرآلی (معدنی) گروه IV-VI با شکاف نواری باریک $0/41 \text{ eV}$ و شعاع بوهراکسیونی بزرگ ۱۸ نانومتری است که کاربردهای زیادی در بسیاری از زمینه‌ها

می‌سازد [۳ و ۴]. به عنوان یکی از سلول‌های فتوولتائیک کم هزینه نسل جدید، سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقطه کوانتومی (QDSSCs) توجه زیادی را جلب کرده‌اند، زیرا شکاف نواری آنها می‌تواند با کنترل اندازه نقاط تنظیم شود [۵ و ۶].

با این حال، بازده تبدیل انرژی (PCE) QDSSC های PbS، با وجود پتانسیل مورد انتظار برای افزایش کارایی تبدیل انرژی خورشیدی، همچنان پایین است. یکی از دلایل این کارایی ضعیف، ناشی از فرایند انتقال بار است. انتقال الکترون در فصل مشترک در QDSSC ها یک فرایند کلیدی است که PCE را تعیین می‌کند و اغلب از بازترکیب بار متأثر می‌شود [۷]. به منظور کاهش بازترکیب بار و بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی، استفاده از یک لایه مسدود کننده توسط دیگران پیشنهاد شده است [۸ و ۹]. PCE سلول‌های خورشیدی با اصلاح لایه مسدود کننده ZnS توسط ها و همکاران بهبود یافت [۸]. خواص نوری و الکترونیکی نقاط کوانتومی توسط آلایش با یون فلز انتقالی Mn^{2+} توسط راج و همکاران بهبود یافته است [۹]. سولفید روی ZnS یک ترکیب مهم معدنی نیمه‌هادی II-VI و یک گزینه بسیار جذاب به عنوان لایه مسدود کننده در سلول‌های فتوولتائیک است. این ماده یک شکاف نواری مستقیم پهن (۳/۷ eV) در حالت توده و در دمای K ۳۰۰ دارد که پهنای آن از ناحیه مرئی تا IR نزدیک است و در دو شکل اصلی بلوری مکعبی و شش ضلعی وجود دارد [۱۰].

در کار قبلی ما QDSSC (n) - PbS ساخته شد و اثر تعداد چرخه‌های پوشش دهی n در عملکرد فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. بیشینه بازده تبدیل انرژی ۳/۴۸ درصد برای سلول خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی (۳) PbS به دست آمد [۱۱].

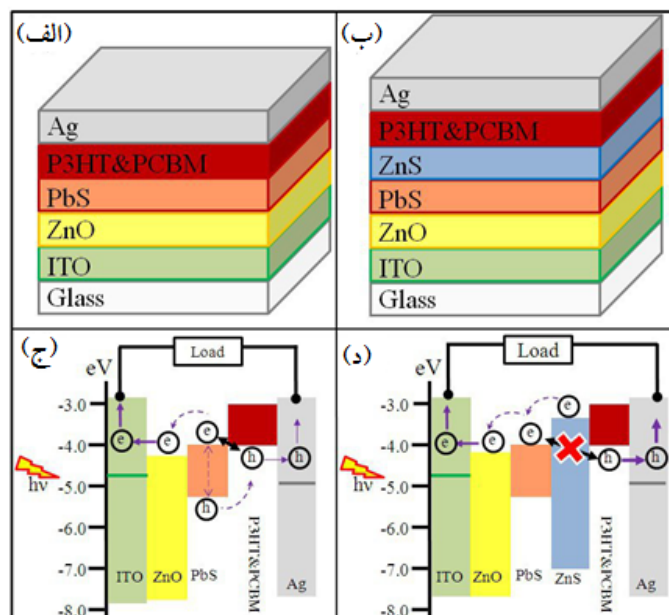
در این مطالعه یک لایه نازک از نقاط کوانتومی (۳) PbS بر روی زیر لایه‌های ZnO / ITO با استفاده از فرایند چرخشی جذب و واکنش متوالی لایه یونی (Spin-SILAR) لایه‌نشانی می‌شود که به عنوان روشی متداول، ساده، سریع و مناسب برای رسوب سولفیدهای فلزی برای تولید در مقیاس بزرگ در نظر

گرفته شده است. سپس با لایه‌نشانی لایه نیمه‌هادی ZnS بر روی نقاط کوانتومی PbS با استفاده از روش SILAR با تعداد چرخه‌های متفاوت پوشش دهی می‌توان از بازترکیب بار ممانعت کرده و به سلول‌های خورشیدی با کارایی بالا رسید. یک لایه پلیمری متشکل از پلی (۳-هگزیل تیوفن) و فیل-۶۱-C-استر متیل اسید بوتیریک P-HT,PCBM روی لایه ZnS به عنوان لایه انتقال حفره HTM لایه‌نشانی شد. سلول با یک لایه نقره‌ای به عنوان الکترود شمارنده (CE) تکمیل شد. ساختار اساسی سلول‌های خورشیدی مورد نظر با و بدون لایه مسدود کننده ZnS و نیز نمودارهای سطوح انرژی لایه‌های سازنده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲. روش‌های تجربی

۲.۱. ساخت PbS حساس شده با فوتوآند اکسید روی

لایه اکسید رسانای شفاف اکسید ایندیوم آلاینده به قلع (ITO) به عنوان زیرلایه استفاده می‌شود. یک لایه ZnO با ضخامت ۷۰ نانومتر به عنوان مواد انتقال الکترون (ETM) بر روی بستر ITO با سرعت چرخش ۴۵۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۳۰ ثانیه با روش پوشش دهی چرخشی ایجاد شد. به منظور حذف گونه‌های آلی در لایه‌های ZnO، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تبلور لایه‌ها و تبخیر بقایای مواد آلی بازپخت انجام گرفت. لایه نقطه کوانتومی PbS نانوبلورین با استفاده از روش چرخشی SILAR به روی لایه ZnO واقع بر روی زیرلایه ITO لایه‌نشانی شد. برای این منظور نیترات سرب $(NO_3)_2$ و سولفید سدیم Na_2S به ترتیب به عنوان منابع کاتیونی و آنیونی Pb^{2+} و S^{2-} مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار مناسبی از محلول نیترات سرب بر روی لایه ZnO ریخته شده و به مدت ۳۰ ثانیه در ۴۵۰۰ دور در دقیقه تحت پوشش دهی چرخشی قرار گرفت. سپس، همان مقدار محلول سولفید سدیم بر روی لایه ریخته و در همان شرایط پوشش دهی چرخشی انجام یافت. این روش دو مرحله‌ای یک چرخه سیلار (SILAR) را تشکیل می‌دهد. لایه نقاط کوانتومی



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایش طرح وار ساختار و سطوح انرژی PbS QDSSC، (الف) و (ج) بدون، (ب) و (د) با لایه مسدود کننده ZnS. نمودارهای انرژی (ج) و (د) فرایندهای اصلی الکترونیکی را در فصل مشترک و مسیر بازترکیب در سلول را نشان می‌دهند که توسط لایه ZnS مسدود می‌شود.

رسوب‌دهی کنترل شود. نمونه‌ها n بار تحت چرخه پوشش دهی سیلار قرار می‌گیرند و برای راحتی نمونه‌ها به صورت ZnS(n) نامگذاری می‌شوند.

PbS پس از تکرار چرخه‌های پوشش‌دهی تا سه بار تشکیل شد. در نهایت، آندهای نوری (فوتوآندهای) ساخته شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت باز پخت شدند.

۳.۲. ساخت QDSSC های PbS

برای رسوب‌دهی یک لایه پلیمری از P3HT و PCBM روی لایه ZnS لایه‌نشانی پوششی در سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۵۰ ثانیه در محیط نیتروژن انجام گرفت. در نهایت، یک الکتروود نقره‌ای با ضخامت ۱۰۰ نانومتر (CE) در بالای لایه پلیمری از طریق تبخیر خلاء در یک اتاقک خلاء بالا (فشار $10^{-6} \times 4$ میلی‌بار) رسوب‌دهی شد. سطح مؤثر سلول PbS QDSSC، ۶ میلی‌متر مربع بود.

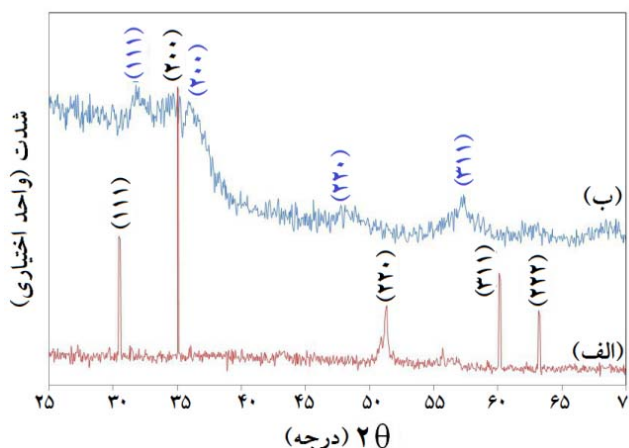
۳. نتایج و بحث

شکل ۲ الگوهای XRD به دست آمده از لایه‌های PbS و ZnS را نشان می‌دهد، که توسط پراش سنخ پرتوی ایکس (۴۰ کیلوولت و

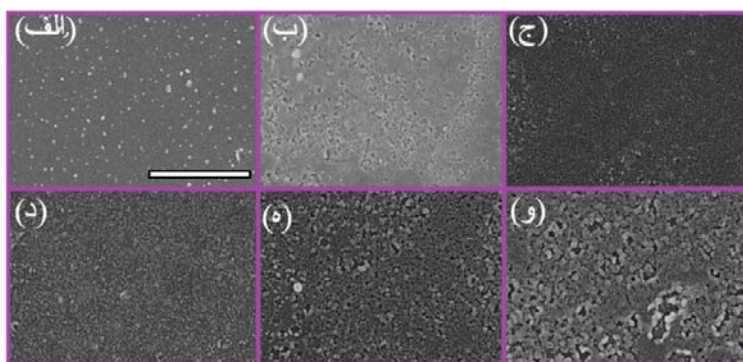
۲.۲. ساخت لایه مسدود کننده ZnS بر روی سطح

نقاط کوانتومی PbS

لایه ZnS با استفاده از روش SILAR روی لایه QD PbS لایه‌نشانی شد. استات دی‌هیدرات روی و سولفید سدیم به ترتیب به عنوان منابع Zn^{+2} و S^{-2} (کاتیونی و آنیونی) استفاده شدند. برای قرار دادن یک لایه مسدود کننده ZnS، ۵۰ میکرولیتر از محلول کاتیونی بر روی زیرلایه ریخته و لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۴۵۰ دور بر دقیقه و به مدت ۳۰ ثانیه انجام یافت. سپس همان مقدار محلول آنیونی بر روی لایه ریخته و طبق همان شرایط (سرعت ۴۵۰ دور بر دقیقه و به مدت ۳۰ ثانیه) لایه‌نشانی چرخشی انجام یافت. ضخامت لایه ZnS می‌تواند با کنترل تعداد چرخه‌های



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) الگوی پراش پرتوی ایکس؛ (الف) $\text{PbS}(3)$ و (ب) $\text{ZnS}(6)$.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصاویر SEM از لایه $\text{ZnS}(n)$ رسوب داده شده بر روی زیرلایه $\text{PbS}(3)$ ، با تعداد چرخه پوشش‌دهی (الف) $n=0$ ، (ب) $n=2$ ، (ج) $n=4$ ، (د) $n=6$ ، (ه) $n=8$ و (و) $n=10$. نوار مقیاس: ۱ میکرومتر.

دیگر توافق خوبی دارند [۱۴ و ۱۵]. این قله پراکندگی با استفاده از داده‌های JCPDS (کد مرجع: ۰۰۸۰-۰۰۲۰) برای ZnS شناسایی شد. برآمدگی پهن مرکزی به دلیل بستر شیشه‌ای بی‌ریخت است. ثابت‌های شبکه ساختار مکعبی ZnS با $a = b = c = 5.345 \text{ \AA}$ برابر است. شکل ۳ تصاویر گرفته شده از نمای بالایی فوتوآندهای $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) را نشان می‌دهد که برای ۸ و ۶ و ۴ و ۲ و ۰ نشان داده شده است.

شکل ۳ (الف) لایه QD PbS را که با سه دوره رسوب‌دهی $\text{PbS}(3)$ به دست می‌آید نشان می‌دهد. هنگامی که لایه مسدود کننده ZnS روی سطح PbS می‌نشیند پوشش کم با دو دوره پوشش‌دهی به دست می‌آید، همان‌طور که در شکل ۳ (ب)

۴۰ میلی‌آمپر) Philips (X'Pert Pro MPD) اندازه‌گیری شده‌اند. تابش‌های $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5404 \text{ \AA}$) در محدوده 2θ از ۲۵ تا ۷۰ درجه است. در الگوی XRD معمولی $\text{PbS}(3)$ ، در شکل ۲ (الف) پنج قله پراکنده اصلی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) در 30° ، 35° ، 50° ، 60° و 63° به ترتیب نشان داده شده است. این قله‌ها با صفحات بلوری فاز مکعبی PbS مرتبط هستند. این داده‌ها با گزارش‌های دیگران توافق خوبی دارند [۱۲ و ۱۳].

الگوی پراش $\text{ZnS}(6)$ در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. تمام قله‌های اصلی پراکندگی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) در 28.9° ، 33.5° ، 48.1° و 57.1° با بازتاب‌های فاز اسفالریت (فاز سولفید روی مکعب) ZnS و با گزارش‌های

و (و)). این تجمع منجر به تشکیل مراکز پراکندگی بیشتری می‌شود و جذب نور فرودی را کاهش می‌دهد. عبور نور از لایه‌های $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ در محدوده $300-600$ نانومتر در شکل ۵ نمایش داده شده است. عبور اپتیکی لایه با $n=0, 2, 4, 6, 8$ و 10 به ترتیب $89, 88, 87, 85, 87$ و 88 درصد است.

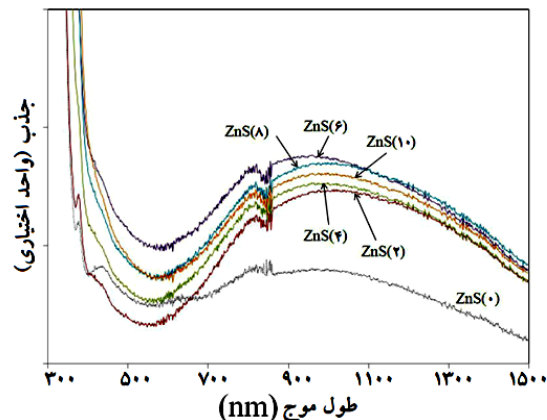
از آنجایی که ZnS یک نیم‌رسانای گاف مستقیم است، رابطه بین ضریب جذب α و انرژی فوتون فرودی $h\nu$ عبارت است از:

$$\alpha h\nu = (h\nu - E_g)^{1/2},$$

شکاف نواری لایه $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ را می‌توان با استفاده از معادله بالا و برون‌یابی قسمت مستقیم منحنی $\alpha h\nu$ بر حسب $h\nu$ محاسبه کرد، همان‌طور که در ضمیمه داخل شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل تغییر شکاف نواری با تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی ZnS را نشان می‌دهد. واضح است که لایه‌های $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ دارای شکاف نواری در محدوده انرژی بین $3.28-3.1$ eV هستند. می‌توان مشاهده کرد که انرژی شکاف نواری لایه $\text{PbS}(3)$ پوشش‌دهی نشده 3.28 eV است. با افزایش چرخه‌های پوشش‌دهی، ضخامت لایه افزایش می‌یابد و شکاف نواری تا 3.1 eV کاهش می‌یابد.

کاهش در گاف نواری با افزایش چرخه‌های پوشش‌دهی ممکن است به دلیل ایجاد نقایص ساختاری در لایه‌های ZnS به هنگام ساخت آنها در دمای اتاق باشد که می‌تواند به حالت‌های مجاز در نزدیکی نوار هدایت ZnS در ناحیه ممنوعه منجر شود. در لایه‌های ضخیم، این حالت‌های مجاز می‌تواند به راحتی با نوار هدایت ادغام شده و موجب کاهش شکاف نواری شود. خواص فتوولتائیک سلول‌های ساخته شده با ساختار $\text{ITO}/\text{ZnO}/\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)/\text{P3HT\&PCBM}/\text{Ag}$ در شکل ۶ نشان داده شده است.

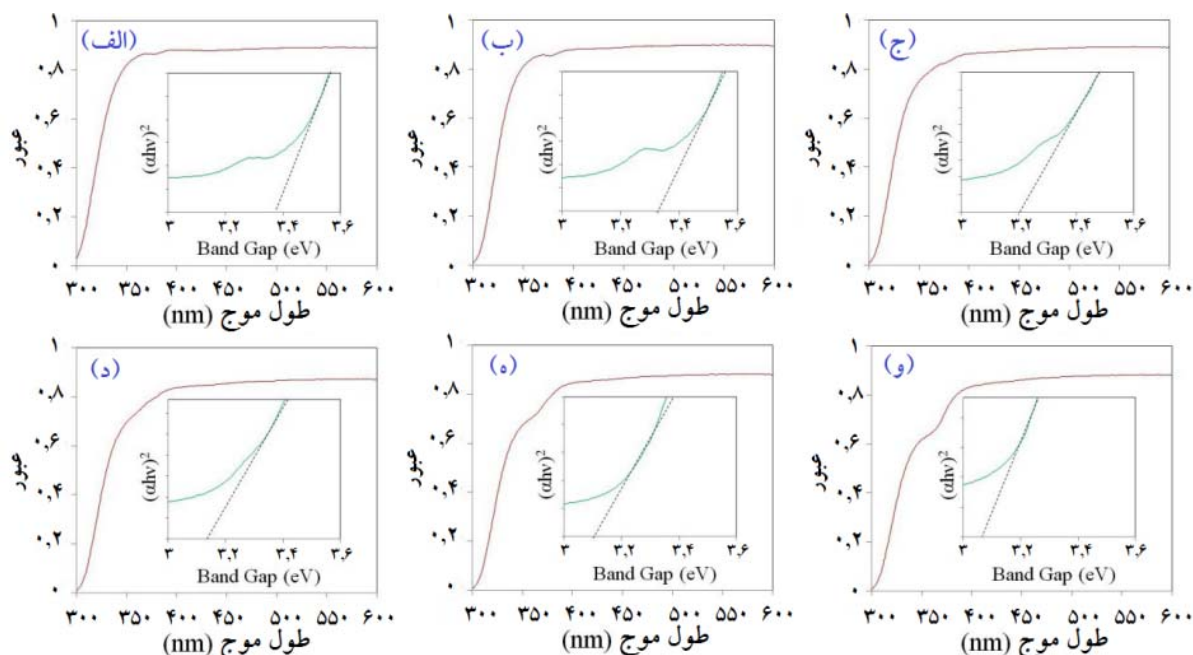
سلول مرجع ($n=0$) نشان‌دهنده چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) 10.1 mA.cm^{-2} ، یک ولتاژ مدار باز (V_{oc}) 0.61 V و یک عامل پرشدگی (FF) 56.46% است که دارای یک بازده تبدیل انرژی (PCE) 3.48% است. پس از قرار دادن لایه مسدود کننده ZnS بین PbS و QDs و HTM ، J_{sc} ، V_{oc} و FF به ترتیب به 10.64 mA.cm^{-2} ، 0.575 V و 3.59% افزایش یافت.



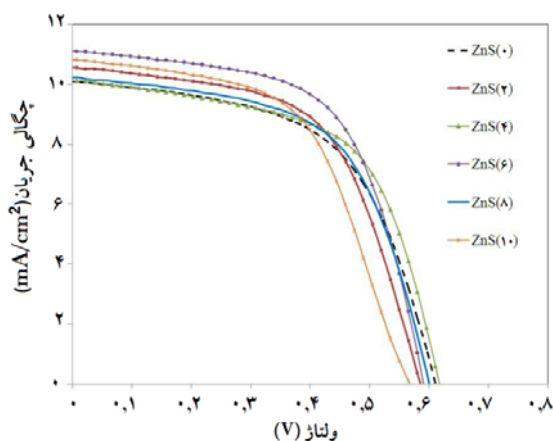
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف جذب پرتوی فرابنفش (Vis-vis) از لایه‌های مسدود کننده $\text{ZnS}(n)$ رسوب یافته بر روی $\text{PbS}(3)$.

نشان داده شده است. همچنین یک اقلیتی از زیرلایه ZnO بدون پوشش باقی می‌ماند. با افزایش چرخه‌های پوشش‌دهی ($n \geq 2$)، رسوب لایه مسدود کننده ZnS روی مورفولوژی سطح تأثیر می‌گذارد (شکل ۳ (ب) - (د)). برای تعداد $n = 6$ دوره، لایه ZnS به طور کامل سطح PbS را پوشش می‌دهد (شکل ۳ (د)) و نشان می‌دهد که $\text{ZnS}(6)$ مورفولوژی سطح بهینه را فراهم می‌کند که می‌تواند به طور مؤثری از تماس مستقیم بین PbS و HTM جلوگیری کند، از این رو به طور قابل ملاحظه‌ای طول عمر الکترون را افزایش می‌دهد. بنابراین، انتظار می‌رود که ضرایب فتوولتائیک PbS QDSSC ، یعنی چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc}) بهبود می‌یابد. در نتیجه به طور کلی بازده تبدیل انرژی را بهبود می‌بخشد. شکل ۴ طیف جذب نوری از لایه‌های $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ را در محدوده 300 تا 1500 نانومتر نشان می‌دهد.

می‌توان مشاهده کرد که شدت جذب $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(2)$ بالاتر از $\text{PbS}(3)$ است که نشان می‌دهد که لایه ZnS جذب نور سلول خورشیدی را بهبود می‌بخشد. شدت جذب با افزایش تعداد چرخه‌های $\text{SILAR}(n)$ از ۲ تا ۶ افزایش می‌یابد، که به تغییر رنگ لایه ZnS نسبت داده می‌شود. اما شدت جذب پس از هشت دوره رسوب‌دهی ZnS کمی کاهش می‌یابد که ممکن است به علت انباشته شدن ذرات ZnS بر روی هم باشد (شکل ۳ (ه)).



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) عبور نور از لایه‌های $\text{PbS}(3)/\text{ZnS}(n)$ با $n=0$ (الف) (ب) ۲، (ج) ۴، (د) ۶، (ه) ۸ و (و) ۱۰، که بر روی بسترهای شیشه‌ای لایه‌نشانی شده‌اند. ضمیمه‌های هر شکل، نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ را نشان می‌دهد.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ویژگی‌های J - V سلول‌های خورشیدی ساخته شده با تعداد چرخه‌های مختلف پوشش‌دهی (n) تحت تابش 100 MW.cm^{-2} ، $1/5 \text{ G}$ AM.

مختلف پوشش‌دهی ZnS لایه مسدود کننده در جدول ۱ آورده شده است. بیشینه مقدار عامل پرشدگی (FF) 60.37% در سلول حاوی $\text{ZnS}(6)$ مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که لایه مسدود کننده ZnS در سطح نقاط کوانتومی $\text{PbS}(3)$ ، تماس مستقیم PbS با HTM را کاهش داده و بنابراین مانع بازترکیب الکترون‌های برانگیخته از نوار هدایت PbS به HTM شده و

حداکثر PCE 3.96% در تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی بهینه $n=6$ همراه با J_{sc} و FF که به ترتیب برابر با 11.11 و 60.37% بودند به دست آمد. چنین بهبودی در بازده سلول خورشیدی با جلوگیری از بازترکیب بار در PbS/HTM حاصل شد. ضرایب فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی ساخته شده از جمله J_{sc} ، FF، V_{oc} و PCE با تعداد چرخه‌های

جدول ۱. عملکرد فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی ساخته شده با چرخه‌های مختلف پوشش‌دهی (n) در 100 MW.cm^{-2} و نور خورشید 1.5 AM .

Coating Cycles (n)	Voc (V)	Jsc (mA.cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
۰	۰٫۶۱	۱۰٫۱۰	۵۶٫۴۶	۳٫۴۸
۲	۰٫۵۹	۱۰٫۶۴	۵۷٫۵۷	۳٫۵۹
۴	۰٫۶۲	۱۰٫۱۳	۵۹٫۲۰	۳٫۷۰
۶	۰٫۵۹	۱۱٫۱۱	۶۰٫۳۷	۳٫۹۶
۸	۰٫۶۰	۱۰٫۲۱	۵۸٫۳۹	۳٫۶۵
۱۰	۰٫۵۷	۱۰٫۸۳	۵۵٫۰۰	۳٫۴۷

چرخه‌ها یافته شد. نتایج تجربی نشان داد که وجود لایه مسدود کننده ZnS می‌تواند به طور مؤثری عملکرد فتوولتائیک را با جلوگیری از بازترکیب در فصل مشترک در وجه مشترک بین QD ها و مواد انتقال حفره (HTM) افزایش دهد. سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقطه کوانتومی PbS با یک لایه مسدود کننده ZnS دارای بازده تبدیل فتوولتائیک بالا (PCE) ۳٫۹۶٪ بود که بالاتر از سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقطه کوانتومی PbS بدون لایه ZnS (۳٫۴۸٪) بود. نتایج تجربی همچنین نشان می‌دهند که افزایش FF با افزایش تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی ZnS تا $n=6$ افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل کاهش فرایند بازترکیب غیرتابشی بار است. به علاوه افزایش سیکل‌های پوشش‌دهی ($n>6$)، منجر به کاهش FF می‌شود. این کاهش به علت مانع اضافه بار برای حمل بار است که افزایش بازده تبدیل توان را محدود می‌کند.

انتقال الکترون را تسهیل می‌کند، همان طور که در شکل ۱ (د) نشان داده شده است. بیشترین افزایش چرخه‌های پوشش‌دهی ($n>6$) ممکن است نرخ بازترکیب بار بین الکترون‌های QDs PbS و حفره‌های HTM را افزایش دهد. در نتیجه، FF کمی (تا ۵۵٪) کاهش می‌یابد. افزایش بیشتر تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی لایه‌های ضخیم ZnS را تولید می‌کند و الکترون‌ها باید مسیر طولانی‌تری را برای رسیدن به لایه QD PbS طی کنند. بنابراین، این مسیر طولانی فرصت بیشتری برای الکترون‌ها برای بازترکیب با حفره فراهم می‌کند. بنابراین، در سلول‌های حاوی ZnS ($n>6$) هر دو عامل بازده و عامل پرتشدگی شروع به کاهش می‌کنند. این نشان می‌دهد که (۶) ZnS می‌تواند به عنوان یک لایه مسدود کننده مؤثر برای فرایند بازترکیب بار به کار رود.

۴. نتیجه‌گیری

حالت بهینه تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی ZnS با تغییر تعداد

مراجع

1. S Zhang, P Cyr, S McDonald, G Konstantatos, and E Sargent, *Appl. Phys. Lett.* **87** (1-3) (2005) 233101.
2. S G Fritz, H Neugebauer, N Sariciftci, S Kumar, and G Scholes, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **91**, 1 (2007) 420.
3. R Schaller, M Sykora, J Pietryga, and V Klimov, *Nano Lett.* **6**, 3 (2006) 424.
4. R Ellingson, M Beard, J Johnson, P Yu, O Micic, and A Nozik, *Nano Lett.* **5**, 5 (2005) 865.
5. A Laref, A Altujar, S Laref, and S J Luo, *Solar Energy* **142**, 15 (2017) 231.
6. A Safdar, M Islam, I Ahmad, A Akram, M Mujahid, Y Khalid, and Y Zhu, *Materials Science in Semiconductor Processing* **41**, 2 (2016) 420.
7. W Lee, J Lee, S Lee, W Yi, S H Han, and B W Cho, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 15 (2008) 153510.
8. T T Ha, Q V Lam, and T D Huynh, *International Journal of Latest Research in Science and Technology* **3**, 3 (2014) 127.
9. C J Raj, K Prabakar, S N Karthick, K V Hemalatha, M Son, and H J Kim, *J. Phys. Chem. C* **117**, 6 (2013) 2600.
10. M Mehrabian and S Aslyousefzadeh, *Journal of Renewable Energy and Environment* **2**, 2 (2015) 29.
11. M Mehrabian and R Jahandizi, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* **10**, 1 (2015) 633.

14. L Zhang, D Qin, G Yang, and Q Zhang, *Chalcogenide Letters* **9**, 3 (2012) 9398.
15. A M Palve and S S Garje, *Bulletin of Materials Science* **34**, 4 (2011) 667.
12. J H Borja, Y V Vorobiev, and R R Bon, *J. Solar Energy Materials and Solar Cells* **95**, 7 (2011) 1882.
13. H M Garcia, M T S Nair, and P K Nair, *Thin Solid Films* **519**, 21 (2011) 7364.