ومقياس

بهبود عملکرد سلولهای خورشیدی حساسشده با نقاط کوانتومی با حساس کردن الکترودهای TiO₂ با دو نوع نقطه کوانتومی PbS و CdS

فاطمه دوست حسینی^{۲۹۱} | عباس بهجت^{۱۹۲}

۱.گروه پژوهشی فوتونیک، مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد ۲.گروه اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

چکیدہ

استفاده از نیم رساناهای با گاف نواری باریک مانند سولفید سرب می تواند محدوده جذب نور را در سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به سمت ناحیه فروسرخ نزدیک توسعه دهد، که از این طریق می توان فوتوجریان تولید شده در سلول را افزایش داد. از طرف دیگر کاربرد PbS به عنوان حساس کننده در این نوع سلول ها موجب مشکلات ناپایداری و بازترکیب بالا می شود. با ساخت و مشخصه یابی سلول های حساس شده با نقاط کوانتومی PbS طی تعداد سیکل های متفاوت مشاهده شد که سلول های ساخته شده دارای چگالی می مناوت مشاهده شد که سلول های ساخته شده دارای چگالی در اثر ترتیب کاربرد دو نوع نقطه کوانتومی سولفید سرب و سولفید کادمیوم در فوتوآند سلول به صورت FTO/TiO₂/PbS/CdS و PbS

بدین منظور یک لایه CdS به روش واکنش و جذب لایه یونی متوالی (SILAR) روی نقاط کوانتومی PbS رسوبگذاری شد. نتایج نشان می دهد این لایه به عنوان لایه محافظ عمل میکند و تا حدی مشکلات ناپایداری و بازترکیب را مرتفع میکند. بعلاوه افزایش قابل توجه چگالی جریان اتصال کوتاه میکند. بعلاوه افزایش قابل توجه چگالی جریان اتصال کوتاه میکند. میزان ۲۸/۲۴ mA/cm² نیز برای سلولهای خورشیدی ساخته شده هیبریدی حساس شده با دو نوع نقطه کوانتومی ساخته شده هیبریدی حساس شده با دو نوع نقطه کوانتومی تقطه کوانتومی PbS/CdS (حدود ۲/۶۴ mA/cm²) به دست آمد. در هر دو سلول از الکترولیت پلی سولفید استفاده شد. بازده سلول خورشیدی حساس شده هیبریدی تحت شرایط بازده سلول خورشیدی حساس شده مقدار ۲/۲۸ رسید. این

بازده بیش از بازده سلولهای خورشیدی حساس شده با یک نوع نقطه کوانتومی است.

واژگان کلیدی: سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم، نقاط کوانتومی

۱ مقدمه

امروزه همزمان با پیشرفت فناوری در دنیا، تقاضای انرژی بسیار افزایش یافته است. بخش عمدهای از انرژی مصرفی از سوختهای فسیلی تأمین میگردد. ذخیره محدود سوختهای فسیلی و آلودگیهای زیست محیطی ناشی از آن، موجب افزایش تقاضا برای انرژی های تجدیدپذیر شده است. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک، انرژی خورشیدی مناسب ترین گزینه معرفی شده است[۱]. سال هاست که سلول های فوتوولتائیک برای تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته به کارمیروند. سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه که برای اولین بار توسط گراتزل و همکارانش در سال ۱۹۹۱ معرفی و سیس توسعه دادهشد[۲] بهدلیل ویژگیهای بسیار عالی مانند هزینه تولید بسیار پایین، فناوری ساخت آسان و اثرات زیست محیطی کم، توجه یژوهشگران را به خود جلب کردهاند [۳]. اگرچه بازدههای نسبتاً خوبی برای این سلولها گزارش شده است اما استفاده از رنگهای گران قیمت برای حساس کردن این گونه سلول های خورشیدی، هنوز آن ها را برای کاربردهای عملی غیر ممکن ساخته است[۴]. علاوهبراین، ناحیه جذب نور رنگهای مولکولی بسیار

1. Photovoltaic

محدود است. در سالهای اخیر برای بهبود عملکرد سلولهای خورشیدی رنگدانهای، روشهای دیگری نیز اتخاذ شده است. یکی از این رویکردها، استفاده از الکترودهای ساختهشده از لایه نازک ₂ TiO است که با نقاط کوانتومی مانند CdS ، CdSe و یا PbS اصلاح شده است و نور را در ناحیه مرئی جذب میکنند [۳]. استفاده از نقاط کوانتومی به عنوان حساس کننده در سلولهای حساس شده نسبت به رنگهای مرسوم چندین مزیت دارند [۴]:

گاف نواری نانوذرات نیمرسانا میتواند توسط اندازه آنها
 تنظیم شود تا محدوده جذبشان بر ناحیه مورد نظر طیف
 خورشیدی منطبق شود.

• دارای گشتاورهای دو قطبی ذاتی بزرگ هستند که میتواند به یک جدایی سریع بار در سلول منجر شود.

دارای ضرایب خاموشی بزرگ هستند که منجر به کاهش
 جریان تاریک و افزایش بازده کل می شود.

 نقاط کوانتومی میتوانند به ازای جذب یک فوتون، چند جفت الکترون-حفره (اکسایتون) تولید کنند که باعث افزایش بازده تبدیلی سلول می شود.

جاذبهای نور می توانند حاملهای بار تولیدشده توسط نور را درمرزدومحیط متفاوت سریعاً جداکند که منجربه کاهش بازترکیب می شود. یکی از چالشهای موجود در سلولهای خورشیدی حساس شده، افزایش پهنای جذب نور از ناحیه مرئی به مادون قرمز نزدیک طیف خورشید است تا با جذب بیشتر نور، فوتوجریان بیشتری تولید شود. ناحیه جذب رنگهای مولکولی که معمولاً در سلولهای خورشیدی حساس شده به رنگ (DSSCs) استفاده می شوند، محدود است. مواد نیم رسانا می توانند همه فوتون های دارای انرژی بالاتر از گاف نواری شان ($_g$) را جذب کنند در حالیکه رنگهای مولکولی تنها فوتون هایی را می توانند جذب کنند که انرژی شان متناظر با گذارهای مولکولی آن هاست [۷–۵].

در سالهای اخیر، نانوذرات نیم رساناهای گوناگونی شامل PbS، Sb₂S₃، CuInS₂, CdSe, CdS برای کاربرد در سلولهای خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفتهاند. از میان این نانومواد، PbS در نقش حساس کننده مؤثرتر ظاهر شده است که ناشی از گاف نواری متناسب آن در حالت حجمی، ۸ eV، است که می تواند باند جذب را به سمت ناحیه مادون قرمز نزدیک توسعه دهد. اخیراً

بطور تجربی نشان داده شده، در تک کریستال TiO₂ حساس شده با PbS، زمانی که الکترولیت پلی سولفید مورد استفاده قرار می گیرد، جمع آوری فوتوجریان دارای بازده کوانتومی بزرگترازیک الکترون بر فوتون است [۴]. همچنین PbS دارای شعاع بوهر اکسایتون بزرگ حدود ۲۰ نانومتر است که می تواند به اثرات سایز کوانتومی وسیع منجر شود. از طرفی استفاده از حالت حجمی PbS در سلول های خورشیدی حساس شده دارای مشکلاتی به شرح ذیل است:

• بهدلیل گاف نواری پایین، بازده تئوری بیشینه سلول بسیار کمتر از ۳۳٪ (حد ترمودینامیکی شاکلی-کویزر) است.

باند رسانش آن در مقایسه با TiO₂ به عنوان ماده حامل
 الکترون در انرژی پایین تری قرار گرفته است، بنابراین قادر به
 تزریق الکترون از PbS به TiO₂ نیست.

PbS در حضور زوجهای اکسایشی/کاهشی مانند یدید/تری
 یدید و پلی سولفید پایدار باقی نمی ماند.

PbS دو مشکل نخست میتواند با کاهش اندازه نانوذرات PbS به زیر شعاع بوهر اکسایتون مرتفع شود که این نتیجه از اثر محصورسازی کوانتومی بهدست میآید. نقاط کوانتومی PbS نسبت به حالت حجمی آن دارای انرژی گاف نواری بزرگتری است، در نتیجه موقعیت باند رسانش آن بالاتر است و موجب تسریع تزریق الکترون به $_{2}$ Tin میشود[۸]. در این تحقیق، تاثیر به کارگیری دو نوع متفاوت از حساس کننده نقاط کوانتومی CdS و SdP در سلول در مقایسه با یک نوع حساس کننده و اثر ترتیب ایمال آن ها مورد برایی نوع متفاوت از حساس کننده نقاط کوانتومی EdS و SdP در سلول در مقایسه با یک نوع حساس کننده و اثر ترتیب نقطه کوانتومی از روش و اکنش و جذب لایه یونی متوالی (سیلار) استفاده شد و سپس تعداد سیکل های بهینه هر کدام تعیین شد.

۲ بخش تجربی

آمادهكردن زيرلايهها

از شیشه لایهنشانی شده با اکسید قلع آلاییده شده با فلوئور (FTO) با مقاومت سطحی ۸ اهم بر سانتی متر مربع به عنوان زیرلایه استفاده شد. زیرلایه های FTO را با آب و صابون شستشو داده و درون یک بشر قرار دادیم به طوریکه طرف رسانای آن به سمت بالا باشد و به ترتیب با محلول های آب دی یونیزه، استون و اتانول هر کدام به مدت ۱۵ دقیقه در حمام فراصوت شستشو دادیم. سپس در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا خشک شود[۳].

لايەنشانى 2TiO

در این بخش از دو نوع خمیر ویسکوز که به ترتیب شامل نانوذرات TiO₂ با قطر ۲۰ و ۴۰۰ نانومتر است استفاده شد. این خمیرها از شرکت توسعه فناوری شریف سولار خریداریشد و با روش دکتر بلید که یک روش لایهنشانی غلطکی است روی زیرلایههای FTO تمیز، لایهنشانی شد.

ابتدا FTO با یک لایه شفاف شامل ذرات $_{2}$ TiO آناتاز با اندازه ۲۰ نانومتر لایه نشانی و سپس به مدت نیم ساعت در آون تحت دمای ۱۲۰ درجه حرارت داده شد. این لایه در سلول نقش انتقال دهنده الکترون را دارد. سپس لایه دوم که شامل ذرات بزرگتر با اندازه ۴۰۰ نانومتر است روی لایه اول با روش دکتر بلید لایه نشانی شد که نقش پراکننده نور را بعهده دارد. این لایه با پراکندهکردن نور ورودی به سلول موجب می شود تا نور مسیر بیشتری در سلول طی کند که موجب افزایش بیشتر بیشتر لایه نشانی لایه دوم، نمونه ها در کوره با دمای ۴۵۰ درجه به لایه نشانی لایه دوم، نمونه ها در کوره با دمای ۴۵۰ درجه به مدت نیم ساعت پخت داده شدند. پس از پخت، هنگامی که دمای کوره به ۸۰ درجه رسید نمونه ها از کوره خارج شدند [۹].

حساسكردن الكترود TiO2 با نقاط كوانتومى PbS/CdS

برای رسوبگذاری نقاط کوانتومی PbS و CdS روی الکترود $_{2}^{1}$ TiO از روش واکنش و جذب لایه یونی متوالی (سیلار)⁽ استفاده شد. بهطور خلاصه برای رسوبگذاری نقاط کوانتومی PbS شد. بهطور خلاصه برای رسوبگذاری نقاط کوانتومی PbS الکترود $_{2}^{0}$ TiO آماده شده ابتدا در محلول آبی ۰/۰۵ مولار $_{2}(NO)$ (NO) (به عنوان پیشماده کاتیونی) به مدت ۱ دقیقه غوطهور شد و سپس با آب دی یونیزه شسته و کاملاً خشک شد. در مرحله بعد این الکترود در محلول آبی ۲۰/۰ مولار S₂Na(به عنوان پیش ماده آنیونی) به مدت ۱ دقیقه غوطهور شد و سپس مراحل شستشو و آنیونی) به مدت ۱ دقیقه غوطهور شد و سپس مراحل شستشو و دلیل است که یون های اضافی باقیمانده که اثر منفی در عملکرد دلیل است که یون های اضافی باقیمانده که اثر منفی در عملکرد در نظر گرفته میشود [۹].

برای رسوبگذاری نقاط کوانتومی CdS نیز الکترود ابتدا در پیشماده کاتیونی ۰/۵ مولار Cd(NO₃)₂ به مدت یک دقیقه غوطهور شد و بعد با حلال پیشماده (که در اینجا آب دی یونیزه است) شسته و خشک شد. سپس غوطهوری در پیشماده

آنیونی 1/4 مولار Na_2S و بعد، شستشو و خشککردن انجام شد. این مراحل نیز یک سیکل سیلار برای لایه نشانی نقاط کوانتومی CdSاست [۱۰]. اندازه نقاط کوانتومی می تواند با تعداد سیکل های غوطه وری کنترل شود. این روش چنان طراحی شده است که اندازه ذرات در یک تک لایه در طی یک سیکل غوطه وری افزایش می یابد. می توان با تکرار چند بار آزمایش، سیکل بهینه را به دست آورد که به ازای آن، بازده سلول بیشینه می شود [۱۱].

در این تحقیق، این لایهنشانیها با تعداد سیکلهای متفاوت برای حساس کردن الکترود TiO₂ یکبار فقط با نقاط کوانتومی PbS، بار دیگر فقط با نقاط کوانتومی CdS و سپس ترکیب این دو با ترتیب PbS/CdS و CdS/PbS به عنوان نمونههای هیبریدی انجام شد. بدین ترتیب چهار نمونه الکترود حساس شده برای استفاده در ساخت سلول به دست آمد. روش به دست آوردن سیکل بهینه در هریک از موارد فوق در بخش ۳–۱ توضیح داده شده است.

تهيه الكتروليت

در این تحقیق از الکترولیت پلی سولفید استفاده شده است. این الکترولیت شامل محلولهای ۲ مولار S و ۰/۵ مولار Sیه به عنوان زوج اکسایشی/ کاهشی و ۲/۲ KCl مولار به عنوان ماده افزودنی است که در حلال آب/متانول (به نسبت حجمی ۳:۳) به حجم ۱۰ میلی لیتر آماده شد. محلول حاصل به مدت ۳ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار گرفت تا به خوبی حل شود و محلول یکنواختی به دست آید.

آماده كردن الكترود مقابل (كاتد)

از CoS (سولفید کبالت) به عنوان کاتالیزور در الکترود مقابل استفاده شد. این الکترود مقابل با روش سیلار طی ۶ سیکل با استفاده از پیش ماده های (Co (acetate) ۰/۵ مولار و Na₂S مراد در مولار آماده شد. برای این کار، زیرلایه های FTO تمیز ابتدا در محلول آبی (cacetate) Co و سپس در محلول آبی Na₂S هر کدام به مدت ۳۰ ثانیه غوطه ور شد [۱].

مجتمعكردن سلول

فوتوالکترود و الکترود مقابل با دوگیره به هم متصل شدند و الکترولیت با کمک یک سرنگ به داخل آن تزریق شد و هریک از سلول های ساخته شده با استفاده از دستگاه Keithley 2400 و شبیه ساز خورشیدی ۲۰۰۳W /cm² با ۱/۵G مشخصه یابی شدند.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ تعیین سیکل بهینه سیلار در رسوبگذاری نقاط

کوانتومی PbS و CdS

الف) تعیین سیکل بهینه سیلار دررسوب گذاری نقاط کوانتومی PbS

الکترود لایه TiO٫ آماده شده چنان که در بخش ۲-۳ بیان شد با نقاط كوانتومى PbS طى سيكل هاى متفاوت حساس شدند و سپس این فوتوالکترودها را با الکترود مقابل CoS مجتمع نموده و یس از تزریق الکترولیت به داخل آن ها، سلول های ساخته شده را مورد مشخصه یابی جریان – ولتاژ (I–V) قرار دادیم. شکل ۱ نمودار جریان-ولتاژ مربوط به نمونههای آزمایشگاهی است که تنها با نقاط كوانتومى PbS طى سيكل هاى متفاوت حساس شدهاند. مشخصههای دیگر این نمونهها از قبیل بازدهی، ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه و فاکتوریرشدگی نیز اندازهگیری و محاسبه گردید که در جدول ۱ نشان داده شده است. ولتاژ سلول، هنگامی که جریان آن برابر صفر است را ولتاژ مدار باز (Voc) می نامند و جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) در شرایطی اندازه گیری می شود که یتانسیل اعمالی برابر صفر باشد. چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) برابر با جریان اتصال کوتاه تقسیم بر مساحت ناحیه فعال سلول است. دو مشخصه بازدهی (η) و فاکتور پرشدگی (FF) نیز از روابط زیر محاسبه شدند.

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{in}} = \frac{J_{SC}V_{OC}FF}{P_{in}} \tag{1}$$



شکل ()) مقایسه مشخصه جریان – ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی سرب سولفید (PbS) با تعداد سیکلهای سیلار یک (PbS/•CdS)،دو(CdSه/ CdS)،سه(CbS/ CdS)،پنج(CdS)،

جدول () نتایج حاصل از مشخصهیابی جریان- ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS با تعداد سیکلهای متفاوت

PbS(Y)	CdS(X)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ^γ)	η (%)	FF
١	•	•,٢٣	۰,۸۸	۰,۰۶	۰,۳۰
٢	•	۰,۲۳	١,٧٥	•,116	۰,۳۱
٣	•	۰,۲۸	7,54	•,7•	۰,۲۸
۵		۰,۲۸	۲,۲۲	۰,۱۶	۰,۲۷
Y		۰,۲۸	۱,۷۵	.,14	۰,۳۱

با افزایش تعداد سیکلهای سیلار در رسوبگذاری PbS، رنگ فوتوالکترودها از قهوهای کمرنگ به قهوهای متمایل به مشکی تغییر میکند. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۱ تعداد سیکل بهینه سیلار در رسوبگذاری PbS، ۳ مرتبه به دست آمد که به ازای آن بازده سلول بیشینه شده است.

ب) تعیین سیکل بهینه سیلار در رسوبگذاری نقاط کوانتومی CdS

همان طور که در بخش ۲–۳ ذکر شد، الکترود TiO₂ با روش سیلار طی سیکلهای متفاوت با نقاط کوانتومی CdS حساس شد و سلول با فوتوالکترودهای حاصل مجتمع و مشخصهیابی شد تا سیکل بهینه تعیین شود. شکل ۲ نمودار جریان–ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده تنها با نقاط کوانتومی CdS با تعداد سیکلهای متفاوت است و سایر مشخصههای سلول در جدول ۲ بیان شده است.



شکل ۲ ۹) مقایسه مشخصه جریان – ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده با CdS با تعداد سیکلهای سیلار سه (PbS / ۳Cds)، پنج (PbS / ۵CdS•)، ده (PbS /۱۰CdS•) و دوازده (PbS / ۱۲CdS•)



جدول ۲ 🚺 نتایج حاصل از مشخصهیابی جریان- ولتاژ سلول های خورشیدی
حساس شده با نقاط کوانتومی CdS با تعداد سیکل های متفاوت

PbS(Y)	CdS(X)	V _{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ^{γ})	η(%)	FF
•	٣	•,۴۴	۲,۸۸	۰,۴۲	۰,۳۴
•	۵	۰,۴۸	4,94	۰,۷۲	۰,۳۱
•	١٠	.,07	۵٫۹۱	١,٠٥	۰,۳۴
•	١٢	.,49	۵,۱۱	۰,۷۸	۰,۳۲

نتایج به دست آمده نشان میدهد که در حساس کردن فوتوآند با نقاط کوانتومی با استفاده از روش سیلار، هر چه تعداد سیکل های سیلار افزایش یابد چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و

> متعاقباً بازده سلول افزایش می یابد تا زمانی که به یک سیکل بهینه می رسد که به ازای آن پارامترهای نامبرده بیشینه می شود. در این بررسی، برای قسمت الف تعداد سیکل بهینه برای Bod برابر ۳ و برای قسمت ب برای CdS برابر ۱۰ به دست آمد. زمانی که رسوب گذاری نقاط کوانتومی با تعداد سیکل های سیلار پایین انجام می شود نقاط کوانتومی، لایه TiO را به صورت جزیی می پوشاند و افزایش به عداد سیکل های رسوب گذاری به

پوشش کامل لایه TiO₂ منجر می شود. اگر حساس سازی بیش از تعداد سیکل بهینه انجام شود این افزایش سیکل عملکرد سلول را کاهش می دهد که می تواند به بازده تزریق بار ضعیف نسبت داده شود و به نظر می رسد ناشی از عوامل زیر باشد:

کاهش اثر کوانتش سایز نقاط کوانتومی بزرگ که منجر به
 کاهش نیروی رانشی برای تزریق بار (الکترون ها و حفره ها) می شود.

افزایش تعداد تله های بازترکیب در خود نقاط کوانتومی با
 اندازه بزرگ

 جلوگیری از انتقال یونهای اکسایشی/کاهشی به دلیل مسدودشدن منفذهای ساختار توسط نقاط کوانتومی[۱۲].
 با افزایش تعداد سیکلهای سیلار برای رسوبگذاری نقاط کوانتومی CdS رنگ الکترودها از زرد کم رنگ به نارنجی تغییر میکند که در شکل ۳ دیده می شود:

10000 C		>
59	9	

شکل ۳ کی با افزایش تعداد سیکل سیلار رنگ الکترود از زردِ کمرنگ به نارنجی تغییر میکند.

بررسی ترکیبات شیمیایی الکترود لایه TiO₂ حساس شده با نقاط کوانتومی CdS توسط EDX نیز انجام شد که در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل EDX تصویر EDX فوتوآند حساس شده با نقاط کوانتومی CdS

چنانکه در شکل ۴ مشخص است پس از اینکه لایه TiO₂ با نقاط کوانتومی CdS حساس شد، عناصر Cd و S در نمونه دیده می شودکه این گواه لایه نشانی موفق CdSروی سطح لایه TiO_است.

۲-۳ بررسی اثر ترتیب بکارگیری نقاط کوانتومی PbS و CdS

در این قسمت برای این که ترتیب مطلوب بکارگیری این دو نوع نقطه کوانتومی در سلول تعیین شود تنها تعداد سیکلهای بهینه که در قسمت ۳–۱ تعیین شد را مورد آزمایش قرار دادیم. بدین صورت که فوتوآند را یکبار ابتدا با نقاط کوانتومی CdS (طی ۱۰ سیکل) و سپس با نقاط کوانتومی PbS (طی ۳ سیکل) حساس کردیم و بار دیگر ترتیب حساس سازی را معکوس کردیم، یعنی فوتوآند ابتدا با نقاط کوانتومی PbS (طی ۳ سیکل) و سپس با نقاط کوانتومی CdS (طی ۳ سیکل) و سپس با

سال دوم | شــمارەى دوم | تــابــســتــان ١٣٩٤

زیر به دست آمد. در شکل ۵ نمودار جریان-ولتاژ و در جدول ۳ مشخصه های دو سلول آمده است.



جدول ۳ ﴾] نتایج حاصل از مشخصهیابی جریان-ولتاز سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS و CbS با ترتیبهای متفاوت

		V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ^γ)	η (%)	FF
	CdS(1.)/PbS(٣)	۰,۳۶	۵,۱۳	.,40	۰,۲۵
	PbS(۳)/CdS(۱۰)	.,0۳	٨,٢۴	1,70	۰,۳۰

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که ترتیب PbS/CdS مطلوب تر از CdS/PbS است. زیرا از لحاظ ساختار تراز انرژی چنانکه در شکل ۶ دیده می شود اجزای فوتوالکترود سلول با ترتیب FTO/TiO₂/PbS/CdS دارای یک ساختار پلهای (بدون سد انرژی) است که موجب ایجاد نیروی رانشی برای تزریق مؤثر الکترون می گردد. بنابراین فوتوجریان سلول و برای تزریق مؤثر الکترون می گردد. بنابراین فوتوجریان سلول و بیان شد، نقاط کوانتومی PbS از لحاظ شیمیایی با الکترولیت پلی سولفید چندان سازگار نیست و استفاده از ترتیب PbS/CdS موجب می شود تا لایه RdS به عنوان لایه محافظ عمل کند و از تماس مستقیم PbS به عنوان لایه محافظ عمل کند و از می شود، جلوگیری کند. به این ترتیب به نظر می رسد پایداری سلول نیز بیشتر شود.



شکل ۶ 🚺 🔹 نمایش ساختار ترازی فوتوالکترود سلول و نقش لایه محافظ CdS برای PbS

۳-۳ بررسی اثر کاربرد دو نوع نقطه کوانتومی PbS و CdS طی سیکل های متفاوت در سلول

با در نظر گرفتن ترتیب مطلوب، سلولهای خورشیدی حساس شده با دو نوع نقطه کوانتومی PbS و CdS با تعداد سیکلهای متفاوت ساخته شده و مورد مشخصه یابی قرار گرفتند.

فوتوآند نمونه های هیبریدی ساخته شده به صورت (X) FTO /TiO2 /PbS (X) و X به ترچسب زده شد که Y و X به ترجیب به تعداد سیکل های سیلار PbS و CdS اشاره دارد.

۳-۴ طیف جذبی فوتوآندها

در شکل ۷ منحنیهای جذب اپتیکی فوتوالکترودهای FTO/TiO₂/PbS(Y)/CdS(X)



شکل ۷ کی منحنی های جذب ایتیکی PbS/(X)CdS (Y)/۲iO_v/(Y) PbS/(X) (X و Y به ترتیب تعداد سیکل های سیلار در رسوب گذاری نقاط کوانتومی PbS و CdSروی فوتوآند است).

همان طور که دیده می شود لبه منحنی جذب نمونه ها با افزایش تعداد سیکل های سیلار، یک شیفت قرمز پیدا کرده اند که نشان دهنده افزایش اندازه نقاط کوانتومی است [۱۲]. محدوده جذب این نقاط کوانتومی انطباق خوبی با طیف خور شید دارند [۳].

۳-۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر SEM مربوط به فوتوآند قبل و بعد از رسوبگذاری نقاط کوانتومی در شکل ۸ نشان داده شده است. در تصویر(a)، که تصویر فوتوآند قبل از رسوبگذاری نقاط کوانتومی است نواحی تیره دیده میشود نشاندهنده تخلخل بین نانوذرات TiO₂ میباشد. با رسوبگذاری نقاط کوانتومی چنانکه در تصویر (d) دیده میشود، این نقاط بخشی از تخلخل را پر میکنند، کاهش نواحی تیره در تصویر (d) گواه این مطلب است.



شکل ۸ ♦】 نقاط کوانتومی CdS و توآند(a) قبل و (b) بعد از رسوبگذاری

۳-۶ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی تصویر AFM یک نمونه از فوتوآند حساس شده با نقاط کوانتومی در شکل ۹ نشان داده شده است.

Topography - Scan forward Line fit



شکل ۹ 🏹 تصاویر AFMفوتوآند بعد از رسوب گذاری نقاط کوانتومی CdS

این تصاویر در پنجره های ۴ و ۲ میکرومتر گرفته شده است که لایه نشانی نقاط کوانتومی روی فوتوآند به وضوح قابل تشخیص است. اندازه تقریبی نقاط کوانتومی برای سیکل بهینه در این تصاویر حدود ۱۱–۹ نانومتر تخمین زده شده است.

۳-۷ مشخصهیابی جریان-ولتاژ

در شکل ۱۰ نمودار جریان-ولتاژ نمونههای هیبریدی و غیرهیبریدی ساخته شده نشان داده شده است. دیگر مشخصههای این سلولها در جدول ۴ آمده است.

نائومقیاس سال دوم (شهارهی دوم | تابستان ۱۳۹٤



شکل ۱۰ 🏹 مقایسه مشخصه جریان-ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده با دو نوع نقطه کوانتومی PbS و CdS

جدول ۴) نتایج حاصل از مشخصهیابی جریان-ولتاژ سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS و CdS با تعداد سیکلهای متفاوت

PbS(Y)	CdS(X)	V _{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ^{γ})	η (%)	FF
1		•/٢٣	•/٨٨	•/•9	۰/۳۰
٢		۰/۲۵	۱/۷۵	•/14	۰/۳۱
F	•	۰/۲۸	2/84	•/٢•	۰/۲۸
۵		•/۲٨	۲/۲۲	•/18	•/۲٧
Y	•	•/۲٨	۱/۷۵	•/14	۰/۳۱
•	٣	./۴۴	۲/۸۸	•/۴۲	•/٣۴
•	۵	•/۴٨	4/94	•/٧٢	۰/۳۱
•	١٠	•/۵٣	۵/۹۱	۱/۰۵	•/٣۴
٣	٣	./۴.	۵/۵۸	•/04	•/79
٣	۵	•/۴٧	8/14	•/9۶	•/٣۴
٣	١٠	•/۵۳	٨/٢۴	۱/۲۵	•/٣•
۵	۵	•/۴٨	4/94	•/٧٢	۰/۳۱
۵	١٠	•/۵۳	۵/۷۵	•/84	۰/۲۸

همانطور که در جدول ۴ دیده می شود نمونه های شامل دو نوع نقطه کوانتومی، چگالی جریان های (J_{sc}) نسبتاً بالایی را در مقایسه با سلول های دارای یک نوع نقطه کوانتومی نشان می دهند، اما مقادیر ولتاژ مدار باز (V_{oc})این نمونه های هیبریدی بین مقادیر مربوط به سلول های حساس به یک نوع نقطه کوانتومی PbS و یا CdS است. از آن جایی که CdS با الکترولیت

www.SID.ir

پلی سولفید سازگار است بنظر می رسد ایجاد یک لایه نقاط کوانتومی CdS روی نقاط کوانتومی PbS توانسته از فرآیند خوردگی فوتوشیمیایی PbS جلوگیری کند و موجب افزایش پایداری سلول شود. به عبارتی PbS فوتوجریان های قابل دستیابی را افزایش می دهد و لایه نشانی CdS رفتار سلول را پایدار می کند. این نکته قابل توجه است که پایداری و تثبیت PbS با لایه نشانی CdS زمانی حاصل می شود که پس از تکمیل رسوب گذاری این دو نوع نقطه زمانی حاصل می شود. اگر بین رسوب گذاری این دو نوع نقطه کوانتومی از لحاظ زمانی فاصله بیفتد، منجر به ناپایداری سلول می شود که بنظر می رسد به حالت های سطحی مربوط می شود. از بین نمونه ها، نمونه حساس شده با (۱۰) PbS(۳)/CdS با می دهد که به عنوان سلول بهینه در نظر گرفته می شود.



۲-۸ مشخصه یابی پراش اشعه X مربوط به فوتوآند سلول هیبریدی بهینه (۲۰)CdS(۲)/TiO₇/PbS(۳)



شکل ۱۱ ♦】 XRD لایه دیاکسید تیتانیوم حساس شده با نقاط کوانتومی PbS و CdS و نمایش محل پیکھا.

اندازه نقاط کوانتومی CdS (برای ۱۰ سیکل) برای سلول هیبریدی بهینه حدود ۹/۸۵ نانومتر و اندازه نقاط کوانتومی PbS (برای ۳ سیکل) حدود ۱۰/۶۱ نانومتر به دست آمد که با تخمین اندازه از تصاویر AFM سازگار است. این اندازه گیری ها با استفاده از رابطه دبای شرر[۱۴]،

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \, \cos(\theta)} \tag{7}$$

FWHM به دست آمد که در آن λ طول موج اشعه X، β برابر FWHM به دست آمد که در آن λ طول موج اشعه (تمام پهنا در نصف بیشینه مربوطه) و θ زاویه براگ پیک پراشیده است.

۴ نتیجهگیری

با ساخت و مشخصهیابی سلولهای حساس شده با نقاط کوانتومی PbS با تعداد سیکلهای متفاوت مشاهده شد که دارای چگالی جریان اتصال کوتاه (Jsc) و ولتاژ مدار باز (Voc) بسیار پایینی هستند. اثر ترتیب کاربرد دو نوع نقطه کوانتومی

سولفيد سرب و سولفيد كادميوم در فوتوآند سلول بهصورت FTO /TiO₂ /PbS /CdS و FTO /TiO₂ /CdS /PbS بررسی شد. در مورد نخست که یک لایه CdS به روش واکنش و جذب لایه یونی متوالی (SILAR) روی نقاط کوانتومی PbS رسوبگذاری شد، بنظر می رسد به عنوان لایه محافظ عمل می کند و تا حدی مشکلات ناپایداری و بازترکیب بالا را مرتفع میکند. چگالی جریان اتصال کوتاه قابل توجهی برای سلول های خورشیدی هیبریدی حساس شده با دو نوع نقطه کوانتومی PbS /CdS حدود ۸/۲۴ mA/cm^۲ مشاهده می شود که در مقایسه با سلول های حساس شده با تنها یک نوع نقطه کوانتومی PbS با جریان اتصال کوتاه حدود ۲/۶۴ mA/cm^۲، بسیار بالاتر است. در هر دو سلول از الكتروليت يلي سولفيد استفاده شده است. بازده سلول خورشیدی حساس شده هیبریدی تحت شرایط ۱ sun (AM ۱,۵ G, ۱۰۰ mA /cm^۲) به مقدار ۱/۲۵٪ رسیده است که بیش از مجموع بازده سلولهای خورشیدی حساس شده با یک نوع نقطه کوانتومی است.

مراجع

- Y. Shengyuan, A. S. Nair, Z. Peining, and S. Ramakrishna, "Electrospun TiO2 nanostructures sensitized by CdS in conjunction with CoS counter electrodes: Quantum dot-sensitized solar cells all prepared by successive ionic layer adsorption and reaction," Materials Letters, vol. 76, pp. 43-46, 2012.
- [2] S. K. Dhungel and J. G. Park, "Optimization of paste formulation for TiO2 nanoparticles with wide range of size distribution for its application in dye sensitized solar cells," Renewable Energy, vol. 35, pp. 2776-2780, 2010.
- [3] J. Li, L. Zhao, S. Wang, J. Hu, B. Dong, H. Lu, et al., "Great improvement of photoelectric property from co-sensitization of TiO2 electrodes with CdS quantum dots and dye N719 in dye-sensitized solar cells," Materials Research Bulletin, vol. 48, pp. 2566-2570, 2013.
- [4] Y. Li, L. Wei, X. Chen, R. Zhang, X. Sui, "Efficient PbS/CdS co-sensitized solar cells based on TiO2 nanorod arrays," nanoscale research letter, vol. 8, pp. 67-73, 2013.
- [5] P. V. Kamat, "Quantum Dot Solar cells. Semicoductor Nanocrystals as Light Harvest," Journal of Physical Chemistry C, vol. 112, pp. 18737-18753, 2008.
- [6] S. Ruhle, M. Shalom, and A. Zaban, "Quantum-dot-sensitized solar cells," Chemphyschem, vol. 11, pp. 2290-304, 2010.
- [7] P. V. Kamat, K. Tvrdy, D. R. Baker, J. G. Radich, "Beyond photovoltaics: Semiconductor nanoarchitectures for liquid-junction solar cells," Chemical Reviews, vol. 110, pp. 6664-6688, 2010.
- [8] A. Braga, S. Gimenz, I. Concina, A. Vomiero, I. Mora-Sero, "Panchoromatic sensitized solar cells based on metal sulfide quantum dots grown directly on nanostructured TiO2 electrodes," Chemical Reviews, vol. 2, pp.454-460, 2011.

- [9] N. Zhou, G. Chen, X. Zhang, L. Cheng, Y. Luo, D. Li, et al., "Highly efficient PbS/CdS co-sensitized solar cells based on photoanodes with hierarchical pore distribution," Electrochemistry Communications, vol. 20, pp. 97-100, 2012.
- [10] Y.-C. Park, E.-H. Kong, Y.-J. Chang, B.-G. Kum, and H. M. Jang, "Tertiary hierarchically structured TiO2 for CdS quantum-dot-sensitized solar cells," Electrochimica Acta, vol. 56, pp. 7371-7376, 2011.
- [11] J. Deng, M. Wang, X. Song, Y. Shi, and X. Zhang, "CdS and CdSe quantum dots subsectionally sensitized solar cells using a novel double-layer ZnO nanorod arrays," Journal of Colloid and Interface Science, vol. 388, pp. 118-122, 2012.
- [12] S. W. Jung, J.-H. Kim, H. Kim, C.-J. Choi, and K.-S. Ahn, "ZnS overlayer on in situ chemical bath deposited CdS quantum dot-assembled TiO2 films for quantum dot-sensitized solar cells," Current Applied Physics, vol. 12, pp. 1459-1464, 2012.
- [13] H. K. Jun, M. A. Careem, and A. K. Arof, "Quantum dot-sensitized solar cells perspective and recent developments: A review of Cd chalcogenide quantum dots as sensitizers," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 22, pp. 148-167, 2013.
- [14] Y. J. Yang and B. J. Xiang, "Wet synthesis of nearly monodisperse CdSe nanoparticles at room temperature," Journal of Crystal Growth, vol. 284, pp. 453-458, 2005.

Improved Performance of QDSSCs by Co-sensitization of TiO₂ Electrodes with PbS and CdS Quantum Dots

F. Doosthosseini^{1,2} | A. Behjat^{1,2*}

1.Atomic and Molecular Groups, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran 2.Photonics Research Group, Engineering Research Centre, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

n this work, quantum dots of different materials were used to fabricate the sensitized solar cells. The successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method was used to synthesise CdS and PbS QD's. By changing the percentages of the material or changes in the number of layers the performance of individual cells was compared. Moreover, solar cells by combination of these cells so-called co-sensitized solar cells were fabricated and characterized. The use of narrow band gap semiconductors such as PbS may expand the light absorption range to the near-infrared region in quantum-dot-sensitized solar cells (QDSCs), increasing the generated photocurrent. However, the use of PbS as a sensitizer in QDSCs causes some problems of stability and high recombination. Here, it is shown that the direct growth of a CdS layer on previously deposited PbS minimizes these problems. An increase in short-circuit current density up to 8.24 mA/cm² and the higher efficiency of 1.25% for the hybrid PbS/CdS QDSCs were obtained, compared to that of PbS QDSCs, using polysulfide electrolyte in both cells.

Keywords

Quantum dots sensitized solar cell, Titanium dioxide nano-particles, Quantum dots.