



حسین سالار آملی^{۱*}، مهسا امیری^۲، مهران جوانبخت^۲، الهام ملکی^۲

۱- آزمایشگاه نانو فناوری و لایه نازک، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، جمهوری اسلامی ایران
۲- گروه مستقل شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، جمهوری اسلامی ایران

ساخت سلول خورشیدی نقاط

کوانتومی CdS/CdSe و افزایش

راندمان آن با استفاده از یون Mn^{2+}

چکیده

در این تحقیق نقاط کوانتومی CdS، CdSe، ZnS سنتز و بر روی الکتروآند بصورت یک فیلم آستر شد. این الکتروآند از زیر لایه‌ای از جنس شیشه تشکیل شده بود و با لایه‌ای نازک از اکسید قلع دوپ شده با فلور (فلوئورین تین اکسید (FTO))، پوشش داده شد. در جهت لایه نشانی CdS و ZnS از روش واکنش‌دهی و جذب پی‌درپی لایه یونی (SILAR) و به منظور لایه نشانی CdSe از رسوب‌دهی حمام شیمیایی (CBD) استفاده شد و رشد ذرات مورد بررسی قرار گرفت. با بهره‌گیری از واکنش اکسیداسیون و احیای "پلی سولفید" به عنوان الکترولیت و استفاده از الکتروآند سولفید مس (Cu_2S) به عنوان کاتد، سلول خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی، (QDSSC) تهیه شد. طیف‌های بدست آمده توسط اسپکتروسکوپی XRD و EDAX نشان داد که ذرات سولفید مس به اندازه $17/53 \text{ nm}$ و نقاط کوانتومی به اندازه‌های ۷ تا $9/5 \text{ nm}$ بدست آمده است.

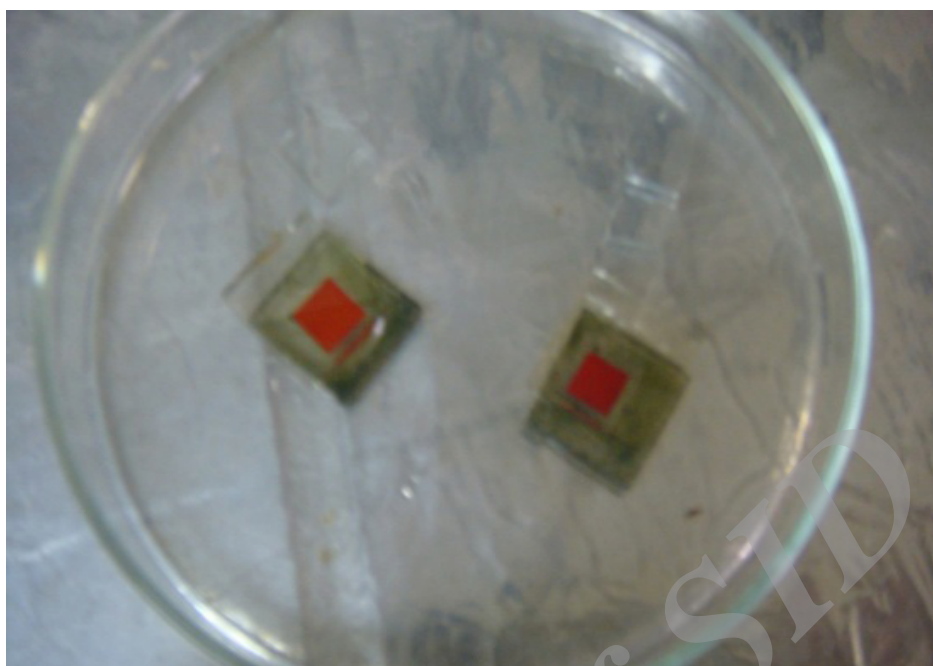
مطالعات مربوط به افزودن یون منگنز به آند سلول خورشیدی به منظور افزایش راندمان، برای اولین بار در این تحقیق صورت گرفت و نشان داده شد که عملکرد سلول خورشیدی با افزودن یون Mn^{2+} به میزان ۵۴٪ افزایش می‌یابد. برای مشخصه‌یابی سلول خورشیدی ساخته شده، از دستگاه شبیه ساز اشعه خورشید با $1/5 \text{ AM}$ استفاده شد و مطالعه مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری عملکرد سلول خورشیدی از جمله ولتاژ مدار باز (VOC)، دانسیته جریان (I)، جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، فاکتور انباشتگی (FF) و بازدهی سلول بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، نقاط کوانتومی، یون منگنز

۱- مقدمه

یکی از چالش‌هایی که امروزه با آن مواجه هستیم افزایش بی‌رویه مصرف انرژی می‌باشد. با افزایش پی در پی جمعیت انسان و ارتقای استانداردهای زندگی، انرژی بیشتری مورد نیاز می‌باشد. در حالی که همچنان سوخت فسیلی (ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) منابع اصلی آن می‌باشند. اساساً انرژی به دست آمده از سوخت‌های فسیلی با دو مشکل مواجه می‌باشد: اولین مشکل محدودیت این منابع و دومین مشکل اثرات محیط زیستی آنها است. به همین سبب تولید نیرو از سوخت‌های فسیلی به تدریج با انرژی‌های تجدید پذیر جایگزین خواهد شد [۱]. در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر (مانند انرژی هسته‌ای، هیدروالکتریک، ژئوترمال، بادی، بیوماس و خورشیدی)، انرژی خورشیدی دارای پتانسیل بیشتری است که آن را بهترین گزینه نسبت به سوخت‌های فسیلی می‌سازد. مقدار انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد آنقدر گسترده است که در یک روز می‌تواند نیاز ۲۷ سال کل بشر را تامین کند [۲].

تا کنون انواع گوناگونی از سلول‌های خورشیدی ساخته شده‌اند که عبارتند از سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون کریستالی [۳]، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون لایه نازک غیر کریستالی، سلول‌های خورشیدی لایه نازک، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مواد آلی مانند سلول‌های خورشیدی رنگ دانه‌ای، سلول‌های خورشیدی پلیمری و سلول‌های خورشیدی مبتنی بر کریستال مایع. اخیراً ثابت شده است که وارد ساختن نانو ساختارهایی از مواد در سلول‌های فوتوولتایی درجه‌ای برای توسعه سلول‌ها با قیمت کمتر [۴-۶] و حتی با زیر لایه‌هایی از جنس پلیمر ساخته شده است. [۷-۹] در سال‌های اخیر "نانو کریستال‌های نیمه هادی معدنی



شکل ۱ - سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی ساخته شده در این تحقیق

" که با عنوان نقاط کوانتوم (Dots Quantum) یا به اختصار QDs، نامیده می‌شوند، امید بخش ساخت نسل جدیدی از سلول‌های خورشیدی شده است. این نوع سلولها، نسل جدیدی هستند که امروزه توجه بسیاری از دانشمندان در حوزه سلول‌های فتوولتاییک را به خود معطوف ساخته است. نقاط کوانتومی به دلیل اندازه و ساختارشان مورد توجه قرار گرفته‌اند و دارای ویژگی خاصی هستند که مواد در حالت توده ندارند [۱۰-۱۲]. نقاط کوانتومی اجازه می‌دهند که اتصال خوبی میان مواد دهنده و پذیرنده الکترون وجود داشته باشد، این ویژگی، برای به دست آوردن بازده بالا بسیار ضروری می‌باشد. علاوه بر این، نقاط کوانتومی می‌توانند به عنوان مولکول‌های حسگر عمل کنند. ویژگی منحصر به فرد سلول‌های ساخته شده با نقاط کوانتومی ناشی از پدیده‌ای است که به آن "برانگیختگی چندگانه" (MEG) گفته می‌شود که سبب افزایش بازدهی این نوع از سلول‌های خورشیدی شده است. نتیجه کلی این

پدیده این است که تنها با جذب یک فوتون، نقاط کوانتومی قادر به تولید چندین زوج الکترون حفره می‌باشند. [۱۳-۱۴] نیمه رساناهای گوناگونی به عنوان حساس کننده در این نوع سلول خورشیدی نقاط کوانتومی استفاده می‌شوند مانند: CdS, CdSe, InP, PbSe, PbS, CuInS₂, Sb₂S₃, [E32] اما از میان تمامی این نیمه رساناها، بیشترین بازدهی برای نیمه رسانای CdSe گزارش شده است [۱۰ و ۱۱].

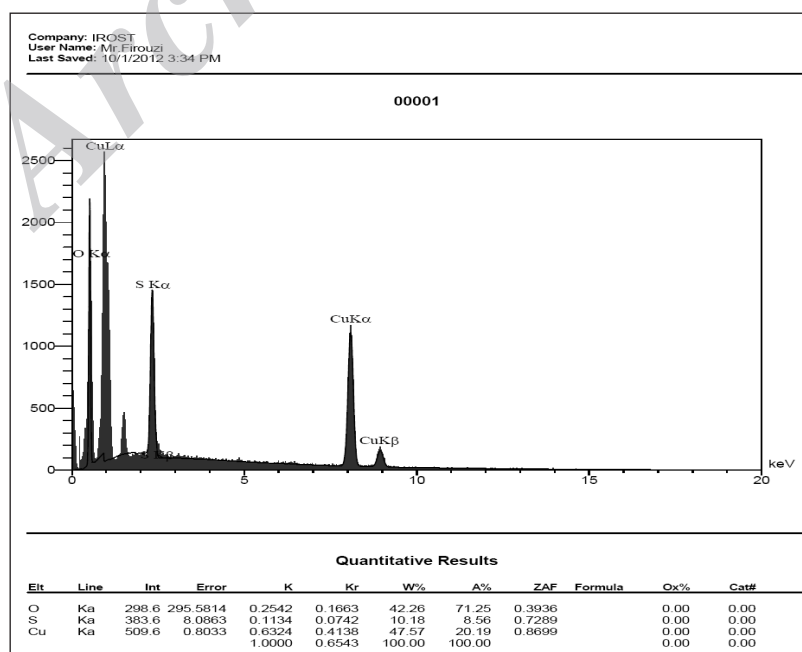
برای تهیه این سلول‌های خورشیدی، می‌بایست نقاط کوانتومی که در آند نقش جاذب نور را دارند، داخل حفره‌های نانو ذراتی از اکسید فلزی ZnO یا TiO₂ قرار گیرند. باید توجه داشت که باند هدایت نقاط کوانتومی باید بالاتر از باند هدایت زیر لایه‌ای باشد که روی آن قرار می‌گیرد و باند ظرفیت آن نیز باید پایین تر از محلول الکترولیت باشد. حساس کردن اکسیدهای فلزی با نقاط کوانتومی با چهار روش امکان پذیر می‌باشد: ۱- رسوب دهی حمام شیمیایی (CBD)، ۲- واکنش دهی و جذب پی در پی لایه یونی (SILAR)، ۳- استفاده از اتصال دهنده‌های دو عاملی و ۴- جذب فیزیکی نقاط کوانتومی بر سطح اکسید فلزی. روش رسوب دهی حمام شیمیایی جدیدترین روشی است که برای نشان دادن نقاط کوانتومی روی سطح اکسیدها فلزی به کار می‌رود [۱۴] ولی در روش سیلار، کنترل بهتری روی توزیع اندازه ذرات خواهیم داشت. در این تحقیق بر طبق نوع نقاط کوانتومی به کار گرفته شده، از هر دو روش استفاده شده است تا بتوانیم سلول‌های خورشیدی نسل سوم تهیه کنیم [۱۵]. در این کار از نقاط کوانتومی CdS, CdSe, ZnS برای حساس کردن سطح آند استفاده می‌شود. از میان گزینه‌های گوناگونی که برای کاتد وجود دارد، استفاده از نانو ذرات Cu₂S که با روش سیلار بر روی شیشه FTO لایه نشانی شده است، بهترین گزینه می‌باشد. برای عملکرد بهتر سلول از الکترولیت پلی سولفید استفاده شده است و برای اولین بار اثر یون Mn²⁺ بر روی بازدهی سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

مواد: تمامی مواد استفاده شده در این تحقیق دارای خلوص تجزیه‌ای بودند. مواد استفاده شده به شرح زیر می‌باشد: سدیم سولفید، استات کادمیوم، سولفیت سدیم، پودر سلنیوم، استات روی نیترات مس ۲آبه، پودر گوگرد، سود و حلال‌های رایج. آماده سازی زیر لایه آند: به منظور آماده سازی زیر لایه، از نانو ذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) با اندازه ذرات ۲۰ (لایه شفاف) و ۴۰۰ نانومتری (لایه پراکنده کننده) استفاده می‌کنیم. به این صورت که لایه از نانو ذرات ۲۰ نانومتری TiO_2 را با روش دکتر بلید روی شیشه FTO آستر کرده و یک عملیات حرارت دهی روی آن انجام می‌دهیم. سپس نانو ذرات ۴۰۰ نانومتری را با همان روش دکتر بلید روی لایه قبلی پوشش داده و مجدداً یک عملیات حرارت دهی به منظور تثبیت لایه انجام می‌شود تا زیر لایه آماده استفاده شود ولی قبل از لایه نشانی می‌بایست زیر لایه به اندازه‌ای تراشیده شود تا سطح فعالی معادل 1 cm^2 به دست آید. اکنون زیر لایه به منظور لایه نشانی نقاط کوانتومی آماده می‌باشد.

۳- تهیه فوتو الکترو آند

برای تهیه فوتو آند حساس شده به نانو ذرات CdS از روش واکنش دهی و جذب پی در پی لایه یونی (سیلار) استفاده می‌شود. هر سیکل سیلار شامل غوطه ورسازی پی در پی الکترو د شیشه‌ای FTO، که با لایه شفاف و لایه پراکنده کننده TiO_2 پوشیده شده است، می‌باشد. بدین صورت که زیر لایه ی TiO_2 را وارد محلولی از S^{2-} کرده و پس از زمان معینی الکترو د را خارج کرده و با آب مقطر شستشو می‌دهیم سپس لایه وارد محلولی از Cd^{2+} می‌شود. این کار یک سیکل سیلار می‌باشد. به منظور افزودن یون Mn^{2+} محلول 0.075 M از منگنز سولفات تهیه کرده و این محلول را به محلول Cd^{2+} اضافه می‌کنیم. این کار اجازه جذب همزمان یون‌های Cd^{2+} و Mn^{2+} را که باعث آسان شدن تلفیق Mn^{2+} در لایه CdS می‌شود، را ممکن می‌سازد. در نتیجه نقاط کوانتومی CdS داخل حفرات خمیر ۲۰ نانومتری قرار می‌گیرد. برای حساس کردن الکترو د با نقاط کوانتومی CdSe، از روش رسوب دهی حمام شیمیایی (CBD) استفاده می‌شود. بدین صورت که محلولی از ترکیب محلول‌های سولفات کادمیوم، سدیم سلنوسولفات (Na_2SeSO_3) و نمک نیتریل سدیم را تهیه کرده و فوتو آندی که با نانو ذرات CdS حساس شده است را داخل آن قرار می‌دهیم و اجازه می‌دهیم تا در دمای 100°C به مدت ۱۲ ساعت لایه نشانی انجام شود. سپس الکترو د را از محلول خارج کرده و با آب مقطر می‌شویم. پس از



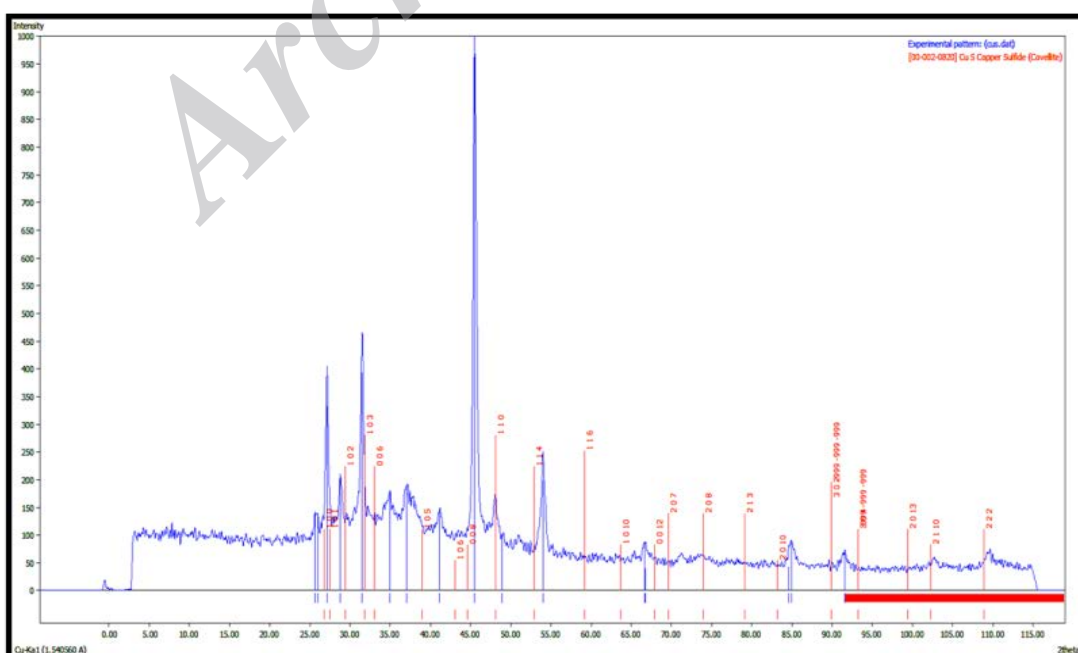
شکل ۲- طیف EDAX از کاند Cu_2S تهیه شده به روش سیلار

آن با استفاده از محلول‌های Zn^{2+} و S^{2-} لایه نشانی ZnS را به طریق سیلار انجام می‌دهیم. اکنون الکتروود با نقاط کوانتومی CdS/CdSe ZnS/CdSe حساس شده است در نتیجه آند سلول خورشیدی آماده می‌باشد [۱۶].

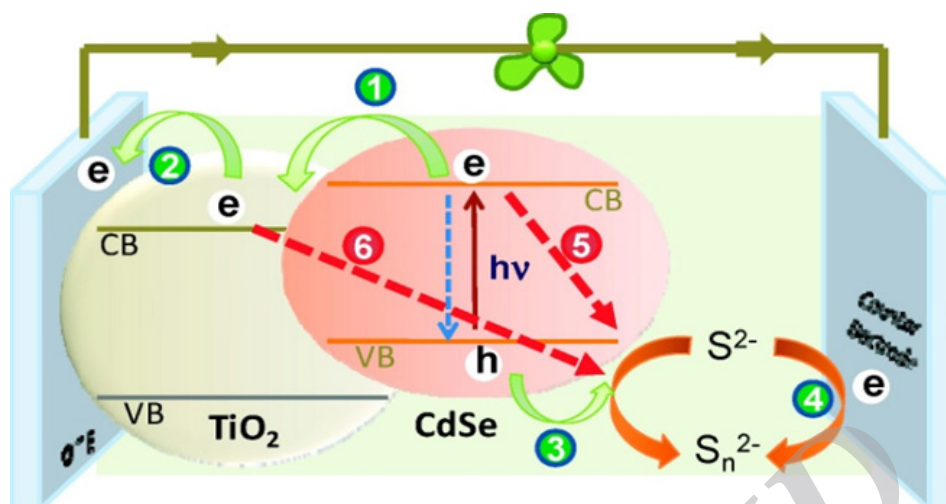
- آماده سازی کاتد: کاتد مورد استفاده در این کار نانو ذرات سولفید مس (Cu₂S) می‌باشد که به روش سیلار بر روی شیشه FTO لایه نشانی شده است. ابتدا می‌بایست شیشه FTO به خوبی تمیز شده باشد سپس محلول‌هایی از Cu^{2+} و S^{2-} تهیه کرده و شیشه FTO را وارد هر یک از محلول‌ها کرده و پس از خروج با اتانول شسته می‌شوند. بدین طریق نانو ذرات Cu₂S روی شیشه FTO قرار می‌گیرند.
- تهیه الکتروولیت: برای تهیه الکتروولیت پلی سولفید محلول‌های گوگرد، سدیم سولفید و سود را با هم ترکیب کرده و در دمای ۱۰۰°C رفلکس می‌کنیم. الکتروولیت سنتز شده باید در یخچال و در تاریکی نگهداری شود.
- بستن سلول خورشیدی: پس از آماده سازی آند، کاتد و الکتروولیت سلول خورشیدی، نوبت به بستن سلول خورشیدی می‌رسد. سلول خورشیدی به طریق ساندویچی با استفاده از فضا دهنده که پلیمری با ضخامت ۲۵ میکرومتر می‌باشد، بسته می‌شود. فضا دهنده علاوه بر این که باعث بسته شدن سلول می‌شود، فاصله‌ای مابین دو الکتروود کاتد و آند، ایجاد می‌کند که این فاصله محلی برای قرارگیری الکتروولیت می‌باشد. پس از قرار دادن فضا دهنده بین کاتد و آند، سیستم را حرارت داده تا فضا دهنده ذوب شده و کاتد و آند به هم بسته شوند. پس از آن از سوراخی که قبلاً روی کاتد تعبیه شده است، الکتروولیت تزریق می‌شود. اکنون سلول خورشیدی آماده برای اندازه گیری می‌باشد. شکل ۱ نمایی از سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی را نشان می‌دهد.
- مشخصه یابی سلول خورشیدی : به منظور اندازه گیری پارامترهای گوناگون سلول خورشیدی، از سیستم شبیه ساز اشعه خورشید (solar simulator) با 1/5 AM و دستگاه اتو لب (lab Auto) استفاده می‌شود [۱۷]. این پارامترها برای دوسولول خورشیدی که یکی از آنها با Mn^{2+} اصلاح شده است را در شرایط یکسان اندازه گیری می‌کنیم.

۴- بحث و بررسی

در سالهای اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از نقاط کوانتومی در سلول‌های خورشیدی انجام شده است. در میان نقاط کوانتومی بسیاری که مورد بررسی قرار گرفته است، نانو کریستال‌های سنتز شده نیمه هادی با پهنای باند وسیع که به اختصار بصورت (WBSC) نشان داده می‌شوند، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در مقایسه با سایر فوتوحسگرها، نقاط کوانتومی



شکل ۳- طیف XRD نانو ذرات سولفات مس



شکل ۴. طرح شماتیک انتقال الکترون در یک سلول خورشیدی بر پایه نقاط کوانتومی

دارای ویژگی‌های زیادی هستند از جمله اینکه راحت تر سنتز می‌شوند، ارزان تر هستند، دارای ضریب جذب بالایی می‌باشند، دارای پهنای بانندی هستند که با تغییر اندازه ذرات قابل تنظیم می‌باشند و و راندمان بالاتری دارند [۱۸] و دارای این خاصیت هستند که تنها با جذب یک فوتون می‌توانند چندین حفره و الکترون ایجاد کنند و از اینرو دارای این ظرفیت هستند که بازدهی محدود سلول‌های خورشیدی نوع اول و دوم را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۱۳ و ۱۴].

برای آماده سازی کاند از روش سیلار استفاده شده است و در ۲۰ مرحله، زیر لایه FTO در محلول کاتیونی و آنیونی فرو برده شد. برای مشخصه یابی نوع و اندازه ذرات لایه نشانی شده به این روش، تمامی مراحل لایه نشانی را بر روی یک ورقه آلومینیومی در ابعاد ۱/۵ cm² تکرار می‌کنیم تا از آن طیف EDAX تهیه کنیم.

شکل ۲ طیف EDAX حاصل از نانو ذرات Cu₂S را نشان می‌دهد. از این طیف می‌توان دریافت که نسبت‌های مولی S به Cu برابر ۱/۲ می‌باشد که به معنای تشکیل نانو ذرات Cu₂S می‌باشد.

شکل ۳ طیف XRD نانو ذرات سولفات مس را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن اندازه نانو ذرات Cu₂S از همین طیف XRD استفاده می‌شود و برای اینکار از فرمول زیر بهره گرفته می‌شود.

$$(kx\lambda)/(\beta \cdot \cos\theta) = d$$

K = فاکتور شکل که مقدار ثابتی دارد و معمولاً برای ساده سازی مقدار ۰/۹ را برای آن در نظر می‌گیرند.

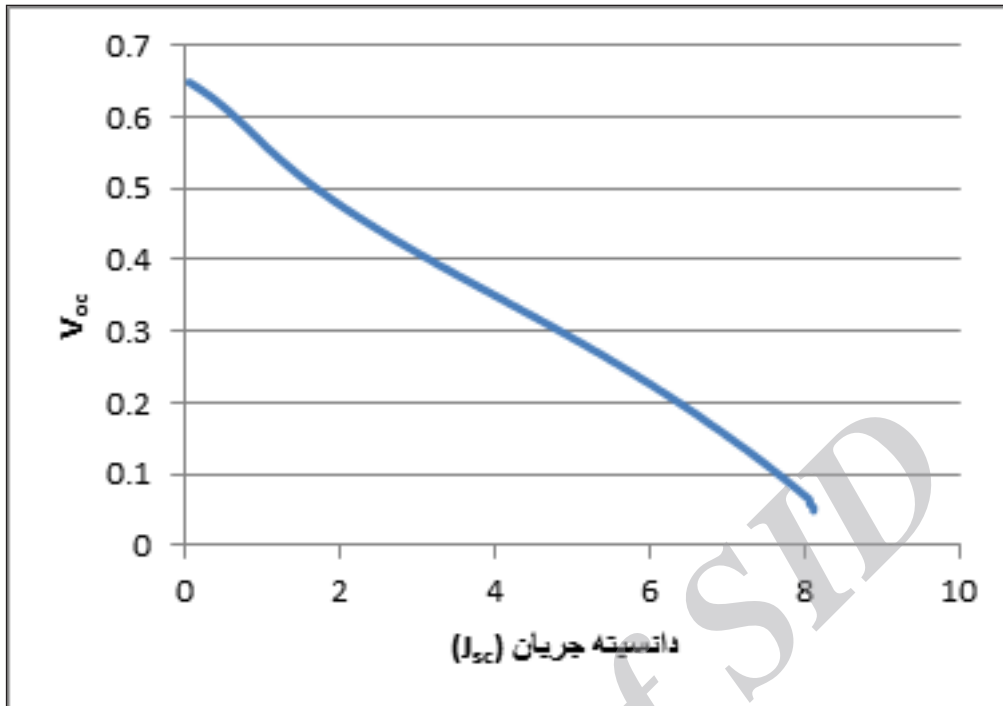
λ = طول موج استفاده شده در پراش پرتو ایکس

β = پهنای کامل در نیم ماکزیمم بر حسب رادیان

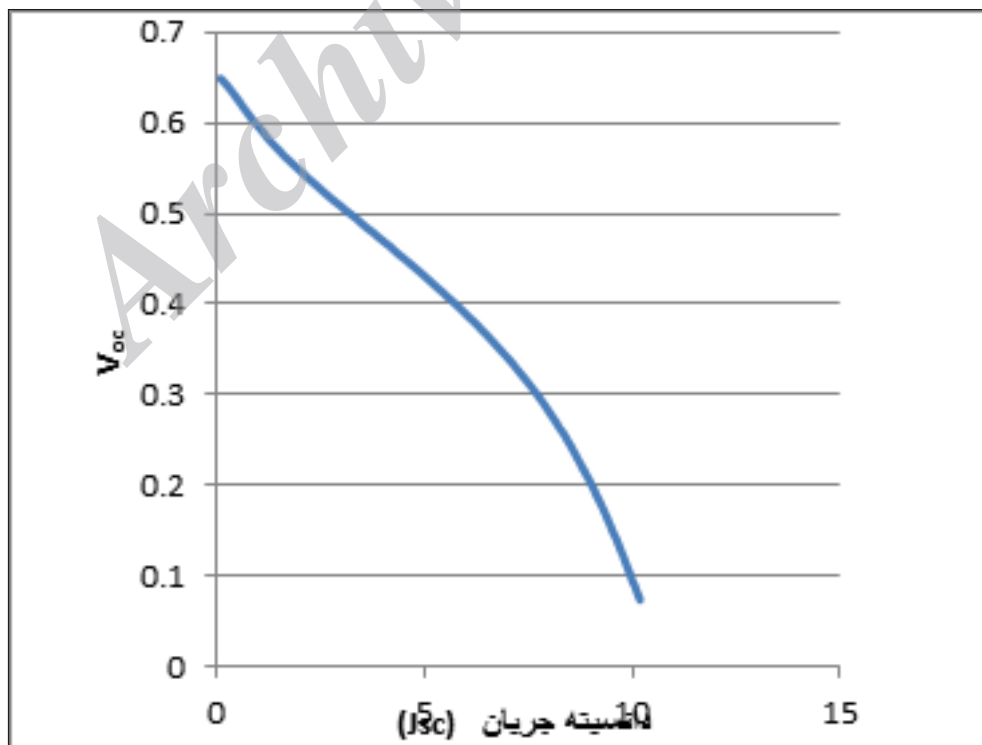
θ = زاویه پراگ مربوط به پیک ناشی از پراش بر حسب درجه

که در نتیجه اندازه ذرات سولفات مس به کمک این معادله برابر ۱۷/۵ نانومتر و با استفاده از آزمایشات مشابه برای نقاط کوانتومی ZnS, CdSe, CdS مابین ۷ تا ۹/۵ نانومتر بدست آمد.

همانگونه که در طرح شماتیک شکل ۴ نشان داده می‌شود. نحوه عملکرد سلول به این صورت است که نور تابیده شده به فوتوآند که با نقاط کوانتومی حساس شده است سبب ایجاد زوج الکترون - حفره در نیمه رسانا می‌شود. سپس الکترون آزاد شده به لایه TiO₂ نفوذ کرده و حفره نیز یک الکترون از اکسایش الکترولیت دریافت می‌کند تا به حالت پایدار برسد. الکترون آزاد شده نیز در مدار خارجی حرکت می‌کند. بدین ترتیب یک سیکل الکتروشیمیایی انجام می‌شود. در این کار سعی بر آن است که بازدهی این نوع از سلول‌ها بهبود یابد. یکی از روشهای اصلاح نانوکریستالهای نیمه رسانا، افزایش ناخالصی به آنها می‌باشد به عنوان مثال با افزودن فلزات واسطه‌ای که از نظر نوری فعال می‌باشند، امکان اصلاح الکترونی و خواص فیزیک نوری نقاط کوانتومی امکان پذیر می‌باشد. ناخالصی، ترازوی از الکترون مابین باند گپ نقاط کوانتومی ایجاد می‌کند که این، جدایی بار و جفت شدگی دینامیکی را تغییر می‌دهد [۱۹]. در این تحقیق به منظور افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی ساخته شده توسط کوانتومی، از یون Mn²⁺



شکل ۵: نمودار ولتاژ-دانشیته جریان برای داده‌های سلول بدون اصلاح با منگنز



شکل ۶: نمودار ولتاژ-دانشیته جریان برای داده‌های سلول پس از اصلاح با منگنز

جدول ۱

نمونه	J_{sc}	V_{oc} (V)	π (%)
Cds/CdSe/ZnS	1.18	0.649	1.22
CdS/CdSe/ZnS	2.11	0.67	1.35
Plus Mn	2.33	0.649	1.89
Plus Mn	2.16	0.65	1.68

استفاه شده است که آنالیزهای مربوط به سلول خورشیدی نشان داد که افزودن این یون واسطه، منجر به افزایشی ۵۴٪ در راندمان سلول خورشیدی می‌شود و این میزان افزایش بالا تر از روش‌های دیگر می‌باشد [۲۰ و ۲۱]. نقاط کوانتومی همچون CdSe/CdS /ZnS دوپ شده با Mn^{2+} ، نشری در حدود ۵۸۵ nm، داشته که به سبب انتقال $d \rightarrow d$ در یون منگنز می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای مشخص یابی سلول‌های خورشیدی وجود دارد که در این تحقیق از روش اندازه گیری جریان- ولتاژ استفاده شده است. برای اندازه گیری جریان- ولتاژ احتیاج به شرایط استاندارد است تا سلول‌های خورشیدی تحت تابش نور خورشید قرار گیرد که به آن سیستم شبیه ساز خورشید می‌گوییم.

مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده برای چند سلول خورشیدی ساخته شده بر پایه نقاط کوانتومی ZnS/CdSe/CdS به علاوه سلول خورشیدی اصلاح شده با Mn^{2+} که با استفاده از سیستم شبیه ساز اشعه خورشید و دستگاه اتولب بدست آمده است، در جدول ۱ آورده شده است. همچنین نمودارهای ولتاژ- دانسیته جریان مربوط به دو نوع سلول‌های خورشیدی تهیه شده در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، برای هر مرحله دو سلول خورشیدی تهیه شد تا تکرار پذیری آزمایشات نیز بررسی شود. در نمونه‌های سوم و چهارم بر نقاط کوانتومی تهیه شده میزان ۱٪ میلی مول یون منگنز افزوده شده است. VOC برای سلول‌های بدون اصلاح با منگنز و سلول اصلاح شده با منگنز تقریباً در یک محدوده می‌باشند. ولی مقدار JSC (دانسیته جریان در مساحت سطح 0.25cm^2 در سلول اصلاح شده با Mn^{2+} افزایش داشته است در نتیجه مقدار بازدهی برای سلول اصلاح شده با یون Mn^{2+} نسبت به سلول‌های بدون اصلاح سطح، افزایش یافته است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی ساخته شد و آزمایشات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفت تا میزان بازدهی این سلول‌ها افزایش یابد. با توجه به اطلاعات بدست آمده در این تحقیق، مشاهده می‌شود که استفاده از Mn^{2+} به عنوان اصلاح کننده سطح آند منجر به افزایش چشمگیری در بازدهی سلول خورشیدی (افزایش ۵۴ درصدی) می‌شود. بدین وسیله نتیجه می‌شود که استفاده از برخی یون‌های واسطه به دلیل انتقالات الکترونی، منجر به افزایش قابل توجهی در عملکرد نقاط کوانتومی و در پی آن ارتقای راندمان سلول‌های خورشیدی ساخته شده توسط این نانو ذرات می‌گردد.

مراجع

1. A.G .Martin ”,Thin film solar cells :review of materials ,technologies and commercial status “J .Mater .Sci .Mater Electron, 18 (2007) S15-S19.
2. L. Ligui, L. Guanghao, Y. Xiaoni and Z. Enle, “ Progress in polymer solar cell” Chinese Science bulletin, 52 (2007) 1145-158.
3. V. Svrcek, A. Slaoui, JC. Muller, “ Silicon nano-crystals as light converter for solar cells”. Thin Solid Films, 451(2004)384-8.
4. N. Seok-in, Y. Byung-Kawan, K. Seok-Soon, V. Doojin, “ Fully Spray-coated ITO-free organic solar cells for low cost power generation” Sol. Energ.Mat. Sol. Cells, 94(2010)1333-1337.



13. S. Qing, Y. Akari, T. Satoru and T. Taro, " CdSe quantum dot-sensitized solar cell employing TiO₂ nanotube working – electrode and Cu₂ S counter – electrode. Appl. Phys. Lett. 97 (2010)123107-3.
14. L. Yafeng, P. Aiyang, Z. Xiangzhen, W. Mingdeng, " CdS quantum- dot- sensitized Zn₂Sno₄ solar cell" Electrochimica Acta, 56 (2011) 4902-4906.
15. M.A. Green, "Third Generation Photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond", Physica E, 14 (2002)65–70.
16. Z.A. Peng, X. Peng, "Formation of high-quality CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals using CdO as Precursor", J. Am. Chem. Soc. 123 (2001) 183–184.
17. Badescu V, Landsberg PT. Influence of photon recycling on solar cell efficiency" Semicond Sci Technol, 12(1997)1491–7.
18. Trupke T, Green MA, Wu` rfel P. Improving solar cell efficiencies by upconversion of sub-band-gap light. J Appl Phys, 92(2002)4117–22.
19. A.L. Efros, M. Rosen, M. Kuno, M. Nirmal, D.J. Norris, M. Bawendi, Band edge exciton in quantum dots of semiconductors with a degenerate valence band: dark and bright exciton states" Phys. Rev. B 54 (1996) 4843–4856
20. A. Luque and A. Marti," Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", Phys. Rev. Lett. 78, (1997) 5014–5017.
21. S. M. Hubbard, C. D. Cress, C. G. Bailey, R. P. Raffaele, S. G. Bailey, and D. M. Wilt " Effect of strain compensation on quantum dot enhanced GaAs solar cells" Appl. Phys. Lett. 92 (2008)123512-8.
5. A. Goetzberger, J. Luther, G. Willeke, "Solar cells: past, present, future" Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, 74 (2002) 1–11.
6. Z. Yaohong, Z. Jun, Y. Xuecgaoi, and W. Junfeng," the optical and electricahemical properties of CdS/CdSe co-sensitised TiO₂ solar cells prepared by successive ionic layer adsorption and reaction processes, Sol. Energ. 86 (2012) 964-971.
7. V. Dyakonov, Electrical aspects of operation of polymer-fullerene solar cells, Thin Solid Films. 451–452 (2004) 493–497.
8. S. E. Shaheen, C.J. Brabec, N.S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, J.C. Hummelen, 2.5% efficient organic plastic solar cells, Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 841–843.
9. T. Fromherz, F. Padinger, D. Gebevehu, C.J. Brabec, J.C. Hummelen, N.S. Sariciftci, Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells. 63 (2000) 61–68.
10. R. Laghumavarapu, M. El-Emawy, N. Nuntawong, A. Moscho, L. F. Lester, and D. L. Huffaker, Improved device performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells with GaP strain compensation layers, Appl. Phys. Lett. 91 (24), p. 243115, 2007.
11. Y. Zusing, C. Chia-Ying, L. Chi-Wei, L. Chi-Lin, C. Huan-Tsung, " Quantum dot- sensitized solar cells featuriong CuS/CoS electrodes provide 4.1% efficiency" Adv. Energ. Mat. 1 (2011) 259-264.
12. G. Nestor, V. Teresa Lana, S. Qing, T. Taro and G. Roberto, " Sensitization of titanium dioxide photoanodes with cadmium selenide quantum dots prepared by Silar photoelectrochemical and carrier dynamics studies" J. Phys. Chem, 114 (2010) 21928-21937.