



## نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و روش‌های بهبود بازدهی

شیما موسی‌خانی<sup>۱\*</sup>، علی‌اصغر صباغ‌الوانی<sup>۳\*</sup>، علی‌اصغر سرایی<sup>۳</sup>، سجاد کیانی<sup>۱\*</sup>، حسن سامعی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۳- استادیار، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

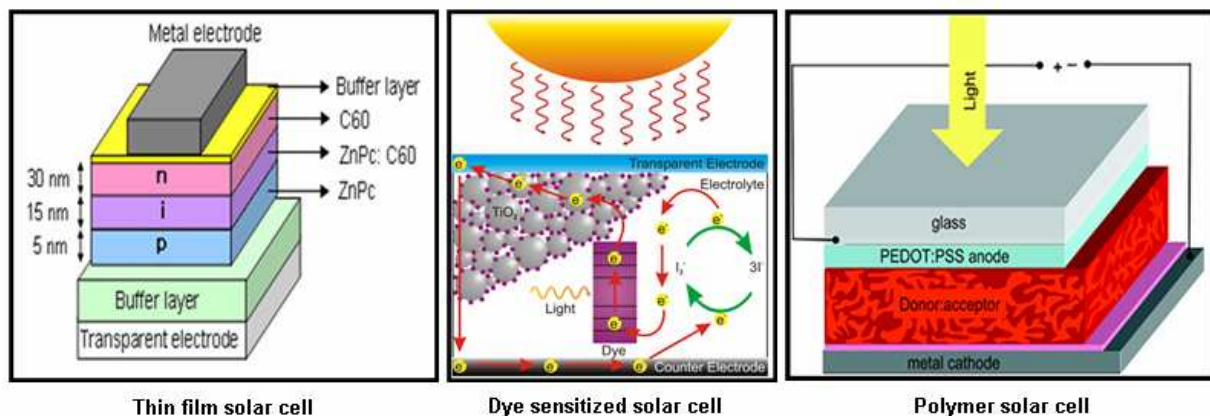
تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۱ تاریخ بازبینی: ۹۱/۷/۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۴

### چکیده

سلول‌های فتوولتائیک منابعی پاک، مؤثر و مطمئن از انرژی الکتریکی را در اختیار قرار می‌دهند. نسل اول این فناوری، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی می‌باشد. به دلیل برخی مشکلات این نسل، مانند هزینه بالا و احتمال زیاد بازترکیب جفت الکترون-حفره در پیوندگاه p-n و در نتیجه کاهش بازده، نسل‌های بعدی سلول‌های خورشیدی مانند سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا و نقاط کوانتومی و همچنین سلول‌های خورشیدی پلیمری به وجود آمدند. همواره محققان در صنعت فتوولتائیک سعی داشتند تا در راستای افزایش بازده، قیمت نهایی سلول را نیز کاهش دهند. در نتیجه این تلاش‌ها راه‌حل‌های مختلفی مانند قراردادن لایه ضد انعکاس جهت افزایش جذب، استفاده از نقاط کوانتومی با محدوده جذب بالا، به کاربردن یک عامل ایجادکننده اتصال عرضی در سلول‌های خورشیدی پلیمری به منظور افزایش سطح فصل مشترک نواحی دهنده و گیرنده و همچنین استفاده از ناخالصی برای تفکیک بهتر جفت الکترون-حفره پدید آمدند. در این مقاله نگاهی اجمالی به نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و برخی راهکارهای ارائه شده جهت افزایش بازده، شده است.

### واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی، بازده، الکترون-حفره، جذب.



۱- مقدمه

سلول‌های فتوولتاییک (PV<sup>۱</sup>) منابعی پاک، مؤثر و مطمئن از انرژی الکتریکی را در اختیار قرار می‌دهند. بالا رفتن بهای نفت، هزینه‌های بالای انرژی، اثرات گازهای گلخانه‌ای و غیره، بشر را مجبور ساخته است تا به دنبال منبعی تجدیدپذیر به منظور کاهش اتکا بر سوخت‌های فسیلی از قبیل زغال‌سنگ، نفت و گاز باشد. دانشمندان در زمینه انرژی به دنبال منابع تجدیدپذیری چون توربین‌های بادی، توربین‌های آبی و سلول‌های خورشیدی هستند. نکته مهم اینجاست که فناوری فتوولتاییک روشی مستقیم به منظور تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی بدون رهاسازی کربن دی‌اکسید یا اثرات گلخانه‌ای است. انرژی خورشیدی بر پایه اثر فتوولتاییک که در سال ۱۸۳۹ کشف شد، استوار است. یک وسیله فتوولتاییک ترکیب یک پیوند p-n در یک ماده نیمه هادی است که در آن ولتاژ از تابش خورشیدی حاصل می‌گردد. فتوولتاییک از فوتون‌ها<sup>۲</sup> استفاده می‌کند تا الکترون‌ها را در یک ماده فعال نوری<sup>۳</sup> تحریک کند. الکترون‌های تحریک شده<sup>۴</sup> به بار<sup>۵</sup> فرستاده می‌شوند و به دستگاه<sup>۶</sup> برمی‌گردند تا مدار<sup>۷</sup> کامل شود. به بیان ساده‌تر سلول خورشیدی وسیله‌ای است که فوتون را از نور گرفته و به الکتریسیته تبدیل می‌کند. اساساً این وسیله باید دو وظیفه را تأمین کند: تولید حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) (CM)<sup>۸</sup> در یک ماده جذب کننده نور و انتقال حامل‌های بار به یک اتصال باشد که الکتریسیته را منتقل کند. زمانی که نور توسط ماده‌ای جذب می‌شود، فوتون‌ها سبب تحریک الکترون‌ها به ترازهای انرژی بالاتر می‌شوند که در یک وسیله فتوولتاییک به دلیل عدم تقارن ذاتی الکترون‌ها قبل از بازگشت به تراز پایه به مدار خارجی تزریق می‌شوند. جذب نور خورشید در نیمه هادی انجام می‌شود. ماده نیمه هادی که در توسعه سلول فتوولتاییک مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌بایست قسمت اعظم طیف خورشیدی را به منظور رسیدن به بازده دریافتی بالا جذب نماید [۱]. در حال حاضر سلول‌های خورشیدی متداول بر پایه تجهیزات فتوولتاییک سیلیکونی می‌باشند که قیمت بالای آنها مشکلی اساسی است. اخیراً سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا به عنوان منبع فتوولتاییک ارزان پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که رنگزا ۷۰٪ شار فوتون خورشیدی را از دست می‌دهد. بنابراین برای بهبود بازده نیاز به یافتن حساس‌کننده‌های جدید با پهنای حساسیت بالا وجود دارد [۲]. از جمله این حساس‌کننده‌ها که امروزه بسیار در دنیا مطرح شده است نقاط کوانتومی<sup>۹</sup> نیمه هادی می‌باشد. در ادامه در مورد هر یک از نسل‌های سلول‌های خورشیدی و روش به کار برده شده جهت افزایش بازدهی و کارایی، توضیح داده خواهد شد.

۲- روش‌های بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی

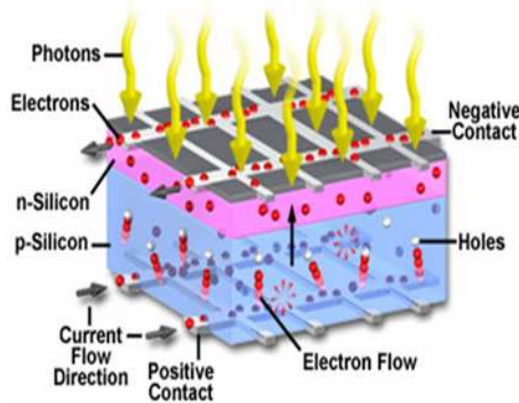
فعالیت‌هایی که جهت بهبود کارایی و بازدهی صورت می‌گیرد در سه حوزه وارد می‌شود:

- ۱- پژوهش‌هایی که در جهت کاهش قیمت هم‌سو با بهینه کردن بازده صورت می‌گیرد.
- ۲- پژوهش‌هایی که فناوری جدیدی را برای ساخت سلول‌های خورشیدی پیشنهاد می‌دهند.
- ۳- پژوهش‌هایی که بر روی ساختار لایه جاذب در سلول‌های خورشیدی انجام می‌گردد.

بر پایه همین تلاش‌ها به تدریج نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی شکل گرفته است.

۱-۲- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی

اولین سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به وسیله قرار دادن نواحی نوع p و نوع n (شکل ۱) و به کار بردن اتصالات فلزی، شکل گرفتند. رشد پیوندگاه<sup>۱۰</sup> p-n در سلول‌های خورشیدی اولیه از توزیع ناخالصی نوع p بورون<sup>۱۱</sup> و نوع n (فسفر) در سیلیکون حاصل می‌شد. این سلول‌های خورشیدی بلافاصله کاربرد عملی در صنعت هوا فضا پیدا کردند و به عنوان منبع تغذیه برای ماهواره‌ها استفاده شدند. تلاش‌های بسیاری برای کاهش هزینه ساخت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی صورت گرفت که منجر به استفاده از سیلیکون‌های چند بلوری و بی‌شکل شد. بازده این نوع سلول‌های خورشیدی در مقایسه با نوع تک‌بلوری کم بود اما در عوض قیمت مناسب‌تری داشت [۳].



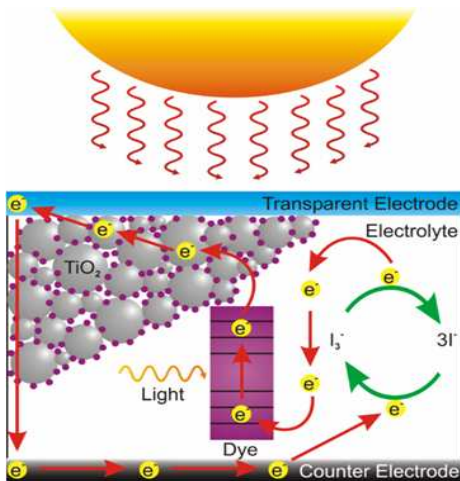
شکل ۱- جریان الکتریکی در سلول خورشیدی پیوندگاه p-n

زمانیکه مقادیر اندکی از ناخالصی‌ها به بلور سیلیکون اضافه می‌گردد، روی سطح فرمی<sup>۱۲</sup> (سطحی که تمام سطوح انرژی قبل از آن با الکترون پر شده است) آن اثر می‌گذارد. به عنوان مثال، اگر سیلیکون با فسفر تلقیح شود الکترون‌های بیشتری به شبکه اضافه شده و سطح فرمی به

1 Polycrystal  
 2 Photon  
 3 Photoactive  
 4 Excited  
 5 Load  
 6 Device  
 7 Circuit  
 8 Carrier multiplication  
 9 Quantum dots

<sup>10</sup> P-n junction  
<sup>11</sup> Boron  
<sup>12</sup> Fermi level

یک فتوالکتروود شامل یک لایه مزومتخلخل<sup>۵</sup> تیتانیوم دی‌اکسید حساس شده به رنگزا و زینتر<sup>۶</sup> شده بر روی شیشه FTO<sup>۷</sup> می‌باشد. شکل ۳ چگونگی ایجاد جریان الکترونی را نشان می‌دهد. عملکرد این سلول به این صورت است که فوتون ورودی<sup>۸</sup> توسط رنگ جذب شده و سبب برانگیخته شدن الکترون می‌گردد. رنگ طوری انتخاب شده است که نوار رسانش<sup>۹</sup> آن بالاتر از نوار رسانش TiO<sub>2</sub> بوده و بنابراین الکترون برانگیخته شده در رنگ می‌تواند به نوار رسانش TiO<sub>2</sub> تونل‌زنی<sup>۱۰</sup> کند.



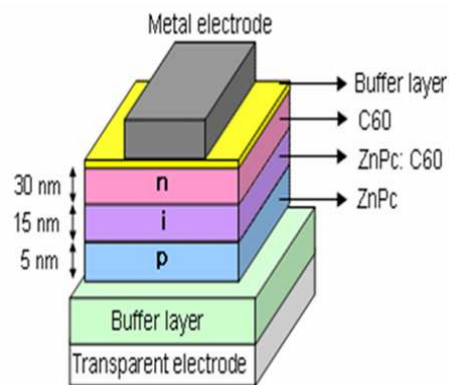
شکل ۳- جریان الکترونی در سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا.

نانوذرات TiO<sub>2</sub> به عنوان حامل این الکترون عمل کرده و در نهایت الکترون به الکتروود FTO می‌رسد. در این بین رنگ توسط محلول احیا شده و آماده دریافت فوتون بعدی می‌گردد. الکترونی که به الکتروود می‌رسد، توسط سیم به الکتروود احیاکننده انتقال یافته و در آنجا الکتروولیت را احیا می‌کند. به این ترتیب جریان برقرار می‌شود. مواد رنگزای رایج مورد استفاده، N3<sup>۱۱</sup> و N719<sup>۱۲</sup> بوده که جذب نوری بالایی در ناحیه مرئی اما ضریب جذب پایینی در ناحیه زیر قرمز<sup>۱۳</sup> (IR) دارند. این در حالی است که طیف خورشیدی محدوده ۰/۳ - ۲/۵ μm را پوشش می‌دهد. بهترین بازده تبدیل انرژی به‌دست آمده توسط سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا حدود ۱۱٪ می‌باشد [۶]. در توسعه رنگزاها برای کاربردهای خورشیدی مشخص شد که حضور گروه‌های کربوکسیل، دومین عامل مهم و تأثیرگذار بعد از بخش جذب است [۷]. گروه‌های کربوکسیل به عنوان نگه‌دارنده مکان‌های روی سطح TiO<sub>2</sub>

پتانسیل‌های منفی‌تر انتقال پیدا می‌کند و اگر بور اضافه شود سطح فرمی به پتانسیل‌های مثبت‌تر انتقال پیدا می‌کند. این کار نیرو محرکه‌ای برای جدایش الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده توسط فوتون در پیوندگاه و حرکتشان به سمت بار ایجاد می‌کند. تمام فناوری‌های اخیر در بازار، قابلیت دسترسی و نیز گستره استفاده از انرژی خورشیدی را بهبود بخشیده‌اند. اما با وجود این اگر سلول‌های فتوولتاییک بخواهد برای همیشه نقش عمده‌ای در حوزه انرژی داشته باشد باید قیمت آن حتی از آنچه که امروز هست کمتر شود. بنابراین، مواد و ساختارهای جدید به منظور حرکت روبه جلو، گسترش پیدا کردند [۳].

## ۲-۲- سلول‌های خورشیدی لایه نازک<sup>۱</sup>

فناوری لایه نازک به منظور کاهش مصرف ماده نیمه هادی، توانایی ساخت سلول‌های خورشیدی ارزان در مساحتی بزرگ و همچنین دستیابی به سلول‌های خورشیدی ساخته شده سری به صورت تک لایه، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تنها ۱٪ از ماده مورد نیاز برای تهیه سلول‌های سنتی در این نوع از سلول‌ها مورد استفاده قرار می‌شود [۴]. از آنجایی که ضخامت لایه نازک n و p بسیار کم است (شکل ۲)، بنابراین ماده جاذب نور باید به خوبی نور خورشید را جذب و نوار شکاف<sup>۲</sup> بهینه‌ای داشته باشد [۵]. به دلیل هزینه بالای سلول‌های خورشیدی پیوندگاه p-n و احتمال زیاد بازترکیب جفت الکترون-حفره<sup>۳</sup> در این نوع و در نتیجه کاهش بازده، نسل‌های بعدی سلول‌های خورشیدی به تدریج به‌وجود آمدند.



شکل ۲- نمونه‌ای از سلول خورشیدی لایه نازک.

## ۲-۳- سلول‌های خورشیدی نانوبلوری

### ۲-۳-۱- سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا<sup>۴</sup>

سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا (DSSC) نسبت به سلول‌های خورشیدی بر پایه سیلیکون هزینه کمتری دارند. اجزای اصلی (DSSC)

<sup>5</sup> Mesoporous

<sup>6</sup> Sinter

<sup>7</sup> Fluorine doped tin oxide

<sup>8</sup> Incident photon

<sup>9</sup> Conduction band

<sup>10</sup> Tunneling

<sup>11</sup> [cis-di (thiocyanato)-bis (2, 2'-bipyridyl-4, 4'-dicarboxylic acid)-ruthenium (II)]

<sup>12</sup> [cis-di (thiocyanato)-bis (2, 2'-bipyridyl-4-carboxylate-4'-carboxylic acid)-ruthenium (II)]

<sup>13</sup> Infrared

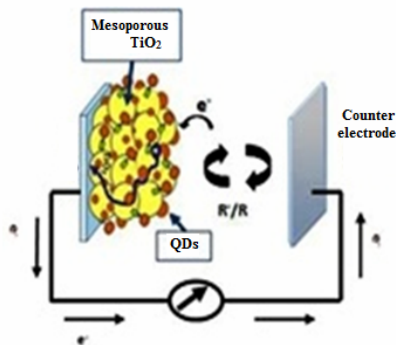
<sup>1</sup> Thin film solar cells

<sup>2</sup> Gap

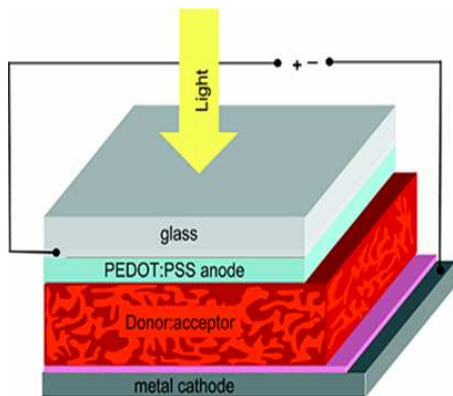
<sup>3</sup> Electron-hole pairs

<sup>4</sup> Dye-sensitized solar cells

حساسیت از خود نشان دادند. به عبارت دیگر علاوه بر ناحیه مرئی قادر به جذب طیف زیر قرمز نزدیک نیز می‌باشند و در مقایسه با نقاط کوانتومی رایج نظیر CdS و CdSe، پهنای حساسیت آنها ۲ تا ۴ برابر است. در نتیجه نقاط کوانتومی  $Ag_2S$  می‌تواند به عنوان حساس‌کننده‌ای مؤثر جهت تولید سلول‌های خورشیدی با بازدهی بالا مورد استفاده قرار گیرد [۶].



شکل ۴- شمایی از یک سلول خورشیدی حساس‌شده به نقاط کوانتومی.



شکل ۵- ساختار سلول خورشیدی پلیمری.

### ۲-۱-۳- نقاط کوانتومی $Ag_2Se$

نوع دیگری از این خانواده، نقاط کوانتومی  $Ag_2Se$  می‌باشد که تمام طیف خورشیدی را پوشش داده و پهنای حساسیت آن ۷ تا ۱۴ برابر سیستم‌های بر پایه Cd است. همچنین جریان تولیدی حاصل از آن ۴ برابر سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به رنگزای  $N_3$  می‌باشد. در نتیجه این نقاط کوانتومی می‌تواند انتخابی مناسب برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی با بازدهی بالا باشد [۲].

### ۲-۳- افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی پلی‌سیلیکونی با

#### استفاده از نانوذرات

در این روش، نانوذرات کروی سیلیکا در یک محلول فعال سطح پخش و بر روی یک سلول خورشیدی سیلیکونی، توسط روش پوشش‌دهی چرخشی اعمال می‌شود تا بلورهای کلوییدی روی سطح تشکیل گردد (شکل ۶). این لایه همانند یک لایه ضد انعکاس برای سلول‌های خورشیدی عمل

مخصوصاً سطح (۱۰۱) آناناز، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. گروه‌های کربوکسیل به سطح اتم‌های تیتانیوم متصل می‌شوند. با گروه‌های اتصالاتی بیشتر، مواد رنگزا با پیوند قوی‌تر به  $TiO_2$  می‌چسبند و در نهایت سرعت بالاتر تزریق الکترون را در اختیار قرار می‌دهند.

### ۲-۳-۲- سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به نقاط کوانتومی<sup>۱</sup>

سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به نقاط کوانتومی امکان ساخت تجهیزات فتوولتائیک با بازدهی بالا و هزینه کم را ممکن می‌سازند [۹]. تولید جریان در این دسته نیز مشابه سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به رنگزا می‌باشد شکل ۴. این سلول‌های خورشیدی نسبت به مواد رنگزا مزایایی از جمله: شکاف انرژی قابل تنظیم، ضریب جذب بالا، تولید جفت الکترون-حفره‌های چندگانه و افزایش جذب در طول موج‌های بالاتر نور خورشید (IR) را در اختیار قرار می‌دهند [۶]. نقاط کوانتومی همچنین مقاطع جذب<sup>۲</sup> تا چندین مرتبه بزرگتر از مواد رنگزا دارند و می‌توانند بار انتقال یافته از نیمه هادی به لایه  $TiO_2$  را انباشته کنند. این نسل در مقایسه با سلول خورشیدی پیوندگاه p-n پتانسیل تولید بازده بالاتری را از خود نشان داده است [۱۰]. نقاط کوانتومی به محققان این امکان را می‌دهد که محل پیوندهای حساس‌کننده‌ها را تنظیم کرده و خواص جذبی و نیروهای محرکه برای انتقال الکترون را تغییر دهند.

### ۲-۴- سلول‌های خورشیدی پلیمری

از مزایای این نسل (شکل ۵) که سبب جلب توجه محققان شده است، می‌توان به هزینه پایین، ایجاد سطح وسیع و انعطاف‌پذیری آنها اشاره کرد. از طرف دیگر از جمله ضعف‌های سلول‌های خورشیدی پلیمری، جریان الکترونی پایین، خواص جذبی نه چندان مناسب نسبت به طیف خورشیدی، تخریب محیطی با جذب پرتو فرابنفش (UV) و غیره می‌باشد. اجزای تشکیل دهنده این نسل عبارتند از شیشه هادی که به عنوان آند و جهت جمع‌آوری حفره‌ها استفاده می‌شود، فیلم‌های نازک شامل لایه‌های فعال نوری و کاتد فلزی (شکل ۵) [۱۱].

### ۳- روش‌های نوین صورت گرفته جهت افزایش بازدهی

#### نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی

### ۱-۳- سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به نقاط کوانتومی بر

#### پایه نقره

### ۱-۱-۳- نقاط کوانتومی $Ag_2S$

این ماده یکی از جدیدترین حساس‌کننده‌های نوری قابل کاربرد در سلول‌های خورشیدی است. نقاط کوانتومی در این پژوهش با استفاده از روش روش جذب و واکنش پی در پی لایه یونی<sup>۳</sup> در لایه نانومتخلخل دی‌اکسید تیتانیوم سنتز می‌شود. نقاط کوانتومی  $Ag_2S$  محدوده ۴۰۰-۱۰۰۰ nm

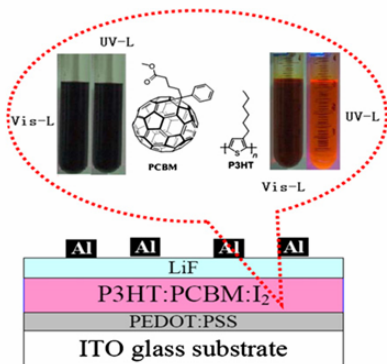
<sup>1</sup> Quantum-dots sensitized solar cells

<sup>2</sup> Cross sections

<sup>3</sup> Successive ionic layer adsorption and reaction deposition

۲-۳-۲- تلخیص ید<sup>۴</sup>

در این روش سلول خورشیدی پلیمری (PCBM /P3HT) با غلظت‌های مختلفی از ناخالصی ید ساخته می‌شود (شکل ۸). افزایش در چگالی جریان اتصال کوتاه با وارد شدن ید به ساختار مشاهده می‌گردد. این افزایش بازده را می‌توان به انتقال و جمع‌آوری بهتر حامل بار و دریافت فوتون بیشتر، نسبت داد. بررسی ریخت شناسی و جدایش فاز فیلم‌های نازک پلیمری به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۵</sup> نشان می‌دهد که جدایش فاز (بین دوپلیمر مورد استفاده P3HT و PCBM) به‌طور مشخصی افزایش می‌یابد که برای تفکیک جفت الکترون-حفره مفید خواهد بود. در نهایت چگالی جریان نوری سلول خورشیدی پلیمری در مقایسه با نوع بدون ید آن افزایش می‌یابد [۱۴].

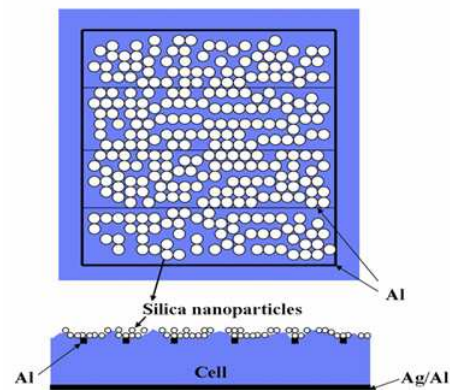


شکل ۸- ساختار سلول خورشیدی پلیمری تلخیص شده به‌وسیله ید.

## ۴- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن هزینه بالا و احتمال زیاد باز ترکیب جفت الکترون-حفره‌های تولید شده در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی پیوندگاه p-n، استفاده از این نوع سلول‌های خورشیدی مقرون به صرفه نمی‌باشد. سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا نیز اگرچه هزینه کمتری را سبب می‌شوند، اما به دلیل محدوده کوچک جذب رنگزا، بازده چندان مناسبی به دست نمی‌دهند. سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی با محدوده جذب بالا، تا حدودی توانسته است بر این محدودیت مواد رنگزا غلبه کند. از سوی دیگر نسل پلیمری این فناوری نیز بستری مناسب را برای ارزان تر شدن آن فراهم کرده است. اما توجه به این نکته ضروری است که استفاده از این مواد پلیمری هزینه‌های بعدی جهت بهبود بازدهی را در بر دارد. چرا که همواره نیاز به موادی است که انتقال الکترون و جداسازی جفت الکترون-حفره را تسهیل نماید. در نتیجه باید به دنبال موادی بود که هم‌سو با کاهش قیمت سلول نهایی، بازده مناسبی را نیز در اختیار قرار دهد.

می‌کند. این لایه خواص ضد انعکاسی عالی در ناحیه فرابنفش و زیر قرمز نزدیک، نشان می‌دهد. عوامل مختلفی مانند استحکام، پایداری حرارتی و شفاف بودن نسبت به فرابنفش، این ماده را جهت استفاده در محیط بیرونی و در معرض نور، مناسب ساخته است. همچنین با استفاده از این لایه افزایش ۱/۳ درصدی در بازده سلول با بهینه‌کردن عوامل موثر در پوشش‌دهی و غلظت نانوذرات مشاهده می‌شود [۱۲].

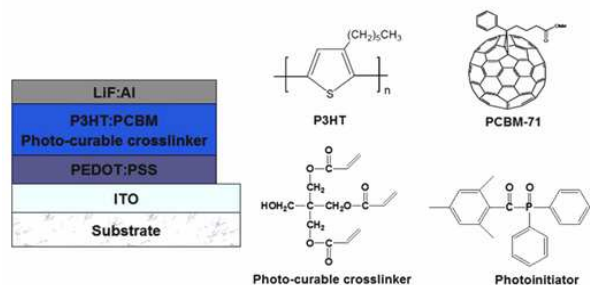


شکل ۶- چگونگی قرار گرفتن نانوذرات سیلیکا.

## ۳-۳- بهبود بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری

۱-۳-۳- ایجاد اتصالات عرضی با پخت‌شونده نوری<sup>۱</sup>

در این روش کارآیی سلول فتوولتائیک آلی، بوسیله نظم‌دهی مولکولی پلیمرهای مورد استفاده (P3HT<sup>۲</sup> و PCBM-71<sup>۳</sup>) به‌وسیله عامل ایجاد اتصالات عرضی نوری و شروع‌کننده نوری بهبود می‌یابد (شکل ۷). عامل ایجاد اتصالات عرضی با مقادیر مختلف به منظور تغییر ساختار سلول خورشیدی به لایه فعال اضافه می‌شود. نتایج حدود ۱۱٪ بهبود را نشان می‌دهند. بهبود بازده عمدتاً به دلیل افزایش جریان اتصال کوتاه در نتیجه تشکیل سطح مؤثر در فصل مشترک نواحی دهنده و گیرنده می‌باشد [۱۳].



شکل ۷- ساختار سلول خورشیدی پلیمری و مواد مورد استفاده.

<sup>۱</sup> Photo-curable cross linker

<sup>۲</sup> Poly(3-hexylthiophene)

<sup>۳</sup> [6,6]phenyl-C61-butyrac methyl ester

<sup>۴</sup> Iodine doping

<sup>۵</sup> Atomic Force Microscopy

## ۵- مراجع

1. R. Jha, Ph. d, "Solar Cell Technology and Application", New York, Taylor and Francis Group, LLC, **2010**.
2. Tubtimate, M. W. Lee, G. J. Wang, "Ag<sub>2</sub>Se quantum-dot sensitized solar cells for full solar spectrum light harvesting", *J. Power Sources* 196, 6603-6608, **2011**.
3. M. A. Green, "The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution", *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 17, 183-189, **2009**.
4. G. Aberle, "Thin-film solar cells", *Thin Solid Films* 517, 4706-4710, **2009**.
5. M. K. Nazeeruddin, S. M. Zakeeruddin, J.-J. Lagref, P. Liska, P. Comte, C. Barolo, G. Viscardi, K. Schenk, M. Grätzel, "Stepwise assembly of amphiphilic ruthenium sensitizers and their applications in dye-sensitized solar cell", *Coord. Chem. Rev.* 248, 1317-1328, **2004**.
6. Tubtimtae, K. L. Wu, H. Y. Tung, M. W. Lee, G. J. Wang, "Ag<sub>2</sub>S quantum dot-sensitized solar cells Electrochemistry", *Communications*, 12, 1158-1160, **2010**.
7. H. Imahori, S. Hayashi, H. Hayashi, A. Oguro, S. Eu, T. Umeyama, Y. Matano, "Effects of porphyrin substituents and adsorption conditions on photovoltaic properties of porphyrin-sensitized TiO<sub>2</sub> cells", *J. Phys. Chem. C* 113, 18406-18413, **2009**.
8. F. Schiffmann, J. Vande Vondele, J. Hutter, R. Wirz, A. Urakawa, A. Baiker., "HYPERLINK "http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp100268r" Protonation-Dependent Binding of Ruthenium Bipyridyl Complexes to the Anatase (101) Surface", *J. Phys. Chem. C* 114, 8398-8404, **2010**.
9. J. Chen, C. Li, D. W. Zhao, W. Lei, Y. Zhang, M. T. Cole, D. P. Chu, B. P. Wang, Y. PCui, XW. Sun, W. I. Milne, "A quantum dot sensitized solar cell based on vertically aligned carbon nanotube templated ZnO arrays", *Electrochem. Commun.* 12, 1432-1435, **2010**.
10. Q. Deng, X. Wang, C. Yang, H. Xiao, C. Wang, H. Yin, Q. Hou, J. Li, Z. Wang, X. Hou, "Theoretical study on In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN quantumdots solar cell", *Physica B* 406, 73-76, **2011**.
11. S. G. Bailey, S. Hubbard, R. P. Raffaele, "Handbook of Self Assembled Semiconductor Nanostructure for Novel Devices in Photonics and Electronics", first ed, UK, Elsevier, **2008**.
12. C. K. Huang, H. H. Lin, J. Y. Chen, K. W. Sun, W. L. Chang, "Efficiency enhancement of the poly-silicon solar cell using self-assembled dielectric nanoparticles", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 95, 2540-2544, **2011**.
13. M. S. Ryu, J. Jang, "Improvement of conversion efficiency of bulk heterojunction organic solar cells using photo-curable crosslinker", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94, 1384-1388, **2010**.
14. Z. Zhuo, F. Zhang, J. Wang, J. Wang, X. Xu, Z. Xu, Y. Wang, W. Tang, "Efficiency improvement of polymer solar cells by iodine doping", *Solid-State Electron.* 63, 83-88, **2011**.