



## سلول‌های خورشیدی پلیمری: ساختار، عملکرد و روش‌های بهبود بازدهی

سجاد کیانی<sup>۱\*</sup>، علی‌اصغر صباغ الوانی<sup>۲\*</sup>، منوچهر خراسانی<sup>۳</sup>، شیما موسی‌خانی<sup>۴\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷

۲- استادیار، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷

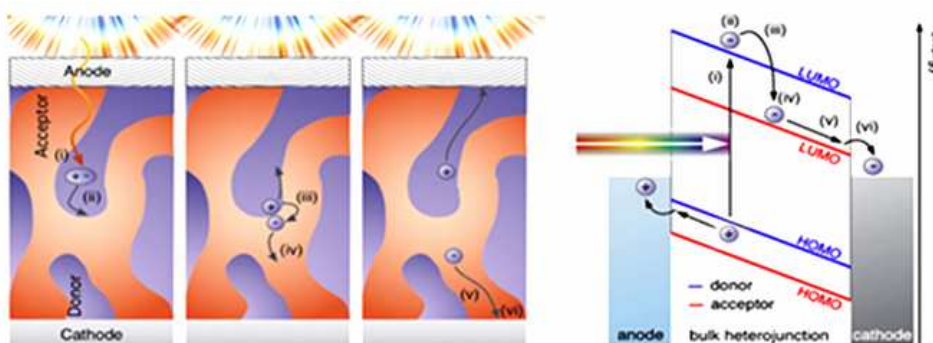
تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۱ تاریخ بازبینی ۱: ۹۱/۷/۹ تاریخ بازبینی ۲: ۹۱/۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۱

### چکیده

تا به امروز پژوهش‌های بسیاری در جهت افزایش بازده، کاهش قیمت و همچنین تلاش برای ارائه فناوری‌های نوین در زمینه سلول‌های خورشیدی انجام شده است. در ادامه این پیشرفت‌ها، نواقص و مشکلات سلول‌های مایع باعث شد که نگاه محققان به سمت سلول‌های خورشیدی پلیمری معطوف گردد، از مزایای این نسل که توجه محققان را به خود جلب کرده است، می‌توان به هزینه پایین، ایجاد سطح وسیع، انعطاف‌پذیری، طراحی در سطح مولکولی و غیره اشاره کرد. با توجه به ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری که مهم‌ترین قسمت آن لایه حساس به نور است، محققان تلاش‌های بسیاری را در جهت بهبود این لایه و افزایش بازده آن انجام دادند. در حال حاضر آلیاژ پلیمری P3HT:PCBM به عنوان بهترین گزینه پیشنهاد شده است. علاوه بر این بهبود  $V_{oc}$  و کنترل ساختار نیز از راه‌های افزایش بازده در این نسل است.

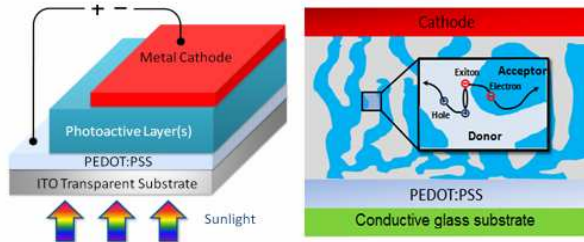
### واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی، پلیمر، بازده، جذب.



\*Corresponding author: [sabbagh\\_alvani@aut.ac.ir](mailto:sabbagh_alvani@aut.ac.ir)

۱- مقدمه



شکل ۱- ساختار یک سلول خورشیدی پلیمری (سمت چپ)، ساختار سلول خورشیدی توده با اتصالات ناهمگن (سمت راست).

از جمله وظایف لایه PEDOT:PSS<sup>3</sup> جلوگیری از واکنش بین لایه فعال و الکتروود می‌باشد. نقش اصلی تولید جریان بر عهده جفت الکترون-حفره می‌باشد، بنابراین بر روی آند جهت نمودن انتقال حفره‌ها، از یک لایه ۱۰ نانومتری PEDOT:PSS که هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به سامانه پلیمری دارد استفاده می‌شود. لایه حساس به نور می‌تواند به صورت حرارتی در خلأ یا پوشش‌دهی چرخشی روی زیرآیند هادی نشاندن شود تا فیلمی با ضخامت حدود ۲۰۰-۱۰۰ nm تشکیل شود. در نهایت الکتروود فلزی روی لایه حساس نوری نشاندن می‌شود. لایه‌های حساس نوری می‌توانند به صورت تک‌لایه، لایه‌ای یا توده با اتصالات ناهمگن<sup>۴</sup> باشند. در دهه ۱۹۹۰ با توجه به این نکته که طول نفوذ جفت‌های الکترون-حفره بسیار کم (در حدود ۲۰-۱۰ nm) بوده و ضخامت لایه‌های فعال نیز بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ nm است ساختارهای اتصالات ناهمگن پیشنهاد شدند.

ساختار اتصالات ناهمگن به وسیله آلیاژسازی پلیمرهای الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده با یکدیگر در همان ابتدا ساخته می‌شوند [۳]. بنابراین سطح فصل مشترک افزایش یافته و فاصله‌ای که جفت‌های الکترون-حفره برای رسیدن به فصل مشترک طی می‌کنند، کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه اتصالات ناهمگن بر این مشکل که همه جفت‌های الکترون-حفره توانایی رسیدن به فصل مشترک دهنده-گیرنده را ندارند، غلبه می‌کند. شکل ۱ (سمت راست) ساختار این نوع سلول را نشان می‌دهد. یکی از شرایط پلیمرهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی وجود پیوندهای دوگانه در ساختار مولکولی آن می‌باشد تا بتواند با استفاده از خاصیت غیر مستقر بودن پیوندها نور خورشید را جذب نموده و سپس با ایجاد حامل بار، جریان الکترونی مناسب را فراهم کند [۴]. از پلیمرهای الکترون‌دهنده که مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به P3HT<sup>۵</sup>، PTB7<sup>۶</sup>، MEH-PPV<sup>۷</sup> و MDMO-PPV<sup>۸</sup> و از نوع الکترون‌گیرنده می‌توان به PCBM<sup>۹</sup> و PC70BM<sup>۱۰</sup> اشاره کرد. بسیاری از تحقیقات انجام شده از

امروزه نیاز است که انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر بیشتری در سهم انرژی جهانی داشته باشند. از آنجایی که سوخت‌های فسیلی رو به اتمام است، نیاز به یک منبع انرژی پایدار به خوبی احساس می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۵ میلادی تقاضای انرژی جهان به ۲۷ تراوات برسد و افزایشی ۱۰ تراواتی نسبت به امروز داشته باشد. با توجه به این افزایش تقاضا، سوخت‌های فسیلی نمی‌توانند جوابگوی انرژی مورد نیاز آیندگان باشند و می‌بایست به دنبال منابع جایگزینی بود که محدود به استفاده برای زمان حال نباشد [۱].

سلول‌های فتوولتائیک منابعی پاک، مؤثر و مطمئن از انرژی الکتریکی را در اختیار قرار می‌دهند. اساس کار سلول‌های فتوولتائیک، جذب فوتون از نور خورشید، جدایش بار و در نهایت جمع شدن الکترون در آند و حفره در کاتد که کامل شدن مدار، همراه با تولید جریان است.

تا به امروز پژوهش‌های بسیاری در جهت افزایش بازده، کاهش قیمت و همچنین تلاش برای ارائه فناوری‌های نوین در زمینه سلول‌های خورشیدی انجام شده است. در حال حاضر سلول‌های خورشیدی متداول بر پایه تجهیزات فتوولتائیک سیلیکونی می‌باشند که قیمت بالای آنها مشکلی اساسی است. در این راستا سلول‌های خورشیدی پلیمری طیف وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است.

از مزایای این نسل که توجه محققان را به خود جلب کرده است، می‌توان به هزینه پایین، ایجاد سطح وسیع، انعطاف‌پذیری، طراحی در سطح مولکولی و غیره اشاره کرد [۲].

جهت درک بهتر، برخی از مفاهیم به کار برده شده در این مقاله به اختصار توضیح داده می‌شود:

- **بازده سلول خورشیدی:** درصد حداکثر خروجی انرژی الکتریکی به انرژی نور ورودی
- $I_{sc}$ : چگالی جریان اتصال کوتاه
- $V_{oc}^1$ : ولتاژ مدار باز
- **جذب:** میزان فوتونی که توسط ماده دهنده دریافت می‌گردد
- $E_g$ : شکاف انرژی هر ماده<sup>۲</sup>

۲- اجزای سلول‌های خورشیدی پلیمری

سلول‌های خورشیدی پلیمری معمولاً از فیلم‌های نازک شامل لایه‌های فعال نوری بین دو الکتروود با وظیفه متفاوت، تشکیل شده است. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که شیشه هادی به عنوان آند جهت جمع‌آوری حفره‌ها استفاده می‌شود که از جمله خواص بارز آن هدایت الکتریکی و عبورپذیری بالا می‌باشد.

<sup>3</sup> Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate)

<sup>4</sup> Bulk-heterojunction

<sup>5</sup> Poly (3-hexylthiophene)

<sup>6</sup> Poly (9, 9'-dioctylfluorene-co-bis-N, N'-(4-butylphenyl)-bis-N, N'-phenyl-1, 4-phenylenediamine

<sup>7</sup> Poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1, 4-phenylene vinylene

<sup>8</sup> Poly[2-methoxy-5-(3,7'-dimethyloctyloxy)-1, 4-phenylenevinylene]

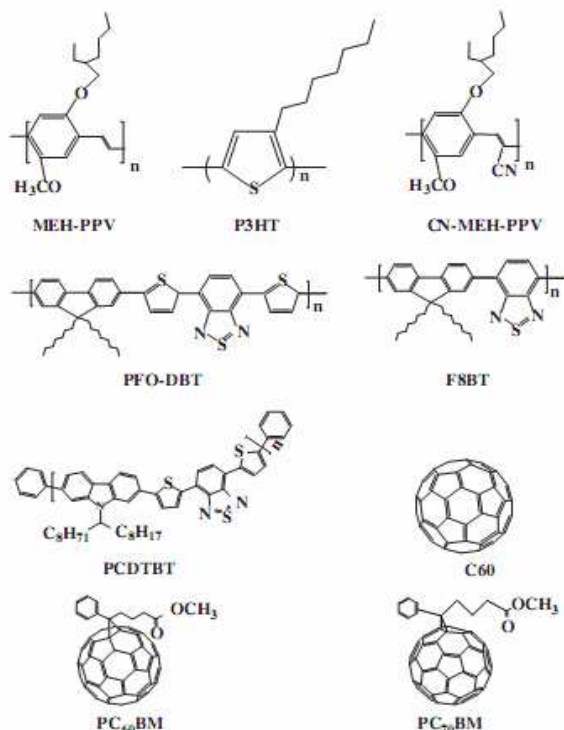
<sup>9</sup> [6,6]phenyl-C61-butyric acid methyl ester

<sup>10</sup> [6,6]phenyl-C71-butyric acid methyl ester

<sup>1</sup> Voltage of open circuit

<sup>2</sup> Band gap

۵. الکترون به کاتد و حفره به آند منتقل می‌شوند.  
 ۶. این جدایش بار باعث ایجاد جریان در سلول خورشیدی پلیمری خواهد شد [۶].



شکل ۲- ساختارهای مختلف پلیمرهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی.

۴- روش‌های بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی پلیمری

- روش‌های بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی پلیمری شامل موارد زیر است [۳, ۷]:
۱. بهبود جذب
  ۲. بهبود  $V_{oc}$
  ۳. کنترل ساختار
  ۴. استفاده از نقاط کوانتومی

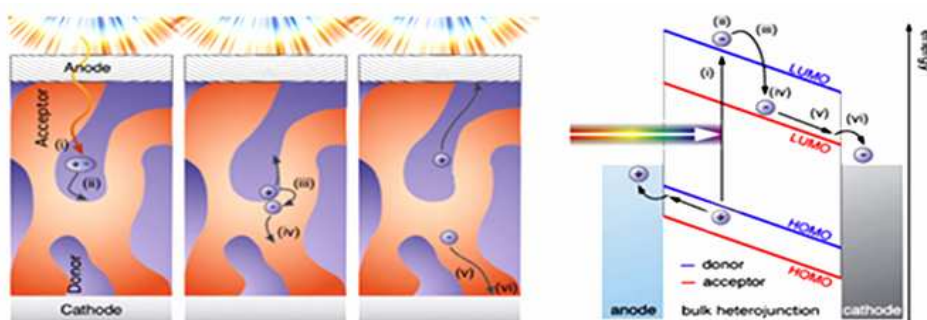
P3HT به تنهایی در لایه پلیمری استفاده نموده اند، این در حالی است که تحقیقات بسیاری نیز بر روی آلیاژ حاصل از P3HT و PCBM صورت گرفته است و نتایج نشان داده که به دلایل مختلفی از جمله، جدایش فازی مناسب ساختارهای دهنده و گیرنده در عین داشتن حد قابل قبولی از خاصیت دهنده و گیرندگی باعث دستیابی به بازدهی بالاتری نسبت به سایر ساختارها گردیده است، بنابراین با توجه به بررسی‌های صورت گرفته آلیاژ P3HT و PCBM می‌تواند بهترین گزینه برای استفاده در لایه پلیمری مورد نظر جهت کاربرد در سلول‌های خورشیدی پلیمری باشد [۵]. شکل ۲ ساختارهای مختلف پلیمرهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.

۳- عملکرد سلول‌های خورشیدی پلیمری

به صورت خلاصه می‌توان این‌گونه بیان نمود که یک جفت الکترون-حفره از طریق جذب فوتون در ماده دهنده الکترون تولید می‌شود و به سطح فصل مشترک ماده الکترون‌دهنده و ماده الکترون‌گیرنده نفوذ می‌کند. جفت الکترون-حفره از هم جدا شده و الکترون‌ها به سمت مولکول الکترون‌گاتیوتر حرکت می‌کنند. بنابراین، جدایش الکترون-حفره صورت گرفته و باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌شود (شکل ۳) [۶]. هر ماده آلی دارای یک سطح انرژی  $HOMO^1$  به‌عنوان آخرین سطح انرژی پرشده توسط الکترون و یک سطح انرژی  $LUMO^2$  به‌عنوان پایین‌ترین سطح انرژی خالی از الکترون می‌باشد، در سلول خورشیدی پلیمری که دارای یک فاز دهنده و یک فاز گیرنده می‌باشد، مراحل تکمیل مدار الکتریکی از جذب فوتون عبوری تا تشکیل الکترون و غیره به شرح زیر می‌باشد (شکل ۳- سمت راست):

۱. نفوذ فوتون به فاز دهنده که باعث تشکیل یک جفت الکترون-حفره می‌شود.
۲. جفت الکترون-حفره تشکیل شده به سطح مشترک ماده دهنده-گیرنده نفوذ می‌کند.
۳. جفت الکترون-حفره از هم جدا می‌شود.
۴. الکترون به  $LUMO$  مولکول گیرنده منتقل می‌شود.

<sup>1</sup> Highest occupied molecular orbital  
<sup>2</sup> Lowest unoccupied molecular orbital



شکل ۳- فرآیند جذب نور و تولید الکترون-حفره در سلول‌های خورشید Bulk-heterojunction نمودار انرژی (سمت راست)، سینتیک جدایش (سمت چپ).

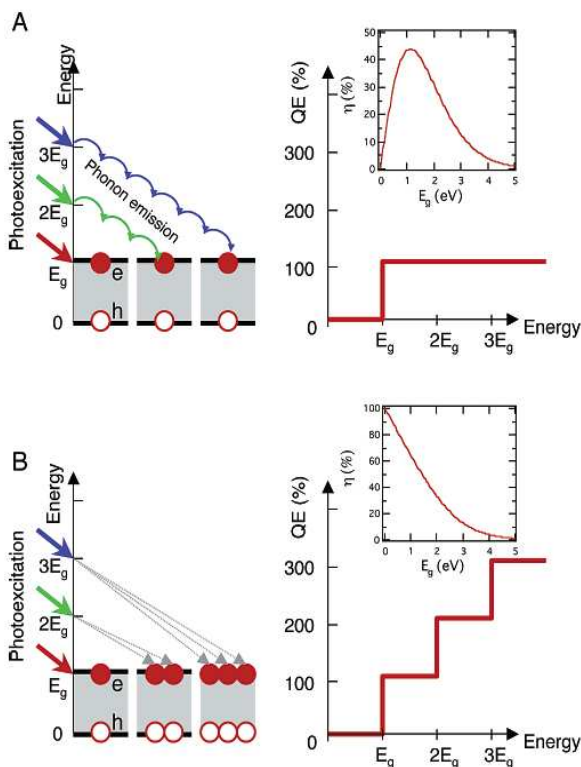
#### ۱-۴- بهبود جذب

تولید برانگیختگی‌های چندگانه<sup>۳</sup> موجب افزایش در بازده سلول خورشیدی گردید [۱۲].

#### ۵- مزایا، معایب و کاربردهای سلول‌های خورشیدی پلیمری

از جمله مزایای سلول‌های خورشیدی پلیمری نسبت به سایر انواع سلول‌های خورشیدی، می‌توان به هزینه پایین تولید، ایجاد سطح وسیع، انعطاف‌پذیری و نیز از جمله معایب این نسل، می‌توان به جریان الکترونی پایین، مشخصه‌های جذبی که مناسب برای طیف خورشید نیستند، تخریب محیطی و غیره اشاره نمود، با توجه به اهمیت دستیابی به سلول‌های خورشیدی با هزینه پایین محققان در تلاش برای بهبود کارایی این نسل و برطرف نمودن معایب آن هستند، که در این مقاله سعی شد به برخی موارد اشاره گردد [۱۳].

در راستای صنعتی‌سازی این سلول‌های خورشیدی شرکت‌های کونورکا<sup>۴</sup>، پلکس‌ترونیک<sup>۵</sup>، هلیاتک<sup>۶</sup> مشغول فعالیت می‌باشند که در شکل ۵ نمونه‌هایی از کاربردهای این سلول‌های خورشیدی که به صورت صنعتی تولید شده‌اند، آورده شده است.



شکل ۴- (A) برانگیختگی در مواد معمول (B) برانگیختگی چندگانه با برخورد یک فوتون.

یکی از عوامل محدودکننده در سلول‌های خورشیدی پلیمری جذب ضعیف می‌باشد. دلیل این امر متناسب نبودن شکاف انرژی بزرگ مواد با طیف خورشیدی است که سبب اتلاف نوری می‌گردد. به عنوان مثال شکاف انرژی<sup>۱</sup> PPV برابر ۱/۸۵ الکترون-ولت بوده که به این ترتیب PPV تا طول موج ۶۷۰ nm یعنی ۴۶٪ فوتون‌ها را جذب می‌کند. این در حالی است که در صورت وجود شکاف انرژی ۱/۱ الکترون-ولت (مانند Si) بیش از ۹۰٪ فوتون‌ها جذب می‌گردد [۷].

روشی که برای برطرف نمودن این مشکل ارائه گردیده است، سنتز پلیمرهایی با شکاف انرژی کمتر بوده و آنچه که در این مرحله قابل ذکر است و می‌بایست مورد توجه قرار گیرد این است که پلیمر سنتز شده باید با ساختار الکترون گیرنده ما اختلاط خوبی داشته باشد [۸].

#### ۲-۴- بهبود Voc

جهت افزایش Voc، در ساختار سل خورشیدی از یک لایه ۱۰ nm<sup>۲</sup> PEDOT:PSS که هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به سامانه پلیمری دارد استفاده می‌شود، با استفاده از اصلاح سطح به وسیله دمای بالا می‌توان هدایت الکتریکی این لایه را افزایش داد. روش دیگر که به این منظور استفاده می‌شود تلقیح این ساختار با گلیسرول و سوربیتول و غیره می‌باشد که به عنوان مثال در مورد تلقیح با گلیسرول خاصیت هدایت الکتریکی ۱۰۰۰ برابر خواهد شد [۷].

#### ۳-۴- کنترل ساختار

اهمیت این قسمت در فراهم نمودن حداکثر سطح مشترک بین پلیمرهای دهنده و گیرنده است. ساختار مناسب به تنهایی فصل مشترک کافی با نیروی بالا برای جدایش الکترون-حفره‌ها را فراهم نمی‌کند بلکه پیوستگی و درهم نفوذ کردن صحیح شبکه برای انتقال مؤثر الکترون‌ها و حفره‌ها مورد نیاز است [۶]. شرط لازم برای رسیدن به شرایط بهینه، امتزاج پذیری مناسب دو ماده است، که خاصیت ذاتی ماده بوده و همچنین وابسته به حلال است. برای دستیابی به بهترین ساختار می‌توان از نمودارهای فازی استفاده نمود [۹، ۱۰].

#### ۴-۴- استفاده از نقاط کوانتومی

در حالت عادی بر اثر برخورد یک فوتون یک جفت الکترون-حفره تولید می‌شود و باقیمانده انرژی نیز به هدر می‌رود. در حالی که در نقاط کوانتومی با جذب یک فوتون برابر  $E_g$ ،  $2E_g$  و  $3E_g$  به ترتیب یک، دو و سه جفت الکترون-حفره تولید می‌شود (شکل ۴).

از آنجاییکه ما به دنبال افزایش بازده سلول خورشیدی هستیم با اضافه نمودن نقاط کوانتومی به ساختار پلیمری می‌توان با بهره‌گیری از خاصیت

<sup>3</sup> Multiple exciton generation

<sup>4</sup> Konorka

<sup>5</sup> Plextronics

<sup>6</sup> Heliatek

<sup>1</sup> polyphenylene vinylene

<sup>2</sup> Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) poly (styrenesulfonate)





شکل ۵- کاربردهای مختلف صنعتی شده از سلول‌های خورشیدی پلیمری.

این موضوع، با توجه به پایین بودن بازده سلول‌های خورشیدی استفاده از روش‌های مختلفی جهت افزایش بازدهی این نوع سلول‌ها، پیشنهاد گردیده است که به چهار روش اشاره شد. با توجه به دلایل ذکر شده سامانه آلیاژی P3HT:PCBM در حال حاضر بهترین گزینه برای استفاده در لایه فعال سلول‌های خورشیدی پلیمری می‌باشد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت موضوع انرژی، کاربرد و ساخت سلول‌های خورشیدی در اولویت پژوهشی بسیاری از مراکز تحقیقاتی دنیا قرار گرفته است. روند ساخت سلول‌های خورشیدی با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر یک از نسل‌ها تا به امروز پیشرفت‌های گوناگونی داشته است و اینک با توجه به اهمیت مسئله اقتصادی، ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری در اولویت قرار دارد. در کنار

#### ۷- مراجع

1. J. Weickert, R. B. Dunbar, H. C. Hesse, W. Wiedemann, L. Schmidt-Mende, "Nanostructured organic and hybrid solar cells", *Adv. Mater.*, 23, 1810-1828, **2011**.
2. B. Paridaa, S. Iniyamb, R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 15, 1625-1636, **2011**.
3. B. Saunders, "Hybrid polymer/nanoparticle solar cells: Preparation, principles and challenges", *J. Colloid Interface Sci.*, 369, 1-15, **2012**.
4. G. Li, R. Zhu, Y. Yang, "polymer solar cells", *nature photonics*, 6, 153-161, **2012**.
5. M. T. Dang, L. Hirsch, G. Wantz, "P3HT: PCBM, Best seller in polymer photovoltaic research", *Adv. Mater.*, 23, 3597-3602, **2011**.
6. C. Deibel, V. Dyakonov, "Polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells", *Rep. Prog. Phys.*, 73, 1-40, **2010**.
7. W. Cai, X. Gong, Y. Cao, "Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94, 114-127, **2010**.

8. Y. Wang, W. Wei, X. Liu, Y. Gu, "Research progress on polymer heterojunction solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 98, 129-145, **2012**.
9. J. Zhao, A. Swinnen, G. V. Assche, J. Manca, D. Vanderzande, B. V. Mele, "Phase diagram of P3HT/PCBM blends and Its implication for the stability of morphology", *J. Phys. Chem. B*, 113, 1587-1591, **2009**.
10. B. Lim, J. Jo, S. In .Na, J. W. Kim, S. S. Kim, D. Y. Kim, "A morphology controller for high-efficiency bulk-heterojunction polymer solar cells", *J. Mater. Chem*, 20, 10919-10923, **2010**.
11. C. Muller, T. A. M. Ferenczi, M. C. Quiles, J. M. Frost, D. C. Bradley, P. Smith, N. S. Stutzmann, J. Nelson, "Binary organic photovoltaic blends: A simple rationale for optimum compositions", *Adv. Mater*, 20, 3510-3515, **2008**.
12. P. V. Kamat, "Quantum dot solar cells: semiconductor nanocrystals as light harvesters", *J. Phys. Chem. C*, 112, 18737-18753, **2008**.
13. M. Henini, "Handbook of self assembled semiconductor nanostructures for novel devices in photonics and electronics", First ed, Amsterdam, Elsevier, **2008**.