

مطالعه بازده تابشی سلول های خورشیدی فوتولتائیک آلی با استفاده از باند گاف

علی محمودلو

استادیار گروه علوم پایه دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

چکیده

سلول های خورشیدی یا سلول های فوتولتائیک، ابزارهایی هستند که انرژی نورانی را جذب کرده و آن را تبدیل به جریان الکتریکی می کنند. امروزه در بیشتر کشور های توسعه یافته و در حال توسعه و در روزگاری که بحث محدودیت انرژی فسیلی، جوامع بشری را به فکر استفاده از منابع انرژی پاک مانند آب، باد و غیره انداخته است، خورشید به عنوان یک منبع انرژی بسیار گسترده و سلولهای خورشیدی به عنوان ابزارهایی برای بکار گیری و استفاده از این منبع لایزال انرژی مطرح می شوند. اکثر سلولهای خورشیدی ای که در دنیا به کار برده می شوند، از مواد معدنی مانند Si (سیلیکون) ساخته می شوند. ولی دلایلی از جمله هزینه ساخت بالا و فرایند دشوار ساخت سلولهای خورشیدی از مواد معدنی، دانشمندان را بر آن داشته است که توجهشان را به سمت مواد دیگری معطوف کنند که توانایی کاربرد در سلولهای خورشیدی را داشته و مشکلات مربوط سیلیکون را نداشته باشد. به نظر می رسد مواد آلی بهترین کاندیدا برای این منظور باشند. در این مقاله عملکرد و بازده سلولهای خورشیدی فوتولتائیک را در دماهای پایین ($T < 300K$) را بررسی کرده ایم، به طوری که فرض شده است که نقص های الکترونی به طور مؤثر فریز می شوند و فقط تلفات بازده، ناشی از گسیل اشعه خواهد بود.

واژه های کلیدی: فوتولتائیک، تلفات بازده، سلول خورشیدی آلی، نقص الکترونی، اکسایتون

۱- مقدمه

یکی از اصلی ترین و مهمترین چالش های بشری در قرن ۲۱، دست یابی به انرژی پایدار و در عین حال سازگار با محیط زیست است. طبق برآوردهای انجام شده، ۸۵٪ منابع انرژی ای که توسط انسان به مصرف می رسد، سهم سوخت های فسیلی از قبیل نفت و گاز و غیره می باشد که خود این سوختها، عامل اصلی بسیاری از آلودگی های زیست محیطی مانند گازهای گلخانه ای است. خورشید به عنوان یکی دیگر از منابع انرژی تجدید پذیر، قادر به تولید انرژی به میزان 120000 TW می باشد. سلول خورشیدی، فرصتی برای در اختیار گرفتن این انرژی پاک، رایگان و فراوان است. [۱]

در سلول های خورشیدی آلی، از مواد نیم رسانای آلی به عنوان محیط فعال سلول استفاده می شود. در حالت کلی مکانیسم عملکرد یک سلول خورشیدی آلی را می توان به ۴ بخش تقسیم کرد که عبارتند از: جذب نور و تولید اکسایتون: نور با برخورد به ماده آلی نیم رسانا، در صورتی که انرژی آن از گاف انرژی بین HOMO و LUMO بیشتر باشد، یک الکترون را از HOMO تحریک کرده و آن را به LUMO انتقال خواهد داد و شبه ذره اکسایتون تولید خواهد شد. [۲]

پخش اکسایتون: همه اکسایتون ها باید به یک محل تفکیک بار برسند، از آنجایی که چنین محلی در سمت انتهایی نیمه رسانا قرار دارد طول پخش اکسایتون ها باید حداقل مساوی با ضخامت لایه باشد، وگرنه آنها باز ترکیب می شوند و فوتونها تولید می شوند. [۳ و ۴]

تفکیک اکسایتون ها: زمانی که اکسایتون به این فصل مشترک می رسد، نیروی الکترواستاتیکی و میدان الکتریکی موضعی ناشی از این اختلاف بر انرژی بستگی اکسایتون غلبه کرده و الکترون و حفره از هم جدا خواهند شد. [۲]

ترابرد حامل ها به طرف الکتروده های مربوطه: پس از تفکیک اکسایتون به بارهای آزاد، الکترون در ماده گیرنده (A) به سمت الکتروده مثبت (کاتد) و حفره در ماده دهنده (D) به سمت الکتروده منفی (آنود) حرکت خواهند کرد.

تفکیک اکسایتون به یک جفت بار تحت میدان های الکتریکی بزرگی اتفاق می افتد که بتوانند با برهمکنش کلمب رقابت کنند. معمولاً فرآیند توسط تئوری مشهور به تئوری Onsager توصیف می شود که بازده تفکیک نوری اکسایتون، Φ ، را بصورت یک سری از میدان الکتریکی E می دهد:

$$\Phi = \Phi_0 \exp\left(-\frac{r_c}{r_0}\right) \left[1 + \frac{r_c e E}{2! k_B T} + \dots\right] \quad (1)$$

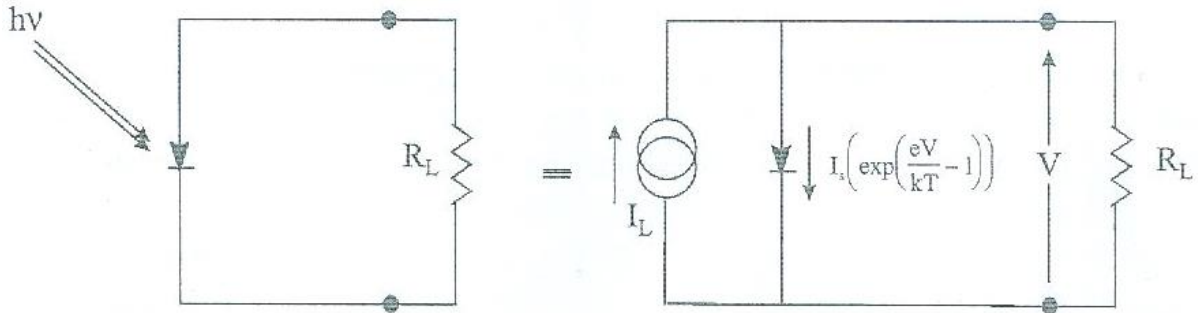
با فاصله بحرانی $r_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 k_B T}$ ، که در کمتر از آن فاصله انرژی کلمبی بزرگتر از انرژی جنبشی است و r_0 فاصله برخورد است. [۵]

مشخصه های یک سلول به صورت یک دیود ایده آل است. زمانیکه ولتاژ از یک ولتاژ آستانه V_s تجاوز کند سلول یک جریان انتقال می دهد:

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

تحت تابش نور، می توان سلول خورشیدی را به صورت جریان معادل در شکل نشان داد که به عنوان یک منبع جریان موازی با پیوندگاه توصیف می شود. I_L از تولید بار تحت تابش بوجود می آید. R_L مقاومت بار مدار خارجی است. [۱] تصوراً جریان در مدار به صورت زیر می شود:

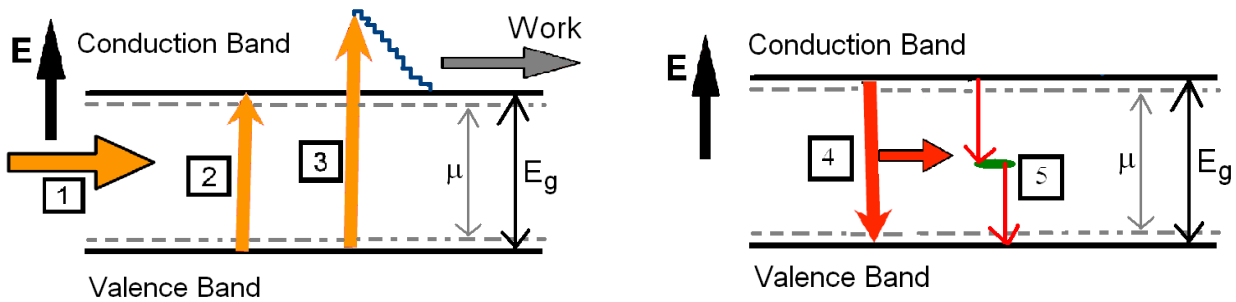
$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right) - I_L \quad (3)$$



مدار معادل یک سلول ایده آل تحت تابش نور

جریان نوری تولید شده توسط یک سلول خورشیدی تحت تابش در مدار اتصال کوتاه به نور برخوردی وابسته است برای رابطه میان چگالی جریان نوری J_{sc} و طیف برخوردی، ما به بازده کوانتومی سلول نیازمندیم $QE(E)$. احتمال آن است که یک فوتون ورودی با انرژی E یک الکترون به مدار خارجی تحویل دهد پس: $J_{sc} = q \int b_s(E) QE(E) dE$ چگالی شار فوتونی ورودی یعنی تعداد فوتونهای انرژی در محدوده E تا $E+dE$ که به واحد سطح در واحد زمان برخورد می کند و q بار الکترونی است.

مدل: سلول های خورشیدی قراردادی از نیمه رساناها ساخته می شوند. سلول های خورشیدی بر پایه نظریه اثر فوتولتائیک است به طوری که یک الکترون می تواند از میان نوار گاف توسط جذب یک فوتون منفرد با انرژی کافی برانگیخته شود. هر فوتون ورودی با انرژی $E < E_g$ کافی نخواهد داشت تا یک الکترون را در باند گاف برانگیخته کند. یک فوتون با انرژی $E = E_g$ فقط به اندازه ای انرژی دارد تا یک الکترون را از میان باند گاف برانگیخته کند و داخل نوار رسانش یک جفت الکترون - حفره بوجود آورد. یک فوتون با انرژی $E > E_g$ داخل باند رسانش برانگیخته بالا دارد و سریعاً به حالت اولیه در لبه نوار گاف از طریق برهمکنش تعداد زیادی فونون برمیگردد. باز ترکیب تابشی به اینصورت اتفاق می افتد که یک الکترون در نوار رسانش از میان باند گاف به نوار ظرفیت می افتد و با یک حفره باز ترکیب می شود و انرژی بصورت گسیل یک فوتون تلف می شود. باز ترکیب شاکلی - رید - هال (SRH) زمانی اتفاق می افتد که یک الکترون از طریق حالات ناخالصی نقص در نیمه رسانا با یک حفره باز ترکیب می شود.



سلولهای خورشیدی آلی، توسط بازده تبدیل انرژی شان η ، مورد ارزیابی قرار می گیرند که توسط ۴ فاکتور تعیین می شود:

$$\eta = \Phi \cdot A \cdot FF \cdot \frac{eV_{max}}{h\nu} \quad (4)$$

فاکتور پرشدگی (FF) تقریباً ۱ یا ۰/۸ می تواند باشد. نسبت بین انرژی الکترون خارج شده (۰/۵eV) و انرژی متوسط فوتونهای جذب شده (۲eV) در سلولهای PV آلی به ۰/۲۵ می رسد. می توان یک تولید بار Φ برابر با یکدر پیوندگاه فعال را پذیرفت. کلورنت های (Colorants) آلی، جذبی در محدوده مرئی $\alpha \gg 10^7 m^{-1}$ در پهنای گاف ۲۰۰-۱۰۰ nm دارند. اگر جذب نور خورشیدی را $A = \frac{1}{2}$ بگیریم بازده تبدیل فوتولتائیک $\eta = ۱۰\%$ را داریم. [۵]

چهار فرایند اصلی که بازده تبدیل توان ادوات فوتوولتاییک را محدود می کنند عبارتند از: [۸]

- ۱- جذب نور در لایه
- ۲- تولید حامل بار آزاد
- ۳- انتقال بار آزاد به الکترودهای مخالف و خارج شدن توسط الکترودها
- ۴- باز ترکیب حامل ها

یکی از فاکتورهای اصلی کاهش بازده در سلولهای خورشیدی آلی (OSC) باز ترکیب می باشد. سه نوع باز ترکیب متداول در سلول های خورشیدی آلی عبارتند از: باز ترکیب لانگوین، باز ترکیب Geminate و باز ترکیب به کمک تله ها (SRH). باز ترکیب لانگوین یا bimolecular: اگر برخورد الکترون و حفره در یک فاصله کمتر از شعاع کلمب باشد باز ترکیب اتفاق می افتد که باز ترکیب لانگوین نام دارد و زمانی معتبر است که فاصله پرش یا از دست دادن انرژی کمتر از شعاع کلمب باشد. این نوع باز ترکیب، مربوط به مرحله بعد از تفکیک اکسایتون ها می باشد. ضمناً باز ترکیب لانگوین از نوع باز ترکیب های مستقیم می باشد. [۶]

$$R_o = \beta(np - n_i^2) \quad (5)$$

که در این رابطه: β ثابت باز ترکیب و n_i^2 نیز چگالی حامل های بار ذاتی است. باز ترکیب به کمک تله ها: اخیراً باز ترکیب غیر مستقیم به شکل فزاینده ای به عنوان یکی از مکانسیم های مهم اتلاف در سلول های خورشیدی آلی مطرح می گردد. در سال ۱۹۵۲ مدل شاکلی - رید - هال (SRH) برای توصیف مکانسیم های تولید و باز ترکیب الکترون ها و حفره ها از طریق به دام اندازی توسط ترازهای انرژی موجود در باند گاف یک نیم رسانا که ناشی از ناخالصی ها می باشند، ارائه گردید.

$$R_{SRH} = c_t N_t \frac{np - n_i^2}{n + p + n_1 + p_1} \quad (6)$$

که در این رابطه N_t چگالی تله ها (traps) و c_t ضریب به دام اندازی می باشد. n_1 و p_1 چگالی های مشخصه و n_i چگالی بار ذاتی می باشد [۷].

نتایج:

جریان خالص در یک سلول خورشیدی آلی به صورت زیر می باشد:

جریان باز ترکیب - جریان تولید شده از نور = جریان خالص

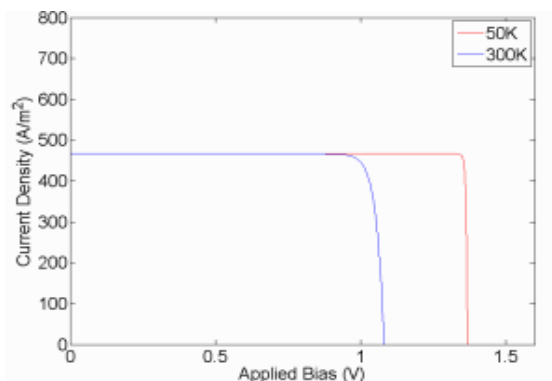
جریان باز ترکیب لانگوین + جریان باز ترکیب تابشی = جریان باز ترکیب

$$J_{abs}(E) = \frac{ef_{\omega} 2\pi}{c^2 h^3} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2}{e^{kT_{sun}} - 1} dE \quad (7)$$

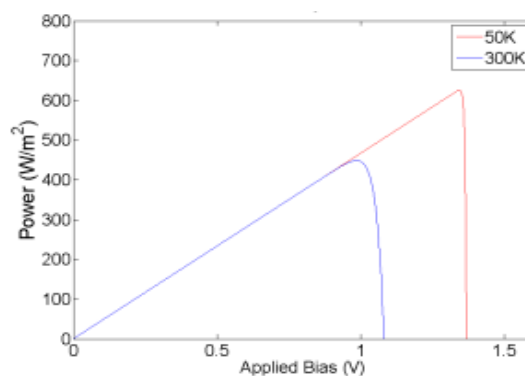
$$J_{rad}(E, V) = \frac{e 2\pi}{c^2 h^3} \int_{E_g}^{10ev} \frac{E^2}{e^{kT_{sun}} - 1} dE \quad (8)$$

$$J_{Lang} = \frac{3\lambda^2}{4KT} \left(\exp\left(\frac{h\theta}{KT}\right) - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} + J_0 \quad (9)$$

توان سلول خورشیدی آلی به صورت تابعی از ولتاژ، بصورت ضرب منحنی جریان در ولتاژ محاسبه می شود. ماکزیمم توان به آسانی از این منحنی پیدا می شود و با تقسیم کردن بر توان ورودی، بازده بدست می آید. شکل زیر منحنی جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ و توان - ولتاژ برحسب نشان می دهد. در دمای ۳۰۰K افزایش ولتاژ تا حدود ۱/۱ ولت جریان ثابتی توسط سلول به مدار داده می شود. ولی در دمای ۵۰K افزایش ولتاژ تا حدود ۱/۴ ولت جریان ثابتی به مدار داده می شود. در همان ولتاژها توان سلول بررسی شده است و در دمای پایین یعنی ۵۰K بیشترین توان را داریم.

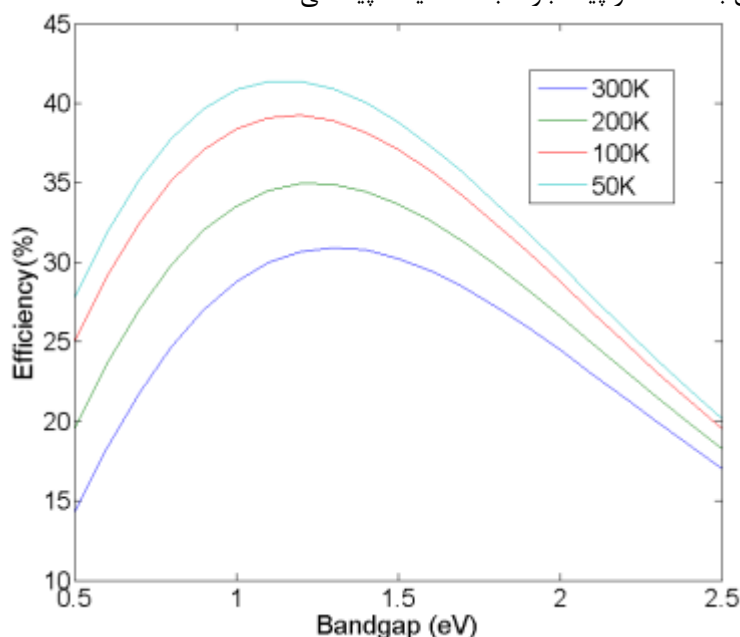


(a) منحنی I-V



(b) منحنی توان

شکل زیر منحنی بازده بر حسب باند گاف را برای دماهای مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با کاهش دما بازده افزایش می یابد و همچنین باند گاف در پیک بازده با دما شیفست پیدا می کند.



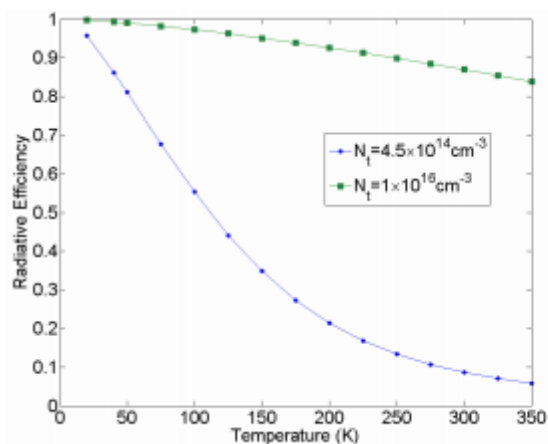
نمودار بازده بر حسب باند گاف، یک تمایل کلی برای افزایش بازده با کاهش دما را نشان می دهد.

MEH-PPV یکی از بهترین پلیمرها است که در ساخت سلول های خورشیدی آلی از آن استفاده می شود و رکورد بالاترین بازده را تا این تاریخ برای دستگاههای تک پیوندگاه دارد. رکورد جهانی این سلول $J_{sc} = 14.2 \frac{mA}{cm^2}$ و $V_{oc} = 0.32 V$ را دارد.

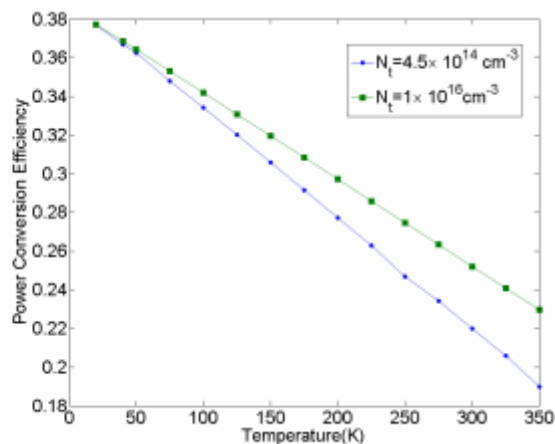
با وارد کردن با ترکیب لانگوبین برای سلول MEH-PPV بازده تابشی و توان کل برحسب دما در دو حالت با چگالی تله $N_t = 4.5 \times 10^{14} cm^{-3}$ و $N_t = 1 \times 10^{16} cm^{-3}$ بررسی شده است. در $N_t = 4.5 \times 10^{14} cm^{-3}$ افت بازده بر حسب دما سریعتر اتفاق می افتد، ولی در $N_t = 1 \times 10^{16} cm^{-3}$ افت بازده بر حسب دما ملایم تر است. ولی در توان

کل کاهش توان بر حسب دما برای هر دو سلول تقریباً به طور خطی می باشد. چگالی گیر اندازی بزرگتر یک مسئله قابل تامل در دمای اتاق است اما در دماهای پایین به همراه سلول خورشیدی آلیبا چگالی تله پایین، بی اهمیت می شود. این نتایج نشان می دهد که در محیط با دمای پایین بطور موثر نقص ها در سلول فریز می شوند و سلول می تواند در محدوده تابشی ایده آل عمل کند.

آشکار است که هر دو سلول یک بازده تابشی افزایشی را با کاهش دما نمایش می دهند، سلول با چگالی تله بزرگتر، یک افزایش آشکارتر را نشان می دهد.

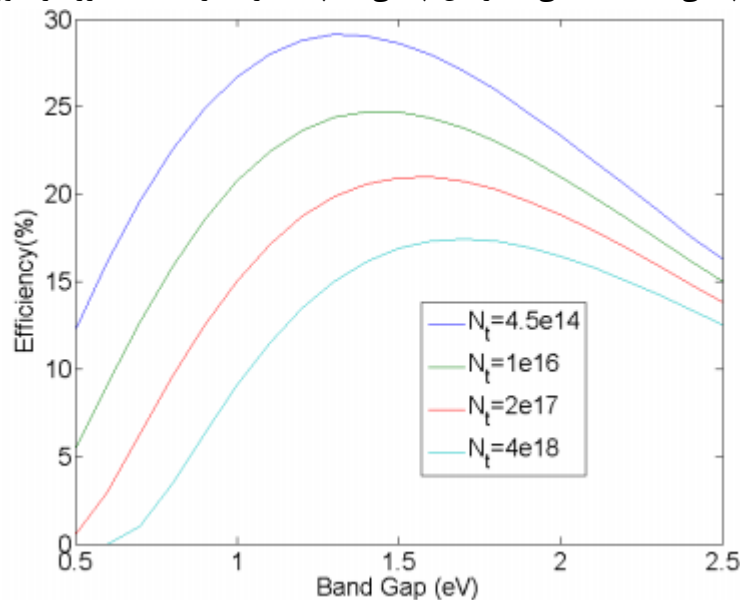


(a) بازده تابشی



(b) بازده تبدیل توان

در شکل زیر منحنی بازده بر حسب باند گاف برای چگالی های تله مختلف رسم شده است. منحنی نشان می دهد که باند گاف در پیک بازده وابسته به چگالی تله است یعنی با افزایش چگالی تله پیک بازده در باند گاف بزرگتر صورت می گیرد.



منحنی بازده بر حسب باند گاف برای چگالی های تله مختلف

منابع

- [1] Bruder, I. 2010. Organic Solar Cells: Correlation Between Molecular Structure, Morphology and Device Performance. M.Sc. Max-Planck Institute.
[2] Klaus Pertritsch, Dipl. Ing. 2000. Organic Solar Cell Architecture. Ph.D. University of Cambridge (US) & Graz (AUS).

- [3]Christ.T,Gluesen.B,Greiner.A,Kettner.A.1997. ColumnarDiscotics for LEDs.Adv. Mat.9,48-52
- [4]Halls.J.J.M,Pichler.K,Friend.R.H.1996.Exciton Diffusion and Dissociation in PPV/C60 Hetrojunction Photovoltaic CellAppl.Phys.Lett.68,3120-3122
- [5]Jean-Michel Nunzi,Organic photovoltaic materials and devices,C. R. Physique 3 (2002) 523-542
- [6]Gytisjusks and kestutis arlauska.2010. Charge carrier recombination in bulk heterojunction organic solar cells.978-953-307-052-0
- [7]Tress.W, Leo, Riede.M.2012.Optimum Mobility, Contact Properties, and Open-Circuit Voltage of Organic Solar Cells:A Drift-Diffusion Simulation Study,Physical Review B,85,155201.
- [8]Zhu.X.Y,Yang.Q,Muntwiler.M.2009.Charge-Transfer Exitons at Organic Semiconductor Surfaces and Interfaces,Acc.Chem.Res,10,1021-1031.