

高效率有机太阳能电池的界面工程研究

刘志洋, 彭瑞祥, 艾 玲, 欧阳新华, 葛子义*

(中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

摘要:有机太阳能电池(OSC)为典型的三明治结构,是以共轭类有机化合物为活性层材料将太阳光转换为电能,通过两个电极输出电流。这些有机物具有来源广、质量轻和可再生等优点,使得有机太阳能电池在清洁能源领域备受关注。当前研究的焦点仍然是提高电池的光电转换效率,主要通过改善活性层材料、优化器件结构和界面修饰等途径。本文重点介绍了作者课题组在界面工程方面所做的代表性工作,通过引入含磺酸基团或羧酸基团的超支化结构的聚合物阴极修饰层材料,获得了高效的 OSCs;合成了新颖的非共轭有机小分子电解质修饰层,制备了高达 10.02%效率的单结正型 OSCs。此外,还研究了简单的极性溶剂处理,如甲醇能够优化活性层形貌,提高电池器件的性能。

关键词:有机太阳能电池;界面工程;超支化聚合物;非共轭有机小分子;极性溶剂

引言

在能源需求的大环境下,开发可再生可持续的清洁能源近些年来蓬勃发展。解决能源危机的途径也层出不穷,太阳能、地热能、风能、海洋能、生物能和核能等“绿色能源”的新工艺新技术不断得到完善,所占能源结构的比重已经达到 15%以上。特别是太阳能,以其得天独厚的优势,迅速开辟了市场得以大规模利用。太阳能主要以热能和光能的形式被开发利用,以光伏打效应为基础的直接将光能转化为电能的太阳能电池被认为会成为能源供应的主体。太阳能电池经历硅基电池、染料敏化电池和化合物薄膜电池到有机太阳能电池、量子点电池和钙钛矿电池等发展,已经日臻成熟,市场份额逐年增加。其中,有机太阳能电池(organic solar cell, OSC)因其制备简单、成本低、选材广、质轻和可柔性大面积制备等优点^[1~3],在便携式电子设备、可穿戴电子设备、光伏建筑一体化和军事等领域具有很强的应用潜力,倍受关注,成为太阳能电池研究领域的重要发展方向。

有机太阳能电池由多层组成,光照下产生的光电流在层间传输,因而每一个界面处的电荷传输性能都影响着器件的整体效率。因此,界面工程在优化电荷提取和重组、接触电阻、电子能级和光学吸收等方面发挥了关键作用^[4~8]。已经有大量的工作致力于有机太阳能电池的界面修饰,包括引入界面层^[9]、极性溶剂处理^[10]、表面等离子效应^[11]和纳米压印^[12]等,其中,引入界面层是简单有效地提高效率的方式。早期,阴极界面层材料主要是金属盐类,如氟化锂^[13]等,但由于其需要昂贵的真空热蒸镀技术成膜,限制了其在低成本的大面积成膜技术中的应用。之后,科研人员成功开发了可水醇溶性的共轭聚合物电解质(CPEs)^[14]、共轭小分子有机界面层材料^[15]和非共轭聚合物及有机小分子材料^[16,17]等用于提高器件性能,水醇溶剂与活性层材料的溶剂有正交性,因而能够通过旋涂来制备界面层,有利于低成本大面积制备电池^[18]。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2017.02.001

收稿:2016-09-02;修回:2016-11-07;

基金项目:国家自然科学基金(21574144, 51273209, 51411140244);浙江省自然科学基金(LR16B040002);宁波市科技创新团队(2015B11002, 2016B10005);中国科学院交叉创新团队和中国科学院前沿科学重点项目(QYZDB-SSW-SYS030);

* 通讯联系人:葛子义,中科院宁波材料技术与工程研究所研究员,2004 年博士毕业于中科院化学研究所,发表 SCI 论文 70 余篇,研究方向为有机光电。E-mail: geziyi@nimte.ac.cn.

作者在有机太阳能电池的界面工程方面做了一系列研究,取得了一些进展,主要包括超支化聚合物界面修饰、非共轭有机小分子界面修饰和极性溶剂处理。通过界面修饰,大幅提高了器件的整体效率。下面分别介绍这几个方面取得的研究进展。

1 超支化聚合物界面材料

聚合物界面修饰材料是目前研究最多的一类界面修饰材料,华南理工大学曹镛院士组在这方面做了大量工作,其中以聚茚衍生物(PFN)(如图 1 所示)材料最具代表性,其作为阴极界面修饰层用于反型器件结构中,以苯并二噻吩基聚合物(PTB7-Th)为给体材料,富勒烯衍生物(PC₇₁BM)为受体材料,获得了 10.61% 的光电转换效率(PCE)^[19]。我们组也在这方面做了相关工作,合成了含磺酸基超支化的聚醚砜(SHBPS)和含羧酸基超支化的聚醚酮(CHBPEK)阴极界面材料(见图 1)^[20]。当以聚(3,4-乙撑二氧噻吩)(PEDOT)和聚苯乙烯磺酸盐(PSS)的溶液制作阳极界面层,聚(3-己基噻吩)(P3HT)为给体材料,富勒烯衍生物(PC₆₁BM)为受体材料,制备传统的正型器件 ITO(钢锡氧化物导电玻璃)/PEDOT:PSS/P3HT:PC₆₁BM/Interlayer(阴极界面层)/Al(铝)时,在标准模拟太阳光源 AM 1.5G, 100mW·cm⁻² 光照下,相对于蒸镀钙(Ca)的器件效率 2.92%,分别提高到 3.21%(CHBPEK)和 3.61%(SHBPES)。可以看出,电流密度(J_{sc})有明显提高,从 9.68mA·cm⁻² (Ca)分别提高到 10.73mA·cm⁻² (CHBPEK)和 10.90mA·cm⁻² (SHBPES);当以苯并二噻吩基聚合物(PTB7)为给体材料,PC₇₁BM 为受体材料,制备 ITO/PEDOT:PSS/PTB7:PC₇₁BM/Interlayer/Al 器件时,与 P3HT 情况类似,相对于蒸镀 Ca 的器件效率 7.99%,分别提高到 8.84%(CHBPEK)和 9.12%(SHBPES),电流密度也有相应提高,从 14.92mA·cm⁻² 分别提高到 15.87mA·cm⁻² (CHBPEK)和 16.20mA·cm⁻² (SHBPES),说明 CHBPEK 和 SHBPES 在界面处能够有效地提取电子并传递到阴极 Al。填充因子(FF)也得到增加,从 70.46%(Ca)分别增加到 73.10%(CHBPEK)和 73.34%(SHBPES),说明 CHBPEK 和 SHBPES 能够与活性层和阴极 Al 间形成良好的欧姆接触,并有利于电子迁移率和空穴迁移率的平衡,从而提高了整个器件的电流密度。我们也用 PFN 作为阴极修饰层用于 PTB7:PC₇₁BM 基正型电池中,其 PCE 为 8.18%, J_{sc} 为 15.81mA·cm⁻²,均低于相应的 CHBPEK 和 SHBPES 基电池,说明含磺酸或羧酸的超支化结构的聚合物能够作为有效的阴极界面修饰材料。

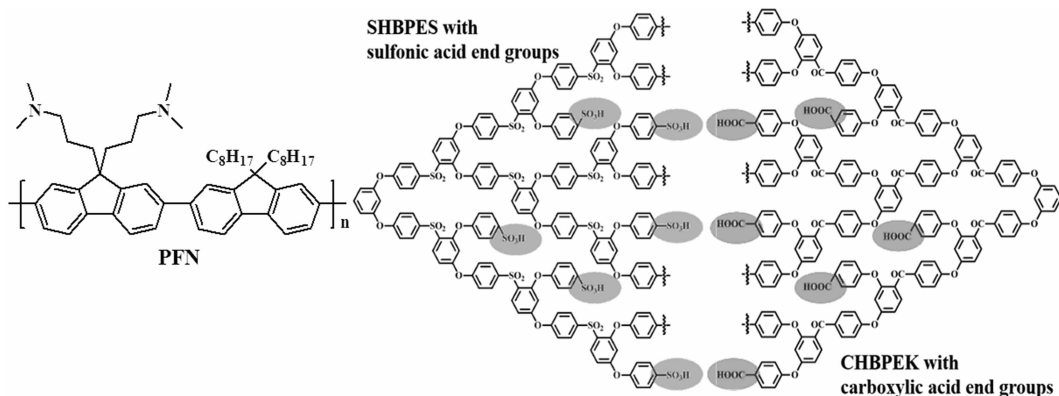


图 1 PFN、SHBPES 和 CHBPEK 的分子结构示意图

Figure 1 Molecular structures of PFN, SHBPES and CHBPEK

2 非共轭有机小分子界面材料

共轭类材料,因其本身具有一定的导电性,被广泛应用于界面层材料结构中,然而绝缘的非共轭类有

表 1 含不同界面层的 P3HT:PC₆₁BM 基和 PTB7:PC₇₁BM 基电池的光伏性能

Table 1 Photovoltaic parameters of P3HT:PC₆₁BM and PTB7:PC₇₁BM solar cells with different interlayers

阴极	给体	V _{oc} /V	J _{sc} /(mA•cm ⁻²)	FF/%	PCE/%	PCE/(%avg)
Ca/Al	P3HT	0.54	9.68	55.71	2.92	2.85
CHBPEK/Al	P3HT	0.54	10.73	55.65	3.21	3.15
SHBPES/Al	P3HT	0.54	10.90	60.88	3.61	3.55
Al	PTB7	0.75	13.55	63.29	6.45	6.38
LiF/Al	PTB7	0.74	15.00	63.04	7.02	6.95
Ca/Al	PTB7	0.76	14.92	70.46	7.99	7.80
PFN/Al	PTB7	0.75	15.81	68.60	8.18	8.14
CHBPEK/Al	PTB7	0.76	15.87	73.10	8.84	8.80
SHBPES/Al	PTB7	0.76	16.20	73.34	9.12	9.08

机材料被认为不利于电荷传输,因而研究较少。LiF、CsF 和 CsCO₃ 等绝缘的金属盐最早被用在有机发光二极管器件中,取得了成功,之后被相继应用于有机太阳能电池。非共轭聚合物,如乙氧基化聚乙烯亚胺(PEIE)^[7]和聚环氧乙烷(PEO)^[16]等(如图 2 所示),首先被用于 OSC 的阴极界面修饰,能够改变界面处能级,形成偶极子对,降低界面处的电子收集势垒,在提高 OSC 的整体性能方面,尤其是电流密度和填充因子,取得了良好的效果。受此启发,非共轭有机小分子阴极界面材料也被逐渐发展。

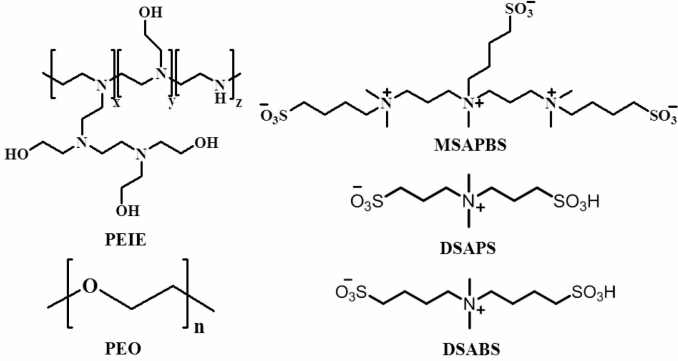


图 2 PEIE、PEO、MSAPBS、DSAPS 和 DSABS 的分子结构图

Figure 2 Molecular structures of PEIE, PEO, MSAPBS, DSAPS and DSABS

我们组在这方面做了突出贡献,合成了多枝化的含三个双性离子成分的非共轭有机小分子电解质(MSAPBS)(如图 2 所示)阴极界面材料,由于其能够在界面处形成偶极子成分,因而有利于界面处的电荷提取和收集,降低电荷重组。制得的正型电池器件,在 AM 1.5G,100mW•cm⁻²光照下,最高获得了效率为 10.02% 的电池,短路电流密度达到 19.25±0.15mA•cm⁻²,开路电压为 0.76±0.01V,填充因子为 68.08±1.0%,其电流密度-电压(J-V)曲线如图 3 所示。与蒸镀 Ca 的器件相比,MSAPBS 基电池的电流密度提高明显,说明这类非共轭的小分子电解质材料作为阴极界面材料是非常有效的,而且 MSAPBS 合成简单、制备成本低,有利于有机太阳能电池的商业化。相关成果发表在 *Nature Photonics* (2015, 9, 520)上^[17],这也是国际上率先突破单结 OSC10%效率瓶颈的报道之一,并入选 2015 年“中国光学重要成果”。

通过进一步简化 MSAPBS 的结构,合成了两个新颖的线性单双性离子成分的非共轭有机小分子电解质(DSAPS 和 DSABS)(如图 2 所示)。这两个小分子电解质分别含有一个正负离子对,并增加了磺酸基团,有利于提高其在醇类试剂中的溶解性^[21]。

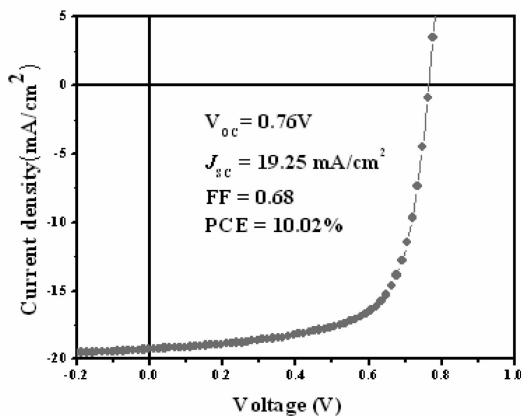


图3 含 MSAPBS 界面层的 PTB7:PC₇₁BM 基 OSCs 的电流密度-电压(J - V)曲线

Figure 3 Current density-voltage (J - V) characteristics of PTB7:PC₇₁BM-based OSCs with MSAPBS interlayer

首先,我们制备和优化了以 DSAPS 为阴极界面层的正型太阳能电池(如图 4 所示),在 AM 1.5G, $100\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 光照下,优化器件和纯 Al 控制器件的电流密度-电压(J - V)特征曲线如图 5 所示,器件性能参数列在表 2 中。可以看出,含 DSAPS 阴极界面层的电池器件展示了最高的能量转换效率 9.79%,相对于其它电池器件(3.9%~8.9%),说明 DSAPS 是一个有效的阴极界面层材料。与没有界面层的控制器件相比,DSAPS 基器件的开路电压(V_{oc})从 $0.55\pm 0.01\text{V}$ 提高到 $0.76\pm 0.01\text{V}$,短路电流密度(J_{sc})从 $15.30\pm 0.16\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $18.20\pm 0.20\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,填充因子(FF)从 $45.5\pm 1\%$ 提高到 $70.0\pm 1\%$ 。仅用甲醇处理活性层,不含阴极界面层的器件,其 V_{oc} ($0.76\pm 0.01\text{V}$)、 J_{sc} ($15.87\pm 0.11\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) 和 FF ($63.9\pm 1\%$) 相对于控制器件也均有增加,说明极性溶剂处理有助于器件性能的提高^[22, 23]。有趣的是,DSAPS 基电池器件的开路电压与仅甲醇处理的电池器件的基本一致,但 J_{sc} 和 FF 更大。而 J_{sc} 和 FF 跟载流子迁移率和内建电场有关,因此可以说明,DSAPS 双性离子盐能够增加载流子迁移率和内建电场,从而有利于界面处的电荷提取和传输,降低双分子重组^[24]。相对于没有甲醇处理的含 Ca 或 LiF 界面层的器件,通过甲醇的处理,器件的性能也均有提高,但是开路电压基本保持在 0.76V,这个结果暗示了甲醇处理对于 PTB7:PC₇₁BM 基电池器件的开路电压有决定性作用,其主要是通过改变电池的内建电场和活性层的表面电势来影响电池的开路电压^[22]。

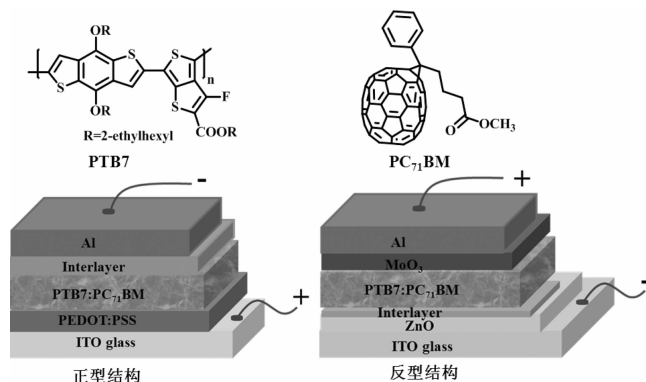


图4 PTB7 和 PC₇₁BM 的分子结构及电池结构示意图

Figure 4 Molecular structures of PTB7 and PC₇₁BM and the schematic of the OSCs

为了进一步考察甲醇处理与非共轭小分子电解质界面层间的协同效应,我们制备了反型电池器件,结构为 ITO/ZnO/有或没有界面层/PTB7:PC₇₁BM/MoO_x/Al(如图 4 所示)。在图 5 和表 3 中可以看出,所有反型电池器件的开路电压基本都是 0.75V,暗示了甲醇处理主要改变了活性层的性能,从而提高

表 2 PTB7:PC₇₁BM 基 OSCs 有或没有界面层和甲醇处理的光伏性能

Table 2 Photovoltaic performance of PTB7:PC ₇₁ BM-based OSCs with or without interlayer and methanol treatment					
阴极	V _{oc} /V	J _{sc} /(mA•cm ⁻²)	FF/%	PCE ^a /(% avg)	PCE/(% max)
None	0.55±0.01	15.30±0.16	45.5±1	3.83	3.89
MeOH/Al	0.76±0.01	15.87±0.20	63.9±1	7.70	7.78
Ca/Al	0.73±0.01	14.95±0.21	66.1±1	7.21	7.35
MeOH/Ca/Al	0.76±0.01	15.27±0.19	69.5±1	8.06	8.15
LiF/Al	0.70±0.01	15.75±0.25	64.9±1	7.16	7.34
MeOH/LiF/Al	0.76±0.01	15.85±0.19	72.3±1	8.71	8.89
DSAPS/Al	0.76±0.01	18.20±0.23	70.0±1	9.68	9.79

^a平均 50 个器件的值(The average values of 50 devices)。

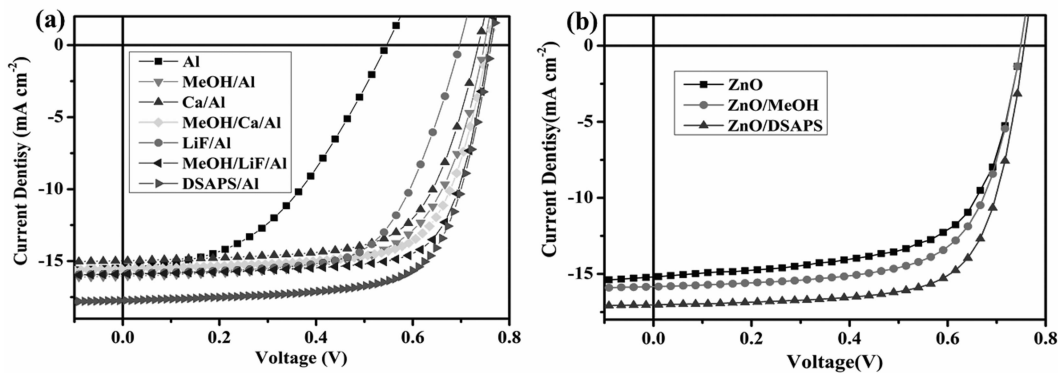


图 5 在 AM 1.5G, 100mW•cm⁻²光照下电流密度-电压曲线
(a)正型器件;(b)反型器件

Figure 5 Current density-voltage (*J*-*V*) curves under AM 1.5G, 100mW•cm⁻² illumination
(a) the conventional structure; (b) the inverted structure

了器件的开路电压。也可以得到即使具有能够改变 ZnO 能级的双性离子成分 DSAPS,也不会影响整个器件的开路电压。甲醇处理 ZnO 层的电池器件,比无处理的 ZnO 层控制器件的 J_{sc} 和 FF 都有轻微的增加,分别从 $15.01\pm0.18\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $64.2\pm1\%$ 增加到 $15.83\pm0.17\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $66.1\pm1\%$,这可能是由于甲醇处理降低了 ZnO 膜表面的缺陷。DSAPS 基电池器件的 J_{sc} 和 FF 均得到明显提高,分别达到 $17.01\pm0.21\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $70.3\pm1\%$,说明 DSAPS 层能够有效地提取界面处的电荷和降低电荷重组,从而提高整个器件的性能。

表 3 PTB7:PC₇₁BM 基反型 OSCs 有或没有界面层的光伏性能

Table 3 Photovoltaic performance of PTB7:PC ₇₁ BM-based inverted OSCs with or without interlayer					
Interlayer	V _{oc} /V	J _{sc} /(mA•cm ⁻²)	FF/%	PCE ^a /(% avg)	PCE/(% max)
ZnO	0.75±0.01	15.01±0.18	64.2±1	7.22	7.34
ZnO/MeOH	0.75±0.01	15.83±0.17	66.1±1	7.85	7.94
ZnO/DSAPS	0.75±0.01	17.01±0.21	70.3±1	8.97	9.10

^a平均 50 个器件的值(The average values of 50 devices)。

3 极性溶剂处理活性层界面修饰

极性溶剂处理活性层能够优化活性层的表面形貌和电势,有利于其形成好的纳米相分离和互穿网络

10.14028/j.cnki.1003-3726.2017.02.001

结构、去除其残留的溶剂等^[25~27]，是一种简单有效的提高 OSCs 整体性能的方法，目前已被广泛使用。

我们组在醇类极性溶剂处理方面也做了相关工作，利用甲醇、乙醇和异丙醇分别处理不同类型的聚合物活性层体系，发现醇类溶剂的处理均有利于器件性能的提高，但相同溶剂对不同体系的作用效果不同，且与处理时间有关^[28]。从表 4 中可以看出，与无醇类溶剂处理的器件相比，通过乙醇的处理，噁二唑基聚合物(PBDT-DFBO)基聚合物电池(如图 6 所示)获得了最好的器件性能， V_{oc} 从 $0.78\pm0.01V$ 提高到 $0.83\pm0.01V$ ， J_{sc} 从 $5.2\pm0.1mA\cdot cm^{-2}$ 提高到 $10.6\pm0.2mA\cdot cm^{-2}$ ，FF 从 $50.2\pm0.1\%$ 提高到 $64.7\pm0.4\%$ ，最终 PCE 从 $2.0\pm0.1\%$ 增加到 $5.6\pm0.3\%$ ，而甲醇和异丙醇处理并没有提高这么明显。同样的，对于噁二唑-噻吩基聚合物(PBDTT-DFBO)(如图 6 所示)基聚合物电池，甲醇处理后，电池效率提高最明显，PCE 从 $2.1\pm0.1\%$ 提高到 $4.5\pm0.3\%$ 。对于噁二唑-呋喃基聚合物(PBDTF-DFBO)(如图 6 所示)基聚合物电池，也是在甲醇处理后，整体性能提高最大，当甲醇处理时间达到 3min 时，获得了最高的效率 7%。通过进一步研究发现，极性溶剂处理能够增强器件的空穴迁移率，从而实现更加平衡的电荷传输，并且易形成纤维状的互穿网络结构形貌，有利于载流子分离和传输，因此提高了整个器件的电流密度和填充因子，效率也随之大幅增加。

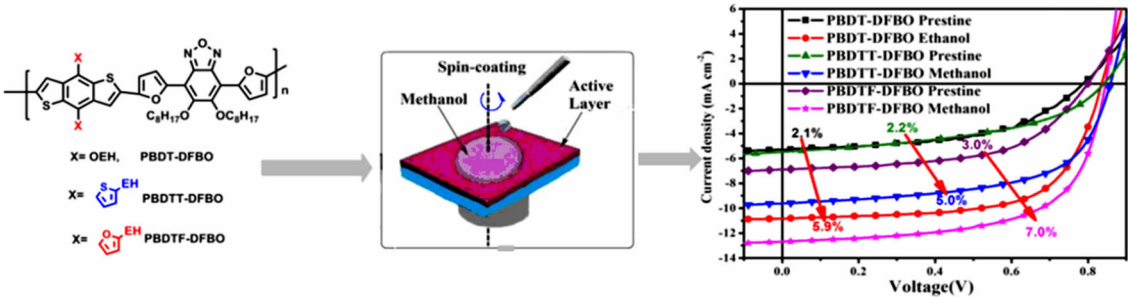


图 6 聚合物分子结构及在 AM 1.5G、100mW·cm⁻²光照下电流密度-电压曲线

Figure 6 Molecular structures of polymers and current density-voltage (J - V) curves under

AM 1.5G, 100mW·cm⁻² illumination

表 4 不同极性溶剂处理 Polymer:PC₇₁BM(混合比 1:2^a, w/w)基电池两分钟的光伏性能

Table 4 Performance of the Polymer:PC₇₁BM (a blend ratio of 1:2^a) solar cells with various polar solvent treatments with a wetting time of 2 min

溶剂处理	V_{oc}^b/V	$J_{sc}^b/(mA\cdot cm^{-2})$	FF ^b /%	PCE ^b /(% avg)
PBDT-DFBO				
无	5.2 ± 0.1	0.78 ± 0.01	50.2 ± 0.1	2.0 ± 0.1
甲醇	9.3 ± 0.1	0.82 ± 0.01	52.9 ± 0.2	4.0 ± 0.2
乙醇	10.6 ± 0.2	0.83 ± 0.01	64.7 ± 0.4	5.6 ± 0.3
异丙醇	9.0 ± 0.4	0.80 ± 0.02	48.7 ± 0.6	3.7 ± 0.1
PBDTT-DFBO				
无	5.5 ± 0.1	0.83 ± 0.01	46.5 ± 0.1	2.1 ± 0.1
甲醇	9.1 ± 0.3	0.86 ± 0.01	58.6 ± 0.5	4.5 ± 0.3 (5.0) ^c
乙醇	7.3 ± 0.5	0.83 ± 0.02	39.4 ± 0.7	2.6 ± 0.1
异丙醇	7.4 ± 0.6	0.82 ± 0.01	46.6 ± 0.5	3.0 ± 0.1
PBDTF-DFBO				
无	6.9 ± 0.1	0.79 ± 0.01	53.4 ± 0.1	2.8 ± 0.2
甲醇	12.7 ± 0.1	0.83 ± 0.01	62.0 ± 0.1	6.5 ± 0.1 (7.0) ^c
乙醇	11.0 ± 0.2	0.81 ± 0.01	53.0 ± 0.4	4.7 ± 0.2
异丙醇	10.7 ± 0.4	0.84 ± 0.01	48.1 ± 0.3	4.4 ± 0.2

^a聚合物与 PC₇₁BM 的质量混合比例为 1:2;^b活性层溶液为二氯苯和 4%(v/v)氯萘混合溶液,光伏参数为 8 个器件的平均值;^c溶剂处理时间为 3 min。

4 展 望

本文综述了近几年作者在有机太阳能电池界面工程方面所做的重要工作,主要包括超支化聚合物界面材料、非共轭有机小分子界面材料和极性溶剂处理方法,有力地提高了有机太阳能电池的整体性能,丰富了界面工程领域的研究内容,促进了有机太阳能电池的发展。

有机太阳能电池进过三十年的发展,效率已经突破 10%,并进一步逐渐提高。目前已经有小部分有机太阳能电池商品如充电宝开始售卖,随着活性层材料的改善、器件结构的创新和界面工程的优化及封装技术和印刷等大面积制备技术的发展,市场前景会越来越明朗,不久的将来会实现大规模商业化应用。

参考文献:

- [1] Chen J W, Cao Y. *Acc Chem Res*, 2009, 42: 1709~1718.
- [2] Dennler G, Scharber M C, Brabec C J. *Adv Mater*, 2009, 21: 1323~1338.
- [3] Li Y F. *Acc Chem Res*, 2012, 45:723~733.
- [4] Braun S, Salaneck W R, Fahlman M. *Adv Mater*, 2009, 21: 1450~1472.
- [5] Choi H, Park J S, Jeong E, Kim G H, Lee B R, Kim S O, Song M H, Woo H Y, Kim J Y. *Adv Mater*, 2011, 23: 2759~2763.
- [6] Seo J H, Namdas E B, Gutacker A, Heeger A J, Bazan G C. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 043303.
- [7] Zhou Y H, Fuentes-Hernandez C, Shim J, Meyer J, Giordano A J, Li H, Winget P, Papadopoulos T, Cheun H, Kim J, Fenoll M, Dindar A, Haske W, Najafabadi E, Khan T M, Sojoudi H, Barlow S, Graham S, Brédas J-L, Marder S R, Kahn A, Kippelen B. *Science*, 2012, 336: 327~332.
- [8] Park S H, Roy A, Beaupré S, Cho S, Coates N, Moon J S, Moses D, Leclerc M, Lee K, Heeger A J. *Nat Photonics*, 2009, 3: 297~302.
- [9] Li G, Chu C W, Shrotriya V, Huang J, Yang Y. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 253503.
- [10] Seo J H, Gutacker A, Sun Y M, Wu H B, Huang F, Cao Y, Scherf U, Heeger A J, Bazan G C. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 8416~8419.
- [11] Kim S S, Na S I, Jo J, Kim D Y, Nah Y C. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 073307.
- [12] Chen J D, Cui C H, Li Y Q, Zhou L, Ou Q D, Li C, Li Y F, Tang J X. *Adv Mater*, 2015, 27: 1035~1041.
- [13] Brabec C J, Shaheen S E, Winder C, Sariciftci N S. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1288.
- [14] He Z C, Zhong C M, Su S J, Xu M, Wu H B, Cao Y. *Nat Photonics*, 2012, 6: 591~595.
- [15] Duan C H, Zhong C M, Liu C C, Huang F, Cao Y. *Chem Mater*, 2012, 24: 1682~1689.
- [16] Zhang F L, Ceder M, Inganäs O. *Adv Mater*, 2007, 19: 1835~1838.
- [17] Ouyang X H, Peng R X, Ai L, Zhang X Y, Ge Z Y. *Nat Photonics*, 2015, 9: 520~525.
- [18] Duan C H, Zhang K, Zhong C M, Huang F, Cao Y. *Chem Soc Rev*, 2013, 42: 9071~9104.
- [19] He Z C, Xiao B, Liu F, Wu H B, Yang Y L, Xiao S, Wang C, Russell T P, Cao Y. *Nat Photonics*, 2015, 9: 174~179.
- [20] Ai L, Ouyang X H, Liu Z Y, Peng R X, Mi D B, Kakimoto M A, Ge Z Y. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2016, DOI: 10.1002/pip.2752.
- [21] Liu Z Y, Ouyang X H, Peng R X, Bai Y Q, Mi D B, Jiang W G, Facchetti A, Ge Z Y. *J Mater Chem A*, 2016, 4: 2530~2536.
- [22] Zhou H Q, Zhang Y, Seifter J, Collins S D, Luo C, Bazan G C, Nguyen T Q, Heeger A J. *Adv Mater*, 2013, 25: 1646~1652.
- [23] Ye L, Jing Y, Guo X, Sun H, Zhang S Q, Zhang M J, Huo L J, Hou J H. *J Phys Chem C*, 2013, 117: 14920~14928.
- [24] He Z C, Zhong C M, Huang X, Wong W Y, Wu H B, Chen L W, Su S J, Cao Y. *Adv Mater*, 2011, 23: 4636~4643.
- [25] Li H, Tang H W, Li L G, Xu W T, Zhao X L, Yang X N. *J Mater Chem*, 2011, 21: 6563~6568.
- [26] Nam S, Jang J, Cha H, Hwang J, An T K, Park S, Park C E. *J Mater Chem*, 2012, 22: 5543~5549.
- [27] Sun Q Q, Zhang F J, Wang J, An Q S, Zhao C, Li L L, Teng F, Hu B. *J Mater Chem A*, 2015, 3: 18432~18441.
- [28] Wang Y, Liu Y, Chen S J, Peng R X, Ge Z Y. *Chem Mater*, 2013, 25: 3196~3204.

Interfacial Engineering for Highly Efficient Organic Solar Cells

LIU Zhi-yang, PENG Rui-xiang, AI Ling, OUYANG Xin-hua, GE Zi-yi*

(Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: Organic solar cells (OSCs) with the typical sandwich structure use the conjugated organic materials as the active layer to convert sunlight into electricity through the two electrode outputting current. These organic materials have the advantages of wide source, lightweight and renewable, causing that OSCs have attracted much attention in the field of clean renewable energy. The present research focus is still to enhance the power conversion efficiency (PCE) of OSCs mainly by improving the active layer materials, optimization of device structure and interfacial modification and so on. This paper mainly introduces the efforts of our group in interfacial engineering. We demonstrated highly efficient OSCs by incorporating the sulfonic acid or carboxylic acid functionalized hyperbranched polymers to modify the cathode interface. We reported the novel non-conjugated small molecule electrolytes as the interfacial layer for efficient OSCs to achieve high PCE up to 10.02% in single heterojunction conventional OSCs. We found that simple polar solvent treatment such as methanol could optimize morphology of the active layer and enhance the performance of the devices.

Key words: Organic solar cells; Interfacial engineering; Hyperbranched polymers; Non-conjugated small molecule; Polar solvent