

文章编号: 2095-2163(2021)10-0089-07

中图分类号: TM914.4

文献标志码: A

基于 PM6:Y6 的有机太阳能电池

袁霞

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 单质结中给体和受体的化学结构限制了二元共混有机太阳能电池的光电转换效率(PCE),三元和四元共混有机太阳能电池的应用扩展了活性层的光吸收范围、改善了薄膜形态和能级排列,从而提高有机太阳能电池器件的效率。随着非富勒烯给/受体材料的设计与合成,在2020年有机太阳能电池的光电转换效率已经超过了18%,三元和四元共混有机太阳能电池的光伏性能远优于二元共混有机太阳能电池。在这篇综述中,系统总结了第三和第四组分材料在PM6:Y6二元体系中的应用和影响。

关键词: PM6:Y6; 二元; 三元; 四元; 有机太阳能电池; 效率

Organic solar cells based on PM6:Y6

YUAN Xia

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] The chemical structure of the donor and acceptor in the single junction limits the photoelectric conversion efficiency (PCE) of binary blended organic solar cells. The application of ternary and quaternary blended organic solar cells expands the light absorption range of the active layer, the thin film morphology and energy level arrangement are improved, thereby increasing the efficiency of organic solar cell devices. With the design and synthesis of non-fullerene donor/acceptor materials, the photoelectric conversion efficiency of organic solar cells has exceeded 18% in 2020, and the photovoltaic performance of ternary and quaternary hybrid organic solar cells is much better than that of binary blending organic solar cells. In this review, the application and influence of the third and fourth component materials in the PM6:Y6 binary system are systematically summarized.

[Key words] PM6:Y6; binary; ternary; quaternary; organic solar cell; efficiency

0 引言

长期以来,有机太阳能电池都在追求一种整体的策略,能够同时提高开路电压(V_{oc})、短路电流(J_{sc})和填充因子(FF),从而使光电转换效率(PCE)最大化^[1]。由于活性层的形态和给/受体电子结构的限制,同时改善所有性能很难实现,从而导致性能上的权衡。很多学者通过多组分体系(三元和四元有机太阳能电池)的研究,希望可以打破二元体系带来的光吸收限制、改善活性层的形态和能级排列,从而提高有机太阳能电池器件的效率。与二元 OSCs 相比,第三和第四组分组适当的能级可以实现相对较高的开路电压(V_{oc}),且使能量损失最小^[2-3]。

1986年,邓青云等人用酞菁铜(CuPC)和四羧基苝衍生物制备第一个双层异质结,器件效率仅有1%^[4]。1995年,Heeger等人引入了体异质结(BHJ)概念,以克服激子扩散长度短和激子寿命有限的困难^[5]。在BHJ结构中,给/受体混合形成双

连续互穿网络,有利于激子解离。由于BHJ的引入,共混有机太阳能电池才得到了快速发展。在富勒烯时代,Pavel等人首次将P3HT:PCBM的共混物用作OSCs的活性层,实现了2.8%的PCE^[6]。在非富勒烯时代,随着Y6的受体的广泛应用,通过界面修饰、形貌优化、添加剂设计和多组分材料应用等,基于PM6:Y6器件的PCE得到了进一步优化,其效率已经超过了18%^[7-8]。

综上所述,本文主要总结了近两年来基于PM6:Y6的二元共混、三元和四元共混有机太阳能电池的性能和应用。以期能够为将来基于PM6:Y6的研究提供一些参考。

1 基于 PM6:Y6 的二元共混有机太阳能电池

1.1 有机太阳能电池的器件结构

有机太阳能电池的器件结构如图1所示。由图1可知,有机太阳能电池通常由阳极、阳极缓冲层、活性层、阴极缓冲层、阴极这5部分组成,结构有单质结结构、平面异质结结构、体异质结结构和叠层结

作者简介:袁霞(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向:有机太阳能电池器件。

收稿日期:2021-07-21

构,并各有优缺点。由于单质结和平面异质结有机太阳能电池的给受体接触面少,激子解离效率很低,体异质结结构的开发有助于有机太阳能电池的进一步发展,也是应用最广泛的一种结构。叠层有机太阳能电池是由2个或者多个子电池串联在一起的光伏器件,由于其结构的复杂,实际应用中更倾向于体异质结结构。



(a) 单质结 (b) 平面异质结 (c) 体异质结 (d) 叠层结构
结构 结构 结构

图1 有机太阳能电池的器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the device structure of an organic solar cell

1.2 基于 PM6:Y6 体系的二元器件

以聚合物 PM6 为给体、非富勒烯小分子受体 Y6 为受体制备了一系列有机太阳能电池,器件结构如图 2(a) 所示,图 2(b) 和图 2(c) 显示了 PM6、Y6 的能级和化学结构。Karki 等人^[9]首次对 PM6:Y6 这种高性能的 BHJ 共混物的结构-性能关系进行研究,并利用光导原子力显微镜、掠入射广角 x 射线散射和固态 F 魔角旋转核磁共振光谱对该薄膜的相分离和分子间的相互作用进行分析,由此实现了 15% 的高性能。Wang 等人^[10]利用宽带瞬态吸收 (TA) 光谱研究了 PM6:Y6 共混物中光电荷产生的空穴转移通道是由内部激发态介导的,并在该单节有机太阳能电池中实现了 17% 的效率。

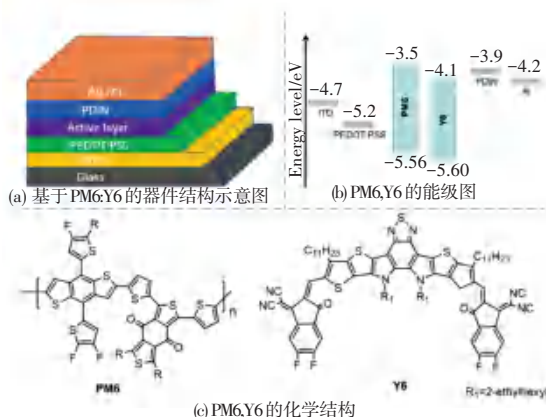


图2 基于 PM6:Y6 体系的二元器件

Fig. 2 Binary components based on PM6:Y6 system

2 基于 PM6:Y6 体系的三元有机太阳能电池

三元策略是近年来有机太阳能电池领域的一个研究热点,就是在 OSCs 的二元主系统中引入了第三组分,目的是为了增强捕光能力和优化活性层形态^[11]。第三组分的最高占用分子轨道 (HOMO) 能级和最低未占用分子轨道 (LUMO) 能级是在具有 2 个给体或受体的三元活性层中形成有效电荷传输通道的重要参数^[12-14]。同时,与二元体系相比,第三组分的适当能级可以实现相对较高的开路电压 (V_{oc}),并减小能量损失^[15]。第三组分的三元策略的应用可以打破主系统带来的光吸收限制,改善有源层的形态和能级排列,从而提高有机太阳能电池的 PCE ^[16]。第三组分大多是合成步骤和结构相对复杂的分子或聚合物,既可以是给体,也可以受体,下面拟从 2 方面展开探讨论述。

2.1 给体

2.1.1 聚合物给体

聚合物给体材料的结构如图 3 所示,不同聚合物给体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能见表 1。近年来,Tang 等人^[17]将具有深 HOMO 能级的宽带隙聚合物 P1 作为第三组分添加到 PM6:Y6 体系中,不仅拓宽了吸收覆盖范围,并形成级联式的能级排列,通过 2 种宽带隙聚合物给体制备了 PCE 高达 16.2% 的三元有机太阳能电池。Xie 等人^[18]成功地将与 PM6 的 HOMO 能级相似的 J71 引入到 PM6:Y6 体系中,PM6 和 J71 的互补吸收光谱可以最大限度地捕获光子,其中 J71 作为形貌调节剂,优化了三元 OSCs 的分子排列和相分离,使得 PCE 达到 16.5%。结果表明,通过优化光子捕获和相分离,三元 OSCs 可以获得更高的性能。Han 等人^[19]设计合成了具有不对称扭曲聚合物主链的 PDHP-Th,将这 2 种聚合物给体引入到 PM6:Y6 中可以诱导蓝移吸收光谱并调节 Y6 的过度聚集,有助于平衡三元器件中的电子和空穴迁移率,使得 PM6:Y6:PDHP-Th 的 PCE 达到 16.8%。Liao 等人^[20]将 TPD-3F 作为第三种组分来制备高效 PM6:Y6 三元 OSCs,TPD-3F 和 PM6 的互溶性较好,且 TPD-3F 比 PM6 具有更深的 HOMO 能级,从而提供了优化的三元共混形貌,促进激子解离和载流子运输,使得其 PCE 达到了 17.0%。

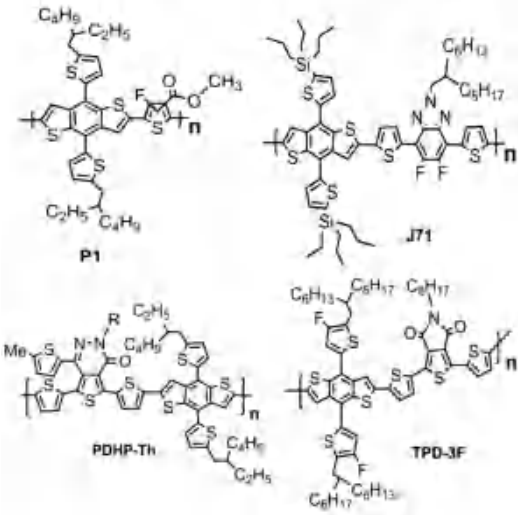


图 3 聚合物给体材料的结构

Fig. 3 Structure of polymer donor materials

表 1 不同聚合物给体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能

Tab. 1 Photovoltaic performance of ternary organic solar cell devices blended with different polymer donor materials and PM6:Y6

Active layer	V_{OC}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	$FF/\%$	$PCE/\%$
PM6:P1	0.850	25.55	76.0	16.5
PM6:J71:Y6	0.850	26.60	71.7	16.8
PM6:PDHP-Th:Y6	0.823	26.58	68.2	15.4
PM6:TPD-3F:Y6	0.880	25.60	73.4	17.0

2.1.2 小分子给体

小分子给体材料的结构如图 4 所示,不同小分子给体材料 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能见表 2。近年来,Chen 等人^[21]设计合

成了一种新型的以苯二氮噻吩(BDT)为中心电子给体单元的给体材料 ECTBD,将 ECTBD 加入到 PM6:Y6 二元体系中, PCE 为 16.51%。研究表明宽带隙给体 ECTBD 的引入有助于提高 FF 与 PM6 和 Y6 的相溶性,充分提高光子捕获能力和优化活性层的形貌。Nicola 等人^[22]将第三组分 O-IDTBR 受体加入到 PM6:Y6 中,提高了有机太阳能电池的运行寿命, PCE 为 16.6%。电荷输运和重组分析表明,O-IDTBR 作为电荷继电器,改善了给体和受体材料的电荷转移,减少了二元器件中陷阱辅助的复合,增强了 PCE ,并且可以在全太阳光照下使光诱导陷阱失活。在三元 OSCs 中,很少考虑到一种很强的分子间相互作用力,即氢键,Zhang 等人^[23]在 DTBO 上引入三氟甲基,加强了 DTBO 与 Y6 间的氢键,氢键的存在改变了 Y6 的静电势(ESP),从而改善了 π - π 堆积,使 PCE 从 15.49% 提升到 16.64%。Chen 等人^[24]开发了一种具有深 HOMO 能级和强结晶的小分子给体 BPR-SCI 来调节有机太阳能电池光电特征和形态特征,将 BPR-SCI 加入 PM6:Y6 主体共混物时,使得 V_{OC} 、 J_{sc} 和 FF 同时提升了, PCE 为 16.74%。 V_{OC} 的增加主要是由于 BPR-SCI 的 HOMO 能级高于 PM6,而 J_{sc} 和 FF 提升主要是由于强结晶的小分子给体 BPR-SCI 的加入使得三元活性层结晶度的增强,从而促使激子快速解离和迁移率的提高。Li 等人^[25]将高结晶小分子 DRTB-T-C4 引入到 PM6:Y6 的二元体系中,形成级联型能级排列和匹配的能量增强激子分离和减少复合损耗,有助于改善填充因子,产生了 PCE 为 17.13% 的高效率。

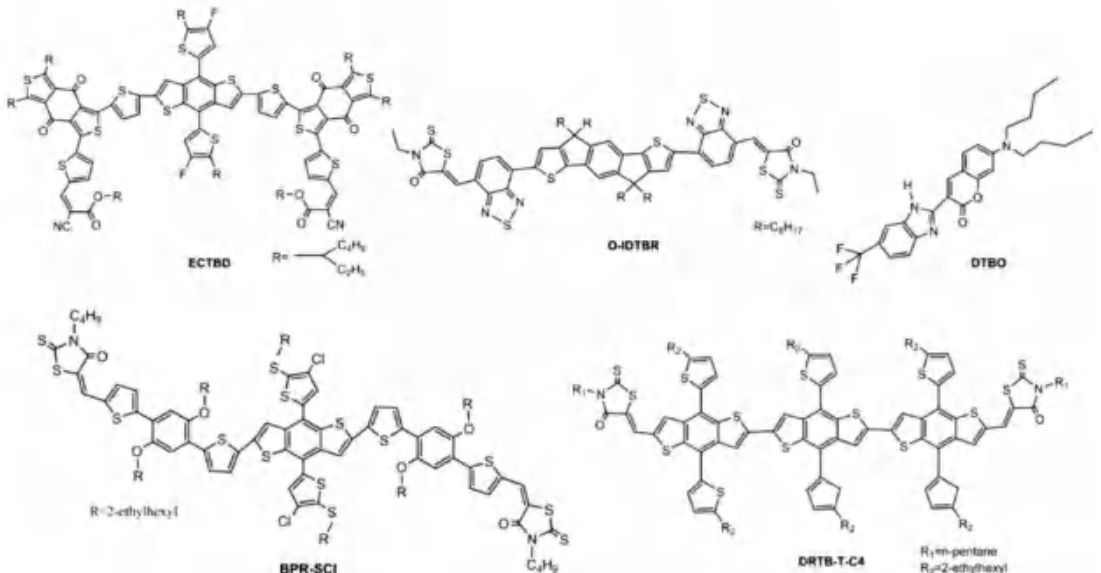


图 4 小分子给体材料的结构

Fig. 4 The structure of small molecule donor materials

表 2 不同小分子给体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能

Tab. 2 Photovoltaic performance of ternary organic solar cell devices blended with different small molecule donor materials and PM6:Y6

Active layer	V_{OC}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
PM6:ECTBD:Y6	0.848	25.54	76.24	16.51
PM6:O-IDTBR:Y6	0.850	25.75	76.00	16.60
PM6:DTBO:Y6	0.830	26.88	74.92	16.64
PM6:BPR-SCI:Y6	0.870	25.77	75.00	16.74
PM6:BRTB-T-C4:Y6	0.850	24.79	81.30	17.13

2.2 受体

2.2.1 富勒烯受体

富勒烯受体材料的结构如图 5 所示,富勒烯受体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能见表 3。近年来,Yan 等人^[26]成功地将 PC71BM 引入到 PM6:Y6 中,在混合比例为 1:1:0.2 的条件下,在刚性机片上的 PCE 达到了 16.67% (认证为 16.0%)。PC71BM 的引入增强了薄膜的光吸收能力,优化了互穿形貌以促进光生电荷的解离和提取,值得注意的是,PM6:Y6:PC71BM 体系可以制备无 ITO 的柔性 OSCs,其 PCE 超过 14%,并且具有良好的弯曲性能。Pan 等人^[27]在 PM6:Y6 二元体系中加入少量的 PC71BM,由于 PC71BM 的 LUMO 能级介于 PM6 和 Y6 之间,导致 PM6:Y6:PC71BM 三元器件 V_{OC} 的增加,使 PCE 达到 16.7%。当 PC71BM 与 PM6:Y6 共混后,保持了原来精细的薄膜形貌和 π - π 堆积模式,从而提高了空穴和电子迁移率,同时也减少了分子复合。

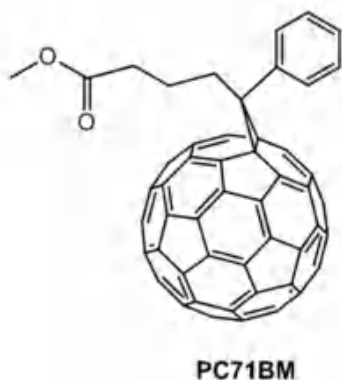


图 5 富勒烯受体材料的结构

Fig. 5 Structure of fullerene acceptor materials

表 3 富勒烯受体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能

Tab. 3 Photovoltaic performance of ternary organic solar cell devices blended with fullerene acceptor materials and PM6:Y6

Active layer	V_{OC}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
PM6:Y6:PC71BM	0.861	25.10	77.20	16.70
PM6:Y6:PC71BM	0.850	25.70	76.35	16.67

2.2.2 小分子受体

小分子受体材料的结构如图 6 所示,不同小分子受体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能见表 4。一般来说,具有 2 个小分子受体的三元 OSCs 比具有 2 个给体三元 OSCs 更容易获得高 PCE^[28]。Li 等人^[29]将近红外吸收体小带隙非富勒烯受体 IDIC 作为 PM6:Y6 体系的第三组分,加入非富勒烯受体后,可以获得更大的给体和受体相,提高了层状结晶度,增加了电荷迁移率,减少了分子复合,PCE 从 15.45% 增加到 16.51%。由于星形分子在二元体系中呈现非晶分布对薄膜形貌进行微调,并且有效地提高了激子解离和电荷收集效率,Cai 等人^[30]将 FBTIC 引入到 PM6:Y6 的二元体系中。FBTIC 和 PM6:Y6 体系相容性良好,可以在不降低光学性能和薄膜形貌的情况下显著增加 V_{OC} ,其 PCE 达到了 16.7%。An 等人^[12]利用 Y6 和 MF1 良好的相容性,将 MF1 作为第三组分引入到 PM6:Y6 二元体系中,获得了 16.8% 的高 PCE。从拉曼映射图、接触角、循环伏安曲线和整齐的共混形貌表征可以证实,Y6 与 MF1 具有良好的相容性,这有利于形成类合金状态,实现了高效的三元 OSCs。考虑到环融合策略可以有效地改善 π 共轭材料的电学、光学和结构性能,Cho 等人^[31]研制了具有双受体-给体-双受体型结构的 γ 系列非富勒烯受体 Y-Th2、Y-BDT 和 Y-CDT,其中 Y-Th2 的 PCE 最高 (16.01%)。Zhan 等人^[32]在 PM6:Y6 体系中引入了小分子受体 BTP-M 构建三元体系,获得了 17.03% 的高效率,远高于二元体系 (15.61%)。由于 Y6 与 BTP-M 形成合金材料,相较于二元器件,三元器件的能量损失降低,同时提高了量子效率。Li 等人^[33]开发了不对称电子受体 BTP-S2,将 BTP-S2 引入到 PM6:Y6 体系中,降低了相应器件的无辐射损耗和能量损耗,促进了电荷分离,从而使 PCE 达到 17.43%。

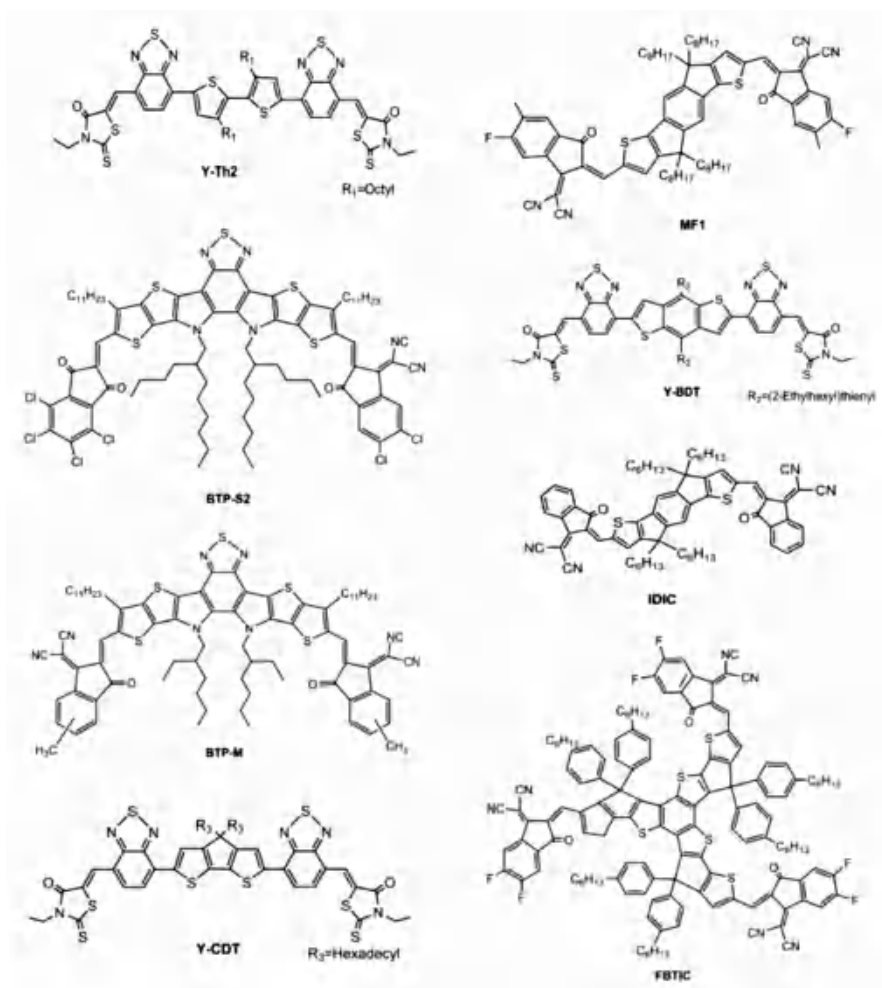


图 6 小分子受体材料的结构

Fig. 6 Structure of small molecule acceptor materials

表 4 不同小分子受体材料与 PM6:Y6 共混的三元有机太阳能电池器件的光伏性能

Tab. 4 Photovoltaic performance of ternary organic solar cell devices blended with different small molecule acceptor materials and PM6:Y6

Active layer	V_{OC}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	$FF/\%$	$PCE/\%$
PM6:Y6:Y-Th2	0.851	25.35	71.44	15.70
PM6:Y6:Y-BDT	0.851	25.03	70.04	14.85
PM6:Y6:Y-CDT	0.833	24.68	68.81	14.11
PM6:Y6:IDIC	0.868	25.39	74.92	16.51
PM6:Y6:FBTC	0.866	24.60	77.90	16.70
PM6:Y6:BTP-M	0.875	26.56	73.46	17.03
PM6:Y6:MF1	0.853	25.68	78.61	17.22
PM6:Y6:BTP-S2	0.880	26.20	75.80	17.43

3 基于 PM6:Y6 四元共混有机太阳能电池

给受体材料的结构如图 7 所示,不同给受体材料与 PM6:Y6 共混的四元有机太阳能电池器件的光伏性能详见表 5。四元共混有机太阳能电池是由 4 种材料混合而成,共有 3 种类型:1 个给体和 3 个受

体,2 个给体和 2 个受体或 3 个给体和 1 个受体。这种多组分体系不仅可以扩大吸收光谱,还可以改善薄膜形貌并实现高性能有机太阳能电池。Ma 等人^[34]将 2 种三元体系 PM6:Y6:Br-ITIC 和 PM6:Y6:PC71BM 重新组合成四元体系 PM6:Y6:Br-ITIC:PC71BM,其 PCE 达到了 16.8% (认证 16.2%)。从共混膜的光致发光光谱 (PL) 可以看出 Br-ITIC 和 Y6 存在明显的光谱重叠,随着 Br-ITIC 的增加,Y6 在共混膜中的发射强度可以单调地增加,表明在 Br-ITIC 和 Y6 之间存在能量转移。Li 等人^[35]提出了一种新的四元材料体系,通过将 IDIC 和 PC71BM 引入到 PM6:Y6 二元体系中,获得了 17.1% 的效率。由于引入的 IDIC 和 PC71BM 的 LUMO 能级都要高于 Y6,使得开路电压和短路电流密度都得到了很大的提升。Zhang 等人^[36]设计合成了新的超宽带隙聚合物给体 PhI-Se,将其引入到 PM6:Y6:PC71BM 体系中,实现了 17.2% 的高效率。同时,除了 PhI-Se 和 PM6 形成的相外,PhI-Se 还会

形成单独的相,有助于电荷分离和空穴传输。Li 等人^[37]在 PM6:Y6 体系中加入 SR197 和 PC71BM 制备四元器件,其中不仅 SR197 的 N-H 基团和 Y6 的 F 原子形成分子间氢键,SR197 和 PC71BM 之间也可以形成氢键,定向地调控活性层形态,增强了给体结晶,促进了电荷的传递和收集,使得该四元体系的 PCE 高达 17.48%。Zhang 等人^[38]在双级联四元共混物 PM6:PM7:Y6:PC71BM 中,实现了形态、能量损失低和超快电荷转移动力学之间的平衡,实现了 18.07% 破纪录的效率。

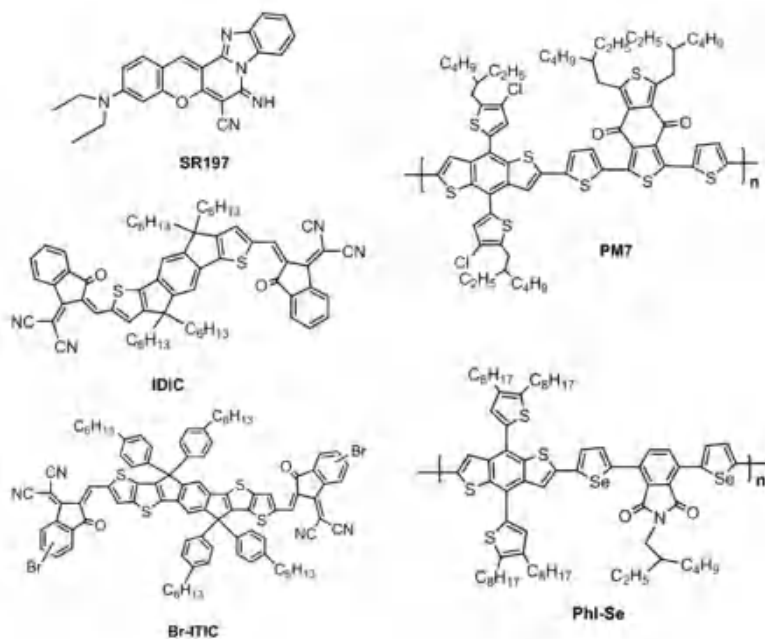


图 7 给/受体材料的结构

Fig. 7 The structure of the donor/acceptor materials

4 结束语

综上所述,基于 PM6:Y6 二元混合体系实现了器件的高光伏性能,其光电转换效率高达 18% 以上。通过在 PM6:Y6 二元体系中引入聚合物给体、小分子给体、富勒烯受体和小分子受体,改善了该二元体系薄膜的表面形貌、优化了相分离、提高了相溶性、降低了能量损失,从而提高了光子捕获能力并促进了激子解离和载流子运输。虽然基于 PM6:Y6 的三元及四元体系可以达到很高的效率,但是对材料的选择没有具体的标准,对高性能材料的制备没有明确的方向。所以,需要进一步探索高性能有机太阳能电池的工作原理。

参考文献

[1] MA Xiaoling, WANG Jian, GAO Jinhua, et al. Achieving 17.4% efficiency of ternary organic photovoltaics with two well-compatible nonfullerene acceptors for minimizing energy loss [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(31): 2001404.

表 5 不同给/受体材料与 PM6:Y6 共混的四元有机太阳能电池器件的光伏性能

Tab. 5 Photovoltaic performance of quaternary organic solar cell devices blended with different donor/acceptor materials and PM6:Y6

Active layer	V_{OC}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
PM6:Y6:IDIC:PC71BM	0.866	26.19	75.29	17.07
PM6:Y6:Br-ITIC:PC71BM	0.853	25.80	76.40	16.80
PM6:Y6:SR197:PC71BM	0.841	27.11	76.62	17.48
PM6:PM7:Y6:PC71BM	0.859	26.55	79.23	18.07
PM6:Phi-Se:Y6:PC71BM	0.851	26.30	76.80	17.20

[2] HUANG He, LI Xiaojun, CHEN Shanshan, et al. Enhanced performance of ternary organic solar cells with a wide bandgap acceptor as the third component [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(48): 27423-27431.

[3] LI Weiping, LIU Wenxiu, ZHANG Xin, et al. Quaternary solar cells with 12.5% efficiency enabled with non-fullerene and fullerene acceptor guests to improve open circuit voltage and film morphology [J]. *Macromolecular rapid communications*, 2019, 40(21): 1900353.

[4] TANG C W. Two-layer organic photovoltaic cell [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(2): 183-185.

[5] YU G, GAO J, HUMMELEN J C, et al. Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions [J]. *Science*, 1995, 270(5243): 1789-1791.

[6] SCHILINSKY P, WALDAUF C, BRABEC C J. Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(20): 3885-3887.

[7] LIN Yuanbo, MAGOMEDOV A, FIRDAUS Y, et al. 18.4% Organic solar cells using a high ionization energy self-assembled monolayer as hole-extraction interlayer [J]. *ChemSusChem*, 2021, 14(7): 3569-3578.

[8] LIU Gongchu, XIA Ruoxi, HUANG Qiri, et al. Tandem organic

- solar cells with 18.7% efficiency enabled by suppressing the charge recombination in front sub-cell [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(29): 2103283.
- [9] KARKI A, VOLLBRECHT J, DIXON A L, et al. Understanding the high performance of over 15% efficiency in single-junction bulk heterojunction organic solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(48): e1903868.
- [10] WANG Rui, ZHANG Chunfeng, LI Qian, et al. Charge separation from an intra-moiety intermediate state in the high-performance PM6:Y6 organic photovoltaic blend [J]. *J Am Chem Soc*, 2020, 142(29): 12751-12759.
- [11] MA Y, ZHOU X, CAI D, et al. A minimal benzo[c][1,2,5]thiadiazole-based electron acceptor as a third component material for ternary polymer solar cells with efficiencies exceeding 16.0% [J]. *Materials Horizons*, 2020, 7(1): 117-124.
- [12] AN Q, WANG J, GAO W, et al. Alloy-like ternary polymer solar cells with over 17.2% efficiency [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(7): 538-545.
- [13] AN Q, WANG J, ZHANG F. Ternary polymer solar cells with alloyed donor achieving 14.13% efficiency and 78.4% fill factor [J]. *Nano Energy*, 2019, 60:768-774.
- [14] SU D, PAN M-A, LIU Z, et al. A trialkylsilylthienyl chain-substituted small-molecule acceptor with higher LUMO level and reduced band gap for over 16% efficiency fullerene-free ternary solar cells [J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(21): 8908-8917.
- [15] ZHANG M, ZHANG F, AN Q, et al. Highly efficient ternary polymer solar cells by optimizing photon harvesting and charge carrier transport [J]. *Nano Energy*, 2016, 22:241-254.
- [16] MA R, LIU T, LUO Z, et al. Adding a third component with reduced miscibility and higher LUMO level enables efficient ternary organic solar cells [J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(8): 2711-2720.
- [17] TANG Yumin, YU Jianwei, SUN Huiliang, et al. Two compatible polymer donors enabling ternary organic solar cells with a small nonradiative energy loss and broad composition tolerance [J]. *Solar RRL*, 2020, 4(11): 2000396.
- [18] XIE Guanshui, ZHANG Zheling, SU Zhenying, et al. 16.5% efficiency ternary organic photovoltaics with two polymer donors by optimizing molecular arrangement and phase separation [J]. *Nano Energy*, 2020, 69:104447.
- [19] HAN J, WANG X, HUANG D, et al. Employing asymmetrical thieno[3,4-d]pyridazin-1(2H)-one block enables efficient ternary polymer solar cells with improved light-harvesting and morphological properties [J]. *Macromolecules*, 2020, 53(15): 6619-6629.
- [20] LIAO X, HE Q, ZHOU G, et al. Regulating favorable morphology evolution by a simple liquid-crystalline small molecule enables organic solar cells with over 17% efficiency and a remarkable J_{sc} of 26.56 mA/cm² [EB/OL]. [2020]. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.0c04297>.
- [21] CHEN S, YAN T, FANADY B, et al. High efficiency ternary organic solar cells enabled by compatible dual-donor strategy with planar conjugated structures [J]. *Science China Chemistry*, 2020, 63(7): 917-923.
- [22] NICOLA G, PALETI S H K, BERTRANDIE J, et al. Exploiting ternary blends for improved photostability in high-efficiency organic solar cells [J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(5): 1371-1379.
- [23] ZHANG Hao, DU Xiaoyang, TANG Yunhan, et al. Introducing trifluoromethyl to strengthen hydrogen bond for high efficiency organic solar cells [J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8:190.
- [24] CHEN Xianjie, ZHANG Qian, WANG Di, et al. High-efficiency ternary organic solar cells based on the synergized polymeric and small-molecule donors [J]. *Solar RRL*, 2020, 4(11): 20200537.
- [25] LI Danqin, ZHU Lei, LIU Xianjie, et al. Enhanced and balanced charge transport boosting ternary solar cells over 17% efficiency [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(34): e2002344.
- [26] YAN Tingting, SONG Wei, HUANG Jiaming, et al. 16.67% Rigid and 14.06% flexible organic solar cells enabled by ternary heterojunction strategy [J]. *Adv Mater*, 2019, 31(39): e1902210.
- [27] PAN Ming'ao, LAU T K, TANG Yabing, et al. 16.7% efficiency ternary blended organic photovoltaic cells with PCBM as the acceptor additive to increase the open-circuit voltage and phase purity [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(36): 20713-20722.
- [28] CHANG Lichun, SHENG Ming, DUAN Leiping, et al. Ternary organic solar cells based on non-fullerene acceptors: A review [J]. *Organic Electronics*, 2021, 90:106063.
- [29] LI Kun, WU Yishi, TANG Yabing, et al. Ternary blended fullerene-free polymer solar cells with 16.5% efficiency enabled with a higher-LUMO-level acceptor to improve film morphology [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(33): 1901728.
- [30] CAI Guilong, LI Yuhao, ZHOU Jiadong, et al. Enhancing open-circuit voltage of high-efficiency nonfullerene ternary solar cells with a star-shaped acceptor [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(45): 50660-50667.
- [31] CHO Y, KUMARI T, JEONG S, et al. Guest-oriented non-fullerene acceptors for ternary organic solar cells with over 16.0% and 22.7% efficiencies under one-sun and indoor light [J]. *Nano Energy*, 2020, 75:104896.
- [32] ZHAN Lingling, LI Shuixing, LAU T K, et al. Over 17% efficiency ternary organic solar cells enabled by two non-fullerene acceptors working in an alloy-like model [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(2): 635-645.
- [33] LI Shuixing, ZHAN Lingling, JIN Yingzhi, et al. Asymmetric electron acceptors for high-efficiency and low-energy-loss organic photovoltaics [J]. *Adv Mater*, 2020, 32(24): e2001160.
- [34] MA Xiaoling, WANG Jian, AN Qiaoshi, et al. Highly efficient quaternary organic photovoltaics by optimizing photogenerated exciton distribution and active layer morphology [J]. *Nano Energy*, 2020, 70:104496.
- [35] LI K, WU Y, LI X, et al. 17.1%-Efficiency organic photovoltaic cell enabled with two higher-LUMO-level acceptor guests as the quaternary strategy [J]. *Science China Chemistry*, 2020, 63(4): 490-496.
- [36] ZHANG Weichao, HUANG Jianhua, XU Jianqiu, et al. Phthalimide polymer donor guests enable over 17% efficient organic solar cells via parallel-like ternary and quaternary strategies [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(32): 202001436.
- [37] LI X, ZHOU L, LU X, et al. Hydrogen bond induced high-performance quaternary organic solar cells with efficiency up to 17.48% and superior thermal stability [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5:3850-3858.
- [38] ZHANG M, ZHU L, ZHOU G, et al. Single-layered organic photovoltaics with double cascading charge transport pathways: 18% efficiencies [J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 309.