

文章编号: 1000-7032(2026)06-1018-11

## 基于氟化侧链的二(噻吩并环戊二烯)并吡啶非富勒烯受体材料合成及光伏性能

涂启胜<sup>1\*</sup>, 林秋香<sup>1</sup>, 王建彬<sup>2\*</sup>, 唐孝生<sup>3</sup>

(1. 福建技术师范学院 无损检测技术福建省高校重点实验室, 福建 福清 350300;

2. 闽江大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

3. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 氟化侧链是提升材料的载流子传输性能的有效手段,但目前基于该策略提升有机太阳能电池的光伏性能仍然较少报道。因此,本文设计合成了三种二(噻吩并环戊二烯)并吡啶的受体-给体-受体(A-D-A)型非富勒烯受体材料(HP1、HP2和HP3),研究了侧链和端基的氟化作用对材料性能的影响。与侧链含氟的HP2相比,仅端基含氟的HP1展现出红移的吸收以及下移的能级。进一步在HP1的侧链引入氟原子,HP3的最低未占分子轨道(LUMO)能级出现一定的上移,光学带隙( $E_g$ )从1.57 eV增大至1.61 eV。与HP1和HP2相比,基于PM6:HP3的混合膜呈现出更明显的相分离形貌和更高载流子传输性能,对应器件能量转换效率(PCE)提高至11.48%,开路电压( $V_{oc}$ )为0.97 V。然而,基于PM6:HP1的器件PCE降低至11.08%, $V_{oc}$ 减小至0.93 V。基于PM6:HP2的器件PCE仅为4.20%。值得一提的是,基于PM6:HP1:HP3(1:0.5:0.5,  $w/w/w$ )的器件PCE则进一步提升至11.95%。结果表明,氟化侧链是提升器件有机太阳能电池光伏性能的有效策略。

**关键词:** 非富勒烯受体; 有机太阳能电池; 二(噻吩并环戊二烯)并吡啶; 氟化侧链; 能量转换效率

中图分类号: TM914.4; O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260037

CSTR: 32170.14.CJL.20260037

## Enhancing Photovoltaic Performance of Dithienocyclopentacarbazole-based Non-fullerene Acceptor by Incorporating Fluorinated Side-chain

TU Qisheng<sup>1\*</sup>, LIN Qiuxiang<sup>1</sup>, WANG Jianbin<sup>2\*</sup>, TANG Xiaosheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Fujian Polytechnic Normal University, Fuqing 350300, China;

2. College of Physics & Electronics Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

3. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: tuqisheng@fpnu.edu.cn; wangjianbinnewlife@foxmail.com

**Abstract:** Side-chain fluorination of non-fullerene acceptors (NFAs) has rarely been reported to enhance the performance of organic solar cells, despite its critical role in boosting the carrier mobility property. Three acceptor-donor-acceptor (A-D-A) type acceptors (HP1, HP2, and HP3) based on dithienocyclopentacarbazole are successfully designed and synthesized. The effects of fluorinations in side-chains and ending groups on the final photovoltaic performance are investigated in detail. Compared to HP2 with fluorinated side-chains, HP1 with fluorinated ending groups shows red-shifted absorption and down-shifted energy levels. For HP3 with fluorination in both side-chains and ending groups, the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) energy level is up-shifted to -3.88 eV in spite of its slightly enlarged optical bandgap in comparison with that of HP1. The PM6:HP3 blend presents better morphology and carrier transport property than HP1- and HP2-based counterparts, and thereby leading to an increased power

收稿日期: 2026-01-31; 修订日期: 2026-02-12

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J011126); 福建省发树慈善基金会资助研究专项(MFK23005); 福州市科技人才培育计划项目(2024-R-001)

Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province (2023J011126); Research Project of Fashu Foundation (MFK23005); Fuzhou Science and Technology Plan Project (2024-R-001)

conversion efficiency (PCE) of 11.48% with an open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of 0.97 V for the corresponding device. However, the HP1-based device delivers a decreased PCE of 11.08% with a reduced  $V_{oc}$  of 0.93 V. And, the PCE based on PM6:HP2 blend is only 4.20%. It should be noted that the organic solar cells based on PM6:HP1:HP3 (1:0.5:0.5, *w/w/w*) affords an enhanced PCE of 11.95%. The findings indicate that rational fluorinated side-chain engineering can significantly enhance the photovoltaic performance of NFAs.

**Keywords:** non-fullerene acceptor; organic solar cell; dithienocyclopentacarbazole; fluorinated side-chain; power conversion efficiency

## 1 引言

本体异质结有机太阳能电池(OSCs)凭借柔性佳、透光性优、制备成本低及环境友好等突出特性,已成为光伏领域的研究热点<sup>[1-4]</sup>。在该类电池的发展进程中,富勒烯类受体材料(以PC<sub>61</sub>BM和PC<sub>71</sub>BM为典型代表)曾长期占据核心地位,其具备高电子迁移率、电荷传输各向同性及与聚合物给体材料相容性良好等优势<sup>[5]</sup>,助力有机太阳能电池的能量转换效率(PCE)突破11%<sup>[6]</sup>。然而,富勒烯受体材料存在固有缺陷,制约了器件光伏性能的进一步提升。相比之下,非富勒烯受体材料具有合成成本低廉、制备工艺简便的特点,且其能级与带隙可实现连续精准调控,能够与聚合物给体材料形成更优的能级匹配,为器件性能突破提供了关键支撑<sup>[7-13]</sup>。近年来,伴随高性能聚合物给体材料的研发突破与器件制备工艺的持续优化,基于非富勒烯受体材料的光伏性能已取得重要进展<sup>[8,12,14-15]</sup>,展现出广阔的应用前景。

目前,A-D-A分子构型是构筑高性能非富勒烯受体材料的最成功策略之一<sup>[16-18]</sup>,其中D为给电子单元,A为吸电子单元。过去十几年中,研究人员通过分子结构的设计优化,开发出种类丰富、结构多样的非富勒烯受体材料,以此调控材料光电特性,进而提升器件光伏性能<sup>[19-30]</sup>。其中,在分子骨架引入具有缺电子效应的卤素原子,正是提升该材料光伏性能的有效手段。研究表明,卤素原子的引入有助于降低材料能级、减小带隙、提高分子平面性并优化活性层形貌<sup>[31-34]</sup>。目前,已有诸多课题组报道了基于卤化端基的非富勒烯受体材料研究成果。例如,Zhan等通过在分子端基引入氟原子,促进了分子内电子转移,实现材料能级下移与带隙窄化<sup>[35]</sup>;同时,又借助端基氟原子诱导形成的分子间F...S与F...H非共价键,增强薄膜分子间相互作用,提升共混膜载流子迁移率。基于该

端基氟化受体材料的器件光电转换效率提升至12.10%<sup>[35]</sup>,远高于端基未氟化的受体材料器件的8.88%。Hou等则将经典受体分子Y6的端基氟原子替换为氯原子,实现了材料吸收光谱红移,并且器件非辐射复合损失降低,器件效率提升至16.50%<sup>[36]</sup>。值得注意的是,与研究人员在受体分子的端基卤化作用的研究投入了大量的精力相比,针对氟化侧链的相关报道仍较为匮乏,该领域具有较大的探索空间与研究价值。研究表明,氟化侧链借助氟原子强吸电子效应,容易实现材料能级和带隙更精细的调控;其诱导的非共价作用能增强分子间相互作用,优化 $\pi$ - $\pi$ 堆积与薄膜形貌,提升载流子传输性能,从而提高器件光伏性能<sup>[18,28]</sup>。

Zheng等报道了一系列以二(噻吩并环戊二烯)并萘、二(噻吩并环戊二烯)并硫茆及二(噻吩并环戊二烯)并咪唑为核心骨架的非富勒烯受体材料<sup>[37-39]</sup>,但氟原子对该类梯形稠环受体材料理化性能的影响尚未得到系统性探究。基于此,本文通过调控氟原子在分子结构中的取代位点,深入分析氟化修饰对材料性能的调控机制。如图1所示,本文设计并合成了三种基于二(噻吩并环戊二烯)并咪唑骨架的受体材料(HP1、HP2和HP3),HP1的氟原子位于端基,HP2的氟原子位于侧链,HP3的氟原子位于端基和侧链。在此基础上,系统探究了氟化侧链与氟化端基对材料光学性能、电化学性能、薄膜形貌、载流子传输性能及光伏性能的影响规律。以宽带隙聚合物PM6作为电子给体材料,基于HP2的器件光电转换效率仅为4.20%。当氟原子取代位点从侧链转移至端基时,PM6:HP1共混体系的器件效率大幅提升至11.08%。在分子的侧链与端基同时引入氟原子的HP3体系中,器件效率进一步提高至11.48%。此外,基于PM6:HP1:HP3的三元共混器件,其PCE进一步提升至11.95%。上述研究结果证实,

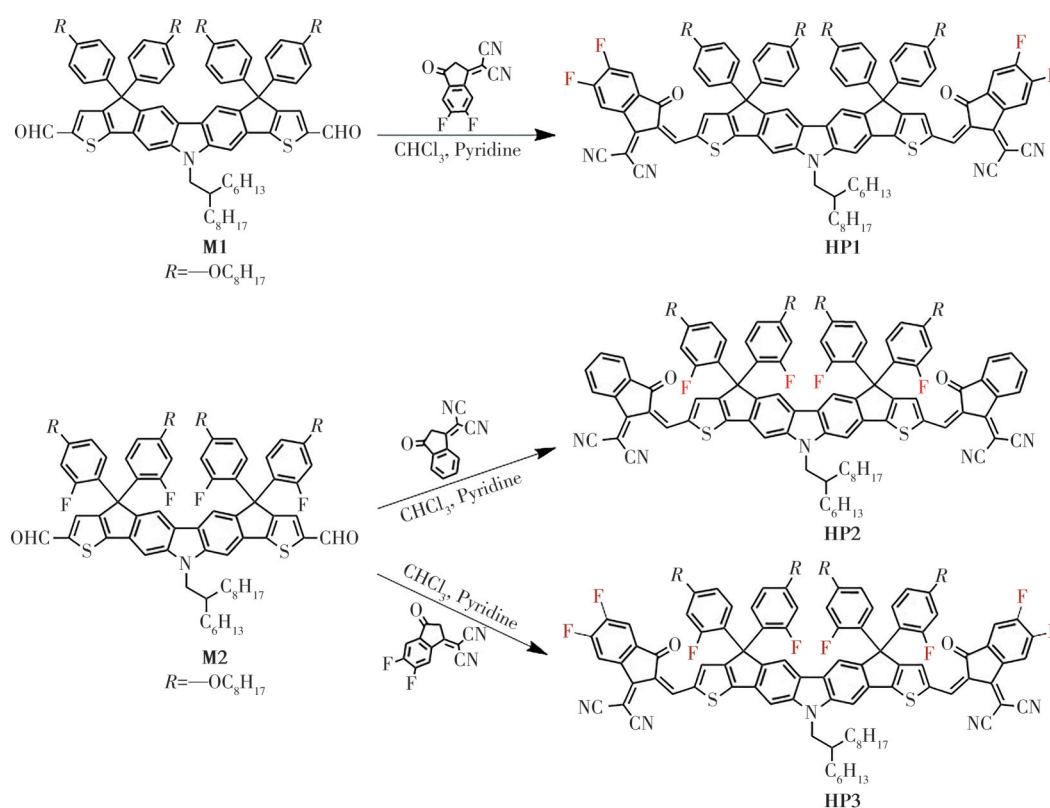


图 1 非富勒烯受体材料 HP1、HP2 和 HP3 的合成路线

Fig.1 Synthetic routes of non-fullerene acceptors HP1, HP2, and HP3

氟化修饰是优化梯形稠环受体分子结构,提升器件光伏性能的有效策略。

## 2 实 验

### 2.1 材料合成

除非特别说明,实验过程中所用的材料试剂都未经进一步纯化,直接购买使用。单体 M1 和 M2 参考已报道的文献合成<sup>[38]</sup>。

**非富勒烯受体 HP1 的合成:**将单体 M1(0.15 g, 0.10 mmol)、INCN2F(0.19 g, 0.82 mmol)和氯仿(30 mL)装入双口圆底烧瓶,形成黄色溶液。 $N_2$ 鼓泡 20 min 后,向混合液注入吡啶(0.3 mL),溶液迅速变为黑色。在  $N_2$  保护下,将溶液升温至  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,搅拌反应 10 h。反应结束后,直接浓缩得到黑色粗产物,以石油醚:二氯甲烷(3:2, *v/v*)为洗脱剂,柱层析分离得到黑色固体粉末 HP1(0.10 g, 77.4%)。 $^1\text{H NMR}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 400 MHz): 8.89 (s, 2 H), 8.60~8.50 (m, 2 H), 7.89 (s, 2 H), 7.77~7.61 (m, 6 H), 7.15 (d,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 8 H), 6.78 (d,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 8 H), 4.23 (d,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 2 H), 3.89 (t,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 8 H), 2.23 (s, 1 H), 1.80~1.68 (m, 8 H), 1.51~1.14 (m, 64 H), 0.94~0.76 (m, 18 H)。

HRMS (MALDI)  $m/z$ : calc. for  $\text{C}_{120}\text{H}_{129}\text{F}_4\text{N}_5\text{O}_6\text{S}_2$  1 876.935 4; found: 1 876.943 4。EA(%) calc. for  $\text{C}_{120}\text{H}_{129}\text{F}_4\text{N}_5\text{O}_6\text{S}_2$ : C, 76.77; H, 6.93; N, 3.73; found: C, 76.77; H, 6.92; N, 3.60。

**非富勒烯受体 HP2 的合成:**参照 HP1 的合成方法得到 HP2,产率 48.7%。 $^1\text{H NMR}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 400 MHz): 8.90 (s, 2 H), 8.76~8.67 (m, 2 H), 8.05~7.88 (m, 6 H), 7.83~7.70 (m, 4 H), 7.66 (s, 2 H), 6.98 (s, 4 H), 6.62 (s, 4 H), 6.55~6.43 (m, 4 H), 4.21 (d,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 2 H), 3.88 (t,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 8 H), 2.26 (s, 1 H), 1.80~1.65 (m, 8 H), 1.51~1.11 (m, 64 H), 0.94~0.75 (m, 18 H)。HRMS (MALDI)  $m/z$ : calc. for  $\text{C}_{120}\text{H}_{129}\text{F}_4\text{N}_5\text{O}_6\text{S}_2$  1 876.935 4; found: 1 876.938 3。EA(%) calc. for  $\text{C}_{120}\text{H}_{129}\text{F}_4\text{N}_5\text{O}_6\text{S}_2$ : C, 76.77; H, 6.93; N, 3.73; found: C, 76.64; H, 6.77; N, 3.57。

**非富勒烯受体 HP3 的合成:**参照 HP1 的合成方法得到 HP3,产率 50.2%。 $^1\text{H NMR}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 400 MHz): 8.90 (s, 2 H), 8.61~8.50 (m, 2 H), 8.01~7.89 (m, 4 H), 7.77~7.64 (m, 4 H), 6.94 (s, 4 H), 6.75~6.45 (m, 8 H), 4.26 (d,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 2 H), 3.88 (t,  $J=8.0\text{ Hz}$ , 8 H), 2.26 (s, 1 H), 1.80~1.67

(m, 8 H), 1.51~1.04 (m, 64 H), 0.97~0.72 (m, 18 H)。HRMS (MALDI)  $m/z$ : calc. for  $C_{120}H_{125}F_8N_5O_6S_2$  1 948. 897 7; found: 1 948. 897 1。EA (%) calc. for  $C_{120}H_{125}F_8N_5O_6S_2$ : C, 73. 93; H, 6. 46; N, 3. 59; found: C, 74. 15; H, 6. 48; N, 3. 43。

## 2.2 仪器与测试

核磁共振氢谱( $^1H$  NMR)从 Bruker AVANCE-400 核磁共振谱仪采集;高分辨质谱(HRMS)通过 UHR TOF LC/MS 质谱仪采集;元素分析(EA)通过 vario MICRO 元素分析仪实现;紫外可见吸收光谱通过 Lambda 365 分光光度计测得;轻敲击式原子力显微镜(AFM)图像通过 Dimension Icon 扫描探针显微镜采集;薄膜厚度通过 Bruker Dektak XT 台阶仪测试;循环伏安曲线(CV)通过 CHI 604E 电化学工作站测试得到,将含受体材料的溶液滴在工作电极,自然风干成膜,再浸入  $n-Bu_4NPF_6$  (0.1 mol/L in  $CH_3CN$ ) 溶液中扫描测试(100 mV/s)。以二茂铁为内标(补充文件图 S1),材料的最高占据/最低未占据分子轨道(HOMO/LUMO)能级通过以下公式计算得到: $E_{HOMO}/E_{LUMO} = -(4.82 + \varphi_{ox}/\varphi_{red})$  eV,其中  $\varphi_{ox}/\varphi_{red}$  分别为起始氧化/起始还原电位。荧光(PL)猝灭实验在 FSP920-C 荧光光谱仪上进行,选取 550 nm 和 650 nm 作为激发波长。

## 2.3 器件制备与表征

参考已报道文献进行有机太阳能电池的制备与表征<sup>[38]</sup>,本文采用倒置器件结构 ITO/ZnO/PM6:Acceptor/MoO<sub>3</sub>/Ag 来研究受体材料的光伏性能,器件制备流程如下。

(1)将 ITO 玻璃分别用洗涤剂、去离子水(3次)、丙酮和异丙醇超声清洗 5 min。随后,转移至 75 °C 的烘箱烘干备用。

(2)将给/受体材料以一定比例混合,采用氯苯和 1,8-二碘辛烷(DIO)分别作为溶剂和添加剂,总浓度为 20 mg/mL,50 °C 搅拌 3~5 h。

(3)ZnO 电子传输层采用溶胶-凝胶法制备:室温下,将  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  (0.6 g)、 $NH_2(CH_2)_2OH$  (0.17 g)和 2-甲氧基乙醇(12 mL)混合,搅拌 8 h,得到 ZnO 前驱液。在紫外臭氧处理的 ITO 表面旋涂成膜(3 000 r/min,40 s),200 °C 热处理 40 min。冷却 30 min 后,将其快速转移至手套箱。

(4)在 ZnO 上,通过旋涂得到活性层薄膜,并在 140 °C 退火处理 8 min。本实验中,可以通过改变旋涂转速或者活性层溶液浓度来调控活性层厚

度,最佳转速约 2 000 r/min、时间 30 s,对应活性层厚度约 110 nm。

(5)将器件转移至镀膜仪,在高真空( $\leq 2.0 \times 10^{-4}$  Pa)的环境中,蒸镀 MoO<sub>3</sub>(10 nm)和 Ag(100 nm),器件面积为 4 mm<sup>2</sup>。采用环氧树脂胶作为封装胶,对器件进行封装。

(6)将器件置于一个标准太阳光下(AM 1.5 G, 100 mW/cm<sup>2</sup>),用 Keithley 2400 半导体测试仪采集器件光伏性能数据。外量子效率(EQE)曲线通过 Newport-EQE 系统测试得到。

## 3 结果与讨论

### 3.1 受体分子的合成与表征

含氟化侧链的二(噻吩并环戊二烯)并咪唑受体材料的分子结构如图 1 所示,其详细合成步骤可参考已报道相关文献<sup>[38]</sup>。该类受体材料的合成均以 2,7-二溴咪唑为起始原料,经五步有机反应制得相应醛基单体;目标非富勒烯受体分子 HP1、HP2 与 HP3 通过 Knoevenagel 缩合反应制备得到,反应产率分别为 77.4%、48.7% 和 50.2%。通过  $^1H$  NMR、HRMS 及 EA 等测试方法,对三种非富勒烯受体材料进行结构表征, $^1H$  NMR 和 HRMS 谱图如图 S2~S7 所示。溶解性测试表明,在 20 °C 条件下,HP1、HP2 和 HP3 均易溶于二氯甲烷、三氯甲烷、甲苯等常用有机溶剂。

### 3.2 受体材料的光学和电化学性质

HP1、HP2 和 HP3 的紫外-可见吸收光谱如图 2 所示,相关数据列于表 1。如图 2(a)所示,在稀氯仿溶液中( $5.0 \times 10^{-6}$  mol/L),由于二(噻吩并环戊二烯)并咪唑给电子单元与吸电子单元之间存在较强的分子内电子转移效应,受体材料在 550~750 nm 均具有较强的吸收。其中,HP2 的最大吸收峰( $\lambda_{max}$ )位于 661 nm,对应的摩尔吸光系数( $\epsilon$ )为  $1.83 \times 10^5$  L/(mol·cm)。将 HP2 的氟原子转移至受体分子的端基,对应材料 HP1 的吸收峰红移至 682 nm, $\epsilon$  则提高至  $1.98 \times 10^5$  L/(mol·cm)。当进一步在 HP1 的侧链引入氟原子,得到侧链和端基都含氟的受体材料 HP3。测试结果表明,HP3 的吸光能力得到改善, $\epsilon$  为  $2.10 \times 10^5$  L/(mol·cm),有利于提高器件对太阳光的利用。但是,其最大吸收峰蓝移至 673 nm,可能是由于给体单元氟化侧链的引入导致 HP3 的给/受体单元间的电子转移作用减弱。如图 2(b)和表 1 所示,在薄膜态,HP1、HP2 和 HP3 的吸收光谱都呈现出不同程度

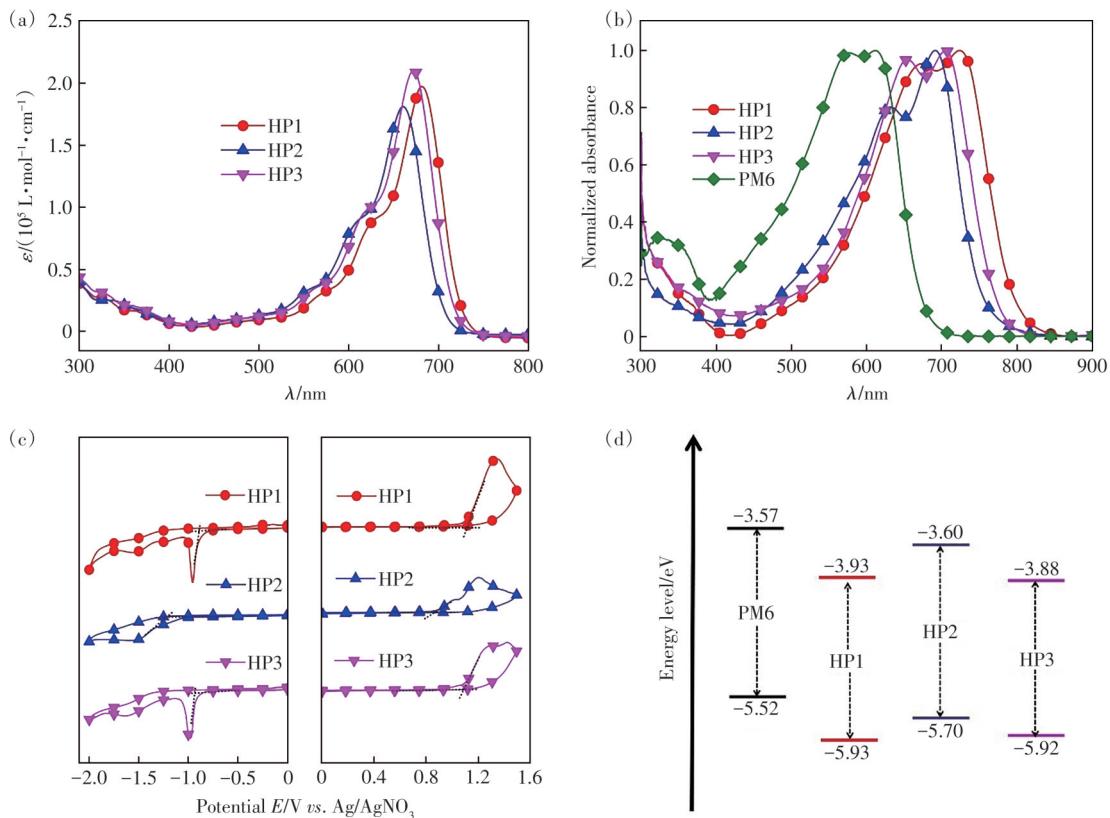


图2 (a)在氯仿中,HP1、HP2和HP3的紫外-可见吸收光谱;(b)在薄膜态,三种受体材料和PM6的紫外-可见吸收光谱;(c)三种受体材料的循环伏安曲线;(d)三种受体材料和PM6的能级图

Fig.2 (a) Absorption spectra for HP1, HP2, and HP3 in dilute chloroform solutions. (b) Absorption spectra for three NFAs and PM6 in pure films. (c) Cyclic voltammetry curves for the three NFAs. (d) Energy level diagram for the three NFAs and PM6

表1 HP1、HP2和HP3的光学和电化学性能

Tab. 1 Optical and electrochemical performances of HP1, HP2 and HP3

Acceptor	$\varepsilon/(10^5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\lambda_{\text{max}}^{\text{solution}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{max}}^{\text{film}}/\text{nm}$	$E_g^a/\text{eV}$	HOMO <sup>b</sup> /eV	LUMO <sup>c</sup> /eV
HP1	1.98	682	725	1.57	-5.93	-3.93
HP2	1.83	661	691	1.66	-5.70	-3.60
HP3	2.10	673	706	1.61	-5.92	-3.88

<sup>a</sup> Optical bandgaps estimated from the onset of the absorption spectra in thin film; <sup>b</sup>  $E_{\text{HOMO}} = -(\varphi_{\text{ox}} + 4.82) \text{ eV}$ ; <sup>c</sup>  $E_{\text{LUMO}} = -(\varphi_{\text{red}} + 4.82) \text{ eV}$ .

的红移,对应的 $\lambda_{\text{max}}$ 分别位于725,691,706 nm,表明薄膜中存在较强的分子间相互作用。根据起始吸收边的位置,计算得到HP1、HP2和HP3的光学带隙分别为1.57,1.66,1.61 eV。与溶液吸收现象的规律类似,侧链和端基都含氟的HP3比HP1的最大吸收峰蓝移了19 nm,带隙也变宽。在三种受体材料中,HP2的光学带隙最宽,不利于器件短路电流密度( $J_{\text{sc}}$ )的提升。如图2(b)所示,聚合物给体材料PM6的吸收光谱集中于400~700 nm,与HP1、HP2、HP3都能形成较好的光谱互补,有利于提高器件对太阳光的利用,从而提升 $J_{\text{sc}}$ 数值<sup>[5,40]</sup>。

本文采用循环伏安法研究了HP1、HP2和HP3的电化学性质,如图2(c)所示,相关数据如表1所

示。HP1、HP2和HP3的起始氧化/还原电位( $\varphi_{\text{ox}}/\varphi_{\text{red}}$ )分别为1.11/-0.89,0.88/-1.22,1.10/-0.94 eV,对应的电化学带隙为2.00,2.10,2.04 eV,该结果与紫外-可见吸收光谱的测试结果相吻合。计算表明,HP2的HOMO/LUMO能级分别为-5.70/-3.60 eV。当将氟原子转移至主链的端基,HP1的HOMO/LUMO能级分别下移至-5.93/-3.93 eV。与HP1相比,在氟化侧链的作用下,HP3的LUMO能级明显上移,HOMO/LUMO能级分别为-5.92/-3.88 eV。相关研究结果表明,受体材料的LUMO越浅,越有助于与聚合物给体材料构筑具有高 $V_{\text{oc}}$ 的器件<sup>[27-28]</sup>。此外,如图2(d)所示,HP1和HP3都与PM6具有较高的能级匹配度,给/受体材料之间的能级差能

够确保激子高效解离。然而,HP2和PM6之间的LUMO能级差值仅为0.03 eV,不利于激子高效解离,容易导致器件性能下降。

### 3.3 荧光猝灭实验分析

本文通过对单组分以及共混膜荧光发射光谱的表征,研究了器件激子解离和电荷传输行为。根据单组分薄膜最大吸收峰的位置,分别选取650 nm和550 nm作为受体材料、给体材料以及对应混合膜的荧光激发波长。如图3(a)~(c)所示,激发波长为650 nm,HP1、HP2与HP3的荧光发射光谱集中于700~880 nm。同时,基于PM6:HP1和PM6:HP3的二元混合膜的荧光很弱,HP1和HP3的荧光均基本被PM6猝灭。而且,基于PM6:HP1:HP3(1:0.5:0.5,  $w/w/w$ )的三元混合膜,受体材料

的荧光被PM6猝灭得更彻底,表明空穴从受体材料至给体材料PM6的传输效率进一步提升。如图3(d)所示,当激发波长为550 nm,PM6的荧光发射光谱集中于600~800 nm。与空穴传输规律相似,在PM6:HP1和PM6:HP3两种二元共混膜中,给体材料PM6的荧光均基本被受体材料猝灭。同样地,相较于二元共混体系,PM6:HP1:HP3三元共混膜中PM6的荧光被猝灭得更彻底,说明电子从PM6向受体材料的转移过程更高效。此外,PM6:HP2共混膜的荧光猝灭效率整体较低,这可能与PM6和HP2之间能级匹配性较差以及共混膜形貌不佳密切相关。以上结果表明,侧链和端基的协同氟化作用会对促进混合膜的电子和空穴的传输性能提升,从而改善器件光伏性能。

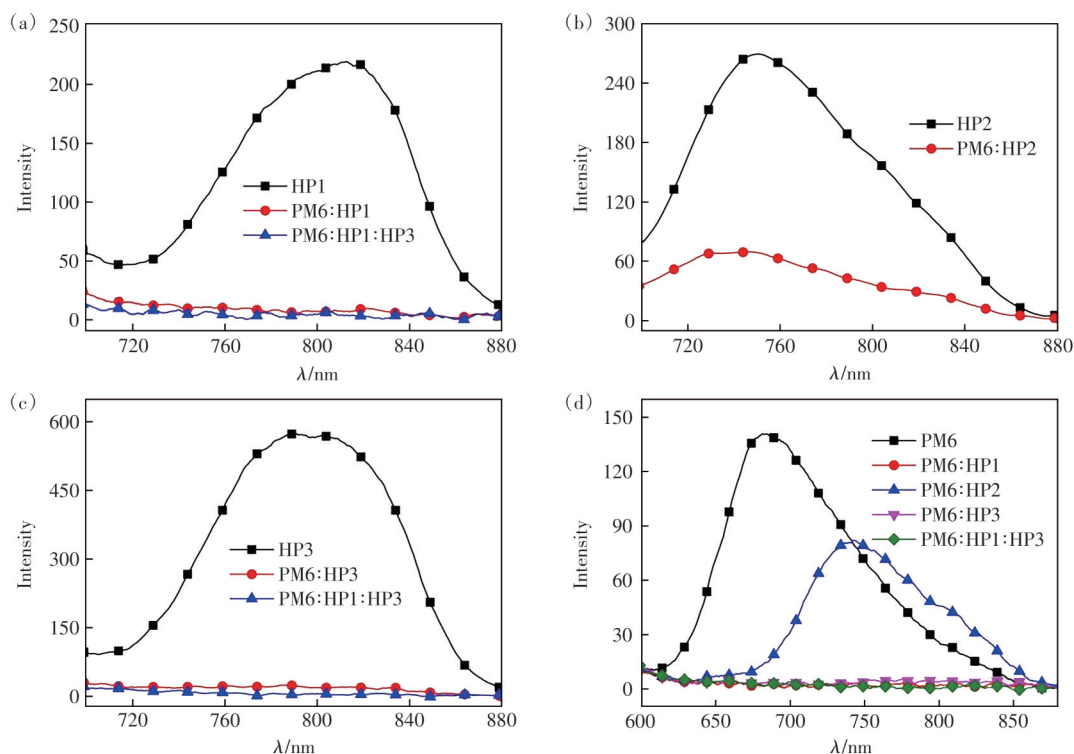


图3 基于HP1、HP2、HP3和PM6单组分薄膜和混合膜的荧光发射光谱:(a)~(c)激发波长为650 nm,(d)激发波长为550 nm  
Fig.3 Photoluminescence emission spectra of the pristine films as well as the corresponding blend films based on HP1, HP2, HP3 acceptors, and PM6 donor: (a)~(c)excited at 650 nm, (d)excited at 550 nm

### 3.4 光伏性能研究

本文采用ITO/ZnO/PM6: acceptor/MoO<sub>3</sub>/Ag的倒置器件结构来研究受体材料的光伏性能,器件优化数据如表S1所示。器件最佳活性层的条件如下:氯苯作为溶剂,DIO作为添加剂(0.2%,  $v/v$ ),给/受体材料的比例为1:1( $w/w$ ),总浓度为20 mg/mL,140 °C退火8 min,活性层厚度约110 nm。最优器件的 $J-V$ 曲线如图4所示,相关性能参数如表2

所示。基于PM6:HP2的器件性能最差,PCE仅为4.20%, $V_{oc}$ 为1.11 V, $J_{sc}$ 为7.85 mA/cm<sup>2</sup>,FF为48.2%。该器件较差的 $J_{sc}$ 和FF可归因于较差的能级匹配度和相分离形貌。然而,将HP2的氟原子转移至端基,对应器件(PM6:HP1)的 $J_{sc}$ 和FF均得到显著提升,分别为16.93 mA/cm<sup>2</sup>和70.4%, $V_{oc}$ 为0.93 V,最终器件PCE提高至11.08%。值得注意的是,在HP1的侧链进一步引入氟原子得到HP3,基于PM6:

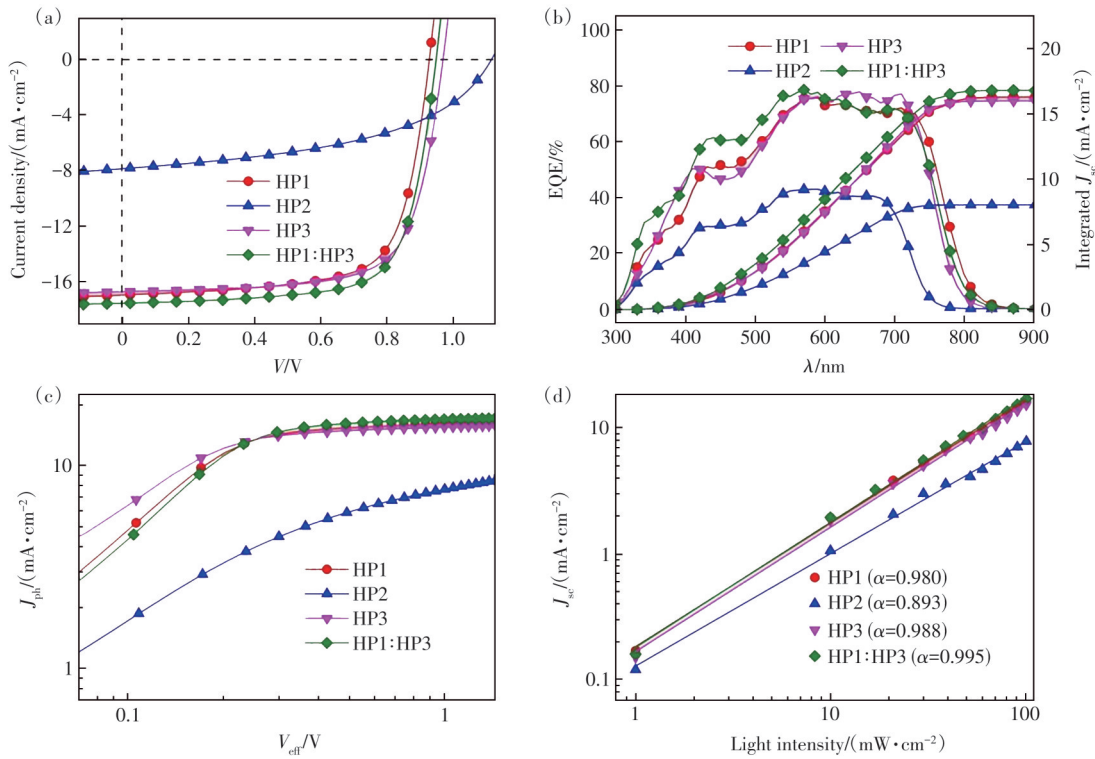


图 4 (a) 基于目标受体材料的二元和三元器件  $J$ - $V$  曲线; (b) 对应器件的 EQE 光谱和积分电流曲线; (c) 器件  $J_{ph}$  与  $V_{eff}$  关系曲线; (d) 器件的光强依赖性曲线

Fig.4 (a) The best  $J$ - $V$  characteristics of binary and ternary PSCs under the irradiation of AM 1.5 G,  $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . (b) EQE spectra and integrated  $J_{sc}$  profiles for the corresponding devices. (c)  $J_{ph}$  versus  $V_{eff}$  curves of the best devices under one sun illumination (AM 1.5 G,  $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). (d) Light-intensity dependence of  $J_{sc}$  curves based on the best devices

表 2 基于 HP1、HP2 和 HP3 的最佳器件光伏性能参数

Tab. 2 Photovoltaic parameters of the PSCs based on HP1, HP2 and HP3, under the illumination of AM 1.5G ( $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

Blend	Blend ratio	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	FF/%	PCE <sup>a</sup> /%
PM6:HP1	1:1	0.93	16.93	70.4	11.08(10.85±0.10)
PM6:HP2	1:1	1.11	7.85	48.2	4.20(4.11±0.10)
PM6:HP3	1:1	0.97	16.69	70.9	11.48(11.34±0.09)
PM6:HP1:HP3	1:0.5:0.5	0.95	17.54	71.7	11.95(11.77±0.11)

<sup>a</sup> Data in parentheses are average and standard deviation values over 8 devices.

HP3 器件的  $V_{oc}$  则提升至 0.97 V,  $J_{sc}$  为  $16.69 \text{ mA/cm}^2$ , FF 为 70.9%, 器件 PCE 进一步提高至 11.48%。此外, 当将 HP1 和 HP3 共同引入活性层中, 构筑三元器件, 如表 1 和表 S2 所示。当 PM6:HP1:HP3 的质量比为 1:0.5:0.5 时, 器件 PCE 进一步提升至 11.95%,  $V_{oc}$  为 0.95 V,  $J_{sc}$  为  $17.54 \text{ mA/cm}^2$ , FF 为 71.7%。需要指出的是, 该器件  $V_{oc}$  在基于 HP1 和 HP3 的二元器件之间。而且, 如图 S8 所示, 基于 HP1:HP3 薄膜的 CV 曲线, 可以计算得到该混合膜的 LUMO 能级为  $-3.90 \text{ eV}$ , 介于 HP1 和 HP3 之间, 表明两种受体材料能够形成较好的合金态<sup>[41-42]</sup>。如图 5 所示, 在 300~550 nm, 三元混合膜的吸收比二元薄膜都有一定程度的增强, 有利于提

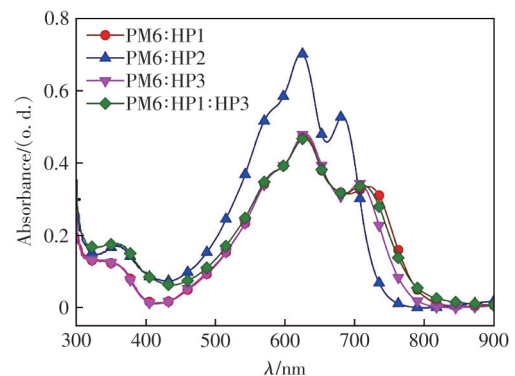


图 5 基于 PM6:HP1、PM6:HP2、PM6:HP3 以及 PM6:HP1:HP3 薄膜的吸收光谱

Fig.5 Absorption spectra of PM6:HP1, PM6:HP2, PM6:HP3, and PM6:HP1:HP3 blends

高器件  $J_{sc}$ 。此外,基于PM6:HP1和PM6:HP3器件的能量损失都较大( $>0.60$  eV)。通过选取具有合适能级的聚合物给体材料,提高给/受体材料之间的能级匹配度,从而使器件性能获得更大突破<sup>[41-42]</sup>。

本文通过表征器件的EQE曲线来研究电池的光电响应情况,以及在一个标准太阳光下得到的器件  $J_{sc}$  的可靠性。如图4(b)所示,器件的EQE曲线与相应混合膜的吸收光谱(图5)基本吻合,表明给/受体材料都对器件的光电流有贡献。在300~550 nm,三元器件的EQE数值比二元器件都高,该区域的光电响应得到增强,与混合膜吸收光谱的结果一致。根据EQE数据,计算得到PM6:HP1、PM6:HP2、PM6:HP3以及PM6:HP1:HP3器件的光电流密度分别为16.31, 8.03, 16.00, 16.83 mA·cm<sup>-2</sup>,与实验中测得的  $J-V$  曲线的数值相吻合,误差都小于5%。

### 3.5 载流子产生、传输和复合研究

为了探索受体分子结构上不同位置的氟化作用对器件的激子解离、载流子传输和收集的影响,本文探究了器件的光电流密度( $J_{ph}$ )与有效电压( $V_{eff}$ )之间的关系,如图4(c)所示。研究表明, $J_{ph}=J_L-J_D$ ,  $J_L$ 和 $J_D$ 分别是指在光照和暗态条件下,器件的电流密度; $V_{eff}=V_0-V_{bias}$ ,  $V_0$ 为 $J_{ph}=0$ 的电压,  $V_{bias}$ 为测试时施加在器件上的偏压。在施加足够的偏压下,器件的电子-空穴对都会解离成自由移动的电荷,光电流密度达到饱和状态,此时的光电流密度与饱和电流密度( $J_{sat}$ )相等,即 $J_{ph}=J_{sat}$ 。在一定条件下,器件的激子解离效率可以通过计算 $J_{ph}$ 与 $J_{sat}$ 的比值来表征,即 $P_{dis}=J_{ph}/J_{sat}$ ,  $P_{dis}$ 越接近1器件的激子解离效率越高<sup>[43]</sup>。如图4(c)所示,  $V_{eff}>2.0$  V时,基于HP1、HP3二元/三元器件的光电流都达到饱和状态。在短路条件下,基于HP1和HP3的器件的 $P_{dis}$ 为98.5%和98.6%,表明基于氟化侧链有利于促进器件激子解离。相比之下,基于PM6:HP2的器件降至95.1%,激子解离效率最低,进而限制器件性能的提升。而基于PM6:HP1:HP3器件的 $P_{dis}$ 高达99.2%,该结果也与该三元器件表现出更高的 $J_{sc}$ 一致。

为了进一步考察氟化作用对器件的双分子复合的影响,本文测试了器件的 $J_{sc}$ 对光强( $P$ )的依赖性关系,如图4(d)所示。研究表明,器件的 $J_{sc}$ 和 $P$ 之间的关系可以用公示 $J_{sc} \propto P^\alpha$ 表示,  $\alpha$ 表示器件的双分子复合程度,  $\alpha$ 越接近1,器件的双分子

复合几率越低<sup>[43-44]</sup>。结果显示,基于PM6:HP2器件的 $\alpha$ 值仅为0.893,双分子复合几率最高。而基于PM6:HP1器件的 $\alpha$ 提升至0.980,当在侧链进一步引入氟原子,对应器件的 $\alpha$ 提升至0.988,表明氟化侧链的引入能够有效抑制器件的双分子复合。基于PM6:HP1:HP3器件的 $\alpha$ 进一步提升至0.995,其数值越高意味着器件双分子复合越弱,有利于器件FF的提高。

此外,为了进一步研究受体材料的分子结构与性能之间的关系,采用空间限制电流法(SCLC)来测试受体材料的载流子迁移率。本文分别采用ITO/PEDOT:PSS/PM6:acceptor/Au和ITO/ZnO/PM6:acceptor/Ca/Al的器件结构来测试共混膜的空穴和电子迁移率。如图S9所示,基于PM6:HP2的空穴( $\mu_h$ )和电子( $\mu_e$ )迁移率都较低,分别仅为 $0.59 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s)和 $1.50 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s)。当将侧链的氟原子分别转移至两侧的端基时,PM6:HP1混合膜的 $\mu_h$ 和 $\mu_e$ 分别提升至 $7.17 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s)和 $10.9 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s),  $\mu_e/\mu_h$ 比值为1.52,电子和空穴迁移率的平衡性提高。进一步在侧链引入氟原子时,PM6:HP3混合膜的 $\mu_h$ 和 $\mu_e$ 分别为 $5.93 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s)和 $7.75 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s),  $\mu_e/\mu_h$ 比值降至1.31,表明氟化侧链能够有效改善载流子传输性能。当引入HP1作为第三组分时,基于PM6:HP1:HP3三元混合膜的 $\mu_h$ 和 $\mu_e$ 分别提升至 $8.24 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s)和 $9.98 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/(V·s),并且电子和空穴迁移率的平衡性得到进一步提高( $\mu_e/\mu_h=1.21$ ),有利于提高器件的 $J_{sc}$ 和FF。

### 3.6 活性层形貌研究

活性层形貌是决定器件激子解离效率和载流子传输性能的一个关键因素,从而影响最终器件的光伏性能。为了探究氟化作用对活性层形貌的影响,本文对共混膜进行了AFM表征。测试所需的薄膜采用与器件活性层相同的工艺。如图6(a)~(c)所示,基于PM6:HP2的表面最为粗糙,均方根(RMS)数值为1.12 nm。基于PM6:HP1薄膜的RMS降低至0.97 nm,而PM6:HP3薄膜则进一步降低至0.85 nm,说明氟化侧链有助于降低混合膜的粗糙度,改善界面欧姆接触。另外,如图6(d)所示,PM6:HP1:HP3的三元混合膜最为光滑,RMS仅为0.73 nm,促使载流子传输性能提高。如图6(e)、(f)所示,基于HP1和HP2的二元混合膜都可以观察到纳米尺度的相分离现象,其中PM6:

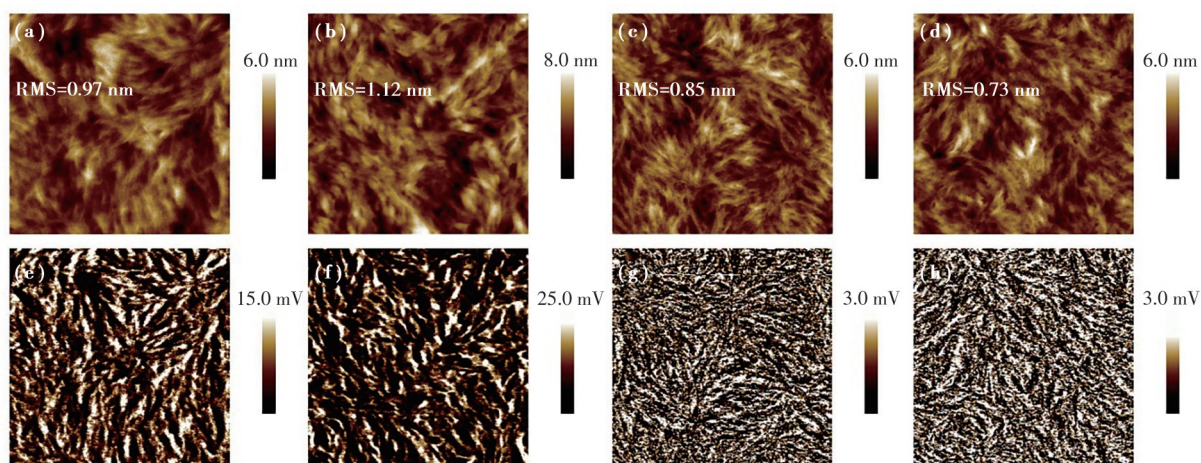


图6 混合膜的AFM高度图(上)和相图(下)。(a),(e)PM6:HP1;(b),(f)PM6:HP2;(c),(g)PM6:HP3;(d),(h)PM6:HP1:HP3

Fig.6 AFM height images (up) and AFM phase images (down) of blends. (a), (e)PM6:HP1. (b), (f)PM6:HP2. (c), (g)PM6:HP3. (d), (h)PM6:HP1:HP3

HP1混合膜的相分离尺寸明显小于PM6:HP2。尤为关键的是,基于PM6:HP3二元共混膜(图6(g))形成更纤细且均匀的相分离形貌,说明氟化侧链能够有效调控并优化给受体材料相分离行为。当引入HP1作为第三组分后,PM6:HP1:HP3三元薄膜仍然保持这种良好的相分离形貌,能够为高效的激子解离、载流子传输和收集提供足够的连续通道<sup>[3,7]</sup>,最终实现器件的 $J_{sc}$ 和FF同步提升。

#### 4 结 论

本文设计并合成了三种基于二(噻吩并环戊二烯)并咪唑的A-D-A型非富勒受体材料(HP1、HP2和HP3)。在二(噻吩并环戊二烯)并咪唑分子的侧链和端基引入氟原子来探索材料的化学结构与性能之间的关系。研究表明,侧链的氟

化作用虽然会使材料的吸收出现一定程度的蓝移,但会提高材料的吸光能力,并且促使活性层给/受体材料形成更为理想的相分离形貌,提高载流子传输性能。基于侧链和端基都含氟的HP3器件的PCE为11.48%,高于仅端基含氟的受体材料HP1(PCE=11.08%)和仅侧链含氟HP2(PCE=4.20%)。基于PM6:HP1:HP3的三元器件PCE则进一步提升至11.95%, $V_{oc}$ 为0.95 V, $J_{sc}$ 为17.54 mA/cm<sup>2</sup>,FF为71.7%。结果证实,侧链氟化作用有利于促进器件性能的提升,为活性层给/受体材料的分子结构优化提供了重要参考。

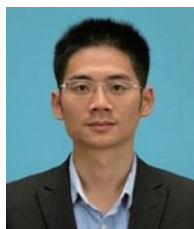
本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260037>

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] WANG Z Y, BO Y W, BAI P J, *et al.* Self-sustaining personal all-day thermoregulatory clothing using only sunlight [J]. *Science*, 2023, 382(6676): 1291-1296.
- [ 2 ] WANG Z Y, ZHANG D, YANG L, *et al.* Mechanically robust and stretchable organic solar cells plasticized by small-molecule acceptors [J]. *Science*, 2025, 387(6732): 381-387.
- [ 3 ] ZHANG G C, LIN F R, QI F, *et al.* Renewed prospects for organic photovoltaics [J]. *Chem. Rev.*, 2022, 122(18): 14180-14274.
- [ 4 ] LU X, XIE C, LIU Y, *et al.* Increase in the efficiency and stability of large-area flexible organic photovoltaic modules via improved electrical contact [J]. *Nat. Energy*, 2024, 9(7): 793-802.
- [ 5 ] HE Z C, XIAO B, LIU F, *et al.* Single-junction polymer solar cells with high efficiency and photovoltage [J]. *Nat. Photonics*, 2015, 9(3): 174-179.
- [ 6 ] ZHAO J B, LI Y K, YANG G F, *et al.* Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents [J]. *Nat. Energy*,

- 2016, 1(2): 15027.
- [ 7 ] HOU J H, INGANÄS O, FRIEND R H, *et al.* Organic solar cells based on non-fullerene acceptors [J]. *Nat. Mater.*, 2018, 17(2): 119-128.
- [ 8 ] 王伟,洪家骏,武娜,等. 薄膜太阳能电池缺陷成像方法应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2150-2163.  
WANG W, HONG J J, WU N, *et al.* Research progress in defect imaging methods for thin film solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(11): 2150-2163. (in Chinese)
- [ 9 ] 张彩霞,张湘鹏,张家豪,等. 非富勒烯有机太阳能电池研究进展:从器件物理到磁场效应 [J]. *发光学报*, 2020, 41(12): 1598-1613.  
ZHANG C X, ZHANG X P, ZHANG J H, *et al.* Advances in non-fullerene organic solar cells: from device physics to magnetic field effects [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(12): 1598-1613. (in Chinese)
- [ 10 ] YAN C Q, BARLOW S, WANG Z H, *et al.* Non-fullerene acceptors for organic solar cells [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2018, 3(3): 18003.
- [ 11 ] ZUO L J, JO S B, LI Y K, *et al.* Dilution effect for highly efficient multiple-component organic solar cells [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(1): 53-60.
- [ 12 ] 王美,刘久铭,刘春雨,等. 体异质结聚合物太阳能电池的界面工程 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1893-1904.  
WANG M, LIU J M, LIU C Y, *et al.* Interface engineering of polymer solar cells [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1893-1904. (in Chinese)
- [ 13 ] YUAN J, ZHANG Y Q, ZHOU L Y, *et al.* Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core [J]. *Joule*, 2019, 3(4): 1140-1151.
- [ 14 ] JIANG Y Y, SUN S M, XU R J, *et al.* Non-fullerene acceptor with asymmetric structure and phenyl-substituted alkyl side chain for 20.2% efficiency organic solar cells [J]. *Nat. Energy*, 2024, 9(8): 975-986.
- [ 15 ] CHEN Z Y, GE J F, SONG W, *et al.* 20.2% efficiency organic photovoltaics employing a  $\pi$ -extension quinoxaline-based acceptor with ordered arrangement [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(33): 2406690.
- [ 16 ] CHENG P, LI G, ZHAN X W, *et al.* Next-generation organic photovoltaics based on non-fullerene acceptors [J]. *Nat. Photonics*, 2018, 12(3): 131-142.
- [ 17 ] TU Q S, ZHENG W J, MA Y L, *et al.* Enhancing the intermolecular interactions of ladder-type heteroheptacene-based nonfullerene acceptors for efficient polymer solar cells by incorporating asymmetric side chains [J]. *CCS Chem.*, 2023, 5(2): 455-468.
- [ 18 ] CAI D D, MA Y L, XING K C, *et al.* Enhancing backbone organization and photovoltaic performance of M-series acceptors by using partially fluorinated side chains [J]. *Chem*, 2024, 10(10): 3131-3147.
- [ 19 ] GHASEMI M, BALAR N, PENG Z X, *et al.* A molecular interaction-diffusion framework for predicting organic solar cell stability [J]. *Nat. Mater.*, 2021, 20(4): 525-532.
- [ 20 ] WANG H T, CAO C C, CHEN H, *et al.* Oligomeric acceptor: A “two-in-one” strategy to bridge small molecules and polymers for stable solar devices [J]. *Angew. Chem.*, 2022, 134(23): e202201844.
- [ 21 ] TIAN L, LIU C C, HUANG F. Recent progress in side chain engineering of Y-series non-fullerene molecule and polymer acceptors [J]. *Sci. China Chem.*, 2024, 67(3): 788-805.
- [ 22 ] BAI H T, WANG Y F, CHENG P, *et al.* An electron acceptor based on indacenodithiophene and 1,1-dicyanomethylene-3-indanone for fullerene-free organic solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3(5): 1910-1914.
- [ 23 ] WU Y, BAI H T, WANG Z Y, *et al.* A planar electron acceptor for efficient polymer solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8(11): 3215-3221.
- [ 24 ] LI D W, ZHANG H R, CUI X Y, *et al.* Halogenated nonfused ring electron acceptor for organic solar cells with a record efficiency of over 17% [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(4): 2310362.
- [ 25 ] MA Y L, ZHENG Q D. A-D-A-type electron acceptors based on pyrrole-containing ladder-type heteroarenes for organic solar cells [J]. *Innov. Mater.*, 2023, 1(3): 100044.
- [ 26 ] YAO H F, CUI Y, YU R N, *et al.* Design, synthesis, and photovoltaic characterization of a small molecular acceptor with an ultra-narrow band gap [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, 56(11): 3045-3049.
- [ 27 ] WANG J Y, XUE P Y, JIANG Y T, *et al.* The principles, design and applications of fused-ring electron acceptors [J].

- Nat. Rev. Chem.*, 2022, 6(9): 614-634.
- [28] DING P F, YANG D B, YANG S C, *et al.* Stability of organic solar cells: toward commercial applications [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2024, 53(5): 2350-2387.
- [29] MA Y L, CAI D D, WAN S, *et al.* Ladder-type heteroheptacenes with different heterocycles for nonfullerene acceptors [J]. *Angew. Chem.*, 2020, 132(48): 21811-21817.
- [30] JIANG K, WEI Q Y, LAI J Y L, *et al.* Alkyl chain tuning of small molecule acceptors for efficient organic solar cells [J]. *Joule*, 2019, 3(12): 3020-3033.
- [31] DAI S X, ZHAO F W, ZHANG Q Q, *et al.* Fused nonacyclic electron acceptors for efficient polymer solar cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139(3): 1336-1343.
- [32] LUO D, JANG W, BABU D D, *et al.* Recent progress in organic solar cells based on non-fullerene acceptors: Materials to devices [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2022, 10(7): 3255-3295.
- [33] LI X M, HUANG G Y, ZHENG N, *et al.* High-efficiency polymer solar cells over 13.9% with a high  $V_{oc}$  beyond 1.0 V by synergistic effect of fluorine and sulfur [J]. *Solar RRL*, 2019, 3(4): 1900005.
- [34] JIANG P C, LIU Y H, SONG J S, *et al.* Emergence of low-cost and high-performance nonfused ring electron acceptors [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2024, 57(23): 3419-3432.
- [35] ZHAO F W, DAI S X, WU Y, *et al.* Single-junction binary-blend nonfullerene polymer solar cells with 12.1% efficiency [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(18): 1700144.
- [36] CUI Y, YAO H F, ZHANG J Q, *et al.* Over 16% efficiency organic photovoltaic cells enabled by a chlorinated acceptor with increased open-circuit voltages [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 2515.
- [37] MA Y L, ZHANG M Q, TANG Y B, *et al.* Angular-shaped dithienonaphthalene-based nonfullerene acceptor for high-performance polymer solar cells with large open-circuit voltages and minimal energy losses [J]. *Chem. Mater.*, 2017, 29(22): 9775-9785.
- [38] TU Q S, MA Y L, ZHOU X B, *et al.* Enhancing the photovoltaic performance of ladder-type dithienocyclopentacarbazole-based nonfullerene acceptors through fluorination and side-chain engineering [J]. *Chem. Mater.*, 2019, 31(15): 5953-5963.
- [39] TANG C Q, CAI D D, ZHENG Q D. Dithienocyclopentadibenzothiophene: a  $C_{2v}$ -symmetric core for nonfullerene acceptors with tunable bandgaps [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7(16): 9609-9617.
- [40] XUE Y J, LAI Z Y, LU H C, *et al.* Unraveling the structure-property-performance relationships of fused-ring nonfullerene acceptors: toward a C-shaped *ortho*-benzodipyrrole-based acceptor for highly efficient organic photovoltaics [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146(1): 833-848.
- [41] AN Q S, ZHANG F J, ZHANG J, *et al.* Versatile ternary organic solar cells: a critical review [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9(2): 281-322.
- [42] LI X E, ZHANG Q L, YU J W, *et al.* Mapping the energy level alignment at donor/acceptor interfaces in non-fullerene organic solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 2046.
- [43] GAO J H, WANG J, AN Q S, *et al.* Over 16.7% efficiency of ternary organic photovoltaics by employing extra PC<sub>71</sub>BM as morphology regulator [J]. *Sci. China Mater.*, 2020, 63(1): 83-91.
- [44] LEE J W, LIM C, LEE S W, *et al.* Intrinsically stretchable and non-halogenated solvent processed polymer solar cells enabled by hydrophilic spacer-incorporated polymers [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2022, 12(46): 2202224.



涂启胜(1988-),男,福建三明人,博士,副教授,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事有机光电材料与器件的研究。

E-mail: tuqisheng@fpnu.edu.cn



王建彬(1983-),男,福建福州人,博士,副教授,2019年于中国科学院福建物质结构研究所获得博士学位,主要从事有机光电材料与器件的研究。

E-mail: wangjianbinnewlife@foxmail.com