

文章编号: 1000-7032(2018)03-0329-08

基于 P3HT 给体的单/双受体平面异质结电池性能及其介电特性

王 超^{1,2}, 余俊乐^{1,2}, 杨 芳^{1,2}, 魏 斌², 郑燕琼^{2*}

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072;

2. 上海大学 新型显示技术与应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘要: 为了研究分析界面电荷等特性对器件的影响, 制备了基于 P3HT 给体的单/双受体平面异质结 (PHJ) 有机太阳能电池 (OPV)。首先研究了 P3HT 膜厚、P3HT 溶剂和 P3HT 膜层的干燥时间对器件性能的影响。为了提高 P3HT/SubPc PHJ 电池的性能, 采用双受体的三元器件结构 (P3HT/SubNc/SubPc), 制备了结构为 ITO/PEDOT:PSS/P3HT/SubNc/SubPc/BCP/Al 的三元瀑布型 OPV 器件并研究了 SubNc 层厚度对其性能的影响。结果表明, 在二元器件 (P3HT/SubPc) 体系中, P3HT 溶于氯仿和 1,2-二氯苯混合溶剂, 成膜后干燥 10 min 退火获得的器件性能最佳。在三元器件中, 随着 SubNc 厚度的增大, 器件光电转换效率 (PCE) 先增大后减小。当 SubNc 厚度为 5 nm 时, 器件 PCE 达到最大。相比于二元器件, 三元器件的各项性能得到明显提升。最后, 比较研究了不同厚度 SubNc 薄膜对器件介电特性的影响。

关键词: 有机太阳能电池; P3HT; 电池性能; 介电特性

中图分类号: TN383+.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183903.0329

Performance and Dielectric Property of Single/Double Acceptor Based Planar Heterojunction Organic Photovoltaic Cells with P3HT Donor

WANG Chao^{1,2}, YU Jun-le^{1,2}, YANG Fang^{1,2}, WEI Bin², ZHENG Yan-qiong^{2*}

(1. School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhengyanqiong@shu.edu.cn

Abstract: To investigate the influence of interface charge on the performance of organic photovoltaic cells (OPVs), the single/double acceptor based planar heterojunction (PHJ) OPV based on P3HT donor were fabricated. Firstly, the effect of poly (3-hexylthiophene) (P3HT) film thickness, P3HT solvent, and the drying time of P3HT film on device performance was studied. To further improve the P3HT/SubPc PHJ performance, the cascade structure of ITO/PEDOT:PSS/P3HT/chloroboron (III) subnaphthalocyanine (SubNc)/boron subphthalocyanine chloride (SubPc)/BCP/Al including double acceptors was fabricated, and the influence of SubNc thickness was also investigated. In the single acceptor system, by using the mixed solvent ($V(\text{chloroform}):V(\text{ODCB})=1:1$) and drying in air for 10 min, the obtained P3HT film achieves the highest performance. While in the cascade structure, the power conversion efficiency (PCE) firstly rises then declines with the increase of SubNc thickness. When the SubNc thickness is 5 nm, the PCE is the highest. The photovoltaic

收稿日期: 2017-07-26; 修订日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(青年)(61504077); 上海市自然科学基金(15ZR1416600)资助项目

Supported by National Natural Scientific Foundation of China for Youth (61504077); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (15ZR1416600)

parameters of cascade cell are all improved compared with the single acceptor based cells. Finally, to get insight into the physical mechanism between the interface charge and device performance, the effect of SubNc thickness on the dielectric characteristic of cascade cells was studied.

Key words: organic photovoltaic cells; P3HT; device performance; dielectric property

1 引 言

太阳能是地球上取之不尽、用之不竭的清洁能源,将太阳能转化为电能是解决全球能源危机的重要途径。有机太阳能电池(OPV)是一种利用有机共轭半导体材料作活性层的光伏器件,利用光生伏特效应将吸收的光能转化为电能,与无机太阳能电池相比,其具有成本低、轻便、易加工等特点^[1-5]。然而迄今为止,有机太阳能电池的最高转换效率与无机太阳能电池的最大为20%的转换效率相比明显偏小,导致有机太阳能电池无法商业化。有机太阳能电池光电转化过程主要包含激子的产生、解离,载流子(电子和空穴)传输和收集等,这些过程都与器件的活性层相关,因此太阳能电池光电转换效率的主要提升手段是通过改变活性层的构成即给体和受体的材料和器件结构来实现^[2]。1992年,A J Heeger将富勒烯作为受体应用到平面异质结(PHJ)太阳能电池中,而PHJ器件受到激子扩散距离的限制,性能的提升也被限制。为了有效改善双层异质结器件性能,研究者们利用双主体材料来增加器件的光吸收,从而达到提高器件光电转换效率(PCE)的目的。Poly(3-hexylthiophene)(P3HT)因其具有较高的空穴迁移率和良好成膜性而成为备受关注的OPV常用给体材料^[6]。但是富勒烯受体有限的光吸收限制了P3HT/富勒烯体系OPV获得更高PCE,因此采用宽吸收光谱的受体材料是提升P3HT体系OPV性能的策略之一。传统给体材料chloroboron(III)subnaphthalocyanine(SubNc)和boron Subphthalocyanine chloride(SubPc)具有近红外吸收。由于吸收光谱能与P3HT互补,另外能级较深,与P3HT的能级匹配,又具有双极性载流子传输特性,因此SubNc和SubPc均可与P3HT形成异质结结构^[7]。由于P3HT/SubNc/SubPc可形成瀑布型结构,因此SubNc双界面接触将对器件性能产生明显影响。另外双受体的应用可进一步拓宽器件的光吸收及载流子远程传输。

本文通过对给体材料P3HT厚度、溶剂和P3HT薄膜退火温度 and 时间的调控,首先研究了其对P3HT/SubPc二元PHJ器件性能的影响。成功制备了三元双受体器件,研究了SubNc厚度对器件性能的影响,同时比较分析了SubNc薄膜厚度对器件的介电特性的影响。研究发现,P3HT薄膜的厚度对器件性能有着明显的影响,P3HT表面均匀性影响给受体界面接触性能。同时发现能级近似的受体相结合形成三元器件,有利于光吸收,从而使得器件性能得到明显提升。说明设计双受体的三元器件是提升PHJ有机太阳能电池性能的有效方法之一。

2 实 验

实验所用双受体的三元瀑布型器件结构为ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(X nm)/SubNc(Y nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm),单受体器件结构为ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(X nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm),如图1所示。其中ITO为阳极,方阻为 15Ω ,厚度为150 nm。用前在去离子水和去污粉混合溶液、丙酮、异丙醇中各超声30 min,最后紫外处理30 min。PEDOT:PSS空穴传输层在处理好的干净ITO上旋涂退火成膜。浓度为12 mg/mL的P3HT溶于不同溶剂中,在手套箱中以不同转速旋涂成膜,以确保膜厚相同,慢干10 min后,在热板上110 °C退火10 min。选择这一退火温度是基于相关报道:P3HT在100~120 °C间退火得到的薄膜空穴传输性能最优^[8]。随后将P3HT薄膜覆盖的基板推入真空腔。当腔体真空度为 1.0×10^{-3} Pa时,依次蒸镀SubNc、SubPc、BCP和Al。

SubPc、BCP和Al的蒸发速率分别为0.03 nm/s、0.06~0.1 nm/s和0.5~1.0 nm/s。器件中P3HT薄膜厚度通过旋涂速率来控制,并由椭圆仪测量膜厚。电流-电压曲线采用Keithley2400双极性电源电表在AM1.5G模拟太阳光源照射下测得。外量子效率(EQE)采用7-SCSpec太阳

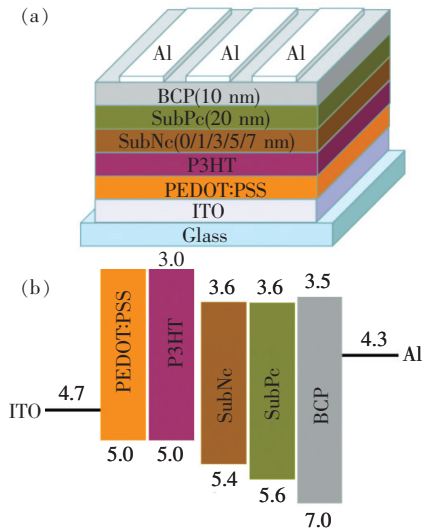


图 1 器件结构(a)和器件中各层能级图(b)

Fig. 1 Device structure(a) and energy level diagram(b) of each layer in device

能测试系统(7-STAR 有限公司, 中国)测得。电容-电压测试采用 agilent E4980A 精密高频数字测试仪(美国 agilent 公司)。薄膜形貌采用原子力显微镜测试(Nanonavi SPA-400 SPM, 日本)。所有器件有效面积为 0.04 cm^2 , 器件未进行任何手段的封装, 测试均在大气环境下进行。

3 结果与讨论

3.1 P3HT 膜层厚度优化

为了研究给体 P3HT 膜厚对单受体器件性能的影响, 我们采用不同旋涂速率(1 500, 2 000, 2 500, 3 000, 3 500 r/min)来控制 P3HT 膜厚, 并制备相应的二元 PHJ 器件 ITO/PEDOT:PSS/P3HT/SubPc/BCP/Al。图 2 展示的是不同厚度 P3HT 相应的 OPV 的 $J-V$ 曲线, 表 1 为器件相应的性能参数。从表 1 中可看出不同膜厚的 P3HT 单受体器件的开路电压(V_{oc})几乎没有变化, 说明 P3HT 膜厚对器件的开路电压影响很小; 短路电流密度(J_{sc})和填充因子(FF)先增大后减小, 在 P3HT 膜厚达到 31.2 nm 和 43.4 nm 时, J_{sc} 和 FF 达到最大, 分别为 1.59 mA/cm^2 和 57%。而 31.2 nm P3HT 的器件 PCE 达到最大值 0.47%, 相比于 1 500 r/min(48.5 nm)涂膜得到的 P3HT 器件, 性能明显提升, 可能的原因为: 低转速下 P3HT 膜过厚, 空穴在传输过程中复合的几率增大, 不利于阳极对载流子(空穴)的收集, 从而降低了器件性能。

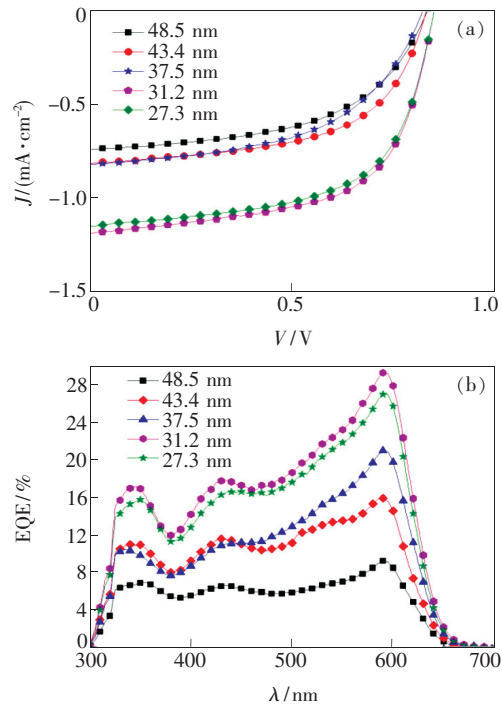


图 2 基于不同厚度 P3HT 层的单受体 PHJ 器件 ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(X nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm)的 $J-V$ 曲线(a)和 EQE 曲线(b)

Fig. 2 $J-V$ (a) and EQE (b) characteristics of PHJ OSCs with different thickness of P3HT layer, device architecture is: ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(X nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm).

而当 P3HT 膜厚降到 31.2 nm 时, 载流子的复合几率在 P3HT/SubPc 中得以降低, 从而增大了器件的 J_{sc} 。

表 1 基于不同 P3HT 膜厚(氯苯为溶剂)的 PHJ 器件性能参数

Tab. 1 Performance of PHJ OSCs with various thickness of P3HT layer (from CB) at the architecture of ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(X nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm)

P3HT thickness/ nm	$V_{oc}/$ V	$J_{sc}/$ ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	FF/ %	PCE/ %
48.5	0.83	0.75	53.47	0.33
43.4	0.83	0.82	57.12	0.39
37.5	0.85	1.07	45.00	0.41
31.2	0.83	1.29	43.26	0.47
27.3	0.81	1.12	45.69	0.42

3.2 P3HT 膜层后处理对器件的影响

为了研究 P3HT 膜层后处理对器件性能的影响

响,我们研究了不同慢干时间对旋涂得到的 P3HT 的影响。在充满氮气的手套箱中慢干 10, 30, 40, 60 min, 然后在热板上 110 °C 退火 10 min 后蒸镀后续的膜层。另外,制备了只在手套箱中慢干 30 min 和 60 min 而不退火处理的两个器件作对比,所有器件的性能参数汇总于表 2。图 3 为相应的 PHJ 器件的 J - V 和 EQE 曲线。在相同退火条件下,二元器件的 J_{sc} 随 P3HT 层溶剂挥发时间的增加而减小,器件的 PCE 也逐渐减小。当慢干时间为 10 min、110 °C 退火 10 min 时,器件效率最佳, V_{oc} 为 0.84 V, J_{sc} 为 1.57 mA/cm², FF 为 57%, PCE 达到 0.47%。在溶剂挥发过程中,相对长时间的慢干有利于溶剂的挥发,聚合物 P3HT 链能有效地进行自组装,从而使其分子结

构更加有序^[9]。然而退火温度过高和时间过长会进一步加速溶剂的挥发,可能导致 P3HT 给体材料的晶畴尺寸过大,进而导致聚合物的变性^[10],因而会使器件效率下降。溶剂挥发(慢干)30 min 再 110 °C 退火 10 min 和仅仅慢干 60 min 无退火处理的器件各性能参数近乎相同,反映了两种 P3HT 薄膜后处理对器件性能的影响几乎相同,说明在这两种工艺条件下 P3HT 链进行自组装的程度相近。手套箱中慢干 60 min 后 110 °C 退火 10 min 的器件相比于无退火处理的器件效率明显下降,说明慢干 60 min, 高温加热可能已导致聚合物的变性。这些结果表明,在有退火处理工艺的条件下,聚合物膜中溶剂自然挥发的时间不宜过长。

表 2 P3HT 薄膜(氯苯为溶剂)不同后处理工艺器件的性能参数,器件结构为 ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(31.2 nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm)

Tab. 2 Performance of PHJ OSCs with different post-treatments of P3HT layer (from CB) at the architecture of ITO/PEDOT:PSS(30 nm)/P3HT(31.2 nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm)

Drying time/min	Annealing	V_{oc}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
10	Yes	0.83	1.29	43.26	0.47
30	Not	0.84	1.12	47.24	0.44
30	Yes	0.83	1.08	45.82	0.41
40	Yes	0.84	0.98	39.84	0.33
60	Yes	0.83	0.83	40.12	0.25
60	Not	0.85	1.10	45.00	0.41

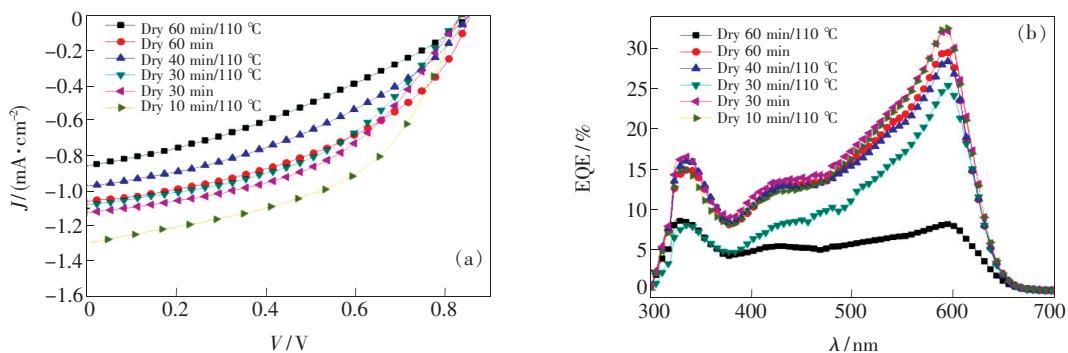


图 3 P3HT 薄膜不同后处理得到的单受体器件的 J - V 曲线(a)和 EQE 曲线(b)

Fig. 3 J - V (a) and EQE (b) characteristics of the single-acceptor based PHJ OSCs with different post-treatments of P3HT layer (in CB)

3.3 不同 P3HT 溶剂对器件性能的影响

为了研究 P3HT 溶液的溶剂对二元器件性能的影响,我们分别使用氯苯(CB)、氯仿(CF)、邻-二氯苯(ODCB)和氯仿:邻-二氯苯体积比为 1:1 的混合溶剂配置浓度为 12 mg/mL 的 P3HT 溶液。使用上述优化后的工艺制备了二元器件,以不同

溶剂 P3HT 溶液制备出厚度基本一致的薄膜,基于 P3HT 不同溶剂的器件性能参数汇总于表 3,相应的 J - V 和 EQE 曲线展示于图 4。由表 3 和图 4 可看出溶剂不同导致器件的 J_{sc} 和 FF 显著变化,致使器件的 PCE 也发生变化。混合溶剂的器件效率最佳, V_{oc} 为 0.78 V, J_{sc} 为 1.23 mA/cm², FF 为

61.09%, PCE 达到 0.59%。PCE 相比氯苯作为溶剂时的器件效率提高了 25%, 可能因为溶剂对 P3HT 薄膜的形貌有着显著影响从而最终影响 $J-V$ 曲线。不同溶剂制备的 P3HT 薄膜的 AFM 图如图 5 所示, 薄膜表面的突起归因于 P3HT 不同的聚集态^[11-12]。氯仿: 邻-二氯苯混合溶剂的 P3HT

薄膜相比其他溶剂获得的膜的表面粗糙度 (RMS) 更小, 仅为 0.68 nm, 结合器件特性说明平整的 P3HT 表面更有利于给受体的良好接触。且 P3HT 的激子扩散长度小于 10 nm, 因此平整的表面有利于激子扩散和电荷分离, 从而获得更高 PCE^[13]。

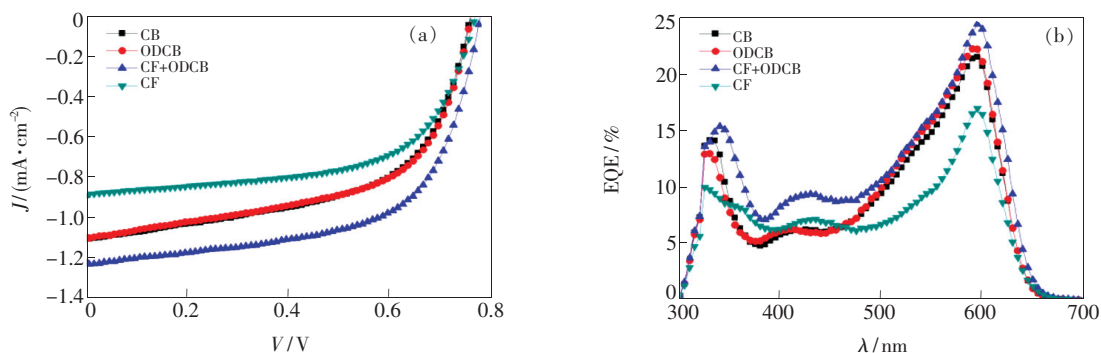


图 4 不同溶剂制备的 P3HT 层相应单受体器件的 $J-V$ 曲线 (a) 和 EQE 曲线 (b), 器件结构为 ITO/PEDOT: PSS(30 nm)/P3HT(31.2 nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm)。

Fig. 4 $J-V$ (a) and EQE (b) characteristics of the single-acceptor-based PHJ OSCs with P3HT film fabricated from various solvents, and the device structure is ITO/PEDOT: PSS(30 nm)/P3HT(31.2 nm)/SubPc(20 nm)/BCP(10 nm)/Al(100 nm).

表 3 基于不同溶剂制备的 P3HT 层的单受体二元器件的性能参数

Tab.3 Summarized performance of the single-acceptor-based PHJ OSCs with P3HT film fabricated from various solvents

Solvent	V_{oc}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
CB	0.76	1.11	56.84	0.48
ODCB	0.74	1.18	54.57	0.48
CF: ODCB	0.78	1.23	61.09	0.59
CF	0.77	0.89	60.71	0.41

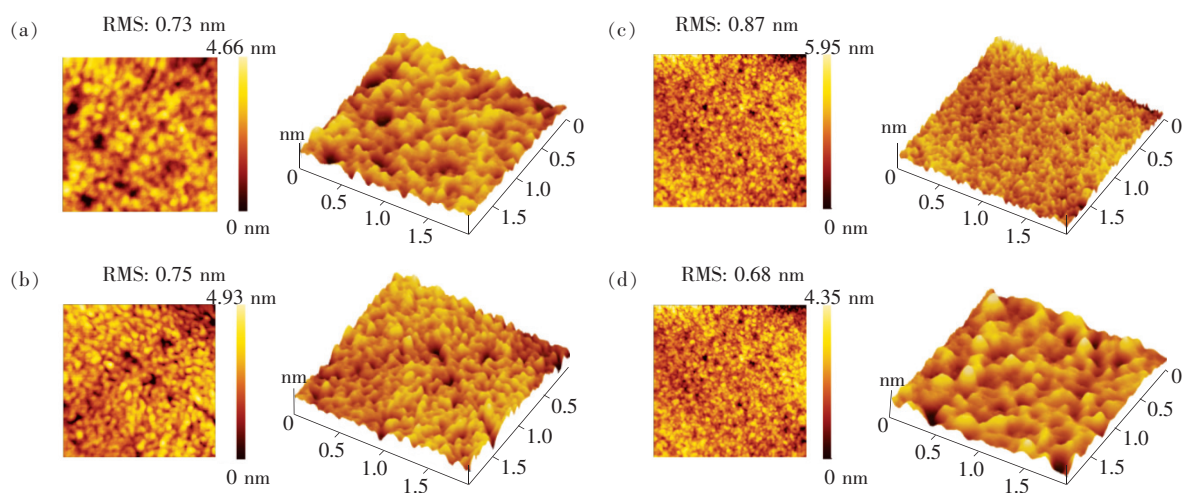


图 5 不同溶剂制备的 P3HT 薄膜 AFM 形貌。(a) 氯苯 (CB); (b) 1,2 邻二氯苯 (ODCB); (c) 氯仿 (CF); (d) CF: ODCB 混合溶剂。扫描尺寸: $2 \mu m \times 2 \mu m$ 。

Fig.5 AFM images of P3HT films fabricated from different solvents. (a) Chlorobenzene (CB). (b) 1,2-dichlorobenzene (ODCB). (c) Chloroform (CF). (d) CF: ODCB. Scanning size: $2 \mu m \times 2 \mu m$.

3.4 基于 SubNc 薄膜的三元器件的介电特性研究

为了进一步提高单受体器件性能,我们设计三元双受体器件结构,成功制备了 ITO/PEDOT:PSS/P3HT/SubNc/SubPc/BCP/Al 双受体瀑布型 PHJ 太阳能电池。基于表 3 中不同溶剂的器件结果,混合溶剂制备的 P3HT 薄膜器件显示更优的性能,因此在三元器件中 P3HT 采用混合溶剂(CF: ODCB)成膜。主要研究了不同厚度 SubNc 对器件性能和介电特性的影响。表 4 为不同 SubNc 厚度的三元器件的性能参数,相应的 $J-V$ 和 EQE 曲线见图 6。由表中参数可看出,三元器件的 V_{oc} 相近,几乎不随 SubNc 厚度增大而变化,主要是因为 SubNc 和 SubPc 的最低未占据分子轨道(LUMO)能级相同^[14-16]。当 SubNc 厚度不超过 5 nm 时,三元器件效率明显优于二元器件,这是因为受体 SubNc 吸收可见光的范围与 SubPc 不同,SubNc 的加入拓宽了器件整体的光吸收范围^[7],使得三元器件激子产生率大于二元器件,因此器件的电流密度增大。当 SubNc 达到 5 nm 时,双受体三元器件性能最佳, V_{oc} 为 0.78 V, J_{sc} 为 2.09 mA/cm²,FF 为 47.52%,PCE 为 0.79%。但当

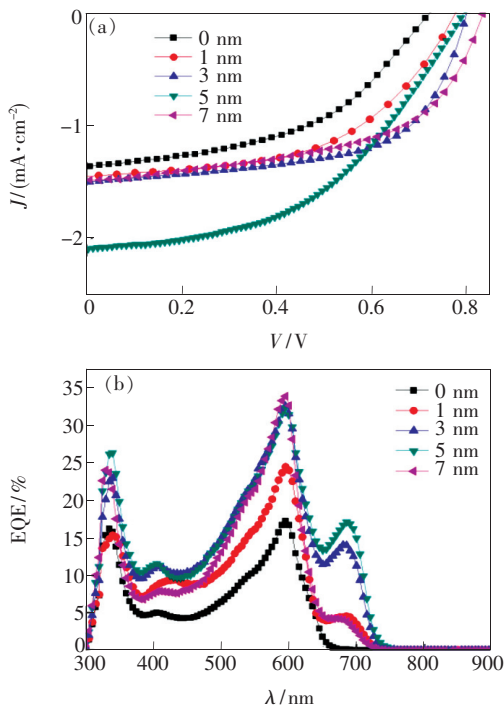


图 6 基于不同厚度 SubNc 层的双受体瀑布结构器件的 $J-V$ 曲线(a)和 EQE 曲线(b)

Fig. 6 $J-V$ (a) and EQE (b) characteristics of the double acceptors based cascade PHJ OSCs with various SubNc thicknesses

表 4 基于不同厚度 SubNc 层的双受体瀑布结构电池的性能参数

Tab. 4 Performances of the double acceptors based cascade PHJ OSCs with various SubNc thicknesses.

SubNc thickness/ nm	$V_{oc}/$ V	$J_{sc}/$ (mA · cm ⁻²)	FF/ %	PCE/ %
0	0.83	1.31	47.18	0.51
1	0.78	1.45	52.28	0.59
3	0.80	1.50	59.91	0.72
5	0.79	2.09	47.32	0.79
7	0.83	1.49	54.00	0.67

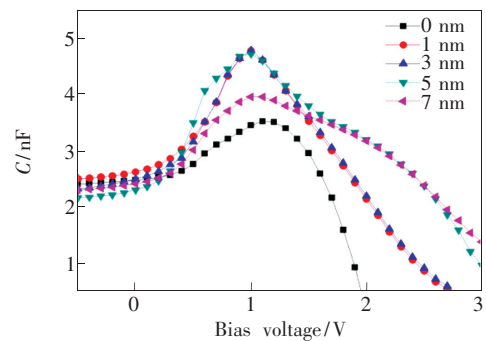


图 7 不同厚度 SubNc 的双受体瀑布结构电池的电容-电压曲线

Fig. 7 Capacitance-voltage characteristics of double acceptors based PHJ OSCs with various SubNc thicknesses

SubNc 厚度继续增大时,器件 J_{sc} 显著下降,引起这一现象可能的原因是激子解离成的电子空穴在传输过程中存在复合损失。

为了研究双受体界面电荷对器件性能的影响及三元器件的介电特性,我们研究了 SubNc 厚度对器件的电容-电压 ($C-V$) 曲线的影响。图 7 展示了不同厚度 SubNc 的三元器件的 $C-V$ 曲线。器件电容电压的关系反映了器件内部及其界面处电荷的积累和复合^[17-18]。在外加较大的反向电压下,由于活性层中载流子被移除,器件等效于平板电容器,电容只与器件的有效面积和厚度有关,为一常数;当外加较小的正向电压时,外加电压会调节器件内的耗尽层宽度,导致空间电荷分布改变,从而引起 $C-V$ 特性不同。 $C-V$ 曲线中的峰值电压可理解为有效电容随外加电场增大到一有限值,此时内建电场消除,减小的有效电场使得有效电荷增大导致了电容增大。而相反的注入电荷降低了表面充电致使电

容减小。相比于二元器件,三元器件的峰值电压稍微降低,峰值电压的减小说明在表面处光诱导电荷的积累降低了有效势垒^[19]。证明 Sub-Nc 层的插入降低了单受体器件的内部势垒,因此有利于提升器件性能。

4 结 论

通过优化制备 P3HT 薄膜过程中的厚度、薄膜退火时间和 P3HT 溶剂,获得了非富勒烯受体器件 P3HT/SubPc 相对较优的性能。实验中发现溶剂对 P3HT 薄膜的形貌有着明显的影响,从而

直接影响单受体二元器件的性能。均匀平整的 P3HT 界面有利于其与受体的接触从而改善器件性能。通过在 P3HT/SubPc 异质结界面上插入另一受体 SubNc,在优化的二元器件基础上,我们制备了三元双受体器件,拓宽了光吸收范围使器件的激子产生率增大,因此明显提升 J_{sc} ,说明采用能级匹配的双受体瀑布结构能有效提升 PHJ 有机太阳能电池性能。电容-电压曲线证明 SubNc 层的插入降低了单受体 P3HT/SubPc 器件的内部势垒,因此有利于提升器件性能。

参 考 文 献:

- [1] SEBASTIEN L, STEVEN V P, ELLEN D S, *et al.*. The future of organic photovoltaic solar cells as a direct power source for consumer electronics [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2012, 103(1):1-10.
- [2] WANG Y M, WEI W, LIU X, *et al.*. Research progress on polymer heterojunction solar cells [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2012, 98(1):129-145.
- [3] LIANG Y Y, XU Z, XIA J B, *et al.*. For the bright future-bulk heterojunction polymer solar cells with power conversion efficiency of 7.4% [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2010, 22(20):E135-E138.
- [4] MARTIN A G, KEITH E, YONSHIHIRO H, *et al.*. Solar cell efficiency tables [J]. *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 2012, 20(1):12-20.
- [5] 王丽娟, 张伟, 秦海涛, 等. 溶液加工条件对聚合物体相异质结太阳能电池性能的影响 [J]. *液晶与显示*, 2013, 28(4):521-526.
WANG L J, ZHANG W, QIN H T, *et al.*. Influence of solution-processed conditions on polymer bulk heterojunction solar cell performance [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2013, 28(4):521-526. (in Chinese)
- [6] 李卫民, 郭金川, 周彬. 溶剂挥发时间对体异质结有机太阳能电池复合特性的影响 [J]. *发光学报*, 2015, 36(4):437-442.
LI W M, GUO J C, ZHOU B. Solvent evaporation time dependent recombination properties in bulk heterojunction organic solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(4):437-442. (in Chinese)
- [7] HUANG P H, WANG Y H, KE J C, *et al.*. Investigation of various active layers for their performance on organic solar cells [J]. *Materials*, 2016, 9(8):667.
- [8] 尹丽琴, 彭俊彪. 聚合物 P3HT 在不同退火温度下的空穴传输特性 [J]. *物理学报*, 2009, 58(5):3456-3460.
YIN L Q, PENG J B. Hole transport in polymer P3HT with different annealing temperatures [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2009, 58(5):3456-3460. (in Chinese)
- [9] HU Z Y, ZHANG J J, ZHU Y J. High-performance and air-processed polymer solar cells by room-temperature drying of the active layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(4):043307.
- [10] ZHENG Y F, GUAN Z Q, YU J S, *et al.*. Effect of *in situ* annealing on the performance of spray coated polymer solar cells [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2013, 111:200-205.
- [11] 刘冠辰, 谢小银. 氯苯和邻二氯苯及其混合物作为溶剂对 P3HT/PCBM 异质结活性层光电转换效率的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(1):13-16.
LIU G C, XIE X Y. Solvent effects of chlorobenzene, ortho-dichlorobenzene and their mixture to performance of P3HT/PCBM-based bulk-heterojunction solar cells [J]. *Sci. Technol. Eng.*, 2016, 16(1):13-16. (in Chinese)
- [12] SHAHEEN S E, GINLEY D S, JABBOUR G E. Organic-based photovoltaics; toward low-cost power generation [J]. *MRS Bulletin*, 2005, 30(1):10-15.
- [13] PEUMANS P, YAKIMOV A, FORREST S R. Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells [J].

J. Appl. Phys., 2003, 93(7):3693-3723.

- [14] BRABEC C J, CRAVINO A, MEISSNER D, *et al.*. Origin of the open circuit voltage of plastic solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2001, 11:34.
- [15] BRABEC C J, CRAVINO A, MEISSNER D, *et al.*. The influence of materials work function on the open circuit voltage of plastic solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 403(2):368-372.
- [16] SCHARBER M, MÜHLBACHER D, KOPPE M, *et al.*. Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—towards 10% energy-conversion efficiency [J]. *Adv. Mater.*, 2006, 18(3):579-583.
- [17] CHEN B, QIAO X, LIU C M, *et al.*. Effects of bulk and interfacial charge accumulation on fill factor in organic solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(19):193302.
- [18] ZHAO C, QIAO X, CHEN B, *et al.*. Thermal annealing effect on internal electrical polarization in organic solar cells [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(9):2192-2197.
- [19] PICKETT A, MOHAPATRA A, LAUDARI A, *et al.*. Hybrid ZnO-organic semiconductor interfaces in photodetectors: a comparison of two near-infrared donor-acceptor copolymers [J]. *Org. Electron.*, 2017, 45:115-123.



王超(1991 -),男,安徽阜阳人,硕士研究生,2015年于安徽大学获得学士学位,主要从事有机太阳能电池的研究。

E-mail: wang722143@i.shu.edu.cn



郑燕琼(1979 -),女,湖北咸宁人,博士,副研究员,硕士生导师,2009年于华中科技大学获得博士学位,曾于日本国立九州工业大学和九州大学从事博士后研究,主要从事有机光电子材料和器件的研究。

E-mail: zhengyanqiong@shu.edu.cn