

doi:10.3788/gzxb20184708.0804001

具有混合结构的三基色有机光电探测器的光电特性

安涛, 刘丹, 吴俊宇

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要:采用溶液旋涂和高真空蒸镀工艺制备了平面和体异质结混合型器件结构的三基色有机光电探测器,利用实验分步探究其不同组分的活性层厚度、混合度以及前置吸收层对器件光电特性的影响.在此基础上,对三基色有机光电探测器进行样品制备及测试.结果表明,混合型结构的光电探测器件对光的吸收几乎覆盖整个可见光区域,对350~700 nm范围的光呈现出类似于平台式的宽光谱响应.该器件在-1 V偏置电压下,对红、绿、蓝光的比探测率分别为 2.89×10^{11} Jones、 3.22×10^{11} Jones、 1.97×10^{11} Jones,表明该器件对红、绿、蓝光有较好探测效果,尤其对红光的探测率有3~4倍提升.

关键词:有机光电探测器;三基色;活性层;光电特性;混合型结构;宽光谱响应;PBDT-TT-F:PCBM

中图分类号:O471.4;O472+.4;O472+.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2018)08-0804001-8

Photoelectric Characteristics of Trichromatic Organic Photodetectors with Hybrid Structure

AN Tao, LIU Dan, WU Jun-yu

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: By adopting solution spin coating and high-vacuum evaporation process, trichromatic organic photodetectors with planar and heterojunction hybrid device structures were prepared. The experiment was used to explore the active layer thickness, mixing degree of different components and the influence of the pre-absorption layer on the photoelectric properties of the device. On this basis, sample preparation and testing of trichromatic organic photodetectors were performed. The results show that the absorption of light by the photodetector device of the hybrid structure covers almost the entire visible light region, and exhibits a broad spectrum response similar to that of the platform-type light in the range of 350~700 nm. Under the bias voltage of -1 V, the detectivity of red, green, and blue light are 2.89×10^{11} Jones, 3.22×10^{11} Jones, and 1.97×10^{11} Jones, respectively. It shows that the device has good detection effects on red, green and blue light, in particular, the detectivity of red light rise up 3 to 4 times.

Key words: Organic photodetectors; Trichromatic; Active layer; Photoelectric characteristics; Hybrid structure; Broad spectral response; PBDT-TT-F:PCBM

OCIS Codes: 040.5160; 040.5150; 040.1880

0 引言

有机光电探测器具有造价低、效率高、制备工艺简单、可制备柔性器件等优点^[1-2],其研究主要集中在三个方面:1)新型半导体聚合物的设计与合成;2)设计新型器件结构,提升载流子输运和收集效率;3)缩小实验室和工业生产之间的差距^[3].研究发现从半导体聚合物到富勒烯的超快光可诱导电子转移之后,随后不同结构的光电器件被逐步报道^[4].2013年,MA等构建了给体/体异质结/受体三层混合结构:ITO/红荧烯(Rubrene)/红荧烯:C60/C60/Al,器件的带宽相比普通平面异质结器件有显著提高^[5].2018年,CHEN等通过紫外光电子能谱(Ultra-violet Photoemission Spectroscopy, UPS)研究具有逐层结构的DCJT(4-

基金项目:国家自然科学基金(No.61106043),陕西省自然基金面上项目(No.2015JM6267)资助

第一作者:安涛(1964-),男,副教授,博士,主要研究方向为新型功率半导体器件、新型有机半导体光电器件等.Email:antao@xaut.edu.cn

收稿日期:2018-03-09; **录用日期:**2018-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

(dicyanomethylene)-2-t-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran)/fullerene C60/DCJTB 界面的机理,阐述了界面处的能级弯曲和界面偶极子的形成,有利于激子解离、电荷载体传输和收集,偏置电压为-1 V时,器件在红外光照射下显示 180.1 mA/cm²的光电流^[6].目前,研究最多的禁带较宽的 P3HT (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)):PCBM([6,6]-Phenyl C60 butyric acid methyl ester) 体异质结构^[7], 仅对波长为 350~650 nm 的蓝光和绿光有强的吸收,而对波长大于 650 nm 的红光吸收不足,光灵敏度低,特别是在弱光环境下,光生载流子被噪声淹没,对红光的探测率大大降低.作为电子给体材料的窄带隙聚合物 PBDT-TT-F 所形成的 PBDT-TT-F:PC₆₁BM 体系,功率转换效率(Power Conversion Efficiency,PCE)已达到 6.33%^[8],其能带结构显示出对红光的良好吸收.由于目前有机光电探测器对红光探测能力不足,为拓宽器件光谱响应范围,结合平面和本体异质结相结合的结构,本文制备了一种新型的三基色有机光电探测器,采用窄带隙聚合物 PBDT-TT-F(Poly-{[4,8-bis[(2-ethylhexyl)oxy]-benzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene-2,6-diyl]-alt-[3-fluore-2-(octyloxy)-carbonylthieno[3,4-b]thiophene-4,6-diyl]})作为给体材料,使其吸收光谱覆盖整个可见光波段,实现器件对红、绿、蓝三基色的均衡吸收,为进一步开发宽光谱响应的图像传感器光敏二极管^[9-10]提供了参考.

1 器件结构及工作原理

本文制备的三基色光电探测器采用 ITO (Indium tin oxide)/PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate))/P3HT/PBDT-TT-F:PC₆₁BM/LiF/Al 结构,如图 1.器件的活性层为 P3HT/PBDT-TT-F:PC₆₁BM 平面异质结与本体异质结相结合的结构,其中 P3HT 作为前置吸收层主要对短波绿光进行吸收,靠近入射面能有效减少有机层对入射光的损耗;其后涂覆的红光材料 PBDT-TT-F 虽然距离光的入射面较远,但红光波长较长,能够在有机层中传播较远

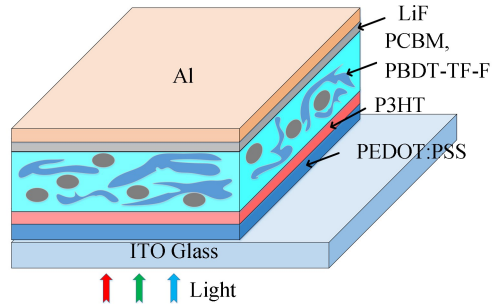


图 1 探测器结构
Fig.1 Structure of the detector

距离并保持相对较少的损耗,在通过 P3HT 层时因其禁带较宽,不吸收红光,从而保持了 PBDT-TT-F 对红光吸收.从单色光传播效率的角度,优化了活性层的光场分布. P3HT/PBDT-TT-F 两种给体材料分离,可以降低三相共混结构中给体-受体材料互为载流子复合中心的几率.其吸收系数与波长关系如图 2,PBDT-TT-F:PC₆₁BM 和 P3HT/PC₆₁BM 分别对 650~750 nm、350~600 nm 波长的光吸收良好,形成吸收光谱互补,获得高光灵敏度的三基色活性层^[11-12].其中,PBDT-TT-F 作为给体材料主要对红光进行吸收,其禁带宽度为 1.61 eV,能级结构为最高占据能级(Highest Occupied Molecular Orbital,HOMO):-5.15 eV,最低空置能级(Lowest Unoccupied Molecular Orbital,LUMO):-3.54 eV,吸收系数为10⁴ cm⁻¹,与 PC₆₁BM 形成性

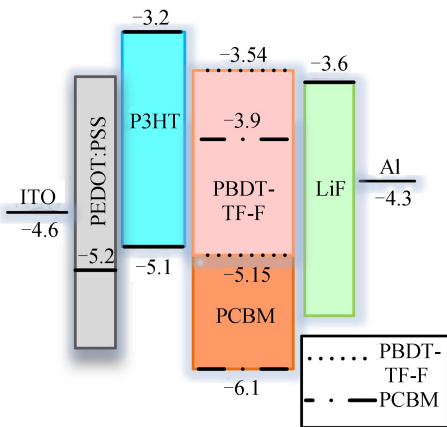


图 2 吸收系数随波长变化曲线
Fig.2 Absorption coefficient varies with wavelength

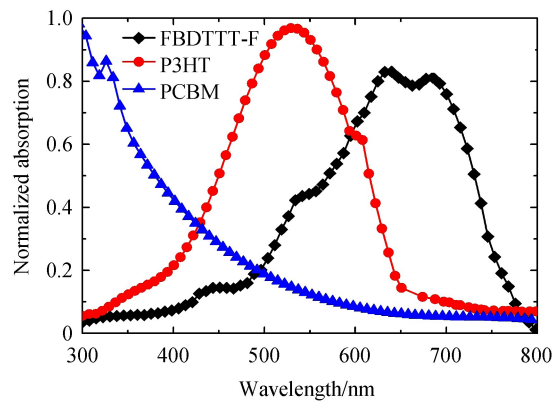


图 3 探测器的能级结构
Fig.3 Energy levels of the detector

能良好的 PBDT-TT-F : PC₆₁ BM 体异质结结构^[13]; 蓝、绿光吸收层采用 P3HT/PC₆₁ BM (PBDT-TT-F : PC₆₁ BM 层中) 平面异质结结构; 缓冲层采用 PEDOT : PSS 和 LiF. 根据图 3 中的能级结构, P3HT 的 LUMO 能级分别与 PBDT-TT-F、PC₆₁ BM 的 LUMO 能级差为 0.34 eV 和 0.7 eV. 从电子输运角度分析, 激子在给-受体界面解离过程中, 驱动力主要来源于给-受体之间的 LUMO 能级差, 一般要求 $\Delta\text{LUMO} > 0.3 \text{ eV}$, 根据能量最低原理, 电子将自发地从 P3HT 的 LUMO 能级向 PBDT-TT-F、PC₆₁ BM 的低能级转移, 形成一个较为理想的输运通道, 而空穴输运通道则相反地向较高 HOMO 能级转移^[14], 因而 P3HT 前置层不仅是蓝、绿光吸收层, 而且是良好的空穴输运层, 在体异质结中产生的空穴可顺利地注入 ITO 电极.

2 实验

实验采用 ITO/PEDOT : PSS(35 nm)/P3HT(x nm)/PBDT-TT-F : PC₆₁ BM(y nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm) 为基本结构. 在样品制备过程中, 首先采用超声清洗方法对刻蚀好的 ITO 玻璃衬底(面电阻 15 Ω), 依次利用洗涤剂、丙酮、去离子水、乙醇进行两次超声清洗, 每次 15 min; ITO 紫外臭氧处理 5 min. 在氮气手套箱中, 通过匀胶机旋涂 PEDOT : PSS 层(转速 3 000 rpm 时长 60 s, 120 $^{\circ}\text{C}$ 退火 15 min); 旋涂 P3HT 溶于浓度为 5 mg/mL 的氯苯溶液, 制备膜厚为 25 nm、20 nm、15 nm 的前置层(转速分别为 2 000 rpm、2 200 rpm、2 500 rpm 时长 60 s), 以及 PBDT-TT-F : PC₆₁ BM 溶于浓度为 5 mg/mL 二氯甲烷的溶液, 制备膜厚为 95 nm(转速为 1300 rpm 时长 60 s), 共混比为 1 : 1、1 : 1.5、1 : 2 的体异质结层, 活性层在 110 $^{\circ}\text{C}$ 退火 15 min. 最后在 10^{-4} Pa 以下的真空蒸镀 LiF(1 nm)/Al(100 nm) 电极, 并进行 120 $^{\circ}\text{C}$ 的热退火处理.

在测试中, 薄膜厚度使用型号为 VB-400 的 VASE 椭偏仪进行测量; 薄膜表面形貌采用 Agilent 5500 SPM 型的原子力显微镜进行观测; 紫外-可见吸收光谱用 UV762 双光束紫外可见分光光度计测量; 荧光光谱测试用 LS-45/55 fluorescence spectrometer; 器件的伏安特性采用 Keithley2636 测试仪在偏压为 -1 V 条件下, 对其电流电压(J - V)特性进行扫描测试; 测试光源包括波长为 558 nm、光功率为 3.3 mW/cm² 的绿光 LED, 波长为 628 nm、光功率为 2.6 mW/cm² 的红光 LED, 波长为 465 nm、光功率为 5.1 mW/cm² 的蓝光 LED 灯.

3 结果与讨论

3.1 P3HT 前置吸收层厚度对探测器光电特性的影响

为探究前置吸收层膜厚对光电特性的影响, 设定主体活性层厚度为 95 nm, PBDT-TT-F : PC₆₁ BM 给-受体共混比为 1 : 1.5, 对 P3HT 前置吸收层厚度为 15 nm、20 nm、25 nm 的探测器进行研究, 分别制备了三组器件, 在红光和绿光光照下进行了测试. 在偏置电压为 -1 V 时, 其光电特性曲线分别如图 4(a) 和 (b) 所示. 从图 4 可看出红光电流随前置吸收层膜厚增加而减小, 由膜厚为 15 nm 时的 0.334 mA/cm² 减小到 25 nm 时的 0.281 mA/cm², 而相应的绿光电流却从 0.326 mA/cm² 增大至 0.397 mA/cm². 这是由于在 PBDT-TT-F

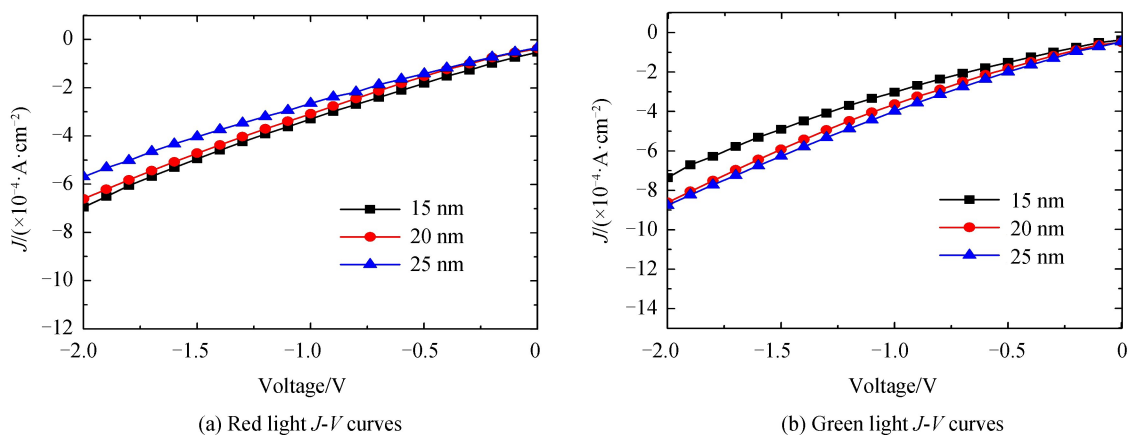


图 4 P3HT 吸收层在 15 nm、20 nm、25 nm 膜厚下红光和绿光的电流电压 J - V 曲线

Fig.4 Red and green photoelectric characteristic curves at different film thickness of P3HT absorption layer of 15 nm, 20 nm and 25 nm

吸收光子生成的激子在给-受体界面分离后,空穴进入 P3HT 中进行传输,随着膜厚的增加,输运过程中的复合几率增大,降低了两端电极对电荷的收集效率,导致红光电流减小^[15-16].另一方面,随着 P3HT 薄膜厚度增加,绿光吸收增强,随之绿光电流增大,但是当膜厚从 20 nm 增加到 25 nm 时,电流从 0.385 mA/cm² 增加到 0.397 mA/cm²,增量仅为 0.012 mA/cm²,增加并不明显,说明对绿光的吸收到达饱和.为了使器件获得良好的光电特性,应在满足绿光充分吸收条件下,尽可能减小前置吸收层膜厚,降低电荷输运过程中的复合率,提高空穴的收集效率^[17-18].因此,当 P3HT 薄膜厚度为 20 nm 时,红、绿光电流为 0.328 mA/cm²、0.385 mA/cm² 时器件表现出良好的光电特性.

3.2 PBDT-TT-F:PC₆₁BM 膜厚对器件性能的影响

在确定 P3HT 膜厚之后,研究 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 膜厚对器件性能的影响时,设定 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 共混比为 1 : 1.5,膜厚分别为 70 nm、80 nm、95 nm、110 nm、150 nm,制备了结构为 ITO/PEDOT : PSS/PBDT-TT-F : PC₆₁BM/LiF/Al 的五组器件.在偏置电压为 -1 V 时器件的光电特性随膜厚的变化如图 5 所示.从图 5 的 $J-V$ 曲线可知,随着活性层膜厚由 70 nm 增大至 95 nm,红光电流密度由 0.285 mA/cm² 增大至 0.349 mA/cm²,此后光电流随着膜厚增加而减小,当膜厚增加到 150 nm 时,光电流减小至 0.177 mA/cm².形成这种电流变化趋势是由于,薄膜厚度较薄时对入射光的吸收不充分,随着膜厚增加光吸收增强,使得光生载流子增多,导致光电流增大^[19].在膜厚为 95 nm 时,入射光吸收率较高,光电流密度达到最大值 0.349 mA/cm²,光响应度为 134.23 mA/W,器件表现出良好的光电特性.继续增大薄膜厚度,入射光在薄膜中的传播距离随之变长,使得材料能够俘获更多光子,增大了对入射光的吸收,然而,器件的整体性能仍然受限于有机聚合物较低的载流子迁移率,约为 $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$,以及较短的激子扩散长度($\sim 10 \text{ nm}$)^[20],当载流子输运距离变长时,自由载流子复合几率随之增大,导致光电流呈现减小趋势^[21-23].因此,应该充分考虑薄膜厚度变化引起的光吸收、自由载流子复合、电子-空穴陷阱等变量的竞争关系.实验结果表明,当膜厚设定为约 95 nm 时,器件具有较好的光电特性.

3.3 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 共混度对探测器光电特性的影响

为研究 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 共混度对器件性能的影响,PBDT-TT-F : PC₆₁BM 的膜厚选用 95 nm,PBDT-TT-F : PC₆₁BM 共混度给出了 1 : 1、1 : 1.5 和 1 : 2 三组实验数据.在红光光照下,偏置电压为 -1 V 时,光电流随活性层 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 共混度的变化,以及不同共混度活性层薄膜原子力显微图 (Atomic Force Microscopy, AFM) 分别如图 6、7 所示.可以看到,暗区称为富电子部分,为 PC₆₁BM 聚集相,亮区则为 PBDT-TT-F 聚集相.

从图 6 可看出混合比在 1 : 1~1 : 1.5 范围内,红光电流随着受体 PC₆₁BM 的比例增大由 0.172 mA/cm² 增大到 0.349 mA/cm²,达到最大值.结合图 7 可知,表面均方根粗糙度(RMS)随之由 0.490 nm 增大至 0.731 nm,表明聚合物 PC₆₁BM 分子间结晶度增大,进行了有序堆积.由于薄膜内 PBDT-TT-F 和 PC₆₁BM 之间相互干扰,并且 PC₆₁BM 可以引起聚合物的选择性溶解,产生更好的垂直相分离^[24],使得形成的聚集体粒径尺寸逐渐趋于均匀,异质结面积增大,导致激子解离效率增加,进而使光生电流增大.当混合度大于 1 : 1.5 后,如图 6、8 所示,光电流随着混合度增大而大幅度降低,从最大值降为共混度为 1 : 2 时的 0.099 mA/cm²,表面均方根粗糙度(RMS)为 1.180 nm.由此分析得到,虽然随混合比增大粗糙度有所提高,但是由于聚合物聚集过度,单相形成团聚,使得形成的薄膜相与相之间分散不均匀,体异质结薄膜形成的互穿网络结构中界面减少,使得激子在界面的分离受影响;较大的团聚增加电荷传输距离,使得电荷通道变差,载流子输运受

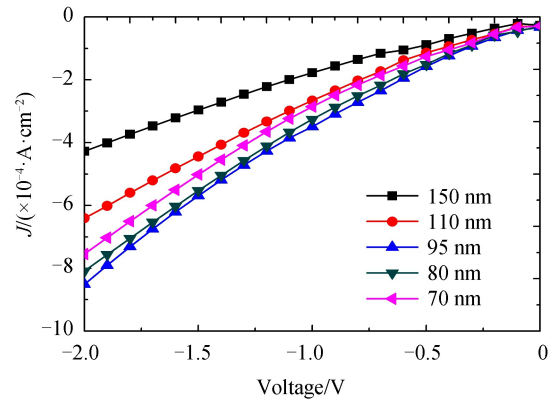


图 5 器件 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 活性层不同膜厚的 $J-V$ 曲线

Fig.5 $J-V$ curves of component with different film thickness of PBDT-TT-F : PC₆₁BM active layer

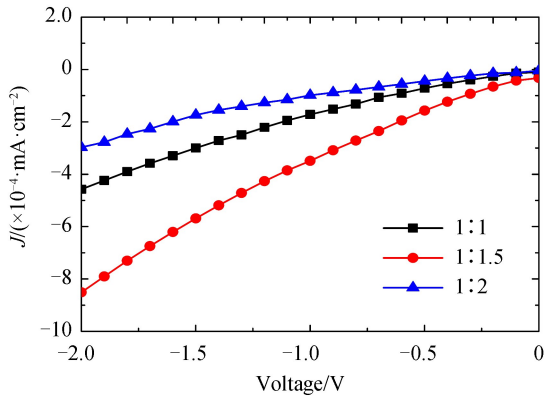


图6 PBDDT-TT-F:PC₆₁BM吸收层不同共混度的J-V曲线
Fig.6 J-V curves of PBDDT-TT-F:PC₆₁BM active layer with different mixing ratios

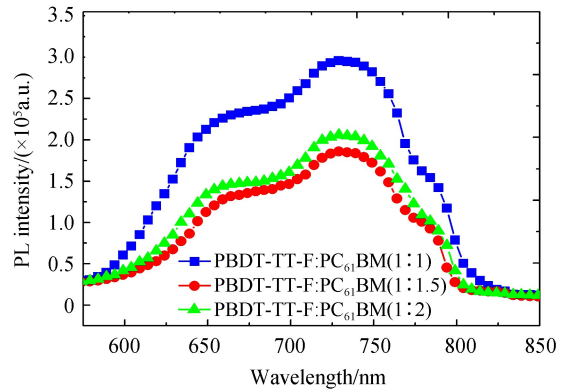


图7 PBDDT-TT-F:PC₆₁BM不同共混度的光致发光谱
Fig.7 PL spectra of PBDDT-TT-F:PC₆₁BM films with different mixing ratios

阻,同时复合概率增多,使光电流明显下降^[25-27].根据P3HT和PC₆₁BM的能级势垒~1.3 eV,体异质结与前置吸收层P3HT接触时,接触面中大面积的PC₆₁BM形成电子阱,而PBDDT-TT-F形成较小的孤岛状分布,增加了接触界面中空穴-电子对的复合,并且阻碍其形成良好的空穴传输通道.光致发光(Photoluminescence, PL)光谱是观察在薄膜异质结中在给-受体界面处发生有效激子解离和电荷转移的一种可能途径.如图7,薄膜结构为P3HT/PBDDT-TT-F:PC₆₁BM的不同共混度的光致发光光谱,采用激发波长为500 nm.光致发光谱具有三个波峰,分别位于约650 nm、730 nm、800 nm处,可见当共混度为1:1.5时光谱猝灭程度最大,即光谱峰值最低,并且峰位不变,波形保持一致,表明共混度的改变仅影响薄膜的电荷转移,在共混度为1:1.5时平面与本体异质结的界面态中电荷的转移效率更高,并且电荷之间重组发生的几率降低.这一点可与AFM图相互印证^[28-29].因此整体来看,当共混度为1:1.5时,薄膜具有好的双连续互穿网络结构、较高的激子解离和电荷输运效率,以及良好的器件响应度,器件性能有所提升.

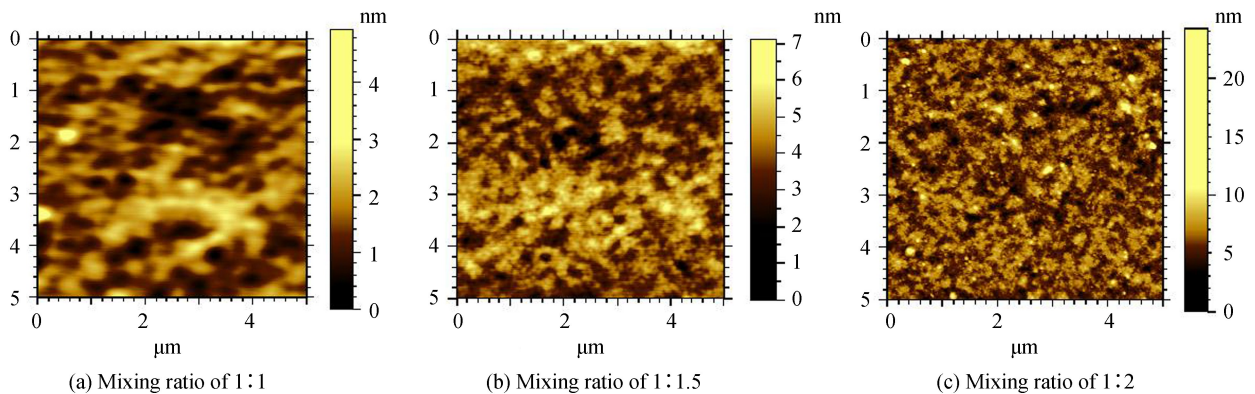


图8 不同共混度的PBDDT-TT-F:PC₆₁BM活性层薄膜AFM原子力显微镜图
Fig.8 Atomic force microscopy images of the PBDDT-TT-F:PC₆₁BM active layer film with different mixing ratios

3.4 退火对探测器光电特性的影响

设定压强为~10⁻⁴ Pa,进行了温度为80℃、100℃、120℃、140℃、160℃的五组实验,研究退火对探测器件的影响.结果发现对于红光、绿光和蓝光,电流密度均有所增大,暗电流密度有所减小.在120℃时退火效果最为显著,如图9,在偏置电压为-1 V时,绿光、蓝光退火前后其光电流密度分别为0.385 mA/cm²和0.463 mA/cm²、0.390 mA/cm²和0.439 mA/cm²,而对于红光电流密度变化较不明显,退火前后其光电流密度为0.306 mA/cm²和0.328 mA/cm²,说明进行120℃退火以后,器件对绿、红、蓝光的响应得到提升,有利于提高器件的光电性能^[30-31].因此分析光电流的增加有两个主要因素:1)退火使器件前置吸收层中的P3HT分子与主体活性层中的PC₆₁BM分子形成的异质结界面面积更大,更有利于提高激子的解离效率;2)退火使前置吸收层中P3HT分子的结晶性更好,减少了薄膜内的自由电荷复合中心,更有利于自由电荷的输运^[32-33].

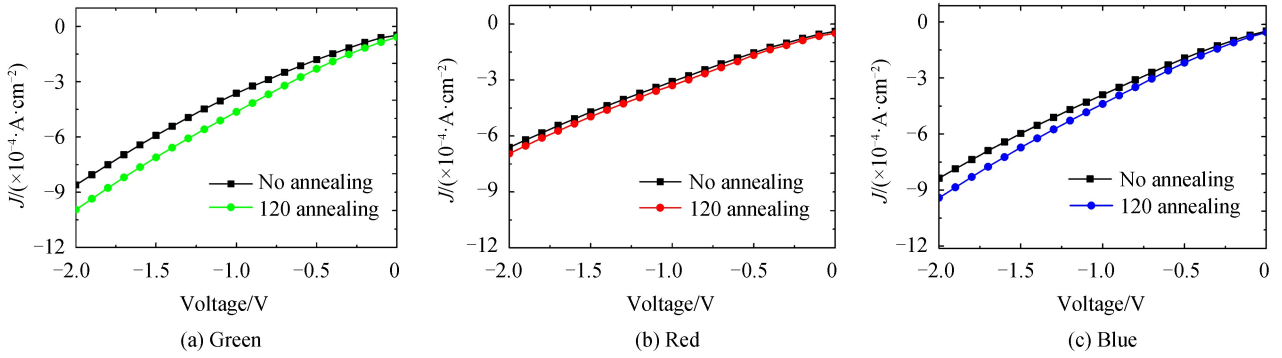


图9 在绿、红、蓝光下经过 120°C 退火的器件的 J - V 曲线
Fig.9 Green, red, blue J - V curves of the device before and after 120°C annealing

3.5 三基色探测器的光电特性

通过实验优化,综合考虑到膜厚对光吸收、电荷复合、输运、收集等的影响,及混合比对薄膜互穿网络形貌、激子扩散、激子分离等的影响,在膜厚达到约 100 nm 时二者没有较大关联.确定 PBDT-TT-F : PC₆₁BM 本体异质结膜厚为 95 nm,共混比为 1 : 1.5,获得了具有良好光电特性的探测器结构 ITO/PEDOT : PSS (35 nm)/P3HT(20 nm)/PBDT-TT-F : PC₆₁BM(95 nm) /LiF(1 nm) /Al(100 nm).在绿、红、蓝光三基色 LED 灯光照下对器件特性进行了测试,其光电流与暗电流随电压变化的曲线及其紫外-可见吸收光谱、EQE 曲线分别如图 10、11 所示.

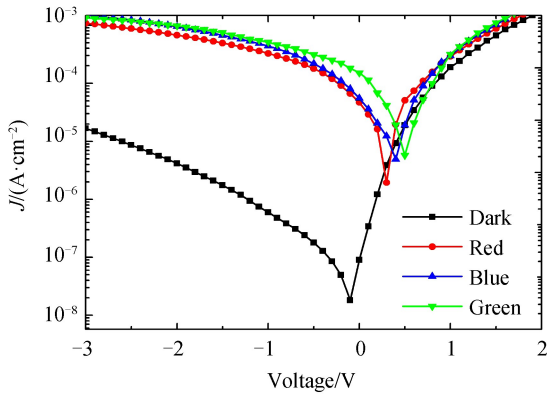


图 10 在绿、红、蓝光下器件的电流与暗电流的 J - V 曲线
Fig.10 J - V curves of the device in the green, red, blue light and in dark

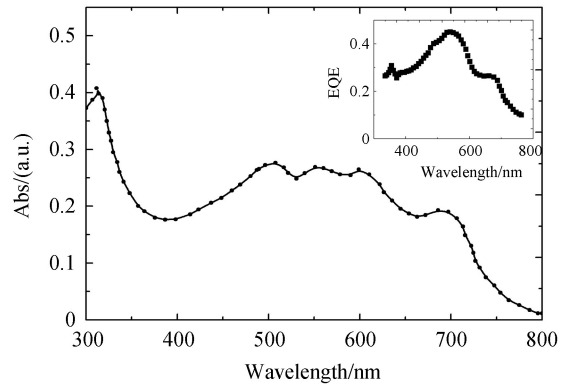


图 11 三基色器件紫外-可见吸收光谱与器件的 EQE 曲线
Fig.11 Absorption spectra and the EQE spectra of the OPDs

光电探测器主要的性能表征是器件对不同波长光的响应度以及器件的比探测率.光响应度(R)指器件在光照条件下,输出光电流的大小 I_{ph} 和输入光信号总功率 P_{out} 之间的比值,即

$$R = I_{ph} / P_{out} \quad (1)$$

比探测率(D^*)指光电探测器单位带宽和单位面积下的光谱的探测比率,当散粒噪声是噪声主要来源时,可将噪声简化为暗电流形式.忽略其他噪声干扰, D^* 是包含了暗电流和光响应度的一个综合指标,单位是 Jones(或 $\text{cm}^2 \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$),即

$$D^* = R / \sqrt{2qJ_{dark}} \quad (2)$$

式中 q 为电荷常量, J_{dark} 为暗电流密度.

在偏置电压为 -1 V 时,该探测器具有较低的暗电流密度,为 $5.95 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$,绿、红、蓝光电流密度分别为 0.463 mA/cm^2 、 0.328 mA/cm^2 和 0.439 mA/cm^2 ;对应的响应度分别为 140.30 mA/W 、 126.15 mA/W 和 86.09 mA/W ;比探测率分别为 $2.89 \times 10^{11} \text{ Jones}$ 、 $1.97 \times 10^{11} \text{ Jones}$ 、和 $3.22 \times 10^{11} \text{ Jones}$.由此可见,优化后的器件光电流较 P3HT : PCBM 本体异质结器件提高 3~4 倍^[2],光响应度总体得到提升,尤其对红光的响应得到增强.从吸收光谱图可以看出,光电探测器件对光的响应几乎覆盖整个可见光区域^[9],

对 350~700 nm 范围的光呈现出类似于平台式的吸收,而 EQE 在此波长范围整体高于 30%,并在 600~750 nm 的红光区域较传统器件结构有所提升^[5],表明探测器具有对三基色宽光谱的响应,整体性能得到提升。

4 结论

本文研究了基于平面和体异质结混合型宽光谱的光电探测器,依据光谱互补原理选取不同光谱材料进行光谱拓宽.在此基础上,对有机活性层的厚度和混合度、前置层以及退火等参数对探测器光电特性的影响机理进行了研究和结构优化.最后,对具有三基色有机光电探测器进行了样品制备及测试,在 -1 V 偏置电压下,红、绿、蓝光的比探测率分别为 1.97×10^{11} Jones、 2.89×10^{11} Jones、 3.22×10^{11} Jones.该探测器响应范围覆盖整个可见光区域,实现探测器可见光全光谱吸收,对红、绿、蓝光有较好的探测效果,尤其对红光探测有较好的提升.研究结果对进一步开发三基色图像传感器光敏二极管具有参考意义。

参考文献

- [1] PEUMANS P, YAKIMOV A, FORREST S R. Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(7): 3693-3723.
- [2] SCHILINSKY P, WALDAUF C, HAUCH J, *et al.* Polymer photovoltaic detectors: progress and recent developments [J]. *Thin Solid Films*, 2004, **451-452**: 105-108.
- [3] GUERRERO A, MONTCADA N, AJURIA J, *et al.* Charge carrier transport and contact selectivity limit the operation of PTB7-based organic solar cells of varying active layer thickness [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(39): 12345-12354.
- [4] CHEN H Y, LO M K F, YANG G, *et al.* Nanoparticle-assisted high photoconductive gain in composites of polymer and fullerene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, **3**(9): 543-547.
- [5] YANG D, ZHOU X, MA D. Fast response organic photodetectors with high detectivity based on rubrene and C60 [J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(11): 3019-3023.
- [6] WU S, YANG J, YE W, *et al.* Study on interface engineering of layer-by-layer structure for applications in organic photodetector [J]. *Synthetic Metals*, 2018, **235**: 16-19.
- [7] DANG M T, HIRSCH L, WANTZ G. P3HT:PCBM, best seller in polymer photovoltaic research. [J]. *Advanced Materials*, 2011, **23**(31): 3597-3602.
- [8] YOU J, CHEN C C, DOU L, *et al.* Metal oxide nanoparticles as an electron-transport layer in high-performance and stable inverted polymer solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(38): 5267.
- [9] JANSEN-VAN VUUREN R D, ARMIN A, PANDEY A K, *et al.* Organic photodiodes: the future of full color detection and image sensing [J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(24): 4766-4802.
- [10] PIERRE A, ARIAS A C. Solution-processed image sensors on flexible substrates [J]. 2016, **1**(4): 043001.
- [11] OSENI S O, MOLA G T. Properties of functional layers in inverted thin film organic solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017, **160**: 241-256.
- [12] 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]. *Organic Electronics*, 2017, **45**: 115-123.
- [13] 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.
- [14] BARTYNSKI A N, TRINH C, PANDA A, *et al.* A fullerene-based organic exciton blocking layer with high electron conductivity [J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(7): 3315-3320.
- [15] SCHWARZ C, BASSLER H, BAUER I, *et al.* Does conjugation help exciton dissociation? a study on poly(p-phenylene)s in planar heterojunctions with C60 or TNF [J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(7): 922-925.
- [16] MAQSOOD I, CUNDY L D, BIESECKER M, *et al.* Monte Carlo simulation of Förster resonance energy transfer in 3D nanoscale organic bulk heterojunction morphologies [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, **117**(41): 21086-21095.
- [17] SAMMITO D, ROMANATO F, ZACCO G, *et al.* Light absorption enhancement in heterostructure organic solar cells through the integration of 1-D plasmonic gratings [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): A476-A488.
- [18] LEE E, KIM C. Analysis and optimization of surface plasmon-enhanced organic solar cells with a metallic crossed grating electrode [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(S5): A740-A753.
- [19] ZHENG Y, JR W J P, KOMINO T, *et al.* Highly efficient bulk heterojunction photovoltaic cells based on C70 and tetraphenylidibenzoperiflanthene [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(14): 60.
- [20] HALLS J J M, PICHLER K, FRIEND R H, *et al.* Exciton diffusion and dissociation in a poly(p -

- phenylenevinylene)/C60 heterojunction photovoltaic cell[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, **68**(22): 3120-3122.
- [21] LEIJTENS T, LIM J, TEUSCHER J, *et al.* Charge density dependent mobility of organic hole-transporters and mesoporous TiO₂ determined by transient mobility spectroscopy: implications to dye-sensitized and organic solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(23): 3227-3233.
- [22] YANG S H, MI Y C, JO S G, *et al.* Photoresponsive ambipolar transport characteristics of organic thin film transistors using soluble HB-ant-THT and PCBM composites[J]. *Synthetic Metals*, 2012, **162**(3-4): 332-336.
- [23] SHUTTLE C G, HAMILTON R, NELSON J, *et al.* Measurement of charge-density dependence of carrier mobility in an organic semiconductor blend[J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, **20**(5): 698-702.
- [24] LEE J K, MA W L, BRABEC C J, *et al.* Processing additives for improved efficiency from bulk heterojunction solar cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, **130**(11): 3619-3623.
- [25] ABBAS M, TEKIN N. Balanced charge carrier mobilities in bulk heterojunction organic solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(7): 073302.
- [26] LEI T, DOU J H, PEI J. Influence of alkyl chain branching positions on the hole mobilities of polymer thin-film transistors[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(48): 6457.
- [27] VAKHSHOURI K, KOZUB D R, WANG C, *et al.* Effect of miscibility and percolation on electron transport in amorphous poly(3-hexylthiophene)/phenyl-C61-butyric acid methyl ester blends[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(2): 026601.
- [28] JANSSEN, AGUIRRE, GOOVAERTS, *et al.* Optimization of morphology of P3HT/PCBM films for organic solar cells: effects of thermal treatments and spin coating solvents[J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2007, **37**(3): 40-43.
- [29] YU D, YANG Y, DURSTOCK M, *et al.* Soluble P3HT-grafted graphene for efficient bilayer-heterojunction photovoltaic devices[J]. *Acs Nano*, 2010, **4**(10): 5633.
- [30] ZHAO C, QIAO X, CHEN B, *et al.* Thermal annealing effect on internal electrical polarization in organic solar cells [J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(9): 2192-2197.
- [31] TANAKA H, ABE Y, MATSUO Y, *et al.* An amorphous mesophase generated by thermal annealing for high-performance organic photovoltaic devices[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(26): 3521.
- [32] HOWARD I A, MAUER R, MEISTER M, *et al.* Effect of morphology on ultrafast free carrier generation in polythiophene:fullerene organic solar cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, **132**(42): 14866-14876.
- [33] REDDY S Y, KUPPA V K. Molecular dynamics simulations of organic photovoltaic materials: Investigating the formation of π -stacked thiophene clusters in oligothiophene/fullerene blends[J]. *Synthetic Metals*, 2012, **162**(23): 2117-2124.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61106043), the Natural Science Foundation of Shaanxi (No. 2015JM6267)

引用格式: AN Tao, LIU Dan, WU Jun-yu, *et al.* Photoelectric Characteristics of Trichromatic Organic Photodetectors with Hybrid Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0804001

安涛,刘丹,吴俊宇.具有混合结构的三基色有机光电探测器的光电特性[J].光子学报,2018,**47**(8):0804001