

引用格式: AN Tao, WU Xi-mei, LIU Xin-ying. Multiplying Organic Photodetector Based on Double-doped C_{60} :DDQ Trap [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1025001

安涛,吴禧梅,刘欣颖. 基于双掺杂 C_{60} :DDQ 陷阱的倍增型有机光电探测器[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1025001

基于双掺杂 C_{60} :DDQ 陷阱的倍增型有机光电探测器

安涛,吴禧梅,刘欣颖

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要: 采用双掺杂方法, 实现了具有高陷阱浓度的有机光电倍增探测器. 在优化的单掺杂(活性层为 P3HT:PC₆₁BM:C₆₀)器件基础上, 保持 C₆₀ 的最优掺杂比例不变(1.0 wt%), 同时掺杂 C₆₀ 和 DDQ 两种电子陷阱, 研究不同 DDQ 掺杂浓度对 P3HT:PC₆₁BM 活性层中陷阱浓度和探测器光电性能的影响. 结果表明, 双掺杂 C₆₀:DDQ 活性层的最大掺杂浓度为 1.5 wt%, 与单掺杂 C₆₀ 活性层(最大掺杂浓度为 1.0 wt%) 相比提高了约 1.5 倍; 双掺杂 C₆₀:DDQ 器件的陷阱浓度为 $2.02 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 与单掺杂 C₆₀ 器件(陷阱浓度为 $5.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 相比提高了约 3.5 倍; 在 -2 V 偏压下, 双掺杂 C₆₀:DDQ 器件的外量子效率高达 2015.32%, 比单掺杂 C₆₀ 器件(外量子效率为 202.60%) 提高了约 10 倍. 采用双掺杂方法可以大大提高陷阱浓度, 从而实现活性层的高浓度陷阱掺杂.

关键词: 有机光电倍增探测器; 双掺杂; 陷阱浓度; 掺杂浓度; 外量子效率

中图分类号: O471.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204910.1025001

Multiplying Organic Photodetector Based on Double-doped C_{60} :DDQ Trap

AN Tao, WU Xi-mei, LIU Xin-ying

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

Abstract: Organic photomultiplier detector with high trap concentration is developed by double doping method. By keeping the optimal doping ratio of C_{60} unchanged (1.0 wt%) based on the optimized single-doped device (active layer is P3HT:PC₆₁BM:C₆₀), while doping both C_{60} and DDQ electron traps, the effects of different DDQ doping concentrations on the trap concentration of the P3HT:PC₆₁BM active layer and the photoelectric performance of the detector are studied. The study shows that the maximum doping concentration of the double-doped C_{60} :DDQ active layer was 1.5 wt%, which is about 1.5 times higher than that of the single-doped C_{60} active layer (maximum doping concentration is 1.0 wt%). The trap concentration of the double-doped C_{60} :DDQ device is $2.02 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, which is about 3.5 times higher than that of the single-doped C_{60} device (trap concentration is $5.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Under the bias voltage of -2 V, the external quantum efficiency of the double-doped C_{60} :DDQ device is as high as 2015.32%, which is about 10 times higher than that of the single-doped C_{60} device (external quantum efficiency is 202.60%). The results show that the double doping method can greatly increase the trap concentration, so as to realize the high concentration trap doping of the active layer.

Key words: Organic photomultiplier detector; Double doping; Trap concentration; Doping concentration; External quantum efficiency

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(No.2019JM251)

第一作者: 安涛(1986—), 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: 2020-06-28; 录用日期: 2020-08-11

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

0 引言

有机半导体材料来源广泛,制备的有机光电探测器(Organic Photodetectors, OPDs)具有质量轻、成本低、柔性好、灵敏度高、响应速度快、光谱范围可调等优点,在导弹制导、环境监测、图像传感等领域具有广泛的应用前景^[1-3].在实际应用中,往往需要光电探测器对弱光信号有着较强的探测能力^[4],近年来,很多研究通过在活性层中掺杂少量的陷阱来俘获载流子^[5-7],引起外电路电荷的隧穿注入,实现高外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)的倍增型有机光电探测器.如,LI Ling-liang等^[7]在聚(3-己基噻吩)(P3HT)中掺杂电子陷阱[6,6]-苯基-C₇₁-丁酸甲酯(PC₇₁BM),当P3HT:PC₇₁BM的比例为100:1时,器件在-19V的偏压下EQE高达9610%($\lambda=625$ nm).HAN Yu等^[6]将10wt%的PC₇₁BM掺入P3HT:2,2'-(2,2'Z)-((5,5'-(4,4,9,9-四(4-己基苯基)-4,9-二氢-S-苯并二茚并[1,2-B:5,6-B']二噻吩-2,7-二基)双(4-((2-乙基己基)氧基)噻吩-5,2-二基))双(亚甲基亚基))双(5,6-二氟-3-氧代-2,3-二氢-1H-茚-2,1-二亚基))二丙二腈(IEICO-4F)体系,获得-3V偏压下911%的EQE($\lambda=550$ nm),但是继续增加PC₇₁BM的比例,器件的EQE降低.YANG Kai-xuan等^[5]制备了活性层为聚[(2,6-(4,8-双(5-(2-乙基己基)噻吩-2-基)苯并[1,2-b:4,5-b']二噻吩)-co-(1,3-二(5-噻吩-2-基)-5,7-双(2-乙基己基)苯并[1,2-c:4,5-c']二噻吩-4,8-二酮)](PBDB-T):Y6的有机光电探测器,其中PBDB-T作为空穴陷阱,引起外电路的电子隧穿注入.随着PBDB-T掺杂比例的增加,器件的EQE先增加后减小,当PBDB-T:Y6的比例为3:100(wt/wt)时,器件的EQE最高为18 000%.为了获得更高的外量子效率,需要更多的陷阱来俘获载流子以引起更多外电路中的电荷隧穿注入,然而随着陷阱掺杂浓度的过量增加,高浓度杂质分子的聚集会导致掺杂效率降低甚至失效,从而降低器件性能^[7-8].

为了解决上述问题,本文提出两种陷阱材料(碳60(C₆₀):2,3-二氯-5,6-二氰基-1,4-苯醌(DDQ))的双掺杂方法,通过在优化的单掺杂C₆₀器件基础上,保持C₆₀的最优掺杂比例不变(1.0 wt%),同时掺杂C₆₀和DDQ两种电子陷阱.该方法可以有效改善因单陷阱的聚集而造成的器件性能下降,大大提高陷阱浓度和掺杂效率,从而获得活性层的高浓度陷阱掺杂.

1 实验

1.1 器件制备

实验采用氧化铟锡(ITO)(20 mm×20 mm, 15 $\Omega \cdot \square^{-1}$)/聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT:PSS)/P3HT:PC₆₁BM:C₆₀:DDQ/铝(Al)的基本结构,图1分别为DDQ分子结构、探测器结构和材料能级.活性层溶液制备:将P3HT(10 mg)、PC₆₁BM(10 mg)、C₆₀(0.2 mg)与DDQ共溶于1 mL邻-二氯苯,然后在室温下用恒温磁力搅拌器充分搅拌12 h.器件制备:将ITO玻璃进行掩膜刻蚀,然后依次使用去

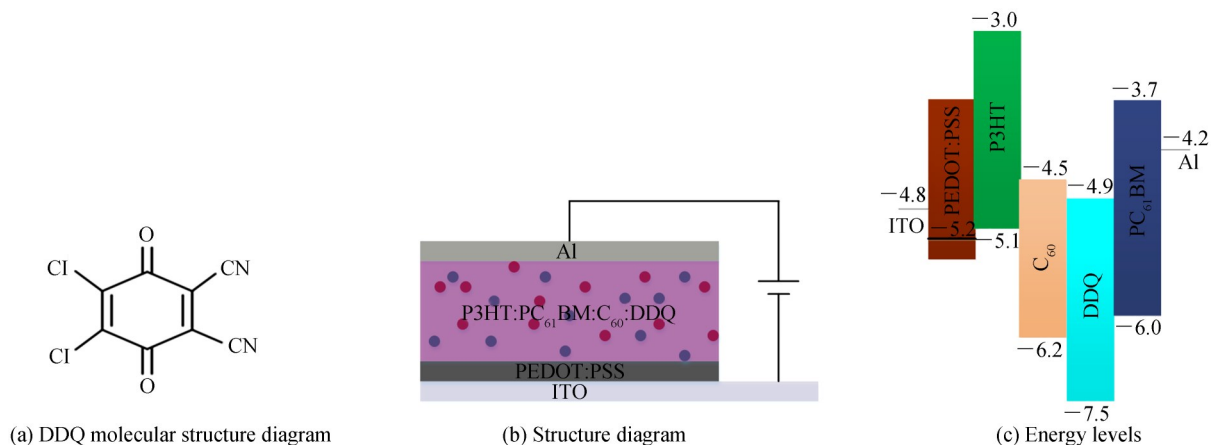


图1 DDQ分子结构和探测器结构与能级

Fig. 1 DDQ molecular structure diagram and structure diagram and energy levels of the OPDs

离子水、丙酮、无水乙醇进行超声清洗 15 min,再用氮气枪吹干备用.将 PEDOT:PSS 以 3500 rpm(60 s)旋涂于 ITO 衬底上,并在 100°C 的数控加热板上退火 10 min.接着将活性层溶液以 700 rpm(60 s)旋涂于 ITO 上,在 100°C 的数控加热板上退火 10 min 以挥发溶剂.然后在 5×10^{-4} Pa 的真空下蒸镀 100 nm Al 电极层(蒸镀速率为 $0.3 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$,蒸镀速率和膜厚由石英振荡监视器控制,最后在 120°C 下真空退火 15 min.器件的有效面积(阳极和阴极的重叠部分)为 1 cm^2 .实验采用的 P3HT、PC₆₁BM、C₆₀ 和 PEDOT:PSS 购买于西安宝莱特光电科技有限公司,DDQ 购买于北京百灵威科技有限公司.

1.2 测试与表征

器件的电流密度-电压(Current density-voltage, J - V)曲线由 Keithley2636 半导体测试系统测量.电容-电压(Capacitance-voltage, C - V)曲线由 Keithley PCT-CVU 多频 CV 仪测量.光源为波长 $\lambda=460 \text{ nm}$ 的蓝光二极管(爱德盛 5050), $P_{\text{in}}=0.21 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.光致发光光谱(Photoluminescence, PL)测试用 LS-45/55fluorescence spectrometer 测量.所有测试均在室温大气环境下进行.

1.3 特征参数计算

探测器的响应度(R)、比探测率(D^*)、外量子效率(EQE)和线性动态范围(Linear Dynamic Range, LDR)的计算公式分别为^[9-10]

$$R = \frac{J_{\text{ph}}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{light}} - J_{\text{dark}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

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

$$\text{EQE} = \frac{J_{\text{ph}}h\nu}{P_{\text{in}}q} = \frac{Rh\nu}{q} \quad (3)$$

$$\text{LDR} = 20 \log \frac{J_{\text{ph}}^*}{J_{\text{dark}}} \quad (4)$$

式中, J_{ph} 是光生电流密度,其值等于光电流密度 J_{light} 与暗电流密度 J_{dark} 之差, h 是普朗克常数, ν 是入射光频率, q 是元电荷的绝对值, P_{in} 是入射光功率, J_{ph}^* 是器件在光功率为 $1 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光照下的光生电流密度.

2 结果与讨论

为了系统研究双掺杂方法的有效性,制备了 P3HT:PC₆₁BM:C₆₀:DDQ 的比例分别为 10:10:0.2:0(器件 A)、10:10:0.2:0.05(器件 B)、10:10:0.2:0.1(器件 C)和 10:10:0.2:0.15(器件 D)的四种有机光电探测器,其中单掺杂器件 A 的 C₆₀ 掺杂比例是经过实验优化后的最优比例.四种器件(A、B、C 和 D)在 $\lambda=460 \text{ nm}$ ($P_{\text{in}}=0.21 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 的蓝光光照下(J_{light})的 J - V 曲线如图 2(a)所示.单掺杂 C₆₀ 器件(器件 A)在 -2 V 偏压下的光电流密度仅为 $1.58 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,与之相比,掺杂了 DDQ 的双掺杂器件的光电流密度显著增大.但是随着 DDQ 掺杂比例的增大,光电流密度先增加后减小,当掺杂 0.1 mgDDQ 时,器件的光电流密度最大,在 -2 V 偏压下为 $1.57 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,是单掺杂 C₆₀ 器件 A 的 9~10 倍.外量子效率定义为特定波长下,每个入射光子能够产生的载流子数目,是衡量器件性能优劣的重要指标^[11-12].图 2(c)为四种器件的 EQE- V 特性曲线,可以看到,掺杂了 DDQ 的双掺杂器件的 EQE 显著增加,在 -2 V 偏压下,器件 B、C、D 的外量子效率随 DDQ 的掺杂比例先增加后减小,分别为 409.54%、2015.32% 和 1630.23%.双掺杂器件 C 的 EQE 是单掺杂器件 A (EQE=202.60%) 的 9~10 倍.如图 1(c)所示,电子从 ITO 阳极注入到 PC₆₁BM 的最低未占分子轨道(Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO),需要克服 1.1 eV 的注入势垒,空穴从 Al 阴极注入到 P3HT 的最高占据分子轨道(Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO),需要克服 0.9 eV 的注入势垒,因此在暗条件下,器件的电流密度较低.图 2(b)为四种器件在暗条件下(J_{dark})的 J - V 曲线,与单掺杂器件相比,双掺杂的器件的暗电流密度略有增加,这可能是因为 DDQ 的掺杂,增加了 P3HT 的结晶,改善了载流子的输运,从而导致暗电流密度增加^[13].以上结果表明,双掺杂 C₆₀:DDQ 陷阱提高了器件的光电倍增效率,改善了光电特性.

如图 1(b)所示,当光照射在活性层上时,给受体材料吸收光子产生激子,激子在 P3HT 和 PC₆₁BM 界面

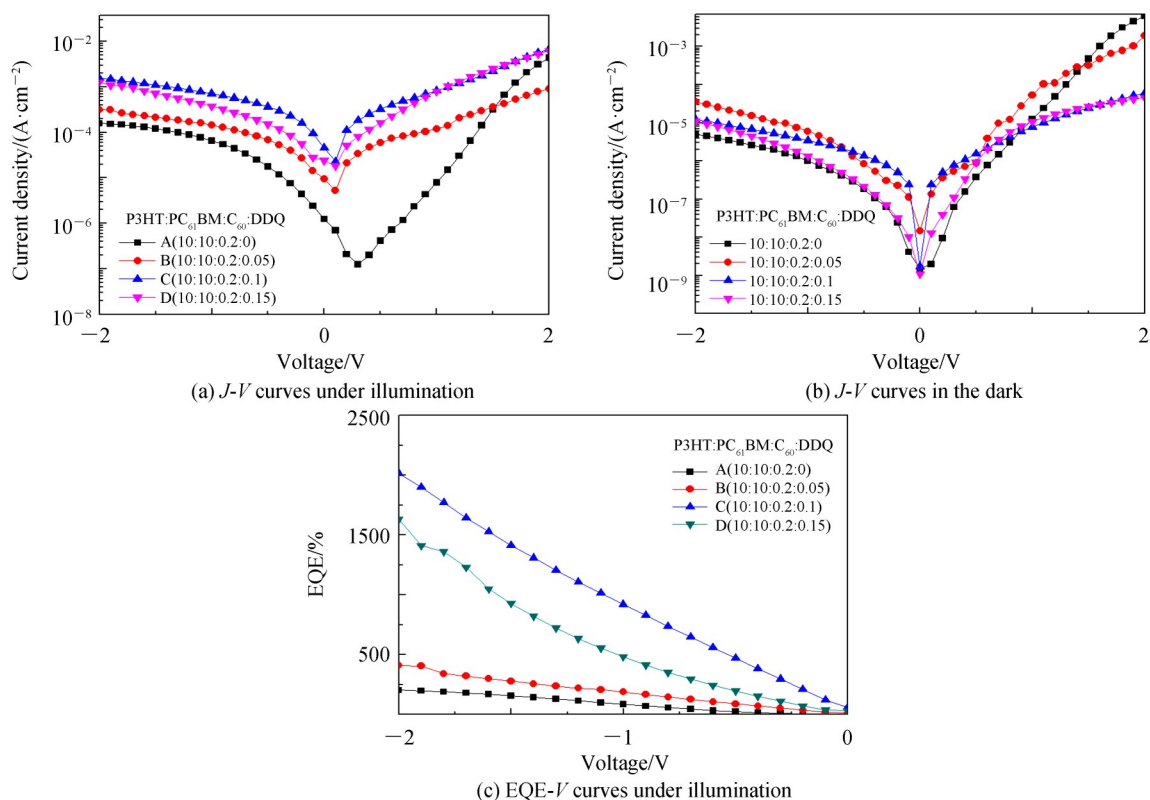


图2 四种器件的 J - V 和 EQE- V 曲线
Fig. 2 J - V curves and EQE- V curves of the four devices

解离后,光生电子被活性层中的电子陷阱俘获,当给器件施加反向电压时,陷阱电子会在外加电场的作用下向 Al 阴极方向传输,从而在 Al 阴极附近的活性层中积累电子,电子的积累会引起 P3HT 的能带向下弯曲,从而减小了势垒宽度,在较小的反向偏压下引起外电路的空穴隧穿注入,最终实现电流倍增^[4].根据电子陷阱辅助空穴隧穿注入的倍增型有机光电探测器的工作机理,器件的倍增效率主要取决于活性层电子陷阱俘获的电子数量^[14].电子的浓度越大,势垒宽度越窄,空穴注入量越大,器件的倍增效率增强.为了有更多的电子被陷阱俘获,往往通过增加陷阱的掺杂浓度,来获得更多的陷阱以俘获载流子,但是大量研究表明,随着陷阱掺杂浓度的增加,陷阱会发生聚集,最终形成连续的载流子输运通道,陷阱效应失效^[15-17].制备的单掺杂器件 A, C_{60} 的最优掺杂比为 1.0 wt%,为了进一步改善器件性能,器件 B、C 和 D 活性层中掺杂 C_{60} 和 DDQ 两种电子陷阱,其中 C_{60} 保持最优掺杂比 1.0 wt% 不变.由于活性层中存在 C_{60} 和 DDQ 两种电子陷阱,陷阱浓度增多,因此可以俘获更多的光生电子,倍增效应增强.因为双掺杂器件活性层中的陷阱浓度大,因此可以俘获较多的光生电子,所以在反偏压下 Al 阴极附近的活性层中积累的电子多.由于同种电荷相互排斥,积累的电子会排斥在外加电场的作用下向 Al 阴极方向传输的陷阱电子.双掺杂器件 Al 阴极附近的活性层中积累的电子多,排斥作用强,单掺杂器件 Al 阴极附近的活性层中积累的电子少,排斥作用弱,所以与器件 B、C、D 相比,单掺杂器件 A 的光电流密度随着反向偏压的增加迅速增大,如图 2(a) 所示.

为了进一步研究双掺杂 (C_{60} :DDQ) 对电子浓度的影响,测量了器件的 C - V 特性曲线.如图 3(a),无论在暗条件还是光照条件下,与单掺杂器件相比,双掺杂器件电容都有明显增加.0 V 偏压下,光照前后,单掺杂器件 A 的电容从 90 nF 增加到 120 nF (增量为 30 nF),而双掺杂器件 C 的电容从 102 nF 增加到 187 nF (增量为 85 nF),表明随着 DDQ 的掺入,活性层中的电子陷阱浓度增加,从而可以俘获更多的电子,减小了势垒宽度.

根据文献[18-19],二极管在小的正负偏压下满足 Mott-Schottky 方程

$$C^{-2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon A^2 N_q} \quad (5)$$

式中, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为半导体的相对介电常数 ($\epsilon_r = 3.8$), N_q 为载流子浓度, V_{bi} 为内建电势, A

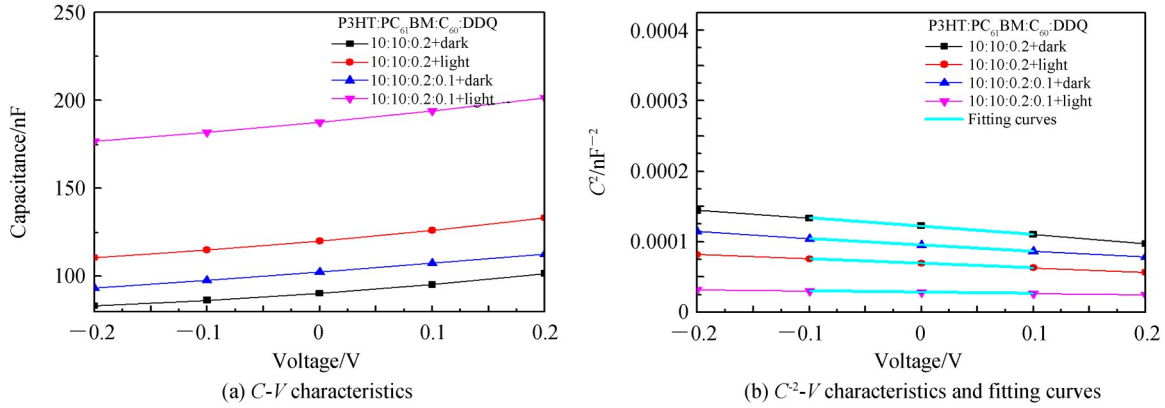


图3 器件A与C的C-V和C²-V特性曲线
Fig. 3 C-V and C²-V characteristics of devices A and C

为器件有效面积.

根据式(5)可知,C²与V呈线性关系,可在较小的正负偏压下,计算C²-V曲线的线性斜率,从而得到N_q.因此,从图3(b)可以得到强光照(电子陷阱饱和)前后不同掺杂的陷阱浓度.器件A、B、C、D的陷阱浓度如图4所示,与单掺杂器件相比,掺杂DDQ的双掺杂器件的陷阱浓度均有显著的增加.而且随着DDQ浓度的增加,陷阱浓度N_q先增大后减小(分别为5.83×10¹⁷、1.73×10¹⁸、2.02×10¹⁸、1.46×10¹⁸ cm⁻³).当掺杂0.1 mg DDQ时,陷阱浓度最大,最大值为2.02×10¹⁸ cm⁻³.为了进一步说明该方法的有效性,根据计算势垒宽度ω,公式为

$$\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V)}{qN_q}} \quad (6)$$

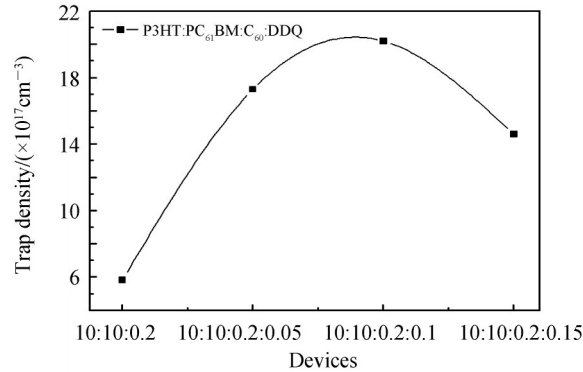


图4 光照下不同掺杂浓度的陷阱浓度
Fig. 4 Trap concentrations under different doping concentrations under illumination

在强光照下,器件A的势垒宽度ω为0.89 nm,器件C的势垒ω为0.57 nm.双掺杂器件C的势垒明显比单掺杂器件A薄.势垒宽度的减小表明双掺杂器件活性层/Al电极界面两侧的电荷积累增加,即活性层中被陷阱俘获的载流子浓度增加.

与单掺杂C₆₀器件活性层的最大掺杂浓度(1.0wt%)相比,双掺杂C₆₀:DDQ器件的活性层的最大掺杂浓度明显增大(1.5 wt%),表明双掺杂方法显著提高了掺杂效率.从图1(c)的材料能级示意图可以看到,P3HT和PC₆₁BM的LUMO能级分别为-3.0 eV和-3.7 eV,而C₆₀(LUMO:-4.5 eV)和DDQ(LUMO:-4.9 eV)两种材料的LUMO能级都比P3HT和PC₆₁BM的LUMO能级低,因此C₆₀和DDQ两种材料均可在主体活性层中充当电子陷阱,进而俘获光生载流子.从图1(c)可以明显看出DDQ的LUMO能级比C₆₀的LUMO能级低0.4 eV,所以DDQ更容易俘获光生电子,这可能与DDQ分子的中心环上连有两个强吸电子基团氰基(-CN)和两个强电负性氯原子有关,如图1(a)所示.双掺杂方法显著提高掺杂效率的原因除了DDQ的掺杂作为陷阱有效俘获光生载流子,增加陷阱浓度外,另一个重要的原因是DDQ的掺杂,增加了P3HT的结晶,改善了载流子的输运^[13].

为了进一步验证双掺杂方法的可行性,我们对不同掺杂薄膜进行了PL光谱测试.图5分别为P3HT:PC₆₁BM、P3HT:PC₆₁BM:C₆₀和P3HT:PC₆₁BM:C₆₀:DDQ的PL谱,可以明显看出,无论是单掺杂薄膜,还是双掺杂薄膜,PL光谱都发生明显的淬灭现象,而且,与单掺杂薄膜相比,双掺杂薄膜的PL光谱强度更弱.以上分析表明,与单掺杂器件相比,双掺杂器件中有更多的光生电子转移到活性层中的陷阱中,进一步证实了双掺杂器件的活性层陷阱浓度大于单掺杂器件的陷阱浓度^[20-22].

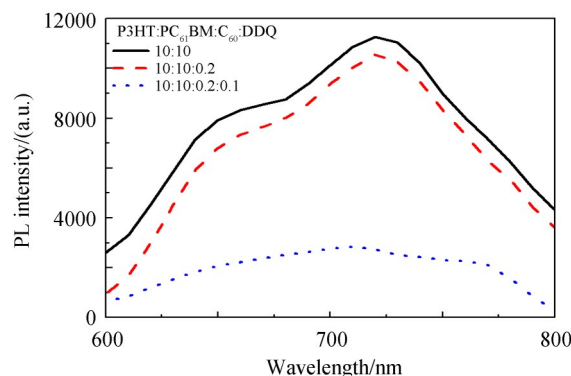
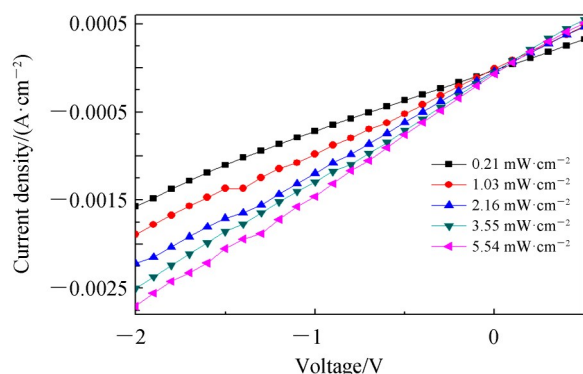
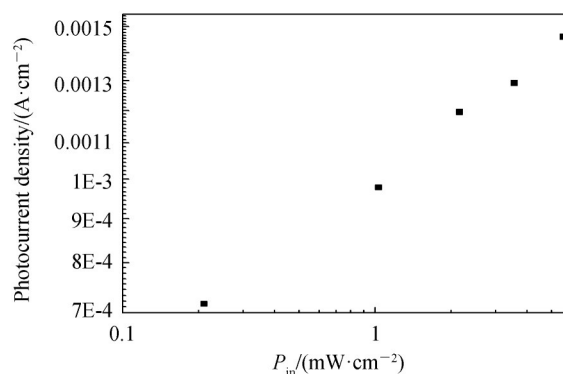


图5 不同掺杂浓度的PL谱

Fig. 5 PL spectra under different doping concentrations

LDR是决定OPDs性能的另一个重要参数.如图6为器件C在在 $\lambda=460$ nm的不同光功率光照下的 $J-V$ 曲线,显然光电流密度随着 P_{in} 的增加而增大,表明该器件可在不同的 P_{in} 下正常工作.图7的 $J_{ph}-P_{in}$ 曲线显示在 $0.2\sim 6$ $mW\cdot cm^{-2}$ 的光功率范围内,器件C的 J_{ph} 随光功率的增加线性增大,表明该探测器具有良好的线性响应.根据式(4)计算得到器件C的LDR为49 dB.

图6 不同光功率光照下器件C的 $J-V$ 曲线Fig. 6 $J-V$ curves of device C under illumination with different light intensity图7 -1.0 V偏压下器件C的 $J_{ph}-P_{in}$ 曲线Fig. 7 $J_{ph}-P_{in}$ of device C under the bias of -1.0 V

以上分析可以看出,双掺杂方法可以改善因单一陷阱聚集而对器件性能产生的不良影响,增加了活性层中的陷阱数量,来俘获更多的载流子,从而降低势垒宽度,提高了外电路电荷的注入效率,大大改善了器件的光电特性.根据器件性能参数的计算公式,器件A、C在 -2 V偏压下的性能参数如表1所示.器件C的 R 、EQE和 D^* 分别比器件A高 ~ 10 倍、 ~ 10 倍和 ~ 6 倍.

表1 -2 V偏压下器件A和C的性能参数Table 1 Performance parameters of devices A and C at -2 V

P3HT:PCB ₆₁ M:C ₆₀ :DDQ	J_{dark} /(A·cm ⁻²)	J_{light} /(A·cm ⁻²)	R /(A·W ⁻¹)	D^* /Jones	EQE /%	N_q /cm ⁻³
Device A(10:10:0.2)	4.96×10^{-6}	1.58×10^{-4}	0.75	5.97×10^{11}	202.60	5.83×10^{17}
Device C(10:10:0.2:0.1)	1.23×10^{-5}	1.57×10^{-3}	7.48	3.77×10^{12}	2015.32	2.02×10^{18}

3 结论

在P3HT:PC₆₁BM中掺杂双电子陷阱C₆₀和DDQ可以有效提高陷阱浓度,实现活性层的高浓度掺杂.实验结果表明,势垒宽度的减小,使得外部电路中空穴隧穿注入电流增大,大大提高了器件的EQE.P3HT:PC₆₁BM:C₆₀:DDQ的最优浓度比为10:10:0.2:0.1,−2 V偏压下,器件的EQE达到2015.32%(λ=460 nm, P_{in}=0.21 mW·cm^{−2}).该掺杂方法将为有机半导体的高浓度陷阱掺杂提供一种新的思路,并可推广到其他高浓度掺杂领域.

参考文献

- [1] LOPEZ-FRAGUAS E, ARREDONDO B, VEGA-COLADO C, *et al.* Visible light communication system using an organic emitter and a perovskite photodetector[J]. *Organic Electronics*, 2019, **73**: 292-298.
- [2] KLAB T, LUSZCZYNSKA B, ULANSKI J, *et al.* Influence of PEIE interlayer on detectivity of red-light sensitive organic non-fullerene photodetectors with reverse structure[J]. *Organic Electronics*, 2020, **77**: 105527.
- [3] WANG Tie-ning, WANG Yue, ZHU Li-jie, *et al.* High sensitivity and fast response sol-gel ZnO electrode buffer layer based organic photodetectors with large linear dynamic range at low operating voltage[J]. *Organic Electronics*, 2018, **56**: 51-58.
- [4] SHI Lin-lin, LIANG Qiang-bing, WANG Wen-yan, *et al.* Research progress in organic photomultiplication photodetectors[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, **8**(9): 713.
- [5] YANG Kai-xuan, WANG Jian, ZHAO Zi-jin, *et al.* Ultraviolet to near-infrared broadband organic photodetectors with photomultiplication[J]. *Organic Electronics*, 2020, **83**: 105739.
- [6] HAN Yu, ZHANG Xiao-hua, ZHANG Fan, *et al.* Improved charge transfer, mobility and morphology for high performance panchromatic organic photodetectors by adding PC71BM in P3HT:IEICO-4F[J]. *Organic Electronics*, 2019, **75**: 105410.
- [7] LI Ling-liang, ZHANG Fu-jun, WANG Jian, *et al.* Achieving EQE of 16,700% in P3HT:PC71BM based photodetectors by trap-assisted photomultiplication[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9181.
- [8] LI Ling-liang, ZHANG Fu-jun, WANG Wen-bin, *et al.* Trap-assisted photomultiplication polymer photodetectors obtaining an external quantum efficiency of 37,500%[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, **7**(10): 5890-5897.
- [9] WANG Wen-bin, DU Ming-de, ZHANG Miao, *et al.* Organic photodetectors with gain and broadband/narrowband response under top/bottom illumination conditions[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(16): 1800249.
- [10] WANG Wen-yan, SHI Lin-lin, ZHANG Ye, *et al.* Effect of photogenerated carrier distribution on performance enhancement of photomultiplication organic photodetectors[J]. *Organic Electronics*, 2019, **68**: 56-62.
- [11] AMIRI M, ALIZADEH N. Highly photosensitive near infrared photodetector based on polypyrrole nanoparticle incorporated with CdS quantum dots[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, **111**: 104964.
- [12] MIAO Jian-li, ZHANG Fu-jun. Recent progress on photomultiplication type organic photodetectors [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, **13**(2): 1800204.
- [13] LI Ai-yuan, MIAO Xin-rui, DENG Xian-yu. Strong electron acceptor additive for achieving efficient polymer solar cells with P3HT:PCBM films by a quick drying process[J]. *Synthetic Metals*, 2013, **168**: 43-47.
- [14] MIAO Jian-li, ZHANG Fu-jun, LIN Yu-ze, *et al.* Highly sensitive organic photodetectors with tunable spectral response under bi-directional bias[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(11): 1711-1717.
- [15] ESOPI M R, CALCAGNO M, YU Qiu-ming. Organic ultraviolet photodetectors exhibiting photomultiplication, low dark current, and high stability[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, **2**(8): 1700025.
- [16] LUO Xiao, LV Wen-li, DU Li-li, *et al.* Insight into trap state dynamics for exploiting current multiplication in organic photodetectors[J]. *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 2016, **10**(6): 485-492.
- [17] MIAO Jian-li, ZHANG Fu-jun, DU Ming-de, *et al.* Photomultiplication type organic photodetectors with broadband and narrowband response ability[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(8): 1800001.
- [18] KIRCHARTZ T, GONG Wei, HAWKS S A, *et al.* Sensitivity of the mott - schottky analysis in organic solar cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, **116**(14): 7672-7680.
- [19] AN Tao, LIU Xin-ying, MA Jian-ping. A new method to enhance organic photodetectors active layer trap doping by blending doping[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2020, **35**(2): 025013.
- [20] WANG Wen-bin, ZHANG Fu-jun, BAI Hui-tao, *et al.* Photomultiplication photodetectors with P3HT: fullerene-free material as the active layers exhibiting a broad response[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(10): 5578-5586.
- [21] HUANG J S, GOH T, LI Xiao-kai, *et al.* Polymer bulk heterojunction solar cells employing Förster resonance energy transfer[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(6): 479-485.
- [22] ZAFAR Q, AHMAD Z. Dual donor bulk-heterojunction to realize a quick and more sensitive organic visible photodetector [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, **29**(13): 11144-11150.