

文章编号:1007-2780(2019)09-0841-08

基于激基复合物主体的高性能 OLED 器件

倪 婷, 丁 磊, 王江南, 宁舒雅, 张方辉*

(陕西科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:为了得到低驱动电压、高光效的有机电致发光二极管(OLED),本文介绍了一种激基复合物 mCP:PO-T2T。首先通过测试 mCP、TPBi、PO-T2T、mCP:TPBi 和 mCP:PO-T2T 薄膜的光致发光光谱,确定了 mCP:TPBi、mCP:PO-T2T 具备激基复合物性能要求,并分别将上述两种激基复合物作为发光层主体,制备器件结构为 HATCN(10 nm)/TAPC(40 nm)/TCTA(10 nm)/mCP(10 nm)/mCP:X:FIrpic(20 nm, Y, 15%)/X(50 nm)/LiQ(2 nm)/Al(120 nm) 的蓝光 OLEDs。当 X 为 PO-T2T, Y=42.5%(质量分数)时,对应蓝光器件开启电压为 2.83 V,功率效率和电流效率分别达到了 35.5 lm/W 和 33.1 cd/A。在此基础上,将 0.2%(质量分数)的黄光磷光材料 PO-01 掺入上述器件的发光层,得到了基于激基复合物主体的暖白光 OLED,该器件获得了 63.7 lm/W 的功率效率、61.8 cd/A 的电流效率以及 19.9% 的外量子效率,实现了具备低电压、高效率、色偏较小等优越性能的暖白光 OLED。

关键词: OLED; 激基复合物; 蓝光; 暖白光

中图分类号: TN383+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193409.0841

OLED with high performance based on exciplex

NI Ting, DING Lei, WANG Jiang-nan, NING Shu-ya, ZHANG Fang-hui*

(College of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 721000, China)

Abstract: In order to obtain OLED with low driving voltage and high efficiency, a kind of exciplex mCP:PO-T2T is introduced in this paper. Firstly, by testing the photoluminescence spectra of mCP, TPBi, PO-T2T, mCP:TPBi and mCP:PO-T2T films, it is determined that mCP:TPBi and mCP:PO-T2T possess exciplex performance requirements. The blue OLEDs are fabricated by using the above two exciplexes as the host of the luminescent layer. The device structure is HATCN(10 nm)/TAPC(40 nm)/TCTA(10 nm)/mCP(10 nm)/mCP:X:FIrpic(20 nm, Y, 15%)/X(50 nm)/LiQ(2 nm)/Al(120 nm). When X is PO-T2T, and Y=42.5% (mass fraction), the open voltage of the corresponding device is 2.83 V, the power efficiency and current efficiency are 35.5 lm/W and 33.1 cd/A,

收稿日期: 2019-03-18; **修订日期:** 2019-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61605105); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(No. 2011KTCQ01-09); 陕西科技大学科研启动资金(No.2016BJ-01); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(No.17JF006)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61605105); Innovation Project of Science and Technology Plan Projects of Shaanxi Province (No. 2011KTCQ01-09); Research Start-up Funds of Shaanxi University of Science and Technology(No.2016BJ-01); Special scientific research plan of Shaanxi Provincial Education Department(No.17JF006)

* 通信联系人, E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn

respectively. On this basis, 0.2% (mass fraction) yellow phosphorescent material PO-01 is incorporated into the light-emitting layer of the above device, warm white OLED based on the host of exciplex is obtained. The power efficiency, current efficiency and external quantum efficiency of the white OLED reaches 63.7 lm/W, 61.8 cd/A and 19.9%, respectively. The warm white OLED with low voltage, high efficiency and low color bias is realized.

Key words: OLED; exciplex; blue light; warm white light

1 引言

近年来,白光 OLED 在固态照明及显示等领域得到了广泛应用,被视为下一代梦幻显示技术^[1-4]。人们最早使用纯荧光发光材料制备的白光 OLED 由于其自旋耦合的限制致使器件效率较低^[5],而纯磷光白光 OLED 虽提高了器件光效,但蓝色磷光材料寿命过低问题仍待解决^[6]。后来人们发现荧光-磷光杂化白光 OLED 结构能够同步实现器件的高寿命和高效率^[7-8],但这种方法仍然不能实现激子 100% 的利用率。随着人们对 OLED 的研究深入,如何在保证器件低驱动电压的同时充分利用所有的激子以获得更高的发光效率成为了目前研究的热点问题。

激基复合物为高光效 OLED 的研究提供了新的方向。外加电场的激发下,激基复合物能够形成 25% 的单线态 S_1 激子和 75% 的三线态 T_1 激子,由于其分子间较小的单线态、三线态能级差,能够实现三线态 T_1 激子向单线态 S_1 激子的上转换(即为反系间穿越, RISC),继而提高激子利用率^[9-13]。Adachi 等人^[14]将 m-MTDATA 和 3TPYMB 分别作为给体和受体形成激基复合物,并以此作为发光层制备的 OLED 器件 EQE 为 5.4%,该实验表明激基复合物对于器件效率提升具有一定的积极作用,此后,基于激基复合物 OLED 的研究层出不穷。相比于分子内热致活化延迟荧光(TADF)材料,激基复合物合成的过程更加简单,且给体、受体材料可选择性较多,不同给体、受体材料的搭配有望形成发射波长不同的激基复合物。如 Hung 等人^[15]采用 3P-T2T : TCTA 作为激基复合物,制备的器件最大 EQE 与功率效率分别为 10% 和 47 lm/W。Zhang 等人^[16]采用 TCTA : Tm3PyBPZ 作为激基复合物,制备的器件最大 EQE 与功率效率分别达到了 13.1% 和 53.4 lm/W。

对于激基复合物在 OLED 的运用,目前研究

倾向于将其直接作为发光层制备荧光蓝光 OLED 或应用于在白光 OLED 中进行光色调节,且为了提高白光器件的光效,一般采用多发光层结构或叠层结构,但这种结构也常常伴随着器件驱动电压的偏大。本文使用激基复合物 mCP : PO-T2T 作为发光主体,制备了蓝光 OLED,通过优化激基复合物掺杂比例,使器件的开启电压降至 2.83 V,功率效率达到 35.5 lm/W。更进一步的,将该激基复合物作为黄光客体 PO-01 和蓝光客体 FIrplic 的共主体,制备的白光 OLED 获得了 63.7 lm/W 的功率效率、61.8 cd/A 的电流效率以及 19.9% 的外量子效率。本文制备的基于激基复合物的白光单发光层 OLED,实现了低驱动电压和高发光效率,而且器件结构简单,具有一定的实用价值。

2 实验

2.1 器件制备

室温下分别测试 mCP、TPBi、PO-T2T、mCP : TPBi 以及 mCP : PO-T2T 薄膜的光致发光(PL)光谱,其中 mCP : TPBi、mCP : PO-T2T 均以 1 : 1 质量比进行掺杂,以此验证 mCP : TPBi、mCP : PO-T2T 激基复合物的形成。

将上述激基复合物分别作为发光层主体制备蓝光 OLEDs,器件结构为: HATCN(10 nm)/TAPC(40 nm)/TCTA(10 nm)/mCP(10 nm)/mCP : X : FIrplic(20 nm, Y, 15%)/X(50 nm)/LiQ(2 nm)/Al(120 nm)。当 Y=42.5% (质量分数,主体质量比为 1 : 1),X 分别为 TPBi、PO-T2T 时,对应器件 B、C;选择性能优异的激基复合物主体,进一步地优化其掺杂比例,当 Y=56.7% (质量分数,主体质量比为 1 : 2)时,对应器件 D,当 Y=28.3% (质量分数,比例为 2 : 1)时,对应器件 E;当 Y=21.3% (质量分数,比例为 3 : 1)时,对应器件 F。同时为对比基于激基复合物主体 OLED 与单主体 OLED 的发光性能差异,

制备了器件 A,其结构为 HATCN(10 nm)/TAPC(40 nm)/TCTA(10 nm)/mCP(10 nm)/mCP:FIrpic(20 nm, 15%)/PO-T2T(50 nm)/LiQ(2 nm)/Al(120 nm)。上述结构体系中, HATCN、LiQ 分别为空穴注入层和电子注入层; TAPC 和 TCTA 为空穴传输层,其中 TCTA 还充当了电子阻挡层作用;FIrpic 为蓝光磷光客体材料;mCP 作用为防止 TCTA 与上述激基复合物的受体材料形成新的激基复合物,干扰实验结果。

在上述实验基础上,本文将激基复合物作为蓝光磷光材料 FIrpic 和黄光磷光材料 PO-01 的共主体,制备了暖白光 OLED,器件结构为:HATCN(10 nm)/TAPC(40 nm)/TCTA(10 nm)/mCP(10 nm)/mCP:X:FIrpic:PO-01(20 nm,Y,15%,0.2%)/X(50 nm)/LiQ(2 nm)/Al(120 nm)。

2.2 器件表征

本文使用的 ITO 基板厚度为 0.7 mm,其中 ITO 厚度为 110 nm,方阻为 $12 \Omega/\square$,器件发光面积为 0.09 cm^2 。薄膜的光致发光光谱和紫外吸收光谱分别通过 Hitachi F-4600 荧光光谱仪和 Perkin Elmer Lambda 750 光度计测出。器件蒸镀设备为苏州方昇光 FS-550。实验中的材料膜厚及材料沉积速率均由石英晶体谐振器实时监测。器件的电流密度、电压、亮度、电流效率、功率效率、电致发光光谱、色坐标等光电特性均由弗士达 FS-1000GA-OLED 设备测得。

3 结果与分析

3.1 激基复合物性能分析

图 1 为 mCP、TPBi、PO-T2T、mCP:TPBi 及 mCP:PO-T2T 5 种薄膜的 PL 光谱,其样品峰峰位分别为 398,396,390,425,470 nm。mCP:TPBi 的光谱相较于 mCP、TPBi 发生了明显红移且其光谱半峰宽明显大于 mCP 和 TPBi。mCP:PO-T2T 的光谱相较于 mCP、PO-T2T 发生了明显红移,且 mCP:PO-T2T 光谱半峰宽大于后者。另一方面,由于 mCP 的 HOMO 能级(6.1 eV)和 TPBi 的 LUMO 能级(2.8 eV)之差为 3.3 eV,小于 mCP 带隙(3.7 eV)或 TPBi 带隙(3.4 eV),同样的,mCP 的 HOMO 能级和 PO-T2T 的 LUMO 能级(3.5 eV)之差为 2.6 eV,小于

mCP 带隙或 PO-T2T 带隙(4 eV),均证明了上述复合薄膜带隙减小,光谱红移的现象。半峰宽变宽、光谱红移等现象表明 mCP:TPBi、mCP:PO-T2T 均可作为激基复合物。

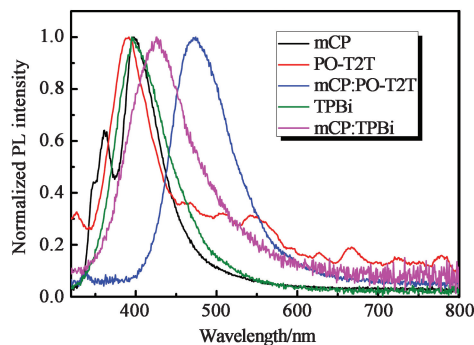


图 1 mCP、TPBi、PO-T2T、mCP:TPBi、mCP:PO-T2T 薄膜的光致发光光谱。

Fig.1 Photoluminescence spectra of mCP, TPBi, PO-T2T, mCP:TPBi and mCP:PO-T2T, respectively.

3.2 基于不同主体的蓝光 OLED

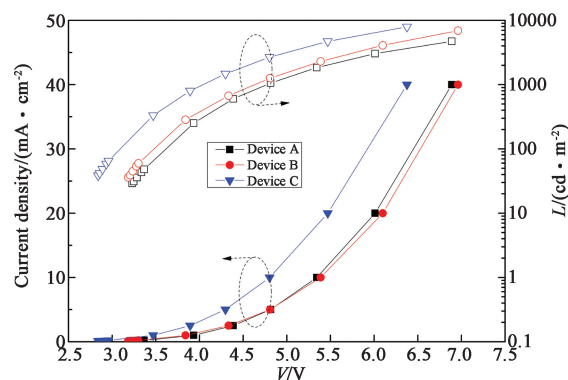
图 2 为基于不同主体的蓝光 OLEDs 光电特性曲线,其中图 2(a)为基于不同主体的蓝光 OLEDs 的电流密度-电压-亮度曲线。在 $0.12 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 电流密度下,器件 A 电压为 3.23 V,分别较器件 B 和 C 高出 0.05 V 和 2.4 V。器件 A 电压异常高的原因主要在于,从 TCTA 方向传输来的空穴和从 PO-T2T 方向传输来的电子分别需要克服 0.3 eV 和 1.1 eV 的能级势垒才能在发光层中进行复合,过高的能级势垒将导致器件驱动电压偏高。器件 B 和器件 C 中形成激基复合物的给体和受体材料又分别充当了对应器件结构中的空穴传输层和电子传输层,所以载流子在传输层与发光层界面处无势垒的传输模式将减小界面电荷积累,降低器件驱动电压。相同亮度下器件 C 驱动电压最低,其受体材料 PO-T2T 电子迁移率($\sim 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)大于 TPBi($\sim 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),具备较强的电子传输能力,且 TPBi 和 PO-T2T 的 HOMO 能级分别较 mCP 低了 0.1 eV 和 1.4 eV,因此,PO-T2T 具备较优的电子传输性能和空穴阻挡性能,有利于电子空穴的平衡传输。

从图 2(b)为基于不同主体的蓝光 OLEDs 的亮度-EQE 特性曲线及光谱分布。亮度从 $100 \text{ cd}/\text{m}^2$ 增至 $1000 \text{ cd}/\text{m}^2$,器件 A、B、C 的 EQE 分

别降了 16.1%、12.4%、4.0%。其中器件 A 的 EQE 滚降最为严重,因为 mCP 为空穴传输型材料,其对空穴迁移率大于电子迁移率,载流子传输不平衡,激子复合区域将偏向阴极侧,部分激子将发生猝灭。而激基复合物的引入,有利于发光层中的载流子达到平衡,有效拓宽了激子复合区域,提高复合几率,降低三线态-三线态激子猝灭,进而降低器件效率滚降。从光谱图中可见,3 个基于不同主体器件的光谱分布均为双峰,主峰位于 472 nm 处,肩峰位于 495 nm 处,并且光谱与 FIrpic 的特征光谱一致,说明主体到客体间的能量转移完全,器件蓝光发射源于客体上的激子退基辐射发光,而非激基复合物自身发光。

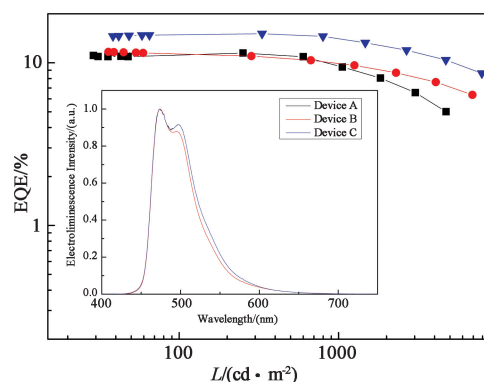
图 2(c)为基于不同主体的蓝光 OLEDs 的功率效率-亮度-电流效率特性曲线,同一亮度下,器件 A 相较于其他器件,效率最低,且效率滚降严重。单主体 mCP 在电致激发下形成的单线态激子和三线态激子分别通过 Förster 和 Dexter 能量传递转移至客体 FIrpic,最终形成 FIrpic 三线态激子并辐射跃迁发光。相比于该能量传递方式,器件 B、C 中由于激基复合物作主体,激子的反系间穿越作用以及磷光材料 FIrpic 中重原子的引入,激子将一直处于一个单线态-三线态-单线态的循环过程,直至能量被传递至客体材料中,激子利用率更高,主体到客体的能量传递效率更高。通常荧光材料的瞬时荧光寿命在纳秒量级,而 TADF 材料的延迟荧光寿命在微秒量级^[14],激基复合物具备 TADF 效应,其延迟荧光寿命较长,所以,器件 B、C 相较于器件 A 而言,随亮度的增大,效率滚降较小。由 PL 光谱可以推断出材料的单线态 S_1 能级,将 mCP : TPBi 和 mCP : PO-T2T 的 PL 光谱最强峰 $\lambda_{\max}$ 分别带入公式 $E_{S1} = 1240/\lambda_{\max}$ 中,得到 mCP : TPBi 和 mCP : PO-T2T 的单线态能级大致为 2.92 eV 和 2.64 eV,且由于激基复合物的内在 TADF 效应,其单线态能级和三线态能级差很小,可以认为 mCP : TPBi 和 mCP : PO-T2T 的三线态能级分别为 2.92 eV 和 2.64 eV^[17]。在 100 cd/m² 的亮度下,器件 C 的功率效率为 33.4 lm/W,电流效率为 32.5 cd/A,分别比器件 B 效率提升 12% 和 26.5%。器件 B 光效较低说明 mCP : TPBi 为主体对发光层电荷平衡能力弱于 mCP : PO-T2T。另一方面, mCP : TPBi 的三线态能级高于受体 TPBi 的三

线态能级(2.8 eV),这将导致主体材料产生的激子有一部分会转移至 TPBi 上,最终通过无辐射跃迁衰减至基态,导致器件 B 光效降低^[18]。



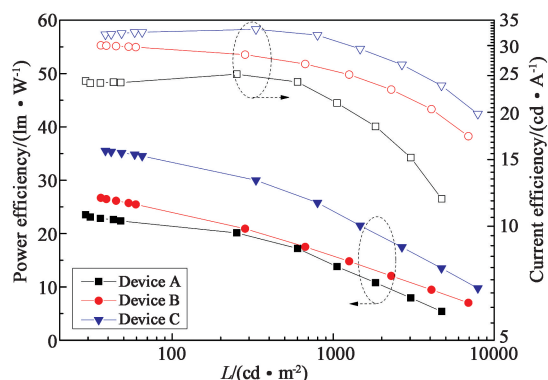
(a) 器件电流密度-电压-亮度特性曲线

(a) Current density-voltage-luminance characteristics of devices



(b) 器件亮度-EQE 特性曲线及光谱分布

(b) Power efficiency-luminance-current efficiency characteristics of devices



(c) 器件功率效率-亮度-电流效率特性曲线

(c) Luminance-EQE characteristics and spectrogram of devices

图 2 基于不同主体蓝光 OLED 的光电特性曲线
Fig.2 Photoelectric characteristics of blue OLEDs based on different hosts

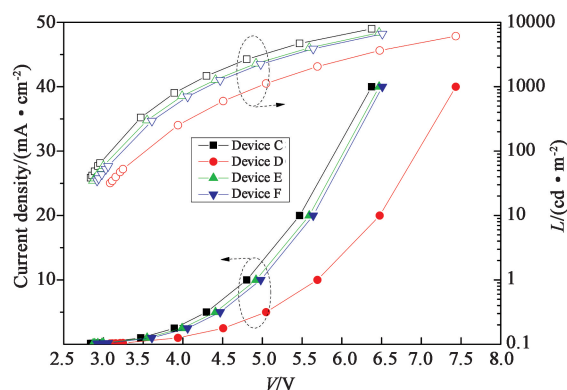
3.3 基于不同掺杂比例的激基复合物主体的蓝光 OLED

图3为基于不同掺杂比例的激基复合物主体的蓝光 OLED 光电特性曲线。图3(a)为基于不同掺杂比例的主体对应器件的电流密度-电压-亮度特性曲线, mCP: PO-T2T 比例为 1:1、1:2、2:1、3:1 时, 对应器件在 0.12 mA/cm² 电流密度下的驱动电压分别为 2.83, 3.1, 2.87, 2.92 V。大电流密度下器件 D 驱动电压急剧增加, 表明 mCP: PO-T2T 为 1:2 掺杂时, 因 PO-T2T 的电子迁移率远大于 mCP 的空穴迁移率, 传输至发光层中的电子和空穴不能完全复合, 空穴过剩导致载流子传输不平衡。同一电流密度下, 随着 mCP: PO-T2T 比例的增大(从 1:1 增至 3:1), 对应器件的开启电压逐渐增加。当 mCP: PO-T2T 掺杂比例为 1:1 时, 发光层中的电子与空穴的传输能力更趋于平衡, 界面载流子积累更少, 激子复合区域更大, 表现在同一亮度下, 器件 C 的驱动电压最小, 特别地, 在 100 cd/m² 的亮度下, 器件 B 的电压为 3.1 V, 1 000 cd/m² 的亮度下为 4.05 V。

图3(b)为基于不同掺杂比例的主体对应器件的功率效率-亮度-电流效率特性曲线。当 mCP: PO-T2T 比例减小(从 1:1 到 1:2)时, 器件效率随亮度增加而大幅降低; 当 mCP: PO-T2T 比例增大(从 1:1 到 1:3)时, 器件效率随亮度增加而逐渐降低; 当且仅当 mCP: PO-T2T 比例为 1:1 时, 器件拥有最高功率效率和电流效率, 分别为 35.5 lm/W 和 33.1 cd/A。受体材料 PO-T2T 与给体材料 mCP 在激基复合物中所占比例过大均会导致电子或空穴过剩, 载流子传输不平衡使得电荷堆积, 继而影响器件发光效率。其中由于 PO-T2T 的高迁移率和强吸电子能力, 使得发光层中载流子严重失衡, 形成的激基复合物能量传递效率降低, 表现在器件 D 随亮度的增加, 效率滚降最为严重。器件 E 和 F 在 100 cd/m² 的亮度下, 功率效率分别较器件 A 低了 12% 和 15%, 说明随 mCP 比例的增加, 发光层中电子和空穴复合区域将逐渐靠近电子传输层一侧, 激子利用率逐渐降低。

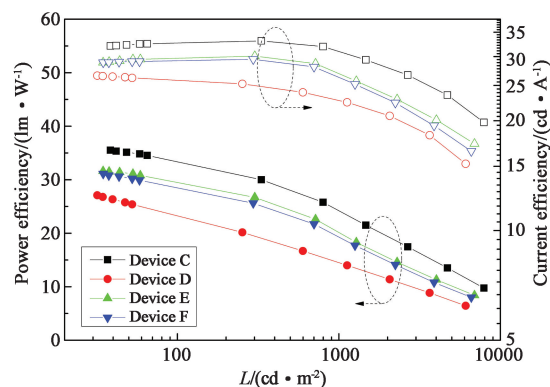
图3(c)为基于不同掺杂比例的主体对应器件的亮度-EQE 特性曲线及光谱分布, 4 个器件的峰值波长一致, 均为 472 nm 和 495 nm, 但器件 E

的肩峰强度明显小于其他 3 个器件, 即蓝光强度有所减弱, 而器件 C、E、F 的光谱强度基本一致。



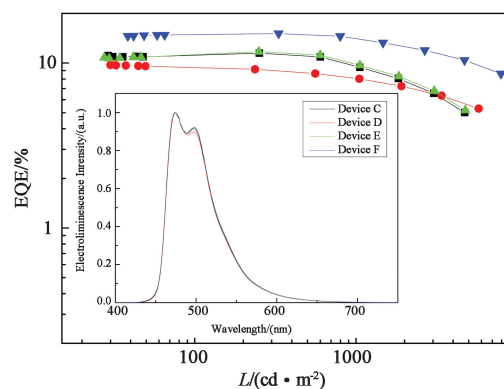
(a) 器件电流密度-电压-亮度特性曲线

(a) Current density-voltage-luminance characteristics curves of devices



(b) 器件功率效率-亮度-电流效率特性曲线

(b) Luminance-EQE characteristics curves and spectrogram of devices



(c) 器件亮度-EQE 特性曲线及光谱分布

(c) Power efficiency-luminance-current efficiency characteristics curves of devices

图3 基于不同掺杂比例蓝光 OLED 的光电特性曲线
Fig.3 Photoelectric characteristics curves of blue OLEDs based on different doping proportions

综上,器件 B 性能最优,即激基复合物 mCP : PO-T2T 掺杂比例为 1 : 1 时,对应的器件驱动电压最低(0.12 mA/cm² 电流密度下电压为 2.83 V),功

率效率最高为 35.5 lm/W,EQE 最高为 15.1%。表 1 为器件 A、B、C、D、E 和 F 的光电特性测试结果汇总。

表 1 器件光电特性参数汇总

Tab.1 Summary of photoelectric characteristic parameters of devices

器件	V ^(a) /V	PE(lm · W ⁻¹)/CE(cd · A ⁻¹)/EQE/% ^(b)		
		Maximum	100 cd/m ²	1 000 cd/m ²
A	3.23	23.5/ 25.2/ 11.5	21.4/ 24.6/ 11.2	13.9/21.4/ 9.4
B	3.18	26.7/ 30.0/ 11.7	29.4/ 23.9/ 11.3	15.8/ 25.7/ 9.9
C	2.83	35.5/ 33.1/ 15.1	33.4/ 32.5/ 14.9	24.1/ 30.9/ 14.3
D	3.09	27.1/ 26.6/ 11.4	23.3/ 25.8/ 11.0	15.6/ 22.8/ 9.7
E	2.87	31.6/ 30.1/ 13.7	29.4/ 29.7/ 13.3	20.1/ 26.8/ 12.8
F	2.92	31.1/ 29.4/ 13.3	28.4/ 29.2/ 13.1	19.2/26.2/ 11.8

^(a) 器件在 0.12 mA/cm² 时的电压;^(b) 器件最高、100 cd/m² 亮度下以及 1 000 cd/m² 亮度下对应的功率效率/功率效率/外量子效率

3.4 基于激基复合物为主体的白光 OLED

图 4 为蓝光材料 FIrpic 和黄光材料 PO-01 的吸收光谱及 mCP : PO-T2T 激基复合物的 PL 光谱,由图可知,FIrpic、PO-01 各自的吸收光谱与 mCP : PO-T2T 的 PL 光谱均有较大面积的重叠,表明以 mCP : PO-T2T 为 FIrpic 和 PO-01 的共主体时,能够实现能量的高效传递。

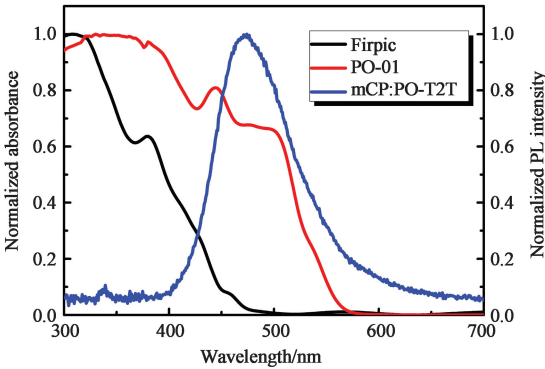
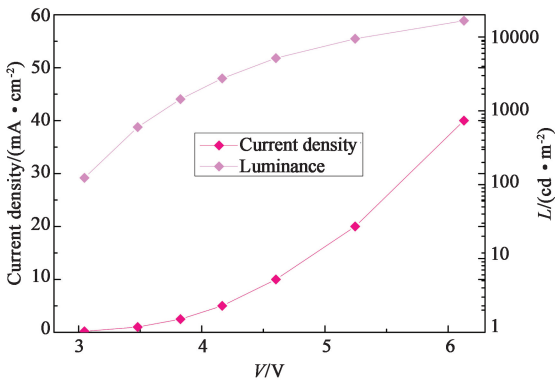


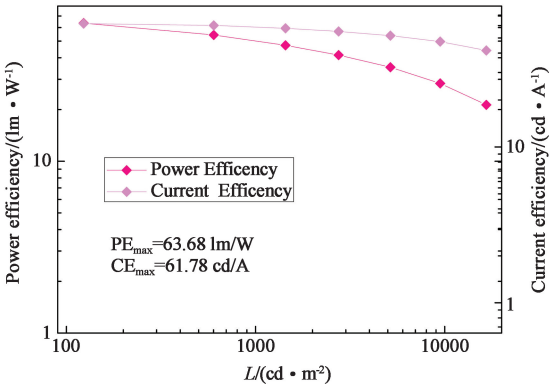
图 4 FIrpic、PO-01 吸收光谱及 mCP : PO-T2T 激基复合物光致发光光谱。

Fig.4 Absorption spectra of FIrpic and PO-01, and the photoluminescence spectra of mCP : PO-T2T.

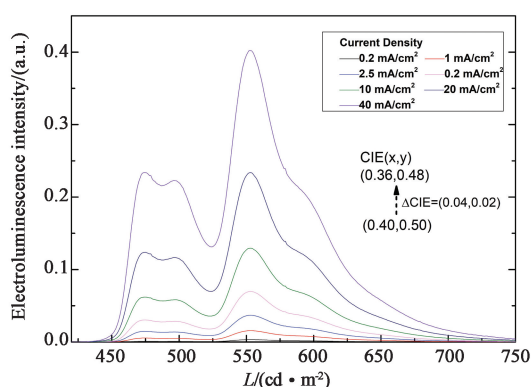
图 5 为基于激基复合物为主体的白光 OLED 光电特性曲线。图 5(a)为器件电流密度-电压-亮度特性曲线,在 0.2 mA/cm² 的电流密度下,白光 OLED 驱动电压为 3.04 V,对应的亮度为 125 cd/m²,且在



(a) 器件电流密度-电压-亮度特性曲线
(a) Current density-voltage-luminance characteristics curves of the device



(b) 器件功率效率-亮度-电流效率特性曲线
(b) Power efficiency-luminance-current efficiency characteristics curves of the device



(c) 器件光谱分布

(c) Spectrogram of the device

图5 白光 OLED 光电特性曲线

Fig. 5 Photoelectric characteristics curves of the warm white OLED

驱动电压为 6.1 V 时,器件亮度可以达到 16 608 cd/m^2 。激子从传输层到发光层的无势垒的传输很大程度上降低了器件的驱动电压,实现了低电压、高亮度的白光 OLED。

图 5(b)为器件功率效率-亮度-电流效率特性曲线。如图所示,基于激基复合物 mCP : PO-T2T 的白光 OLED 的功率效率和电流效率分别达到了 63.7 lm/W 和 61.8 cd/A 。激基复合物 mCP : PO-T2T 的引入及比例优化,提高了激子利用率,使其在发光层中能够平衡复合发光,有利于器件光效的提升。

图 5(c)为器件的光谱分布。电流密度由 0.2 mA/cm^2 增至 40 mA/cm^2 ,器件 CIE 色坐标由 (0.40, 0.50) 变至 (0.36, 0.48),其中 x 偏移量为 0.04, y 偏移量为 0.02, CIE 色坐标变化量很小。白光能量传递方式包含两种:一是主体直接传递能量至黄光客体和蓝光客体;二是能量从主体传递至蓝光客体,再由蓝光客体传递至黄光客体。而引起色偏移的原因在于,FIrpic 的三线态能级 (2.6 eV) 高于 PO-01 的三线态能级 (2.2 eV),但低于 mCP : PO-T2T 的三线态能级 (2.64 eV),激基复合物主体

mCP : PO-T2T 优先将三线态激子传递给 PO-01,待 PO-01 能级上的激子饱和后,剩余的激子继续传递至 FIrpic,因此,随着电流密度的增加,蓝光的强度越来越强。另一方面,由于黄光客体材料 PO-01 的吸收面积几乎覆盖了蓝光客体 FIrpic 的吸收面积,并且 FIrpic 的三线态能级高于 PO-01 的三线态能级,因此能量大部分传递给 PO-01,表现在光谱上,则为黄光强度强于蓝光。在小电流密度下,因黄光客体掺杂比例较小,由于 Dexter 能量转移限制,主体与客体间距大于转移距离,导致能量转移不完全,因此,器件在小电流驱动下仍有蓝光峰存在。

4 结 论

本文将激基复合物 mCP : PO-T2T 作为发光层主体分别制备了高光效蓝光和暖白光 OLED。首先通过测试 mCP、TPBi、PO-T2T、mCP : TPBi 及 mCP : PO-T2T 薄膜的 PL 光谱,确定了 mCP : TPBi 与 mCP : PO-T2T 具备激基复合物性能要求。将 mCP、mCP : TPBi 与 mCP : PO-T2T 分别作为蓝光磷光客体 FIrpic 的主体,制备基于不同主体的蓝光 OLEDs,对比其器件性能,发现基于 mCP : PO-T2T 主体的器件性能最优。通过改变 mCP : PO-T2T 的掺杂比例来优化器件结构,结果表明,激基复合物 mCP : PO-T2T 以 1 : 1 质量比掺杂时,对应的器件性能最优,器件开启电压为 2.83 V,功率效率和电流效率分别达到了 35.5 lm/W 和 33.1 cd/A 。在此基础上,将 mCP : PO-T2T 作为白光 OLED 主体,制备的白光 OLED 的发光层结构为 mCP : 42.5% (质量分数) PO-T2T : 15% FIrpic : 0.2% PO-01,该白光器件获得了 63.7 lm/W 的功率效率、61.8 cd/A 的电流效率以及 19.9% 的外量子效率,实现了低电压、高效率、色偏较小的暖白光 OLED。

参 考 文 献:

- [1] 马颖,韩薇,张方辉,等.发光层混合掺杂的白光 OLED 器件[J].液晶与显示,2011,26(1):40-43.
MA Y, HAN W, ZHANG F H, et al. White organic light-emitting diodes based on mixed doping emitting layer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(1): 40-43. (in Chinese)
- [2] 王琦,马东阁.白光有机发光二极管的制备方法[J].液晶与显示,2009,24(5):617-629.

- WANG Q, MA D G. Fabrication methods of white organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(5): 617-629. (in Chinese)
- [3] CHO Y J, YOON K S, LEE J Y. A universal host material for high external quantum efficiency close to 25% and long lifetime in green fluorescent and phosphorescent OLEDs [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(24): 4050-4055.
- [4] FAN C, ZHU L P, LIU T X, *et al.* Using an organic molecule with low triplet energy as a host in a highly efficient blue electrophosphorescent device [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(8): 2147-2151.
- [5] BULOVIV, DESHPANDE R, THOMPSON M E, *et al.* Tuning the color emission of thin film molecular organic light emitting devices by the solid state solvation effect [J]. *Chemical Physics Letters*, 1999, 308(3-4): 317-322.
- [6] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, 459(7244): 234-238.
- [7] WU Z B, LUO J J, SUN N, *et al.* High - performance hybrid white organic light-emitting diodes with superior efficiency/color rendering index/color stability and low efficiency roll - off based on a blue thermally activated delayed fluorescent emitter [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(19): 3306-3313.
- [8] YANG D, DUAN Y H, YANG Y Q, *et al.* Application of exciplex in the fabrication of white organic light emitting devices with mixed fluorescent and phosphorescent layers [J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 166: 77-81.
- [9] PARK Y S, LEE S, KIM K H, *et al.* Exciplex - forming co-host for organic light - emitting diodes with ultimate efficiency [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(39): 4914-4920.
- [10] SEINO Y, SASABE H, PU Y J, *et al.* High - performance blue phosphorescent OLEDs using energy transfer from exciplex [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1612-1616.
- [11] ZHANG D D, CAI M H, ZHANG Y G, *et al.* Highly efficient simplified single-emitting-layer hybrid WOLEDs with low roll-off and good color stability through enhanced Forster energy transfer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(51): 28693-28700.
- [12] SUN Y R, GIEBINK N C, KANNO H, *et al.* Management of singlet and triplet excitons for efficient white organic light-emitting devices [J]. *Nature*, 2006, 440(7086): 908-912.
- [13] UOYAMA H, GOUSHI K, SHIZU K, *et al.* Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence [J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 234-238.
- [14] GOUSHI K, ADACHI C. Efficient organic light-emitting diodes through up-conversion from triplet to singlet excited states of exciplexes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(2): 023306.
- [15] HUNG W Y, FANG G C, CHANG Y C, *et al.* Highly efficient bilayer interface exciplex for yellow organic light-emitting diode [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(15): 6826-6831.
- [16] ZHANG L, CAI C, LI K F, *et al.* Efficient organic light-emitting diode through triplet exciton reharvesting by employing blended electron donor and acceptor as the emissive layer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(45): 24983-24986.
- [17] ZHANG H, WANG Z Q, GAO L, *et al.* Low efficiency roll-off and high color stability pure fluorescent white organic light-emitting diode based exciplex host [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(2): 954-959.
- [18] WU S F, LI S H, WANG Y K, *et al.* White organic LED with a luminous efficacy exceeding 100 lm • W⁻¹ without light out-coupling enhancement techniques [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(31): 1701314.

作者简介:



倪 婷(1992—),女,陕西宝鸡人,硕士,2019年于陕西科技大学获得硕士学位,主要从事有机电致发光器件方面的研究。E-mail: 646124497@qq.com



张方辉(1966—),男,山西曲沃人,博士,教授,2008年于陕西科技大学获得博士学位,主要从事有机照明显示和LED方面的研究。E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn