

基于激基复合物的高效单色和白色有机发光二极管

袁青松, 付祥恩

引用本文:

袁青松, 付祥恩. 基于激基复合物的高效单色和白色有机发光二极管[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(9): 892–899.

YUAN Qing-song, FU Xiang-en. High efficient monochromatic and white organic light-emitting diodes based on exciplex[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 892–899.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0892>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于激基复合物主体的高性能OLED器件

OLED with high performance based on exciplex

液晶与显示. 2019, 34(9): 841–848 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0841>

溶液法制备 SimCP : FIrpic 掺杂的蓝色磷光器件

Solution processible SimCP : FIrpic doped blue phosphorescent devices

液晶与显示. 2015(2): 240–245 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0240>

基于13,13-二甲基N,N-二-对甲苯基-13H-茚并[1,2-B]蒽-2-胺高效长寿命蓝光有机电致发光二极管

High-efficiency long-life blue organic electro-luminescent diode based on 13,13-dimethyl-N,N-di-p-tolyl-13H-indeno[1,2-b]anthracen-2-amine

液晶与显示. 2019, 34(12): 1136–1142 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193412.1136>

基于化学溶液法制备的氧化锌量子点发光二极管研究

Research of zinc oxide quantum dot light-emitting diodes based on preparation of chemical solutions

液晶与显示. 2016, 31(7): 635–642 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163107.0635>

OLED显示与照明——从基础研究到未来的应用

OLED display and lighting——from basic research to future applications

液晶与显示. 2016, 31(3): 229–241 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163103.0229>

文章编号:1007-2780(2020)09-0892-08

基于激基复合物的高效单色和 白色有机发光二极管

袁青松*, 付祥恩

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要:为了探究激基复合物对于有机发光二极管(OLED)性能的影响,本文制备了一系列基于无激基复合物结构和激基复合物结构的器件。首先对比分析 N,N'-bis(naphthalene-1-yl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine (NPB)、4,4',4''-tris(Ncarbazolyl)-triphenylamine (TCTA)、1,3,5-tris(Nphenylbenzimidazole-2-yl) benzene (TPBi)、NPB:TPBi 和 TCTA:TPBi 五种薄膜的光致发光(PL)光谱,确定了 NPB:TPBi 不能有效地形成激基复合物,而 TCTA:TPBi 符合激基复合物的要求。随后结合蓝色磷光 Bis[(3,5-difluoro-2-(2-pyridyl) phenyl)-(2-carboxypyridyl) iridium(III)] (FIrpic)和橙色磷光 Bis(4-phenylthieno[3,2-c]pyridinato-N,C2') acetylacetonate iridium(III) (PO-01)超薄发光层,制备了一系列的单色和白色 OLED 器件,并优化了磷光超薄发光层的厚度以获得更高亮度和效率。相比于无激基复合物器件,基于激基复合物的单色蓝光、橙光、双色白光器件性能得到极大的提升,获得最大的亮度分别为 5 823,29 000,23 790 cd/m²,最大功率效率(PE)分别为 15.3,47.8,51.0 lm/W。这些改进的器件性能归因于三重态激子到单重态激子的反向系间窜越(RISC)和高效的主客体能量转移。

关键词:有机发光二极管;激基复合物;超薄发光层;效率;亮度

中图分类号:TN383+.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203509.0892

High efficient monochromatic and white organic light-emitting diodes based on exciplex

YUAN Qing-song*, FU Xiang-en

(School of Science, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to explore the influence of exciplex on the performance of organic light-emitting diodes (OLED), a series of devices based on the structure with or without exciplex have been fabricated. Firstly, it is determined that NPB:TPBi is not effective to form exciplex, while TCTA:TPBi possesses exciplex performance requirements by comparing and analyzing the photoluminescence spectra of N,N'-bis(naphthalene-1-yl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine (NPB), 4,4',4''-tris(Ncarbazolyl)-triphenylamine (TCTA), 1,3,5-tris(Nphenylbenzimidazole-2-yl) benzene (TPBi), NPB:TPBi and TCTA:TPBi films. Then, a series of monochromatic and white OLED devices have been fabricated by combining ultrathin emission layer of blue phosphorescence bis[(3,5-difluoro-2-(2-

收稿日期:2020-02-04;修订日期:2020-05-06.

* 通信联系人, E-mail:358201651@qq.com

pyridyl) phenyl-(2-carboxypyridyl) iridium(Ⅲ) (FIrpic) and orange phosphorescence bis(4-phenylthieno[3,2-c]pyridinato-N,C2') acetylacetonate iridium(Ⅲ) (PO-01), and the thickness of ultrathin phosphor layers are optimized to achieve high brightness and efficiency. Compared with devices without exciplex, the performance of monochromatic blue, orange and two-color white devices based on the exciplex have been greatly improved, with the maximum brightness of 5 823, 29 000, 23 790 cd/m^2 and the maximum power efficiency (PE) of 15.3, 47.8, 51.0 lm/W , respectively. These improved device performances are attributed to the reverse inter system crossing (RISC) from triplet exciton to singlet exciton and the efficient host-guest energy transfer, which provides a feasible idea for the preparation of high-efficiency OLED devices with simple structure.

Key words: organic light-emitting diode; exciplex; ultrathin emitting layer; efficiency; luminance

1 引言

近些年来,OLED 凭借其柔性超薄、透明化、重量轻、响应时间短和能耗低等特点而在固态照明和智能显示等领域得到广泛应用^[1-5]。根据自旋量子统计理论,电子与空穴复合后形成的单重态和三重态激子的概率比为 1 : 3^[6]。荧光材料虽然可靠性高且成本低,但它只能吸收利用 25% 的单重态激子能量,其他 75% 的三重态激子能量将无辐射衰减,导致荧光材料的内量子效率 (IQE) 极限仅为 25%^[7]。磷光材料能通过有效的系间窜越 (ISC) 将单重态激子和三重态激子混合后辐射发光,其 IQE 理论值趋于 100%^[8-9]。但是磷光 OLED 在高浓度、高电压情况下有三重态激子猝灭现象,限制了其外量子效率 (EQE) 的提高^[10]。效率和亮度决定了 OLED 能否进一步大规模商业化应用,如何有效利用单重态和三重态激子以提高发光效率成为当前迫切需要解决的难题^[11]。

两种单极性有机半导体材料构成的两种主体的平面或体异质结界面结构的激基复合物为高性能 OLED 的研究提供了良好的方向^[12-13]。激基复合物的本质是电荷转移,在库仑力的作用下,可以实现 RISC 效应,减少了三重态激子的能量损失^[14-15]。目前,通过将空穴传输层和电子传输层材料结合形成的混合主体在光致发光器件中的应用得到了很多学者的效仿,Xu 等人^[16]把 SAFDPA 和 TPBi 按照重量比 1 : 1 混合形成激基复合物,其搭配 FIrpic 蓝光材料的器件最大外量子效率 (EQE)、电流效率 (CE)、最大功率效率 (PE) 分别为 6.52%、16.52 cd/A 、13.15 lm/W 。

Zhang 等人^[17]使用 TCTA 与 Tm3PyBPZ 形成激基复合物,峰值波长 514 nm,其绿光器件的最大 EQE、CE、功率效率 PE 分别为 13.1%、44.2 cd/A 、54.5 lm/W 。Chen 等人^[18]运用 TPAPB : TPBi 形成了激基复合物,其峰值波长为 471 nm,匹配橙色磷光发光层后的白光器件最大 EQE、CE、PE 分别为 15.7%、42.5 cd/A 、29.6 lm/W 。Luo 等人^[19]把 TAPC 和 TmPyPB 形成的激基复合物搭配黄色发光层和红色发光层,制备出了 EQE 和 PE 分别为 16.8% 和 56.4 lm/W 的白光器件。Ni 等人^[20]将 mCP : TPBi 和 mCP : PO-T2T 两种激基复合物作为发光层主体,成功制备了低驱动电压、高效率 and 色偏较小的暖白光 OLED。

为了进一步探究激基复合物对白光器件性能的影响,本文分别制备了基于传统无激基复合物和存在激基复合物的非掺杂橙色、蓝色、白色 3 组器件。首先通过在供体/受体界面插入超薄发光层的方法探究激基复合物对单色器件的效率和亮度的影响;随后引入双超薄发光层和激基复合物结合的概念探究激基复合物对白光器件性能的影响。最终获得了简化结构和高效率的单色和白色 OLED 器件。

2 实验

本文所有的器件都是在刻有氧化铟锡 (ITO) (方阻为 15 $\Omega/\square$) 条形电极的玻璃基片上制备而成的。ITO 玻璃基片在蒸镀之前需要经过超声波清洗仪进行预处理,分别在洗洁剂、去离子水、异丙醇、乙醇中依次清洗 20 min,最后放置在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的烘烤箱内烘干。在制备器件

的过程中,蒸镀机腔体内气压 $< 5 \times 10^{-4}$ Pa。根据材料的类型以及所需制备的厚度,热蒸发速率是不同的。超薄磷光层、电荷注入层、传输层、负极(铝)的热蒸发速率分别为 0.01, 0.05, 0.1, 0.3 nm/s。ITO 电极与蒸镀的负极的重叠部分即为器件的有效发光区域,有效发光面积为 9 mm^2 。实验中利用 Keithley2400 电源和 PR655 光谱仪测试获得器件电流密度、亮度、效率和电致发光光谱。用 F-7000 型荧光光谱仪在 315 nm 的激发光长下对有机材料的光致发光光谱进行了表征。除了在氮气环境下记录的光致发光瞬态衰减曲线外,所有的测量都是在室温下进行的,没有进行封装。

本文分别以 1, 4, 5, 8, 9, 11-hexaazatriphenylene hexacarbonitrile (HAT-CN) 和 8-Hydroxyquinolinolato-lithium (LiQ) 为空穴注入层(HIL)和电子注入层(EIL)^[21-22]。N, N'-bis(naphthalene-1-yl)-N, N'-bis(phe-nyl)-benzidine (NPB) 和 TCTA 分别作为第一空穴传输层(HTL)和第二 HTL^[23-24]。TPBi 和 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline (Bphen) 分别作为第一电子传输层(ETL)和第二 ETL^[25]。FIrpic 和 PO-01 用作蓝色和橙色磷光材料^[26]。器件能级示意图以及部分材料的化学分子式如图 1 所示。

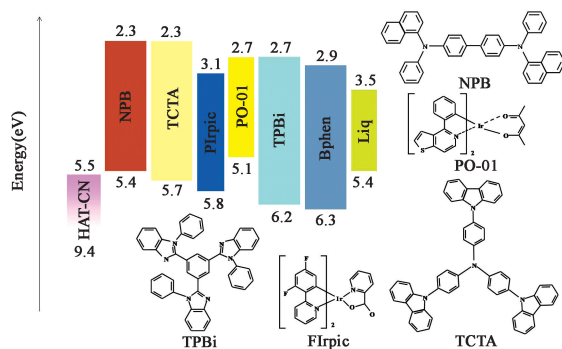


图 1 有机材料的能级示意图和部分化学分子式

Fig.1 Schematic diagram of organic materials and the energy level/molecular

3 结果和讨论

NPB、TCTA、TPBi、NPB/TPBi 和 TCTA/TPBi 薄膜的光致发光光谱如图 2 所示。NPB/

TPBi 和 TCTA/TPBi 混合薄膜的掺杂比例均为 1:1。众所周知,激基复合物发射峰的能量与电子供体的电离势(I_D)和电子受体的电子亲和势(A_A)之间的能量差($I_D - A_A$)呈线性关系,其关系公式如下:

$$E_{\text{exciplex}} = (I_D - A_A) + \text{Constant} \quad (1)$$

其中,常数(Constant)的绝对值为 $\leq 0.4 \text{ eV}$ ^[27]。从图中可以看出 NPB/TPBi 混合薄膜的发射谱在约 446 nm 处达到峰值,几乎完全与 NPB 纯膜的发射谱重叠,因此,NPB/TPBi 的光致发光谱只显示了 NPB 的本征发射,说明 NPB 与 TPBi 之间的分子间相互作用不能有效地形成界面激基复合物。然而,TCTA/TPBi 的光致发光谱与 TCTA 或 TPBi 的光致发光谱有很大的不同。TCTA/TPBi 的光致发光光谱显示蓝色发射,峰值为 437 nm,其光谱出现红移和展宽的现象,这是归因于 TCTA/TPBi 的界面激基复合物。

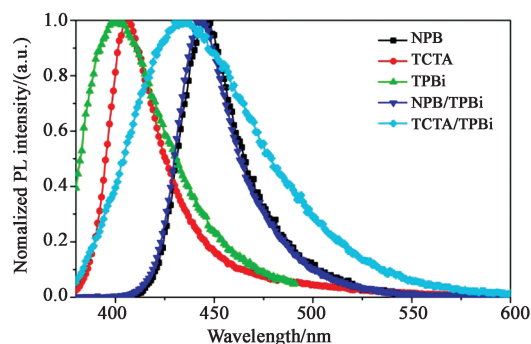


图 2 NPB、TCTA、TPBi、NPB/TPBi 和 TCTA/TPBi 的光致发光光谱。

Fig.2 PL spectra of NPB, TCTA, TPBi, NPB/TPBi, and TCTA/TPBi.

蓝色磷光材料 FIrpic 的吸收谱范围为 200~450 nm,橙色磷光材料 PO-01 的吸收谱范围为 250~550 nm,NPB/TPBi 的光致发光光谱范围为 400~500 nm,TCTA/TPBi 的光致发光光谱范围为 350~600 nm,更宽的光谱覆盖保证了当两种分子系统接近 $\sim 10 \text{ nm}$ 时,TCTA/TPBi 的界面激基复合物能量能够有效传递至磷光材料 FIrpic 和 PO-01^[28-30]。

如图 3 所示,首先将蓝色超薄磷光层和黄色超薄磷光层分别嵌入到无界面激基复合物结构和有界面激基复合物的结构中,制备的单色器件结构如下:

黄光器件 A (无界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (50 nm)/PO-01 (0.1 nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/LiQ (2 nm)/Al (100 nm);

黄光器件 B (有界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (40 nm)/TCTA (10 nm)/PO-01 (0.1 nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/LiQ (2 nm)/Al (100 nm);

蓝光器件 C (无界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (50 nm)/Flrpic (0.1 nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/LiQ (2 nm)/Al (100 nm);

蓝光器件 D (有界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (40 nm)/TCTA (10 nm)/Flrpic (0.1 nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/LiQ (2 nm)/Al (100 nm)。

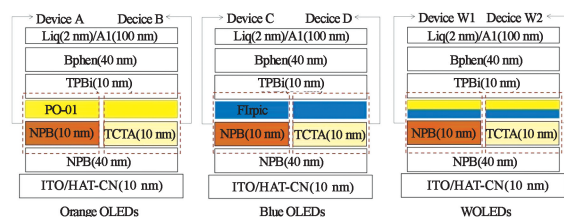


图 3 器件 A、B、C、D、W1 和 W2 的结构图。

Fig.3 Device structure of device A, B, C, D, W1, and W2.

从表 1 可以看出,橙光器件 A、B 的最大电流密度分别为 347.5 mA/cm^2 、 326.7 mA/cm^2 。蓝光器件 C、D 的最大电流密度分别为 306.7 mA/cm^2 、 299.2 mA/cm^2 。这是因为 NPB 空穴迁移率与 Bphen 的电子迁移率相近,约为 $10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于载流子传输平衡^[31-32]。图 4 是器件 A、B、C 和 D 的亮度-电压-电流密度特性曲

表 1 优化后的无激基复合物和有激基复合物的器件电致发光特性

Tab.1 EL properties of the devices without exciplex and within exciplex

Devices	$L_{\max}/$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	$J_{\max}/$ ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\eta_{\text{PE max}}/$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)	$\eta_{\text{CE max}}/$ ($\text{cd} \cdot \text{A}^{-1}$)	$\eta_{\text{EQE max}}/$ (%)	CIE(x, y)	
						3 V	7 V
A	6 841	347.5	13.1	10.4	4.2	(0.491 7, 0.469 8)	(0.405 4, 0.389 8)
B	29 000	326.7	47.8	41.8	17.7	(0.519 3, 0.477 3)	(0.505 7, 0.477 6)
C	671	306.7	0.2	0.3	0.3	(0.151 1, 0.156 2)	(0.151 2, 0.131 8)
D	5 823	299.2	15.3	13.4	9.4	(0.155 7, 0.403 4)	(0.183 0, 0.410 8)
W1	3 550	313.1	5.4	4.7	2.5	(0.503 7, 0.482 3)	(0.385 6, 0.366 6)
W2	23 790	308.9	51.0	44.7	16.1	(0.469 0, 0.486 5)	(0.447 2, 0.485 4)

$L_{\max}$ 为最大亮度; $J_{\max}$ 为最大电流密度; $\eta_{\text{PE max}}$ 为最大功率效率; $\eta_{\text{CE max}}$ 为最大电流效率; $\eta_{\text{EQE max}}$ 为最大外量子效率; CIE(x, y) 为 1931 色坐标。

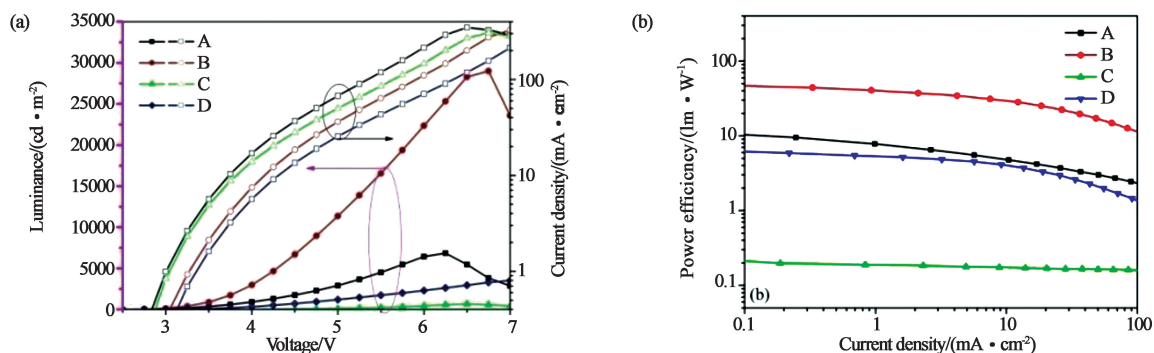


图 4 (a) 器件 A、B、C 和 D 的亮度-电压-电流密度曲线; (b) 器件 A、B、C 和 D 的功率效率-电流密度曲线。

Fig.4 (a) J - V - L characteristics of devices A, B, C, and D; (b) η_{PE} - J characteristics of devices A, B, C, and D.

线以及功率效率-电流密度曲线。器件 A、B、C、D 的最大亮度分别为 6 841, 29 000, 671, 5 823 cd/m^2 。在 CE、PE、EQE 方面, 橙光器件 B 和蓝光器件 C 都高于无激基复合物的橙光器件 A 和蓝光器件 D。NPB 的三重态能级 ($T_1 = 2.3 \text{ eV}$) 低于 TCTA ($T_1 = 2.73 \text{ eV}$), 难以限制的 FIrpic ($T_1 = 2.65 \text{ eV}$) 和 PO-01 ($T_1 = 2.21 \text{ eV}$) 的三重态激子, 导致无激基复合物的器件有部分激子流失到主体中^[26, 33-34], 降低了器件的整体亮度。图 5 展示了无界面激基复合物和有界面激基复合物器件的激子能量转移过程。在无界面激基复合物的器件中, 空穴和电子复合后形成的单重态和三重态激子直接传递给客体磷光材料, 过多的三重态激子堆积在界面处, 存在着严重的三重态激子猝灭效应, 极大地降低了效率和亮度^[10]。而在有界面激基复合物的器件中, 聚集在界面处的三重态激子上转换为单重态激子, 再通过 Förster 和 Dexter 能量转移方式传递至发光材料, 使得效率和亮度得到极大改善^[34]。

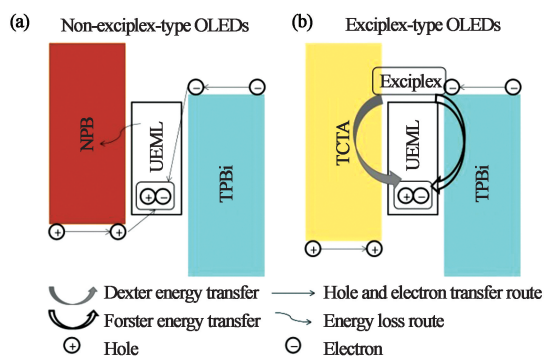


图 5 无激基复合物(a)和有激基复合物(b)器件的能量转移过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of emission processes in devices without exciplex (a) and with exciplex(b)

为进一步探究激基复合物对白光器件性能的影响, 我们将蓝色和橙色超薄层同时嵌入供体/受体界面处, 制备了 W1 和 W2 两个器件。

器件 W1 (无界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (50 nm)/FIrpic (1 nm)/PO-01 (0.01 nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm);

器件 W2 (有界面激基复合物结构):

ITO/HAT-CN (10 nm)/NPB (40 nm)/TCTA (10 nm)/FIrpic (1 nm)/PO-01 (0.01

nm)/TPBi (10 nm)/Bphen (40 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm)。

在上述器件中, 我们将黄色超薄层的厚度设置为 0.01 nm。一方面, 保证总磷光层的最大厚度在 1 nm 左右, 以保证供体/受体界面分子相互作用不受影响, 另一方面这也是大量实验优化后的厚度比, 以此来保证蓝光和黄光的平衡性。如图 6 和表 1 所示, 器件 W1 和 W2 的最大电流密度分别为 313.1 mA/cm^2 、308.9 mA/cm^2 , 其最大功率效率分别为 5.4 lm/W 、51.0 lm/W 。虽然器件 W1 的注入载流子数量大于器件 W2, 但是激基复合物结构将功率效率增加了大约 10 倍, 使得最大亮度从器件 W1 的 3 550 cd/m^2 提高到器件 W2 的 23 790 cd/m^2 。器件 W2 的 CE 和 EQE 分别达到了 44.7 cd/A 、16.1%, 器件 W2 的色坐标 (x, y) 在 3~7 V 范围内的变化值为 (0.02, 0.00), 满足了一定的应用要求。图 7 是器件 W1 和 W2 在 7 V 电压下的电致发光光谱。器件 W1 的蓝光峰值波长在 450 nm (NPB 的本征光谱), 这是由于 NPB 的低三重态能级, 使得 W1 器件中 FIrpic 的激子能量流失到主体 NPB 和 PO-01

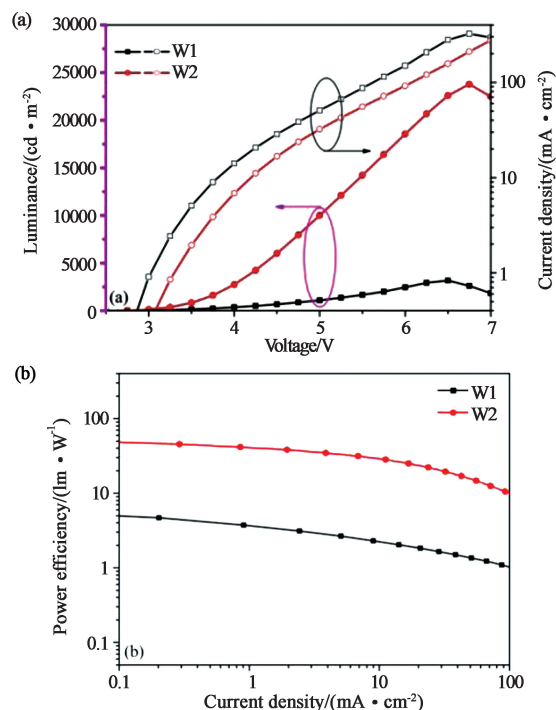


图 6 (a) 器件 W1 和 W2 的亮度-电压-电流密度曲线; (b) 器件 W1 和 W2 的功率效率-电流密度曲线。

Fig.6 (a) J - V - L characteristics of devices W1 and W2; (b) η_{PE} - J characteristics of devices W1 and W2.

中,从而导致在蓝光部分呈现出 NPB 的发射光谱。而器件 W2 的蓝光峰值波长在 476 nm 处,表明激基复合物产生的激子有效地传递至磷光材料 FIrpic。

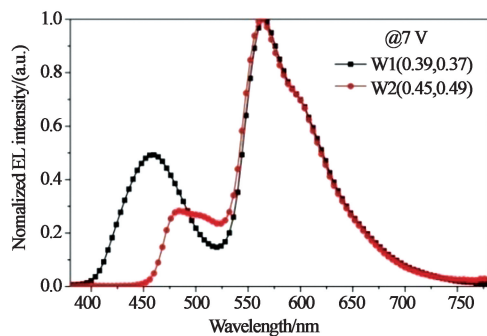


图7 器件 W1 和 W2 在 7 V 电压下的电致发光光谱

Fig.7 EL spectra of devices W1 and W2 at the voltage of 7 V

4 结 论

本文主要讨论了有、无激基复合物对 OLED 器件的性能影响。结果表明,无论是单色器件,还是双色器件,TCTA 和 TPBi 形成的激基复合物对器件的效率和亮度有着很大的提升作用。器件性能的提高归因于激基复合物结构中产生的单重态和三重态激子能够通过 Förster 和 Dexter 能量转移方式高效传递至超薄磷光层。将双超薄层引入到界面激基复合物结构中,不仅能有效地简化器件结构,而且降低了能量损耗,提高了器件性能。实验得到了最优的白光器件 W2,其最大 PE、CE、EQE 和亮度分别为 51.0 lm/W、44.7 cd/A、16.1% 和 23 790 cd/m²,这为制备高性能白光 OLED 器件提供了一条可行思路。

参 考 文 献:

- [1] WU X X, LI F S, WU W, *et al.* Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT: PSS conductive film formed by spray-coating [J]. *Vacuum*, 2014, 101: 53-56.
- [2] CHIME A C, FISCHER A P A, BENSMIDA S, *et al.* Analysis of optical and electrical responses of μ -OLED with metallized ITO coplanar waveguide electrodes submitted to nanosecond electrical pulses [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(5): 2282-2289.
- [3] CHOI J H, LEE M, KANG K, *et al.* Adaptive color saturation control for low power RGBW OLED displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(8): 784-790.
- [4] 关晓琳, 孟丽, 贾天明, 等. 液晶性直线型共轭芳炔衍生物的合成及电致发光性质[J]. *应用化学*, 2018, 35(4): 426-435.
GUAN X L, MENG L, JIA T M, *et al.* Synthesis and electroluminescent properties of a liquid crystalline linear conjugated arylacetylene derivative[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(4): 426-435.
- [5] 刘伟强, 崔荣朕, 武瑞霞, 等. 蓝色延迟荧光材料及器件的研究进展[J]. *应用化学*, 2019, 36(1): 1-9.
LIU W Q, CUI R Z, WU R X, *et al.* Recent progress on blue delayed fluorescent materials and devices[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2019, 36(1): 1-9. (in Chinese)
- [6] HU B, YAN L, SHAO M. Magnetic-field effects in organic semiconducting materials and devices [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(14/15): 1500-1516.
- [7] 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.
- [8] WANG Q, HO C L, ZHAO Y B, *et al.* Reduced efficiency roll-off in highly efficient and color-stable hybrid WOLEDs: the influence of triplet transfer and charge-transport behavior on enhancing device performance [J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(2): 238-246.
- [9] HIGUCHI T, NAKANOTANI H, ADACHI C. High-efficiency white organic light-emitting diodes based on a blue thermally activated delayed fluorescent emitter combined with green and red fluorescent emitters [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(12): 2019-2023.
- [10] LIN B Y, EASLEY C J, CHEN C H, *et al.* Exciplex-sensitized triplet-triplet annihilation in heterojunction organic thin-film [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(12): 10963-10970.

- [11] FENG D X, DONG D, LIAN L, *et al.* High efficiency non-doped white organic light-emitting diodes based on blue exciplex emission [J]. *Organic Electronics*, 2018, 56: 216-220.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] SHIN H, LEE S H, KIM K H, *et al.* Blue phosphorescent organic light-emitting diodes using an exciplex forming co-host with the external quantum efficiency of theoretical limit [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(27): 475-4734.
- [15] KALINOWSKI J, COCCHI M, VIRGILI D, *et al.* Mixing of excimer and exciplex emission: a new way to improve white light emitting organic electrophosphorescent diodes [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 4000-4005.
- [16] XU T, ZHANG Y X, HUANG C C, *et al.* Highly simplified blue phosphorescent organic light-emitting diodes incorporating exciplex-forming co-host assisting energy transfer [J]. *Journal of Luminescence*, 2019, 206: 554-559.
- [17] 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.
- [18] CHEN Z, LIU X K, ZHENG C J, *et al.* High performance exciplex-based fluorescence-phosphorescence white organic light-emitting device with highly simplified structure [J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(15): 5206-5211.
- [19] LUO D X, LI X L, ZHAO Y, *et al.* High-performance blue molecular emitter-free and doping-free hybrid white organic light-emitting diodes: an alternative concept to manipulate charges and excitons based on exciplex and electrophosphorescence emission [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1566-1575.
- [20] 倪婷, 丁磊, 王江南, 等. 基于激基复合物主体的高性能 OLED 器件[J]. 液晶与显示, 2019, 34(9): 841-848.
- NI T, DING L, WANG J N, *et al.* OLED with high performance based on exciplex [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(9): 841-848. (in Chinese)
- [21] LIN H W, LIN W C, CHANG J H, *et al.* Solution-processed hexaazatriphenylene hexacarbonitrile as a universal hole-injection layer for organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(4): 1204-1210.
- [22] 吴有智, 郑新友, 朱文清, 等. 以 Liq 作为电子注入层的高效有机电致发光器件[J]. 发光学报, 2003, 24(5): 473-476.
- WU Y Z, ZHENG X Y, ZHU W Q, *et al.* Efficiency improvement of organic electroluminescent devices by using Liq as an electron injection layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2003, 24(5): 473-476. (in Chinese)
- [23] MU X, WU X M, HUA Y L, *et al.* Low driving voltage in an organic light-emitting diode using MoO₃/NPB multiple quantum well structure in a hole transport layer [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(2): 027805.
- [24] KANG J W, LEE S H, PARK H D, *et al.* Low roll-off of efficiency at high current density in phosphorescent organic light emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(22): 223508.
- [25] JIANG Z L, TIAN W, KOU Z Q, *et al.* The influence of the mixed host emitting layer based on the TCTA and TPBi in blue phosphorescent OLED [J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 49-52.
- [26] KUE K W, SHENG R, DUAN Y, *et al.* Efficient non-doped monochrome and white phosphorescent organic light-emitting diodes based on ultrathin emissive layers [J]. *Organic Electronics*, 2015, 26: 451-457.
- [27] XU T, YANG M J, LIU J, *et al.* Wide color-range tunable and low roll-off fluorescent organic light emitting devices based on double undoped ultrathin emitters [J]. *Organic Electronics*, 2016, 37: 93-99.
- [28] WU M J, WANG Z J, LIU Y F, *et al.* Non-doped phosphorescent organic light-emitting devices with an exciplex forming planar structure for efficiency enhancement [J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 164: 119-125.
- [29] KALINOWSKI J, GIRO G, COCCHI M, *et al.* Unusual disparity in electroluminescence and photoluminescence spectra of vacuum-evaporated films of 1,1-bis ((di-4-tolylamino)phenyl) cyclohexane [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(17): 2352-2354.

- [30] YOON K S, LEE J Y. Narrow bandgap host material for high quantum efficiency yellow phosphorescent organic light-emitting diodes doped with iridium(Ⅲ) bis(4-phenylthieno[3,2-c]pyridine)acetylacetonate [J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 161: 271-274.
- [31] QI Y G, WANG Z J, HOU S H, *et al.* Color stable and highly efficient hybrid white organic light-emitting devices using heavily doped thermally activated delayed fluorescence and ultrathin non-doped phosphorescence layers [J]. *Organic Electronics*, 2017, 43: 112-120.
- [32] LIU B Q, NIE H, ZHOU X B, *et al.* Manipulation of charge and exciton distribution based on blue aggregation-induced emission fluorophors: a novel concept to achieve high-performance hybrid white organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(5): 776-783.
- [33] KIM B S, LEE J Y. Engineering of mixed host for high external quantum efficiency above 25% in green thermally activated delayed fluorescence device [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(25): 3970-3977.
- [34] LIU B Q, TAO H, WANG L, *et al.* High-performance doping-free hybrid white organic light-emitting diodes: the exploitation of ultrathin emitting nanolayers (< 1 nm) [J]. *Nano Energy*, 2016, 26: 26-36.

作者简介:



袁青松(1992—),男,江苏宿迁人,硕士,2020年于上海理工大学获得硕士学位,主要研究方向为有机电致发光器件。E-mail: 358201651@qq.com