

通过调控载流子复合和激子能量传递实现非掺杂WOLED的低效率滚降

王彦博*, 朱鑫宇

上海理工大学, 理学院, 上海

收稿日期: 2023年3月23日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

摘要

基于磷光的白色有机发光二极管(WOLED)具有高效率和环境友好等优点, 但仍然面临着制作过程复杂、高亮度下效率衰减的严峻挑战。在本文中, 基于多个蓝色界面激基复合物并在其插入薄磷光层, 制备了具有低效率滚降和无掺杂层的高效磷光体WOLED。我们提出的器件采用策略性激子管理, 通过界面激基复合物对三重态能量进行限制。抑制了高亮度下激子浓度增加所引起的三重态-三重态湮灭(TTA)。同时采用PO-T2T/TPBi异质结有效地减少载流子捕获, 有效地降低了载流子俘获所引起的三重态-极化子湮灭(TPA)。所得到的无掺杂的磷光WOLED的最大电流效率(CE)和功率效率(PE)为47.9 cd/A和50.1 lm/W, 且3000 cd/m²亮度下的电流效率仍为40.0 cd/A, 在无掺杂WOLED中达到了极低的效率滚降。我们的方法为克服无掺杂磷光体WOLED中三重态激子浓度猝灭和载流子俘获所引起的效率衰减提供了一条有效的途径。

关键词

无掺杂, 载流子俘获, 异质结, 低效率滚降, WOLED

Realizing Low Efficiency Roll-Off Doping-Free WOLED by Manipulating Charge Carrier Recombination and Excitons Energy Transfer

Yanbo Wang*, Xinyu Zhu

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 23rd, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 王彦博, 朱鑫宇. 通过调控载流子复合和激子能量传递实现非掺杂 WOLED 的低效率滚降[J]. 应用物理, 2023, 13(4): 118-125. DOI: 10.12677/app.2023.134014

Abstract

White organic light-emitting diode (WOLED) based on phosphor has the advantages of high efficiency and environmental friendliness, but it still faces severe challenges such as complex production process and efficiency roll-off at high luminance. In this paper, a high efficiency phosphor WOLED with efficiency low roll-off and non-doped layer was fabricated based on multiple blue interfacial exciplexes and inserting thin phosphor layers into them. The proposed device adopts strategic exciton management, and the triplet energy is limited by the interfacial exciplex. The triplet-triplet annihilation (TTA) caused by the increase of exciton concentration at high luminance is suppressed at the same time, PO-T2T/TPBi heterojunction is used to effectively reduce charge carrier capture and effectively reduces triplet-polaron annihilation (TPA) caused by carrier trapping. The maximum current efficiency (CE) and power efficiency (PE) of the obtained non-doped phosphor WOLED are 47.9 cd/A and 50.1 lm/W, and the current efficiency at 3000 cd/m² luminance is still 40.0 cd/A, which achieves extremely low efficiency roll-off in non-doped WOLED. Our method provides an effective way to overcome the efficiency roll-off caused by triplet exciton concentration quenching and charge carrier trapping in non-doped phosphor WOLED.

Keywords

Non-Doped, Carrier Trapping, Heterojunction, Low Efficiency Roll-Off, WOLED

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

白色有机发光二极管(WOLED)由于其独特的性能, 在近近年来备受关注并取得了重大的进展[1] [2] [3] [4] [5]。特别是具有反系间窜越特性的激基复合物与磷光材料混合的 WOLED 器件结构, 理论上可以达 100%的内量子效率(IQE) [6] [7] [8]。这是由于在激基复合物处利用单重态激子进行荧光发射, 在磷光材料处利用三重态激子进行磷光发射。从而减少了磷光材料通过系间窜越(ISC)产生的三重态激子聚集, 拓宽了激子复合区, 实现了高效率的混合 WOLED 器件[9] [10] [11] [12]。但是磷光材料的低单/三重态能级使激子大量聚集在磷光处, 仅少部分用于激基复合物发光, 由于了三重态 - 三重态湮灭(TTA), 仍会导致高电压或高亮度下浓度猝灭产生的低效率问题[13]。此外器件的载流子捕获形成的三重态 - 极化子湮灭和单重态 - 极化子湮灭也是造成效率滚降的重要原因。因此减少磷光材料在高电压下的效率滚降具有重要意义[12]。

为了解决高亮度下的激子浓度聚集导致的低效率问题, 研究人员对基于激基复合物的磷光 WOLED 器件进行了研究。目前主要分为两种方法: 一种方法是采用多掺杂结构获得较宽的激子复合区, 并减少磷光材料的载流子捕获[13] [14] [15] [16]。另一种方法是采用较厚的激基复合物使激子复合区远离磷光, 从而减少单重态激子被用于磷光[7] [17] [18] [19] [20]。这两种方法无疑都造成了较复杂的器件制备问题。例如, 2021 年, Li 等人通过激子管理并将磷光掺杂进混合主体中, 抑制了激子的浓度猝灭, 制备了最大电流效率(CE)为 47.5 cd/A 和 5000 cd/m² 的 CE 仍为 43.1 cd/A 的低效率衰减 WOLED 器件[13]。但三种掺杂材料导致了制作过程复杂。2020 年 Ying 等人采用了蓝色界面激基复合物并在其中插入磷光层, 所得

到的无掺杂 WOLED 为最大功率效率和电流效率为 91.5 lm/W 和 70 cd/A, 且 1000 cd/m² 时的功率效率为 49.5 lm/W。但随着亮度增加 4000 cd/m² 下的 PE 仅为 15 lm/W 左右[21]。尽管制造了高效率且简单的无掺杂 WOLED 器件, 但激子浓度高度聚集, 表现出严重的效率衰减。此外, 2020 年, Chen 等人还通过将超薄的红色/绿色磷光发射体插入 16 nm 蓝色激基复合物中, 并将激子复合区控制在最右侧的 9 nm 激基复合物内, 得到了最大功率效率和电流效率为 50.6 lm/W 和 66.2 cd/A 且 1000 cd/m² 下的 35.5 cd/A 的 WOLED 器件[7]。由于在 9 nm 处的激基复合物中消耗了大量激子, 获得了较好的低效率滚降器件。但 16 nm 的蓝色体激基复合物仍然无法避免制造过程复杂的缺点。

在这篇文章中, 通过空穴和电子传输材料形成了两种蓝色界面激基复合物, 并在其中依次插入蓝色/黄色磷光层。通过调节激基复合物的电子传输材料厚度, 对两侧能量进行合理的分配。此外, 提出了双电子传输材料的异质结用于抑制载流子的俘获, 制备了一系列低效率滚降的无掺杂 WOLED 器件。优化后的 WOLED 器件最大电流效率(CE)和功率效率(PE)为 47.9 cd/A 和 50.1 lm/W, 且 3000 cd/m² 亮度下的电流效率仍为 40.0 cd/A。在目前的无掺杂 WOLED 中获得了极低的效率滚降。

2. 实验简介

所有的器件在预处理过的玻璃衬底上制作。玻璃表面的材料是氧化铟锡(ITO)。在对玻璃进行洗涤、超声、烘干之后开始实验, 实验通过有机热蒸镀法将材料蒸镀在玻璃基底上。材料进行热蒸镀的沉积速率为 0.05 Å/s~2 Å/s。实验结束后对器件进行 1 h 的冷却后再开始测量数据。通过计算机控制光谱仪 PR655 分光光度计和 Keithley2400 数字电源测量并记录了 EL 光谱等光电数据。此外, 通过分光光度计和 origin 软件拟合公式计算了某一亮度下的电流效率、功率效率。

在我们的实验中, 1,1'-bis [4-(di-p-tolylamino)phenyl]cyclohexane (TAPC), 4,4',4''-tri(N-carbazolyl) triphenylamine(TCTA) 和 1,3,5-tri[(3-pyridyl)-phen-3-yl] benzene (TmPyPB) 分别作为第一空穴传输层 (HTL1)、第二空穴传输层层(HTL2)和电子传输层(ETL) [22]。Iridium(III)bis(4-phenylthieno[3,2-c]pyridinato-N,C2')acetylacetonate (PO-01)和 iridium(III) bis([(4,6-difluorophenyl)-pyridinato-N,C2']) picolinate (Flrpic) 分别作为黄色和蓝色磷光材料[13]。本研究中涉及的主要发光材料的分子结构如图 1(b)所示。

3. 结果与讨论

这里, 为了制造高效率且低效率滚降的 WOLED, 我们提出了一种新颖、简单的且全部基于界面激基复合物的无掺杂 WOLED 器件结构。如图 1(a)所示, 在我们的器件中, 发光单元由 mCP/PO-T2T, TPBi/TCTA 两个界面激基复合物组成, 并在其中插入蓝色磷光、黄色磷光发光层。一方面, 界面激基复合物有反系间窜越的作用, 这有助于把载流子复合而成的三重态的激子转变成单重态激子。另一方面, 界面激基复合物的空/电子传输层可以限制能量传递[21]。

首先, 我们通过调整发光层(EML)中 PO-T2T:TPBi 的发射层的厚度来研究能量传递路径对效率滚降的影响。器件 A 的基本结构如下: ITO (100 nm)/HAT-CN (10 nm)/TAPC (40 nm)/TCTA (5 nm)/mCP (3 nm)/Flrpic (0.3 nm)/PO-T2T:TPBi (Xnm)/PO-01 (0.1 nm)/TCTA (2 nm)/TmPyPB (40 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm)的 WOLED, 其中 X = 2, 3, 4 分别对应器件 A₁, A₂, A₃。

图 2(a)表示器件 A₁~A₃ 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线, 图 2(b)表示器件 A₁~A₃ 的电流密度 - 电压曲线。如表 1 所示, 器件 A₁、A₂、A₃ 的最大电流效率分别为 40.6 cd/A、29.2 cd/A、24.5 cd/A。在器件 A 中, 激子复合区主要被 TPBi:PO-T2T 限制在左侧。而右侧黄色磷光 PO-01 的能量主要依靠蓝色磷光对其进行的 dexter 能量传递。如图 2(c)所示, 随着 TPBi:PO-T2T 厚度的增加, 蓝光的光谱强度逐渐增加。但由于 2~3 nm 的最大 dexter 能量传输距离, 黄色磷光几乎无法获得三重态激子。器件 A₂、A₃ 的激

子利用率降低, 器件 A3 的最大效率仅为 24.5 cd/A。此外, 激子主要被限制在了蓝色磷光和 mCP/PO-T2T 处, 高三重态激子浓度导致器件发生了三重态 - 三重态湮灭(TTA)。这是器件 A2、A3 发生严重效率滚降的主要原因。因此 2 nm 的 PO-T2T:TPBi 的 A1 器件, 保证了 dexter 能量对黄色磷光的传递, 同时又保证了蓝色磷光自身发光。

界面激基复合物可以减少三重态激子, 可以进一步优化器件的效率滚降问题。在器件 A2 的基础上制作了 B1、B2。如图 1 所示, 器件的基本结构如下: ITO (100 nm)/HAT-CN (10 nm)/TAPC (40 nm)/TCTA (5 nm)/mCP (3 nm)/Flrpic (0.3 nm)/PO-T2T:TPBi (Y1:Y2 nm)/PO-01 (0.1 nm)/TCTA (2 nm)/TmPyPB (40 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm) 的 WOLED, 其中 B1、A1、B2 中 TPBi:PO-T2T 的掺杂比例分别为 Y1:Y2 = 1:3、1:1、3:1。

图 3(a)表示器件 B1、B2 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线, 图 3(b)表示器件 B1、B2 的电流密度 - 电压曲线。如表 1 所示, 器件 B1、B2 的最大电流效率分别为 38.4 cd/A、48.1 cd/A。

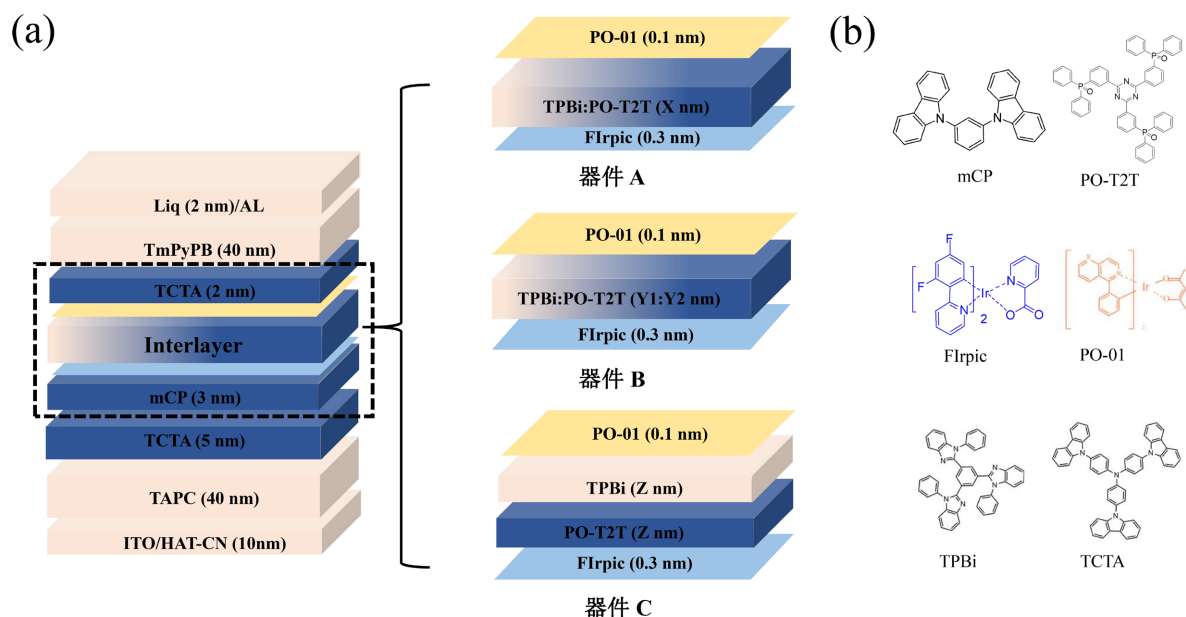


Figure 1. (a) The schematic structural diagrams of all WOLEDs used in this work; (b) molecular structure diagram of main luminescent materials involved in this study

图 1. (a) 本工作中使用的所有 WOLEDs 的结构示意图; (b) 本研究中涉及的主要发光材料的分子结构图

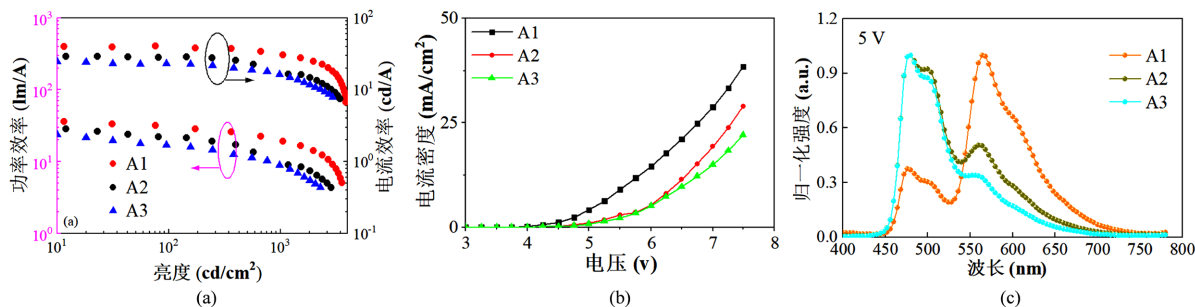


Figure 2. (a) Current efficiency-luminance-power efficiency curve of the devices A1~A3; (b) current density-voltage curve of the devices A1~A3; (c) the normalized EL spectra of devices A1~A3 at 5 V

图 2. (a) 器件 A1~A3 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线; (b) 器件 A1~A3 的电流密度 - 电压曲线; (c) 器件 A1~A3 在 5 V 下的归一化电致发光光谱

Table 1. EL characteristics of devices tested with different structures**表 1.** 不同结构测试器件的电致发光特性

器件	CIE (x, y) ^a	CD (mA/cm ²) ^b	CE _{max} (cd/A)	PE _{max} (lm/W)	CE			PE		
					(cd/A)			(lm/W)		
					$\eta_{100}/\eta_{1000}/\eta_{3000}$	$\eta_{100}/\eta_{1000}/\eta_{3000}$	η_{3000}			
A1	(0.446, 0.465)	30.42	40.6	39.3	39.8/31.2/17.7	30.8/19.7/8.8	56.4			
A2	(0.275, 0.424)	23.74	29.2	28.2	27.0/15.5/7.8	18.6/8.0/3.1	73.3			
A3	(0.231, 0.413)	18.28	24.5	23.6	21.7/13.6/6.4	14.3/6.8/2.4	73.9			
B1	(0.228, 0.435)	67.90	38.4	39.1	37.8/30.4/20.0	32.4/20.8/11.4	47.9			
B2	(0.457, 0.480)	87.19	48.1	50.3	43.6/35.0/23.6	39.8/27.4/15.8	50.9			
C1	(0.392, 0.457)	306.33	47.9	50.1	47.8/45.1/40.0	46.7/38.5/30.9	16.5			
C2	(0.270, 0.429)	244.47	44.0	45.7	44.0/40.6/35.2	42.8/33.9/26.1	20.0			
C3	(0.214, 0.424)	153.86	45.1	43.6	43.1/42.1/35.0	41.8/34.8/25.2	22.4			

^a 在 5 V 的电压下收集一个 CIE 坐标值; ^b 电流密度是在 7.25 V 的电压下收集的。

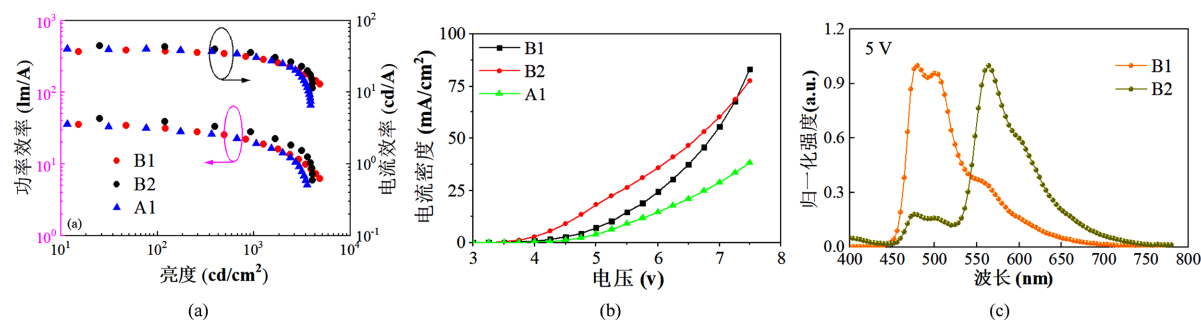


Figure 3. (a) Current efficiency-luminance-power efficiency curve of the devices B1, B2, A1; (b) current density-voltage curve of the devices B1, B2, A1; (c) the normalized EL spectra of devices B1, B2 at 5 V

图 3. (a) 器件 B1、B2、A1 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线; (b) 器件 B1、B2、A1 的电流密度 - 电压曲线; (c) 器件 B1、B2 在 5 V 下的归一化电致发光光谱

在器件 B1 中 PO-T2T 的掺杂比例多于 TPBi, 可以在 mCP/PO-T2T 界面处形成更多的界面激基复合物。能量传递原理如图 4 所示, 界面激基复合物可以将三重态激子反向系间窜越迁到单重态能级, 可以有效缓解三重态激子浓度的增加。如图 3(c)所示, 蓝光的强度增强, 表明蓝色磷光中的三重态激子猝灭减弱。在器件 B2 中, TPBi 的掺杂比例更多, 右侧的 TPBi/TCTA 处的激基复合物增加。对黄色磷光中的三重态激子的浓度改善增强, 因此光谱中蓝光的强度显著降低。黄色磷光 PO-01 的三重态能级较低($T_1 = 2.20$ eV) [4], 更容易获得其他发光层的能量传递。这导致 PO-01 处的激子浓度集中较高, 因此使黄光利用率增加的 B2 器件获得了更大的效率。

除了三重态 - 三重态湮灭是导致器件效率滚降严重的原因。三重态 - 极化子湮灭(TPA)也是一个非常重要的因素。在无掺杂器件中磷光材料特别是黄色磷光材料往往因为其较低的最低能级(LUMO 能级)和较高的最高能级(HOMO 能级)导致了严重的载流子捕获, 因此我们很难避免三重态 - 极化子湮灭造成的效率滚降。

在 mCP/PO-T2T 和 TPBi/TCTA 两种蓝色界面激基复合物中, 界面激基复合物不仅存在于界面处还少量存在于两侧的传输材料内。TPBi: PO-T2T 的掺杂结构使左右两侧的能量更好的传递, 因此器件效率较高。但由于黄色磷光的 2.7 eV 的 HOMO 能级和 5.1 eV 的 LUMO 能级导致了其载流子捕获严重, 使得在

黄光磷光处存在较深的载流子陷阱。尽管器件 B2 获得了 48.1 cd/A 的最大电流效率, 但是效率滚降仍然没被大幅度降低。

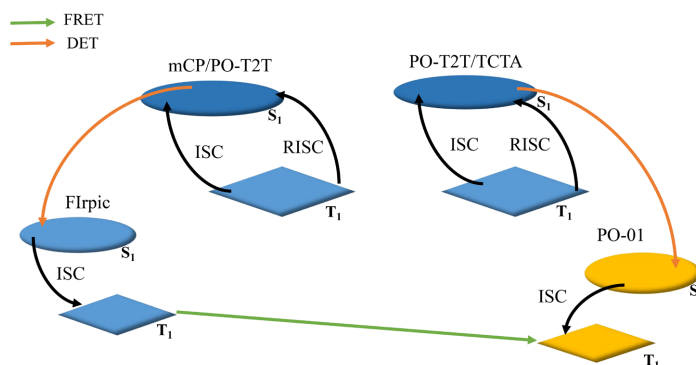


Figure 4. The energy transfer path diagram of device C1-C3; ISC and RISC represent the process of intersystem crossing and reverse intersystem crossing, respectively. FRET and DET represent Förster energy transfer processes, respectively.

图 4. 器件 C1~C3 的能量传递路径图; ISC 和 RISC 分别代表系间窜越和反向系间窜越过程。FRET 和 DET 分别代表 Förster 能量和 Dexter 能量传递过程

因此我们制作了 PO-T2T/TPBi 异质结构的器件 C, 器件结构如下: ITO (100 nm)/HAT-CN (10 nm)/TAPC (40 nm)/TCTA (5 nm)/mCP (3 nm)/Flrpic (0.3 nm)/PO-T2T (Znm)/TPBi (Znm)/PO-01 (0.1 nm)/TCTA (2 nm)/TmPyPB (40 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm), 其中 Z = 1、1.5、2 分别对应 C1、C2、C3。

图 5(a) 表示器件 C1~C3 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线, 图 5(b) 表示器件 C1~C3 的电流密度 - 电压曲线。如表 1 所示, 器件 B1、B2、B3 的最大电流效率和最大功率效率分别为 47.9 cd/A、38.4 cd/A、45.1 cd/A 和 50.1 lm/W、45.7 lm/W、43.6 lm/W。与器件 B2 的电流密度相比, 器件 C1~C3 的电流密度有着明显提升, 表明载流子捕获减少。如图 6 所示, 拥有 6.68 eV HOMO 能级的 PO-T2T 和 6.1 eV HOMO 能级的 TPBi 将空穴严格的限制在左侧。双势垒结构使黄色磷光无法捕获空穴。此外, 具备与 PO-01 相同的 2.7 eV HOMO 能级的 TPBi, 消除了电子陷阱, 使 PO-01 无法进行电子捕获。器件 C1 在 3000 cd/m² 的亮度下电流效率仍为 40.0 cd/A, 在无掺杂结构中具有极低的效率滚降。但随着异质结厚度增加, 左侧蓝色磷光和右侧黄色磷光逐渐被分离, 器件 C2、C3 的效率逐渐降低。这是因为势垒增厚有助于减少黄光的载流子捕获, 但势垒也影响了两侧磷光的能量传递。如图 5(c) 所示。黄光的强度减少, 导致器件中激子仅被蓝色磷光利用, 能量利用率降低。

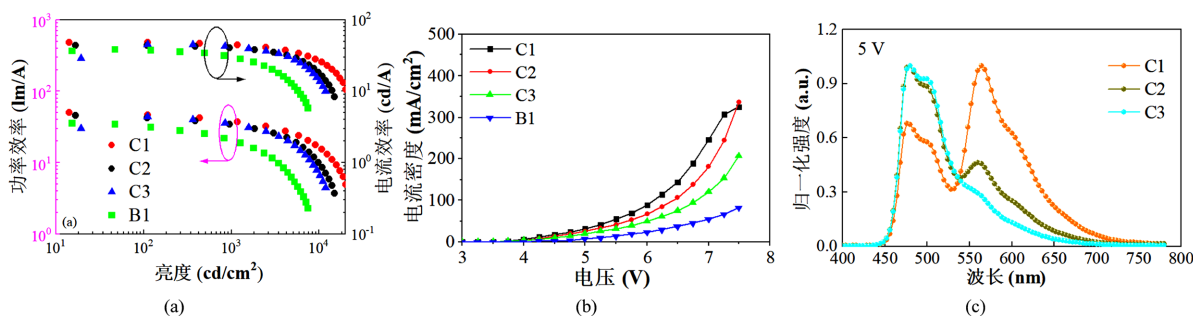


Figure 5. (a) Current efficiency-luminance-power efficiency curve of the devices C1~C3, B1; (b) current density-voltage curve of the devices C1~C3, B1; (c) The normalized EL spectra of devices C1~C3 at 5 V

图 5. (a) 器件 C1~C3、B1 的电流效率 - 亮度 - 功率效率曲线; (b) 器件 C1~C3、B1 的电流密度 - 电压曲线; (c) 器件 C1~C3 在 5 V 下的归一化电致发光光谱

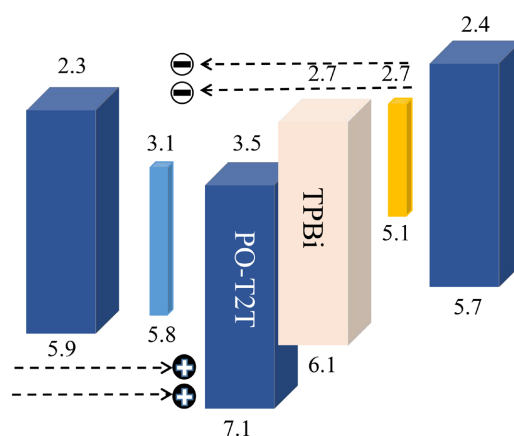


Figure 6. The carrier transport path diagram of device C1~C3
图 6. 器件 C1~C3 的载流子传输路径示意图

4. 结论

我们成功地通过制备基于全界面激基复合物的磷光 WOLED 器件, 实现了高效率且低效率滚降的无掺杂器件。界面激基复合物拥有着更好的能量和载流子的限制作用。在我们提出的器件结构中进行战略性激子管理后, 激子利用率得到了提升, 效率获得显著提升并且得到了较低的效率滚降。此外还对载流子捕获问题进行了研究, 利用双电子传输层结构作为磷光之间的异质结。结果表明, 通过界面激基复合物的反系间窜越的作用可以有效减少三重态激子引起的浓度猝灭问题。异质结结构也有助于减少复合区之外的磷光层的载流子捕获。我们的结果为制备低成本、制作简单的低效率滚降的 WOLED 照明设备提供了一种很有前景的方法。

参考文献

- [1] Yao, J.W., Ying, S.A., Qiao, X.F., *et al.* (2019) High Efficiency and Low Roll-Off All Fluorescence White Organic Light-Emitting Diodes by the Formation of Interface Exciplex. *Organic Electronics*, **67**, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.01.011>
- [2] Liu, D., Zhu, W.Q., Huang, L., *et al.* (2021) Multiple Emission Mechanism Based Four-Peak Tuning Strategy to Achieve Ultra-High Color Rendering Index and Chromatic-Stable White Organic Light Emitting Diodes. *Optical Materials*, **113**, Article ID: 110587. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110587>
- [3] Chen, T.Q., Li, J., Cao, J. and Yang, J. (2021) Spectrum-Stable Tetra-Chromatic White Organic Light-Emitting Diodes with Red Emitter outside the Exciton Recombination Zone. *Optical Materials*, **117**, Article ID: 111150. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111150>
- [4] Wang, L.J., Kou, Z.Q., Wang, B.Q., *et al.* (2021) Realizing High Efficiency/CRI/Color Stability in the Hybrid White Organic Light Emitting Diode by Manipulating Exciton Energy Transfer. *Optical Materials*, **115**, Article ID: 111059. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111059>
- [5] Cho, E., Hong, M., Yang, Y.S., *et al.* (2022) Energy Transfer Processes in Hyperfluorescent Organic Light-Emitting Diodes. *Journal of Materials Chemistry C*, **10**, 4629-4636. <https://doi.org/10.1039/D1TC05090G>
- [6] Schwartz, G., Pfeiffer, M., Reineke, S., *et al.* (2007) Harvesting Triplet Excitons from Fluorescent Blue Emitters in White Organic Light-Emitting Diodes. *Advanced Materials*, **19**, 3672-3676. <https://doi.org/10.1002/adma.200700641>
- [7] Chen, Y., Wu, Y., Lin, C., *et al.* (2020) Simultaneous High Efficiency/CRI/Spectral Stability and Low Efficiency Roll-Off Hybrid White Organic Light-Emitting Diodes via Simple Insertion of Ultrathin Red/Green Phosphorescent Emitters in a Blue Exciplex. *Journal of Materials Chemistry C*, **8**, 12450-12456. <https://doi.org/10.1039/D0TC03053H>
- [8] Chen, Y., Sun, Q., Dai, Y., *et al.* (2019) EL Properties and Exciton Dynamics of High-Performance Doping -Free Hybrid WOLEDs Based on 4P-NPD/Bepp2 Heterojunction as Blue Emitter. *Advanced Optical Materials*, **7**, Article ID: 1900703. <https://doi.org/10.1002/adom.201900703>

- [9] Miao, Y., Wang, K., Zhao, B., *et al.* (2018) High-Efficiency/CRI/Color Stability Warm White Organic Light-Emitting Diodes by Incorporating Ultrathin Phosphorescence Layers in a Blue Fluorescence Layer. *Nanophotonics*, **7**, 295-304. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0021>
- [10] Ying, S., Yuan, J., Zhang, S., *et al.* (2019) High Efficiency Warm White Organic Light-Emitting Diodes with Precise Confinement of Charge Carriers and Excitons in the Exciplex Host System. *Journal of Materials Chemistry C*, **7**, 7114-7120. <https://doi.org/10.1039/C9TC01892A>
- [11] Zhang, S., Yao, J., Dai, Y., *et al.* (2020) High Efficiency and Color Quality Undoped Phosphorescent White Organic Light-Emitting Diodes Based on Simple Ultrathin Structure in Exciplex. *Organic Electronics*, **85**, Article ID: 105821. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105821>
- [12] Ying, S., Sun, Q., Dai, Y., *et al.* (2019) Precise Regulation of the Emissive Layer for Ultra-High Performance White Organic Light-Emitting Diodes in an Exciplex Forming Co-Host System. *Materials Chemistry Frontiers*, **3**, 640-649. <https://doi.org/10.1039/C9QM00017H>
- [13] Li, A., Sun, M.Y., Yang, L.P., *et al.* (2021) Improved Efficiency, Stable Spectra and Low Efficiency Roll-Off Achieved Simultaneously in White Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes by Strategic Exciton Management. *Organic Electronics*, **97**, Article ID: 106262. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106262>
- [14] Wang, Z., Liu, Z., Zhang, H., *et al.* (2018) Highly Efficient and Spectra Stable Warm White Organic Light-Emitting Diodes by the Application of Exciplex as the Excitons Adjustment Layer. *Organic Electronics*, **62**, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.07.030>
- [15] Miao, Y., Wang, K., Gao, L., *et al.* (2018) Precise Manipulation of the Carrier Recombination Zone: A Universal Novel Device Structure for Highly Efficient Monochrome and White Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes with Extremely Small Efficiency Roll-Off. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 8122-8134. <https://doi.org/10.1039/C8TC02479K>
- [16] Zhang, T., Yao, J., Zhang, S., *et al.* (2021) Highly Efficient and Low Efficiency Roll-Off Organic Light-Emitting Diodes with Double-Exciplex Forming Co-Hosts. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 6062-6067. <https://doi.org/10.1039/D0TC05842D>
- [17] Li, M., Tao, Z., Peng, Y., *et al.* (2022) Facile Fabrication of Multi-Color Electroluminescent Devices by Tricomponent Exciplex Regulation. *Organic Electronics*, **101**, Article ID: 106421. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106421>
- [18] Ye, J., Zheng, C.J., Ou, X.M., *et al.* (2012) Management of Singlet and Triplet Excitons in a Single Emission Layer: A Simple Approach for a High-Efficiency Fluorescence/Phosphorescence Hybrid White Organic Light -Emitting Device. *Advanced Materials*, **24**, 3410-3414. <https://doi.org/10.1002/adma.201201124>
- [19] Sun, N., Wang, Q., Zhao, Y., *et al.* (2014) High-Performance Hybrid White Organic Light-Emitting Devices without Interlayer between Fluorescent and Phosphorescent Emissive Regions. *Advanced Materials*, **26**, 1617-1621. <https://doi.org/10.1002/adma.201304779>
- [20] Ying, S., Yang, D., Qiao, X., *et al.* (2018) Improvement of Efficiency and Its Roll-Off at High Brightness in White Organic Light-Emitting Diodes by Strategically Managing Triplet Excitons in the Emission Layer. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 10793-10803. <https://doi.org/10.1039/C8TC03823F>
- [21] Ying, S., Chen, Y., Yao, J., *et al.* (2020) High Efficiency Doping-Free Warm-White Organic Light-Emitting Diodes with Strategic-Tuning of Radiative Excitons by Combining Interfacial Exciplex with Multi-Ultrathin Emissive Layers. *Organic Electronics*, **85**, Article ID: 105876. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105876>
- [22] Zhang, J.M., Liu, S.H., Chen, Y.F., *et al.* (2021) Simple-Structure Color-Tunable Fluorescent Organic Light-Emitting Devices with Chromaticity Difference beyond Five-Step McAdam Ellipses. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **54**, Article ID: 505103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2642>