

文章编号: 1000-7032(2025)12-2344-09

基于聚集诱导发光材料为蓝光发射的磷光超薄层结构 荧光/磷光混合型白光有机发光二极管

宗 潇¹, 潘侃佳¹, 代岩峰^{2*}, 马东阁²

(1. 广东科技学院 机电工程学院, 广东 东莞 523083;

2. 华南理工大学 高分子光电材料与器件研究所, 发光材料与器件全国重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 研究了荧光/磷光混合型白光有机发光二极管(White organic light-emitting diodes, WOLEDs)的器件结构及其对激子利用率的影响,并且进一步分析了其内在机制。在所制备的 WOLEDs 中,其发光层是由一种在薄膜状态下具有高荧光量子效率的聚集诱导发光(Aggregation-induced emission, AIE)材料 TPB-PAC 和在 TPB-PAC 层中引入的黄色磷光 Ir(tppy)₂(acac)超薄层组成。研究发现,插入的磷光超薄层位置对器件性能具有很大的影响。最后,通过对磷光超薄层的优化,制备出高效率、低滚降双色荧光/磷光混合型 WOLEDs,其最大外量子效率、功率效率和电流效率分别达到了 25.31%、85.80 lm·W⁻¹ 和 81.34 cd·A⁻¹,在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的外量子效率为 23.19%,色度坐标(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)为 (0.43, 0.43),表现为标准的暖白光发射。

关 键 词: 有机发光二极管; 白光; 聚集诱导发光; 超薄层结构

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250228

CSTR: 32170.14.CJL.20250228

A Fluorescent/Phosphorescent Hybrid White Organic Light-emitting Diode (OLED) Using A Phosphorescent Ultra-thin Layer Structure with An Aggregation-induced Emission (AIE) Material as Blue Emitter

ZONG Xiao¹, PAN Kanjia¹, DAI Yanfeng^{2*}, MA Dongge²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523083, China;

2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, Institute of Polymer Photoelectric Materials and Devices,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding Author, E-mail: msyfdai@scut.edu.cn

Abstract: This paper mainly investigates the device structure of fluorescent/phosphorescent hybrid WOLEDs and their impact on exciton utilization, and further analyzes its underlying mechanism. In the fabricated WOLEDs, the emissive layer is composed of an aggregation-induced emission (AIE) material TPB-PAC exhibiting high fluorescent quantum efficiency in film and an ultrathin yellow phosphorescent layer of Ir(tppy)₂(acac) incorporated into the TPB-PAC layer. It is experimentally found that the position of the inserted phosphorescent ultra-thin layer significantly influences the device performances. Through optimizing the ultra-thin layer, the high-efficiency, low-roll-off two-color fluorescent/phosphorescent hybrid WOLEDs with a maximum external quantum efficiency (EQE) of 25.31%, a power efficiency of 85.80 lm·W⁻¹, and a current efficiency of 81.34 cd·A⁻¹ are achieved. At the luminance of 1 000 cd·m⁻², the EQE keeps 23.19% with CIE coordinates (0.43, 0.43), exhibiting standard warm white light emission.

Key words: organic light-emitting diode; white light; aggregation-induced emission; ultra-thin layer structure

收稿日期: 2025-10-22; 修订日期: 2025-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(21788102)

Supported by National Natural Science Foundation of China(21788102)

1 引 言

自 1994 年 Kido 等^[1]报道了首个白光有机发光二极管 (White organic light-emitting diodes, WOLEDs) 以来, 在随后的三十年, WOLEDs 得到了广泛研究与发展, 其功率效率甚至超过了 $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1[2-5]}$, 电流效率 (Current efficiency, CE)、外量子效率 (External quantum efficiency, EQE)、色度坐标 (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) 以及显色指数 (Color render index, CRI) 都相继得到了改善^[6-8]。然而, 为了满足市场需求, 仍需要进一步提高 WOLEDs 的效率和寿命, 并改善其在高亮度下的效率滚降。目前, 从发光材料种类来分, WOLEDs 有全荧光型、热活化延迟荧光 (Thermally-activated delayed fluorescence, TADF) 型、全磷光型和荧光/磷光混合型^[9-14]。全荧光型 WOLEDs 有较长的工作寿命, 但由于荧光材料只有 25% 的单线态激子发射, 因而其器件的效率较低; 虽然 TADF 型可以实现 100% 的激子发射, 但目前仍面临稳定性和高亮度下效率滚降问题; 全磷光型 WOLEDs 由于其 25% 的单线态激子和 75% 的三线态激子都可以辐射跃迁到基态, 实现 100% 的激子利用率, 因而该类器件具有较高的效率。然而, 受限于蓝光磷光材料的稳定性, 全磷光型 WOLEDs 的寿命和在高亮度下的效率滚降都需要解决。相比之下, 荧光/磷光混合型 WOLEDs 同时利用了高稳定性的蓝光荧光材料和高效率的绿、红或黄光磷光材料的优点, 使制备的 WOLEDs 在保证高稳定性的同时, 也兼具了高效率。因此, 荧光/磷光混合型 WOLEDs 成为了研究热点。其中, 荧光和磷光材料的选择尤为重要, 可以根据单线态激子和三线态激子扩散长度的不同设计器件结构, 从而获得高效率荧光/磷光混合型 WOLEDs。然而, 在荧光/磷光混合型 WOLEDs 中, 由于磷光材料产生的三线态激子寿命较长, 会导致其密度较高, 因此引起的三线态激子猝灭易造成效率滚降。并且, 荧光/磷光混合型 WOLEDs 的效率仍受限于蓝光荧光发光材料, 不但需要蓝光荧光发光材料具有高的荧光量子效率, 也需要该材料具有高的激子利用率。在这方面, 科研人员在材料和器件方面做了大量研究, 器件的效率和稳定性都得到了改善^[15-20]。近年来发展起来的具有热激子发光特性的聚集诱导发光 (Aggregation-

induced emission, AIE) 材料受到了广泛关注, 由于这类分子在聚集状态下表现出较高的发光效率, 非常适合用来制备荧光/磷光混合型 WOLEDs。可以看到, AIE 材料在薄膜状态下具有很高的荧光量子产率 (Photoluminescence quantum yield, PLQY), 一般可以达到 90% 以上。另外, AIE 材料具有高能级反系间窜越 (High-lying reverse intersystem crossing, hRISC) 过程, 这样在高能级上的三线态激子可以有效地反系间窜越到激发单线态能级, 实现理论上 100% 激子的利用。可以预期, 采用 AIE 材料作为蓝光荧光发光材料有望制备出高效率荧光/磷光混合型 WOLEDs, 近年来报道的基于 AIE 蓝光材料制备的荧光/磷光混合型 WOLEDs 的实验结果已经证明了这一点^[21-23]。

本文利用一种在薄膜状态下具有高荧光量子效率的 AIE 蓝光材料 TPB-PAC 作为发光层, 并在 TPB-PAC 中插入黄光磷光 $\text{Ir}(\text{tptpy})_2(\text{acac})$ 超薄层, 制备了高效率、低效率滚降荧光/磷光混合型双色 WOLEDs。可以看到, 由于 TPB-PAC 具有在薄膜状态下高的 PLQY 和匹配的三线态能级, 其单线态激子可以用于有效的蓝光荧光发射, 而三线态激子可以有效地传递给磷光 $\text{Ir}(\text{tptpy})_2(\text{acac})$, 使其产生高效的黄光发射。如此制备的荧光/磷光混合型 WOLEDs 显示了高效率, 其最大外量子效率 EQE、功率效率 (Power efficiency, PE) 和电流效率 CE 分别达到了 25.31%、 $85.80 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $81.34 \text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$, CIE 坐标为 (0.43, 0.43), 表现为标准的暖白光发射。该器件也显示了低的效率滚降, 在 $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 亮度下的 EQE 仍高达 23.19%。该结果为高效率、低效率滚降荧光/磷光混合型 WOLEDs 的制备及其 AIE 蓝光材料的设计合成提供了新的思路。

2 实 验

2.1 样品制备

所有的器件制备在以氧化铟锡 (Indium tin oxide, ITO) 为阳极的玻璃基板上。ITO 玻璃基板首先用专用清洗剂超声清洗 90 min, 之后用去离子水冲洗干净, 紧接着用氮气吹干。吹干后的 ITO 玻璃基板放入烘箱中 200°C 加热烘干 30 min 之后取出, 然后放入氧等离子体室进行紫外-臭氧处理, 清洁表面污物, 改善 ITO 功函数。处理后的 ITO 基板正面朝下传入真空蒸镀室, 抽真空至小于 10^{-5} Pa 真空度, 之后开始蒸镀制备器件。蒸镀

之前开启旋转装置,旋转速度一般为 20 r/min,然后依次蒸镀空穴注入层(Hole-injection layer, HIL)、空穴传输层(Hole-transporting layer, HTL)、电子阻挡层(Electron-blocking layer, EBL)、发光层(Emitting layer, EML)、电子传输层(Electron-transporting layer, ETL)、电子注入层(Electron-injection layer, EIL)以及金属阴极铝(Aluminium, Al)。有机层的蒸发速率维持在 0.05~0.2 nm/s,掺杂的发光材料需要的蒸镀速率一般为 0.001~0.004 nm/s。对于金属 Al 采用陶瓷蒸发源进行蒸镀,蒸镀速率为 0.4~0.5 nm/s。最终,得到 ITO 与 Al 交叉形成的 4 mm×4 mm 发光面积的 OLEDs 器件。

2.2 测试方法

实验过程中,主要的测试方法和使用的仪器

如下:在 OLEDs 的测试中,电流密度-亮度-电压(J - L - V)特性采用 Keithley 2400 电压表和 Keithley 2000 电流表来记录;EL 光谱采用 PR650 SpectraScan Photometer 测量。所有测试均是在大气中进行。

3 结果与讨论

首先制备了 TPB-PAC 非掺杂蓝光荧光 OLEDs,经优化的器件结构为 ITO/HAT-CN(5 nm)/TAPC(50 nm)/TCTA(5 nm)/TPB-PAC(20 nm)/TmPyPB(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm),图 1(a)、(b)分别为器件的结构和所用的分子结构。如图 1(c)所示,该器件显示了优异的电致发光(Electroluminescence, EL)性能,其最大 EQE 达到了 7.86%,

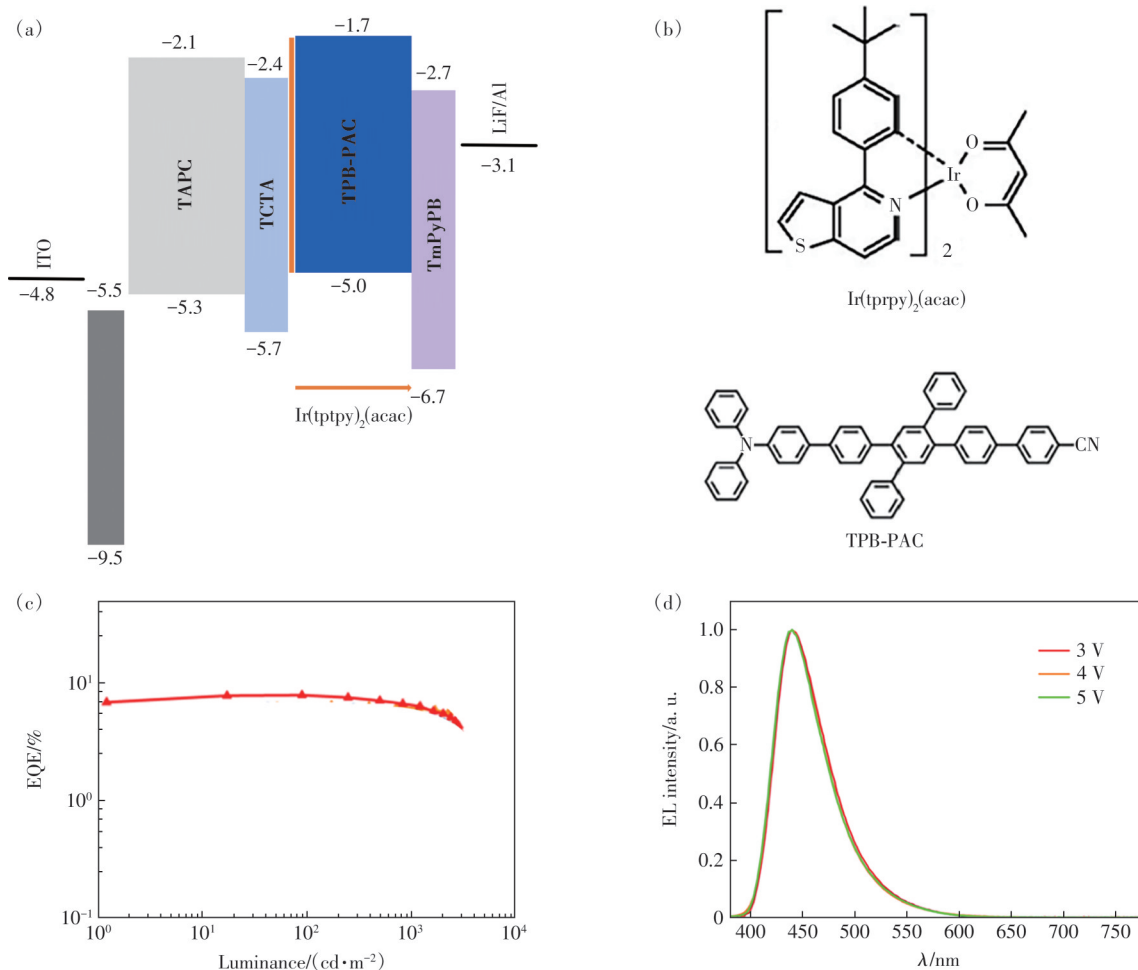


图 1 (a)TPB-PAC 蓝光荧光 OLEDs 器件结构示意图以及插入 Ir(tppy)₂(acac) 磷光超薄层确定激子复合区的情况,其中橙色线代表插入的 Ir(tppy)₂(acac) 超薄层;(b)Ir(tppy)₂(acac) 和 TPB-PAC 的分子结构式;(c)蓝光器件的 EQE-亮度特性;(d)蓝光器件在不同电压下的 EL 光谱

Fig.1 (a) Schematic diagram of TPB-PAC blue fluorescent OLED device structure and the case of determination of exciton recombination by inserting Ir(tppy)₂(acac) phosphorescent layer. The orange line indicates the incorporated Ir(tppy)₂(acac) ultra-thin layer. (b) Molecular structures of Ir(tppy)₂(acac) and TPB-PAC. (c) EQE-luminance characteristic of the blue device. (d) EL spectra of the blue device at different voltages

在 1 000 cd·m⁻²亮度下仍保持 6.64%, 表现了低的效率滚降。该器件也发射了很好的蓝光, 其色度坐标 CIE 为(0.15,0.09)(图 1(d))。为了更好地制备荧光/磷光混合型 WOLEDs, 我们对所制备的蓝光器件在发光层中的激子复合区进行了实验确定, 通常的方法是插入磷光超薄层。我们插入厚度为 0.16 nm 的 Ir(tp₂py)₂(acac) 黄色磷光超薄层, 通过改变磷光层的位置测量黄光磷光发射强度和蓝光发射强度, 用它们的比值可以确定激子分布, 从而确定激子复合区。这里定义电子阻挡层与发光层之间的界面为 0 点, 电子传输层与发光层之间的界面为终点(20 nm 处), 制备的器件结构为: ITO/HAT-CN(5 nm)/TAPC(50 nm)/TCTA(5 nm)/TPB-PAC(*X* nm)/Ir(tp₂py)₂(acac)(0.16 nm)/TPB-PAC(20~*X* nm)/TmPyPB(40 nm)/LiF(1 nm)/Al。其中, *X* 依次为 0 nm、2 nm、5 nm、8 nm、11 nm、14 nm、17 nm 和 20 nm, 对应的器件分别定义为 B4D0、B4D2、B4D5、B4D8、B4D11、B4D14、B4D17 和 B4D20, 其结构如图 1(a)所示。

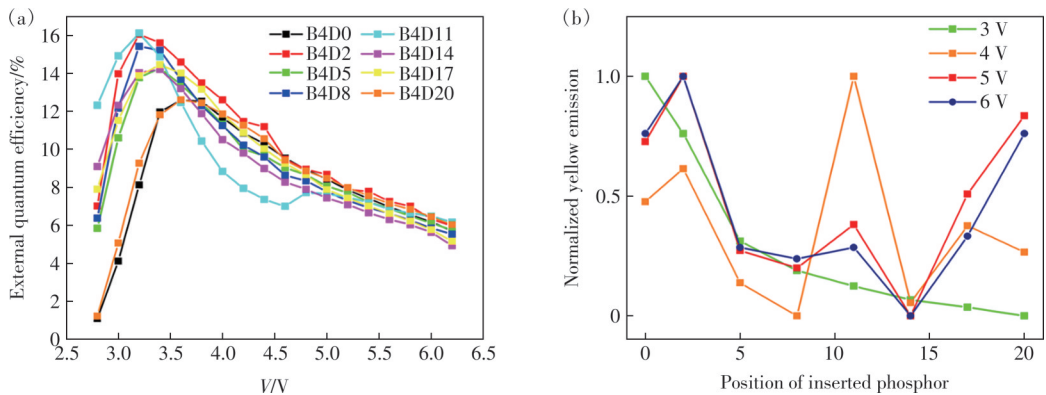


图 2 (a)在 AIE 蓝光发光层中不同位置插入 Ir(tp₂py)₂(acac)超薄层制备的 OLEDs 的 EQE-电压特性;(b)不同电压下的激子分布

Fig.2 (a) EQE-V characteristics of the fabricated OLEDs with Ir(tp₂py)₂(acac) ultra-thin layer inserted at various positions in the AIE blue EML. (b) Exciton distribution profiles under different voltages

表 1 在 AIE 蓝光发光层中不同位置插入 Ir(tp₂py)₂(acac)超薄层制备的 OLEDs 的 EL 性能总结

Tab. 1 Summary of the EL performances of the fabricated OLEDs with Ir(tp₂py)₂(acac) ultra-thin layer inserted at various positions in the AIE blue EML

Device	<i>V</i> _{on} /V	EQE _{max} /%	EQE ₁₀₀₀ /%	<i>L</i> _{max} /(cd·m ⁻²)	CIE(5 V)
B4D0	2.8	12.61	12.55	12 310	(0.30,0.27)
B4D2	2.8	16.07	13.51	13 311	(0.32,0.29)
B4D5	2.8	14.28	12.01	9 994	(0.27,0.23)
B4D8	2.8	15.44	12.10	9 764	(0.27,0.22)
B4D11	2.8	16.13	10.45	10 703	(0.28,0.24)
B4D14	2.8	14.22	11.89	9 189	(0.25,0.20)
B4D17	2.8	14.46	13.18	11 966	(0.29,0.26)
B4D20	2.8	12.62	12.46	17 017	(0.31,0.28)

从图 2(a)和表 1 可以看到,虽然在 2 nm、8 nm 和 11 nm 位置插入黄光磷光超薄层的器件显示了较高的效率,但仍存在高亮度下效率滚降问题,这可能是由于超薄层无法完全利用三线态激子,造成了三线态激子在高亮度下的聚集,猝灭了激子,引起了器件在高亮度下的效率滚降。为了探究这个问题,我们研究了磷光超薄层厚度对器件性能的影响。这里我们固定磷光超薄层在 11 nm 处,并进行磷光超薄层厚度的优化,器件结构为:ITO/HAT-CN(5 nm)/TAPC(50 nm)/TCTA(5 nm)/TPB-PAC(11 nm)/Ir(tptpy)₂(acac)(*X* nm)/TPB-PAC(9 nm)/TmPyPB(40 nm)/LiF(1 nm)/Al,其中 *X*=0.08,0.16,0.24,0.32 nm,分别对应器件 W1、

W2、W3 和 W4,器件的 EL 性能和光谱如图 3 所示,表 2 是器件的 EL 性能总结。可以看到,器件 W1~W4 的启亮电压均为 2.6 V,这也意味着在这 4 个厚度下,磷光超薄层厚度并没有影响器件的电学特性,这也是超薄层的一个显著特点。相比之下,器件的效率和高亮度下的效率滚降完全不同,器件 W1 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 16.52%、40.48 lm·W⁻¹ 和 42.34 cd·A⁻¹,最大亮度为 10 974 cd·m⁻²,在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 12.56%,效率滚降为 23.9%;器件 W2 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 17.69%、47.08 lm·W⁻¹ 和 47.98 cd·A⁻¹,最大亮度为 13 143 cd m⁻²,在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 14.10%,效率滚降为

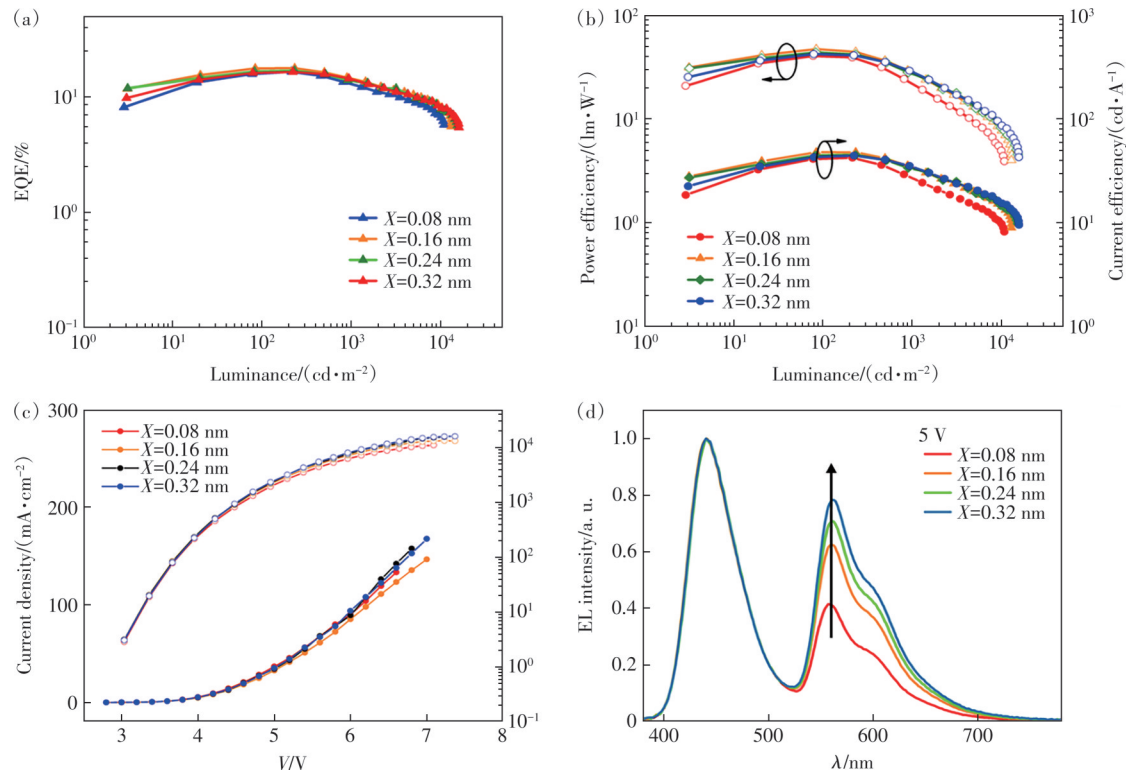


图 3 在 11 nm 处插入不同磷光超薄层厚度制备的 OLEDs 的 EL 性能。(a)EQE-亮度特性;(b)PE-CE-亮度特性;(c)电流密度-电压特性(*J*-*V*);(d)在 5 V 电压下的 EL 光谱

Fig.3 EL performances of the fabricated OLEDs with different thickness ultra-thin phosphorescent layer inserted at 11 nm. (a) EQE-luminance characteristics. (b) PE-CE-luminance characteristics. (c) Current density-voltage (*J*-*V*) characteristics. (d) EL spectra at 5 V voltage

表 2 在 11 nm 处插入不同磷光超薄层厚度制备的 OLEDs 器件 W1~W4 的 EL 性能总结

Tab. 2 Summary of the EL performances of the fabricated OLEDs W1~W4 with different phosphorescent ultra-thin layer thicknesses inserted at 11 nm

Device	<i>V</i> _{on} /V	EQE _{max} /%	EQE ₁₀₀₀ /%	PE _{max} /(lm·W ⁻¹)	CE _{max} /(cd·A ⁻¹)	<i>L</i> _{max} /(cd·m ⁻²)	Roll-off/%	CIE(5 V)
W1	2.6	16.52	12.57	40.48	42.34	10 974	23.9	(0.25,0.20)
W2	2.6	17.69	14.10	47.08	47.98	13 143	20.3	(0.29,0.25)
W3	2.6	16.78	13.80	43.75	45.17	15 552	17.8	(0.29,0.26)
W4	2.6	16.46	14.20	42.13	44.41	16 021	13.7	(0.30,0.27)

20.3%; 器件 W3 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 16.78%、43.75 lm·W⁻¹ 和 45.17 cd·A⁻¹, 最大亮度为 15 552 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 13.80%, 效率滚降为 17.8%; 器件 W4 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 16.46%、42.13 lm·W⁻¹ 和 44.41 cd·A⁻¹, 最大亮度为 16 021 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 14.20%, 效率滚降为 13.7%。

可以看出, 随着超薄层厚度的增加, 器件的效率滚降在不断减小, 同时亮度也得到提高, 这表明激子利用率得到了改善, 抑制了三线态激子猝灭, 使更多三线态激子能量传递给了 Ir(tppy)₂(acac) 黄光磷光分子, 增加了磷光 Ir(tppy)₂(acac) 的发射, 如图 3(d) 归一化 EL 光谱所示。为了便于分析, 我们给出了不同磷光超薄层厚度的 OLEDs 的归一化 EQE-亮度特性曲线, 如图 4 所示。可以清楚地看到, 增加磷光超薄层厚度的确改善了器件的效率滚降特性, 特别是在高亮度下尤为明显。

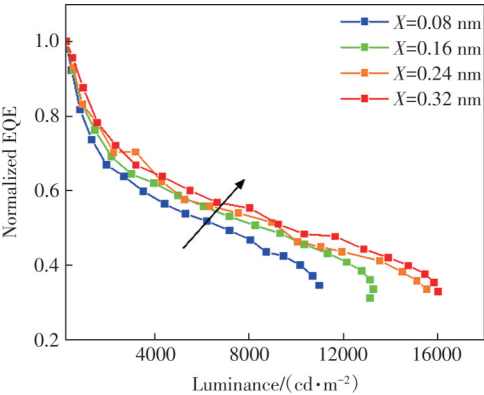


图 4 在 11 nm 处插入不同磷光超薄层厚度制备的 OLEDs W1~W4 的归一化 EQE-亮度特性曲线

Fig.4 Normalized EQE-luminance characteristics of the fabricated OLEDs W1-W4 with different phosphorescent ultra-thin layer thicknesses inserted at 11 nm

从器件激子分布图 2(b) 可以看到, 由于激子分布在整个发光区, 显然在 11 nm 处插入单个磷光超薄层并不能完全有效利用三线态激子, 使器件的效率无法得到进一步提高。从图 3(d) 的 EL 光谱也可以看到, 蓝光发射峰远高于黄光磷光发射峰, 磷光黄光发射无法提高, 器件呈现了冷白光特性。为了进一步制备出标准或暖色的 WOLEDs, 并进一步提高器件效率和改善效率滚降, 我们进行了插入多个磷光超薄层的研究。由于在 2 nm、8 nm 和 11 nm 处有较高的激子分布, 我们在 2 nm、8 nm 和 11 nm 处分别插入 Ir(tppy)₂(acac) 黄光磷光超薄层, 保持 TPB-PAC 蓝光发光

层厚度不变, 进行了器件的 EL 特性研究。器件结构为: ITO/HAT-CN (5 nm)/TAPC (50 nm)/TCTA (5 nm)/TPB-PAC (2 nm)/Ir(tppy)₂(acac) (0.16 nm) X/TPB-PAC (6 nm)/Ir(tppy)₂(acac) (0.16 nm) Y/TPB-PAC (3 nm)/Ir(tppy)₂(acac) (0.16 nm) (Z)/TPB-PAC (9 nm)/TmPyPB (40 nm)/LiF (1 nm)/Al, 具体的器件结构参数如表 3 所示, 对应器件 W5、W6、W7 和 W8, 其 EL 性能与光谱如图 5 所示, EL 性能总结在表 4 中。可以看到, 插入多个磷光超薄层的确进一步改善了器件的效率和亮度下的效率滚降, 也得到了很好的白光发射, 器件效率达到了传统 AIE 磷光掺杂混合型 WOLEDs 的水平^[22], 但大大简化了器件的制备工艺。

表 3 在器件发光层中插入 3 个磷光超薄层的具体位置参数, 这里 X 表示超薄层插入的位置, 0 表示不插入超薄层

Tab.3 Specific position parameters for the inserted three phosphorescent ultra-thin layers into the EML in devices. Here, X represents the inserted position of ultra-thin layer, 0 represents no insertion of ultra-thin layer

器件	X/nm	Y/nm	Z/nm
W5	2	8	11
W6	2	0	11
W7	2	8	0
W8	0	8	11

从图 5 和表 4 可以看到, 器件 W5 的最大 EQE、PE 和 CE 分别达到了 25.31%、85.80 lm·W⁻¹ 和 81.34 cd·A⁻¹, 最大亮度为 30 778 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 23.19%, CIE 坐标为 (0.43, 0.43); 器件 W6 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 22.53%、70.47 lm·W⁻¹ 和 67.91 cd·A⁻¹, 最大亮度为 31 385 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 21.21%, CIE 坐标为 (0.42, 0.42); 器件 W7 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 22.58%、77.65 lm·W⁻¹ 和 71.96 cd·A⁻¹, 最大亮度为 30 394 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 20.88%, CIE 坐标为 (0.41, 0.41), 三个器件都表现为标准的暖白光发射。器件 W8 的最大 EQE、PE 和 CE 分别为 18.22%、52.42 lm·W⁻¹ 及 52.64 cd·A⁻¹, 最大亮度为 23 703 cd·m⁻², 在 1 000 cd·m⁻² 亮度下的 EQE 为 16.53%, CIE 坐标为 (0.34, 0.32), 为标准的冷白光发射。从实验结果来看, 器件 W5、W6 和 W7 的 CIE 色度没有变化, 但器件 W5 展示出了最优异的

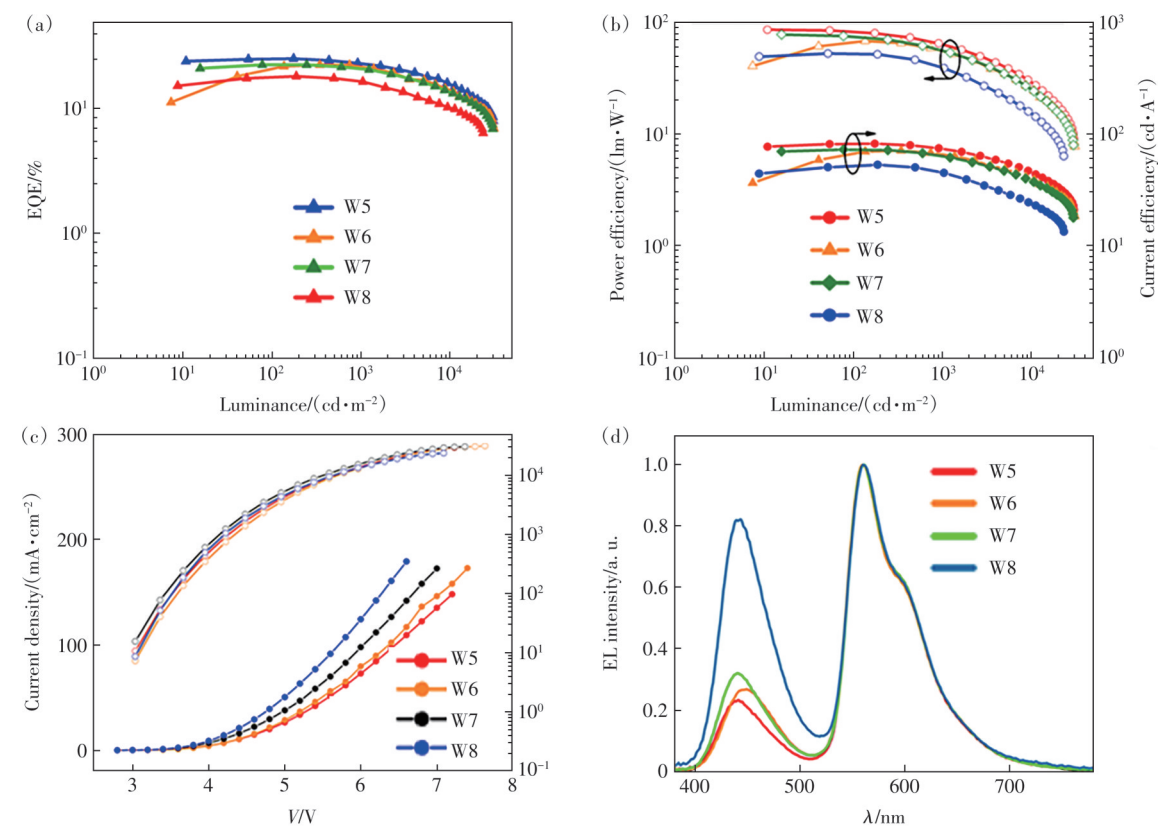


图5 在发光层中插入多个磷光超薄层制备的混合型WOLEDs的EL性能。(a)EQE-亮度特性;(b)PE-CE-亮度特性;(c) J - V 特性;(d)器件在5 V电压下的EL光谱特性

Fig.5 EL performances of the fabricated hybrid WOLEDs inserting multiple phosphorescent ultra-thin layers in EML. (a) EQE-luminance characteristics. (b)PE-CE-luminance characteristics, (c) J - V characteristics. (d)EL spectra at 5 V voltage

表 4 在发光层中插入多个磷光超薄层制备的混合型WOLEDs的EL性能总结

Tab. 4 Summary of the EL performances of the fabricated hybrid WOLEDs inserting multiple phosphorescent ultra-thin layers in EML

Device	V_{on}/V	$EQE_{max}/\%$	$EQE_{1000}/\%$	$PE_{max}/(lm \cdot W^{-1})$	$CE_{max}/(cd \cdot A^{-1})$	$L_{max}/(cd \cdot m^{-2})$	CRI	CIE(5 V)
W5	2.8	25.31	23.19	85.80	81.34	30 778	42	(0.43, 0.43)
W6	2.8	22.53	21.21	70.47	67.91	31 385	44	(0.42, 0.42)
W7	2.8	22.58	20.88	77.65	71.96	30 394	44	(0.41, 0.41)
W8	2.8	18.22	16.53	52.42	52.64	23 703	58	(0.34, 0.32)

白光性能,表明器件W5中激子得到了最有效的利用。研究发现,在发光层中插入更多的磷光超薄层并不能进一步提高器件的效率,如图5(c)所示;但插入更多的磷光超薄层虽然没有改变器件的启亮电压,却降低了器件中的电流,表明插入的磷光超薄层对载流子起到了一定的俘获作用,因此制备这类白光器件时需要插入磷光超薄层的数量和厚度进行优化。器件W5也显示了相对稳定的白光发射光谱,如图6所示。其中蓝光发射峰强度随亮度增加,其原因是:一方面随着亮度的增加,在发光层内产生的激子能量更多地被蓝光分子TPB-PAC吸收;另一方面,由于采用了磷光超薄层,被磷光分子接收的三线态激子能量将

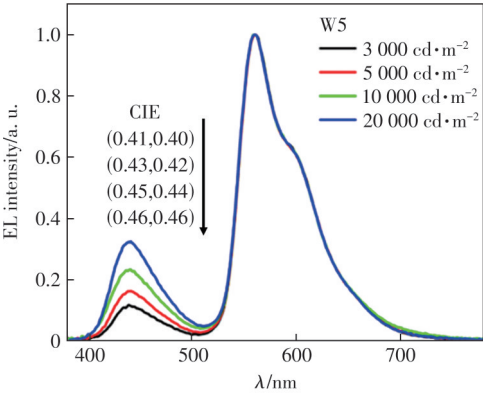


图6 制备的混合型WOLEDs器件W5在不同亮度下的归一化EL光谱

Fig.6 Normalized EL spectra of the fabricated hybrid WOLED W5 at different luminance

随着亮度的增加而达到饱和, 因此最终导致器件蓝光发射峰强度随着亮度有所增加。

4 结 论

本文利用一种高效率的 AIE 蓝光材料作为发光层, 通过在发光层中引入黄光磷光超薄层制备了高效率、低效率滚降荧光/磷光混合型 WOLEDs。研究发现, 磷光超薄层的位置及其厚度对器件性能和发光颜色有很大的影响。通过优化超薄层的厚度及其位置, 并引入多个磷光超薄层来有效利用三线态激子, 制备的双色 WOLEDs 显示了优异的 EL 性能。其最大亮度为

30 778 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 最大 EQE、PE 和 CE 分别达到 25.31%、85.80 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 81.34 $\text{cd}\cdot\text{A}^{-1}$, 在 1 000 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 亮度下的 EQE 仍保持 23.19%, 显示了低的效率滚降, CIE 坐标为 (0.43, 0.43), 为标准的暖白光发射。研究结果充分证明了 AIE 有机分子作为高效蓝光荧光发射材料制备荧光/磷光混合型 WOLEDs 的有效性, 为高性能 WOLEDs 的研究和开发提供了新的方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250228>

参 考 文 献:

- [1] KIDO J, KIMURA M, NAGAI K. Multilayer white light-emitting organic electroluminescent device [J]. *Science*, 1995, 267(5202): 1332-1334.
- [2] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, 459(7244): 234-238.
- [3] DING L, SUN Y Q, CHEN H, *et al.* A novel intermediate connector with improved charge generation and separation for large-area tandem white organic lighting devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2(48): 10403-10408.
- [4] YING S A, SUN Q, DAI Y F, *et al.* Precise regulation of the emissive layer for ultra-high performance white organic light-emitting diodes in an exciplex forming co-host system [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2019, 3(4): 640-649.
- [5] OU Q D, ZHOU L, LI Y Q, *et al.* Extremely efficient white organic light-emitting diodes for general lighting [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24(46): 7249-7256.
- [6] MIAO Y, WANG K X Q, ZHAO B, *et al.* High-efficiency/CRI/color stability warm white organic light-emitting diodes by incorporating ultrathin phosphorescence layers in a blue fluorescence layer [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 295-304.
- [7] ZHANG T M, SHI C S, ZHAO C Y, *et al.* Extremely low roll-off and high efficiency achieved by strategic exciton management in organic light-emitting diodes with simple ultrathin emitting layer structure [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(9): 8148-8154.
- [8] MIAO Y Q, WANG K X, GAO L, *et al.* 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 [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(30): 8122-8134.
- [9] LI Y C, LI X L, CHEN D J, *et al.* Design strategy of blue and yellow thermally activated delayed fluorescence emitters and their all-fluorescence white OLEDs with external quantum efficiency beyond 20% [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(38): 6904-6912.
- [10] LIU X, WANG Y F, LI M, *et al.* Aromatic-imide-based TADF material as emitter for efficient yellow and white organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2021, 88: 106017.
- [11] KIM J W, YOU S I, KIM N H, *et al.* Study of sequential dexter energy transfer in high efficient phosphorescent white organic light-emitting diodes with single emissive layer [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4(1): 7009.
- [12] HUA W, DU X G, SU W M, *et al.* Full phosphorescent white-light organic light-emitting diodes with improved color stability and efficiency by fine tuning primary emission contributions [J]. *AIP Adv.*, 2014, 4(2): 027103.
- [13] YE J, ZHENG C J, OU X M, *et al.* 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 [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(25): 3410-3414.
- [14] YE J, ZHENG C J, OU X M, *et al.* White OLEDs: 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 [J].

- Adv. Mater.*, 2012, 24(25): 3290.
- [15] 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.
- [16] ZHENG C J, WANG J, YE J, *et al.* Novel efficient blue fluorophors with small singlet-triplet splitting: hosts for highly efficient fluorescence and phosphorescence hybrid WOLEDs with simplified structure [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(15): 2205-2211.
- [17] ZHAO F C, WEI Y, XU H, *et al.* Spatial exciton allocation strategy with reduced energy loss for high-efficiency fluorescent/phosphorescent hybrid white organic light-emitting diodes [J]. *Mater. Horiz.*, 2017, 4(4): 641-648.
- [18] CHEN Y W, YANG D Z, QIAO X F, *et al.* Novel strategy to improve the efficiency roll-off at high luminance and operational lifetime of hybrid white OLEDs *via* employing an assistant layer with triplet-triplet annihilation up-conversion characteristics [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(19): 6577-6586.
- [19] YE J, CHEN Z, AN F F, *et al.* Achieving highly efficient simple-emission layer fluorescence/phosphorescence hybrid white organic light-emitting devices *via* effective confinement of triplets [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014, 6(12): 8964-8970.
- [20] KIM G W, BAE H W, LAMPANDE R, *et al.* Highly efficient single-stack hybrid cool white OLED utilizing blue thermally activated delayed fluorescent and yellow phosphorescent emitters [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 16263.
- [21] QIN W, YANG Z Y, JIANG Y B, *et al.* Construction of efficient deep blue aggregation-induced emission luminogen from triphenylethene for nondoped organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Mater.*, 2015, 27(11): 3892-3901.
- [22] XU Z, GONG Y B, DAI Y F, *et al.* High efficiency and low roll-off hybrid WOLEDs by using a deep blue aggregation-induced emission material simultaneously as blue emitter and phosphor host [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(9): 1801539.
- [23] 韩鹏博, 徐赫, 安众福, 等. 聚集诱导发光 [J]. *化学进展*, 2022, 34(1): 1-130.
- HAN P B, XU H, AN Z F, *et al.* Aggregation-induced emission [J]. *Prog. Chem.*, 2022, 34(1): 1-130. (in Chinese)



宗潇(1989-),女,山东淄博人,博士,副教授,2021年于武汉理工大学获得博士学位,主要从事照明与显示用功能材料及器件的研究。

E-mail: 24418721@qq.com



代岩峰(1980-),男,吉林松原人,硕士,工程师,2016年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事有机发光二极管的研究。

E-mail: msyfdai@scut.edu.cn