

文章编号: 1673-5196(2021)06-0015-06

基于茈的非掺杂荧光白色有机电致发光器件

吴有智^{*1}, 梁楠¹, 赵玉康¹, 张材荣²

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用两种经典传统荧光材料作为发光层, 制备了非掺杂白色有机电致发光器件(WOLEDs). 在器件中两层茈(perylene)以薄层的方式分别置于双极性主体材料 CBP(4,4'-di(N-carbazole)biphenyl) 两侧作为蓝光发射体, 一层超薄的红荧烯(rubrene)插入 CBP 中作为橙光发射体. 通过改变 rubrene 在 CBP 中的插入位置获得了高效率白色荧光器件, 最高电流效率为 6.6 cd/A(外量子效率为 2.6%), 最高亮度为 18 480 cd/m², 且其中一种器件在 200 mA/cm² 的高电流密度下, CIE(commission internationale de l'éclairage) 色坐标可达理想白光平衡点(0.33,0.33).

关键词: 荧光; 白色; 有机电致发光器件; 茈; 红荧烯

中图分类号: TN383+.1 **文献标志码:** A

Non-doped fluorescent white organic electroluminescent device based on perylene

WU You-zhi¹, LIANG Nan¹, ZHAO Yu-kang¹, ZHANG Cai-rong²

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. School of Science, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: By using two typical traditional fluorescent materials as the light-emitting layer, an non-doped all fluorescent white organic light-emitting diode (WOLED) is fabricated. In the device, two thin layers of perylene are located at both sides of ambipolar host material CBP (4,4'-N,N'-dicarbazole-biphenyl) as blue emitters, an ultra-thin rubrene layer inserted into CBP as orange emitter. A simple and efficient OLED is obtained by varying the insertion position of rubrene in CBP, the highest current efficiency is 6.6 cd/A (external quantum efficiency is 2.6%), the maximum brightness is 18 480 cd/m², and Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) co-ordinates can reach the ideal white light equilibrium point (0.33, 0.33) at a current density of 200 mA/cm².

Key words: fluorescence; white; organic electroluminescent device (OLED); perylene; rubrene

白色有机电致发光器件(white organic light-emitting diode, WOLED)凭借功耗低、自发光和分辨率高等优点在照明以及显示应用方面具有非常大的发展潜力, 因此一直是有机电致发光研究中的热点^[1-2]. WOLED 的基本结构为“三明治”结构, 包括阳极、有机功能层和阴极、有机功能层的结构设计以及材料选择是决定器件电学性能和光学性能的关键, 一般情况下有机功能层由空穴(电子)注入层、空穴(电子)传输层和发光层组成. 为了实现理想白

光, 器件发光层的发射光谱应尽可能覆盖宽的可见光波长(380~780 nm), 为此 WOLED 的发光材料通常选用互补色^[3-4], 即橙色和蓝色两种颜色协同发光; 或者三基色^[5-6], 即红色、绿色和蓝色三种颜色协同发光. 在发光层制备工艺中, 为了避免因发光材料发生聚集导致器件性能降低的现象产生, 最直接的方法是将发光材料掺杂在主体材料中构成主客体掺杂系统^[7]. 然而此工艺在实际操作中很难精确控制共蒸发后主客体掺杂比例, 器件仍然达不到预期性能. 相比之下, 非掺杂工艺不仅可以使得器件的制备工艺得到简化, 同时发光材料通过薄层或超薄层的方式位于主体材料界面使其同样具有掺杂的效果而使得器件效率有效提高^[8], 该方法已经得到了诸多实验验证, 并且获得了较好的器件性能. 例如, 张运

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(11964016)

通讯作者: 吴有智(1965-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 教授.

Email: youzhiwu@163.com

虎等^[9]于 2013 年利用超薄插入法制备了电流效率为 6.7 cd/A, 外量子效率为 2.8% 的高效率传统全荧光 WOLED; 2014 年, 马东阁等^[10]利用超薄非掺杂的发射层制备了外量子效率为 23.1% 且低效率滚降的全磷光 WOLED; 赵娟等^[11]于 2018 年报道了以热活化延迟荧光材料 (TADF) 作为超薄发光层的 WOLED 器件外量子效率为 19.8%。

蓝光是白光的三原色之一, 是实现白光必不可少的发光材料, 因此吸引了众多国内外课题组对其进行研究^[12-15]。但是蓝光材料具有能隙宽度大, 激发态能级高的特点, 在稳定性、色纯度和量子效率等方面容易存在问题, 与红光、绿光材料相比, 研究进展以及发展速度仍较为缓慢。迄今为止, 蓝光磷光材料和 TADF 材料在激子利用率上取得了很大进展, 两种材料均可实现 100% 的激子利用率从而获得高外量子效率器件。然而, 磷光材料工作机理基于重金属的引入, 造成材料稳定性低, 很难获得满足实际应用要求的高亮度、高稳定性的高效纯蓝色发射; TADF 材料要求材料本身具备较小的单重态与三重态之间能级差以此获得延迟荧光, 目前成本较高, 不利于商业化生产。在各种蓝光材料中, 传统蓝色荧光材料因刚性分子结构和发光机理, 在色纯度、热稳定性方面表现出了更好的优势, 且成本较低, 是目前仍被使用次数最多的蓝光材料^[16-18], 因此开发传统蓝色荧光材料的使用价值具有较大的意义。芴 (perylene) 是经典的传统荧光蓝色发光材料, 荧光量子效率高达 0.94^[19], 五个苯环并在一起的共轭结构使其具有稳定性好的特点。丁帮东等^[20]制备了以 perylene 和 rubrene 掺杂在主体材料 ADN (9, 10-di-beta-naphthylanthracene) 中作为发光层的掺杂白光器件, 在器

件中 perylene 不仅是蓝光发射体还是主体材料与 rubrene 之间的能量传递媒介, 其中 perylene 与 rubrene 之间的不完全能量传递机制非常突出, 但是器件的亮度和色度均不十分理想, 在 14 V 电压下亮度为 11 665 cd/m², CIE (commission Internationale de l'éclairage) 色坐标为 (0.30, 0.37)。

本文选择具有双极性特征的 CBP (4,4'-N,N'-dicarbazole-biphenyl) 作为主体材料^[21], 将超薄 rubrene 插入主体材料中, perylene 以非掺杂薄层的方式置于主体材料两侧, 即位于 TPD/CBP 界面和 CBP/TPBi 界面, 制备了非掺杂传统荧光白色器件, 其最高电流效率为 6.6 cd/A (外量子效率为 2.6%), 在 15 V 左右电压下最高亮度为 18 480 cd/m², 对应 CIE 色坐标为 (0.32, 0.34), 非常接近理想白光平衡点。

2 实验

图 1 所示为实验中所用有机材料的化学结构。采用真空蒸镀的方法制备 OLED 器件, 首先使用清洗剂反复擦洗 ITO 基板, 再依次使用丙酮、乙醇和去离子水超声清洗, 用红外灯烘干后迅速放入真空室内。在同一真空室 (真空度约为 4×10^{-4} Pa) 内, 通过常规的电加热将所有功能层按照特定顺序蒸镀到 ITO 衬底上, 每层的厚度由石英晶体振荡厚度监控仪控制。在器件中, TPD 为空穴传输层, 薄层 perylene 为蓝光发光层, 超薄层 rubrene 作为橙色发光层插入主体材料 CBP 中, TPBi 为电子传输层, LiF/Al 作为复合阴极, 器件的发光面积为 2 mm × 5 mm。制备的器件结构为 ITO/MoO₃ (0.5 nm)/TPD

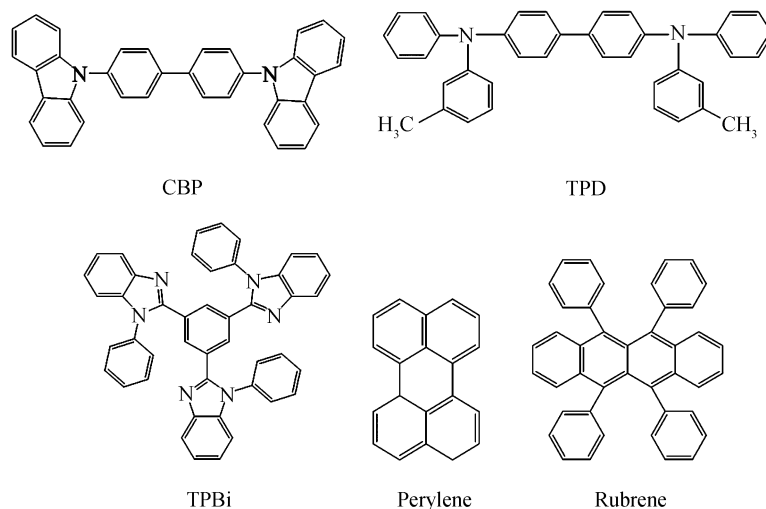


图 1 所用有机材料的化学结构

Fig.1 The chemical structure of organic materials used in the experiment

(50 nm)/perylene(2 nm)/CBP(20- x nm)/rubrene (0.2 nm)/CBP(x nm)/perylene(2 nm)/TPBi (20 nm)/LiF/Al,其中 $x=3,6,10,14,17$ nm,分别称为器件 A、B、C、D、E.器件制备完成后,从真空室(先充气至周围环境大气压)取出器件迅速在空气气氛和室温条件下,对器件进行测试.电流-电压关系用 Keithley 2400 数字源表测量,器件亮度及电致发光光谱用 PR650 型光谱扫描色度计测量.

3 结果与讨论

图 2 所示为五种器件在 20 mA/cm^2 电流密度下的归一化电致发光(electroluminescence, EL)光谱.从图可以看出,五种器件的发射峰均包含了位于 452、480 nm 处来自 perylene^[19] 的蓝色发射峰和位于 560、600 nm 处来自 rubrene^[9] 的橙色发射峰.随着 rubrene 与阴极侧 perylene 之间的距离逐渐增大,从 3 nm(器件 A)逐渐增加至 17 nm(器件 E),perylene 的蓝色发光成分逐渐升高, rubrene 的橙色发光成分逐渐降低.器件 A、B、C 三种器件中包含的位于 410 nm 附近处来自 TPD^[22] 的深蓝色发射峰也随之逐渐减弱,直至器件 D 和 E 的深蓝色光成分消失.从图中明显看出,器件 C 的蓝色发光成分与橙色发光成分的发光比例最佳,该器件对应

的结构为 rubrene 位于 CBP 中间且 rubrene 与阴极侧 perylene 距离为 10 nm,在此情况下,器件呈现白光,CIE 色坐标为(0.32,0.34),非常接近理想白光.器件 A 和器件 B 中 rubrene 与阴极侧 perylene 距离都较近,分别为 3、6 nm, rubrene 的发光强度几乎都为 perylene 的 2 倍,器件呈现淡黄色,CIE 色坐标分别为(0.38,0.39),(0.38,0.40).在器件 D 和器件 E 中 rubrene 靠近阳极侧,与阴极侧 perylene 的距离分别为 14、17 nm, rubrene 的发光强度仅为 perylene 的三分之一,两种器件呈现蓝绿光,CIE 色坐标分别为(0.20,0.24),(0.21,0.25).五种器件的 CIE 色坐标列于表 1.

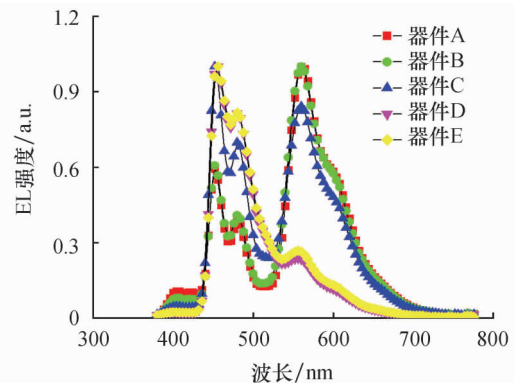


图 2 不同器件的 EL 光谱

Fig.2 EL spectra of different devices

表 1 五种器件的性能数据

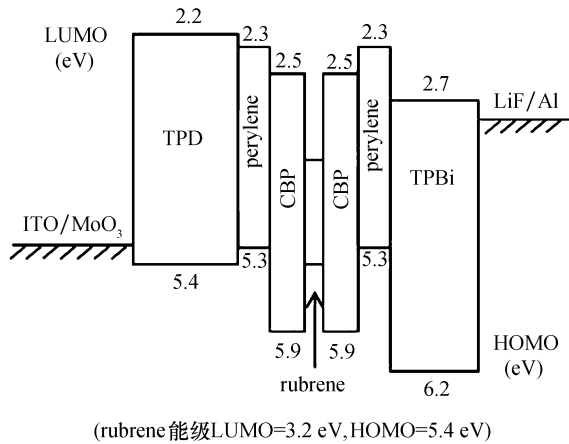
Tab.1 Performance data of five devices

器件	V_{on}/V	CIE 色坐标(x, y)	颜色	$L_{max}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$\eta_{e,max}/(\text{cd} \cdot \text{a}^{-1})$	$\eta_{ext,max}/\%$
器件 A	3.4	(0.38, 0.39)	淡黄色	16 134	6.12	2.0
器件 B	3.4	(0.38, 0.40)	淡黄色	16 566	6.18	2.0
器件 C	3.3	(0.32, 0.34)	白色	18 480	6.60	2.6
器件 D	3.3	(0.20, 0.24)	蓝绿色	16 830	6.07	3.3
器件 E	3.5	(0.21, 0.25)	蓝绿色	16 768	6.03	3.4

注: V_{on} 为启亮电压,亮度为 1 cd/m^2 时的电压;CIE 为电流密度 20 mA/cm^2 时的色坐标; L_{max} 为最高亮度; $\eta_{e,max}$ 为最大电流效率; $\eta_{ext,max}$ 为最大外量子效率.

上述五种器件色度上的差异可以通过器件的发光机理来解释.器件的能级结构如图 3 所示,能级参考文献中报道的数据^[9,23-24].图中 perylene 的 LUMO 能级(2.3 eV)比 CBP 的 LUMO 能级(2.5 eV)高 0.2 eV,从而阻碍了电子在阴极侧的输运,使得大部分电子累积在阴极侧 perylene 处,此处为器件的主要激子复合区域.而空穴从阳极注入后相对顺利地输运至此,与电子直接复合为激子,处于激发态的 perylene 分子主要通过两种途径释放能量,一是跃迁回基态产生 perylene 的蓝色发射,二是通过 Förster 型能量传递将能量传给 rubrene^[20].随着 rubrene 与阴极侧 perylene 距离的减小, rubrene 获得

来自激发态 perylene 的能量传递部分的比例增大,相应地,激发态 perylene 跃迁回基态发射蓝光部分减少,器件逐渐以橙色发光为主.反之,当 rubrene 与阴极侧 perylene 距离越大,两者之间的能量传递受到抑制,激发态 perylene 通过辐射途径发射蓝光部分比例增加,蓝光强度增大.少量电子被输运至 TPD 与空穴复合形成激子,随着 rubrene 逐渐靠近阳极侧,分子获得来自激发态 TPD 的 Förster 型能量传递^[25]越有效,故而器件 A 至器件 E 的 TPD 发光成分逐渐减小甚至消失,器件 E 的 rubrene 发光强度呈现小幅度升高的趋势.另外, rubrene 分子也可以直接捕获主体材料 CBP 中输运的载流子复合



(rubrene能级LUMO=3.2 eV, HOMO=5.4 eV)

图 3 器件的能级结构示意图

Fig.3 Energy level structures of the devices

形成激子^[26],但是在器件中 rubrene 的厚度只有 0.2 nm,对载流子输运影响较小,且橙色发光强度随着 rubrene 在 CBP 中插入位置变化而发生变化,直接俘获载流子效应在 rubrene 发光机理中不占主导,而来自其他材料的能量传递效应为 rubrene 的主要发光机理.要实现白光要求各颜色光达到恰当合适的比例,当 rubrene 距离阴极一侧 perylene 的距离为 10 nm 时,蓝色发光成分与橙色发光成分达到均衡,器件色度非常接近理想白光,CIE 色坐标为 (0.32,0.34).

电流密度从 0.2 mA/cm² 增至 200 mA/cm²,器件 A 的色坐标值逐渐减小,在高电流密度下 (200 mA/cm²) 甚至出现了 (0.33,0.33) 的理想白色发光平衡点,其他 4 种器件的色坐标也随着电场变化有相应的变化,但是器件 D 和器件 E 两种器件的色坐标变化较小,所有器件 CIE 色坐标的变化列于表 2. 结合器件结构,以器件 A 在不同电流密度下的 EL 光谱为例对此现象进行解释,如图 4.

表 2 五种器件 CIE 色坐标的变化

Tab.2 Variation of CIE color coordinates of five devices

器件	CIE 色坐标 (x, y)
器件 A	(0.47~0.33, 0.48~0.33)
器件 B	(0.46~0.31, 0.46~0.33)
器件 C	(0.33~0.29, 0.36~0.30)
器件 D	(0.19~0.20, 0.26~0.23)
器件 E	(0.18~0.22, 0.25~0.25)

由图 4 可以看出,器件 A 在低电流密度下 (0.2~20 mA/cm²) 以 rubrene 发射橙色发光成分为主;在高电流密度下 (200 mA/cm²) 以 perylene 发射蓝光成分为主.这种现象的产生机制可能归因于在高电流密度下 rubrene 单重态激子的场诱导淬灭效应增大^[20,29-30],使得 perylene 发光成分较

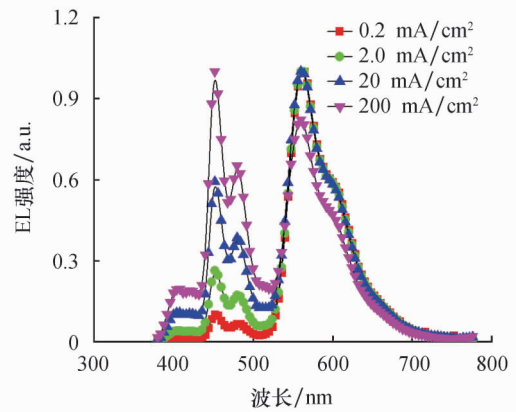


图 4 不同电流密度下器件 A 的 EL 光谱

Fig.4 EL spectra of the device A at different current density

rubrene 有明显增加.且在高电流密度下,载流子隧穿能力增强,阳极侧 TPD 分子可以捕获电子与空穴复合为激子后跃迁回基态发射深蓝色光,在器件中起着辅助发光的作用,使得器件白光色域更广,在这样一个过程下,最终器件 A 在高电流密度下获得 (0.33,0.33) 的理想白光平衡点.器件 B 和器件 C 同样因为受到电场的影响,色坐标值减小,色度蓝移,其中器件 C 的色度始终处于白光区.但是在器件 D 与器件 E 中,两种器件的 EL 光谱以 perylene 发射蓝光成分为主,橙光成分强度与蓝光成分原本相差较大(在图 2 的 EL 光谱中两种器件橙光峰值为蓝光峰值的 30% 左右),器件中 rubrene 激子的场诱导淬灭效应较弱,因此随着电场变化两种成分比例变化不会太大;另外,激发态 TPD 与 rubrene 之间的能量传递部分随两者之间距离减小而增加,橙色发光成分有小幅度增加,器件 E 色坐标值有小幅度增大的趋势.

图 5 所示为五种器件的电流-电压-亮度特性曲线.由图可见,五种器件的电流-电压特性曲线非常接近,因所有器件的总厚度不变,器件厚度变化对电压的影响不作考虑,故此现象说明了 rubrene 在 CBP 中插入位置的变化对器件的载流子行为影响较小.另外,五种器件的亮度-电压特性曲线差异也较小,驱动电压为 15 V 时器件 C 的亮度为 18 480 cd/m²,器件 A、B、D、E 最高亮度分别也可达到 16 134、16 566、16 830、16 768 cd/m²,而且五种器件的启亮电压较低,基本都在 3.3 V 左右.图 6 为五种器件的电流效率-电压特性曲线,曲线都随着驱动电压的升高呈现下降的趋势,这与一般的 OLED 发光效率随电压变化趋势相似.器件 A、B、C、D、E 的最高电流效率分别为 6.12、6.18、6.60、6.07、6.03 cd/A,对应的外量子效率 η_{ext} 分别为 2.0%、2.0%、

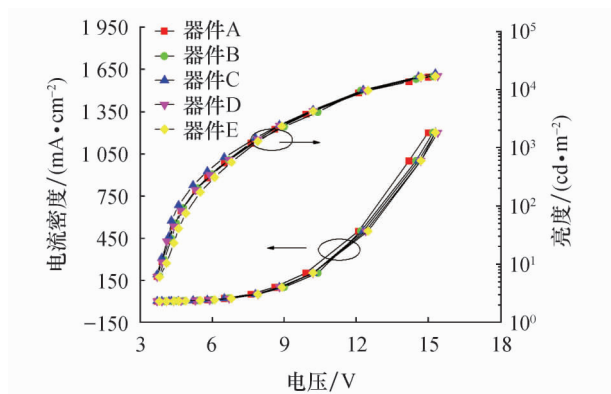


图 5 五种器件的电流-电压-亮度特性曲线

Fig. 5 Current density-voltage-luminance characteristics for the five devices

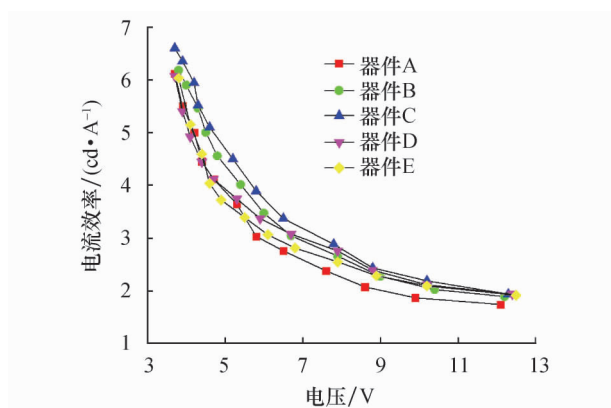


图 6 五种器件的电流效率-电压特性曲线

Fig. 6 Current efficiency-voltage characteristics for the five devices

2.6%、3.3%、3.4%，五种器件的性能数据列于表 1。器件 C 的电流效率最高，五种器件的 η_{ext} 似乎随着 rubrene 在 CBP 中的插入位置逐渐靠近阳极而增大，这是因为 rubrene 距离阳极侧越近，激发态 TPD 与 rubrene 之间的 Förster 型能量传递部分越有效。器件 η_{ext} 的大小差异主要取决于 TPD, perylene 和 rubrene 三种材料的荧光量子效率以及三种材料获得的激子数量。TPD 虽然作为器件的空穴传输材料，但是电子仍可以注入产生激发态^[29]，在 TPD 分子中所形成的激子主要会有两种行为：激发态 TPD 跃迁回基态发射深蓝色光或者激子通过能量传递给两种发光材料，两种行为之间是相互竞争关系，且后者对于激子的利用实际上是将低量子效率的激子转化为高量子效率激子的行为，有利于提高器件 η_{ext} 。Mattoussi 等^[30]利用积分球方法测量荧光量子效率发现了在 TPD 中掺杂 rubrene 后荧光量子效率升高的现象，且结合理论证明了低量子效率材料与高量子效率材料之间有效的能量传递有利于实现高效率器件。器件 D 与器件 E 的 rubrene 插入位置距离

阳极侧较近，激发态 TPD 通过 Förster 型能量传递给 rubrene 分子的比例越大，相应地，激子的利用效率得到提升，器件 D 与器件 E 的 η_{ext} 增大。其他 3 种器件中 rubrene 距离阳极侧较远，激发态 TPD 与 rubrene 之间的能量传递受到抑制，大部分 TPD 的激子会跃迁回基态发射深蓝色光，这种从低效向高效激子转化的部分就越小，所以相比器件 D 与器件 E，器件 A、器件 B 以及器件 C 的 η_{ext} 较小。

4 结论

将超薄 rubrene 插入主体材料 CBP 中，perylene 以非掺杂薄层的方式置于 TPD/CBP 界面和 CBP/TPBi 界面制备了工艺简单的非掺杂 OLED，通过改变 rubrene 在 CBP 中的插入位置获得一系列高亮度 WOLED。其中，rubrene 与阴极侧 perylene 距离 10 nm 时得到了非常接近理想白光的发光，CIE 色坐标为 (0.32, 0.34)，在 15.3 V 驱动电压下亮度为 18 480 cd/m²，发光效率为 6.6 cd/A (外量子效率为 2.6%)。器件 A 在电流密度为 200 mA/cm² 时，TPD 作为辅助发光，获得了 CIE 色坐标为 (0.33, 0.33) 的最佳白光平衡点。

参考文献:

- [1] TANG C W, VAN SLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(12): 913-915.
- [2] KIDO J, HONGAWA K, KOUYAMA K, *et al.* White light-emitting organic electroluminescent devices using the poly(N-vinylcarbazole) emitter layer doped with three fluorescent dyes [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(7): 815-817.
- [3] HO C L, WONG W Y, WANG Q, *et al.* A multifunctional Iridium-Carbazolyl orange phosphor for high-performance two-element WOLED exploiting exciton-managed fluorescence/phosphorescence [J]. *Advanced Functional Materials*, 2008, 18(6): 928-937.
- [4] TSUJI T, NAKA S, OKADA H, *et al.* Nondoped-type white organic electroluminescent devices utilizing complementary color and exciton diffusion [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(18): 3329-3331.
- [5] YANG H S. White organic light-emitting devices based on blue fluorescent dye combined with dual sub-monolayer [J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 142: 231-235.
- [6] ZHANG Z Q, WANG Q, DAI Y F, *et al.* High efficiency fluorescent white organic light-emitting diodes with red, green and blue separately monochromatic emission layers [J]. *Organic Electronics*, 2009, 10(3): 491-495.
- [7] TANG C W, VAN SLYKE S A, CHEN C H. Electroluminescence of doped organic thin films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(9): 3610-3616.
- [8] LIU J, SHI X D, WU X K, *et al.* Achieving above 30% external

- quantum efficiency for inverted phosphorescence organic light-emitting diodes based on ultrathin emitting layer [J]. *Organic Electronics*, 2014, 15(10): 2492-2498.
- [9] 张运虎, 吴有智, 马继晶, 等. 超薄插入法实现的理想白色有机电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2013, 34(6): 748-752.
- [10] ZHU L P, ZHAO Y B, ZHANG H M, *et al.* Using an ultrathin non-doped orange emission layer to realize high efficiency white organic light-emitting diodes with low efficiency roll-off [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(24): 244512.
- [11] ZHAO J, CHEN X J, YANG Z, *et al.* Highly-efficient fully non-doped white organic light-emitting diodes consisting entirely of thermally activated delayed fluorescence emitters [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(13): 3226-3232.
- [12] LEE C W, LEE J Y. Above 30% external quantum efficiency in blue phosphorescent organic light-emitting diodes using pyrido[2,3-b] indole derivatives as host materials [J]. *Advanced Material*, 2013, 25(38): 5450-5454.
- [13] KIM J B, HAN S H, YANG K, *et al.* Highly efficient deep-blue phosphorescence from heptafluoropropyl-substituted Iridium complexes [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(1): 58-61.
- [14] UOYAMA H, GOUSHI K, SHIZU K, *et al.* Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence [J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 234-238.
- [15] KIM M, JEON S K, HWANG S H, *et al.* Stable blue thermally activated delayed fluorescent organic light-emitting diodes with three times longer lifetime than phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15): 2515-2520.
- [16] ZHANG X H, LIU M W, WONG O Y, *et al.* Blue and white organic electroluminescent devices based on 9, 10-bis(20-naphthyl)anthracene [J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, 369(3/4): 478-482.
- [17] HOSOKAWA C, HIGASHI H, NAKAMURA H, *et al.* Highly efficient blue electroluminescence from a distyrylarylene emitting layer with a new dopant [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(26): 3853-3855.
- [18] TOBAT P I S, TILL S, ACHIM S, *et al.* Spiro compounds for organic optoelectronics [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(4): 1011-1065.
- [19] MI B X, GAO Z Q, LEE C S, *et al.* Reduction of molecular aggregation and its application to the high-performance blue perylene-doped organic electroluminescent device [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(26): 4055-4057.
- [20] DING B D, ZHU W Q, JIANG X Y, *et al.* White organic light-emitting diodes based on incomplete energy transfer from perylene to rubrene [J]. *Solid State Communications*, 2008, 148(5/6): 226-229.
- [21] MARSAL P, AVILOV I, DA SILVA FILHO D A, *et al.* Molecular hosts for triplet emission in light emitting diodes: A quantum-chemical study [J]. *Chemical Physics Letters*, 2004, 392(4/5/6): 521-528.
- [22] HONG Z R, LIANG C J, LI R G, *et al.* Infrared and visible emission from organic electroluminescent devices based on praseodymium complex [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(13): 1942-1944.
- [23] 吴有智, 郑新友, 朱文清, 等. 电子传输层厚度对 LiBq₄ 蓝色有机电致发光器件的影响 [J]. *半导体光电*, 2002, 23(4): 253-256.
- [24] TSE S C, TSUNG K K, SO S K. Single-layer organic light-emitting diodes using naphthyl diamine [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(21): 213502.
- [25] ZHANG Z L, JIANG X Y, XU S H, *et al.* The effect of rubrene as a dopant on the efficiency and stability of organic thin film electroluminescent devices [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, 31(1): 32-35.
- [26] 李璐, 于军胜, 黎威志, 等. 有机电致发光器件中染料掺杂类型的研究 [J]. *材料导报*, 2007, 21(12): 121-123.
- [27] KALINOWSKI J, DI MARCO P, COCCHI M, *et al.* Voltage-tunable-color multilayer organic light emitting diode [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(17): 2317-2319.
- [28] WANG Y Z, SUN R G. Multicolor multilayer light-emitting devices based on pyridine-containing conjugated polymers and para-sexiphenyl oligomer [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 74(24): 3613-3615.
- [29] MURATA H, MERRITT C D, KAFABI Z H. Emission mechanism in rubrene-doped molecular organic light-emitting diodes: direct carrier recombination at luminescent centers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(1): 119-124.
- [30] MATTOUSSI H, MURATA H, MERRITT C D, *et al.* Absolute photoluminescence quantum yield of molecular organic thin films: effects of doping with the strongly fluorescent rubrene [J]. *Organic Light-Emitting Materials and Devices II*, 1998, 3476: 49-60.