

文章编号: 1000-7032(2022)04-0576-07

# 单层热激活延迟荧光有机发光器件及其激子分布特性

唐 歌, 刘士浩, 张乐天, 谢文法\*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 单层结构对简化有机电致发光器件(OLED)的制备工艺及降低其制造成本具有重要意义。本文采用非掺杂热激活延迟荧光(TADF)发光层, 结合  $C_{60}$  (2 nm)/ $MoO_3$  (3 nm)/ $C_{60}$  (2 nm) 修饰的 ITO 阳极及 4,7-二苯基-1,10-菲罗啉(Bphen, 3 nm) 修饰的 Ag 阴极, 制备了单层 TADF 器件(TADF-OLED)。该单层 TADF-OLED 具有良好的空穴和电子注入能力, 开启电压为 3 V, 最大电流、功率及外量子效率分别可达到 37.7 cd/A、47.4 lm/W 和 13.24%。然后, 我们利用“探针法”研究了该单层 TADF-OLED 的激子分布情况, 发现大部分激子在发光层靠近阳极侧形成。最后, 我们利用经典电磁学理论对器件的光取出效率进行模拟分析, 证实了这种激子分布特性有助于实现较高的光取出效率, 进而改善器件的外量子效率。

**关 键 词:** 单层有机发光器件; 热激活延迟荧光; 激子分布; 电极修饰层; 光取出效率

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220014

## Single-layer Thermally Activated Delayed Fluorescent Organic Light-emitting Devices and Exciton Distribution Profiles

TANG Ge, LIU Shi-hao, ZHANG Le-tian, XIE Wen-fa\*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Jilin University Region,

College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xiewf@jlu.edu.cn

**Abstract:** Developing single-layer structure is important to simplify fabrication processes and reduce manufacture costs of organic light-emitting devices (OLEDs). In this work, we develop an efficient single-layer thermal activation delayed fluorescence (TADF) OLED by combining a non-doped TADF emitting layer, a  $C_{60}$  (2 nm)/ $MoO_3$  (3 nm)/ $C_{60}$  (2 nm) modified ITO anode and a 4,7-Diphenyl-1,10-phenanthroline (Bphen, 3 nm) modified silver cathode. The single-layer TADF-OLED can achieve efficient hole and electron injection ability such that it has a low turn-on voltage of 3 V, a maximum current efficiency of 37.7 cd/A, a maximum power efficiency of 47.4 lm/W, and an external quantum efficiency of 13.24%. And then, we investigate the exciton distribution profile of the single-layer TADF-OLED by using a “probe” method. It is found that most excitons are formed at the emitting layer close to the anode. Finally, with the classical theory of electromagnetism, we simulate and analyze the outcoupling efficiency, and prove that this exciton distribution profile is beneficial to achieve higher outcoupling efficiency, and thus the external quantum efficiency of single-layer OLEDs.

**Key words:** single-layer OLED; thermal activation delayed fluorescence (TADF); exciton distribution profile; anode modified layer; outcoupling efficiency

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(62174067, 62175085, 61905086); 吉林省科技发展计划(20200201296JC)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (62174067, 62175085, 61905086); Science and Technology Development Planning of Jilin Province (20200201296JC)

## 1 引言

有机发光二极管(OLED)因其高对比度、高色彩饱和度、低功耗等优势,在照明和显示领域展现出了巨大的商业价值和应用前景<sup>[1]</sup>。目前,荧光材料和磷光材料常被用作 OLED 的发光材料。但是它们均具有各自的局限,比如,荧光材料内量子效率受限,而磷光材料掺有重金属,昂贵且不可再生。因此作为第三代 OLED 发光材料的热激活延迟荧光材料(Thermally activated delayed fluorescence, TADF)应运而生<sup>[2-3]</sup>。TADF 材料具有反向系间窜越(Reverse inter system crossing, RISC)行为,即单重激发态和三重激发态能级差很小,三重态激发态能够很轻易地吸收环境热量,并上转换为单重激发态发光。因此 TADF 材料能够同时利用单线态、三重态发光,使内量子效率理论值能达到 100%。

OLED 器件从之前邓青云博士发明的“三明治结构”,再到发展成如今最常见的多层结构,器件结构愈加复杂,在提高器件效率的同时,也增加了制备成本<sup>[4-5]</sup>。单层器件较之多层器件,没有功能层调节层与层之间的能级匹配,因此缺少的传输层和阻挡层可能导致电荷注入效果低以及载流子传输不平衡的问题。目前已报道过一些基于磷光发光层的单层 OLED<sup>[6-8]</sup>,但基于 TADF 发光层的单层器件的报道还很少见<sup>[9]</sup>。通常而言, TADF 材料具有双极性的特点,因此,无需额外添加传输层、阻挡层便可以实现良好的载流子传输,避免载流子积累,并减少激子的猝灭。此外, TADF 材料可以同时利用单线态激子和三重态激子,非掺杂 TADF 发光层被证实可以实现良好的发光效率<sup>[10]</sup>,在构建非掺杂单层 OLED 方面具有显著优势。

本文采用高效的 TADF 材料 CzDBA(9,10-二(4-(9H-吡啶-9-基)-2,6-二甲基苯基)-9,10-二硼萘)作为非掺杂发光层,结合界面修饰的 ITO 阳极及 Ag 阴极,制备了单层 TADF 器件(TADF-OLED)。首先,我们对器件的阳极修饰层(AML)进行了研究。根据器件性能分析,基于  $C_{60}$ (2 nm)/ $MoO_3$ (3 nm)/ $C_{60}$ (2 nm)为 AML 的器件有最佳性能,其最高亮度超过 150 000 cd/m<sup>2</sup>,最大电流效率、功率效率和外量子效率分别可达 37.7 cd/A、47.4 lm/W 和 13.24%。与其他 AML 相

比,该 AML 的优势在于可以显著降低空穴注入势垒。接着,我们利用“探针法”研究了该单层 TADF-OLED 的激子分布情况,发现多数激子在发光层靠近阳极侧形成。最后,基于经典电磁学理论,我们利用自主研发的 OptiXLED 软件对器件的光取出效率进行分析,证实了这种激子分布特性有助于实现较高的光取出效率,进而改善器件的外量子效率。

## 2 实验

首先,使用 Decon 90 清洗剂对已预沉积铟锡氧化物(ITO)的玻璃衬底进行清洗,然后用去离子水对其超声清洗处理 3 次。随后将清洗后的衬底放入烘箱加热 10 min(120 ℃)。待烘干之后,将其放置在真空度低于  $6 \times 10^{-4}$  Pa 的多源有机分子气相沉积系统中,利用真空热蒸镀法在衬底上依次沉积阳极修饰层、发光层、阴极修饰层和阴极。有机层、 $MoO_3$  和 Ag 电极的沉积速率分别为 0.1, 0.01, 0.2 nm · s<sup>-1</sup>,器件的发光面积为 10 mm<sup>2</sup>。在室温环境下使用大塚 GP500 分光光度计测量系统同时进行器件光电特性的测试。

## 3 结果与讨论

单层器件中,阴极/阳极修饰层至关重要,因为它们能够修饰电极并改善载流子注入,从而影响器件载流子平衡<sup>[11]</sup>。我们设计了四组不同 AML 层的器件,图 1(a)为单层 TADF 器件示意图,所示器件结构为 ITO/AML/CzDBA(80 nm)/Bphen(3 nm)/Ag(100 nm),四组 AML 的结构分别为: $MoO_3$ (3 nm)(器件 A1)、 $C_{60}$ (2 nm)/ $MoO_3$ (3 nm)(器件 A2)、 $MoO_3$ (3 nm)/ $C_{60}$ (2 nm)(器件 A3)以及  $C_{60}$ (2 nm)/ $MoO_3$ (3 nm)/ $C_{60}$ (2 nm)(器件 A4)。

图 2 所示为器件的光电特性曲线。从图中可知,相比于器件 A1、A2 和 A3,器件 A4 性能明显提升。器件 A4 的最大电流效率、功率效率和外量子效率(EQE)分别可达 37.7 cd/A、47.4 lm/W 和 13.24%。而器件 A1 和 A2 的最大电流效率小于 15 cd/A,最大功率效率不超过 20 lm/W。在相同亮度下,相比于器件 A1 和 A2,器件 A4 的效率提升了近 4 倍。4 个器件的开启电压都小于 3 V,随着驱动电压的增大,器件 A4 的电流密度及亮度都显著高于器件 A1、A2 和 A3。

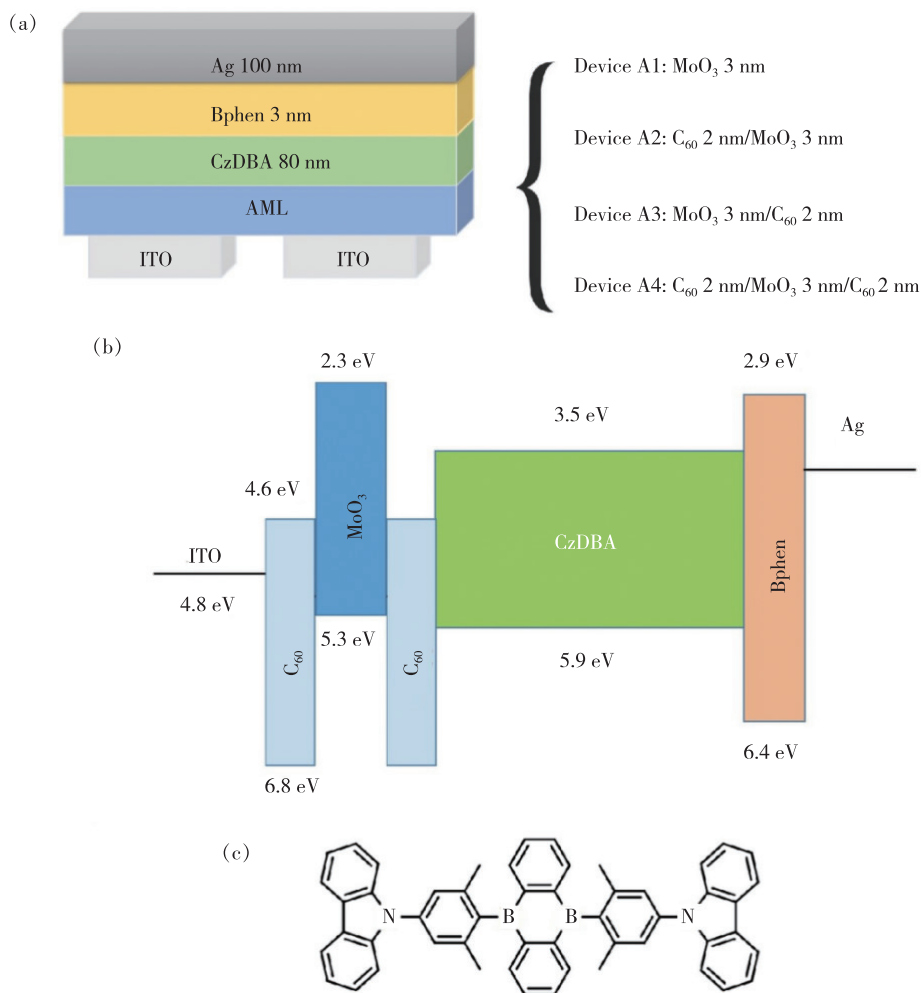


图 1 (a)单层 TADF 器件示意图;(b)能级图;(c)CzDBA 的分子结构。

Fig. 1 (a)Schematic diagrams of simple-layer TADF OLED. (b)Energy levels. (c)Molecular structure of CzDBA.

器件 A4 效率远高于其他 3 个器件的原因是,在高功函数的过渡金属氧化物 MoO<sub>3</sub> 与有机半导体之间插入的具有高电离能的 C<sub>60</sub> 界面层可以形成阳极到有机半导体的欧姆接触。欧姆接触的形成有助于降低空穴注入势垒,并改善空穴注入电流与电子注入电流的平衡性,从而减少载流子积累和激子猝灭等原因引起的非辐射复合损耗<sup>[12]</sup>。欧姆接触的形成主要是因为 C<sub>60</sub> 具有比 CzDBA 更高的电离能,可以使阳极的费米能级与 CzDBA 的电离能重新对准<sup>[13]</sup>。因此,空穴从阳极注入到复合区只有很小的能级势垒,仅需要较小的电压便可以实现高效的空穴注入<sup>[14]</sup>。此外,有报道表明与 ITO 接触的 C<sub>60</sub> 层可以在 ITO 阳极表面形成界面偶极子,因此在 ITO 与 MoO<sub>3</sub> 之间额外引入的 C<sub>60</sub> 层有助于进一步降低 ITO 到 MoO<sub>3</sub> 的空穴注入势垒<sup>[15-16]</sup>,这可能是造成器件 A4 效率高于 A3 的原因。同样对于 3 nm 的电子注入

层,Bphen 深的 HOMO 能级(−6.4 eV)可以起到空穴阻挡作用,CzDBA 较低的 LUMO 能级(−5.9 eV)也减轻了电子陷阱效应对器件平衡传输的影响。同时金属 Ag 沉积在有机物 Bphen 的过程中将形成金属-有机物“供体-受体”络合物,而这种络合物的形成也更利于电子的注入<sup>[17]</sup>。

单层器件的发光层较厚,因此通常具有宽的发光区。我们设计并制备了探针器件用以分析器件 A4 的激子分布情况。如图 3 所示,在器件发光层的不同位置分别插入 0.3 nm 的(乙酰丙酮)双(2-甲基二苯并[f,h]喹喔啉)合铱[ Ir(MDQ)<sub>2</sub>-(acac)] 红光超薄层作为探针,探针超薄层与 CzDBA 依次蒸镀形成非掺杂薄膜,制备了九组探针器件。九组探针器件 B1 ~ B9 分别对应于不同的探针插入位置,即从阳极修饰层与发光层的界面开始依次间隔 10 nm。我们课题组先前的研究表明该超薄层的插入对器件的电流-电压特性没

有明显影响<sup>[18]</sup>,而且绿光染料的激子能量可以充分地转移给红光染料<sup>[19]</sup>。因此通过测试器件的发光光谱特性,我们可以通过观察红光染料的发

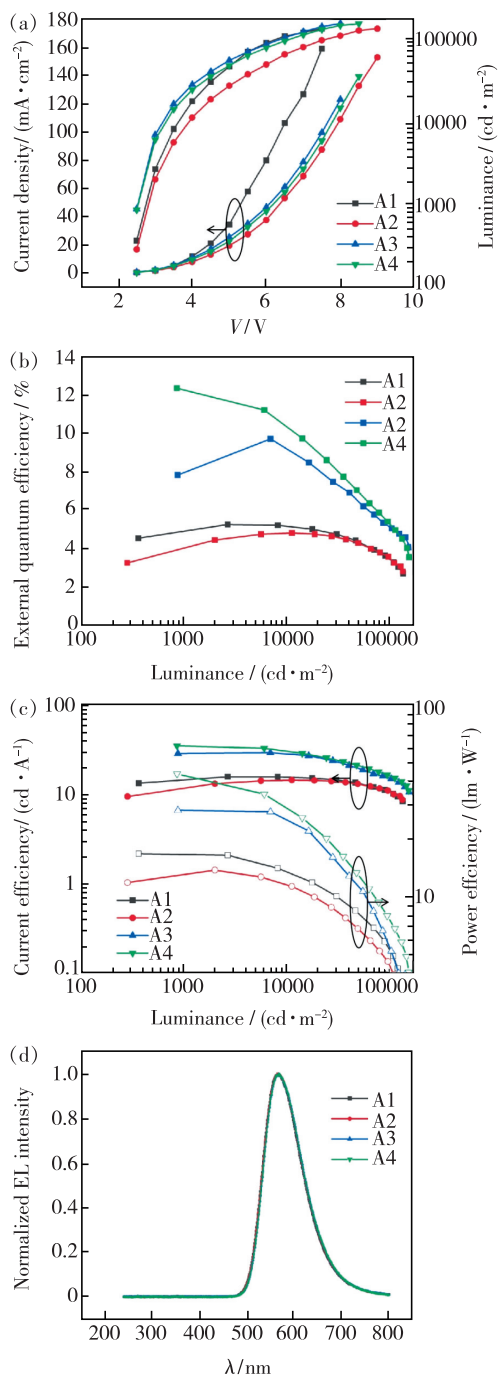


图2 器件 A1 ~ A4 的电流密度-电压-亮度特性(a)、外量子效率-亮度特性(b)、电流效率-亮度和功率效率-亮度特性(c)与归一化电致发光光谱(d)。

Fig. 2 Current density-voltage-luminance ( $V$ - $J$ - $L$ ) (a), external quantum efficiency-luminance (EQE- $L$ ) curve (b), current efficiency-luminance (CE- $L$ ) and power efficiency-luminance (PE- $L$ ) characteristics (c) and normalized EL spectra (@ 6 V) (d) of device A1 – A4.

光强度分析器件激子的分布情况<sup>[20]</sup>。我们将测试所得到的 CzDBA 发光峰设为 1, 探针器件的发光峰按照 CzDBA 的光谱进行归一化处理, 排除 CzDBA 的光谱影响, 比较各个探针器件的红光发射的相对强度。如图 4(a)、(b) 所示, 器件 B1 的红光发光强度最高, 且占比达到 50%, 这表明激

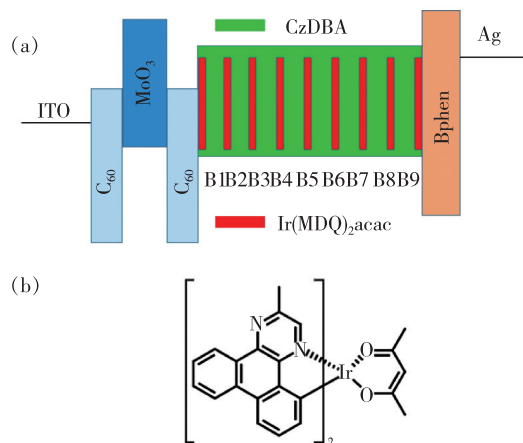


图3 (a) 器件 A4 的探针器件结构示意图; (b)  $\text{Ir}(\text{MDQ})_2(\text{acac})$  的分子结构示意图。

Fig. 3 (a) Probe devices for device A4. (b) Molecular structure of  $\text{Ir}(\text{MDQ})_2(\text{acac})$ .

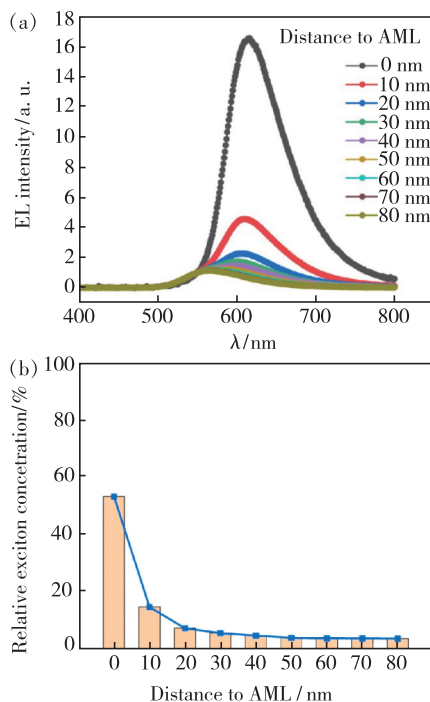


图4 (a) 各探针器件光谱; (b) 器件 A4 的相对激子浓度分布。

Fig. 4 (a) EL spectra of probe devices (normalized to their green EL intensity). (b) Relative exciton concentration distribution of device A4.



子主要在 AML 与发光层的界面处产生,这可归因于 CzDBA 的电子迁移率略高于空穴迁移率<sup>[9]</sup>。图 4(b)的曲线可以近似认为是器件 A4 中激子的空间分布特性  $R(x)$ 。

为了分析激子空间分布对器件效率的影响,我们利用经典电磁学理论对器件的光取出效率进行了模拟及分析。首先,器件的外量子效率存在如下关系:  $\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{outcoup}} = \gamma \cdot \eta_{\text{exc}} \cdot \varphi_p \cdot \eta_{\text{outcoup}}$ , 其中,  $\eta_{\text{int}}$  为内量子效率,  $\eta_{\text{outcoup}}$  为光取出效率,  $\gamma$  为电子-空穴平衡因子,  $\eta_{\text{exc}}$  为激子可利用度 (TADF 材料理论为 100%),  $\varphi_p$  为发光染料的量子产率。当材料体系确定时,外量子效率很大程度上取决于光取出效率和平衡因子<sup>[21-22]</sup>。因此,基于经典电磁学理论,我们采用自主研发的分析软件 OptiXLED 对器件的光取出效率进行了分析。

首先,根据器件结构搭建了平面多层光学薄膜体系,然后,根据经典电磁学理论,引入垂直 (v) 和平行 (h) 于平面方向的偶极子,这些偶极子的辐射光功率密度  $K$  可以由以下公式计算<sup>[23]</sup>:

$$K_{\text{TMv}} = \frac{3}{4} \text{Re} \left[ \frac{u^2}{\sqrt{1-u^2}} \frac{(1+a_{\text{TM}}^+)(1+a_{\text{TM}}^-)}{1-a_{\text{TM}}} \right], \quad (1)$$

$$K_{\text{TMh}} = \frac{3}{8} \text{Re} \left[ \sqrt{1-u^2} \frac{(1-a_{\text{TM}}^+)(1-a_{\text{TM}}^-)}{1-a_{\text{TM}}} \right], \quad (2)$$

$$K_{\text{TEh}} = \frac{3}{8} \text{Re} \left[ \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \frac{(1+a_{\text{TE}}^+)(1+a_{\text{TE}}^-)}{1-a_{\text{TE}}} \right], \quad (3)$$

$$a_{\text{TM,TE}}^+ = r_{\text{TM,TE}}^+ \exp(2jk_{z,e}z^+), \quad (4)$$

$$a_{\text{TM,TE}}^- = r_{\text{TM,TE}}^- \exp(2jk_{z,e}z^-), \quad (5)$$

$$a_{\text{TM,TE}} = a_{\text{TM,TE}}^+ a_{\text{TM,TE}}^-, \quad (6)$$

其中,  $\text{Re}[\ ]$  代表虚数的实部,  $u$  为归一化的面内波矢,  $r_{\text{TM,TE}}^+$  ( $r_{\text{TM,TE}}^-$ ) 代表 TM 和 TE 偏振波从发射层向上 (向下) 方向传播的反射系数,  $z^+$  ( $z^-$ ) 为偶极子距发光层上下界面的距离,  $k_{z,e}$  为发光层中的波矢量的  $z$  方向分量。

总辐射功率  $F$  可由以下公式计算:  $F(\lambda) = \int_0^\infty K(\lambda, u) du^2 = \int_0^\infty [(1-\Theta)K_{\text{TMv}} + \Theta \cdot (K_{\text{TMh}} + K_{\text{TEh}})] du^2$ , 其中,  $\Theta$  为水平偶极子比。最后,根据多层光学薄膜体系可以进一步计算出远场辐射模式,进而得到器件的光取出效率。

图 5(a) 所示为理论模拟的光取出效率-波长特性随偶极子位置 (对应于探针所在位置) 变化曲线 ( $\eta_{\text{outcoup}}(x, \lambda)$ )。结合图 2(d) 所示的发光光谱  $S(\lambda)$ , 我们得到了器件 A4 光取出效率随发光区位置变化特性, 即:  $\eta_{\text{outcoup}}(x) = \int_{380}^{780} \eta_{\text{outcoup}}(x, \lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda$ , 如图 5(b) 所示。从图中可以看出, 当激子位于 B1、B2 和 B3 处时器件具有更高的光取出效率, 约为 33%。这主要由于 B1、B2、B3 处的激子远离金属电极, 而金属/有机介质界面形成的表面等离子体激元 (SPP) 会对激子辐射产生共振吸收。由于远离金属电极, B1 ~ B3 处的激子辐射受到 SPP 共振吸收影响较弱, 从而具有较高的光取出效率。结合图 4(b) 所示的激子的空间分布特性  $R(x)$ , 单层器件的光取出效率可以表示为:  $\eta_{\text{outcoup}} = \int_0^{80} R(x) \cdot \eta_{\text{outcoup}}(x) dx$ 。于是, 我们计算得到了器件 A4 的光取出效率为 29.42%, 器件的高光取出效率得益于激子的空间分布特性。

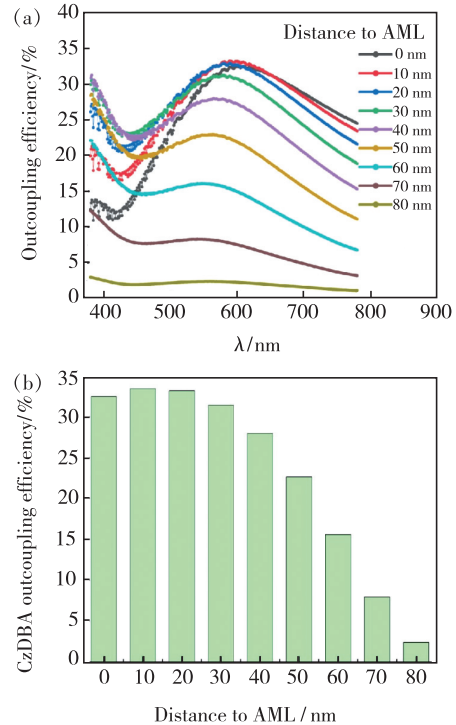


图 5 (a) 光取出效率-波长特性随偶极子位置变化曲线; (b) 器件 A4 光取出效率随发光区位置变化特性。

Fig. 5 (a) Outcoupling efficiency of dipole source at different position of the emitting layer as a function of wavelength. (b) Outcoupling efficiency device A4 as a function of distance to the AML/EML interface.

CzDBA 薄膜的量子产率为 90.6%<sup>[24]</sup>,因此,基于 CzDBA 的单层底发射器件的外量子效率理论最大值可达 26.65%,该理论结果高于器件 A4 的最大外量子效率。我们认为,由于单层器件没有载流子限制层,因此存在较严重的漏电流,导致器件电子-空穴平衡因子远低于 1,从而使得器件的外量子效率低于理论最大值。进一步改善载流子的平衡注入和传输将有助于提高器件效率。

## 4 结 论

本文研究了不同阳极修饰层对空穴注入能力的影响,证实了结合过渡金属氧化物 MoO<sub>3</sub> 与 C<sub>60</sub> 可以形成 ITO 到有机半导体的欧姆注入,显著降低空穴注入势垒。实验结果表明,阳极修饰层结

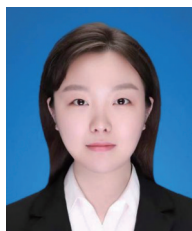
构为 C<sub>60</sub>(2 nm)/MoO<sub>3</sub>(3 nm)/C<sub>60</sub>(2 nm)的器件空穴注入效果最好。基于此,我们成功制备了结构为 ITO/C<sub>60</sub>(2 nm)/MoO<sub>3</sub>(3 nm)/C<sub>60</sub>(2 nm)/CzDBA(80 nm)/Bphen(3 nm)/Ag(100 nm)的高效率单层 TADF 器件。该器件开启电压为 3 V,最大电流效率、功率效率和外量子效率分别可达 37.7 cd/A、47.4 lm/W 和 13.24%。我们进一步研究了单层器件中的激子空间分布对器件光取出效率的影响,证实了该器件的激子空间分布情况有助于实现高光取出效率。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220014>.

## 参 考 文 献:

- [1] 李继军,聂晓梦,李根生,等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学, 2018,11(5):695-710.  
LI J J, NIE X M, LI G S, et al. Comparison and research progress of flat panel display technology [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(5):695-710. (in Chinese)
- [2] WANG H, ZANG C X, SHAN G G, et al. Bluish-green thermally activated delayed fluorescence material for blue-hazard free hybrid white organic light-emitting device with high color quality and low efficiency roll-off [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019,7(9):1801718-1-9.
- [3] 刘婷婷,李淑红,王文军,等. 基于器件结构提高 TADF-OLED 器件的发光性能[J]. 发光学报, 2020,41(1):77-85.  
LIU T T, LI S H, WANG W J, et al. Enhanced luminescent properties of TADF-OLEDs based on device structures [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(1):77-85. (in Chinese)
- [4] 张祥,陈逸凡,刘士浩,等. 交流驱动的绿色透明机电致发光器件[J]. 发光学报, 2021,42(2):153-157.  
ZHANG X, CHEN Y F, LIU S H, et al. Alternating current driven green transparent organic light-emitting devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021,42(2):153-157. (in Chinese)
- [5] 崔东岳,王帅,李淑红,等. 调控空穴传输层的分子取向提高有机发光二极管性能[J]. 发光学报, 2021,42(5):691-699.  
CUI D Y, WANG S, LI S H, et al. Improving performance of organic light-emitting diodes by tuning molecular orientation in hole transport layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021,42(5):691-699. (in Chinese)
- [6] PORIEL C, RAULT-BERTHELOT J. Designing host materials for the emissive layer of single-layer phosphorescent organic light-emitting diodes:toward simplified organic devices [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021,31(24):2010547-1-4.
- [7] LUCAS F, QUINTON C, FALL S, et al. Universal host materials for red, green and blue high-efficiency single-layer phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015,8(46):16354-16367.
- [8] JEON W S, PARK T J, KIM K H, et al. High efficiency red phosphorescent organic light-emitting diodes with single layer structure [J]. *Org. Electron.*, 2010,11(2):179-183.
- [9] KOTADIYA N B, BLOM P W M, WETZELAER G J A H. Efficient and stable single-layer organic light-emitting diodes based on thermally activated delayed fluorescence [J]. *Nat. Photonics*, 2019,13(11):765-769.
- [10] AMRUTH C, LUSZCZYNSKA B, SZYMANSKI M Z, et al. Inkjet printing of thermally activated delayed fluorescence (TADF) dendrimer for OLEDs applications [J]. *Org. Electron.*, 2019,74:218-227.
- [11] MALLIARAS G G, SALEM J R, BROCK P J, et al. Electrical characteristics and efficiency of single-layer organic light-

- emitting diodes [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(20):R13411-R13414.
- [12] NICOLAI H T, KUIK M, WETZELAER G A H, *et al.* Unification of trap-limited electron transport in semiconducting polymers [J]. *Nat. Mater.*, 2012, 11(10):882-887.
- [13] KOTADIYA N B, LU H, MONDAL a, *et al.* Universal strategy for ohmic hole injection into organic semiconductors with high ionization energies [J]. *Nat. Mater.*, 2018, 17(4):329-334.
- [14] LEE S Y, YASUDA T, NOMURA H, *et al.* High-efficiency organic light-emitting diodes utilizing thermally activated delayed fluorescence from triazine-based donor-acceptor hybrid molecules [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(9):093306-1-4.
- [15] KIM T S, KOO Y M, JEONG H, *et al.* Significantly improved power efficiency of organic light-emitting diodes with surface dipole on anode and ohmic cathode contact [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2007, 458(1):217-225.
- [16] KIM S H, JANG J. Relationship between indium tin oxide surface treatment and hole injection in C60 modified devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(25):253501-1-3.
- [17] WEN X M, YIN Y M, LI Y, *et al.* Tandem white organic light-emitting device using non-modified Ag layer as cathode and interconnecting layer [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(3):675-679.
- [18] LIU S H, ZANG C X, ZHANG J M, *et al.* Air-stable ultrabright inverted organic light-emitting devices with metal ion-chelated polymer injection layer [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2022, 14:14-1-11.
- [19] LIU S H, ZHANG X, YIN M J, *et al.* Coffee-ring-free ultrasonic spray coating single-emission layers for white organic light-emitting devices and their energy-transfer mechanism [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2018, 1(1):103-112.
- [20] YU Z W, ZHANG J X, LIU S H, *et al.* High-efficiency blue phosphorescent organic light-emitting devices with low efficiency roll-off at ultrahigh luminance by the reduction of triplet-polaron quenching [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(6):6292-6301.
- [21] KIM D H, LEE H N. Patternless light outcoupling enhancement method for top-emission organic light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, 55(11):112102-1-5.
- [22] WEI P C, ZHANG D D, DUAN L. Modulation of Förster and Dexter interactions in single-emissive-layer all-fluorescent WOLEDs for improved efficiency and extended lifetime [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 30(6):1907083-1-10.
- [23] ZANG C X, LIU S H, XU M X, *et al.* Top-emitting thermally activated delayed fluorescence organic light-emitting devices with weak light-matter coupling [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10:116-1-10.
- [24] WU T L, HUANG M J, LIN C C, *et al.* Diboron compound-based organic light-emitting diodes with high efficiency and reduced efficiency roll-off [J]. *Nat. Photonics*, 2018, 12(4):235-240.



唐歌(1996-),女,黑龙江大庆人,硕士研究生,2019年于吉林大学获得学士学位,主要从事有机电致发光器件方面的研究。

E-mail: tangge19@mails.jlu.edu.cn



谢文法(1978-),男,福建三明人,博士,教授,博士生导师,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机光电子学方面的研究。

E-mail: xiewf@jlu.edu.cn