

文章编号:1007-2780(2014)06-0886-07

基于 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 电荷产生层的叠层有机电致发光器件的特性研究

景 姝^{1,2}, 王 华^{1,2}, 刘慧慧^{1,2}, 杜晓刚^{1,2}, 苗艳勤^{1,2}, 潘成龙^{1,2}, 周禾丰^{1,3*}

(1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新材料工程技术研究中心, 山西 太原 030024;

3. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:采用结构为 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 的电荷产生层, 制备出了双发光单元叠层有机电致发光器件(OLED: Organic Light Emitting Device)。通过对比实验发现当 F4-TCNQ 层的厚度为 8 nm、Al 层的厚度为 5 nm 时, 电荷产生层产生电荷的能力较强且具有良好的透光率。基于此, 本文制备了发光层为 CBP:6%Ir(ppy)₃ 的叠层 OLED, 通过与单发光单元 OLED 的性能比较发现:采用 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 作为电荷产生层制备的叠层 OLED 的最大电流效率与功率效率分别为 51.6 cd/A、28.4 lm/W, 为单发光单元 OLED 的 2.16 倍、1.8 倍, 此外采用这种结构的电荷产生层有效解决了叠层 OLED 由于工作电压高而导致功率效率并未得到提升的问题;另一方面, 采用有机材料 F4-TCNQ 代替传统无机金属氧化物作为电荷产生层中的电荷产生部分, 能够避免无机金属氧化物高温升华对 Al 层薄膜的破坏, 提升了器件的效率并且降低了器件的 roll-off 现象。

关键词:电荷生成层;叠层;OLEDs**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142906.0886

Characteristic of tandem organic light-emitting diodes with charge generation layer of LiF/Al/F4-TCNQ/NPB

JING Shu^{1,2}, WANG Hua^{1,2}, LIU Hui-hui^{1,2}, DU Xiao-gang^{1,2},
MIAO Yan-qin^{1,2}, PAN Cheng-long^{1,2}, ZHOU He-feng^{1,3*}(1. *Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*2. *Research Center of Advanced Materials Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*3. *College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)*

Abstract: A novel type of tandem organic light emitting device (OLED) was demonstrated by employing LiF/Al/F4-TCNQ/NPB as charge generation layer (CGL). By contrast experiment, it is suggested that the optimum thickness of F4-TCNQ and Al in CGL is 8 nm and 5 nm, respectively, which

收稿日期:2014-03-25;修订日期:2014-04-17.

* 通信联系人, E-mail:zhouhefeng@tgut.edu.cn

exhibits the good ability of generating charges and higher optical transmittance. Based on the optimized structure of CGL, we fabricated the tandem OLED with the emission layer of CBP:6%Ir(ppy)₃. By comparing the device performance of the tandem OLED and conventional single OLED, it was found that the highest current efficiency and power efficiency were 51.6 cd/A and 28.4 lm/W, which was 2.16 times and 1.8 times as high as that of single OLED, respectively. In conclusion, the tandem OLED with the CGL of LiF/Al/F4-TCNQ/NPB can improve the power efficiency of OLED. In addition, replacing conventional inorganic metal oxide with organic material of F4-TCNQ in CGL can avoid the destruction of film formation of Al layer, inducing in improving in performance and weakening the efficiency roll-off phenomenon.

Key words: charge generation layer;tandem;OLEDs

1 引 言

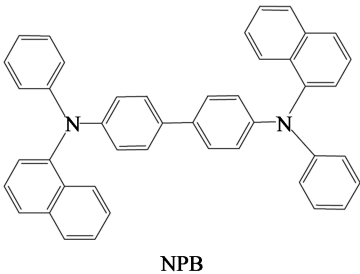
有机电致发光器件 (OLED; Organic Light Emitting Device), 具有驱动电压低、效率高、能实现大面积全色显示等优点, 在平板显示领域引起广泛的关注, 近年来成为国际上的研究热点^[1-8]。提高有机发光器件的效率和寿命一直是人们研究的课题, 为此, 日本的 Kido 等人首先提出了叠层 OLED 的概念, 即垂直层叠两个或多个发光单元以构成一个器件, 在各发光单元之间使用电荷产生层 (CGL; Charge Generation Layer) 连接, 所以高质量的 CGL 是制备叠层器件的关键^[2]。在叠层 OLED 器件中, CGL 产生的载流子是在电场的诱导下产生的, 产生的载流子在外界偏压的下向发光单元注入。自叠层器件概念提出以来, 不同 CGL 结构都被设计出来。例如: 三氧化钼 (MoO₃)^[9], 三羟基喹啉铝 (Alq₃); Mg/三氧化钨 (WO₃)^[10], 2,9-甲氧基丙二酸二甲酯 1-4,7-联苯 1-1,10-邻二氮杂菲 (BCP); Cs/五氧化二钒 (V₂O₅)^[11]等, 有报道称无机金属氧化物的蒸镀温度较高, 会造成 CGL 中相邻层薄膜的破坏, 无形中会降低叠层器件的性能, 降低了叠层器件的进一步实用化的可能^[5]。为此, 本文采用有机材料 F4-TCNQ 来代替传统的无机金属氧化物材料、采用 LiF/Al 代替传统 CGL 中的电子注入单元 (多为掺杂结构) 作为 CGL, 并且制备了基于此 CGL 的高效叠层器件, 简化了器件的制备工艺。

2 实 验

ITO 导电玻璃 (20 Ω/□) 分别在去离子水、

丙酮中反复超声清洗两遍, 每次超声 15 min, 待干燥后进行紫外光辐照处理 15 min 后, 在腔室真空度高于 4×10⁻⁴ Pa 的真空中沉积各层膜。将各有机功能层依次沉积于 ITO 玻璃之上, 蒸镀速率控制在 0.1~0.2 nm/s, 蒸镀 LiF 层时, 蒸镀速率约为 0.01 nm/s, 对于 CGL 中的 Al 层, 需同其他有机层一致, 蒸镀速率控制在 0.1~0.2 nm/s, 最后在 5×10⁻³ Pa 的真空度下覆盖阴极 Al, 在整个器件制备完成后对器件进行真空室内封装, 蒸镀无机材料 MgF₂ 作为封装层。蒸镀过程中采用石英晶体膜厚监测仪对有机功能层和 LiF 的厚度进行在线监测。器件的发光面积为 2 mm × 2 mm。通过由计算机控制的 Keithley 2400 和光谱扫描光度计 PR655 所构成的测试系统对器件的亮度—电流—电压、电致发光光谱进行测量。所有测量均在室温条件下大气环境中进行。

实验中所使用的材料分子式分别为 NPB(N, N'-二苯基-N, N'-二 (1-萘基)-1, 1'-联苯-4, 4'-二胺), CBP(4, 4'-二 (咔唑-9-基)-联苯), Ir(ppy)₃ (三 (2-苯基吡啶) 铱 (III)), BCP(2,9-甲氧基丙二酸二甲酯 1-4,7-联苯 1-1,10-邻二氮杂菲), F4-TCNQ(2,3,5,6-四氟-7,7,8,8-四氰二甲基对苯醌)。图 1 为工作中所使用有机材料的化学结构式。



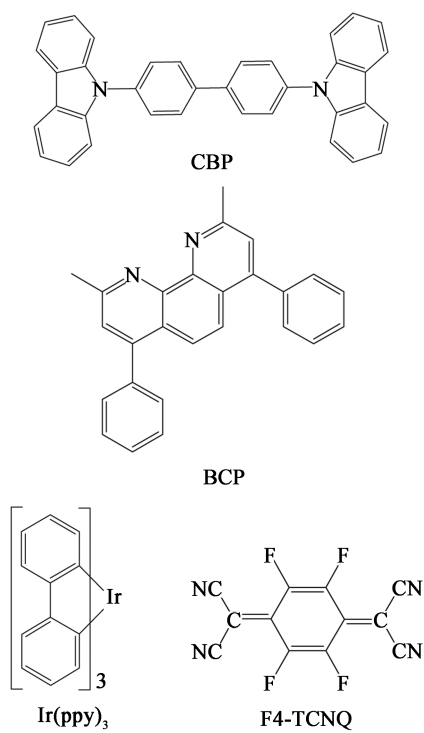


图 1 有机材料 NPB, CBP, BCP, Ir(ppy)₃ and F4-TCNQ 的化学结构式

Fig. 1 Chemical structures of NPB, CBP, BCP, Ir(ppy)₃ and F4-TCNQ used in this work

3 结果与讨论

3.1 CGL 最佳厚度的优化

首先制备了 CGL 的倒置型器件结构 ITO/Alq₃(50 nm)/LiF(1 nm)/Al(*x* nm)/F4-TCNQ(*y* nm)/NPB(10 nm)/NPB(40 nm)/Al(100 nm),通过改变 Al 和 F4-TCNQ 的厚度,确定最佳的 CGL 结构。

图 2 所示为基于 CGL 的倒置型器件偏压下的电荷的产生与传输过程。由于 ITO 与 Alq₃ 的最高占据轨道(HOMO 能级)有 1.0 eV 的势垒,空穴很难从阳极注入到 Alq₃ 中,同样 Al 阴极与 NPB 的最低控轨道(LUMO 能级)的 1.6 eV 的势垒也导致电子也很难从阴极注入到 NPB 中。器件加上偏压后,所测得的电流的大小则反应了 CGL 产生电荷的能力。从能级图中可以看出, CGL 的电荷产生在 F4-TCNQ/NPB 的界面, NPB 为 p 型有机层, F4-TCNQ 为 n 型有机层, NPB 费米能级较低且接近其 HOMO。相同地 F4-TCNQ 的费米能级会较高且接近其 LUMO。

当 p-n 结接触的时候,则费米能级会达到个平衡的等能级状态, n 型以及 p 型的费米能级结合在一起时, HOMO 以及 LUMO 间的变化会形成一个通道,如图 3 所示, 当外加电场的时候, 在 p-n 结上的电子空穴的偶极子因为内建电场弱于外加电场, 所以将被分开成空穴与电子, 利用隧穿效应通过通道后分别注入 OLED 器件内。

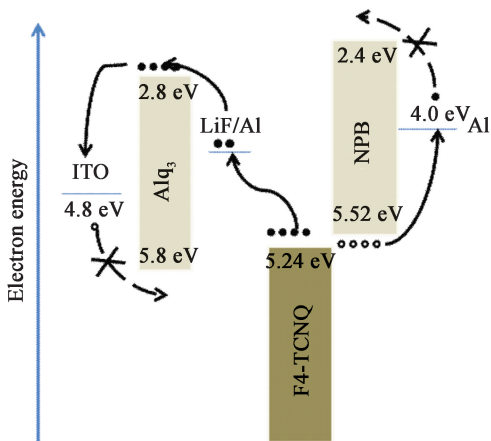


图 2 倒置型器件结构在偏压下的电荷产生与传输过程

Fig. 2 Charge generation and separation process of the inverted devices under forward bias

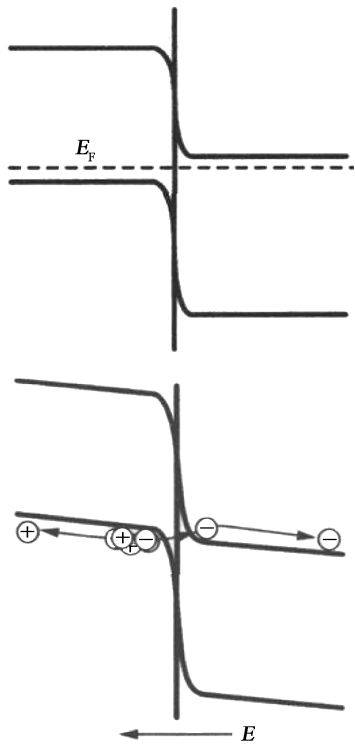


图 3 CGL 的机制图解

Fig. 3 Illustration of mechanism of CGL

图 4 展示了倒置型器件中 F4-TCNQ 取不同厚度时的 J - V 曲线,倒置型器件结构为 ITO/ Alq_3 (50 nm)/LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(y nm)/NPB(10 nm)/NPB(50 nm)/Al(100 nm), y 分别取 1、2、4、6、8、10 nm。从图 3 可以看出,当 F4-TCNQ 的厚度为 8 nm 时,器件的电流密度达到最大,F4-TCNQ 的厚度增加至 10 nm 时,器件的电流密度却降低,可见厚度为 10 nm 的 F4-TCNQ 作为 CGL 产生电荷的能力低于 8 nm 的 F4-TCNQ,故最佳的 F4-TCNQ 厚度为 8 nm。

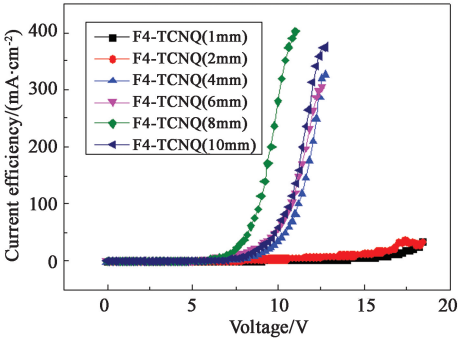


图 4 倒置型器件中 F4-TCNQ 取不同厚度时的 J - V 曲线

Fig. 4 J - V curves of inverted devices with different thickness F4-TCNQ

图 5 展示了倒置型器件中 Al 取不同厚度时的 J - V 曲线,器件结构为 ITO/ Alq_3 (50 nm)/LiF(1 nm)/Al(x nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)/NPB(50 nm)/Al(100 nm), x 分别取 0、1、3、5、7 nm。从图中可以看出,当 CGL 中 Al 厚度为 5 nm 和 7 nm 时的电流密度远大于 1 nm 和 3 nm 所对应的电流密度,Al 厚度为 1 nm 和 3 nm

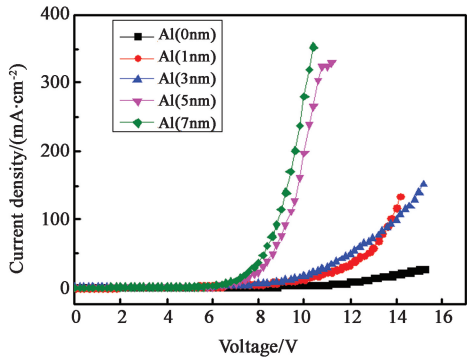


图 5 倒置型器件中 Al 取不同厚度时的 J - V 曲线

Fig. 5 J - V curves of inverted devices with different thickness Al

时,器件的电流密度远小于 5 nm 时的电流密度,说明非常薄的 Al 层不能够有效传输电子,导致 CGL 的效率不高。此外,当 Al 的厚度小于 5 nm 时,蒸镀形成的铝膜会有孔隙,导致累积在界面左侧的电子不能够进行有效的传输。

图 6 展示了不同厚度 Al 的 CGL 所对应的透光率,5 nm Al 对应的 CGL 在 516 nm 处的透光率为 92.17 %,而 7 nm Al 对应的 CGL 在 516 nm 处的透光率为 87.31%。相比较而言,5 nm 的 Al 所对应的 CGL 的透光率远大于 7 nm 的透光率,而从图 6 可以看出,5 nm Al 倒置型器件产生电荷的能力略小于 7 nm 的,综合两者可以确定,经过优化的 CGL 的最佳结构为 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)。

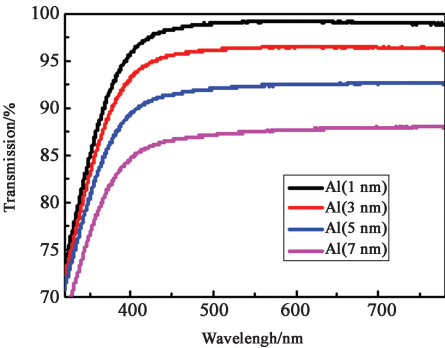


图 6 Al 取不同厚度 CGL 的透光率

Fig. 6 Optical transparency of CGL with different thicknesses Al

3.2 叠层器件的制备以及与单层器件的对比

采用 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)作为 CGL 制备了双发光层的叠层器件 A,并制备了单发光层器件 B 作为参考。结构如下:

器件 A:

ITO/NPB(40 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃(30 nm)/BCP(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)/NPB(40 nm)/CBP:6%Ir(ppy)₃(30 nm)/BCP(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)

器件 B:

ITO/NPB(40 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃(30 nm)/BCP(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)

图 7 给出了器件 A 与 B 的亮度和电流密度随电压的变化关系,在相同的电流密度 10 mA/

cm^2 下,叠层器件 A 与单层器件 B 的亮度分别为 $4\,484\text{ cd/m}^2$ 、 $2\,256\text{ cd/m}^2$,器件 A 的亮度为器件 B 的 1.98 倍。说明在一个外加偏压下,叠层结构能够使得载流子在两个发光单元复合,形成的激子数是单层的二倍,所以亮度也会增加至单层的二倍。随电压的增加,器件 A 的电流密度远小于器件 B 的电流密度,是因为叠层结构能够有效的降低器件的电流密度,使得更多的载流子复合并辐射发光,从图 8 器件 A 的能级结构可以看到,叠层器件 A 在使用结构为 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 的 CGL 后,从阳极注入的漏电流(空穴)能够到达 CGL 中的 F4-TCNQ,从而分离再注入到发光层中,同时,来自阴极产生的漏电流(电子)会到达 CGL 再分离利用,这样会减少漏电流,使得器件 A 的电流密度减小,增加两侧发光层载流子的复合几率,使得在相同的电流密度下器件的亮

度会增加为单层器件的 2 倍。从图 6 中还可以观察到器件 A 的工作电压和阈值电压要大于单层器件 B,但小于单层器件 B 的 2 倍。例如,在 100 cd/m^2 相同亮度下,普通单层器件 B 的工作电压为 4.1 V ,而叠层器件 A 只有 5.4 V ,电压的增幅仅为 31%,同时,可以看到,叠层器件 A 的阈值电压为 4.5 V ,远小于单层器件 B 的阈值电压 (3.1 V) 的 2 倍,这表明:相对于传统的叠层结构的 OLED 器件^[14],LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)作为 CGL 具有较低的阈值电压。

图 9 给出了叠层器件 A 与单层器件 B 的电流效率、功率效率随电流密度的变化曲线。在电流密度为 10 mA/cm^2 时,器件 A 与 B 的电流效率分别为 42.8 、 22.6 cd/A ,器件 A 的效率提升为器件 B 的 1.9 倍。而叠层器件 A 的最大电流效率为 51.6 cd/A ,为单层器件 B 最大效率的 2.16 倍。这是因为叠层器件 A 能够降低在相同亮度下器件的工作电流,使得器件的电流效率提高。

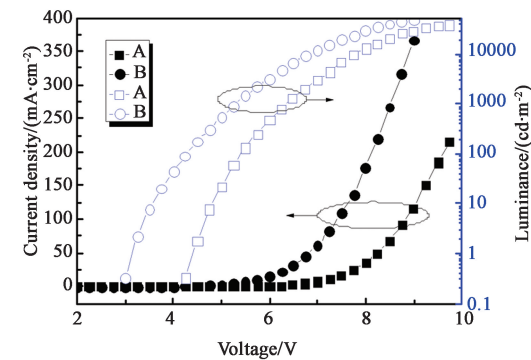


图 7 器件 A 与器件 B 的亮度和电流密度随电压的变化关系

Fig. 7 Luminance-current density-voltage curves of devices A and B

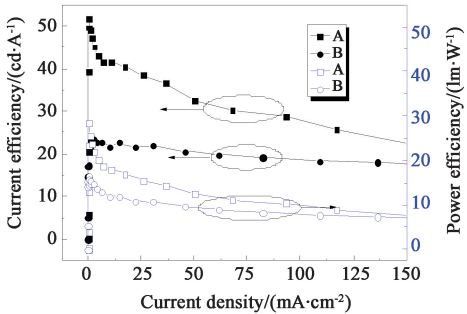


图 9 器件 A 与器件 B 的电流效率和功率效率随电流密度的变化关系

Fig. 9 CE-PE-J curves of devices A and B

从图 9 中还可看出,叠层器件 A 的功率效率随电流密度比器件 B 的功率效率有大幅度的提高,最大功率效率为 28.4 lm/W ,高于单层器件 B。图 10 展示出了器件 A 与 B 的功率效率随亮度的变化曲线。在亮度为 100 cd/m^2 时,叠层器件 A 的功率效率为 28 lm/W ,器件 B 的功率效率为 16 lm/W ,相对于单层器件 B 来说,器件 A 的功率效率提高了 1.75 倍。在亮度为 $1\,000\text{ cd/m}^2$ 时,器件 A 的功率效率提高至器件 B 的 1.57 倍。这是由于叠层器件 A 的工作电压与启亮电压均降至单层的 2 倍以内,使得功率效率大大提高。

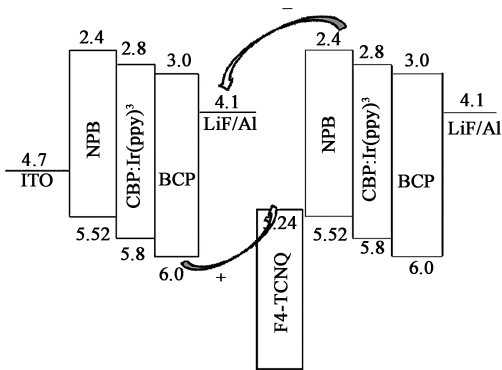


图 8 器件 A 的能级图

Fig. 8 Energy level diagram of device A

在前人的研究报道中指出,在叠层结构的 OLED 过程中,其亮度和电流效率成倍增加的同时,电压也将成倍增加,这将引起器件的功率效率降低^[13-14]。而本文使用 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8nm)/NPB(10 nm)作为 CGL 能够有效的降低器件的工作电压是因为使用双层 LiF(1 nm)/Al(5 nm)作为电子传输层,在电场的作用下,电子可以沿着 F4-TCNQ 的 LUMO 能级以较低的势垒注入到 Al 中,最后注入到发光单元中。而 CGL 中所使用的材料 NPB 与发光单元中的空穴传输材料相同,使得堆积在界面附近的空穴会很容易注入并传输至发光层内。这样会减少 CGL 向两个发光单元注入电荷的困难,从而降低了器件的工作电压和启亮电压,使得叠层器件的功率效率提高至单层的 1.8 倍。结果表明 CGL LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)能高效地产生并传输电荷。

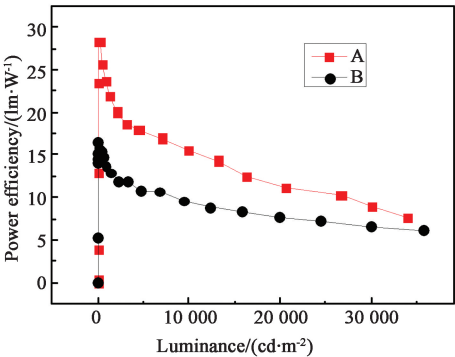


图 10 器件 A 与器件 B 的功率效率随亮度的变化关系
Fig. 10 PE-L curves of devices A and B

3.3 CGL 中 F4-TCNQ 的作用

为证明 CGL 能够缓解无机非金属氧化物给叠层器件带来的不利影响,我们制备了基于 CGL LiF(1 nm)/Al(5 nm)/MoO₃(8 nm)/NPB(10 nm)的叠层器件 C,并与器件 A 进行对比。

器件 C:

ITO/NPB(40 nm)/CBP: 6% Ir(ppy)₃(30 nm)/BCP(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(5 nm)/ MoO₃(8nm)/NPB(10 nm)/NPB(40 nm)/CBP: 6% Ir(ppy)₃(30 nm)/BCP(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)

图 11 中给出了基于不同连接层的叠层器件,器件 A 的 CGL 为 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TC-

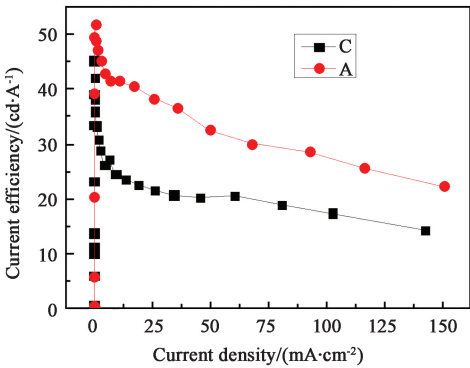


图 11 器件 A 与器件 C 的电流效率随电流密度的变化关系
Fig. 11 CE-J curves of devices A and C

NQ(8 nm)/NPB(10 nm),器件 C 的 CGL 为 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/ MoO₃(8 nm)/NPB(10 nm)。从图中显示的数据可以看出,器件 C 与器件 A 的最大效率相当,分别为 45.2、51.6 cd/A,但随着电流密度的增加,叠层器件 A 的效率下降缓慢,而器件 C 的效率减弱的很迅速,说明器件 A 所使用的 CGL 能够很好地减轻器件的 roll-off 现象。这是由于 F4-TCNQ 的蒸镀温度较低,不能够破坏 Al 层薄膜,使得 CGL 所产生的电子在高电压和高电流密度下能够很好地注入到发光单元中,提高器件的性能。另一方面,由于金属氧化物 MoO₃ 的透过率远小于有机材料 F4-TCNQ 的透过率,能够使得靠近阴极的发光层发射很好地透射出光。所以基于连接层 LiF(1 nm)/Al(5 nm)/F4-TCNQ(8 nm)/NPB(10 nm)的器件 A 的性能优于器件 C 的性能。

4 结 论

基于新型结构的 CGL,即 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB,优化了产生电荷的最佳厚度,并且制备了基于 CBP: 6% Ir(ppy)₃ 为发光单元的叠层器件与单层器件,比较叠层器件与单层器件,可知其效率、在一定电流密度下所对应的光谱均为普通单层器件的 2 倍。叠层器件的最大电流效率与功率效率分别为 52.6 cd/A、28.4 lm/W。通过对叠层器件电流效率与功率效率的分析,更加深入了解 CGL 的内在机理。与叠层对比器件的比

较结果能够说明本文所用的 CGL 能够很好地缓解由于高温无机非金属氧化物所带来的缺陷。结果表明,结构为 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 的 CGL 可以用来制备高效叠层 OLED。

参 考 文 献:

[1] Kido J, Matsumoto T, Nakada T, *et al.* High efficiency organic EL devices having charge generation layers [J]. *SID Int. Symp. Dig. Tech.*, 2003, 34(1): 964-965.

[2] 朱海娜,徐征,郑宁. 利用多周期量子阱结构提高有机发光二极管的效率[J]. 液晶与显示, 2013, 28(2): 188-193.
Zhu H N, Xu Z, Zheng N. Enhancing the efficiency of organic light emitting diode by using multi-period quantum well structure [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 188-193. (in Chinese)

[3] 黄晋,张方辉,张微. 绿红双发光层有机电致磷光器件的载流子调控研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(1): 22-27.
Huang J, Zhang F H, Zhang W. Regulation of carriers in double organic electroluminescent phosphorescent emitting layer (green and red) [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(1): 22-27. (in Chinese)

[4] Zhang H M, Wallace C H, Dai Y F, *et al.* The structural composite effect of Au-WO₃-Al interconnecting electrode on performance of each unit in stacked OLEDs [J]. *Organic Electronics*, 2009, 10: 402-407.

[5] 陈永华,马东阁. 有机半导体异质结电荷产生层及其在叠层有机发光二极管中的应用[J]. 中国科学通报, 2011, 56(24): 1947-1955.
Chen Y H, Ma D G. Organic semiconductor heterojunction charge generation layer and its application in tandem organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Sci Bull (Chinese Ver)*, 2011, 56(24): 1947-1955. (in Chinese)

[6] Wang Q, Chen Y H, Chen J S, *et al.* White top-emitting organic light-emitting diodes employing tandem structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(13): 133302.

[7] 王摇丽,吴晓明,华玉林. 插入电荷控制层对蓝色 OLED 发光性能的提高[J]. 发光学报, 2014, 35(1): 84-89.
Wang L, Wu X M, Hua Y L. Improvement of performance of a blue organic light-emitting diode by inserting charge control layers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(1): 84-89. (in Chinese)

[8] 袁桃利,张方辉,张微. 空穴传输层对有机电致发光器件性能的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(11): 1457-1461.
Yuan T L, Zhang F H, Zhang W. The electroluminescent performance of OLED based on different hole transport layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(11): 1457-1461. (in Chinese)

[9] Kanno H, Holmes R J, Sun Y, *et al.* White stacked electrophosphorescent organic light-emitting devices employing MoO₃ as a charge-generation layer [J]. *Adv. Mater.*, 2006, 18(3): 339-342.

[10] Chang C C, Hwang S W, Chen C H, *et al.* High-efficiency organic electroluminescent device with multiple emitting units [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, 43: 6418-6422.

[11] Matsumoto T, Nakada T, Endo J, *et al.* Multiphoton organic EL device having charge generation layer [J]. *SID Int. Symp. Dig. Tech.*, 2003, 34(1): 979-981.

[12] Lee H D, Lee S J, Lee K Y, *et al.* High efficiency tandem organic light-emitting diodes using interconnecting layer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, 48: 082101.

[13] Liao L S, Slusarek W K, Hatwar T K, *et al.* Tandem organic light-emitting mode using hexaazatriphenylene hexacarbonitrile in the intermediate connector [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(2): 324-329.

[14] Liao L S, Klubek K P, Tang C W. High-efficiency tandem organic light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(2): 167-169.

作者简介:景姝(1989—),女,山西芮城人,硕士研究生,主要从事叠层有机电致发光器件的研究。E-mail: jingshu23008@126.com

周禾丰(1959—),男,北京人,教授,主要从事有机电致发光材料以及器件的研究。E-mail: zhouhefeng@tyut.edu.cn