

具有PEDOT：PSS/HAT-CN双空穴注入层的高效柔性OLED器件

赵紫玉, 张方辉, 赵会, 林志超, 薛震, 丁磊

引用本文:

赵紫玉, 张方辉, 赵会, 等. 具有PEDOT：PSS/HAT-CN双空穴注入层的高效柔性OLED器件[J]. 液晶与显示, 2020, 35(2): 99–107.

ZHAO Zi-yu, ZHANG Fang-hui, ZHAO Hui, et al. High-efficiency flexible OLED devices with PEDOT: PSS/HAT-CN double hole injection layer[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2): 99–107.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203502.0099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于纳米压印 PET 基底的高效柔性有机电致发光器件

High-efficiency flexible organic light-emitting diodes on nanoimprinted PET substrate

液晶与显示. 2016, 31(8): 733–739 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163108.0733>

在Liq中掺杂Yb作为电子注入层修饰电极Yb/Al

Yb/Al electrode modified by Yb-doped Liq electron injection layer

液晶与显示. 2020, 35(3): 189–197 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203503.0189>

一种含液晶基元的新型铱配合物的合成与发光性能研究

Synthesis and electrophosphorescence of a novel Iridium(III) complex containing liquid-crystal fragment

液晶与显示. 2015(5): 752–756 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0752>

透明叠层结构Ag/MoO3/Ag阳极对绿光OLED器件性能的影响

Effects of transparent Ag/MoO3/Ag stack as anode on the performance of green organic light-Emitting diodes

液晶与显示. 2016, 31(1): 74–79 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163101.0074>

原子层沉积方法制备低温多层Al2O3/TiO2复合封装薄膜的研究

Low-temperature multi-layer Al2O3/TiO2 composite encapsulation thin film by atomic layer deposition

液晶与显示. 2016, 31(6): 532–539 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0532>

文章编号:1007-2780(2020)02-0099-09

具有 PEDOT : PSS/HAT-CN 双空穴注入层的高效柔性 OLED 器件

赵紫玉¹, 张方辉^{1*}, 赵 会¹, 林志超¹, 薛 震², 丁 磊^{1*}

(1. 陕西科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 陕西莱特光电材料股份有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:为了研究不同的空穴注入层修饰柔性衬底对柔性 OLED 器件性能的影响, 本文采用 HAT-CN、PEDOT : PSS、PEDOT : PSS/HAT-CN 3 种空穴注入层制备柔性 OLED 器件。设计的器件结构为 PET/ITO/HIL/TAPC (60 nm)/CBP : Ir(ppy)₃ (20 nm, 10%)/TmPyPB (45 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm)。采用旋涂的方法制备了 PEDOT : PSS, 其余有机层及阴极采用真空蒸镀法制备。结果表明, 采用 PEDOT : PSS/HAT-CN 复合薄膜作为空穴注入层的柔性 OLED 器件性能最优。该器件的最大电流效率和最大功率效率分别为 84 cd/A 和 76 lm/W。研究表明, 经 PEDOT : PSS 修饰的柔性衬底表面更为连续及平滑, 不容易使器件发生漏电及短路现象; 同时 PET/ITO/PEDOT : PSS/HAT-CN 复合薄膜在绿光波段有较高的透过率, 可以提高器件的出光率; 另外该双空穴注入结构使器件内部载流子的注入处于动态平衡状态, 增加了电子和空穴载流子的复合概率。

关键词:有机电致发光; 双空穴注入层; 柔性; PEDOT : PSS; HAT-CN

中图分类号:TN383⁺. 1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20203502.0099

High-efficiency flexible OLED devices with PEDOT : PSS/HAT-CN double hole injection layer

ZHAO Zi-yu¹, ZHANG Fang-hui^{1*}, ZHAO Hui¹,
LIN Zhi-chao¹, XUE Zhen², DING Lei^{1*}(1. School of Electric and Information Engineering,
Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;
2. Shaanxi Light Optoelectronics Material Co., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to study the effect of different hole injection layers on the performance of flexible OLED devices, HAT-CN, PEDOT : PSS and PEDOT : PSS/HAT-CN were used to prepare flexible OLED devices and measure their performance parameters. The device structure is PET/ITO/HIL/TAPC (60 nm)/CBP : Ir(ppy)₃ (20 nm, 10%)/TmPyPB (45 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm). PEDOT : PSS was prepared by spin coating, and the other organic layers and cathode were prepared by vacuum evaporation. The results show

收稿日期:2019-07-13; 修订日期:2019-10-10.

基金项目:国家自然科学基金 (No.61605105); 陕西省重点研发计划 (No. 2017ZDCXL-GY-06-03)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61605105); Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (No. 2017ZDCXL-GY-06-03)

* 通信联系人, E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn; dinglei@sust.edu.cn

that the flexible OLED device with PEDOT : PSS/HAT-CN composite film as hole injection layer has the best performance. The maximum current efficiency and power efficiency can reach 84 cd/A and 76 lm/W. The research shows that the surface of the flexible substrate modified by PEDOT : PSS has better continuity and smoothness, so that the phenomenon of leakage and short circuit is reduced; meanwhile, the composite film of PET/ITO/PEDOT : PSS/HAT-CN has a higher transmittance in green light band, which can improve the extraction efficiency of the device. Moreover, the injection of carriers in this device is in balance, increasing the compound probability of electrons and holes.

Key words: OLEDs; double HIL; flexible; PEDOT : PSS; HAT-CN

1 引言

柔性 OLED 不仅具备普通 OLED 器件功耗低、响应时间快、色域广、环保、自发光等优点,而且还具备良好的柔韧性,更轻薄、更耐冲击,可广泛应用于可穿戴设备、智能手机、智能手表、VR/AR 眼镜、电子纸、柔性照明面板等设备中^[1-8],极大方便了人们的生活。然而柔性聚合物衬底因表面粗糙度高、熔点低、水氧透过率高的缺点,一直制约着柔性 OLED 的发展^[9]。低温制程 ITO 阳极的方法导致 ITO 导电薄膜透明度低、电阻率高,空穴注入能力弱^[10];同时薄膜沉积具有一定的保形性,粗糙的衬底导致阳极会呈现出凹凸不平的状态,容易出现器件短路的问题,从而造成不可挽回的损坏。OLED 属于双载流子注入型器件,增强载流子的注入能力、促进载流子的注入平衡是提高 OLED 性能的关键所在。在阳极与空穴传输层之间引入空穴注入层作为缓冲层,是修饰平滑阳极、增强阳极与空穴传输层之间的功函数匹配度,提升柔性 OLED 阳极端的空穴注入能力、促进器件内部载流子平衡的一种重要手段。聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT : PSS)水溶液可通过旋涂的方式形成一种具有良好的导电性、透光性、柔韧性以及热稳定性,且与 ITO 能级匹配的薄膜,被广泛应用于空穴注入层^[11]。Wu 等^[12]采用高导 PEDOT : PSS 修饰石墨烯阳极,降低了石墨烯阳极的表面粗糙度以及方阻,成功制备出了最高效率为 1.09 cd/A 的绿色荧光柔性 OLED 器件。Zhao 等^[13]采用 PEDOT : PSS/三氧化钼(MoO_3)复合型空穴注入层将阳极功函数提升至 6 eV,使阳极与空穴传输层之间的注入势垒有了大幅度下降。2,3,6,7,10,11-六氰基-1,4,5,8,9,12-六氮杂苯

并非(HAT-CN)因其 LUMO 能级接近 ITO 功函数^[14],也常被用作空穴注入层使用。张静等^[15]采用 HAT-CN 作为空穴注入层得到了 CIE 色坐标 $x=0.330\ 9$, $y=0.347\ 2$, 电流效率为 6.4 cd/A 的高效白色荧光 OLED 器件。刘亚东^[16]等采用 HAT-CN/酞菁铜(CuPC)双空穴注入层制备了蓝光 ADN 器件。该结构有效地提高了器件的空穴注入效率,使得器件内部载流子注入较为平衡,最高效率达到了 1.5 cd/A。以上研究大多基于刚性衬底进行,而基于柔性衬底的研究还比较少见。

因此,本文首先对 PET/ITO 衬底进行了一定程度的耐弯能力测试。并分别采用单层 HAT-CN、单层 PEDOT : PSS,以及新型 PEDOT : PSS/HAT-CN 复合薄膜作为空穴注入层在 PET/ITO 衬底上制备柔性 OLED 器件。研究了采用不同空穴注入层时 PET/ITO/HIL 复合薄膜的透过率变化情况以及所制备柔性 OLED 器件的性能变化情况。同时,以此为基础制备了发光面积为 80 mm×80 mm 的大面积柔性 OLED 器件。

2 实验

2.1 器件制备

PET/ITO 柔性衬底购买于华南湘城科技有限公司, PEDOT : PSS 溶液购买于上海贺利氏工业技术材料有限公司。有机材料购买于长春市阪和激光科技有限公司。柔性衬底的方阻由苏州晶格电子有限公司生产的 ST-2285C 型四探针测试仪测量。光学显微镜图像由 Nikon(日本)生产的 Nikon L200ND 拍摄。

2.1.1 PET/ITO 柔性衬底的刻蚀及清洗

使用苏州德龙激光有限公司生产的纳秒激光

刻蚀设备将 PET/ITO 柔性衬底刻蚀出阳极图案。将刻蚀好的带有 ITO 图案的柔性衬底依次用酒精、去离子水超声清洗 15 min。最后,将清洗好的柔性衬底放入温度为 100 °C 的烘箱中烘干待用。

2.1.2 PEDOT : PSS 薄膜的制备过程

使用 0.45 μm 的水相过滤头对 PEDOT : PSS 水溶液进行过滤处理。然后使用旋涂设备将过滤好的 PEDOT : PSS 水溶液以 1 500 r/min 的转速旋涂在清洗好的柔性衬底上,旋涂时间为 30 s。最后,将旋涂好的柔性衬底放入烘箱中在 100 °C 的温度下退火 15 min。

2.1.3 真空蒸镀过程

把准备好的柔性衬底移入 FS-100 有机金属热真空蒸镀设备腔体内,待真空度到达 5.3×10^{-4} Pa 时,加热蒸发源,依次蒸镀空穴注入层 HAT-CN、空穴传输层 4,4'-环己基二[N,N-二(4-甲基苯基)苯胺](TAPC)、发光层 4,4'-二(9-咔唑)联苯(CBP) : 三(2-苯基吡啶)合铱($\text{Ir}(\text{ppy})_3$)、电子传输层 3,3'-[5'-(3-(3-吡啶基)苯基)][1,1':3',1''-三联苯]-3,3''-二基]二吡啶(TmPyPB)、电子注入层 8-羟基喹啉-锂(Liq)以及阴极 Al。使用晶体振荡器监测膜厚及速率,有机材料的蒸发速率控制在 0.2 nm/s 左右,金属 Al 的蒸发速率控制在 0.5 nm/s 左右。

基于同样的制备过程,我们分别制备了以 HAT-CN、PEDOT : PSS、PEDOT : PSS/HAT-CN 为空穴注入层的 3 组器件,其结构为:

器件 A: PET/ITO/HAT-CN (10 nm)/TAPC (60 nm)/CBP : $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ (20 nm, 10%)/TmPyPB (45 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm);

器件 B: PET/ITO/PEDOT : PSS/TAPC (60 nm)/CBP : $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ (20 nm, 10%)/TmPyPB (45 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm);

器件 C: PET/ITO/PEDOT : PSS/HAT-CN (10 nm)/TAPC (60 nm)/CBP : $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ (20 nm, 10%)/TmPyPB (45 nm)/Liq (2 nm)/Al (100 nm)。

图 1 为制备器件的结构示意图。

2.2 器件性能测试

实验制备的器件由弗士达科学仪器有限公司生产的 FS-1000GA-OLED I-V-L 自动光学特性测试平台进行测量,测试参数包括电流值、电压

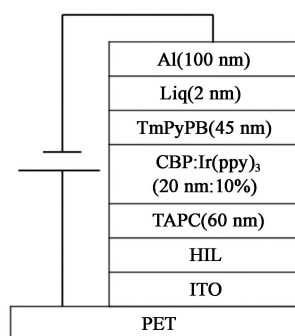


图 1 器件结构示意图

Fig.1 Configurations of the devices

值、亮度值、电流效率。透过率由 PerkinElmer (美国) 生产的紫外可见分光光度计 PE Lambda750 进行测量,测试范围为 380 ~ 780 nm。器件未经封装,均在室温下进行测量。

3 分析与讨论

图 2 为 PET/ITO 柔性衬底方阻随弯折次数变化的关系图。将 32 mm × 32 mm 的柔性衬底以 6 mm 为曲率半径进行弯折。从图中可以看出,弯折次数小于 500 次时,衬底方阻无明显变化;弯折大于 500 次后,方阻才会随着弯折次数的增加而出现线性上升。而柔性 OLED 器件损坏很大程度上是由阳极弯折过程中产生裂纹引起衬底表面方阻增加造成的。因此,从方阻的变化情况来看,本衬底具有一定程度的抗弯折能力,适用于柔性有机电致发光器件的制备。

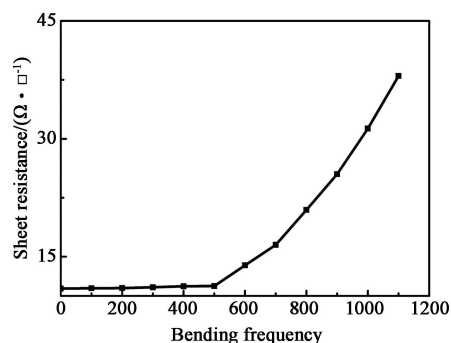


图 2 PET/ITO 衬底的方阻-弯折次数关系

Fig.2 Sheet resistance of PET/ITO vs. the repeated bending tests

图 3 为 PET/ITO 及 PET/ITO/HIL 复合薄膜在可见光范围内的透过率图。从图中可以看

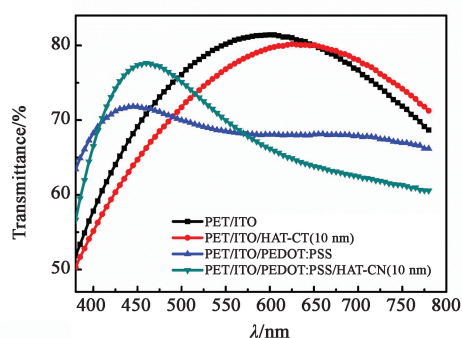


图 3 PET/ITO 及 PET/ITO/HIL 复合薄膜的透过率
Fig.3 Transmittance of PET/ITO and PET/ITO/HIL composite film

出,在绿光波段,空穴注入层的加入导致柔性衬底的透过率下降,PET/ITO/HIL 薄膜的透过率普遍低于 PET/ITO 柔性衬底的透过率。其中,PET/ITO/PEDOT:PSS 的薄膜透过率最低,而 PET/ITO/HAT-CN 复合薄膜在 515~560 nm 范围内透过率较高,PET/ITO/PEDOT:PSS/HAT-CN 在 500~515 nm 范围内较高。由增透膜原理可知,当薄膜两侧的反射光路程差满足公式(1):

$$2nd = (2k+1) \lambda/2, \quad (1)$$

其中: n 为薄膜的折射率, d 为薄膜厚度, k 取任意整数,薄膜两侧的反射光就会发生干涉相消,从而大大减少了光的反射损失,增强了光的透射率。因此,推测 PEDOT:PSS 蒸镀 HAT-CN 后复合薄膜透过率在特定波段上升的原因是:在蒸镀 HAT-CN 后,PET 基板上多层膜的厚度 d 和等效折射率 n 发生改变,致使多层膜两侧的反射光路程差约等于半个波长,达到了增透的效果。PET/ITO/PEDOT:PSS 与 PET/ITO/HAT-CN 之间复合薄膜的透过率差异则是由于材料自身的差异造成的。PEDOT:PSS 溶液为黑色,旋涂成为薄膜后颜色较深,导致其对入射光的吸收作用较强;而 HAT-CN 蒸镀成为薄膜后则呈浅色半透明状,对入射光的吸收能力较弱。

图 4 为 PET/ITO 及 PET/ITO/HIL 复合薄膜在光学显微镜下所拍摄的图像。如图 4(a)所示,PET/ITO 柔性衬底表面存在着诸多缺陷,这可能是由于 PET 基底本身较为粗糙导致 ITO 成膜不均匀造成的。这些缺陷极易引起器件产生漏电或短路的现象,从而影响器件性能。如图 4(b)

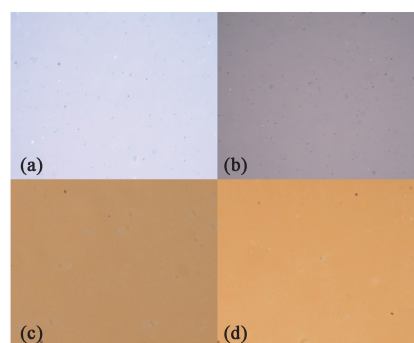


图 4 不同复合薄膜 PET/ITO (a)、PET/ITO/HATCN(b)、PET/ITO/PEDOT:PSS(c)和 PET/ITO/PEDOT:PSS/HAT-CN) (d) 的光学显微镜图像。

Fig.4 Optical microscope image of different composite films. (a) PET/ITO; (b) PET/ITO/HATCN; (c) PET/ITO/PEDOT:PSS; (d) PET/ITO/PEDOT:PSS/HAT-CN).

所示,由于蒸镀的 HAT-CN 膜层较薄,柔性衬底表面缺陷的改善情况并不明显。而从图 4(c)和图 4(d)中可以观察到,旋涂 PEDOT:PSS 之后,使得器件的表面更加连续及平滑,表面缺陷明显减少。

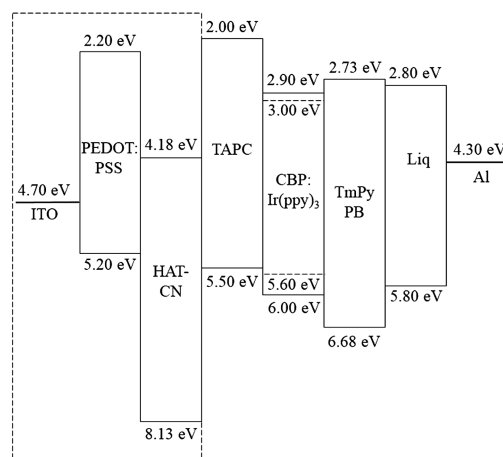


图 5 器件能级结构图

Fig.5 Energy band diagram of devices

图 5 为器件的能级结构示意图,能级值来源于参考文献[17-21]。磷光客体材料 Ir(ppy)₃ 的 LUMO 和 HOMO 能级分别为 3 eV 和 5.6 eV,介于主体材料 CBP 的 LUMO 和 HOMO 能级范围之间,有利于能量从主体转移至客体。空穴注入层 PEDOT:PSS 的加入可以有效地将阳极 ITO 到空穴传输层 TAPC 的注入势垒由 0.8 eV

降低至 0.3 eV,便于空穴的注入。HAT-CN 能级较为特殊,空穴会从 ITO 的费米能级经由 HAT-CN 的 LUMO 能级传递至 TAPC 的 HOMO 能级上,电子则从 TAPC 的 HOMO 能级跃迁至 HAT-CN 的 LUMO 能级之上,形成界面偶极子^[22]。且 HAT-CN 材料具有较强的吸电子特性,可以形成更多的界面偶极子从而增强空穴的注入^[23]。

图 6(a)为器件的电流密度-电压曲线。由图 6(a)可知,流经器件的总电流会随着电压的增高呈现出上升趋势,具有良好的整流特性。在同一电压下,流经以单层 PEDOT:PSS 作为空穴注

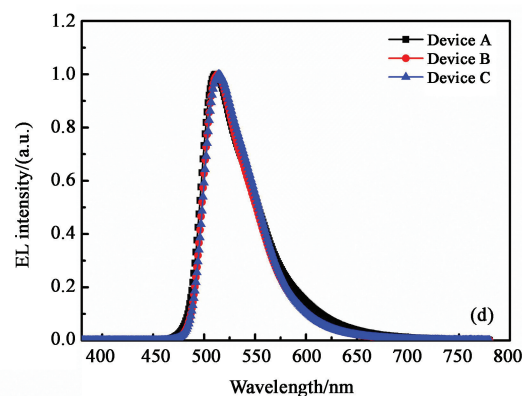
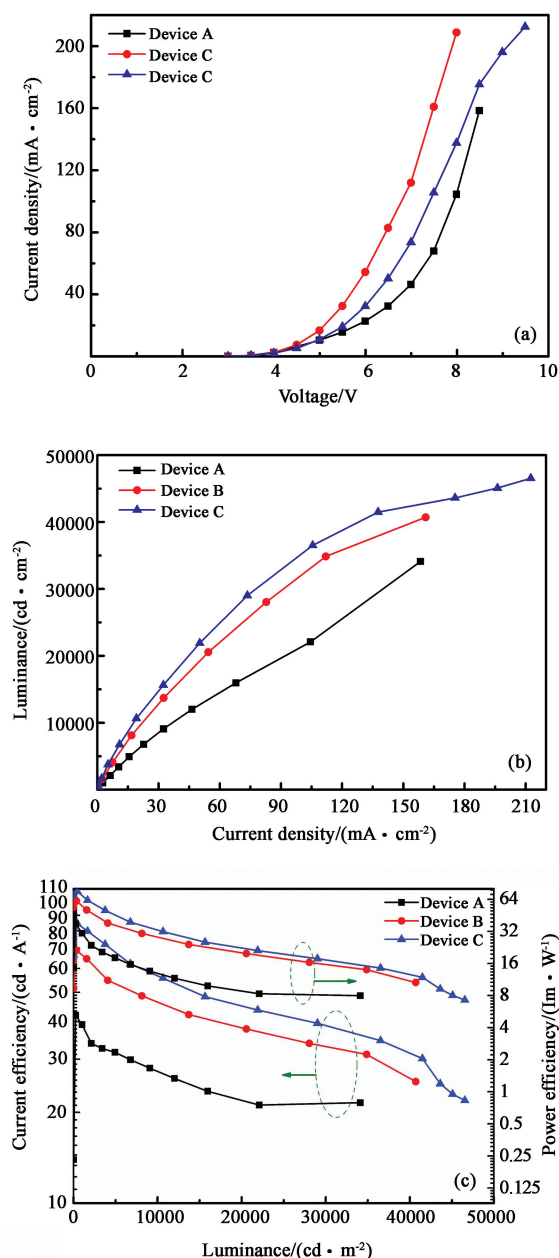


图6 器件的电致发光特性。(a)电流密度-电压曲线;(b)亮度-电流密度曲线;(c)电流效率/功率效率-亮度曲线;(d) 30 mA/cm^2 电流密度驱动下的归一化光谱。

Fig. 6 Electroluminescence characteristics of devices. (a) Current density-voltage characteristics; (b) Luminance-current density characteristics; (c) Current efficiency/power efficiency-luminance characteristics; (d) Normalized electroluminescence spectra in 30 mA/cm^2 .

入层的器件的总电流最高,流经以单层 HAT-CN 作为空穴注入层的器件的总电流最低。原因主要是由于不同空穴注入层存在着空穴注入能力的差异,空穴注入能力越强,总电流越高。其中,以单层 PEDOT:PSS 及以单层 HAT-CN 作为空穴注入层的器件均在 8 V 左右就被击穿,最大电流密度分别为 209 mA/cm^2 和 158 mA/cm^2 ;而采用 PEDOT:PSS/HAT-CN 作为双空穴注入层的器件击穿电压为 10 V 左右,最大电流密度为 213 mA/cm^2 。

图 6(b)为器件的亮度-电流密度曲线。由图 6(b)可知,在同一电流密度下,采用 PEDOT:PSS/HAT-CN 作为双空穴注入层的器件亮度最高,采用单层 HAT-CN 作为空穴注入层的器件亮度最低。器件 C 亮度高于器件 B 的原因主要有两方面:(1) PET/ITO/PEDOT:PSS/HAT-CN 薄膜绿光波段透过率高于 PET/ITO/PEDOT:PSS 薄膜,提高了器件的出光率;(2)该器件内部载流子处于动态平衡状态,增加了电子和空穴的复合概率,使得参与复合发光的电流较多,而贯穿器件的漏电流较少。器件 A 亮度最低,一方面是 PET/ITO/HAT-CN 薄膜表面缺陷

较多,容易形成漏电流造成的;另一方面则是由于其空穴注入能力较弱,致使器件内部载流子达不到动态平衡状态。

图 6(c)为器件的电流效率/功率效率-亮度曲线。由图 6(c)可知,采用 PEDOT : PSS/HAT-CN 作为双空穴注入层的器件效率最高。器件电流效率的定义为发光亮度与电流密度之比,结合图 6(b)可知,到达同样的发光强度时,器件 C 所

需要的电流密度最小,因此器件 C 的电流效率最高。同时,输出同等光强时,器件 C 所需的电功耗也较小,因此器件 C 的功率效率也较高。

图 6(d)为 30 mA/cm² 电流密度下器件的归一化光谱。3 条曲线几乎重合,波峰均位于 515 nm 左右,说明空穴注入层的改变并没有使器件的色坐标产生较大的漂移,空穴和电子仍在发光层内复合发光。器件的具体参数如表 1 所示。

表 1 器件性能参数

Tab.1 The performance parameters of devices

器件	初始亮度 ^a / (cd · m ⁻²)	电流效率 ^b / (cd · A ⁻¹)	功率效率 ^b / (lm · W ⁻¹)	光谱峰位 / nm	CIE1931 ^c / (x, y)
A	10	42, 41, 32	38, 35, 19	511	(0.30, 0.62)
B	11	69, 67, 43	62, 57, 25	514	(0.26, 0.65)
C	15	84, 82, 57	76, 70, 33	514	(0.26, 0.65)

a.初始亮度为 3 V 电压下所测得的亮度
b.从左向右依次为最大效率、亮度为 1 000 cd · m⁻²下效率和 10 000 cd · m⁻²下效率
c.色坐标为器件最高效率时的值

为了进一步明确各个空穴注入层的空穴注入能力,验证上述分析的正确性,制备了结构如下所示的空穴型器件,分别是:

Device D: PET/ITO/HAT-CN (10 nm)/TAPC (60 nm)/Al;

Device E: PET/ITO/PEDOT : PSS/TAPC (60 nm)/Al;

Device F: PET/ITO/PEDOT : PSS/HAT-CN (10 nm) /TAPC (60 nm)/Al。

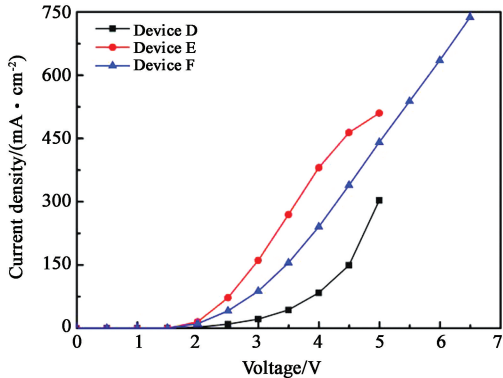


图 7 单空穴器件的电流密度-电压特性曲线
Fig. 7 Current density-voltage characteristics of single hole devices

图 7 为单空穴器件的电流密度-电压特性曲线。从图中可以看出,在同一电压下器件 D 的电流密度最大,说明采用单层 PEDOT : PSS 作为空穴注入层的器件拥有更强的空穴注入能力。在电子注入能力不变的情况下,空穴注入能力过多或过少都会影响器件内部载流子的动态平衡状态,最终影响器件性能。采用 PEDOT : PSS/HAT-CN 合适的空穴注入能力以及相对较高的透过率共同作用,最终使该器件拥有了较好的性能。

基于以上研究,本文采用 PEDOT : PSS/



图 8 大面积柔性 OLED 器件
Fig.8 Large area flexible OLED device

HAT-CN 作为空穴注入层,成功制备出了如图 8 所示的发光面积为 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的大面积柔性 OLED 器件。该器件的成功制备充分说明柔性 OLED 器件应用于大面积柔性照明面板中的无限可能性。

4 结 论

本文分别采用单层 HAT-CN、单层 PEDOT:PSS 以及新型 PEDOT:PSS/HAT-CN 复合薄膜作为空穴注入层修饰柔性衬底来制备柔性 OLED 器件。在旋涂 PEDOT:PSS 之后柔性衬

底表现得更为平滑。在 515 nm 处, PET/ITO/HAT-CN、PET/ITO/PEDOT:PSS/HAT-CN 复合薄膜透过率较高,均为 74% ; PET/ITO/PEDOT:PSS 透过率较低为 69% 。实验结果表明,采用新型 PEDOT:PSS/HAT-CN 双空穴注入层的器件性能更优。该器件最大亮度可达到 $46\,543\text{ cd/m}^2$,分别是其他两组器件的 1.2 倍和 1.4 倍;最大电流效率和最大功率效率可达到 84 cd/A 及 76 lm/W ,分别是其他两组器件的 1.2 倍和 2 倍。同时,大面积柔性 OLED 器件的成功制备,也证明了该类型器件在实际应用中的巨大潜力。

参 考 文 献:

- [1] LIU Y F, FENG J, ZHANG Y F, *et al.* Improved efficiency of indium-tin-oxide-free flexible organic light-emitting devices [J]. *Organic Electronics*, 2014, 15(2): 478-483.
- [2] XIANG C Y, KOO W, SO F, *et al.* A systematic study on efficiency enhancements in phosphorescent green, red and blue microcavity organic light emitting devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(6): e74.
- [3] LOZANO G, LOUWERS D J, RODRÍGUEZ S R, *et al.* Plasmonics for solid-state lighting: enhanced excitation and directional emission of highly efficient light sources [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(5): e66.
- [4] 杨桢林, 费纯纯, 成程, 等. 柔性有机发光二极管柔性电极薄膜的研究进展 [J]. 发光学报, 2019, 40(2): 238-256.
YANG Z L, FEI C C, CHENG C, *et al.* Review of flexible electrode film for flexible organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(2): 238-256. (in Chinese)
- [5] 王培, 王振, 陈爱, 等. 电子主体材料对蓝光 OLED 的影响 [J]. 发光学报, 2018, 39(7): 955-960.
WANG P, WANG Z, CHEN A, *et al.* Effects of host and electron transport materials on blue organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(7): 955-960. (in Chinese)
- [6] 刘士浩, 张祥, 张乐天, 等. 顶发射绿光量子点电致发光器件 [J]. 发光学报, 2018, 39(2): 156-161.
LIU S H, ZHANG X, ZHANG L T, *et al.* Research on top-emitting green quantum dots light-emitting devices. [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 156-161. (in Chinese)
- [7] 侯敏娜, 吴董宇, 卢国婧, 等. 高激子利用率的蓝光荧光材料及其激发态性质 [J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1659-1668.
HOU M N, WU D Y, LU G J, *et al.* Photophysical and excited state properties of blue fluorescent material with high exciton utilizing efficiency [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(12): 1659-1668. (in Chinese)
- [8] 陈文斌, 郭文瑞, 牟婉莹, 等. 喷墨打印和旋涂法制备有机电致发光显示器件中空穴注入及发光层的比较研究 [J]. 发光学报, 2018, 39(10): 1451-1457.
CHEN W B, GUO W R, MOU W Y, *et al.* Comparing of inkjet printing *versus* spin coating for preparing fine structure hole transfer and emitting layers in OLED display construction [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(10): 1451-1457. (in Chinese).
- [9] 段炼, 张黎, 张国辉. 柔性 OLED 制备及性能 [J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(4): 287-290.
DUAN L, ZHANG C, ZHANG G H. Preparation and behavior of flexible organic light emitting diodes [J]. *Sciencepaper Online*, 2010, 5(4): 287-290. (in Chinese)
- [10] ITO H, OKA W, GOTO H, *et al.* Plastic substrates for flexible displays [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(5B): 4325.
- [11] PEISERT H, PETR A, DUNSCH L, *et al.* Interface fermi level pinning at contacts between PEDOT:PSS and molecular organic semiconductors [J]. *ChemPhysChem*, 2007, 8(3): 386-390.

- [12] WU X X, LI F S, WU W, *et al.* Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT: PSS conductive film formed by spray-coating [J]. *Vacuum*, 2014, 101: 53-56.
- [13] ZHAO Y B, CHEN J S, CHEN W, *et al.* Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate)/MoO₃ composite layer for efficient and stable hole injection in organic semiconductors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(4): 043716.
- [14] DAI Y F, ZHANG H M, ZHANG Z Q, *et al.* Highly efficient and stable tandem organic light-emitting devices based on HAT-CN/HAT-CN : TAPC/TAPC as a charge generation layer [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(26): 6809-6814.
- [15] 张静, 张方辉, 阎洪刚. HAT-CN 作为空穴注入层的高效白色荧光有机电致发光二极管 (英文) [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(4): 490-495. (in English)
- ZHANG J, ZHANG F H, YAN H G. High efficiency white fluorescent organic light-emitting diodes with HAT-CN hole injection layer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(4): 490-495.
- [16] 刘亚东, 田杰, 宋新潮, 等. 组合空穴注入层在有机电致蓝光器件中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 259-262.
- LIU Y D, TIAN J, SONG X C, *et al.* Applications of combination hole injection layer in blue OLED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 259-262. (in Chinese)
- [17] 丁磊, 张方辉, 张麦丽, 等. 新型双空穴注入型高效有机电致发光二极管 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22(12): 1761-1764.
- DING L, ZHANG F H, ZHANG M L, *et al.* A novel high-efficiency organic lighting emitting devices with double hole injection layers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(12): 1761-1764. (in Chinese)
- [18] 杨君礼, 武聪伶, 李源浩, 等. 氧化石墨烯掺杂 PEDOT : PSS 作为空穴注入层对有机发光二极管发光性能的影响 [J]. *物理化学学报*, 2015, 31(2): 377-383.
- YANG J L, WU C L, LI Y H, *et al.* Effect of graphene oxide doped PEDOT: PSS as a hole injection layer on the luminescence performance of organic light-emitting diodes [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2015, 31(2): 377-383. (in Chinese)
- [19] YANG S Y, JIANG M X. White light generation combining emissions from exciplex, excimer and electromer in TAPC-based organic light-emitting diodes [J]. *Chemical Physics Letters*, 2009, 484(1/3): 54-58.
- [20] SU S J, CHIBA T, TAKEDA T, *et al.* Pyridine-containing triphenylbenzene derivatives with high electron mobility for highly efficient phosphorescent OLEDs [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(11): 2125-2130.
- [21] HAN J, KWON Y, SOHN J, *et al.* Highly enhanced phosphorescent organic light-emitting diodes with cesium fluoride doped electron injection layer [C]//*Proceedings of SPIE 9566, Organic Light Emitting Materials and Devices XIX*. San Diego: SPIE, 2015.
- [22] 张静, 张方辉. 双空穴注入的绿色磷光有机电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2012, 33(10): 1107-1111.
- ZHANG J, ZHANG F H. A green phosphorescent organic lighting emitting device with double hole injection layers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(10): 1107-1111. (in Chinese)
- [23] KIM Y K, KIM J W, PARK Y. Energy level alignment at a charge generation interface between 4,4'-bis(N-phenyl-1-naphthylamino)biphenyl and 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene-hexacarbonitrile [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(6): 063305.

作者简介:



赵紫玉(1996—)女,陕西渭南人,硕士研究生,2017 年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事于 OLED 器件方面研究,E-mail: 982129890@qq.com



张方辉(1966—)男,山西曲沃人,博士,教授,2008 年于陕西科技大学获得博士学位,主要从事于 OLED、LED 等研究,E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn



丁磊(1985—)男,陕西兴平人,博士,副教授,2015 年于苏州大学于得博士学位,主要从事于 OLED 器件方面研究,E-mail: dinglei@sust.edu.cn