

doi:10.3788/gzxb20184712.1223001

以 B3PyPPM 为电子传输层制备蓝色 磷光 OLED 器件

林雯嫣¹, 喻叶¹, 彭雪康¹, 金玉¹, 吴志军¹, 刘菁华^{1,2}

(1 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

(2 厦门市移动多媒体通信重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘 要:以 B3PyPPM 作为电子传输层, 分别以 TCTA 和 mCP 为母体, 制备 A、B 两组结构为 ITO/HATCN(5 nm)/TAPC(45 nm)/TCTA : Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM : Cs(15%, 10 nm)/Al, ITO/HATCN(5 nm)/TAPC(45 nm)/mCP(5 nm)/mCP : Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM : Cs(15%, 10 nm)/Al 的蓝色磷光器件, 其中 X 的值分别为 40 nm、45 nm、50 nm、55 nm。实验证明, mCP 作为母体的器件最大亮度和最大电流效率分别达到 14 930 cd/m²、9.9 cd/A, 亮度从 500 cd/m² 上升到 3 000 cd/m² 时, 外量子效率滚降仅仅只有 10.1%, 远优于以 TCTA 为母体器件的效率滚降特性, 由于 B3PyPPM 能够改善电子的注入特性, 两组器件的开启电压分别为 2.3 V 和 2.8 V, 低于采用其他电子传输层材料制备的 Firpic 蓝色磷光器件。在 30 mA/cm² 电流密度下, 器件光谱有一个波长在 474 nm 的主峰和 496 nm 的振动峰, 随着电子传输层厚度的增加, 振动峰的强度增强, 这是由微腔效应引起的, 通过光学模拟详细地研究了器件中存在的微腔现象。

关键词:有机半导体; 有机电致发光器件; 外量子效率; 微腔效应; n 掺杂

中图分类号: TN383+.1; TN312+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2018)12-1223001-7

Fabricating Blue Phosphorescent Organic Light-emitting Devices by Using B3PyPPM as Electron Transport Layer

LIN Wen-yan¹, YU Ye¹, PENG Xue-kang¹, JIN Yu¹, WU Zhi-jun¹, LIU Jing-hua^{1,2}

(1 College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

(2 Xiamen Key Laboratory of Mobile Multimedia Communication, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: We fabricated blue phosphorescent organic light-emitting devices of A and B groups by using B3PyPPM as electron transport layer and TCTA and mCP as host. The structure are: ITO/HATCN(5 nm)/TAPC(45 nm)/TCTA : Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM : Cs(15%, 10 nm)/Al and ITO/HATCN(5 nm)/TAPC(45 nm)/mCP(5 nm)/mCP : Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM : Cs(15%, 10 nm)/Al. The values of X are 40 nm, 45 nm, 50 nm, and 55 nm, respectively. Experiments show that the devices which use mCP as host is far better than the device using TCTA as host. The maximum luminance of 14 930 cd/m² and the maximum current efficiency of 9.9 cd/A are obtained. The efficiency roll-off in EQE is only 10.1% when the luminance rises from 500 cd/m² to 3 000 cd/m². Since B3PyPPM can improve the injection characteristics of electrons, the turn-on voltage of the two groups devices are 2.3 V and 2.8 V, respectively, which is lower than the Firpic blue phosphorescent OLEDs fabricated with other electron transport layer materials. At the current density of 30 mA/cm², the spectra of all devices have a major peaks at 474 nm and a vibrational peak at 496 nm. As

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61605049, 61575070, 11674111)资助

第一作者: 林雯嫣(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为有机电致发光器件. Email: linwy71@126.com

通讯作者: 刘菁华(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为有机电致发光器件. Email: jinghualiu1215@yahoo.com.hk

收稿日期: 2018-06-27; 录用日期: 2018-08-13

the thickness of B3PyPPM increases, the intensity of the shoulder increases due to the microcavity effect. The microcavity phenomenon existing in the device is studied in detail by optical simulation.

Key words: Organic semiconductor; Organic light-emitting device; External quantum efficiency; Microcavity effect; n-doping

OCIS Codes: 230.2090; 230.3670; 310.6860

0 引言

传统的照明消耗大量能源,据统计,我国目前有 12% 的能源应用于照明,目前用于照明的白炽灯和荧光灯中大部分能量会转化为热能而损耗,而使用最普遍的节能灯由于其主要成分水银会污染环境,也不是理想的照明用具,因此发展环保节能的照明用具十分紧迫.有机电致发光器件(Organic Light-emitting Devices, OLED)由于其驱动电压低、轻薄、用料广泛无污染、发光均匀柔和、健康护眼、可弯折、轻便易安装等特点,受到国内外研究者和生产商的关注和重视,并逐渐在固态照明中崭露头角,未来有望成为与发光二极管(Light Emitting Diode, LED)并驾齐驱的照明能源.

自 1994 年 Kido^[1] 制备了第一个白色有机电致发光器件(White Organic Light-emitting Devices, WLOED)以来,越来越多的科研人员投入到 WOLED 的研究中.影响白光器件性能的主要因素有蓝光部分的效率和寿命等,而高效的蓝光器件是得到高效的白光器件的基础和关键^[2],也是推动 WOLED 实现大规模产业化和应用的基础和关键因素.

目前使用的发光材料有荧光和磷光两种,荧光材料只有单线态激子参与发光,效率不高;磷光材料由单线态和三线态激子共参与发光,内量子效率可达到 100%,因此自从 1998 年 Forrest 等^[3]报道以后备受关注.含有重金属铱(Ir)的配合物二(4,6-二氟苯基吡啶-C2,N)吡啶甲酰合铱(iridium bis(4,6-difluorophenyl)-pyridinato-N,C2')picolinate, Firpic)^[4-5]是目前最常用的蓝色磷光材料.为了提高蓝色磷光器件的亮度和效率,母体材料起到决定性的作用.为了使主客体之间实现有效的能量转移,并且防止在主客体掺杂系统中客体材料的能量回传给主体材料,发光层母体一般选择能量高、禁带宽的材料^[6-8].分别以 4,4',4''-三(咔唑-9-基)三苯(4,4',4''-Tris(carbazol-9-yl) triphenylamine, TCTA)和 1,3-二-9-咔唑基苯(N,N'-dicarbazolyl-3,5-benzene, mCP)作为母体材料制备器件,同时,用 4,6-双(3,5-二(3-吡啶)基苯基)-2-苯基嘧啶(4,6-Bis(3,5-di(pyridin-3-yl) phenyl)-2-phenylpyrimidine, B3PyPPM)作为电子传输层材料.至今为止,还没有以 B3PyPPM 为电子传输层制作蓝色磷光器件的报道.B3PyPPM 最低未占轨道能级(Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO)较低,可以改善电子注入特性及降低器件的驱动电压^[9],同时具有较高的三线态能级(2.81 eV)^[10],能有效地将激子束缚在发光层内,有良好的应用潜力.此外,为了使发光层中的载流子数量更加平衡,将碱金属铯(Cesium, Cs)掺杂在 B3PyPPM 中,以提高电子的注入能力.

1 实验

1.1 ITO 玻璃预处理

依次加入 decon90、WIN188 清洗溶液、去离子水、酒精,在 60 °C 的温度下超声清洗 5~10 min,然后用干燥的氮气吹干,放入烘箱中烘干 30 min 后,进行等离子处理,再放入 LN-162SA 型多源有机气相沉积系统中.

1.2 器件的制备与测试

真空度达到 5.0×10^{-5} Pa 时,以热蒸镀的方式,按结构依次蒸镀坩锅中不同的有机材料,制备两组蓝色磷光器件,其结构分别为

$A_1 \sim A_4$:

ITO/HAT-CN(5 nm)/TAPC(45 nm)/TCTA:Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM:Cs(15%, 10 nm)/Al;

$B_1 \sim B_4$:

ITO/HAT-CN(5 nm)/TAPC(45 nm)/mCP(5 nm)/mCP:Firpic(15%, 15 nm)/B3PyPPM(X nm)/B3PyPPM:Cs(15%, 10 nm)/Al.其中 2,3,6,7,10,11-六氰基-1,4,5,8,9,12-六氮杂苯并菲(dipyrazino[2,3-f:2',3'-h]quinoxaline-2,3,6,7,10,11-hexacarbonitrile, HATCN)作为空穴注入层,以 4,4'-环己基二[N,N-

二(4-甲基苯基)苯胺](1,1- Bis[4-[N,N'-di(p-tolyl) amino]phenyl]cyclohexane, TAPC)作为空穴传输层, B3PyPPM 作为电子传输层 (Electronic Transport Layer, ETL), X 的值分别为 40 nm、45 nm、50 nm、55 nm, B3PyPPM:Cs 作为电子注入层, Firpic 作为发光层掺杂材料, TCTA 作为第一组器件的发光层母体, mCP 作为第二组器件的激子阻挡层和发光层母体, 能级结构如图 1 所示^[11-13]. OLED 的有效发光面积是 3 mm×3 mm, 实验的电压、电流、亮度等均由 keithley2400 程控电源及 LS-110 亮度计组成的测试系统进行测量, 光谱由 PR655 光谱仪和 keithley2400 程控电源组成的系统测量, 所有测量都是在充满氮气的手套箱中进行.

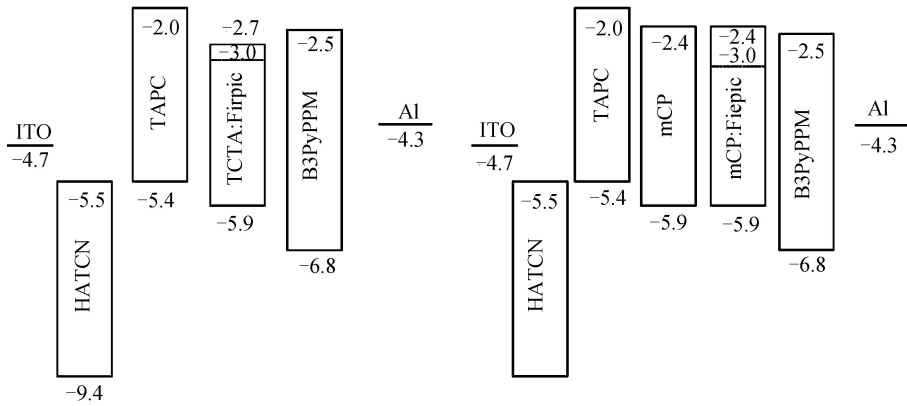


图 1 器件能级示意图

Fig.1 Energy level of the devices

2 实验结果及分析

图 2(a)、(b)是器件 A 组和 B 组的电流密度-电压曲线, (c)、(d)是器件 A 组和 B 组的亮度-电压曲线.从

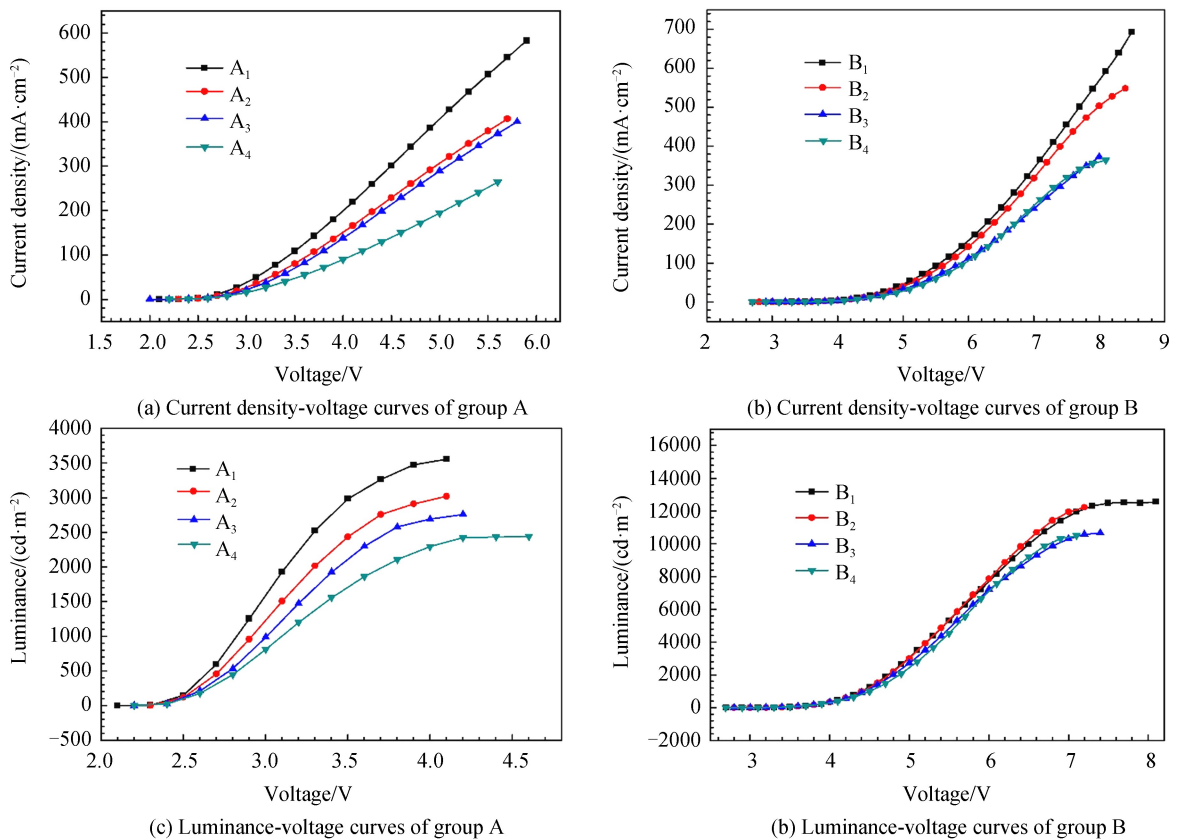


图 2 器件 A 组和 B 组的电流密度-电压曲线和亮度-电压曲线

Fig.2 Current density-voltage curves and luminance-voltage curves of group A and B

图中可知,电流密度随电压的增加而增加,但随着电子传输层厚度的增加,在相同电压下的电流密度逐渐减小,这是因为相同电压下,电子传输层越厚,器件厚度越大,电场越小,电流密度越小.在亮度方面,从图中可知,以 mCP 为母体的器件的亮度高于以 TCTA 为母体的器件,在 B3PyPPM 厚度为 40 nm 的时候,以 TCTA 为母体的器件的最大亮度仅为 $3\,554\text{ cd/m}^2$,明显低于以 mCP 为母体的器件的最大亮度 $14\,930\text{ cd/m}^2$.原因有两个:第一,mCP 的能带比 TCTA 宽 0.3 eV ;第二,mCP 的三线态能级比 TCTA (2.7 eV) 高 0.48 eV ^[14],所以,mCP 能更好地将能量传递给客体材料 Firpic,防止客体材料的能量回传给母体材料,且能够更好地防止蓝光激子的扩散^[15-16],避免能量的浪费,提高器件的亮度.此外,从图中还可知,A 组器件的开启电压在 2.3 V 左右,而 B 组器件的开启电压大约在 2.8 V ,高出 A 组器件 0.5 V ,这是由于 mCP 的 LUMO 轨道能级高出 B3PyPPM 0.1 eV ,而 TCTA 的 LUMO 能级低于 B3PyPPM 0.2 eV ,A 组器件电子传输层与母体之间较低的势垒降低了其开启电压.两组器件的开启电压都低于其他电子传输层材料(例如 1,3,5-三[(3-吡啶基)-3-苯基]苯(1,3,5-tri[(3-pyridyl)-phen-3-yl]benzene, TMPyPB)^[17-18], 1,3-双(3,5-二吡啶-3-基苯基)苯(1,3-bis[3,5-di(pyridin-3-yl)phenyl]benzene, B3PyPB), 4,6-双(3,5-二(3-吡啶)基苯基)-2-甲基嘧啶(4,6-Bis(3,5-di(pyridin-3-yl)phenyl)-2-methylpyrimidine, B3PyMPM), 4,6-双(3,5-二(4-吡啶)基苯基)-2-甲基嘧啶(4,6-Bis(3,5-di(pyridin-4-yl)phenyl)-2-methylpyrimidine, B4PyMPM)^[19-20])制备的 Firpic 蓝色磷光器件.Chen 等^[20]以 mCP 为母体,B4PyMPM 为电子传输层制备 Firpic 器件,电流效率和功率效率分别达到 12.43 cd/A 和 13.94 lm/W ,但是开启电压高达 3.11 V ,高于本实验中制备的以 mCP 为母体的器件的开启电压,这正是由于本实验中所采用的 B3PyPPM 的 LUMO 能级较低,从而降低了电子的注入势垒,进而改善器件的开启电压,体现了 B3PyPPM 优异的电子注入特性.

图 3(a)、(b)为 A 组器件的电流效率-亮度曲线和功率效率-亮度曲线,(c)是 B 组器件的功率效率-亮度-电流效率-亮度-电流效率曲线,表 1 为 A 组和 B 组器件亮度与电流效率、功率效率关系,从图 3(a)、(b)、(c)和表 1 可知,B 组器件的最大电流效率、 100 cd/m^2 、 $1\,000\text{ cd/m}^2$ 亮度下的电流效率都高于同种电子传输层厚度的 A 组器件,而 B 组器件的最大功率效率、 100 cd/m^2 亮度下的功率效率都低于 A 组器件,这是由于 B 组器件的开启电压

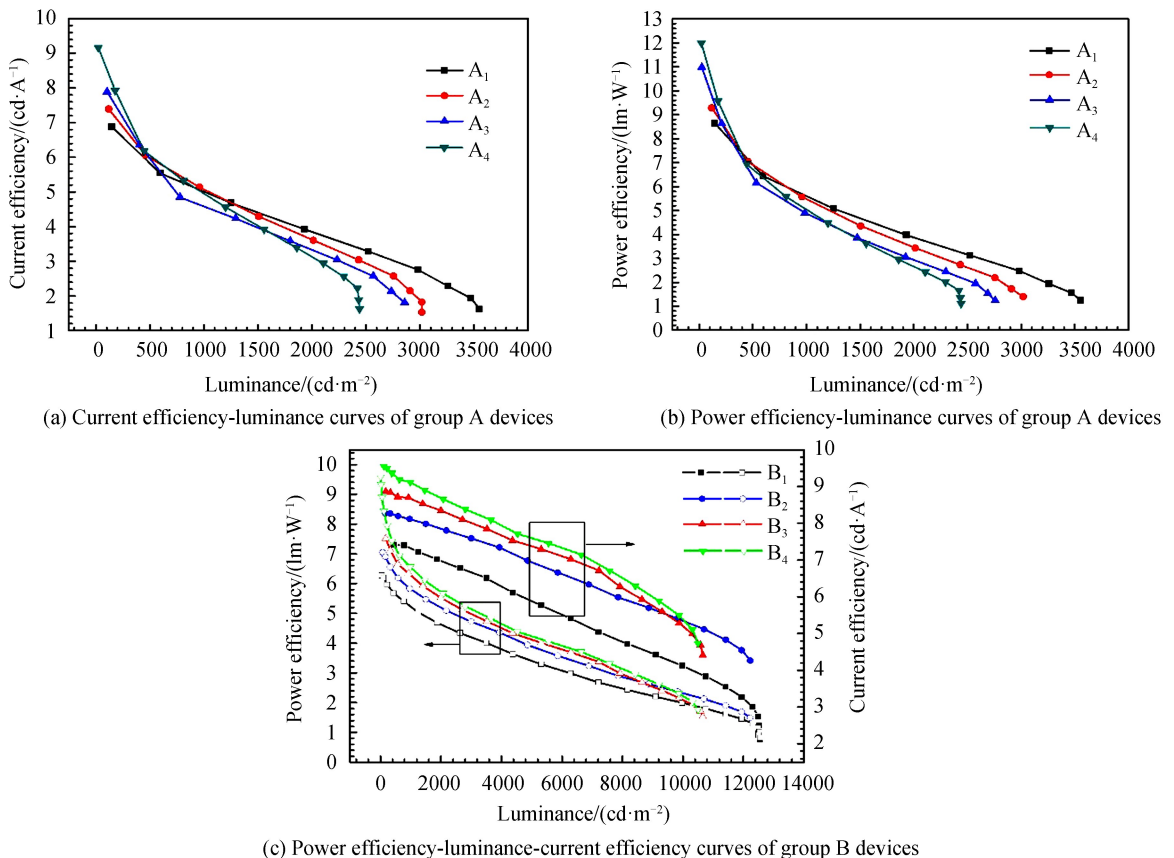


图 3 A 组和 B 组器件的功率效率-亮度-电流效率曲线

Fig.3 Power efficiency-luminance-current efficiency curves of group A and B devices

较大,使得功率效率较低.图 4 给出了 B3PyPPM 厚度为 40 nm 时,以 TCTA 和 mCP 为母体的器件 A1、B1 的外量子效率-亮度曲线,从中可以看出,器件亮度从 500 cd/m²上升到 3 000 cd/m²时,器件 A1 和 B1 的外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)滚降分别为 53.6%和 10.1%,器件 B1 的效率滚降程度远低于器件 A1,说明以 mCP 为母体的器件发光层内载流子数量更加平衡,避免以 TCTA 为母体的器件在高亮度大电流密度下三线态激子的三重态-三重态猝灭.

表 1 A 组和 B 组器件亮度与电流效率、功率效率关系

Table 1 Characteristics of luminance-current efficiency, power efficiency of group A and group B devices

Device	CE/(cd · A ⁻¹)			PE/(lm · W ⁻¹)		
	η_{Max}	η_{100}	η_{1000}	η_{Max}	η_{100}	η_{1000}
A1	7.2	7.0	4.8	9.4	9.1	5.4
A2	7.6	7.4	4.9	9.9	9.5	5.4
A3	8.4	7.9	4.6	10.8	10.0	4.9
A4	9.2	8.5	5.0	12.0	10.8	5.0
B1	7.4	7.3	4.1	6.3	6.2	5.2
B2	8.3	8.2	8.1	7.2	7.1	5.8
B3	9.1	8.3	8.9	7.5	7.1	6.3
B4	9.9	9.9	9.4	9.7	8.5	6.6

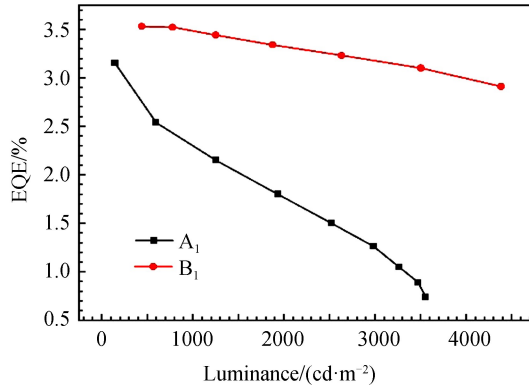
图 4 电子传输层厚度为 40 nm 下器件 A₁ 和 B₁ 的外量子效率-亮度曲线Fig.4 External quantum efficiency-luminance curve of device A₁ and device B₁ with electron transport layer thickness of 40 nm

图 5(a)、(b)分别是 A 组器件和 B 组器件在 10 mA/cm² 电流密度下的归一化电致发光光谱.从图中可知,A、B 两组器件都有一个在 474 nm 的主峰,以及一个波长在 496 nm 的偏振峰,为 Firpic 的特征光谱,此外,没有观察到任何传输层材料和母体材料发光,说明激子复合区域主要位于发光区中且母体和客体材料之间实现了充分的能量转移.随着电子传输层厚度的增加,偏振峰的强度逐渐增强,以 mCP 为母体,B3PyPPM 的厚度为 55 nm 的器件中,偏振峰的强度超过主峰,这是由于光学微腔效应引起的.具有发光层的发光薄膜结构可以用类似于 Smith 提出的用于描述法布里-珀罗结构的透射率的方法来表述

$$I_{\text{OLED}}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ T_{\text{anode},i} \left[1 + R_{\text{cathode},i} + 2\sqrt{R_{\text{cathode},i}} \cos \left(\frac{4\pi z_i \cos \theta_{\text{in}}}{\lambda} + \phi_{\text{cathode},i} \right) \right] \right\} / \left[1 + R_{\text{cathode},i} R_{\text{anode},i} - 2\sqrt{R_{\text{cathode},i} R_{\text{anode},i}} \cos \left(\phi_{\text{cathode},i} + \phi_{\text{anode},i} + \frac{4\pi L \cos \theta_{\text{in}}}{\lambda} \right) \right] I_0(z_i, \lambda) \quad (1)$$

式中, R_{anode} 和 R_{cathode} 是两个电极的反射值, ϕ_{anode} 和 ϕ_{cathode} 是反射镜的相移, T_{anode} 是从阳极出射的透射率, L 是有效腔长, $I_0(Z_i, \lambda)$ 是发光层的辐照度, $I_{\text{OLED}}(\lambda)$ 是通过衬底的辐照度, Z_i 是发光子层 i 与阴极的界面之间的光学距离, θ_{in} 是发光材料出射光束的角度,通过调节 $I_{\text{OLED}}(\lambda)$ 可以获得发光谱.微腔的谐振模式满足 Fabry-Perot 方程

$$\frac{\phi_{\text{anode}} + \phi_{\text{cathode}}}{2} - \frac{2\pi L \cos \theta}{\lambda} = m\pi \quad (2)$$

m 是模式级数^[21-22].从中可知器件腔长影响光谱,通过改变电子传输层厚度来改变腔长,器件的光谱也会随

之发生变化.为了进一步分析原因,使用模拟软件 simOLED 模拟出不同电子传输层厚度下器件的光谱并与实验测得的光谱进行比较,如图 5(c),其中模拟器件 S_1 与 S_2 的结构分别与 B_3 和 B_4 相同,从中可知,模拟器件的光谱随着电子传输层厚度变化情况与实验结果一致,证明由于微腔效应,器件光谱会随着 B3PyPPM 厚度的变化而变化.

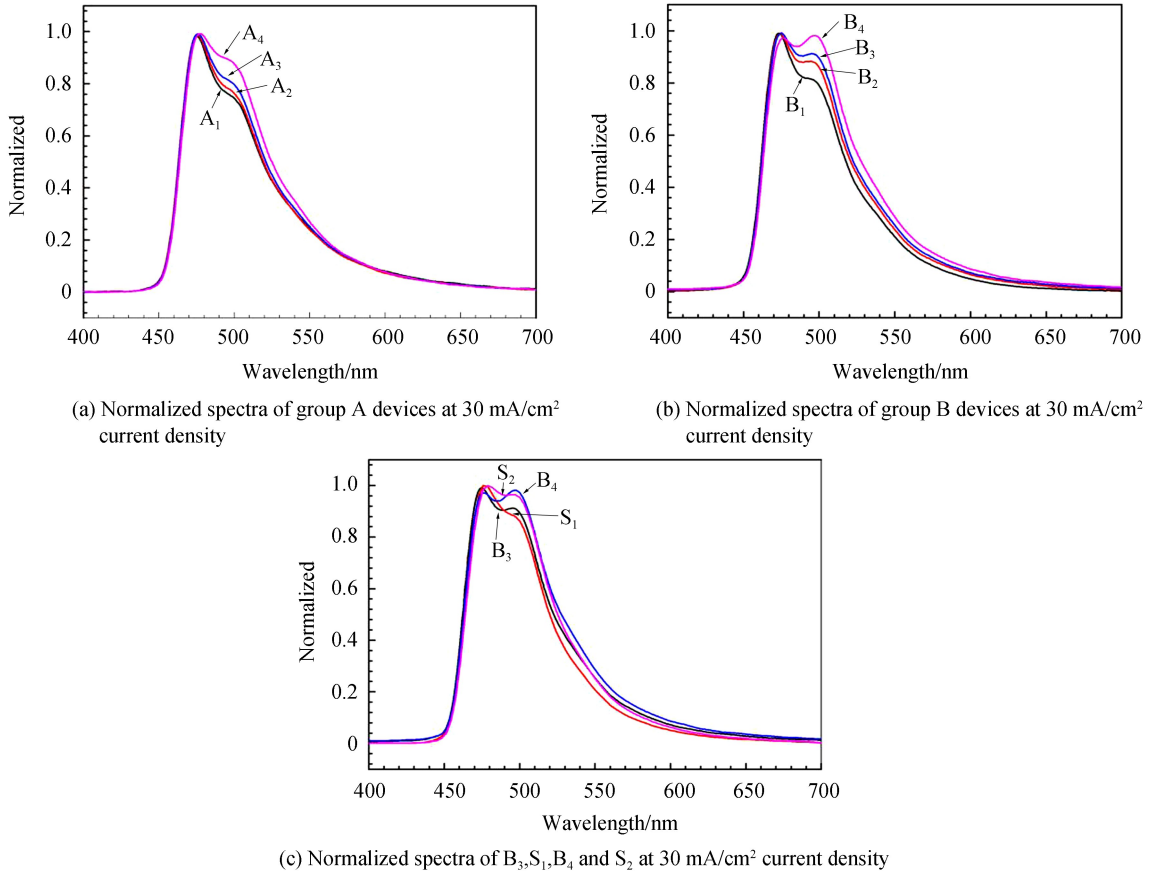


图 5 30 mA/cm² 电流密度下的归一化光谱

Fig.5 Normalized spectra at 30 mA/cm² current density

3 结论

分别以 TCTA 和 mCP 为母体,以 B3PyPPM 为电子传输层,制备两组蓝色磷光器件,以 mCP 为母体的器件亮度高于同种电子传输层厚度的 TCTA 器件,以 mCP 为母体的器件最大亮度可达 14 930 cd/m²,而以 TCTA 为母体的器件的最大亮度仅为 3 554 cd/m²,亮度从 500 cd/m² 上升到 3 000 cd/m² 时,以 mCP 为母体的器件外量子效率滚降仅仅只有 10.1%,远优于以 TCTA 为母体的器件.在电流效率方面,以 mCP 为母体的器件最大电流效率分别为 7.4 cd/A, 8.4 cd/A, 9.1 cd/A, 9.9 cd/A,高于以 TCTA 为母体的器件.两组器件的开启电压分别为 2.3 V 和 2.8 V,低于其他电子传输层制备的 Firpic 器件,说明 B3PyPPM 有其他传输层材料所不具备的优异的电子注入特性.两组器件的光谱为 Firpic 的特征光谱,随着电子传输层 B3PyPPM 厚度的增加,由于微腔效应,振动峰的强度增强.

参考文献

- [1] KIDO J, HONGAWA K, OKUYAMA 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.
- [2] ZU Jie, CHEN Ping, SHENG Ren, *et al.* Highly efficient blue organic light-emitting diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(4): 487-491.
祖洁, 陈平, 盛任, 等. 高效率的蓝色磷光有机电致发光器件[J]. *发光学报*, 2017, **38**(4): 487-491.
- [3] BAIDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, *et al.* Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices[J]. *Nature*, 1998, **395**(6698): 151-154.
- [4] SHIH C H, RAJAMALLI P, WU C A, *et al.* A high triplet energy, high thermal stability oxadiazole derivative as the

- electron transporter for highly efficient red, green and blue phosphorescent OLEDs[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, **3**(7): 1491-1496.
- [5] WANG C, YUAN Y, LI S Y, *et al.* A highly twisted triarylborane-based biphenyl as an efficient host for blue and green phosphorescent OLEDs[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(32): 7607-7613.
- [6] AHN D H, JEONG J H, JIE S, *et al.* Highly efficient deep blue fluorescent organic light-emitting diodes boosted by thermally activated delayed fluorescence sensitization[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(12):10246-10253.
- [7] CHEN Jiu-le. The study of the blue organic light emitting diode performance based on connecting layer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
陈久乐. 基于衔接层蓝光 OLED 器件性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [8] CUI L S, XIE Y M, WANG Y K, *et al.* Pure hydrocarbon hosts for $\approx 100\%$ exciton harvesting in both phosphorescent and fluorescent light-emitting devices[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(28): 4213-4217.
- [9] CHEN D, SU S J, CAO Y. Nitrogen heterocycle-containing materials for highly efficient phosphorescent OLEDs with low operating voltage[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, **2**(45): 9565-9578.
- [10] YANG X, ZHOU G, WONG W Y. Functionalization of phosphorescent emitters and their host materials by main-group elements for phosphorescent organic light-emitting devices[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, **44**(23): 8484-8575.
- [11] WEI X F, TAN W Y, ZOU J H, *et al.* High T_g small-molecule phenanthroline derivatives as a potential universal hole-blocking layer for high power-efficiency and stable organic light-emitting diodes[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, **5**(9): 2329-2336.
- [12] ZHANG Y, YU F X, MA X J, *et al.* Efficient red phosphorescent organic light emitting diodes based on solution processed all-inorganic cesium lead halide perovskite as hole transporting layer[J]. *Organic Electronics*, 2017, **50**(5): 411-417.
- [13] LIU M, SU S J, JUNG M C, *et al.* Hybrid heterocycle-containing electron-transport materials synthesized by regioselective suzuki cross-coupling reactions for highly efficient phosphorescent OLEDs with unprecedented low operating voltage[J]. *Chemistry of Materials*, 2012, **24**(24):3817.
- [14] CHOU H H, CHENG C H. A highly efficient universal bipolar host for blue, green, and red phosphorescent OLEDs [J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(22):2468-2471.
- [15] SHAHALIZAD A, D'ALÉO A, ANDRAUD C, *et al.* Near infrared electroluminescence from Nd (TTA) 3phen in solution-processed small molecule organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2017, **44**: 50-58.
- [16] RAJAMALLI P, SENTHILKUMAR N, GANDEEPAN P, *et al.* A thermally activated delayed blue fluorescent emitter with reversible externally tunable emission[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(5): 900-904.
- [17] DOH Y J, PARK J S, JEON W S, *et al.* Soluble processed low-voltage and high efficiency blue phosphorescent organic light-emitting devices using small molecule host systems[J]. *Organic Electronics*, 2012, **13**(4):586-592.
- [18] BIN J K, CHO N S, HONG J I. New host material for high - performance blue phosphorescent organic electroluminescent devices[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(21):2911-2915.
- [19] SASABE H, MINAMOTO K, PU Y J, *et al.* Ultra high-efficiency multi-photon emission blue phosphorescent OLEDs with external quantum efficiency exceeding 40%[J]. *Organic Electronics*, 2012, **13**(11):2615-2619.
- [20] CHEN C, LIU Y F, CHEN Z, *et al.* High efficiency warm white phosphorescent organic light emitting devices based on blue light emission from a bipolar mixed-host[J]. *Organic Electronics*, 2017, **45**: 273-278.
- [21] POITRAS D, KUO C C, PY C. Design of high-contrast OLEDs with microcavity effect[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(11): 8003-8015.
- [22] ZHANG Chun-yu, WANG Cheng, XIAO Li-guang, *et al.* Spectral analysis of organic/microcavity organic light-emitting devices with the change in thickness of organic layer[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2012, **32**(1): 69-73.
张春玉, 王成, 肖力光, 等. 有机层厚度变化的有机电致发光器件与微腔器件光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(1):69-73.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.61605049, 61575070, 11674111)

引用格式: LIN Wen-yan, YU Ye, PENG Xue-kang, *et al.* Fabricating Blue Phosphorescent Organic Light-emitting Devices by Using B3PyPPM as Electron Transport Layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1223001

林雯嫣, 喻叶, 彭雪康, 等. 以 B3PyPPM 为电子传输层制备蓝色磷光 OLED 器件[J]. 光子学报, 2018, **47**(12):1223001