

doi: 10.3788/gzxb20134202.0144

# 基于新型电荷生成层的 P-i-N 结构白色 有机叠层电致发光器件

汪津<sup>1</sup>, 肖心明<sup>1</sup>, 张冰<sup>2</sup>, 姜文龙<sup>1</sup>, 丁桂英<sup>1</sup>, 谢文法<sup>3</sup>

(1 吉林师范大学 信息技术学院 功能材料物理与化学教育部重点实验室, 吉林 四平 136000)

(2 四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

(3 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

**摘 要:** 采用 2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline (BCP); 5 wt. % cesium carbonate ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ) 和 N, N'-Bis(naphthalen-1-yl)-N, N'-bis(phenyl)-benzidine (NPB); 20 wt. % molybdenum oxide ( $\text{MoO}_3$ ) 分别作为器件的电子注入层和空穴注入层, 研究了 N 型和 P-i-N 结构有机电致发光器件的载流子传输特性. 载流子传输层中 BCP;  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  和 NPB;  $\text{MoO}_3$  的引入有效增强了载流子注入能力, 从而降低了器件的驱动电压. 基于新型电荷生成层 BCP; 5 wt. %  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  / NPB; 20 wt. %  $\text{MoO}_3$  制备了色稳定、高效率 P-i-N 结构有机叠层器件. 与单元器件相比, 引入新电荷生成层有机叠层器件的最大电流效率增大了 2.5 倍, 表明该电荷生成层可以有效地将电子和空穴分别注入到相邻发光单元中. 采用该电荷生成层制备了 P-i-N 结构白色有机叠层器件, 器件的上下发光单元分别为橙光和蓝光发射. 当发光亮度从 500 增加到 5 000  $\text{cd}/\text{m}^2$  时, 器件的色坐标稳定在 (0.33, 0.29) 附近, 接近白光等能点. 利用单色发光单元堆叠制备白色有机叠层器件的方法为实现色稳定、高效率的白色有机电致发光器件提供了一种有效的途径.

**关键词:** 电荷生成层; 叠层; 效率; 有机电致发光器件

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0144-6

## Highly Efficient Tandem P-i-N White Organic Light Emitting Diode Based on a New Charge General Layer

WANG Jin<sup>1</sup>, XIAO Xin-ming<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>2</sup>, JIANG Wen-long<sup>1</sup>,  
DING Gui-ying<sup>1</sup>, XIE Wen-fa<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory of Functional Materials Physics and Chemistry of the Ministry of Education,  
College of Information Technology, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

(2 School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(3 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Organic light emitting diodes (OLEDs) were fabricated using 5 wt. % cesium carbonate ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ) doped 2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline (BCP) as electron-injection layer and 20 wt. % molybdenum oxide ( $\text{MoO}_3$ ) doped N, N'-Bis(naphthalen-1-yl)-N, N'-bis(phenyl)-benzidine (NPB) as hole-injection layer, respectively, and the carrier transfer characteristics were examined. The lowered driving voltage suggests BCP;  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  and NPB;  $\text{MoO}_3$  efficiently enhance carrier injection in OLEDs. Color-stable and efficient tandem P-i-N white organic light emitting diode (WOLED) with a new charge generation layer, which consists of BCP; 5 wt. %  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  / NPB; 20 wt. %  $\text{MoO}_3$ , has been fabricated. The maximum current efficiency of the two-

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 11074096)、吉林省基础研究计划基金 (No. 20100510) 和吉林省自然科学基金 (Nos. 20101512; 201215221) 资助

**第一作者:** 汪津 (1972-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为有机半导体器件物理. Email: Jwang@jlnu.edu.cn

**收稿日期:** 2012-11-19; **录用日期:** 2012-11-29

unit tandem P-i-N orange device is enhanced by 2.5 factors with respect to the one-unit device. Such a connecting structure permits efficient opposite hole and electron injection into two adjacent emitting units and gives tandem devices superior electrical and optical performances. The tandem P-i-N WOLED with the charge generation layer, in which the individual orange phosphorescent and blue fluorescent were used as emissive units, exhibits excellent color stability and higher efficiency. The Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) chromaticity coordinates almost focus exactly on (0.33, 0.29) between 500 cd/m<sup>2</sup> and 5 000 cd/m<sup>2</sup>, which closes to the point of equal energy (0.33, 0.33). The results may prove the method to be effective to enhance the current efficiency and color-stable of WOLED.

**Key words:** Charge general layer; Tandem; Efficiency; OLED

## 0 引言

有机电致发光器件(Organic Light-Emitting Diode, OLED)具有低功耗、主动发光、视角宽、响应速度快、发光颜色在可见光区内可调和制造成本低等诸多优点,是未来重要的平板显示技术之一<sup>[1-2]</sup>。另外,OLED因其高效率、高显色指数、面光源等特点在平板显示器的背景光源和固态照明等领域中也有极其广阔的应用前景,成为研究的热点方向<sup>[3-7]</sup>。OLED的亮度随电流密度的增加而增大,由于热效应、电流淬灭等不利因素影响使器件的工作寿命随电流密度增加而缩短。因此,对于常规结构的OLED器件,实现发光的高亮度,器件需要维持相对较高的电流密度,势必缩短其工作寿命。有机叠层器件最早是为了开发全色显示器件而设计<sup>[8]</sup>。近年来,有机叠层器件被认为是当代平板显示和固态照明领域最有潜力的技术之一<sup>[9-12]</sup>。有机叠层器件通常采用电荷产生层(Charge General Layer, CGL)将多个发光单元垂直串联。电荷产生层分别作为相邻发光单元的阳极和阴极。 $N$ 个发光单元( $N>1$ )的OLED的电流效率可以达到单个OLED的 $N$ 倍。换言之,在相同发光亮度的情况下,有机叠层器件的电流密度是单元器件的 $1/N$ ,因此,有机叠层器件电流密度成倍减小可以增加器件稳定性。CGL的设计是有机叠层器件制备的关键。高效的CGL应在可见光范围内具有较高的光透射率、良好的电荷生成和载流子注入特性。CGL的设计通常采用金属或金属化合物的多层结构<sup>[13-14]</sup>、非掺杂的有机多层结构<sup>[15]</sup>、掺杂的有机-无机双层结构<sup>[16-17]</sup>或掺杂的有机-金属(或金属氧化物)双层结构<sup>[18-19]</sup>。其中,掺杂有机-金属(或金属氧化物)双层结构CGL的N型一侧一般采用在Tris(8-hydroxy-quinolinato)aluminium( $\text{Alq}_3$ )、4,7-Diphenyl-1,10-phenanthroline(Bphen)等电子传输材料中掺杂Li、Cs等金属或 $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Rb}_2\text{CO}_3$ 等金属化合物。研究表明CGL的电子注入能力取决于电荷产生层的电导率,而不是金属的功函数<sup>[20]</sup>。在P型一侧,一般选用可见光范

围内透射率较高(大于80%)的 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{WO}_3$ 等金属氧化物单层或掺杂空穴传输材料<sup>[21-22]</sup>。高传导特性的P型和N型掺杂层能够减少界面处的欧姆损失,有效增强载流子的注入能力,降低器件功耗<sup>[23-24]</sup>。本文采用新型CGL制备了有机叠层发光器件,P型掺杂层采用空穴传输材料N,N'-Bis(naphthalen-1-yl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine(NPB)掺杂 $\text{MoO}_3$ ,N型掺杂层采用电子传输材料2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline(BCP)掺杂 $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ 。分别以BCP: $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ /NPB; $\text{MoO}_3$ 、BCP: $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ / $\text{MoO}_3$ 为CGL,制备了橙光发射的单色有机叠层器件,研究了两种CGL对器件光电性能的影响;以BCP: $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ /NPB; $\text{MoO}_3$ 为CGL,通过置换橙色和蓝色发光单元的位置,制备了色稳定、高效率的白色有机叠层器件。

## 1 实验

在相同实验条件下,器件 $A_1\sim A_3$ 、 $B_1\sim B_2$ 采用4,4'-Bis(carbazol-9-yl)biphenyl(CBP):Bis(2-phenylbenzothiazolato)(acetylacetonate)iridium(III)( $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$ )作为发光层,器件 $C_1\sim C_2$ 的蓝色发光单元采用蓝光染料4,4'-bis(2,2'-diphenylvinyl)-1,1'-biphenyl(DPVBi)作为发光层,橙色发光单元仍采用CBP: $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$ 为发光层。器件中NPB作为空穴传输层,BCP为激子阻挡层和电子传输层,LiF/Al为复合阴极。表1列出了单元器件 $A_1\sim A_4$ 、叠层器件 $B_1\sim B_2$ 、 $C_1\sim C_2$ 的结构,实验所用有机材料的化学结构式如图1所示。

ITO导电玻璃(20  $\Omega$ /sq)经过丙酮、乙醇、去离子水反复超声清洗、干燥等步骤处理之后,置于多源有机分子气相沉积系统的腔室内,腔室真空度优于 $4\times 10^{-4}$  Pa。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,之后蒸镀LiF层,蒸镀速率约为0.01 nm/s,最后在 $5\times 10^{-3}$  Pa的真空度下覆盖阴极Al。蒸镀过程中采用FTM-V型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 $2\times$

表1 器件结构  
Table 1 The OLED structures

Device or units layer	Structures
A <sub>1</sub>	ITO/NPB(50 nm)/EML-O/BCP(30 nm)/LiF(0.6 nm)/Al
A <sub>2</sub>	ITO/NPB(50 nm)/EML-O/ETL/Al
A <sub>3</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-O/ETL/Al
A <sub>4</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-B/ETL/Al
B <sub>1</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-O/ETL/HTL <sub>1</sub> /EML-O/ETL/Al
B <sub>2</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-O/ETL/HTL <sub>2</sub> /EML-O/ETL/Al
C <sub>1</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-O/ETL/HTL/EML-B/ETL/Al
C <sub>2</sub>	ITO/HTL <sub>1</sub> /EML-B/ETL/HTL/EML-O/ETL/Al
HTL <sub>1</sub>	NPB: 20 wt. % MoO <sub>3</sub> (30 nm)/NPB(20 nm)
HTL <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub> (5 nm)/NPB(45 nm)
EML-O	CBP: 10 wt. % Ir(BT) <sub>2</sub> acac(30 nm)
ETL	BCP(10 nm)/BCP:5 wt. % Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (20 nm)
EML-B	DPVBi(30 nm)

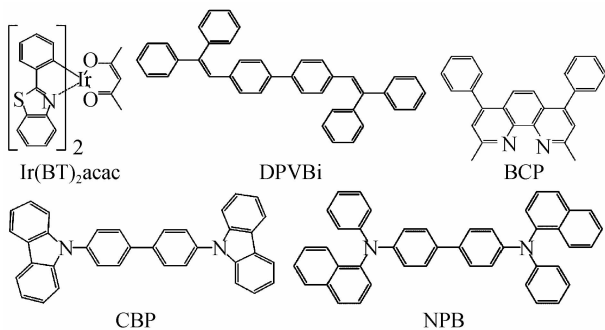


图1 实验所用有机材料的化学结构式

Fig. 1 Chemical structure of organic materials

2 mm<sup>2</sup>. 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、色度进行测量. 所有测量均在室温条件下大气环境中进行.

## 2 结果与讨论

制备的 N 型结构器件 A<sub>2</sub> 采用 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 作为电子注入层. 在 N 型掺杂结构器件的基础上, 以 NPB: 20 wt. % MoO<sub>3</sub> 作为空穴注入层, 制备了 P-i-N 结构器件 A<sub>3</sub>. 器件 A<sub>1</sub> ~ A<sub>3</sub> 的发光层均为 CBP: 10 wt. % Ir(BT)<sub>2</sub>acac. 图 2 是器件 A<sub>1</sub> ~ A<sub>3</sub> 的亮度-电流密度-电压特性曲线, 从图中亮度-电压特性曲线可以看出, 在相同驱动电压下, N 型结构器件 A<sub>2</sub> 的发光亮度略高于参考器件 A<sub>1</sub>, P-i-N 型结构器件 A<sub>3</sub> 的发光亮度明显高于器件 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub>. 亮度为 1000 cd/m<sup>2</sup> 时, 器件 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 和 A<sub>3</sub> 对应的驱动电压分别为 7.5 V、7.2 V 和 5.8 V. 在电流密度-

电压特性曲线中, 相同驱动电压下器件 A<sub>1</sub> ~ A<sub>3</sub> 的电流密度逐渐增加, 表明 N 型掺杂结构的引入增加了电子传输层内电子的浓度, P 型掺杂结构的引入增加了空穴在空穴传输层内的浓度, 从而降低了器件的驱动电压. 器件 A<sub>2</sub> 和 A<sub>3</sub> 载流子注入能力的增强, 提高了发光区内载流子复合形成激子的比例, 使器件的发光亮度增强. 鉴于 Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 掺杂 BCP、MoO<sub>3</sub> 掺杂 NPB 结构具有良好的载流子注入特性, 以及 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 MoO<sub>3</sub> 的高可见光透射率, 因此选用掺杂的有机 P-N 节 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NPB: 20 wt. % MoO<sub>3</sub> 作为有机叠层器件的 CGL.

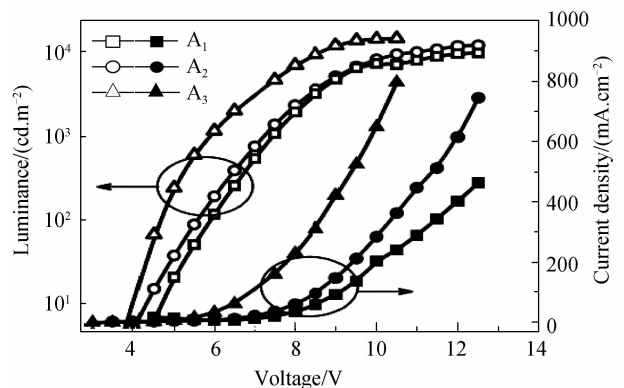


图2 器件 A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> 的亮度-电流密度-电压特性曲线

Fig. 2 Luminance-current density-voltage characteristics of devices A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub>

为了研究叠层器件 CGL 的性能, 分别以 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NPB: 20 wt. % MoO<sub>3</sub> 和 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/MoO<sub>3</sub> 作为 CGL, 制备了 2 个发光单元的有机叠层器件 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub>. 2 个发光单元均采用 CBP: 10 wt. % Ir(BT)<sub>2</sub>acac 作为发光层. 图 3 是单元 P-i-N 型器件 A<sub>3</sub>、有机叠层器件 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的亮度-电流密度-电压特性曲线. 在电流密度为 20 mA/cm<sup>2</sup> 时, 叠层器件 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的发光亮度分别为 1 670 cd/m<sup>2</sup> 和 1 473 cd/m<sup>2</sup>, 对应的驱动电压分别为 14.8 V 和 15.9 V, 单元器件 A<sub>3</sub> 的发光亮度为 703 cd/m<sup>2</sup>, 驱动电压为 5.6 V. 在相同电压下, 器件 B<sub>1</sub> 的电流密度和发光亮度均高于器件 B<sub>2</sub>, 表明 CGL 的 P 型一侧采用 NPB: MoO<sub>3</sub> 代替 MoO<sub>3</sub> 薄层可以有效增强 P-N 节的电特性. 如图 4 所示, 电流密度为 20 mA/cm<sup>2</sup> 时, 单元器件 A<sub>3</sub> 的电流效率 3.8 cd/A, 有机叠层器件 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的电流效率分别是单元器件 A<sub>3</sub> 的 2.5 倍 (9.4 cd/A) 和 2.1 倍 (7.9 cd/A). 上述结果表明器件 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的 CGL 均能将产生的电子和空穴注入到两侧相邻的发光单元, 达到将 2 个发光单元有效串联起来的目的. 与器件 B<sub>2</sub> 相对比, 器件 B<sub>1</sub> 的 CGL 效果更好. 从图 4 中插图的电致发光光谱可以看出, 器件的发光主峰都

位于 560 nm, 在 600 nm 处有一肩峰, 其发光均来自于橙光染料 Ir(BT)<sub>2</sub>acac 的辐射发光.

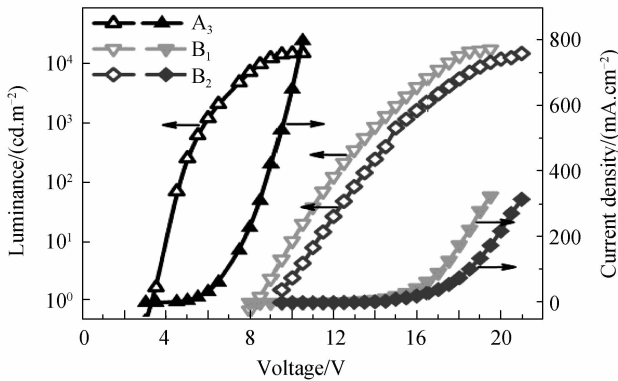


图3 器件 A<sub>3</sub>、B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的亮度-电流密度-电压特性曲线  
Fig. 3 Luminance-current density-voltage characteristics of devices A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub>

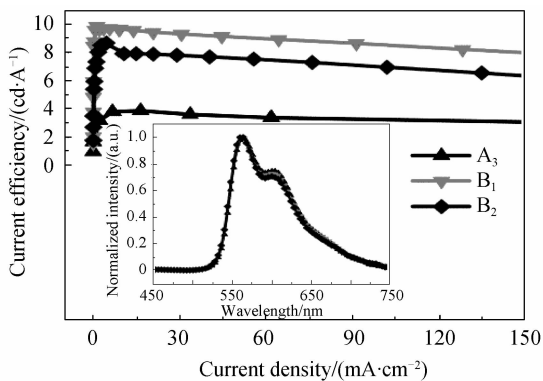


图4 器件 A<sub>3</sub>、B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的电流效率-电流密度特性曲线;  
插图: 器件 A<sub>3</sub>、B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 的归一化电致发光光谱  
Fig. 4 Current efficiency-current density characteristics of devices A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub>; Inset: Normalized EL spectra of devices A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub>

采用 BCP: 5 wt. % Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NPB: 20 wt. % MoO<sub>3</sub> 作为 CGL 制备了包含 2 个单色发光单元的白光有机叠层器件. 器件 C<sub>1</sub> 的下发光单元(靠近 ITO)以 CBP: 10 wt. % Ir(BT)<sub>2</sub>acac 为发光层, 上发光单元以 DPVBi 为发光层. 将器件 C<sub>1</sub> 的上下发光单元的发光层位置调换制备了器件 C<sub>2</sub>. 同时制备了以 DPVBi 为发光层的蓝光器件 A<sub>4</sub>. 在图 4 的电流效率与电流密度关系曲线中, 器件 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的最大电流效率分别为 4.44 cd/A 和 5.59 cd/A, 对应的色坐标分别为 (0.42, 0.42) 和 (0.33, 0.29). 图 5 插图是橙色单元器件 A<sub>3</sub>、蓝色单元器件 A<sub>4</sub> 和有机叠层器件 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 在电流密度为 20 mA/cm<sup>2</sup> 时的归一化电致发光光谱. 器件 A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> 的发光分别来自 Ir(BT)<sub>2</sub>acac 和 DPVBi 的辐射发光. 器件 C<sub>1</sub> 蓝光部分的光谱相对于器件 A<sub>4</sub> 的光谱蓝移了 20 nm, 并且半峰宽变窄, 而器件 C<sub>2</sub> 的蓝光部分光谱与器件 A<sub>4</sub> 的光谱相比几乎没有发生变化. 器件 C<sub>1</sub> 橙光部分的光谱相比于器件 A<sub>3</sub> 的光谱没有明显的变化, 而器

件 C<sub>2</sub> 的橙光部分的光谱与器件 A<sub>3</sub> 相比 560 nm 附近的发光峰明显增强. 由于器件的电致发光光谱是在相同电流密度下测得的, 因此器件 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 发光光谱的变化不是激子复合区迁移引起的. 在有机叠层器件中, 由于 CGL 的存在使器件中形成了两个光学共振微腔, 微腔效应引起器件 C<sub>1</sub> 蓝光部分的光谱蓝移和半峰宽变窄. 器件 C<sub>2</sub> 橙光部分的光谱相对增强主要是由于上下发光单元发光光学路径不同引起光学干涉导致的结果<sup>[12]</sup>.

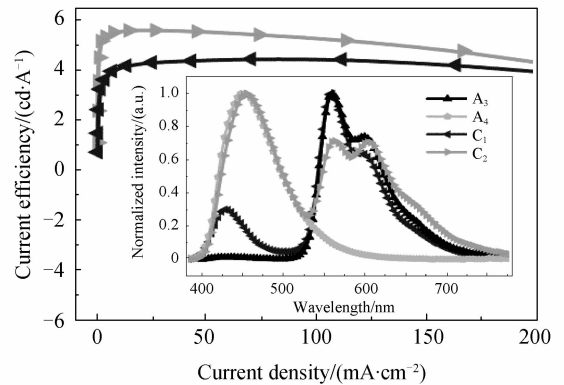


图5 器件 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的电流效率-电流密度特性曲线;  
插图: 器件 A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub>、C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的归一化电致发光光谱  
Fig. 5 Current efficiency-current density characteristics of devices C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub>; Inset: Normalized EL spectra of devices A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>, C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub>

从图 6 中有机叠层器件 C<sub>2</sub> 的 L-J-V 曲线和  $\eta_J$ -J 曲线可以得出, 当亮度为 5 000 cd/m<sup>2</sup> 时, 器件的驱动电压为 22.5 V, 对应电流密度为 93.2 mA/cm<sup>2</sup>, 电流效率为 5.3 cd/A. 图 7 是有机叠层器件 C<sub>2</sub> 在不同电压下的归一化电致发光光谱, 当电压从 14 V 增加到 18 V 时, 色坐标由 (0.32, 0.29) 变化到 (0.33, 0.30), 橙光部分相对蓝光部分的强度逐渐增强. 随驱动电压继续增加, 色坐标由 (0.33, 0.30) 变化到 (0.31, 0.27), 橙光部分的相对强度逐渐减弱.

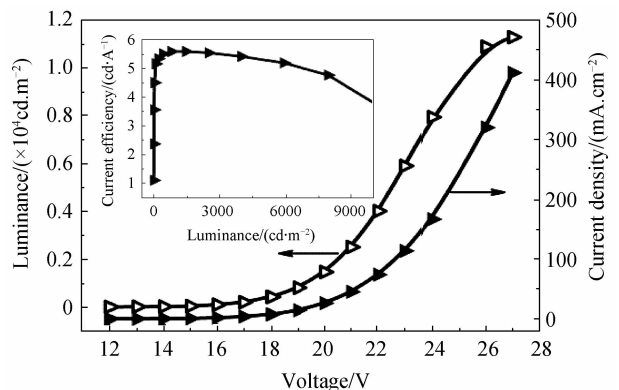


图6 叠层器件 C<sub>2</sub> 亮度-电流密度-电压特性曲线;  
插图: 叠层器件 C<sub>2</sub> 在不同电压下的色坐标图  
Fig. 6 Luminance-current density-voltage characteristics of device C<sub>2</sub>; Inset: CIE coordinates of the device C<sub>2</sub> at different applied voltages in CIE chromaticity diagram

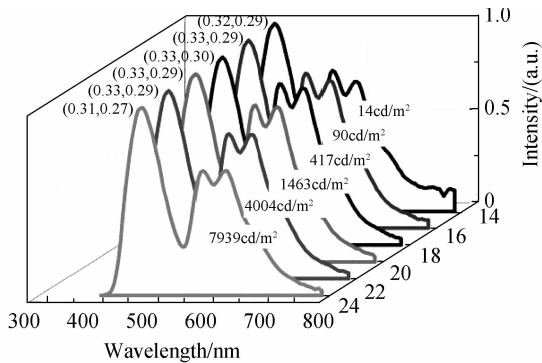


图7 叠层器件  $C_2$  在不同电压下的归一化电致发光光谱  
Fig. 7 Normalized EL spectra of tandem device  $C_2$  at different applied voltages

根据器件  $C_2$  中各有机层的能级结构关系(如图8所示)可知,上发光单元中橙色染料  $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$  的禁带完全落在了主体材料 CBP 的禁带中,对 CBP 而言, $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$  既是空穴陷阱同时也是电子的陷阱.由于  $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$  的掺杂浓度较高,在低电场下载流子可以从直接传输层注入到掺杂剂  $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$ ,使  $\text{Ir}(\text{BT})_2\text{acac}$  自辐射发光,低电场下其发光强度受电压影响较大.对于下发光单元,空穴和电子注入到 DPVBi 需要分别克服 0.4 eV 和 0.2 eV 的势垒,并且 DPVBi 的电子和空穴的迁移率都很低,低电场下 DPVBi 发光强度受电压的影响较小,因此低电场下随驱动电压增加橙光相对增强,驱动电压继续增加使器件内部电场增强,下发光单元中更多的载流子越过势垒注入到 DPVBi 中,使蓝光部分发光强度的增加幅度变大,导致蓝光部分逐渐增强.当器件的亮度从 1 000  $\text{cd}/\text{m}^2$  增加到 5 000  $\text{cd}/\text{m}^2$  时,色坐标稳定在 (0.33, 0.29) 附近,接近白光等能点.

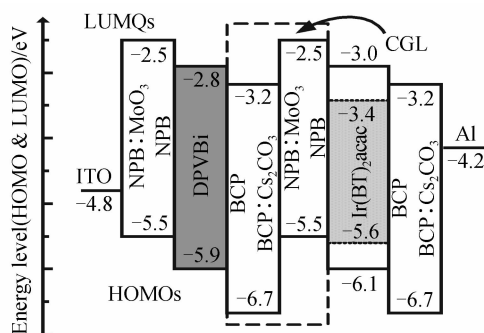


图8 叠层器件  $C_2$  的能级结构图  
Fig. 8 Schematic energy-level diagram of device  $C_2$

### 3 结论

采用 BCP: 5 wt. %  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ /NPB: 20 wt. %  $\text{MoO}_3$  为作为 CGL 制备了 2 个发光单元的橙光有机叠层器件.橙光有机叠层器件的最大电流效率为对应单元器件的 2.5 倍,表明该 CGL 可以有效地产

生电子-空穴对,并注入到相邻的发光单元中.同时,采用该 CGL 制备了包含 2 个单色发光单元的叠层结构有机器件,通过互补色实现了白光发射.当发光亮度从 500  $\text{cd}/\text{m}^2$  增加到 5 000  $\text{cd}/\text{m}^2$  时,器件的色坐标稳定在 (0.33, 0.29) 附近,接近白光等能点.利用单色发光单元堆叠的方法制备的有机白光器件可以有效避免多发光层结构的有机白光器件中因激子复合区域的移动引起的色坐标不稳定的问题,实现高效率、色稳定的白色有机电致发光器件.

### 参考文献

- [1] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **51**(12): 913-915.
- [2] FORREST S R. The road to high efficiency organic light emitting devices[J]. *Organic Electronics*, 2003, **4**(2-3): 45-48.
- [3] DENG Zhao-ru, YANG Sheng-yi, MENG Ling-chuan, et al. Application of ultrathin layer in white organic electroluminescent devices[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2008, **24**(4): 700-704.  
邓召儒, 杨盛谊, 孟令川, 等. 超薄层在白色有机电致发光器件中的应用[J]. *物理化学学报*, 2008, **24**(4): 700-704.
- [4] MA Tao, JIANG Ya-dong, YU Jun-sheng, et al. Bright white organic light-emitting diode mixed blue and green emission[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2008, **24**(6): 977-980.  
马涛, 蒋亚东, 于军胜, 等. 混合蓝色和绿色发射的高亮度白色有机电致发光器件[J]. *物理化学学报*, 2008, **24**(6): 977-980.
- [5] WU Xiao-ming, HOU Qi-chuan, HUA Yu-lin, et al. White organic light-emitting devices using organic/inorganic color conversion film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 596-599.  
吴晓明, 侯庆传, 华玉林, 等. 利用复合色彩转换膜实现白色有机电致发光[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 596-599.
- [6] CUI Guo-yu, LI Chuan-nan, LI Tao, et al. Organic light-emitting device with  $\text{Li}_3\text{N}$  n-type doped electron injecting layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 194-198.  
崔国宇, 李传南, 李涛, 等. 采用  $\text{Li}_3\text{N}$  n 型掺杂层作为电子注入层的 OLED 器件研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 194-198.
- [7] ZHANG Rui, LI Chuan-nan, LI Tao, et al. Fabrication of inverted bottom organic light-emitting device with  $\text{Li}_3\text{N}$  n-type doping electron injecting layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 199-203.  
张睿, 李传南, 李涛, 等. 一种采用  $\text{Li}_3\text{N}$  掺杂电子注入层的底发射倒置结构 OLED 的制备[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 199-203.
- [8] SHEN Z L, BURROWS P E, BULOVIĆ V, et al. Three-color, tunable, organic light-emitting devices[J]. *Science*, 1997, **276**(5321): 2009-2011.
- [9] QI X F, SLOOTSKY M, FORREST S. Stacked white organic light emitting devices consisting of separate red, green, and blue elements[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(19): 3306-3308.
- [10] LEEM D S, LEE J H, KIM J J, et al. Highly efficient tandem P-i-N organic light-emitting diodes adopting a low temperature evaporated rhenium oxide interconnecting layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(10): 3304-3306.
- [11] HO M H, CHEN T M, YEH P C, et al. Highly efficient P-

- i-N white organic light emitting devices with tandem structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(23): 3507-3509.
- [12] KANNO H, HOLMES R J, SUN Y, *et al.* White stacked electrophosphorescent organic light-emitting devices employing MoO<sub>3</sub> as a charge-generation layer[J]. *Advance Materials*, 2006, **18**(3): 339-342.
- [13] SUN J X, ZHU X L, PENG H J, *et al.* Effective intermediate layers for highly efficient stacked organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(9): 3504-3506.
- [14] ZHANG H M, DAI Y F, MA D G. High efficiency tandem organic light-emitting devices with Al/WO<sub>3</sub>/Au interconnecting layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(12): 3504-3506.
- [15] LAI S L, CHAN M Y, FUNG M K, *et al.* Copper hexadecafluorophthalocyanine and copper phthalocyanine as a pure organic connecting unit in blue tandem organic light-emitting devices[J]. *Journal Applied Physics*, 2007, **101**(1): 4509-4513.
- [16] LAW C W, LAU K M, FUNG M K, *et al.* Effective organic-based connection unit for stacked organic light-emitting devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(13): 3511-3513.
- [17] CHO T Y, LIN C L, WU C C. Microcavity two-unit tandem organic light-emitting devices having a high efficiency[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(11): 1106-1108.
- [18] CHANG C C, CHEN J F, HWANG S W, *et al.* Highly efficient white organic electroluminescent devices based on tandem architecture[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(25): 3501-3503.
- [19] KANNO H, GIEBINK N C, SUN Y R, *et al.* Stacked white organic light-emitting devices based on a combination of fluorescent and phosphorescent emitters [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(2): 3503-3505.
- [20] CHAN M Y, LAI S L, LAU K M, *et al.* Influences of connecting unit architecture on the performance of tandem organic light-emitting devices [J]. *Advance Functional Materials*, 2007, **17**(14): 2509-2514.
- [21] MEYER J, WINKLER T, HAMWI S, *et al.* Transparent inverted organic light-emitting diodes with a tungsten oxide buffer layer[J]. *Advance Materials*, 2008, **20**(20): 3839-3843.
- [22] XIE G H, MENG Y L, WU F M, *et al.* Very low turn-on voltage and high brightness tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum-based organic light-emitting diodes with a MoO<sub>x</sub> p-doping layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(9): 3305-3307.
- [23] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, **459**(7244): 234-238.
- [24] WALER K, MAENNING B, PFEIFFER M, *et al.* Highly Efficient Organic Devices Based on Electrically Doped Transport Layers [J]. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(4): 1233-1271.