

文章编号: 1000-7032(2014)11-1342-07

## 基于量子阱结构的混合型白光有机发光器件

安 涛\*, 李 朋, 李怀坤, 丁志明, 王海峰

(西安理工大学 电子工程系, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以荧光材料 BePP<sub>2</sub> 结合量子阱作为蓝光发射层, 磷光材料 GIr1 和 R-4B 掺入到混合双极性主体材料 CBP: Bphen 中分别作为绿、红发光层并且在红绿发光层中引入间隔层 TPBI, 组合得到发白光的混合型有机发光器件。其中量子阱是以 BePP<sub>2</sub> 作为势阱、TCTA 为势垒。结果表明: 当势垒层数为 2 时, 器件的最大发光亮度和电流效率分别为 21 682.5 cd/m<sup>2</sup> 和 23.73 cd/A; 当电压从 7 V 增加到 14 V 时, 色坐标从(0.345, 0.350) 变化到(0.340, 0.342)。与无量子阱结构的参考器件相比, 势垒层数为 2 的器件的最大功率效率为 8.07 lm/W, 色坐标变化相对最小为 ±(0.005, 0.008), 还有一个高的显色指数 83。

**关键词:** 有机半导体; 磷光材料; 荧光材料; 量子阱; 白光有机发光器件

中图分类号: TN383+.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20143511.1342

## Hybrid White Organic Light-emitting Devices Based on Quantum Well Structure

AN Tao\*, LI Peng, LI Huai-kun, DING Zhi-ming, WANG Hai-feng

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

\* Corresponding Author, E-mail: antao@xaut.edu.cn

**Abstract:** Hybrid white organic light-emitting device based on fluorescent layer combining with phosphorescent doping layer was fabricated, in which fluorescent material BePP<sub>2</sub> acted as blue emitter layer, phosphorescent material GIr1 and R-4B doped into CBP: Bphen bipolar type host acted as green and red emitter layer, respectively. The ultrathin spacer layer was constructed by inserting a 2.0 nm thin layer of TPBI between red and green emitting layer. In the quantum well structure, BePP<sub>2</sub> and TCTA acted as the potential well layer and the potential barrier layer, respectively. The maximum luminance and current efficiency are 21 682.5 cd/m<sup>2</sup> and 23.73 cd/A, respectively. The Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) coordinates of the device vary from (0.345, 0.350) at 7 V to (0.340, 0.342) at 14 V when the number of potential barrier layer is two. In comparison with the reference device without quantum well structure, the device with two barrier layers achieves a maximum power efficiency of 8.07 lm/W, a low CIE coordinates changing of ±(0.005, 0.008), and a high color rendering index of 83.

**Key words:** organic semiconductor; phosphorescent material; fluorescent material; quantum well; white organic light-emitting devices

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61106043)资助项目

## 1 引 言

有机发光二极管 (OLED) 作为冷光源, 因高效率、广视角、低成本等优点而在平板显示器和固体照明领域表现出了优越的性价比<sup>[1-4]</sup>。在固体照明方面, 有机发光器件的成本、使用寿命、稳定性等方面与荧光灯相比还存在一定的差距。目前主要通过开发新材料和改良器件结构来提高白光有机器件的发光效率、色稳定、显色指数。通过使用不同的功能材料组合可以得到符合要求的白光光源, 比如采用蓝、黄发光材料来得到二波段型白光, 还可以使用蓝、红、绿发光材料相组合获得三波段型白光<sup>[5-6]</sup>。一般蓝光发光材料为荧光材料, 其最大内量子效率为 25%; 而绿红功能材料多为磷光材料, 理论上其内量子效率可以同时利用单线态、三线态激子而能达到 100%。为组合得到白光器件, 需要优化材料的顺序、厚度等, 因为材料的能级、不同的排列顺序、传输电子空穴的能力都会对器件的光电性能有很大的影响<sup>[7]</sup>。

从结构方面来说, 为了提高器件的光电特性可以引入量子阱、微腔结构<sup>[8-9]</sup>。1999 年, Xie 等<sup>[10]</sup>使用 TPD/BePP<sub>2</sub> 多量子阱结构制作了三波段型的白光有机电致发光器件, 19 V 时的发光亮度和发光效率分别为 4 000 cd/m<sup>2</sup> 和 0.4 lm/W, 发光效率和亮度都比较低。2012 年, Bo 等<sup>[11]</sup>采用 TPBI/CBP 的量子阱结构制备了二波段型白光, 其最大发光效率和功率效率分别为 14.5 cd/A 和 5.4 lm/W。现在, 性能优良的白光器件大多

数都是荧光/磷光类型<sup>[12]</sup>。采用量子阱结构提高荧光材料的发光效率来搭配磷光材料发光, 可以获得色稳定性好的白光器件, 目前这方面器件结构的报道还比较少。

本文使用蓝光荧光材料 BePP<sub>2</sub> 和绿红磷光材料 GIrl 和 R-4B 组合得到了三波段型白光。为了提高器件的光电性能, 引入了量子阱结构、混合双极性主体材料和薄的间隔层<sup>[13]</sup>。以 BePP<sub>2</sub> 为势阱和 TCTA 为势垒构成了 I 型量子阱。使用空穴传输材料 CBP 和电子传输材料 Bphen 混合得到双极性主体材料 (1:1), 并在其中掺入磷光发光材料 GIrl 和 R-4B。为了使红绿有高的发光效率和获得稳定的发光光谱, 又加入了电子传输材料 TPBI 的间隔层<sup>[14]</sup>。通过改变量子阱的数量 (BePP<sub>2</sub> 总的厚度不变), 来研究混合型白光器件的光电性能。与无量子阱的器件相比, 有量子阱的器件具有更好的发光效率和低的滚落效应 (roll-off), 而且还有较好的白光色坐标和稳定发光光谱。

## 2 实 验

实验使用的材料有: 空穴注入材料 4,4'-tris (N-(2-naphthyl)-Nphenyl-amino)-triphenylamine (2-TNATA)、空穴传输材料 N,N'-bis (naphthalen-1-yl)-N,N'-bis (phenyl) benzidine (NPB) 和 4,4',4''-tris (N-carbazolyl) triphenylamine (TCTA)、主体材料 4,4'-N,N-dicarbazolebiphenyl (CBP) 和 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline (Bphen)、电子传输材

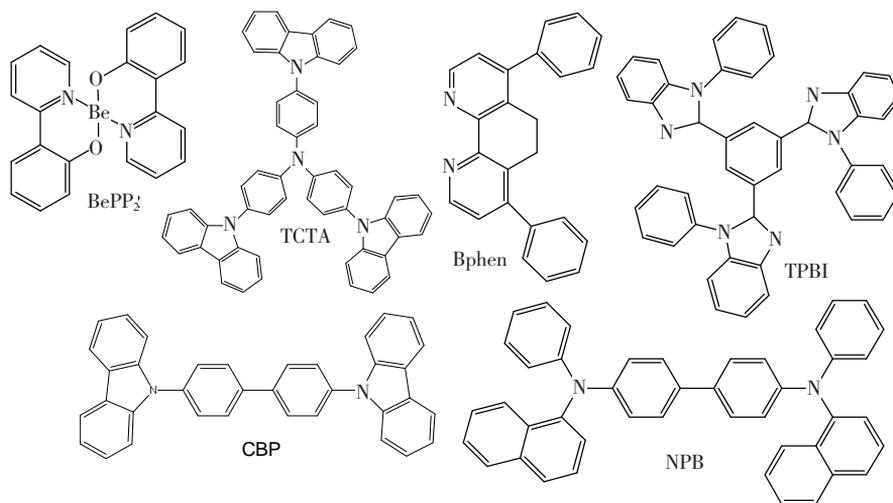


图 1 有机材料的分子结构

Fig. 1 Molecule structures of organic material

料 2, 2', 2''-(1, 3, 5-benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole) (TPBi)、荧光材料 bis[2-(2-hydroxyphenyl)-pyridine] beryllium (BePP<sub>2</sub>)。图 1 为有机材料的化学结构式。其中绿色磷光材料 GIr1 购于长春坂和科技有限公司, 红色磷光材料 R-4B 购于西安瑞联近代电子材料有限责任公司, 材料的数据由公司提供。

器件结构为 ITO/2-TNATA(20nm)/NPB(30 nm)/量子阱/CBP: Bphen: GIr1(14%)(20 nm)/TPBI(2 nm)/CBP: Bphen: R-4B(2%)(10 nm)/Bphen(30 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)。其中量子阱结构为 BePP<sub>2</sub>(16 nm); BePP<sub>2</sub>(8 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(8 nm); BePP<sub>2</sub>(6 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(5 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(5 nm); BePP<sub>2</sub>(4 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(4 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(4 nm)/TCTA(2 nm)/BePP<sub>2</sub>(4 nm), 对应不同结构的器件记为 A、B、C、D。其中器件 A 为参考器件, 4 种器件的量子阱的势垒层数可记为  $n=0, 1, 2, 3$ 。

使用 OLED-V 型有机真空蒸镀机蒸镀各层有机膜, 通过控制不同蒸镀源的温度来调整蒸镀速率, 并使用 SI-TM216 型石英晶体膜厚检测仪检测有机功能层的厚度。蒸镀时的真空度约为  $5 \times 10^{-4}$  Pa, 基片的温度控制在 50 °C。ITO 衬底的方块电阻为 25  $\Omega/\square$ , 面积为 20 mm  $\times$  20 mm。在 ITO 上依次蒸镀不同的有机功能材料, 最后沉积

Al 电极。

以 KEITHLEY-4200 电流-电压源、ST-86LA 屏幕亮度计和 OPT-2000 光谱光度计等构成测量系统, 测量器件的亮度-电流-电压、光谱、色坐标等光电参数。所有测试结果都是在室温大气条件下进行。所有样品的发光面积约为 100 mm<sup>2</sup>, 测试前样品在真空下封装。

### 3 结果与讨论

图 2 为器件的能级图<sup>[15-16]</sup>。由图可知, 器件发光可以分为荧光/磷光两发光区域。在荧光区域, 空穴经过空穴注入层和传输层, 还需要克服 0.3 eV 的势垒才能进入蓝光发光层, 所以在 NPB/BePP<sub>2</sub> 界面可以堆积部分空穴, 与阴极部分传输过来的电子相结合形成激子。在 BePP<sub>2</sub>/CBP: Bphen 界面, 因为 BePP<sub>2</sub> 的 HOMO 能级与 CBP 相差 0.3 eV, 空穴有部分堆积在此处, 与从电子传输材料 Bphen 上传输过来的电子相结合形成激子。此处激子一部分向荧光区域扩散进而发蓝光, 一部分向磷光区域扩散而发绿光。在红绿磷光发光区域, 采用的是混合双极性主体材料, 电子和空穴可以在整个磷光区域传输。在此区域, 发光有两种方式, 一是从空穴传输材料 CBP 捕获空穴和电子传输材料 Bphen 上捕获电子进而形成激子直接发光, 二是通过在界面形成的激子而间接发光。

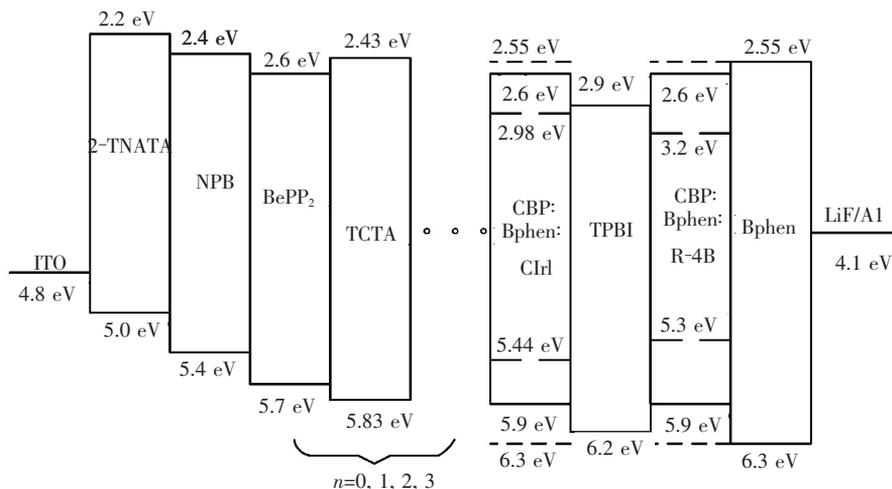


图 2 混合白光有机器件的能级图

Fig. 2 Energy diagram of hybrid white organic devices

图 3 为混合双极材料的 PL 光谱与红绿磷光材料的吸收光谱。从图可以看出, 混合双极材料

的 PL 光谱与吸收谱有很大的重叠部分。Bphen: CBP 主体材料能很好地将能量转移给磷光材料

而发光(光谱重叠的面积越大,主客材料间能量转移越好)。在磷光区域加入的电子传输型薄层 TPBi 增加了形成激子的界面。Bphen 与 TPBi 的 LUMO 能级相差 0.35 eV,电子从 TPBi 传到绿光区域时,要克服 0.35 eV 能级,所以部分电子留在 TPBi 界面,而与 CBP 上的空穴形成激子,进而扩散到绿光区域发出绿光。加入量子阱结构对蓝光的主要作用是通过阱的限制作用截留部分空穴,并将从磷光区域传输过来未能参加发光的电子留在阱内,进而与阱内的空穴形成激子而发蓝光,这样可以提升蓝光材料的发光效率。

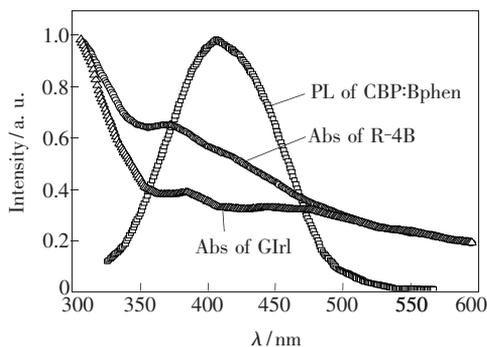


图 3 双极型主体材料 CBP: Bphen 的光致发光光谱和 R-4B、G1rl 的吸收光谱。

Fig. 3 PL spectrum of bipolar type host material CBP: Bphen, and absorption spectra of R-4B and G1rl.

图 4(a)为器件的电流-电压特性曲线。在相同电压下,随着量子阱层数的增加,器件的电流密度变小。其原因一方面是量子阱层数的增加,载流子传输过程中要克服势垒的界面增加;另一方面是势垒层 TCTA 的加入增加了器件发光层的厚度。在相同电流下,器件的阱数越少,对应的电压也越小。器件 A 的电流密度在所有的器件中最大。因为器件 A 没有量子阱结构,所以当空穴从 NPB 传输到荧光材 BePP<sub>2</sub> 时,因没有 TCTA 势垒层而可以无阻碍地输运到磷光发光层,而且器件 A 的发光层厚度在所有器件中最小,所以表现出大的电流现象。

图 4(b)、(c)分别为器件的亮度-电流密度、电流效率-电流密度曲线。器件加入量子阱的主要目的,一是通过阱的限制作用,提升荧光材料的发光效率;二是用阱来调控电子空穴在发光层的分布。在相同电压下,随着阱数的增加,电流密度减小,发光亮度增大,而发光效率先增大后减小。其原因是:(1) 在没有阱结构时,在荧光区域只有

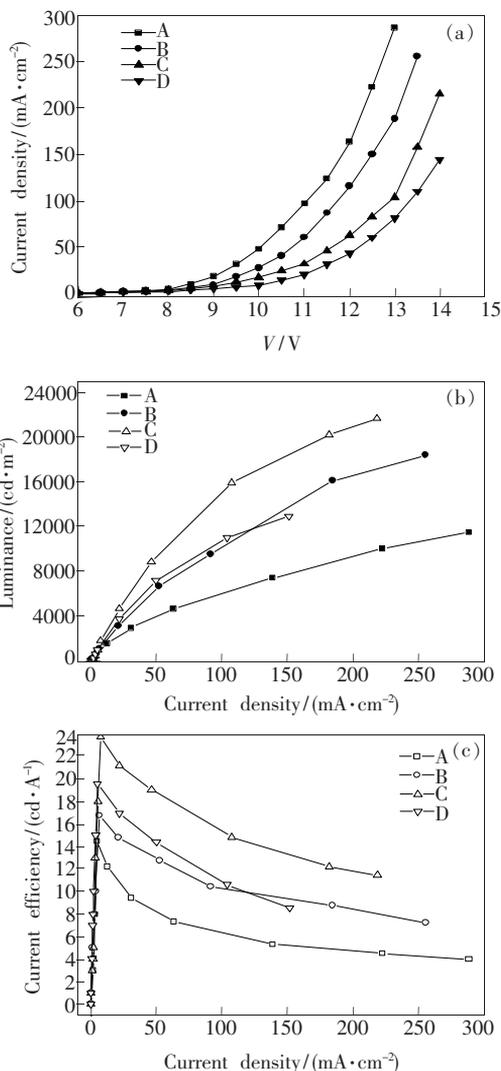


图 4 器件 A、B、C、D 的电流密度-电压(a)、亮度-电流密度(b)、电流效率-电流密度(c)曲线。

Fig. 4 Current density-voltage (a), luminance-current density (b), and current efficiency-current density (c) characteristics of device A, B, C, D, respectively.

在界面处才可能出现复合区域,而荧光区域参加复合的电子和空穴只占总的载流子很少一部分,所以蓝光发光比较弱。大部分空穴和电子分布在磷光区域,磷光材料只能捕获一定的载流子而发光,其余的电子和空穴被传输出发光层而浪费掉,所以器件 A 的发光效率较低。(2) 当量子阱的阱数增加时,因为 BePP<sub>2</sub>/TCTA 构成类似于 I 型量子阱结构,所以空穴和电子都能被限制在阱内。堆积在阱内的空穴增加了空间电场,提升了电子向荧光区域的注入能力,阱内的电子和空穴能充分地结合形成激子而发出蓝光。在磷光区域,因为磷光材料掺杂浓度是不变的,所以掺杂材料捕

获载流子和复合发光的能力大小是确定的。阱的作用能使电子和空穴合理地分布在磷光和荧光区域,让材料充分发光,所以器件 C 表现出最大的发光效率<sup>[17]</sup>。(3) 当阱超过一定数量后,一方面荧光区域限制了大部分的电子和空穴,过高的激子浓度导致激子-激子猝灭效应或激子-极化子效应,反而使发光效率下降,蓝光的发光强度减弱;另一方面在磷光区域只有少部分的空穴和电

子,使磷光材料发光不充分,发光效率下降。由于上述原因,势垒层数为 2 的器件 C 的性能表现最好,其最大发光亮度、电流效率分别为 21 682.5 cd/m<sup>2</sup> 和 23.73 cd/A,在 10 000 cd/m<sup>2</sup> 时的发光效率为 18.44 cd/A。而参考器件 A 的最大发光亮度、电流效率分别为 11 478.7 cd/m<sup>2</sup> 和 14.45 cd/A,在 10 000 cd/m<sup>2</sup> 时的发光效率为 4.55 cd/A。可见,量子阱的加入对器件的性能有大幅度的提升。

表 1 器件在不同电压下的电流效率和功率效率

Table 1 Current efficiency and power efficiency of device A, B, C, D under various voltages

Device	Maximum $\eta_p/(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	8 V		10 V		12 V	
		$\eta_j/(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$	$\eta_p/(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	$\eta_j/(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$	$\eta_p/(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	$\eta_j/(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$	$\eta_p/(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$
A	5.49	13.98	5.49	8.33	2.62	5.07	1.33
B	5.99	10.67	4.18	10.67	4.18	9.99	2.61
C	8.07	12.57	4.92	21.95	6.89	15.01	3.92
D	6.80	10.21	3.97	18.99	5.96	15.01	3.92

量子阱结构的加入提高了器件的发光效率,但同时又增加了发光层的厚度,使器件的驱动电压增大。我们希望器件在小的驱动电压下获得更高的功率效率。随着量子阱的加入,器件的开启电压也随之增大。由图 4(a)可知,在相同的电流下,阱数越多,对应的电压就越大,从而影响到器件的功率效率。不同电压下,器件的电流效率( $\eta_j$ )和功率效率( $\eta_p$ )的值如表 1 所示。其中器件 C 的最大功率效率为 8.07 lm/W,而参考器件的最大功率效率为 5.49 lm/W。相同驱动电压下,电流效率越大,功率效率就越大。对于器件 B、C、D,其功率效率的变化趋势是:随着电压的变大,先变大再变小。在小的电压下,因为量子阱的加入使电流效率增大的趋势比电压增大的趋势大,所以器件的功率效率变大。但是在大的驱动电压下,功率效率下降了。其原因是大的驱动电压,器件发光趋于饱和,进而电流效率和功率效率都会变小。

器件的电致发光光谱如图 5 所示。光谱共有 3 个发射峰,分别来至荧光材料 BePP<sub>2</sub> (465 nm)、磷光材料 GIrI (523 nm) 和 R-4B (605 nm)。器件的电致发光谱覆盖了 400 ~ 800 nm 的一个宽范围的可见光区域。随着阱数的改变,器件的电致发光光谱也有很大的变化。对于绿光发射峰,其强度基本不变,主要原因是绿光发光方式是通过界面形成激子间接发光和直接从混合主体材料捕获

电子、空穴直接发光,阱数改变时,电子和空穴也能有效地输运到绿光发光层,所以对其发光强度影响不大。而蓝光和红光发射峰就对阱数变化很敏感。首先,蓝光主要是处于量子阱内的电子和空穴结合而发光,阱数对其影响最大。随着势垒层数的增加,更多的空穴被限制在阱内,与从磷光区域输运过来的电子结合发出蓝光。即发射峰随阱数的增加而增强。但是,因为量子阱的阱层逐渐变薄、阱的限制作用增强而对阱内结合成的激子压缩变强,这样激子半径变小,使激子的光谱发射峰向高能方向移动即光谱蓝移<sup>[9]</sup>。从图 5 可知,BePP<sub>2</sub> 的发射峰从 465 nm 蓝移到了 450 nm。对于红光发光区域,其发光机理如下:从 TPBI 隧穿过来的空穴跳跃到 CBP 的 HOMO (5.9 eV) 能级上,R-4B 的 HOMO、LUMO 能级分别为 5.3 eV

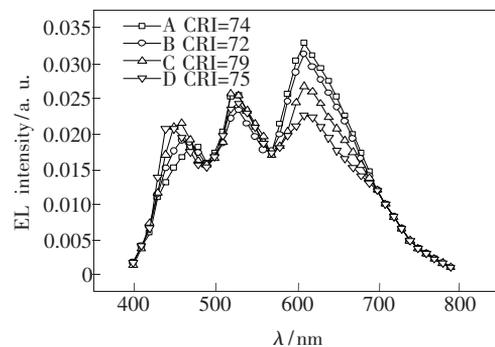


图 5 器件 A、B、C、D 在 9 V 时的电致发光光谱。

Fig. 5 EL spectra of device A, B, C, D at 9 V.

和 3.2 eV, 而 Bphen 的 LUMO 能级为 2.55 eV, 所以 R-4B 能直接捕获 CBP 上的空穴和 Bphen 上的电子形成激子而直接发红光。所以, 隧穿过来的

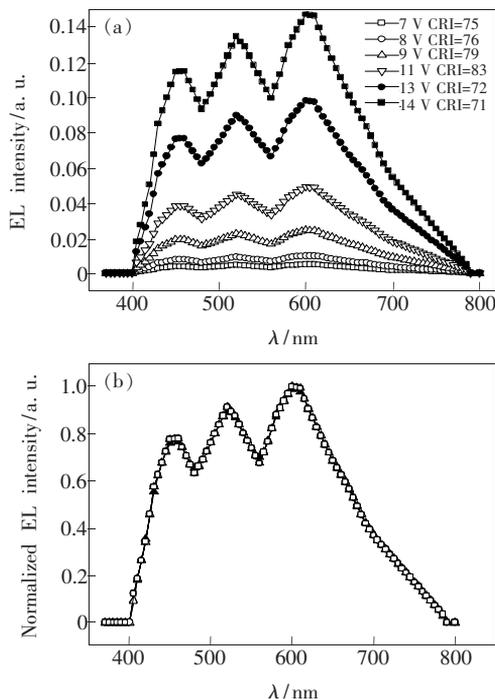


图 6 器件 C 在不同电压的电致发光光谱 (a) 和归一化 EL 光谱 (b)

Fig. 6 EL spectra under various voltages (a) and normalized EL spectrum (b) of device C

空穴数量对红光影响较大。随着阱数的增加, 大部分空穴被限制在荧光层, 隧穿到红光区域的空穴数量减少, 同时发光层厚度增加, 器件中的电流密度也减小了, 所以红色发光减弱。由图 3 可知, 混合主体材料发光谱与 R-4B 的吸收谱叠合的面积很大, 所以能有效地将能量传递给客体材料, 弥补隧穿过来的空穴数量不足的状况。可见, 这样的结构设计能够平衡三种发光的强度, 得到很好的白光色坐标。在 9 V 时, 4 个器件的色坐标分别为 (0.387, 0.376)、(0.379, 0.361)、(0.343, 0.346) 和 (0.355, 0.360), 都处于白光范围内。其中, 势垒层数为 2 的器件 C 的色坐标更接近于理想白光的 (0.333, 0.333)。

器件 C 表现出了很好的发光亮度和发光效率, 进一步研究其在不同电压下的光谱变化也是很有必要的。图 6 为器件 C 在不同电压下的电致发光光谱和其归一化的 EL 光谱。随着电压的增加, 器件 C 的发光强度增大。总体来说, 红光的发光最强, 绿光次之, 蓝光最弱。而其归一化光谱在不同电压下能很好的重叠在一起, 其色稳定性不随电压变化而较大的改变。表 2 为器件 A、B、C、D 的总的性能参数。不同电压下, 器件的色坐标从 7 V 到 14 V 变化大小不同。其中 A 的色坐标变化最大, 为  $\pm (0.010, 0.013)$ ; 而器件 C 的

表 2 器件 A、B、C、D 的性能参数

Table 2 Performance characteristics of device A, B, C, D

	Maximum luminance/ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Maximum current efficiency/ ( $\text{cd} \cdot \text{A}^{-1}$ )	CIE coordination				
			7 V	8 V	9 V	11 V	14 V
A	11 478.7	14.45	(0.378, 0.369)	(0.382, 0.371)	(0.387, 0.376)	(0.388, 0.380)	(0.390, 0.381)
B	18 377.3	16.77	(0.385, 0.365)	(0.380, 0.362)	(0.379, 0.361)	(0.375, 0.360)	(0.370, 0.358)
C	21 682.5	21.17	(0.345, 0.350)	(0.348, 0.349)	(0.343, 0.346)	(0.342, 0.343)	(0.340, 0.342)
D	12 939.8	19.55	(0.348, 0.355)	(0.351, 0.359)	(0.355, 0.360)	(0.360, 0.367)	(0.358, 0.371)

色坐标变化最小, 为  $\pm (0.005, 0.008)$ 。

### 4 结 论

通过磷光/荧光材料组合得到了高发光效率的混合型白光器件, 其中荧光材料为 BePP<sub>2</sub> 发蓝光, 磷光材料为 R-4B、GIr1 分别发红光和绿光。从器件的结构和材料两方面着手提高了荧光/磷光混合型白光器件的发光效率。在结构方面: 加入了量子阱结构, TCTA/Bphen 交替生长构成 I 型量子阱用来提升蓝光的发光效率;

在磷光发光区引入薄的电子输运型 TPBI 间隔层, 厚度为 2 nm, 其作用为扩展复合区域和限制激子在发光区。在材料方面: 磷光材料掺杂在混合双极性主体材料 CBP: Bphen 中, 其作用为电子空穴能均分布在整个磷光发光区域, 而客体发光材料能直接从 CBP: Bphen 捕获空穴电子而直接发光。当量子阱的势垒层数为 2 时, 器件的最大发光亮度和电流效率分别为 21 682.5  $\text{cd}/\text{m}^2$  和 23.73  $\text{cd}/\text{A}$ 。在电压由 7 V 变到 14 V 的过程中, 其色坐标变化为  $\pm (0.005, 0.008)$ 。

而无量子阱的参考器件的最大发光亮度、电流效率分别为  $1\,478.7\text{ cd/m}^2$ 、 $14.45\text{ cd/A}$ , 在  $7\text{ V}$  变到  $14\text{ V}$  的过程中, 色坐标变化为  $\pm(0.010,$

$0.013)$ 。可见, 量子阱结构的加入能够提高器件的发光效率, 也能减小器件的色坐标随电压的变化。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Yuan T L, Wang X F, Zhu X J, *et al.* White organic light-emitting device's preparation and research of doping to chromaticity influence [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2009, 38(10):2530-2532 (in Chinese).
- [ 2 ] Ma F Y, Su J P, Cheng D M, *et al.* High efficiency high brightness red emission microcavity organic light-emitting diode [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2007, 36(8):1397-1399 (in Chinese).
- [ 3 ] An T, Xia Y F, Nan J B, *et al.* Hole injection layer effect on red oled performance [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2013, 42(1):24-27 (in Chinese).
- [ 4 ] Lu D, Guo J H. Efficient blue electroluminescent devices based on hydroxyphenyl pyridine beryllium complex [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2005, 26(2):237-241 (in Chinese).
- [ 5 ] Seo J A, Gong M, Lee J Y. High external quantum efficiency in yellow and white phosphorescent organic light-emitting diodes using an indoloacridinefluorene type host material [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(8):1843-1848.
- [ 6 ] Zhang Z Q, Wang Q, Dai Y F, *et al.* High efficiency fluorescent white organic light-emitting diodes with red, green and blue separately monochromatic emission layers [J]. *Org. Electron.*, 2009, 10(3):491-495.
- [ 7 ] Zhang W, Zhang F H, Huang J. Properties of phosphorescent organic light-emitting diodes with different doping order on light emitting layer [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (光谱学与光谱分析), 2013, 33(7):1763-1766 (in Chinese).
- [ 8 ] Li Y T, Chen H, Chu M H, *et al.* Organic light-emitting devices with a coupled microcavity [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(11):1186-1191 (in Chinese).
- [ 9 ] Huang J, Zhang F H, Zhang W. Regulation of carrier in double organic electroluminescent phosphorescent emitting layer (green and red) [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2014, 29(1):22-27 (in Chinese).
- [ 10 ] Xie Z Y, Li Y Q, Huang J S, *et al.* Organic multiple-quantum well white electroluminescent devices [J]. *Synth. Met.*, 1999, 106(1):71-74.
- [ 11 ] Zhao B, Su Z S, Li W L, *et al.* High efficient white organic light-emitting diodes based on triplet multiple quantum well structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(5):053310-1-4.
- [ 12 ] Zhao F C, Chen Y H, Wang Q, *et al.* Studies of fluorescence/phosphorescence hybrid white organic light-emitting diodes [J]. *Sci. China Chem.* (中国科学:化学), 2013, 43(4):398-406 (in Chinese).
- [ 13 ] Li Q, Zhao J, Wang Q, *et al.* Effect of spacer on white organic light-emitting devices consisted of double light-emitting layers [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(1):45-50 (in Chinese).
- [ 14 ] Sang B S, Su C G, Lee H M, *et al.* Improving light efficiency of white polymer light emitting diodes by introducing the TPBi exciton protection layer [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(14):4143-4146.
- [ 15 ] Park Y S, Lee S H, Kim K H, *et al.* Exciplex-forming co-host for organic light-emitting diodes with ultimate efficiency [J]. *Adv. Funt. Mater.*, 2013, 23(39):4914-4920.
- [ 16 ] Zhang W, Zhang F H, Huang J. Effect of spacer on red and green phosphorescent organic light-emitting devices [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (光谱学与光谱分析), 2014, 34(2):322-326 (in Chinese).
- [ 17 ] Zhang M L, Zhang F H, Zhang W, *et al.* Luminance performances of phosphorescent organic light-emitting diodes based on different Ir(ppy)<sub>2</sub>acac doping[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2014, 29(3):328-332 (in Chinese).



安涛(1964 -),男,陕西西安人,副教授,硕士生导师,2004年于西安理工大学获得硕士学位,主要从事新型功率半导体器件、新型半导体 OLED 平板显示技术与照明等方面的研究。

E-mail: antao@xaut.edu.cn