

文章编号: 0253-2239(2007)03-0487-7

基于 CBP:BCzVB:Btp₂Ir(acac)体系的白色 有机电致发光器件色度飘移研究*

张晓波 委福祥 刘 向 朱文清 蒋雪茵 张志林

(上海大学 嘉定校区材料科学与工程学院, 上海 201800)

摘要: 以苯乙烯类化合物 BCzVB 为蓝色荧光染料,以铱配合物 Btp₂Ir(acac)为红色磷光染料,共掺杂到 CBP 基质中作为发光层,制备了白色有机电致发光器件,研究了该体系发光色度漂移的原因。器件在掺杂 CBP:6%BCzVB:0.2%Btp₂Ir(acac),在驱动电流从 4~200 mA/cm² 变化范围内,发光色坐标从(0.340,0.273)飘移到(0.308,0.273),色坐标轻微蓝移。对器件发光光谱和亮度-电流密度曲线等分析表明:器件色度的轻微蓝移是由于 CBP 基质向 Btp₂Ir(acac)掺杂剂完全的能量传递、荧光染料 BCzVB 向磷光染料 Btp₂Ir(acac)不完全的能量传递等内在物理过程和磷光染料 Btp₂Ir(acac)自身发光饱和等特性共同决定的。

关键词: 光学材料;有机电致发光;色度漂移;能量传递;发光饱和

中图分类号: TN383 文献标识码: A

Color-Coordinate Shift in White Organic Electroluminescent Device Based on CBP:BCzVB:Btp₂Ir(acac) Under Large Driving Currents

Zhang Xiaobo Wei Fuxiang Liu Xiang Zhu Wenqing Jiang Xueyin Zhang Zhilin

(College of Material Science and Engineering, Jiading Campus, Shanghai University, Shanghai 201800)

Abstract: White organic electroluminescence devices (OLEDs) were fabricated, with BCzVB as blue luminescence dye and Btp₂Ir(acac) as red phosphorescence dye doped into CBP substrate as the light-emitting layer. The reason for the system color-coordinate shift is explored. For the device with the doping mass fraction of 6% BCzVB and 0.2% Btp₂Ir(acac), the color-coordinate shifts slightly from (0.340,0.273) to (0.308,0.273), when the driving current varies from 4 to 200 mA/cm². The reason of the slight blue shift is derived by the luminescence spectrum and luminance-current density curve. It is found that internal physical processes, such as the complete energy transfer from host CBP to dopant Btp₂Ir(acac) and incomplete energy transfer from blue dye of BCzVB to red dye of Btp₂Ir(acac), and luminescence saturation of phosphorescent dye of Btp₂Ir(acac) determine the slight blue shift.

Key words: optical material; organic electroluminescence (OLED); color-coordinate shift; energy transfer; luminescence saturation

1 引 言

有机电致发光作为一种新兴的显示技术近年来得到了长足的发展^[1~3]。白色有机电致发光器件因可以用作平面照明光源,同时可与彩色滤色膜结合实现全彩显示,因而具有广阔的市场应用前景,成为近年来研究的热点^[4~6]。目前白色有机电致发光器件面临的主要问题之一是器件发光的色坐标随驱动电压的增大而发生改变,器件发光仅在一定的电

压范围内为白光。对于多发光层的白光器件,发光亮度和效率一般很高,但发光色度漂移较为严重,色坐标 X 值飘移甚至超过 50%^[7]。这是由于在多发光层器件中,载流子复合区域随驱动电压变化而改变,从而引起发光色坐标的变化^[8]。而采用单一发光层结构实现白光,则能消除载流子复合区域随电压变化这一不利影响,得到色度稳定的白光发射。

采用单一发光层结构实现白光,一般具有两种

* 国家 973 计划(2002CB613400)和国家自然科学基金(90201034,60477014,60577041)资助课题。

作者简介: 张晓波(1976—),男,湖北宜昌人,博士研究生,主要从事有机电致发光器件方面的研究。

E-mail: zhangxb2005@sohu.com

导师简介: 蒋雪茵(1942—),女,江苏人,教授,博士生导师,主要从事有机发光的研究。E-mail: xyjiang@mail.shu.edu.cn

收稿日期: 2006-04-29; 收到修改稿日期: 2006-07-24

形式:单一化合物白光发射和染料掺杂结构白光发射。前者因发光色度固定、发光亮度和效率较低而相对研究较少。染料掺杂结构实现白光发射则具有色度可调、色度稳定性较多发光层器件好、发光亮度和效率较高等优点,因而得到广泛的研究。在染料掺杂单一发光层白光器件研究中结果较好的有:Tao 等^[9]以 PAP-NPA 作为蓝光材料,掺杂 0.5% 的红荧烯(rubrene)实现了白光,但器件的色坐标(0.31,0.33)仅在驱动电压为 8~12 V 的区间内较为稳定。Jiang X Y 等^[10]以 JBEM 为基质材料、peryle 和 DCJT 为蓝光和红光染料制备了白光器件。在电流密度 4~200mA/cm² 的区间内,色坐标保持为(0.32, 0.38),与等能点白光的色坐标(0.33, 0.33)相比,色度偏黄。总体而言,专门就白光器件色度随外场变化而变化这一现象作深入细致研究的较少。

本文以苯乙烯类化合物 BCzVB 为蓝色荧光染料,以铱配合物 Btp₂Ir(acac)为红色磷光染料,共掺杂到 CBP 基质中作为发光层,通过改变红色磷光染料 Btp₂Ir(acac)掺杂浓度,实现了器件的白光发射。器件在驱动电流变化时,发光色坐标轻微蓝移,从器件中两种染料获取能量的方式和染料本身的发光特性等方面详细讨论了色坐标轻微蓝移的原因。

2 实 验

制备了蓝色、红色和白色三组发光器件,其结构

分别为:

蓝色: ITO//NPB20nm/CBP:质量分数为 6%的 BCzVB dnm/ BALq 5nm/Alq10nm/LiF1nm/Al

红色: ITO//NPB20nm/CBP:质量分数为 6%的 Btp₂Ir(acac) 20nm/ BALq 5nm/Alq10nm/LiF1nm/Al

白色: ITO//NPB20nm/CBP:质量分数为 6%的 BCzVB : x% Btp₂Ir(acac) 20nm / BALq 5nm/Alq 10nm/LiF 1nm/Al. 这里 N, N'-di (naphthalene-1-yl)-N, N'-diphenyl-benzidine(NPB)是空穴传输层, 4, 4'-N, N'-dicarbazole- biphenyl(CBP)是发光层基质, bis(2-(2'-benzo [4, 5- α] thienyl) pyridinato-N, C3') iridium(acetyl-acetonate)(Btp₂ Ir(acac))是红色磷光染料, 1, 4-bis [2-(3-N-ethylcarbazoryl) vinyl] benzene (BCzVB)是蓝光荧光染料; aluminum (III) bis(2-methyl-8-quinolinato) 4-phenylphenolate (BALq)是激子阻挡层, 8-hydroxyquinoline aluminum(Alq)是电子传输层, LiF/AL 为复合电极。

将 ITO 玻璃衬底经清洗及等离子体处理后放入 1.0×10^{-3} Pa 的真空室内,相继蒸发空穴传输层、发光层、激子限定层及电子传输层。然后制作金属电极,其中染料掺杂发光层采用多源蒸发。最后器件经密封测量。

器件的亮度、色度及光谱通过 PR650 光谱扫描色度计测量,亮度-电压、电流-电压特性用 2400 SourceMeter 及相关线路测量。所用有机材料的分子结构及器件结构示于图 1。

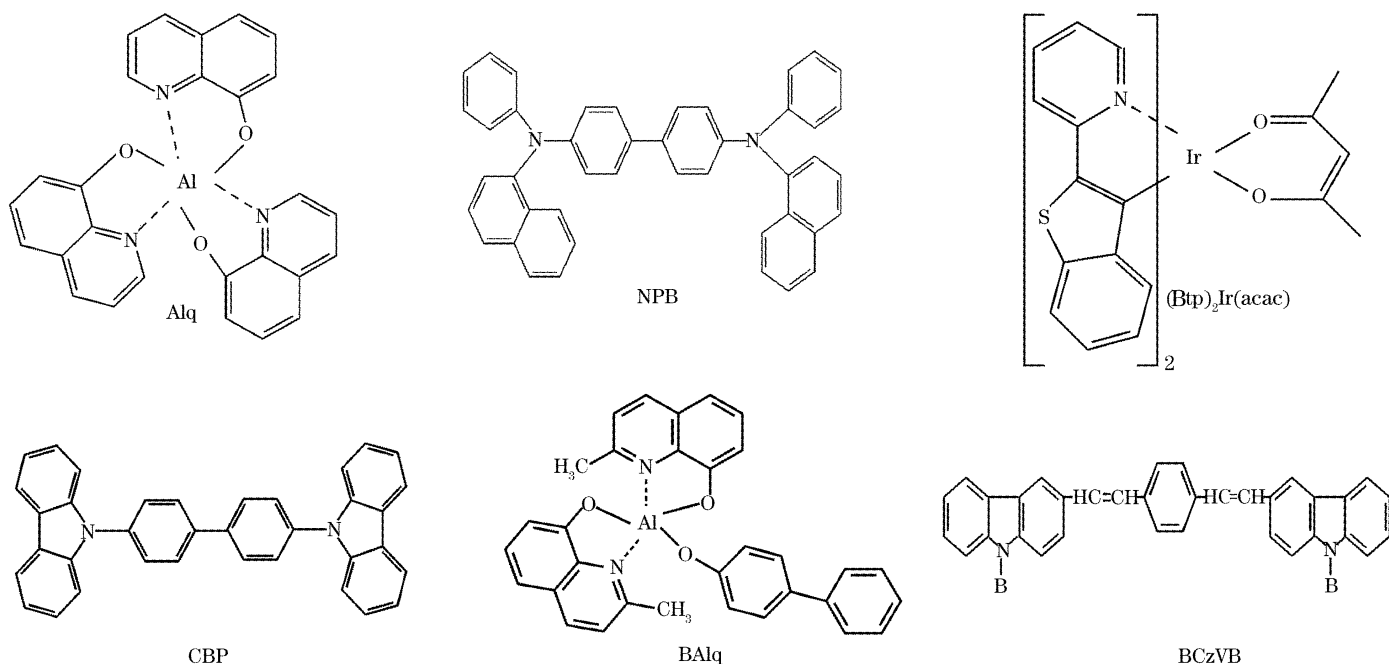


图 1 有机材料分子结构

Fig. 1 Organic molecular structures

3 实验结果与讨论

根据色度学原理,将两种不同颜色的光组合可以实现白光。将蓝色发光和红色发光相混合,实现了器件的白光发射。而在白光中蓝光成分所占比重较大,红光所占比重较小,所以要求蓝光发射具有较高的亮度和效率。为此,首先对蓝光器件的发光层厚度进行了优化。

3.1 色度极为稳定的蓝光器件

制备了发光层厚度 d 分别为 10 nm、15 nm、20 nm 和 25 nm 四个蓝光器件,分别记为 B-10, B-15, B-20, B-25, 其结构为 ITO//NPB20 nm/CBP:质量分数为 6% 的 BCzVB dnm/BAIq 5 nm/Alq 10 nm/LiF 1 nm/Al。其中蓝光染料 BCzVB 的掺杂浓度经优化为质量分数 6%^[11]。器件在电流密度 4 mA/cm² 驱动下的归一化发光光谱示于图 2。由

图可见,四个器件的发光光谱形状与文献[11]所报导的相同,光谱均由源于蓝光染料 BCzVB 分子的发光波长为 448 nm 和 476 nm 的双峰构成。值得注意的是,光谱中没有出现基质 CBP 位于 410 nm 的发光,也没有出现空穴传输层材料 NPB 位于 450 nm 的发光或者激子阻挡层 BAlq 位于 500 nm 的发光,呈现了极为纯正的染料分子 BCzVB 的发光。

蓝光器件的亮度-电流关系如图 2(b)所示。当发光层厚度为 20 nm 时,器件在驱动电流为 400 mA/cm² 时具有最高发光亮度 5076 cd/m²。器件色度随驱动电流的变化关系详见表 1,可以看出,蓝光器件在驱动电流从 4~280 mA/cm² 的变化范围内,发光色坐标始终保持在(0.16,0.21)附近,色度极为稳定。

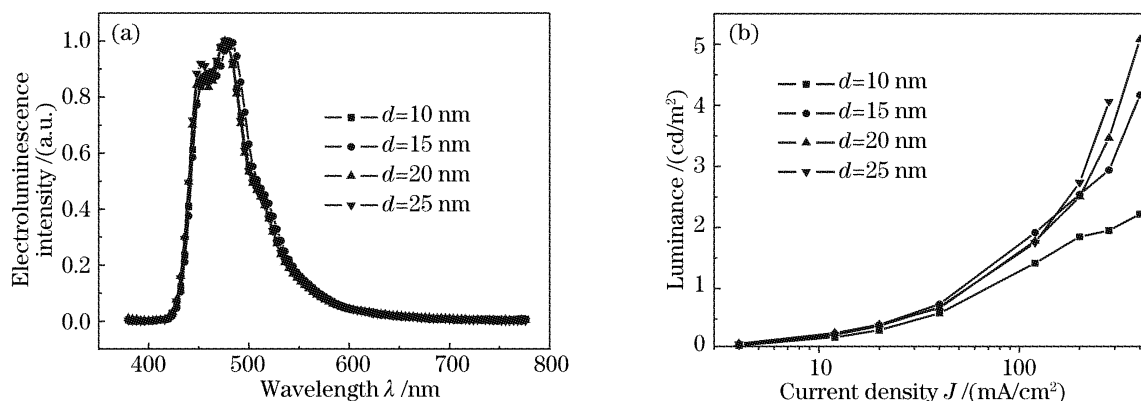


图 2 不同发光层厚度 d 时蓝光器件在电流密度 4 mA/cm² 驱动下归一化发光光谱(a),亮度-电流密度曲线(b)

Fig. 2 Normalized electroluminescence spectra under the driven current density of 4 mA/cm² (a), Luminance (b) versus current density curves of blue-light devices with different light-emitting layer thickness

表 1 器件色度随驱动电流的变化关系

Table 1 Color coordinate of devices under different driving current densities

	4 mA/cm ²	12 mA/cm ²	20 mA/cm ²	40 mA/cm ²	120 mA/cm ²	200 mA/cm ²	280 mA/cm ²
B-10	(0.161,0.211)	(0.161,0.210)	(0.162,0.212)	(0.163,0.212)	(0.164,0.210)	(0.168,0.214)	(0.170,0.218)
B-15	(0.159,0.200)	(0.159,0.199)	(0.159,0.198)	(0.159,0.197)	(0.160,0.194)	(0.164,0.197)	(0.167,0.200)
B-20	(0.158,0.210)	(0.158,0.209)	(0.159,0.209)	(0.161,0.209)	(0.162,0.207)	(0.165,0.210)	(0.167,0.212)
B-25	(0.160,0.199)	(0.160,0.197)	(0.161,0.197)	(0.162,0.196)	(0.167,0.201)	(0.171,0.206)	(0.173,0.207)
R-20	(0.436,0.298)	(0.447,0.300)	(0.453,0.300)	(0.459,0.301)	(0.477,0.306)	(0.488,0.309)	(0.512,0.317)
W-6	(0.605,0.354)	(0.600,0.355)	(0.598,0.355)	(0.593,0.355)	(0.590,0.356)	(0.596,0.359)	(0.603,0.361)
W-3	(0.549,0.340)	(0.551,0.341)	(0.551,0.341)	(0.549,0.341)	(0.549,0.342)	(0.560,0.346)	(0.563,0.347)
W-1	(0.464,0.305)	(0.455,0.303)	(0.452,0.303)	(0.444,0.302)	(0.446,0.307)	(0.449,0.310)	(0.455,0.313)
W-0.2	(0.340,0.273)	(0.324,0.270)	(0.319,0.270)	(0.310,0.268)	(0.300,0.267)	(0.308,0.273)	—

3.2 色度明显红移的红色器件

制备了结构为 ITO//NPB20nm/CBP:质量分数为 6% Btp₂Ir(acac) 20 nm/BAIq 5 nm/Alq 10 nm/LiF 1 nm/A 的红色磷光器件,记为 R-20。其中红色磷光染料 Btp₂Ir(acac)的掺杂浓度经优化为质量分数 6%^[17]。图 3 是器件在不同电流密度激发下以蓝色

发光峰值 464 nm 的发光强度进行归一划所得光谱。可以看出,整个光谱分为波长范围为 550~760 nm 的红光部分和占据整个光谱相当比重的波长范围为 400~550 nm 的蓝光部分。红光部分是磷光染料 Btp₂Ir(acac)的特征发光,它由峰值位于 608 nm 的主峰和 650 nm 的肩峰构成;蓝光部分通过双峰高

器件发光色度随驱动电流的变化关系详见表 1。可以看出,对于白光器件 W-6、W-3、W-1,器件的色坐标在驱动电流从 4 mA/cm² 到 280 mA/cm² 范围内是相当稳定的;而对于器件 W-0.2,其色度由驱动电流从 4 mA/cm² 时的(0.340,0.273)变化到 200 mA/cm² 时的(0.308,0.273),发生轻微蓝移。

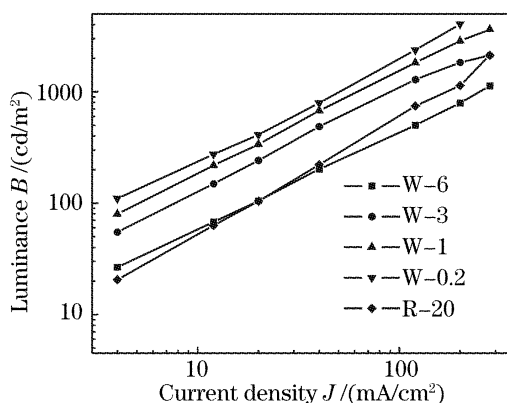


图 5 白光和红光器件的亮度-电流密度曲线

Fig. 5 Curves of luminance-current density for red light device and white-light devices

3.4 白光器件色度轻微蓝移的机理分析

一般说来,基质中掺杂剂的发光其能量来源有以下几种可能,从基质到掺杂剂的能量传递、掺杂剂分子直接俘获载流子或者两者兼而有之。实验中,随着激发电流密度的增大,红光器件发光色坐标明显红移。这与红光染料 Btp₂Ir(acac)在 CBP 基质中获取能量的方式有关。Chihaya Adachi 等^[15] 根据其实验结果认为在基质 CBP 和掺杂剂 Btp₂Ir(acac)之间存在完全的能量传递。吴有智等^[15] 的研究结果表明,Btp₂Ir(acac)在 CBP 基质中既可以通过能量传递从 CBP 基质获得能量,也可以直接俘获载流子获得能量。本工作中,正如前面所分析的,NPB 和 BALq 激子发光的出现则证明磷光染料 Btp₂Ir(acac)在 CBP 基质中不能有效地俘获电子或空穴。从红光器件的能级图 6 可以看出,处于激子阻挡层 BALq LUMO 能级的电子,在电场作用下的迁移分

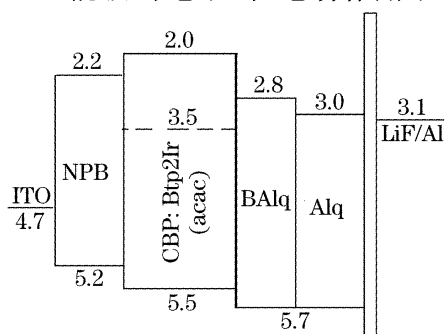


图 6 红光器件能级图

Fig. 6 Energy level diagram of red-light device

为两部分(因为发光层中电子为少子,而少子决定了器件发光的亮度和效率,故这里只讨论电子的分布情况):一部分电子注入到 CBP 基质 LUMO 能级;另一部分则陷入掺杂剂 Btp₂Ir(acac) LUMO 能级,直接为 Btp₂Ir(acac) 分子所俘获,然而正如前面所分析的,掺杂剂 Btp₂Ir(acac)在 CBP 基质中并不能有效的俘获载流子,因而通过载流子俘获方式获取能量效率很低。激子阻挡层 BALq LUMO 能级和 CBP 基质 LUMO 能级之间的势差为 0.8 eV,这是一个较大的势垒高度,电子注入不易。但随着外场增强,电子携带能量增加,从 BALq LUMO 能级注入到 CBP LUMO 能级应该逐渐容易,因而注入到 CBP 基质 LUMO 能级的电子所占比重可能逐渐增大。这些电子继而与空穴复合生成 CBP 激子,然后 CBP 激子将其能量通过完全的能量传递方式传递给 Btp₂Ir(acac)分子,从而使 Btp₂Ir(acac)分子得到激发,也就是说在注入电流密度增大时,掺杂剂 Btp₂Ir(acac)分子可能更多地依靠高效率的能量传递方式而非低效率的载流子俘获方式获得能量而发光,导致发光色度红移。这就解释了红光器件在电流加大时的色度红移现象。

蓝光器件光谱表现为纯正的染料分子 BCzVB 的发光。根据 Youzhi Wu 等^[17] 的研究结果,在结构为 ITO/TPD/CBP:BCzVB / BALq/Alq/Liq/Al 器件中,蓝光染料 BCzVB 分子的发光主要源于载流子俘获。这一点在本实验中也得以证实。红光器件中出现的 NPB 和 BALq 的发光,在白光器件中由于蓝光染料 BCzVB 的掺杂而被猝灭(见图 4),有力地证明了 BCzVB 分子能够极为有效的俘获电子和空穴,阻止了电子从发光层注入到空穴传输层或者空穴从发光层注入到激子阻挡层,抑制了 NPB 和 BALq 激子的生成和发光,从而在光谱中表现为纯粹的蓝光染料 BCzVB 分子的发光。

因此,在 CBP 基质中,对蓝光器件而言,蓝光染料 BCzVB 主要通过十分有效的载流子俘获来获得能量;对红光器件而言,红光染料 Btp₂Ir(acac)既可以从 CBP 基质通过完全的能量传递获得能量,也可以通过载流子俘获来获得能量,但后一种方式效率很低,红光染料 Btp₂Ir(acac) 主要是从 CBP 基质通过完全的能量传递获得能量。因此,在 CBP 基质中,蓝光染料 BCzVB 和红光染料 Btp₂Ir(acac)获取能量的主要方式不同,不存在直接的竞争关系。由此可以确定,在白光器件中,保持蓝光染料的质量比不变而减小红光染料的质量比导致的蓝光染料发光

相对增强这一现象,证明了从蓝光染料 BCzVB 到红色磷光染料 Btp₂Ir(acac)存在有效的能量传递。

白光器件中两种掺杂剂发光的能量来源分别是如下过程(见图 7):蓝光染料 BCzVB,主要是载流子俘获;红光染料 Btp₂Ir(acac)既可以从 CBP 基质通过完全的能量传递高效的获得能量,也可以从蓝光染料 BCzVB 通过不完全的能量传递得到有效激发。比之红光器件,白光器件中磷光染料 Btp₂Ir(acac)由于增加了从蓝光染料 BCzVB 处通过能量传递获得有效激发的途径,因而更易生成三线态激子,在大电流驱动下,三线态激子之间的 T-T 湮没也应更加严重,导致器件亮度下降。这一推断在实验中通过粗略的亮度比较得以证实:从图 5 可以看出,蓝光和红光染料掺杂质量分数均为 6% 的白光器件(W-6)在驱动电流密度小于 20 mA/cm² 时亮度明显高于红光器件,但当驱动电流密度大于 20 mA/cm² 时亮度反而低于红光器件,这正是在白光器件中生成更多的 Btp₂Ir(acac)三线态激子、T-T 湮灭更加严重的结果。甚至在荧光染料质量分数为 6%、磷光染料质量为 3% 的白光器件中,在驱动电流密度小于 280 mA/cm² 时,器件发光亮度远远高于红光器件;而当电流密度增大到 280 mA/cm² 时亮度下降到与红光器件相当。这些结果一方面证明了从蓝光染料 BCzVB 向磷光染料 Btp₂Ir(acac)能量传递的有效性;另一方面也说明随着磷光染料掺杂浓度的减小,三线态激子之间的 T-T 湮没被逐渐抑制了。

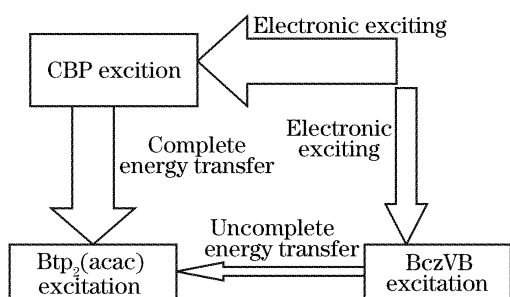


图 7 白光器件中的主要能量关系

Fig. 7 Main energy relationship in white-light devices

总结起来,红光染料 Btp₂Ir(acac) 在 CBP 基质中存在能量传递和载流子俘获两种能量获取方式导致了红光器件在变化的电场下色度红移,而在蓝光染料 BCzVB 和红光染料 Btp₂Ir(acac)共掺杂的白光器件中,由于 BCzVB 能够十分有效的俘获载流子,完全堵塞了 Btp₂Ir(acac)分子通过载流子俘获机制来获取能量这一通道,从而使白光器件避免了在电场变化时色度红移。这一点在表 1 中得到充分

证明,白光器件 W-6、W-3 和 W-1 的色度极为稳定,几乎不随电流的变化而改变。至于器件 W-0.2 的色度随电流的增大而轻微蓝移,主要是因为是在器件 W-0.2 中,红色磷光染料掺杂浓度极低(只有 0.2%),这意味着在器件 W-0.2 中每个磷光染料 Btp₂Ir(acac)分子周围有着比在器件 W-6、W-3 和 W-1 中多得多的 CBP 分子和 BCzVB 分子,因而能够更加容易的从 CBP 分子和 BCzVB 分子获得能量,所以在驱动电流增大时其发光也就更容易饱和,造成从 BCzVB 分子向 Btp₂Ir(acac)分子能量传递通道的部分堵塞,导致蓝光染料 BCzVB 发光的相对增强,因此白光器件 W-0.2 的色度随电流的增大而轻微蓝移。所以,磷光染料 Btp₂Ir(acac)的发光饱和特性也是白光器件 W-0.2 色度轻微蓝移的影响因素之一。

4 结 论

制备了蓝色荧光染料 BCzVB 和红色磷光染料 Btp₂Ir(acac)共掺杂的白光器件,在掺杂水平 CBP: 6% BCzVB: 0.2% Btp₂Ir(acac)条件下,器件在 4~200 mA/cm² 变化范围内,发光色坐标从(0.340, 0.273)蓝移到(0.308, 0.273),色坐标轻微蓝移。器件色度的轻微蓝移是由于 CBP 基质向 Btp₂Ir(acac)掺杂剂完全的能量传递、荧光染料 BCzVB 向磷光染料 Btp₂Ir(acac)不完全的能量传递等内在物理过程和磷光染料 Btp₂Ir(acac)自身发光饱和等特性共同决定的。

参 考 文 献

- 1 Wu Peng, Yang Ligong, Liu Xu *et al.*. Forster energy transfer in organic blend thin-film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 369~372 (in Chinese)
吴 鹏,杨立功,刘 旭等. 有机混合薄膜中的 Forster 能量传递[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 369~372
- 2 Zhu Wenqing, Zheng Xinyou, Jiang Xueyin *et al.*. Study on the luminous properties of blue organic electroluminescent diodes with distyrylarylenes derivative[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 361~365 (in Chinese)
朱文清,郑新友,蒋雪茵等. 以联苯乙烯衍生物为发光层的蓝色有机发光二极管特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 361~365
- 3 Wu Youzhi, Zhu Wenqing, Zheng Xinyou *et al.*. Highly efficient bright red organic electrophosphorescent device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 719~720 (in Chinese)
吴有智,朱文清,郑新友等. 高效率高亮度红色有机电致磷光器件[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 719~720
- 4 Yuanmin Wang, Feng Teng, Changqi Ma *et al.*. Green to white to blue OLEDs by using PBD as a chromaticity-tuning layer[J]. *Displays*, 2004, **25**(5): 237~239
- 5 Feng Li, Gang Cheng, Yi Zhao *et al.*. White-electrophosphorescence devices based on rhenium complexes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(23): 4716~4718

- 6 Gangtie Lei, Liduo Wang, Yong Qiu. Blue phosphorescent dye as sensitizer and emitter for white organic light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(22): 5403~5405
- 7 K. O. Cheon, J. Shinar. Bright white small molecular organic light-emitting devices based on a red-emitting guest-host layer and blue-emitting 4, 4-bis (2, 2'-diphenylvinyl)-1, 1'-biphenyl [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1738~1740
- 8 Lei Gangtie, Duan Lian, Wang Liduo *et al.*. Progress of white organic light emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2004, **25**(3): 221~230(in Chinese)
雷钢铁,段 炼,王立铎等. 有机电致发光白光器件的研究进展 [J]. *发光学报*, 2004, **25**(3): 221~230
- 9 C. H. Chuen, Y. T. Tao. Highly-bright white organic light-emitting diodes based on a single emission layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(24): 4499~4501
- 10 Jiang Xueyin, Zhang Zhilin, Zhang Buxin *et al.*. Stable and current independent white-emitting organic diode [J]. *Synth. Met.*, 2002, **129**(1): 9~13
- 11 Chishio Hosokawa, Hisahiro Higashi, Hiroaki Nakamura *et al.*. Highly efficient blue electroluminescence from a distyrylarylene emitting layer with a new dopant[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(26): 3853~3855
- 12 Zhang Xiaobo, Cao Jin, Wei Fuxiang *et al.*. High efficient red organic electrophosphorescence devices with changing thickness of the emitting layer[J]. *Acta Chin. Phys.*, 2006, **55**(1): 137~140 (in Chinese)
张晓波,曹 进,委福祥等. 发光层厚度变化的高效红色有机电致磷光器件[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 119~123
- 13 Zhang Xiao, Wei Fuxiang, Cao Jin *et al.*. High-efficiency red organic electrophosphorescence devices with different host of light-emitting layer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **6**(26): 508~511 (in Chinese)
张晓波,委福祥,曹 进等. 不同发光层基质材料的高效红色有机电致磷光器件[J]. *半导体光电*, 2005, **6**(26): 508~511
- 14 Chihaya Adachi, Marc A. Baido, Stephan R. Forrest *et al.*. High-efficiency red electrophosphorescence devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(11): 1622~1624
- 15 Wu Youzhi. Study of the properties and mechanism of organic thin film electroluminescent devices[D]. A Dissertation for Ph. D, 2003, Shanghai: Shanghai University Press. 93
吴有智. 有机薄膜电致发光器件特性及机理研究[D]. 博士论文. 上海: 上海大学出版社. 93
- 16 Y. Z. Wu, X. Y. Zheng, W. Q. Zhu *et al.*. Highly efficient pure blue electroluminescence from 1, 4-bis [2-(3-N-ethylcarbazylo) vinyl] benzene [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(24): 5077~5088