

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

基于 *N*-对甲氧苯基咔唑-2-乙炔基-8-羟基喹啉锌的白色和黄色有机电致发光器件的性能

丁桂英¹ 姜文龙^{1,*} 汪津¹ 欧阳新华² 曾和平^{2,*}¹吉林师范大学信息技术学院, 吉林 四平 136000; ²华南理工大学化学与化工学院, 广州 510641

摘要: 通过研究新型荧光染料 *N*-对甲氧苯基咔唑-2-乙炔基-8-羟基喹啉锌(MoBCzHQZn)的电致发光(EL)特性, 发现 MoBCzHQZn 具有较强的发光特性和空穴传输特性, 利用此特性制备了非掺杂型的有机电致白光器件和掺杂型的有机电致黄光器件. 白光器件的结构为 ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al, 器件在 15 V 电压下实现了白光发射, 色坐标为(0.3719, 0.3275), 最大发光亮度为 3414 cd·m⁻², 在 14 V 电压下的最大发光效率为 1.69 cd·A⁻¹、黄光器件的结构为 ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6%Ir(ppy)₃:10%MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6%Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al, 器件在 15 V 电压下实现了黄绿光发射, 色坐标为(0.3590, 0.5787), 最大发光亮度为 11073 cd·m⁻², 在 9 V 电压下的最大发光效率为 2.51 cd·A⁻¹.

关键词: 有机电致发光器件; 空穴传输发光材料; 亮度
中图分类号: O644

Properties of White and Yellow Organic Light-Emitting Devices Based on (*E*)-2-(2-(9-(4-Methoxyphenyl)-9*H*-Carbazol-3-yl) Quinolato-Zinc

DING Gui-Ying¹ JIANG Wen-Long^{1,*} WANG Jin¹ OUYANG Xin-Hua² ZENG He-Ping^{2,*}¹College of Information Technology, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin Province, P. R. China;²School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: We investigated the electroluminescence (EL) characteristics of a novel yellow emitting material: (*E*)-2-(2-(9-(4-methoxyphenyl)-9*H*-carbazol-3-yl)quinolato-zinc (MoBCzHQZn). The results demonstrated the MoBCzHQZn with strong yellow emitting and hole-transporting ability. Based on these performances, a series of un-doping white and doping yellow organic light-emitting devices (OLEDs) were fabricated. The white device was fabricated as follows: ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al, white OLEDs were obtained with Commission International de L'Eclairage coordinates of (0.3719, 0.3275), the maximum luminance was 3414 cd·m⁻² at an applied voltage of 15 V and the maximum luminous efficiency was 1.69 cd·A⁻¹ at an applied voltage of 14 V. The yellow device was fabricated as follows: ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al, yellow OLEDs were obtained with Commission International de L'Eclairage coordinates of (0.3590, 0.5787), the maximum luminance was 11073 cd·m⁻² at an applied voltage of 15 V and the maximum luminous efficiency was 2.51 cd·A⁻¹ at an applied voltage of 9 V.

Key Words: Organic light-emitting devices; Hole-transporting emitter material; Luminance

Received: May 4, 2009; Revised: June 7, 2009; Published on Web: August 19, 2009.

*Corresponding authors. Email: jiang_wl@163.com, hpzeng@scut.edu.cn; Tel: +86-434-3291993.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (20471020, 20671036), National Science Foundation for Young Scientists of China (10804036), Foundation of Science and Technology of Jilin, China (20050523, 20080528), Foundation of Education Bureau of Jilin Province, China (200325, 200454), and Foundation of Science and Technology of Guangdong Province, China (2006A10801002).

国家自然科学基金项目(20471020, 20671036)、国家青年基金项目(10804036)、吉林省科技发展计划项目(20050523, 20080528)、吉林省教育厅科研计划项目(200325, 200454)和广东省科技项目(2006A10801002)资助

白光有机电致发光器件(WOLED)搭配彩色滤光片已经变成制作全彩化显示器的主要方法之一,一般都是引用多层各自发光的混合法,如天蓝色加黄光(二波段)或红加绿加蓝光(三波段)的白光组合^[1-3].在高分辨率全彩的主动有机电致发光(OLED)面板发展趋势中,白光加彩色滤光片是目前极为看好的量产技术^[4].而日本三洋柯达(SKD)所用的 OLED 白光光源就是一种天蓝加黄光的简易组合,并可达到高效率及高稳定性的商品要求.所以在 OLED 研发的发光材料中,黄光虽然不是原色,但它却有一定的重要性.目前优异的黄光荧光染料仅有价格较昂贵的红荧烯(rubrene).所以研发优质的黄光发光材料尤为重要.8-羟基喹啉铝(Alq₃)是 Kodak 公司最早提出的用作电致发光(EL)器件中的发光层材料的物质,Alq₃几乎满足了有机 EL 器件对材料提出的所有要求,因此是一种难得的 EL 发光材料.人们普遍认为 8-羟基喹啉与 Zn²⁺形成的配合物与 Alq₃类似,通过修饰 8-羟基喹啉的结构或者改变其配位金属原子,可以获得性能较好的金属配合物^[5-9].我们课题组^[10]已经报道过一种 8-羟基喹啉金属锌配合物 TPAHQZn,用此材料制备的非掺杂型有机电致白光器件的最大发光效率为 2.66 cd·A⁻¹.

虽然实现 WOLED 的方法有很多^[11-16],可采用非掺杂的方法^[17-19]制备的白光器件降低了器件的复杂度,提高了器件的可重复性,更有利于器件的实用化;且在发光层中掺杂高效率的荧光染料,是改善和提高电致发光器件效率的重要途径^[20-23].本文报道了一种新型 *N*-对甲氧苯基咔唑-2-乙烯基-8-羟基喹啉锌(MoBCzHQZn)黄橙色发光材料,研究了它的电致发光特性,利用它的空穴传输和黄橙色发射特性,制备了非掺杂型的有机电致白光器件和掺杂型的黄光器件.

1 实验

1.1 器件制备

本实验中所用 MoBCzHQZn(纯度 99%)是华南理工大学化学与化工学院曾和平教授等合成的新材料,其它材料均从北京意莱特光电材料技术有限公司购买.

为了研究 MoBCzHQZn 的电致发光性能,设计了以下四种结构的器件:器件 A, ITO/2T-NATA(50 nm)/MoBCzHQZn(40 nm)/LiF(0.5 nm)/Al; 器件 B, ITO/2T-NATA(20 nm)/NPBX(20 nm)/MoBCzHQZn

(30 nm)/BCP(10 nm)/Alq₃(20 nm)/LiF(0.5 nm)/Al; 器件 C, ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(30 nm)/BCP(10 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF(0.5 nm)/Al; 器件 D, ITO/2T-NATA(20 nm)/NPBX(30 nm)/MoBCzHQZn(30 nm)/BCP(10 nm)/LiF(0.5 nm)/Al. 器件 A, 只有空穴注入层(2T-NATA(4,4',4''-三(2-萘基苯基氨基)三苯基胺)) and 电子注入层(LiF)的单发光层器件,主要研究它的发光特性和载流子传输特性; 器件 B, 既有空穴传输层 NPBX(*N,N'*-双(3-萘基)-*N,N'*-二苯基-[1,1'-二苯基]-4,4'-二胺)又有电子传输层 Alq₃; 器件 C, 只有电子传输层 Alq₃, 无空穴传输层(NPBX), 主要研究 MoBCzHQZn 的空穴传输特性; 器件 D, 只有空穴传输层 NPBX, 无电子传输层 Alq₃, 主要研究 MoBCzHQZn 的电子传输特性.

最后,利用 MoBCzHQZn 作黄橙光发射层和空穴传输层,制备了结构为 ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8 nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的非掺杂型有机电致白光器件和结构为 ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的掺杂型有机电致黄光器件.

实验所用 MoBCzHQZn 的化学结构式如图 1 所示.有机电致白光和黄光器件的能级图分别如图 2 和图 3 所示,实验选用深圳南玻集团生产的方块电阻为 40 Ω·□⁻¹ 的氧化铟锡(ITO)基片,将 ITO 导电玻璃作为衬底,以覆于其上的 ITO 用作阳极.选用 2T-NATA 作空穴注入层,新材料 MoBCzHQZn 既作为空穴传输层又作为黄橙光发射层, NPBX 作为蓝光发射层和空穴传输层, 2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-啉啡咯啉(BCP)作为空穴阻挡层, Alq₃ 作为电子传输层, 1,3,5-三(*N*-苯基-2-苯并咪唑)苯(TPBi)作为电子传输层和空穴阻挡层, 三(2-苯基吡啶)合铱(Ir(ppy)₃)起到磷光敏化剂的作用, 4,4'-*N,N'*-二咔唑联苯(CBP)作为母体, LiF 用作缓冲层, 以利于电子注

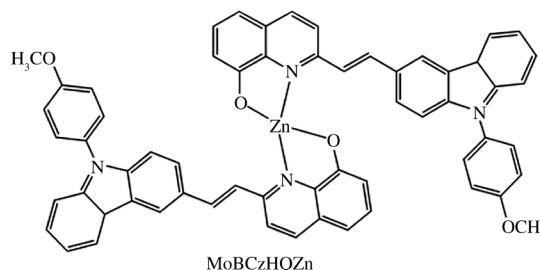


图 1 MoBCzHQZn 的化学结构式
Fig.1 Chemical structure of MoBCzHQZn

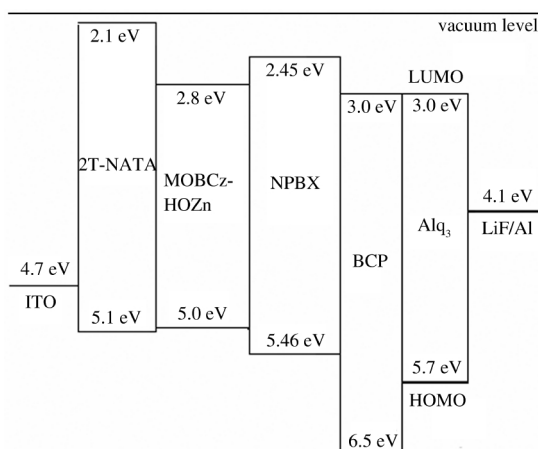


图2 白光器件 ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn (25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8 nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的能级图

Fig.2 Schematic energy level of the white device with the structure of ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8 nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al

ITO: indium tin oxide; 2T-NATA: 4,4',4''-[N-(2-naphthyl)-N-phenylamino]-triphenylamine; NPBX: N,N'-bis-(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine; BCP: 2,9-dimethyl,-4,7-diaphenyl-1,10-phenanthroline; Alq₃: tris(8-quinolinolato)aluminum; HOMO: the highest occupied molecular orbital; LUMO: the lowest unoccupied molecular orbital

入, 大约蒸镀 120 nm 厚的 Al 作阴极。

实验中将 ITO 玻璃衬底用清洁剂、丙酮、乙醇、去离子水反复冲洗, 超声、干燥。器件的制备在多源有机分子气相沉积系统中进行。将所用材料分别放在不同的蒸发源(石英坩埚)中, 每个蒸发源的温度可以单独控制。按设计的结构分别生长不同的有机材料层, 最后生长 LiF 和 Al 作为阴极, 在生长的过程中系统的真空度维持在 3.3×10^{-4} Pa 左右, 蒸发速度控制在 $0.2-0.4 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$, 器件有效发光面积为 $4-9 \text{ mm}^2$ 。

1.2 器件性能表征

在室温(22 °C)、大气环境下, 对以上未封装器件用由计算机控制的美国吉时利(Keithley)仪器公司生产的可编程的电流-电压源 Keithley Source 2400 和美国产的光谱扫描光度计 PR655 所构成的测试系统来表征亮度(L)-电压(V), 电流(I)-电压(V), 色坐标及电致发光(EL)光谱。有机膜的厚度由上海产的 FTM-V 型石英晶体膜厚监测仪监测。所有的数据都是在室温下大气中测得。

2 结果与讨论

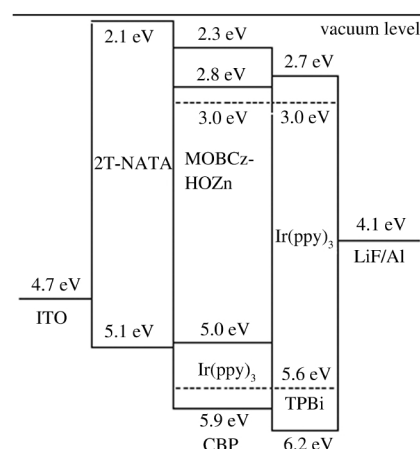


图3 黄光器件 ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的能级图

Fig.3 Schematic energy level of the yellow device with the structure of: ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al

Ir(ppy)₃: fac tris (2-phenylpyridine) iridium; TPBi: 2,2',2''-(1,3,5-phenylene)tris(1-phenyl-1H-benzimidazole); CBP: 4,4-N,N'-dicarbazole-biphenyl

2.1 MoBCzHQZn 的电致发光特性

图 4 为器件 A 在不同电压时的归一化电致发光光谱。由图可看出, 器件的 EL 谱几乎覆盖了从 380 nm 到 780 nm 的整个可见光范围, 器件在 590 nm 左右有明显的发射峰, 是来自 MoBCzHQZn 的黄橙光发射, 不同电压下器件的归一化电致发光光谱几乎相同, 这说明 MoBCzHQZn 器件的电致发光光谱并不随着驱动电压的变化而变化, 器件具有稳定的色纯度。

由图 5 器件 A 的亮度-电压和效率-电压曲线

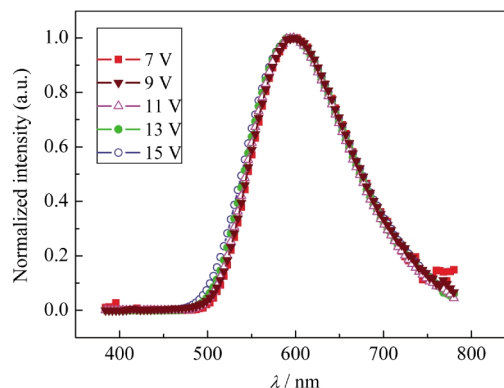


图4 器件 A 在不同电压下的归一化电致发光光谱图
Fig.4 Normalized EL spectra of device A at different voltages

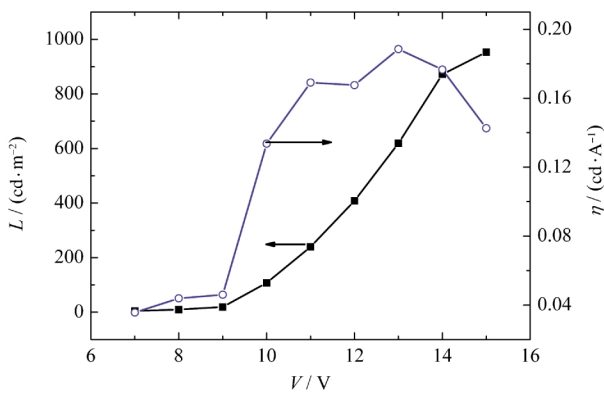


图5 器件A的亮度(L)-电压(V)和效率(η)-电压(V)曲线
Fig.5 Luminance-voltage and efficiency-voltage characteristics of device A

可知,器件的启亮电压为7 V,随着电压的升高,器件的亮度明显增大,呈现出典型的二极管光电特性.器件A具有较好的发光性能,在13 V电压下获得的最大发光效率为 $0.19 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$,15 V电压下获得的最大发光亮度为 $953.2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,色坐标从7 V时的(0.5311, 0.4629)到15 V的(0.5131, 0.4752)变化很小.这个器件表明了MoBCzHQZn具有很强的发光特性和空穴/电子传输特性.制备发光器件时它可直接作发光层、空穴传输层和电子传输层.这个单发光层器件的性能比报道的双量子阱的金属配合物器件的性能^[20]好很多.

2.2 MoBCzHQZn的空穴/电子传输特性

器件B、C、D的 L - V 曲线如图6所示.由图可看出,三种器件的启亮电压都低于7 V,在电压7 V时的亮度分别为9.4、4.5和 $1.2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,随着电压的升高,三个器件的亮度均明显增大,呈现出典型的二极管光电特性.其中器件C具有较好的发光性能,

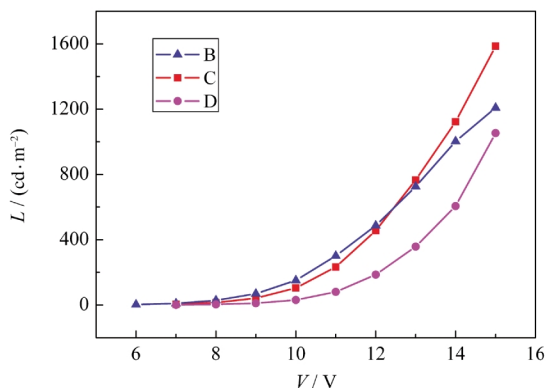


图6 器件B、C、D的亮度(L)-电压(V)曲线
Fig.6 Luminance-voltage characteristics of devices B, C and D

在电压为15 V时,最大亮度达到了 $1586 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,此时色坐标为(0.5284, 0.4637),器件B为 $1209 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,色坐标为(0.5278, 0.4642),器件D为 $1053.4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,色坐标为(0.5175, 0.4710),在相同的电压下,器件B和C的亮度普遍高于器件D.三个器件均属于理想的黄橙光发射.为了进一步探讨MoBCzHQZn器件的电致发光特性,给出了器件B、C和D的 η - V 曲线,如图7所示.可以看出,随着电压的逐渐增大,三个器件的发光效率的变化趋势基本一致.在电压小于12 V(B为10 V)时,三个器件的发光效率都逐渐增加,在电压12 V时(B为10 V),器件C、B和D的发光效率分别达到最大值 0.42 、 0.32 和 $0.28 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$,当电压大于12 V时,三个器件的发光效率呈现缓慢的下降趋势,在相同的电压下,器件C的效率明显高于B和D,器件B的效率又高于器件D.说明了无空穴阻挡层NPBX的器件C的发光层MoBCzHQZn同时具有较强空穴传输能力;无电子传输层Alq₃的器件D发光层MoBCzHQZn同时具有较弱的电子传输能力,即新材料MoBCzHQZn具有较好的发光特性和空穴传输特性.从MoBCzHQZn的能级(2.8 eV, 5.0 eV)看(见图2和3),更进一步说明MoBCzHQZn具有较强的空穴传输性能,器件A-D的主要性能参数见表1.

2.3 MoBCzHQZn作发光层和空穴传输层的有机电致白光和黄光器件

以上实验结果表明,MoBCzHQZn具有较强的发光特性和空穴传输特性,利用这些特性制备了结构为ITO/2T-NATA(20 nm)/MoBCzHQZn(25 nm)/NPBX(13 nm)/BCP(8 nm)/Alq₃(34 nm)/LiF(0.5 nm)/Al的非掺杂型有机电致白光器件和结构为ITO/2T-

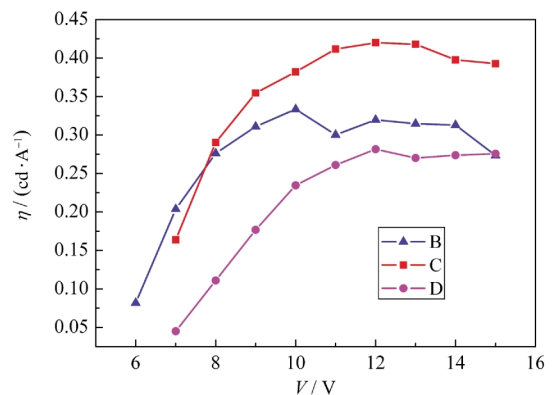


图7 器件B、C和D的效率(η)-电压(V)曲线
Fig.7 Efficiency-voltage characteristics of devices B, C and D

表 1 器件 A-D 的主要性能参数
Table 1 Performance of devices A-D

Device	$L_{\max}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	${}^1\text{CIE coordinates}(x, y)$	$\eta_{\max}/(\text{cd}\cdot\text{A}^{-1})$	${}^2\text{CIE coordinates}(x, y)$
A	953.2	(0.5131, 0.4752)	0.19	(0.5200, 0.4718)
B	1209	(0.5278, 0.4642)	0.32	(0.5336, 0.4603)
C	1586	(0.5284, 0.4637)	0.42	(0.5336, 0.4603)
D	1053.4	(0.5175, 0.4710)	0.28	(0.5284, 0.4646)

L_{\max} : maximum luminance; ${}^1\text{CIE coordinates}(x, y)$: Commission International de L'Eclairage coordinates of maximum luminance; η_{\max} : maximum luminous efficiency; ${}^2\text{CIE coordinates}(x, y)$: Commission International de L'Eclairage coordinates of maximum luminous efficiency.

NATA (20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn (25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的掺杂型有机电致黄光器件.

由图 8 白光器件 ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al 在不同电压时的归一化电致发光光谱可知, 器件的 EL 谱几乎覆盖了从 380 nm 到 780 nm 的整个可见光范围, 分别表现为在 450 nm 附近的 NPBX 的蓝光发射, 以及 590 nm 附近的 MoBCzHQZn 的黄橙光发射. 因此, 激子的结合区域被控制在 MoBCzHQZn 和 NPBX 发光层内 (见图 2). 而且, 随着电压的升高, 黄橙光的发射强度相对于蓝光的发射强度逐渐增强. 主要原因有以下几点: (1) NPBX 和 MoBCzHQZn 的厚度比例; (2) NPBX 和 MoBCzHQZn 的发光效率; (3) NPBX 和 MoBCzHQZn 界面存在 0.46 eV 的势垒差 (见图 2). 在本实验中, 这种现象主要是 NPBX 和 MoBCzHQZn 的发光效率和 NPBX 和 MoBCzHQZn 界面的势垒差作用的结果^[10]. 器件的色坐标由 6 V(2.327 cd·m²) 时的 (0.3181, 0.3053) 到 15 V(3414 cd·m²) 时的 (0.3719, 0.3275) 均在白光范围内.

由图 9 白光器件 ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/

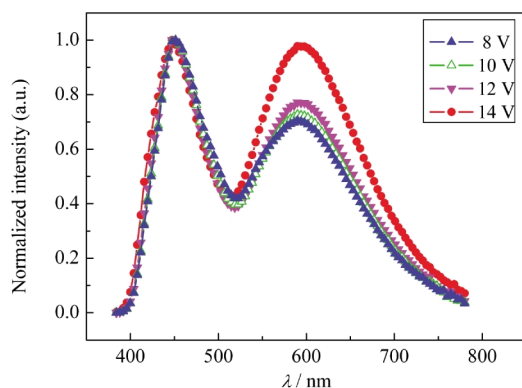


图 8 白光器件 ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al 在不同电压下的归一化光谱图
Fig.8 Normalized EL spectra of white device ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al at different voltages

NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al 的亮度-电压和效率-电压曲线可知, 器件的启亮为 6 V, 器件在 14 V 时达到最大电流效率为 1.69 cd·A⁻¹, 在 15 V 时达到最大亮度为 3414 cd·m⁻², 此时色坐标为(0.3719, 0.3275). 并且器件的色坐标由 6 V(2.327 cd·m²) 时的(0.3181, 0.3053)到 15 V(3414 cd·m²) 时的(0.3719, 0.3275)均在白光范围内, 说明黄橙光材料 MoBCzHQZn 的性能比报道的基于锌金属配合物荧光染料的性能好^[25].

由图 10 黄光器件 ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn (25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的亮度-电压和效率-电压曲线可知, 器件的启亮电压较低(<6 V), 在 6 V 时亮度已达到 64.94 cd·m⁻², 器件在 9 V 时达到最大发光效率为 2.51 cd·A⁻¹, 在 15 V 时达到最大发光亮度为 11073 cd·m⁻², 此时色坐标为(0.3590, 0.5787). 器件的性能较好主要原因有三方面: 首先, 2T-NATA 的最高占据分子轨道(HOMO)能级(5.1 eV)和 MoBCzHQZn 的 HOMO 能级(5.0 eV)几乎相等, 更有利于空穴注入(见图 3); 其次, 黄光发射层采用母体材料 CBP 中同时掺杂 Ir(ppy)₃ 和 MoBCzHQZn 这种结构, 利用了 Ir(ppy)₃ 的磷光敏化作用, 提高了

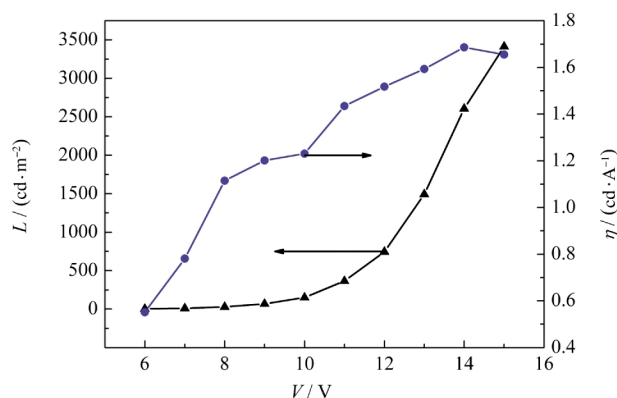


图 9 白光器件 ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al 的亮度-电压和效率-电压曲线
Fig.9 Luminance-voltage and efficiency-voltage characteristics of white device with the structure of ITO/2T-NATA/MoBCzHQZn/NPBX/BCP/Alq₃/LiF/Al

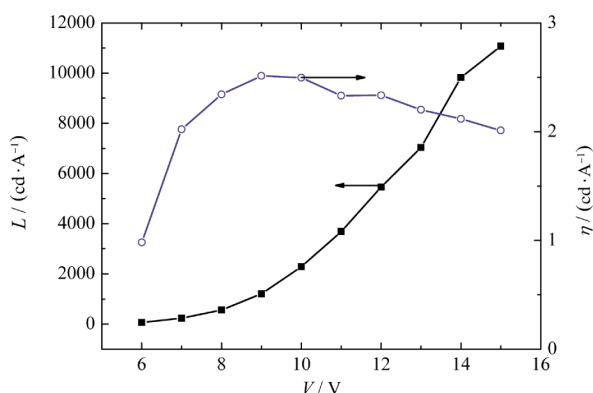


图 10 黄光器件 ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al 的亮度-电压和效率-电压曲线
Fig.10 Luminance-voltage and efficiency-voltage characteristics of yellow device with the structure of ITO/2T-NATA(20 nm)/CBP:6% Ir(ppy)₃:10% MoBCzHQZn(25 nm)/TPBi:6% Ir(ppy)₃(47 nm)/LiF(0.5 nm)/Al

MoBCzHQZn 的发光效率和亮度^[26];第三,利用Ir(ppy)₃掺杂到电子传输层 TPBi 中,提高了电子的迁移率,调整了空穴和电子的平衡,将激子有效地限制在发光层中发光,从而提高了有机电致发光器件的效率^[27]。

3 结论

研究了新型荧光染料 MoBCzHQZn 的电致发光特性,并利用 MoBCzHQZn 的发光特性和空穴传输特性,制备了非掺杂型的有机电致白光器件和掺杂型的有机电致黄光器件。白光器件在 14 V 电压下获得的最大发光效率为 1.69 cd·A⁻¹, 15 V 电压下获得的最大发光亮度为 3414 cd·m⁻²,器件的色坐标由 6 V(2.327 cd·m⁻²)时的(0.3181, 0.3053)到 15 V(3414 cd·m⁻²)时的(0.3719, 0.3275)均在白光范围内。黄光器件在 9 V 时达到最大发光效率为 2.51 cd·A⁻¹,在 15 V 时达到最大发光亮度为 11073 cd·m⁻²,此时色坐标为(0.3590, 0.5787)。

References

- 1 D'Andrade, B. W.; Forrest, S. R. *Adv. Mater.*, **2004**, **16**: 1585
- 2 Kido, J.; Kimura, M.; Nagai, K. *Science*, **1995**, **267**: 1332
- 3 Liu, T. H.; Wu, Y. S.; Lee, M. T.; Chen, H. H.; Liao, C. H.; Chen, C. H. *Appl. Phys. Lett.*, **2004**, **85**: 4304
- 4 Chen, J. X.; Huang, X. W. *Organic electroluminescent materials and devices*. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 122 [陈金鑫, 黄孝文. OLED 有机电致发光材料与器件. 北京: 清华大学出版社, 2007: 122]
- 5 Kido, J.; Ohtaki, C.; Hongawa, K.; Okuyama, K.; Nagai, K. *Jpn. J.*

- Appl. Phys.*, **1993**, **32**: 917
- 6 Hamada, Y.; Sano, T.; Fujii, H.; Nishio, Y.; Takahashi, H.; Shibata, K. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1996**, **35**: 1339
- 7 Sharma, A.; Singh, D.; Makrandi, J. K.; Makrandi, J. K.; Kamalasanan, M. N.; Shrivastva, R.; Singh, I. *Mater. Lett.*, **2007**, **61**: 4614
- 8 Pohl, R.; Montes, V. A.; Shinar, J.; Anzenbacher, P. *J. Org. Chem.*, **2004**, **69**: 1723
- 9 Barberis, V. P.; Mikroyannidis, J. A. *Synth. Met.*, **2006**, **156**: 865
- 10 Ding, G. Y.; Jiang, W. L.; Wang, J.; Wang, L. Z.; Wang, G. D.; Cong, L.; Ouyang, X. H.; Zeng, H. P. *Semicond. Sci. Technol.*, **2009**, **24**: 025016
- 11 Li, G.; Shinar, J. *Appl. Phys. Lett.*, **2003**, **83**: 5359
- 12 Adamovich, V.; Brooks, J.; Tamayo, A.; Alexander, A. M.; Djurovich, P. I.; Forrest, S. R.; Thompson, M. E. *New J. Chem.*, **2002**, **26**: 1171
- 13 D'Andrade, B.; Brooks, J.; Adamovich, V.; Thompson, M. E.; Forrest, S. R. *Adv. Mater.*, **2002**, **14**: 1032
- 14 D'Andrade, B. W.; Thompson, M. E.; Forrest, S. R. *Adv. Mater.*, **2002**, **14**: 147
- 15 Lei, G. T.; Wang, L. D.; Qiu, Y. *Appl. Phys. Lett.*, **2004**, **85**: 5403
- 16 D'Andrade, B. W.; Forrest, S. R. *J. Appl. Phys.*, **2003**, **94**: 3101
- 17 Chen, C. H.; Shi, J.; Tang, C. W. *Macromol. Symp.*, **1998**, **125**: 1
- 18 Xie, W. F.; Liu, S. Y. *Materials Science Forum*, **2005**, **475**: 1799
- 19 Ding, G. Y.; Jiang, W. L.; Wang, J.; Chang, X.; Wang, J.; Wang, L. Z.; Wang, G. D. *Journal of Optoelectronics·Laser*, **2008**, **19**(8): 1039 [丁桂英, 姜文龙, 汪津, 常喜, 王静, 王立忠, 王广德. 光电子·激光, **2008**, **19**(8): 1039]
- 20 Murata, H.; Merritt, C. D.; Kafafi, Z. H. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **1998**, **4**: 119
- 21 Zhou, X.; Pfeiffer, M.; Blochwitz, J.; Werner, W.; Nollau, A.; Fritz, T.; Leo, K. *Appl. Phys. Lett.*, **2001**, **78**: 410
- 22 Tokito, S.; Tsuzuki, T.; Sato, F.; Iijima, T. *Current Appl. Phys.*, **2005**, **5**: 331
- 23 Cheng, G.; Zhang, Y. F.; Zhao, Y.; Liu, S. Y. *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, **88**: 083512
- 24 Hao, Y. Y. Ph. D. Dissertation. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006 [郝玉英. 博士学位论文. 太原: 太原理工大学, 2006]
- 25 Zheng, J. J.; Hua, Y. L.; Yin, S. G.; Feng, X. L.; Wu, X. M.; Wang, S. G.; Sun, Y. Y.; Li, Y. F.; Yang, C. H.; Shuai, Z. G. *Chin. J. Lumin.*, **2004**, **25**: 231 [郑加金, 华玉林, 印寿根, 冯秀岚, 吴晓明, 王树国, 孙媛媛, 李永舫, 杨春和, 帅志刚. 发光学报, **2004**, **25**(3): 231]
- 26 Ding, G. Y.; Jiang, W. L.; Chang, X.; Hua, J.; Han, Q.; Ouyang, X. H.; Zeng, H. P. *Acta Phys.-Chim. Sin.*, **2009**, **25**: 958 [丁桂英, 姜文龙, 常喜, 华杰, 韩强, 欧阳新华, 曾和平. 物理化学学报, **2009**, **25**: 958]
- 27 Ding, G. Y.; Jiang, W. L.; Wang, J.; Wang, L. Z.; Wang, J.; Chang, X. *Research and Progress of Solid State Electronics*, **2008**, **28**: 392 [丁桂英, 姜文龙, 汪津, 王立忠, 王静, 常喜. 固体电子学研究与进展, **2008**, **28**: 392]