

• 研究论文 •

2-对联苯-8-羟基喹啉锌的合成及其应用于新型白光 OLED

赵 婷 丁洪流 施国跃 金利通*

(华东师范大学化学系 上海 200062)

摘要 合成了一种全新的有机发光材料 2-对联苯-8-羟基喹啉锌($\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$), 通过 ^1H NMR, UV-Vis 等对配合物的结构进行表征. 利用该材料制备了新型白光有机电致发光器件(OLED), 其结构为: ITO/NPB (N,N' -双(1-萘基)- N,N' -二苯基-1,1'-二苯基-4,4'-二胺)/BCP (2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-菲咯啉)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2/\text{Al}$. 通过调节空穴阻挡层 BCP 的厚度, 实现了 NPB(蓝光发射)和 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (黄光发射)作为器件双发光层的有效复合, 并研究了其发光机理. 当 BCP 层的厚度为 2.0 nm 时, 获得了稳定的白色发光; 该器件在 6 V 电压下启亮, 20 V 电压时最大发光亮度达到 130 cd/m^2 , 电流效率为 0.224 cd/A .

关键词 白光有机电致发光器件; 空穴阻挡层; 2-对联苯-8-羟基喹啉锌; 2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-菲咯啉

Synthesis of Bis(2-biphenyl-4'-yl-8-quinolinolato)zinc and Its Application in a Novel White OLED

ZHAO, Ting DING, Hong-Liu SHI, Guo-Yue JIN, Li-Tong*

(Department of Chemistry, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract A novel emission material bis(2-biphenyl-4'-yl-8-quinolinolato)zinc $\{\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2\}$ was synthesized and confirmed by ^1H NMR and UV-Vis measurements. White organic light-emitting diode with a structure of ITO/NPB (N,N' -di(1-naphthyl)- N,N' -diphenyl-(1,1'-biphenyl-4,4'-ylenediamine)/BCP (2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2/\text{Al}$ was fabricated and its electroluminescent mechanism was studied. The mixture light from double emitting materials of NPB (blue-light emission) and $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (yellow-light emission) was achieved by effectively adjusting the thickness of BCP that functioned as a hole blocking layer. When a 2.0 nm-thick BCP was used, white-light emission was obtained. With a lower turn-on voltage at about 6 V, the white OLED showed a maximum brightness of 130 cd/m^2 and current efficiency of 0.224 cd/A at 20 V.

Keywords white organic light-emitting diode; hole blocking layer; bis(2-biphenyl-4'-yl-8-quinolinolato)-zinc; 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline

有机电致发光器件(OLED)由于具有亮度大、重量轻、功耗低等优点, 是近年来平板显示领域的研究热点^[1,2]. OLED 的基本结构是在阳极与阴极之间夹入不同的有机材料, 器件的发光则是来自于载流子在有机发光层中的复合作用. 目前, 已有大量的具有空穴传输性能或电子传输性能的小分子(或大分子)有机材料被应用到

OLED 的研究中^[3,4]. 其中, 为了实现全彩显示和作为笔记本电脑等数码产品的背投光源, 白光 OLED 的研究和应用逐渐成为人们关注的热点问题.

在全世界领域, 白光 OLED 的研究工作得到了广泛的开展. 1993 年, Kido 等^[5]首次报道了一种掺杂有三种荧光染料、多层结构的白光 OLED: ITO/PVK:TPB,

* E-mail: ltjin@chem.ecnu.edu.cn

Received November 26, 2007; revised and accepted January 17, 2008.

国家自然科学基金(No. 20575021)资助项目.

Coumarin 6, DCM-1/TAZ/AlQ/Mg:Ag. 随后, Granstrom 研究小组^[6]设计出一种利用聚噻吩类发光材料实现白光发射的单层、大分子有机电致发光器件. 此外, Forrest 研究小组^[7]利用蓝、绿、红三原色, 构建了具有独立驱动系统和垂直堆积结构的 OLED 器件, 最终获得了综合的白光发射. 前人的研究表明为了制备白光 OLED, 通常有以下几种方法: 制备独立的发光层分别获得蓝、绿、红三原色, 并在器件中复合后产生混合白光, 发射波长基本覆盖 400~700 nm 可见光区; 或利用掺杂荧光染料与主体发光材料的相互作用, 直接制备出单层白光 OLED; 还可以通过激基复合物^[8]或加入空穴阻挡层的方法^[9,10]来实现白光发射.

本文中, 我们合成了一种全新的有机发光材料 2-对联苯-8-羟基喹啉锌(Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂), 并且设计出新型结构的白光 OLED: ITO/NPB/BCP/Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂/Al. 该器件中, 菲咯啉衍生物 BCP (2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-菲咯啉)作为空穴阻挡层被引入到发光材料 NPB (*N,N'*-双(1-萘基)-*N,N'*-二苯基-1,1'-二苯基-4,4'-二胺)与 Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂ 两层之间, 通过改变 BCP 的厚度在 0~10.0 nm 之间, 获得了来自于双发光层 Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂(黄光发射)和 NPB(蓝光发射)的复合发光. 当 BCP 的厚度为 2.0 nm 时, 得到了稳定的白光发射. 这种利用空穴阻挡层来制备白光 OLED 的方法, 工艺过程简单、器件稳定性好, 有利于工业化的大规模生产.

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

高真空多级镀膜台(DM-220, 上海田京电子光学技术有限公司); 复合真空计(ZDF-2F, 上海金玛电光技术研究所); 膜厚监控仪(LHC-2, 上海金玛电光技术研究所); 屏幕亮度计(ST-86LA, 北京师范大学光电仪器厂); 紫外-可见分光光度计(Cary 50 Conc, Varian); 荧光分光光度计(F-4500, Hitachi); 核磁共振波谱仪(Avance 500 MHz, Bruker).

NPB 购自 Sigma-Aldrich 公司; BCP 购自 Fluka 公司; 8-羟基喹啉、4-溴联苯购自上海国药集团; Al 带(纯度 99.99%); 其他所有试剂均为分析纯, 水为二次蒸馏水.

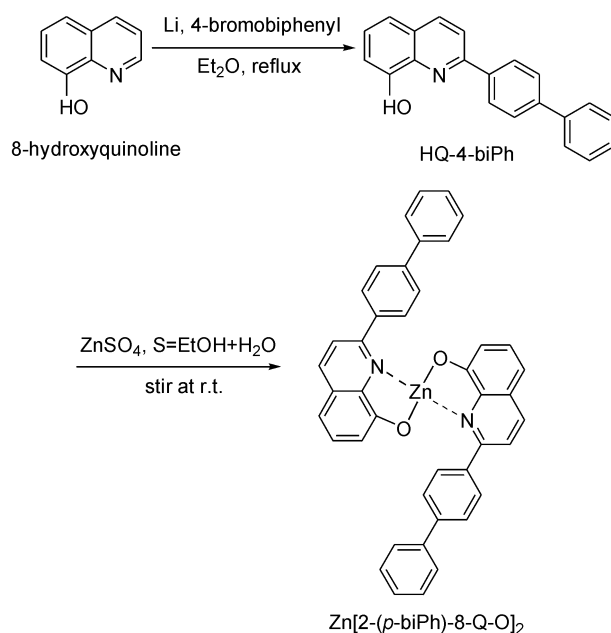
1.2 2-对联苯-8-羟基喹啉(HQ-4-biPh)的合成

在氩气氛围下将 57.90 mmol 的 4-溴联苯缓慢滴加到 0.84 g (0.121 mol)金属锂的乙醚溶液中, 剧烈搅拌, 反应结束后即可制得有机锂试剂. 在反应液中逐滴加入 4.00 g (27.60 mmol) 8-羟基喹啉的乙醚溶液, 搅拌 1~2 h; 将反应混合物倾入冰水中, 分出有机相, 除去溶剂得

到粗产品, 经硅胶色谱提纯可得黄色晶体, 产率 54%, m.p. 170~172 °C (文献值 170~171 °C^[11]), UV-Vis (CHCl₃) λ_{max}: 290, 329 nm; ¹H NMR (CDCl₃, 500 MHz) δ: 7.2 (d, *J*=7 Hz, 1H), 7.4~7.5 (m, 5H), 7.7 (m, 3H), 7.8 (d, *J*=8 Hz, 2H), 8.0 (d, *J*=9 Hz, 1H), 8.2 (d, *J*=8 Hz, 2H), 8.4 (br.s, 1H).

1.3 2-对联苯-8-羟基喹啉锌(Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂)的合成

将 ZnSO₄·7H₂O 水溶液用盐酸酸化, 缓慢加入到 HQ-4-biPh 的乙醇溶液中, 室温搅拌 15 min. 用氢氧化钠溶液调 pH 至弱碱性, 继续搅拌 24 h. 陈化过滤, 用热水和冰乙醇多次洗涤滤饼, 减压抽干; 经乙醇重结晶可得黄绿色固体, 产率 85%, m.p. 322~324 °C, UV-Vis (CHCl₃) λ_{max}: 296, 420 nm; ¹H NMR (DMSO, 500 MHz) δ: 6.9 (s, 1H), 7.0 (s, 3H), 7.4~7.5 (m, 5H), 7.6 (s, 2H), 8.2 (s, 1H). 合成 Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂ 的反应路线见图 1.



图式 1 合成 Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂ 的反应路线
Scheme 1 Synthetic route for Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂

1.4 白光 OLED 器件的制备

实验所用的 BCP 和 NPB 的分子结构如图 1 所示. 将已经蚀刻好的 ITO(氧化铟-氧化锡)导电玻璃依次在丙酮、乙醇和去离子水中超声 10 min, 于真空烘箱中烘干; 经紫外光照射 10~15 min, 以提高表面功函数和平整度. 利用真空热蒸镀法制备如图 2 所示结构的 OLED 器件: ITO/NPB (40 nm)/BCP (0~10.0 nm)/Zn[2-(*p*-biPh)-8-Q-O]₂ (40 nm)/Al (200 nm). 其中, NPB 层在器件

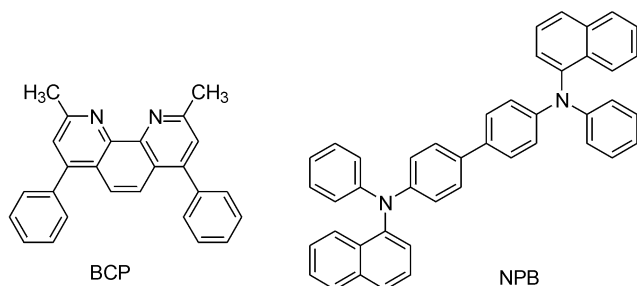


图1 BCP 和 NPB 的分子结构

Figure 1 Molecule structure of BCP and NPB

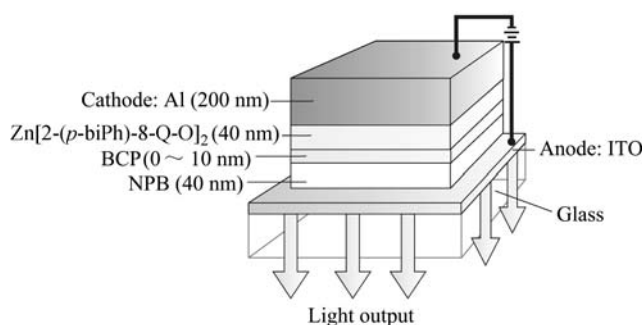


图2 OLED 器件结构示意图

Figure 2 Simplified configuration of OLED devices

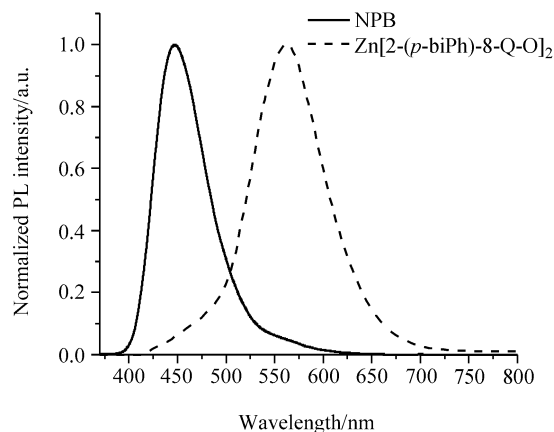
中既作为空穴传输层, 又作为蓝光发射材料; BCP 层中, 由于电子的迁移能力远远大于空穴, 因而 BCP 在 OLED 器件中能起到很好的空穴阻挡作用; 本实验室合成的 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 既可作为黄光发射材料, 又具有良好的电子传输性能. 实践中, 我们控制了 BCP 层的厚度从 0 nm 至 10.0 nm 变化, 制备了 6 种 OLED 器件(分别命名为 Device 1~6, 具体结构参见表 1). 在真空度 2×10^{-3} Pa 条件下, 各有机层和阴极材料 Al 依次热蒸镀成膜, 有机材料的沉积速率均控制在 0.2~0.3 nm/s 之间, 阴极铝的蒸发速率为 8 nm/s 左右.

2 结果和讨论

2.1 发光光谱与轨道能级

图 3 给出了 NPB 和 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 薄膜的光致发光(PL)光谱, 均为单峰发射, 半峰宽小于 100 nm.

NPB 和 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 的最大 PL 发射峰分别位于 447 nm ($\lambda_{\text{ex}}=353$ nm)和 562 nm ($\lambda_{\text{ex}}=432$ nm). 因而 NPB 能够获得蓝光发射, 而 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 可以得到黄光发射. 此外, 通过循环伏安^[12,13]和紫外-可见光谱法可以对新型发光材料的能级大小进行准确测定^[14,15], 根据此方法我们考察了 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 的能隙大小为 2.33 eV, 其最高占有分子轨道(HOMO)和最低未占有分子轨道(LUMO)的能级分别对应 5.32, 3.00 eV.

图3 NPB 和 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 薄膜的归一化 PL 光谱Figure 3 The normalized PL spectra of NPB and $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ film

2.2 电致发光性质

图 4 是 15 V 外加电压下 Device 1~Device 6 归一化后的电致发光(EL)光谱. Device 1 的结构中没有引入 BCP 层, 其 EL 光谱只出现了约 560 nm 处的单发射峰, 器件色调为黄色, 此处的单峰与 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 的 PL 发射峰(位于 562 nm)基本吻合, 因此判断是来自于发光材料 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 层的发射, 而 NPB 层在器件中仅起到空穴传输作用. 观察无 BCP 层时 OLED 器件各组成的能级关系图(见图 5(a)), NPB 的 LUMO 能级为 2.4 eV, $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 的 LUMO 能级为 3.0 eV, 两者之间 0.6 eV 的能级势垒, 有效地将从阴极所产生的电子控制在 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 层内; 同时, 由

表1 OLED 器件结构

Table 1 The OLED device structures

OLED device	Structure
Device 1	ITO/NPB (40 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al
Device 2	ITO/NPB (40 nm)/BCP (1.0 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al
Device 3	ITO/NPB (40 nm)/BCP (2.0 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al
Device 4	ITO/NPB (40 nm)/BCP (3.0 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al
Device 5	ITO/NPB (40 nm)/BCP (5.0 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al
Device 6	ITO/NPB (40 nm)/BCP (10.0 nm)/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ (40 nm)/Al

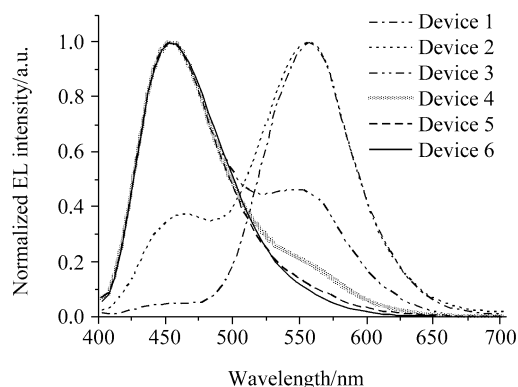


图4 OLED器件 Device 1~Device 6 的归一化 EL 光谱

Figure 4 Normalized EL spectra of Device 1~Device 6

于 NPB 与 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 的 HOMO 能级较接近, 从阳极 ITO 产生的空穴能够顺利地通过 NPB 并进入到 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 层, 因此空穴与电子在 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 层中复合, 得到 560 nm 处的单峰发射。

为了获得白光的发射, 可以通过增加黄光的互补色蓝光成分, 即增加 NPB 的发光, 因此考虑在 NPB 与 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 之间加入一层空穴阻挡材料 BCP. 观察含有 BCP 层时 OLED 器件各组成的能级示意图[见图 5(b)]可知, BCP 的 HOMO 能级大致为 6.4~6.7 eV^[16,17], 与 NPB 的 HOMO 能级 5.5 eV 相比, 0.9~1.2 eV 的巨大能级势垒能够有效阻挡空穴穿过 BCP 层, 使大量的空穴保留在 NPB 层中; 同时, BCP 的 LUMO 能级在 2.9~3.2 eV 左右, 与 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 的 LUMO 能级相匹配, 使电子能够很顺利地经过 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 和 BCP 层, 到达 NPB 层, 继而使电子和空穴在 NPB 层中复合发光, 获得 NPB 的蓝色发光. BCP 作为器件的空穴阻挡层, 其空穴阻挡能力受到多方面的影响, 其中厚度就是一个重要因素, 文中制备了五种含有 BCP 层的 OLED 器件: Device 2~Device 6, BCP 的厚度在 1.0~10.0 nm 之间变化, 并研究了其电致发光性能. 如图 4 中 Device 2~Device 5 的 EL 光谱所描述的, 空穴和电子的复合区域同时发生在两个发光层中, 即观察到了位于 560 和 450 nm 处的两个发射峰, 前者是来自于 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 层的发射, 而 450 nm 处的 EL 发射峰与 NPB 薄膜的光致发射峰(位于 447 nm)基本吻合, 因此是来自于 NPB 层的光发射. 随着 BCP 厚度从 1.0 nm 增大到 5.0 nm, NPB 发射峰的比例逐渐增强, 而 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 发射峰的比例在不断减小, 说明了载流子的主要复合区域逐渐从 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 层转移至 NPB 层. 当 BCP 厚度达到 10.0 nm 时(见图 4 中 Device 6 曲线), EL 光谱中 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 的发射峰已经消失, 可以推断这种情况下 10.0 nm 的 BCP 完全阻挡

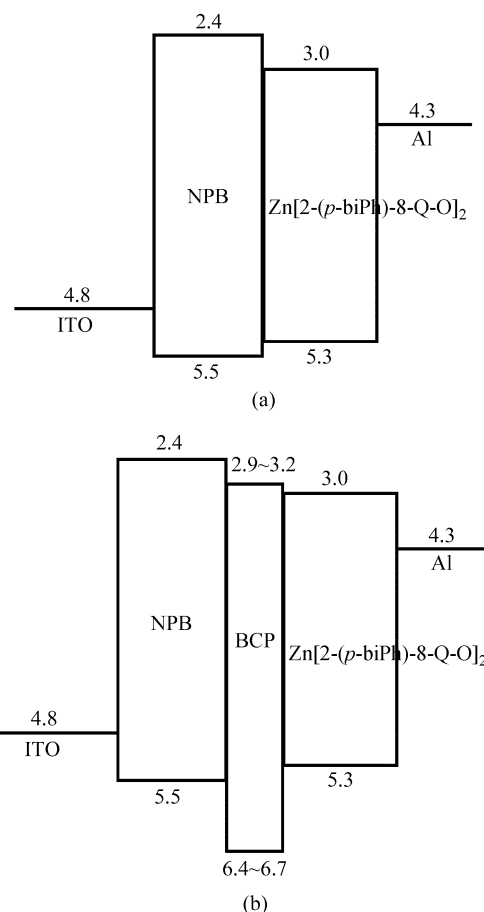


图5 OLED器件能级示意图(单位: eV): (a)无 BCP 层; (b)有 BCP 层

Figure 5 The energy level alignment of OLED devices (unit: eV): (a) without BCP layer; (b) with BCP layer

了空穴进入 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 层, 使载流子的复合区域被很好地控制在 NPB 层中, 获得了纯正的 NPB 蓝色发光。

因此, 通过改变 BCP 层的厚度, 得到了一系列 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 和 NPB 的复合发射光谱. 最终当 BCP 的厚度为 2.0 nm 时, 获得了稳定的白色发光, 该白光 OLED 在 15 V 电压下 CIE (Commission Internationale d'Eclairage) 色坐标达到(0.22, 0.25), 且随电压变化不大。

图 6 为器件 Device 3 在外加电压分别为 10, 12.5, 15, 17.5, 20 V 时的归一化 EL 光谱. 施加不同的外加电压, 各 EL 光谱中位于 450 和 560 nm 处的发射峰波长几乎没有改变. 控制 $\text{Zn}[\text{2-(p-biPh)-8-Q-O}]_2$ 的发射强度一定, 可以观察到随着外加电压的逐渐增加, EL 光谱中位于 450 nm 处的发射峰呈现微小幅度的上升趋势, 即 OLED 器件中 NPB 的发射比例有所提高. 这一现象可以理解为: 随着外加电压不断增大, 更多的电子拥有了一定的能量, 足以穿越空穴阻挡层到达 NPB 层, 使器件获得更多比例的 NPB 发射. 同时也可以从图中观察到, 当施加较高电压时 NPB 发射峰升高的幅度有所减缓, 这可能

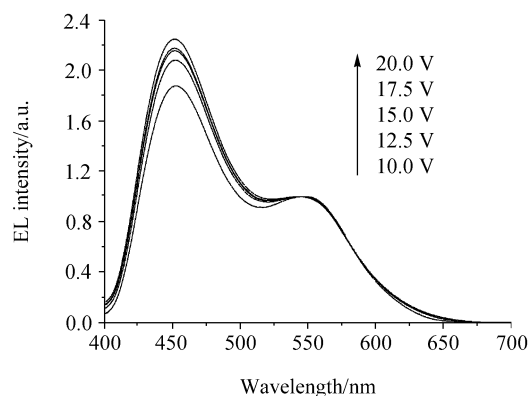


图6 不同电压下器件 Device 3 的归一化 EL 光谱

Figure 6 Normalized EL spectra of Device 3 with different applied voltage

是因为器件中大部分的空穴受到 BCP 的阻挡作用而被捕获在 NPB 层内, 电压波动所引起电子迁移的作用相对而言是一个次要因素. 因此, 实验表明外界电压对于器件中双发光层的发射峰波长和比例几乎无影响, 这为器件在实际应用中取得稳定的工作性能提供了有利的理论基础.

图 7 描述了 Device 3 的电流密度-电压特性曲线, 插图为该器件的亮度-电压特性曲线. Device 3 获得了稳定的白色发光, 启动电压约为 6 V; 当外界驱动电压为 20 V 时, 器件的最大发光亮度达到 130 cd/m^2 , 相应的电流效率为 0.224 cd/A . 在常温大气环境下, 对未经封装的 OLED 器件 Device 3 进行老化过程的测试, 经恒电压 20 V 驱动, 器件初始亮度计为 130 cd/m^2 , 亮度衰减为 50% 的半寿命约为 200 h. 由于器件的老化时间与器件亮度大致呈反比关系, 因此若按初始亮度 50 cd/m^2 计, 器件的半寿命为 520 h. 同时, 实践发现随着器件使用

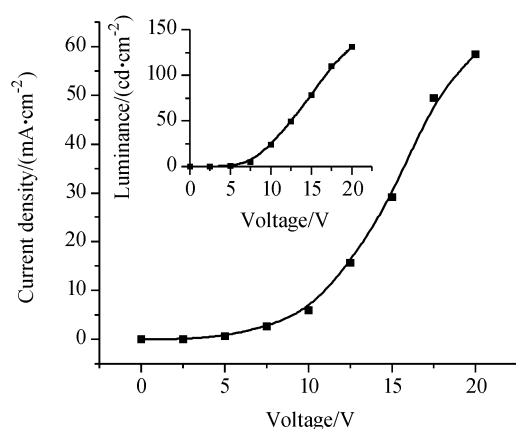


图7 Device 3 的电流密度-电压特性曲线(插图为该器件的亮度-电压特性曲线)

Figure 7 Characteristics of current density vs. voltage of Device 3 (the inset is a luminance-voltage curve)

时间的延长, 其发光颜色几乎无改变, 但是由于空气中水气等因素导致发光处出现老化的黑斑. 如果进一步改善器件结构, 增加辅助层并且进行严格的隔水隔氧封装处理, OLED 的发光性能和稳定性将会更好.

此外, 比较了外加电压均为 20 V 时 6 种 OLED 器件的发光亮度. 含有空穴阻挡层 BCP 的 OLED 器件, 其亮度与 Device 1 相比均有所提高, 其原因在于: OLED 器件中空穴的迁移率往往比电子的迁移率大两个数量级, 加入了空穴阻挡层 BCP 后, 有利于平衡两者的传输速率, 将载流子有效地限制在发光层中, 从而提高了载流子复合和发光的几率.

3 结论

合成了一种有机发光材料 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$, 并设计了全新结构的白光 OLED: ITO/NPB/BCP/ $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2/\text{Al}$. 通过改变空穴阻挡层 BCP 的厚度, 研究了 OLED 器件的电致发光机理, 实验表明: BCP 的厚度从 0 nm 增加至 10.0 nm, 得到了双发光层 NPB 和 $\text{Zn}[2-(p\text{-biPh})\text{-}8\text{-Q-O}]_2$ 不同比例的复合发光. 当 BCP 的厚度为 2.0 nm 时, 获得了稳定的白光发射, 该器件在外加电压为 20 V 时, 最大发光亮度达到 130 cd/m^2 , 电流效率为 0.224 cd/A ; 此外, 白光 OLED 的发射峰波长与发射比例几乎不受外加电压的影响. 通过加入空穴阻挡层来制备白光 OLED, 工艺简单、启动电压低、发光性能稳定, 预计在未来的商业生产中将具有广阔的应用前景.

References

- 1 Tang, C. W.; VanSlyke, S. A. *Appl. Phys. Lett.* **1987**, *51*, 913.
- 2 Tang, C. W.; VanSlyke, S. A.; Chen, C. H. *J. Appl. Phys.* **1989**, *65*, 3610.
- 3 Hung, L. S.; Chen, C. H. *Mater. Sci. Eng., R.* **2002**, *39*, 143.
- 4 Li, S.-B.; Zhang, Y.; Niu, Q.-L.; Zhao, L.; Fan, Q.-L.; Peng, B.; Zhu, X.-H.; Cao, Y.; Huang, W. *Acta Chim. Sinica* **2006**, *64*, 2509 (in Chinese).
(李盛彪, 张晔, 牛巧莉, 赵雷, 范曲立, 彭波, 朱旭辉, 曹镛, 黄维, 化学学报, **2006**, *64*, 2509.)
- 5 Kido, J.; Hongawa, K.; Okuyama, K.; Nagai, K. *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *64*, 815.
- 6 Granstrom, M.; Inganas, O. *Appl. Phys. Lett.* **1996**, *68*, 147.
- 7 Forrest, S. R.; Burrows, P. E.; Shen, Z.; Gu, G.; Bulovic, V.; Thompson, M. E. *Synth. Met.* **1997**, *91*, 9.
- 8 Chao, C.-L.; Chen, S.-A. *Appl. Phys. Lett.* **1998**, *73*, 426.
- 9 Yang, K.-X.; Gao, W.-B.; Zhao, J.-H.; Sun, J.-X.; Lu, S.-X.; Liu, S.-Y. *Synth. Met.* **2002**, *132*, 43.
- 10 Tsou, C.-C.; Lu, H.-T.; Yokoyama, M. *J. Cryst. Growth*

- 2006**, 289, 559.
- 11 Phillips, J. P.; Huber, W. H.; Chung, J. W.; Merritt, L. L. *J. Am. Chem. Soc.* **1951**, 73, 630.
- 12 Chen, A.-S.; Li, Y.-M.; Zhang, H. *Acta Chim. Sinica* **2005**, 63, 460 (in Chinese).
(陈安尚, 李亚明, 张华, 化学学报, **2005**, 63, 460.)
- 13 Hao, Y.-Y.; Xu, B.-S.; Gao, Z.-X.; Wang, H.; Zhou, H.-F.; Liu, X.-G. *J. Mater. Sci. Technol.* **2006**, 22, 225.
- 14 Ding, B.-D.; Zhang, J.-M.; Zhu, W.-Q.; Zheng, X.-Y.; Wu, Y.-Z.; Jiang, X.-Y.; Zhang, Z.-L.; Xu, S.-H. *Chin. J. Lumin.* **2003**, 24, 606 (in Chinese).
(丁邦东, 张积梅, 朱文清, 郑新友, 吴有智, 蒋雪茵, 张志林, 许少鸿, 发光学报, **2003**, 24, 606.)
- 15 Flora, W. H.; Hall, H. K.; Armstrong, N. R. *J. Phys. Chem. B* **2003**, 107, 1142.
- 16 Kim, D.-E.; Kim, W.-S.; Kim, B.-S.; Lee, B.-J.; Kwon, Y.-S. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* **2007**, doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.05.042.
- 17 Shi, Y.-M.; Deng, Z.-B.; Xu, D.-H.; Xiao, J. *Displays* **2006**, 27, 166.

(A0711262 PAN, B. F.; DONG, H. Z.)