

含樟脑基辅助配体铱配合物的合成及光电性能

周会东,张浩清,淤阳成真,童碧海

(安徽工业大学 冶金工程学院,安徽 马鞍山 243032)

摘要:以2-苯基喹啉为主配体,以乙酰丙酮和樟脑基配体为辅助配体,分别合成铱配合物**1**和**2**,通过核磁共振氢谱、红外光谱及质谱表征配合物的结构,并研究其光物理性能和电致发光性能。结果表明:配合物**1**和**2**的发光波长分别为603,619 nm,分别属于橙光和红光发射,量子效率分别为34%和53%,樟脑基辅助配体能有效提高配合物的发光量子效率;配合物**1**和**2**的电致发光波长分别红移到612,622 nm,樟脑基辅助配体能有效降低电致发光光谱的发光红移;配合物**1**器件的最大外量子效率为0.014%,最大亮度30.2 cd/m²,与配合物**1**器件相比,配合物**2**的外量子效率提高到3倍以上,最大外量子效率达0.044%,最大亮度48.6 cd/m²,且其色坐标为(0.64,0.35),接近标准红色的色坐标,配体中引入樟脑基团能有效提高配合物的发光效率,发光颜色对掺杂浓度不敏感。该研究结果对设计开发综合性能优异的有机电致发光材料有借鉴意义。

关键词:铱配合物;樟脑;有机电致发光

中图分类号:O 614.82 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2018.04.006

Synthesis and Optoelectronic Properties of Iridium Complex Containing Camphor Based Auxiliary Ligands

ZHOU Huidong, ZHANG Haoqing, FUYANG Chenzhen, TONG Bihai

(School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: Iridium complexes **1** and **2** were synthesized with 2-phenyl quinoline as the main ligand and acetyl acetone, and camphor based pyridyl pyrazole derivatives as the auxiliary ligands. The structures of the complexes were characterized by nuclear magnetic resonance(NMR), infra red(IR) spectrum and mass spectrum(MS). The photophysical and electroluminescent properties of the complexes were also studied. The results show that the luminescence wavelengths of complexes **1** and **2** are 603 nm and 619 nm, respectively, which belong to orange and red light emission accordingly, and the quantum efficiencies are 34% and 53%, respectively, indicating that the camphor based auxiliary ligands could effectively improve the photoluminescence quantum efficiency of iridium complexes. The electroluminescent wavelengths of the complexes **1** and **2** are red-shifted to 612, 622 nm, respectively, indicating that the camphor based auxiliary ligands could effectively reduce the red shift of luminescence. The maximum external quantum efficiency of the device based on complex **1** is 0.014%, and the maximum brightness is 30.2 cd/m². Compared with the device based on complex **1**, the external quantum efficiency of complex **2** is increased to more than 3 times, the maximum external quantum efficiency reaches 0.044%, and the maximum brightness is 48.6 cd/m². Moreover, its color coordinates are (0.64, 0.35), and close to the standard red color coordinates. Therefore, the introduction of camphor group in the auxiliary ligand can effectively improve the luminescence efficiency of the complexes, and make the luminescence color insensitive to their concentration. These results are useful for the design and development of organic electroluminescent materials with excellent

收稿日期:2018-09-21

基金项目:国家自然科学基金项目(21572001);安徽省大学生创新创业训练项目(201810360136)

作者简介:周会东(2000—),男,安徽六安人,研究方向为光电功能材料。

通信作者:童碧海(1979—),男,湖南汉寿人,博士,教授,主要研究方向光电功能材料。

comprehensive performance.

Key words: iridium complex; camphor; organic electroluminescence

有机电致发光材料是指在电场作用下能发出光的有机材料。1998年Baldo等^[1]发现,磷光材料可同时利用单线态激子和三线态激子达到100%的内量子效率。铱配合物具有易于制备、光热稳定性好、便于通过配体的修饰来调节发光波长和效率等优点,致使其在有机电致发光、传感等领域得到越来越多的应用^[2-3]。铱配合物用于电致发光时,由于分子的聚集,其在高浓度时发光浓度淬灭,为避免发生这种现象可通过高分子化^[4]、掺杂于主体材料中^[5]或分子修饰^[6]等方式解决。但是,高分子化时高分子材料的分子结构不可控,不同批次的产品性质差别较大;掺杂于主体材料中则因铱配合物浓度不同导致发光光谱变化。分子修饰有两种方式:一种是通过超支化来修饰,然而超支化分子合成难度大,且效果与超支化的面密度有关,面密度越大效果越好^[7],此外超支超过一定代数后电致发光效果会更差,因此超支化不是最好的方法;另一种修饰方式是通过在配体上引入大的位阻基团,既能有效降低分子聚集度又能让激子有效地在发光中心复合。如,文献[8]中将蒽烯结构引入到铱配合物,可得到溶解性能和升华性能均较好的铱配合物,器件的最佳铱配合物掺杂的质量分数达26%,且发光光谱随掺杂含量变化小;文献[9]中用樟脑基乙酰丙酮得到铱配合物,将其用于有机电致发光时获得了6.45 cd/A的最大亮度效率。

吡啶吡唑配体^[10]是一种与过渡金属配位有较强亲和力的配体,能有效调节配合物的能级,增强配合物的稳定性,表现出优异的光电性能。樟脑是一种二环天然萜类化合物,具紧凑的饱和烷基,有较大的刚性,因此能作为高效的位阻基团来修饰化合物。鉴于此,笔者将樟脑位阻基团融入到吡啶吡唑配体中,并用于铱配合物的制备,以期调节铱配合物的发光波长,降低配合物的分子间相互作用。

1 实验

1.1 实验原料

樟脑,体积分数为96%,阿拉丁试剂有限公司;氢化钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;水合肼,体积分数为85%,上海沪试实验室器材股份有限公司;2-吡啶甲酸乙酯,分析纯,萨恩化学技术(上海)有限公司;苯乙酮,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;2-氨基苯甲醛,分析纯,萨恩化学技术(上海)有限公司;其他药品均为市售分析纯产品,购买后直接使用。

1.2 配体及铱配合物的合成

1.2.1 合成路线

配体及铱配合物合成路线如图1。

1.2.2 樟脑基配体的合成

在氮气保护下,将5 g (32.9 mmol)樟脑加入到5 g (125.0 mmol)氢化钠的25 mL四氢呋喃溶液中,常温下搅拌5 h后注入7 mL (51.8 mmol) 2-吡啶甲酸乙酯,再搅拌5 h。反应完成后,在冰浴条件下往混合物中加入10 mL甲醇淬灭,然后加去离子水并用浓盐酸调pH值近中性。旋蒸除去有机溶剂后用二氯甲烷萃取,有机层用无水硫酸钠干燥,蒸除溶剂后,往剩余物中加入30 mL甲醇和12 mL水合肼,加热回流12 h,再减压蒸除溶剂得粗产品。所得粗产品利用二氯甲烷作为洗脱剂,过中性氧化铝柱,得到纯度较高的7,8,8-三甲基-3-(2-吡啶)-4,5,6,7-四氢-2H-4,7-桥亚甲基吡唑,即樟脑基配体,总产率为52%。

IR (KBr, cm^{-1}): $\nu(\text{N}-\text{H})$ 3 189 (m), $\nu(\text{—CH}_3)$ 2 957 (m), 2 867 (m), $\nu(\text{—CH}_2)$ 2 927 (s), $\nu(\text{PhC}=\text{C})$ 1 592 (m), 1 566 (w), 1 490 (s), 1 473 (m), $\nu(\text{C}=\text{N})$ 1 385 (m). $^1\text{H NMR}$ (CDCl_3 , 400 MHz, δ): 10.40 (s, 1 H), 8.52 (d, $J=8.0$ Hz, 1 H), 7.55 (t, $J=69.6$ Hz, 1 H), 7.51 (d, $J=8.0$ Hz, 1 H), 7.20 (t, $J=13.6$ Hz, 1 H), 3.10 (s, 1 H), 2.11~2.23 (m, 1 H), 1.81~1.85 (m, 1 H), 1.42~1.45 (m, 2 H), 1.34 (s, 3 H), 1.07 (s, 3 H), 0.73 (s, 3 H). MS ((+)-ESI): $m/z=242$ (calcd. 242 for $\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{N}_3$ ($[\text{M}+\text{H}]^+$)).

1.2.3 2-苯基喹啉配体的合成

向0.94 g (7.8 mmol) 2-氨基苯甲醛和0.94 g (7.8 mmol)苯乙酮混合物中加入饱和的乙醇钠溶液,加热回流12 h,冷却,过滤所得固体用二氯甲烷重结晶得白色针状产品,即2-苯基喹啉^[11],产率为76%。

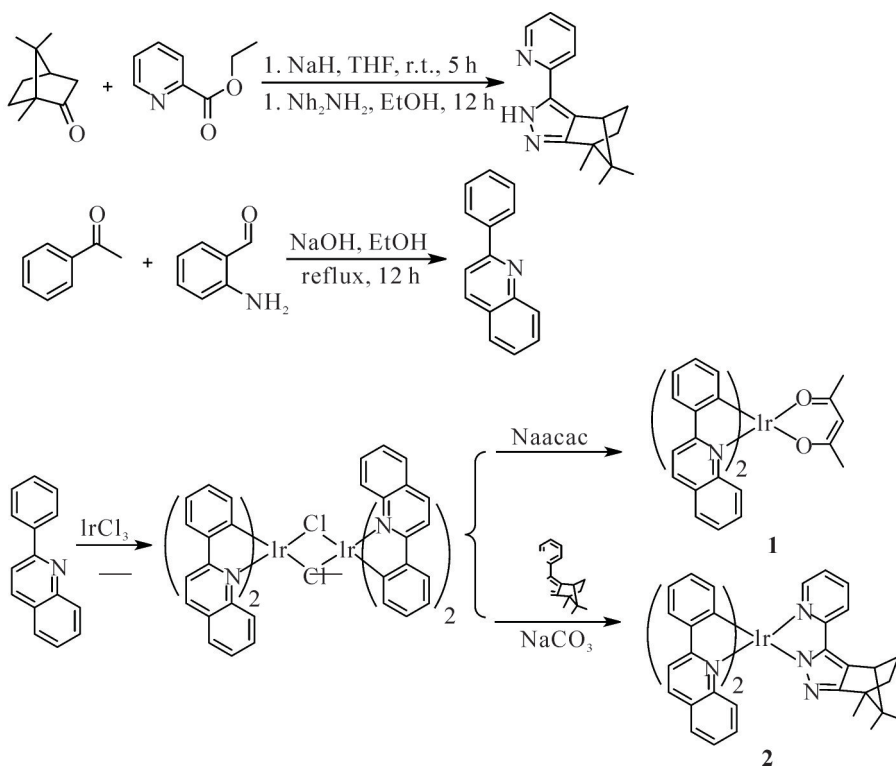


图1 配体及铱配合物的合成路线

Fig. 1 Synthetic routes of ligands and iridium complexes.

IR (KBr, cm^{-1}): $\nu(\text{PhC}=\text{H})$ 3 056 (w), $\nu(\text{PhC}=\text{C})$ 1 596 (m), 1 552 (w), 1 508 (w), 1 491 (m). ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz, δ): 8.23 (d, $J=8.4$ Hz, 1 H), 8.12~8.19 (m, 3 H), 7.90 (d, $J=8.4$ Hz, 1 H), 7.84 (d, $J=8.0$ Hz, 1 H), 7.73 (t, $J=7.2$ Hz, 1 H), 7.54 (t, $J=8.0$ Hz, 3 H), 7.47 (t, $J=7.2$ Hz, 1 H).

1.3 铱配合物的合成

称取 1.46 g (7.10 mmol) 2-苯基喹啉和 1.00 g (2.84 mmol) $\text{IrCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 于两口圆底烧瓶中, 注入 5 mL 去离子水和 15 mL 2-乙氧基乙醇, N_2 保护下升温至 110 $^\circ\text{C}$ 反应 24 h, 冷却至室温析出红色固体, 过滤, 分别用去离子水, 乙醇洗涤固体, 自然晾干, 得铱二氯桥中间体, 产率为 41%。将 0.10 g (0.08 mmol) 铱二氯桥中间体溶于 5 mL 二氯甲烷溶剂中, 加入 0.10 g (0.8 mmol) 乙酰丙酮钠和 5 mL 乙醇, 室温搅拌 4 h 后, 50 $^\circ\text{C}$ 回流 2 h。减压蒸除溶剂, 用二氯甲烷作为洗脱剂在硅胶柱上提纯, 得到铱配合物 **1**, 产率 36%。

IR (KBr, cm^{-1}): $\nu(\text{C}=\text{H})$ 3047 (m), $\nu(\text{—CH}_3)$ 2 920 (m), 2 850 (w), $\nu(\text{C}=\text{O})$ 1 724 (m), $\nu(\text{PhC}=\text{C})$ 1 604 (m), 1 579 (s), 1 543 (m), 1 516 (s). ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz, δ): 8.52 (d, $J=8.5$ Hz, 2 H), 8.21~8.47 (m, 4 H), 7.92~8.10 (m, 4 H), 7.43~7.69 (m, 4 H), 6.90 (t, $J=7.5$ Hz, 2 H), 6.55 (t, $J=7.3$ Hz, 2 H), 6.39 (d, $J=7.6$ Hz, 2 H), 4.71 (s, 1 H), 1.56 (s, 6 H). FAB-MS: $m/z=700$ (calcd. 700 for $\text{C}_{35}\text{H}_{28}\text{N}_2\text{O}_2\text{Ir}$ ($[\text{M}+\text{H}^+]$)).

将 0.27 g (0.2 mmol) 铱二氯桥中间体, 0.5 g (2.0 mmol) 樟脑基配体, 0.32 g (3.2 mmol) 碳酸钠和 30 mL 乙氧基乙醇混合, 在氮气保护下, 回流 12 h 后加水沉淀, 过滤得红色固体。用 $\nu(\text{二氯甲烷})/\nu(\text{甲醇})(40:1)$ 的溶液作为洗脱剂在硅胶柱上提纯, 得到铱配合物 **2**, 产率为 48%。

IR (KBr, cm^{-1}): $\nu(\text{—CH}_3)$ 2 958 (m), 2 860 (w), $\nu(\text{C}=\text{N})$ 1 637 (m), $\nu(\text{PhC}=\text{C})$ 1 607 (m), 1 543 (w), 1 515 (w), 1 466 (m). ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz, δ): 8.25 (d, $J=8.5$ Hz, 1 H), 7.90 (d, $J=8.0$ Hz, 2 H), 7.61~7.84 (m, 8 H), 6.47~7.29 (m, 13 H), 4.11 (s, 1 H), 2.93 (t, $J=8.5$ Hz, 2 H), 2.86 (t, $J=8.5$ Hz, 2 H), 0.80~1.42 (m, 9 H). FAB-MS: $m/z=854$ (calcd. 854 for $\text{C}_{48}\text{H}_{44}\text{N}_5\text{Ir}$ ($[\text{M}+\text{H}^+]$)).

1.4 配合物及其器件光电性能的测试

核磁共振氢谱由 BRUKER Avance III 400 型超导核磁共振谱仪测试, 电喷雾电离质谱由 Thermo LCQ DECA XP 型质谱仪测定, 红外光谱由美国尼高力 Nicolet-6700 型傅里叶红外光谱仪测定; 紫外-可见吸收光谱由 Shimadzu 公司 UV-3600 型紫外可见分光光度计测定, 荧光光谱及光致发光量子效率由 Perkin Elmer

LS55型荧光分光光度计测定。

将铱配合物与聚合物共溶后采用旋涂法制作铱配合物的电致发光器件。器件结构为氧化铟锡(ITO)/聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)+聚苯乙烯磺酸钠(PSS)(40 nm)/铱配合物(质量分数为2%)+聚乙烯基咔唑(PVK)(质量分数为70%)+2-(4-联苯基)-5-苯基恶二唑(PBD)(质量分数为28%)(80 nm)/Ba(4 nm)/Al(120 nm)。发光层以PVK为主体材料,PVK是常用的空穴传输材料,且加入电子传输材料PBD,以平衡电荷传输。PVK溶于氯苯,PBD和铱配合物溶于氯仿,按比例混合后采用旋涂法制备发光层;阳极为ITO基片,经处理后其能级在 -4.8 eV,因ITO与PVK的HOMO能级仍存在较大的势垒^[12],不利于空穴的注入,因此需在ITO表面旋涂一层PEDOT+PSS膜,将ITO的Fermi能级提高至 $-5.2\sim-5.3$ eV,降低空穴从阳极注入的势垒;最后在器件表面蒸镀一层低功函的金属钡和铝作为阴极。

制备电致发光器件时,在真空镀膜机中热蒸镀金属阴极,沉积速率和金属层的厚度通过厚度/速率监控仪(STM 100)控制,发光区域的面积为 $0.3\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 。电致发光(EL)光谱在Intraspec IV型CCD光栅光谱仪(美国Oriel公司制造)上测定,发光二极管的伏安特性由半导体电流电压源(Keithley236)测试,光强(cd/m^2)和亮度效率(cd/A)用硅-光电二极管测得,并用PR-705光度计校准。器件测试中的递进扫描偏压与信号采集由计算机控制,其性能测试均在氮气手套箱中进行。

2 结果与讨论

2.1 铱配合物的结构分析

根据图1,铱配合物的合成分为两步,第一步是用2-苯基喹啉与三氯化铱反应生成铱二氯桥中间体,该中间体不用提纯就可进行下步反应。第二步是用辅助配体解离铱二氯桥中间体得目标产物,用樟脑基辅助配体解离产物**2**的产率为48%,而用乙酰丙酮解离产物**1**的产率只有36%,说明樟脑基辅助配体的配位能力比乙酰丙酮强。核磁共振氢谱结果表明,铱配合物中氢的个数与理论值吻合,铱配合物**1**的核磁共振氢谱中出现了2个甲基的核磁特征峰,而铱配合**2**则出现了樟脑的核磁特征峰,说明得到了正确的目标产物。另外电喷雾电离质谱表征表明,铱配合物的实际分子量与理论值吻合,进一步说明了产物的正确性。

2.2 铱配合物的光物理性能

配合物在乙腈($5\times 10^{-5}\text{ mol/L}$)中的紫外-可见吸收光谱如图2。分析图2可知:因配合物**1**和**2**结构相似,两配合物的紫外-可见吸收光谱相似,其在350 nm以下的强吸收带是由配体自旋允许的配体间电荷转移($^1\text{LC}(\pi-\pi^*)$)跃迁引起;而从350 nm延伸到可见光的弱吸收带可以归属为金属与配体之间的电荷转移($^1\text{MLCT}$),配体与配体之间的电荷转移($^1\text{LLCT}$), $^3\text{MLCT}$, $^3\text{LLCT}$ 和配体中心的 $^3\pi-\pi^*$ 跃迁。由于铱的重原子效应,高层的 $^1\text{MLCT}$ 跃迁通过自旋轨道耦合作用与自旋禁止的 $^3\text{MLCT}$, $^3\text{LLCT}$ 和 $^3\text{LC}(\pi-\pi^*)$ 跃迁混合^[11],从而使这些跃迁获得可观的强度。另外,铱配合物**1**和**2**的紫外吸收边分别为568,590 nm,以此估算二者的能级差分别为2.18,2.10 eV,铱配合物**2**的能级差比配合物**1**小,这主要是由于樟脑基配体的缺电子程度不如乙酰丙酮所致。

分析图2的光致发光光谱可知:铱配合物的发光为橙红光发射,配合物**1**的发射波长为603 nm,而配合物**2**的波长红移至619 nm,发生红移的原因与紫外吸收边红移的原因一致;配合物**2**的波长619 nm接近纯红光发射,从三基色的角度来说更有实际应用价值。以 $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]\text{Cl}_2$ 为标准物($\Phi_{\text{std}}=0.062$),测试铱配合物在二氯甲烷中的光致发光量子效率(Φ_{em}),其中配合物**2**的量子效率为53%,而配合物**1**的量子效率较低,只有34%。说明樟脑基配体不仅能调节发光波长,最为重要的是还能有效降低由于配合物相互聚集导致的发光淬灭,提高发光量子效率。

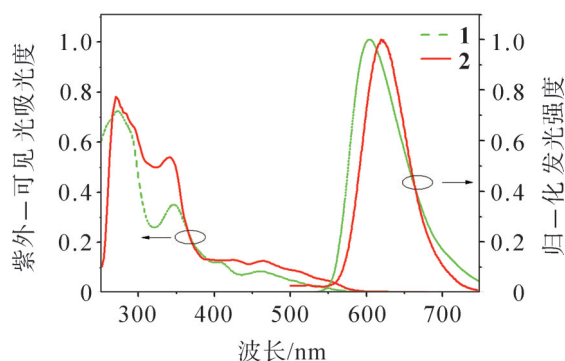


图2 铱配合物的紫外-可见吸收光谱和光致发光光谱

Fig. 2 UV-Vis absorption and photoluminescence spectra of the iridium complexes

2.3 铈配合物器件的电致发光性能

配合物1,2器件的电致发光谱如图3。由图3可知:配合物1电致发光光谱的最大发射波长为612 nm,与光致发光光谱相比红移了9 nm;配合物2电致发光光谱的最大发射波长为622 nm,与光致发光光谱相比仅红移3 nm,发射波长发生红移的主要原因是电致发光器件中配合物浓度较高;波长435 nm处主体材料没有发光。由此表明:樟脑基配体能有效降低分子聚集,进而可减少发光红移,有利于稳定器件光谱,减少因掺杂浓度及电压变化时造成的光谱漂移,增强器件的可重复性;主体材料的能量有效传递给掺杂的配合物。

表1为配合物1,2电致发光器件的性能。从表1可看出:配合物1,2器件的启明电压分别为5.0,10.8 V,这是因为樟脑基为不导电的烷基基团,基团的引入一定程度上降低了导电性,因此配合物2器件的开启电压较高;配合物1器件的最大外量子效率为0.014%,流明效率为0.007 cd/A,最大亮度为30.2 cd/m²,而配合物2器件的效率有较大程度提高,最大外量子效率达0.044%,流明效率为0.023 cd/A,最大亮度为48.6 cd/m²。但是,两种器件的总体效率偏低,这与器件结构中没有空穴阻挡层,从而导致电子与空穴不能有效在发光层的复合有关;配合物2器件的发光性能相比配合物1提升明显,外量子效率提高到3倍以上,说明樟脑基配体能够有效降低电致发光的浓度淬灭。

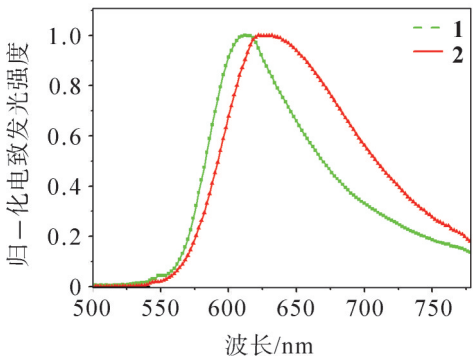


图3 器件的电致发光光谱

Fig. 3 Electroluminescence spectra of devices

表1 电致发光器件的性能

Tab. 1 Performances of the electrophosphorescent devices

样品	电压/ V	电流密度/ (mA/cm ²)	亮度/ (cd/m ²)	最大流明效率/ (cd/A)	最大外量子 效率/%	最大亮度/ (cd/m ²)	色坐标	启明电压/ V
1	6.2	122	6.2	0.007	0.014	30.2	(0.57,0.36)	5.0
2	12.4	187	41.4	0.023	0.044	48.6	(0.63,0.35)	10.8

图4为器件的电流密度-电压-亮度曲线。从图4可看出:在高电压下器件的亮度下降,这归因于铈配合物激发态三线态湮灭以及场诱导的淬灭效应^[2];同时,配合物1器件的色坐标为(0.57,0.36),而配合物2的色坐标为(0.63,0.35),配合物2的色坐标接近美国电视系统委员会制式规定的标准红色色坐标(0.67, 0.33)^[13-14],适于纯红光器件的制作。因此通过樟脑基配体的修饰,铈配合物的发光颜色更优,发光效率大大提高,增强了材料的电致发光综合性能。

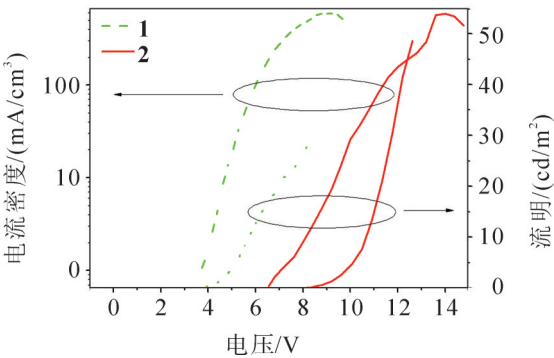


图4 器件的电流密度-电压-亮度曲线

Fig. 4 Current density-voltage-luminance curves of the devices

3 结 论

将樟脑基团引入到铈配合物中,并通过核磁共振氢谱、红外光谱及质谱对含樟脑基辅助配体铈配合物结构进行表征研究,其主要光电性能如下。

- 1) 樟脑基铈配合物的发光波长为619 nm,接近纯红光发射,相比于乙酰丙酮铈配合物的发光红移,其量子效率有所提高。
- 2) 与光致发光光谱相比,樟脑基铈配合物的电致发光光谱发生红移,色坐标为(0.64,0.35),接近标准红色的色坐标。樟脑基铈配合物器件启明电压为10.8 V,最大亮度为48.6 cd/m²,与乙酰丙酮铈配合物相比,其

器件外量子效率提高到3倍以上,说明樟脑基配体能明显提高有机电致发光器件的性能。

通过优化器件结构和铱配合物的掺杂浓度可提升含樟脑基辅助配体铱配合物的有机电致发光性能,在低成本全彩平板显示领域有望获得应用。该研究为设计光谱稳定、发光效率高的新型铱配合物电致磷光材料提供了实验依据和理论基础。

参考文献:

- [1] BALDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, et al. High efficiency phosphorescent emission from organic electroluminescent devices[J]. *Nature*, 1998, 395:151–154.
- [2] IM Y, BYUN S U, KIM J H, et al. Recent progress in high-efficiency blue-light-emitting materials for organic light-emitting diodes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27:160307(1–24).
- [3] ZHAO Q, LI F Y, HUANG C H. Phosphorescent chemosensors based on heavy-metal complexes[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39:3007–3030.
- [4] SEKINE C, TSUBATA Y, YAMADA T. Recent progress of high performance polymer OLED and OPV materials for organic printed electronics[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2014, 15:034203(1–15).
- [5] HU W K, LI S H, MA X F, et al. Blue-to-green electrophosphorescence from iridium(III) complexes with cyclometalated pyrimidine ligands[J]. *Dyes and Pigments*, 2018, 150:284–292.
- [6] CAO X S, MIAO J S, ZHU M R et al. Near-infrared polymer light-emitting diodes with high efficiency and low efficiency roll-off by using solution-processed iridium(III) phosphors[J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27:96–104.
- [7] DING J Q, WANG B, YUE Z Y, et al. Bifunctional green iridium dendrimers with a “self-host” feature for highly efficient nondoped electrophosphorescent devices[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, 48:6664–6666.
- [8] XIE H Z, LIU M W, WANG O Y, et al. Reduction of self-quenching effect in organic electrophosphorescence emitting devices via the use of sterically hindered spacers in phosphorescence molecules, *Advanced Materials*, 2001, 13:1245–1248.
- [9] 骆开均,张晨阳,苏祎伟,等. 一种基于二-[2',6'-二氟-2,3'-联吡啶-N,C4'] [3-乙酰基-1,7,8-三甲基-双环[2.2.1]-2-庚酮-O,O]铱(III)的非掺杂蓝色磷光发光器件[J]. *发光学报*, 2014, 35:1158–1164.
- [10] CHI Y, TONG B H, CHOU P T et al. Metal complexes with pyridyl azolates: design, preparation and applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2014, 281:1–25.
- [11] ZHAO Q, JIANG C Y, SHI M, et al. Synthesis and photophysical, electrochemical, and properties of a series of iridium(III) complexes based on quinoline derivatives and different β -diketonate ligands[J]. *Organometallics*, 2006, 25:3631–3638.
- [12] 何鉴,刘红梅,郑才俊,等. 带烷氧基的苯基蒽烯吡啶铱配合物在聚合物电致发光器件中的应用研究[J]. *影像科学与光化学*, 2008, 26(1):16–24.
- [13] 倪现花,童碧海,张千峰. 功能化环金属铱(III)配合物的应用研究进展[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(1):1–7.
- [14] 童碧海,杨子,梅群波. 苯基噻吩类铱配合物的合成及其铁(III)离子传感[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 29(1): 4–8.

责任编辑:何莉