

新型宽谱带黄色磷光铱(III)配合物的合成、光物理性质及其高效电致发光

陶鹏, 郑小康, 尹梦娜, 赵方卿, 苗艳勤, 刘淑娟, 赵强

引用本文:

陶鹏, 郑小康, 尹梦娜, 等. 新型宽谱带黄色磷光铱(III)配合物的合成、光物理性质及其高效电致发光[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 1-7.

TAO Peng, ZHENG Xiao-kang, YIN Meng-na, et al. Novel yellow phosphorescent iridium(III) complex with broad emission: Synthesis, photophysical properties and efficient electroluminescence[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(1): 1-7.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0266>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种正丙基环己烷修饰红光铱(III)配合物的合成与发光性能研究

Synthesis and electrophosphorescence of a red Iridium(III) complex modified by propylcyclohexane

液晶与显示. 2016, 31(5): 429-434 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163105.0429>

一种含液晶基元的新型铱配合物的合成与发光性能研究

Synthesis and electrophosphorescence of a novel Iridium(III) complex containing liquid-crystal fragment

液晶与显示. 2015(5): 752-756 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0752>

溶液法制备 SimCP : FIrpic 掺杂的蓝色磷光器件

Solution processible SimCP : FIrpic doped blue phosphorescent devices

液晶与显示. 2015(2): 240-245 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0240>

基于激基复合物主体的高性能OLED器件

OLED with high performance based on exciplex

液晶与显示. 2019, 34(9): 841-848 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0841>

高效暖白光器件的廉价制备及其相关材料研究

Solution processed high-efficiency low color temperature organic light emitting diodes and related materials

液晶与显示. 2015(3): 421-426 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153003.0421>

文章编号:1007-2780(2021)01-0001-07

新型宽谱带黄色磷光铱(III)配合物的合成、 光物理性质及其高效电致发光

陶 鹏¹, 郑小康¹, 尹梦娜², 赵方卿¹, 苗艳勤^{2*}, 刘淑娟¹, 赵 强^{1*}

(1. 南京邮电大学 有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地,

信息材料与纳米技术研究院, 柔性电子(未来技术)研究院, 江苏 南京 210023;

2. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:发展新型高性能黄色磷光材料是实现高品质互补色白光有机发光器件(OLEDs)的关键。本工作中,使用氯原子功能化的 2-苯基喹啉衍生物作为环金属配体,乙酰丙酮作为辅助配体,通过温和的合成方法制备了一种新型氯功能化的黄色磷光铱(III)配合物(Ir1)。通过核磁共振谱和单晶 X-射线衍射确认了配合物的结构。该配合物在二氯甲烷中具有强的宽谱带黄色磷光发射,最大发射峰位于 574 nm,发射寿命为 1.29 μ s,量子效率达到 51%。与同类发射波段的铱(III)配合物相比,该黄光配合物具有非常宽的单分子发射半峰宽(101 nm)。进一步制备了基于该磷光配合物的高性能黄光 OLEDs,器件最大发射峰位于 568 nm,发射半峰宽达到 88 nm,器件最大亮度、外量子效率、电流效率和功率效率分别达到 18 310 cd/m²、20.8%、58.16 cd/A 和 48.3 lm/W。结果表明该黄色磷光配合物在高性能互补色白光有机发光器件方面具有重要前景。

关 键 词: 磷光;铱(III)配合物;黄光;电致发光;半峰宽**中图分类号:** TP394.1;TN383+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0266

Novel yellow phosphorescent iridium(III) complex with broad emission: Synthesis, photophysical properties and efficient electroluminescence

TAO Peng¹, ZHENG Xiao-kang¹, YIN Meng-na², ZHAO Fang-qing¹,
MIAO Yan-qin^{2*}, LIU Shu-juan¹, ZHAO Qiang^{1*}(1. *Key Laboratory for Organic Electronics and Information Displays,
Institute of Advanced Materials, Institute of Flexible Electronics (Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;*2. *Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of
Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)***Abstract:** High-performance yellow emitter is the key to achieve high-quality complementary white**收稿日期:** 2020-10-09; **修订日期:** 2020-11-06.**基金项目:** 国家杰出青年科学基金(No. 61825503); 国家自然科学基金(No. 61905120, No.61705156); 江苏省自然科学基金(No. BK20190740); 山西省重点研发计划(国际合作项目; No.201903D421087)

Supported by National Funds for Distinguished Young Scientists (No.61825503); National Natural Science Foundation of China (No. 61905120, No.61705156); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20190740); Key R&D Program of Shanxi Province (International Cooperation, No.201903D421087)

* 通信联系人, E-mail: iamqzhao@njupt.edu.cn; miaoyanqin@tyut.edu.cn

organic electroluminescence. Herein, a novel yellow iridium(III) complex (Ir1) is synthesized by using chlorine-bearing cyclometalated ligand under the mild condition. The complex is confirmed by nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction analysis. In degassed CH_2Cl_2 , the complex shows bright yellow phosphorescent emission with high luminescent quantum yield of 51% and lifetime of 1.29 μs at room temperature. Notably, the full width at half maximum (FWHM) of emission spectrum is up to 101 nm. Moreover, complex Ir1 is served as triplet emitter in organic light-emitting device. The device exhibits broad yellow emission at 568 nm with FWHM of 88 nm, maximum brightness of 18 310 cd/m^2 , external quantum efficiency of 20.8%, current efficiency of 58.2 cd/A and power efficiency of 48.3 lm/W .

Key words: phosphorescence; iridium(III) complex; yellow emission; electroluminescence; full width at half maximum

1 引言

有机电致发光器件(OLEDs)具有超薄、柔性、低功耗、宽视角以及平面发光等优势,有望应用于平板显示与固态照明等领域,引起了学术界和产业界的广泛关注^[1-3]。

有机电致发光材料是实现高性能有机电致发光器件的关键因素之一。近年来,有机电致发光材料经过不断发展与进步,按照其发光类型分类,主要包括荧光发光材料、磷光发光材料以及热激活延迟荧光材料等,其中磷光发光材料是一类含有过渡金属原子(如铱、铂等)的高性能发光材料。磷光发光材料得益于过渡金属重原子诱导的强烈自旋-轨道耦合效应,能够有效利用电致发光器件中形成的三重态激子,实现高效率电致发光^[4-6]。

蓝光-黄光互补色白光器件因其器件结构与工艺相对简单等优势而成为一类有潜力的白光器件^[7]。黄光材料的综合性能(如发光效率和发射半峰宽等)对提升互补色白光器件性能显得尤为重要。例如,具有宽发射谱带的黄光材料可以覆盖更多的白光光谱,有助于提升白光器件的显色指数^[8-9]。相比于广泛研究的红、绿、蓝三基色发光材料,黄光材料则研究的相对较少,其材料体系的发展远不及三基色发光材料。Xie 等报道了一种蓝光-黄光互补色白光器件,由于使用的黄色磷光材料发射半峰宽仅有 63 nm,白光器件的显色指数较低只有 65^[10]。Dumur 等报道了一种基于 7,8-苯并喹啉环金属配体的黄色磷光铱(III)配合物,该配合物发射峰位于 551 nm,发射半峰宽为 75 nm^[11]。最近,我们通过 2-苯基喹啉衍生物

引入三氟甲基和(或)氟原子,不仅实现了该类铱(III)配合物高效率黄绿光发射,而且有效增加了单分子发射光谱半峰宽,配合物溶液和黄光器件的发射半峰宽都达到 100 nm,表明 2-苯基喹啉衍生物配体是一类可实现宽发射半峰宽的潜在的环金属配体^[2]。但是,该类黄色磷光铱(III)配合物含有芳香性碳氟键($\text{C}_{\text{aryl}}-\text{F}$),通常认为,分子中的 $\text{C}_{\text{aryl}}-\text{F}$ 键会降低发光器件的工作寿命^[3-6]。基于此,我们通过合理的分子设计,使用氯原子替代芳香性氟原子,形成更稳定的芳香性碳氯键($\text{C}_{\text{aryl}}-\text{Cl}$),有望提升器件工作寿命,同时期望保持该类铱(III)配合物宽的发射半峰宽。在本工作中,我们使用氯原子功能化的 2-苯基喹啉衍生物作为环金属配体,选择乙酰丙酮作为辅助配体,通过温和的合成方法制备了一种新型氯功能化的黄色磷光铱(III)配合物(Ir1)。该配合物在二氯甲烷中具有明亮的黄色宽谱带磷光发射,最大发射峰位于 574 nm,发射寿命为 1.29 μs ,量子效率达到 51%。该黄光配合物显示非常宽的发射半峰宽(101 nm)。基于该磷光铱(III)配合物的高性能黄光器件的最大发射峰位于 568 nm,发射半峰宽达到 88 nm,器件最大外量子效率、电流效率和功率效率分别达到 20.8%、58.16 cd/A 和 48.3 lm/W 。

2 实验

2.1 原料与试剂

环金属配体 2-(4-氯-3-(三氟甲基)苯基)-4-甲基喹啉为本实验室合成。乙酰丙酮、碳酸钾(K_2CO_3)购于萨恩化学技术有限公司,纯度 99%。三水合三氯化铱($\text{IrCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)购于上海

久岭化工有限公司,纯度 99.9%。其他试剂均为市售分析纯。

2.2 测试方法

使用 Bruker 400 型核磁共振仪测试核磁共振氢谱(^1H NMR)和氟谱(^{19}F NMR)、氘代二氯甲烷(CD_2Cl_2)为溶剂。使用 Bruker D8 QUEST X-射线单晶衍射仪在 100 K 下测试晶体结构。使用 SHIMADZU 基质辅助激光解离飞行时间质谱(MALDI-TOF-MS)测试铱(III)配合物分子量。使用 Shimadzu UV-2550 测试紫外-可见吸收光谱,溶剂为二氯甲烷。使用 Edinburgh LFS-980 分别测试发射光谱、激发态寿命以及发光量子效率等。在无水乙腈溶液中测试循环伏安曲线,铂电极作为工作电极和对电极,Ag/AgNO₃ (0.01 mol/L 的乙腈溶液)作为参比电极,四(正丁基)六氟磷酸铵作为电解质,使用二茂铁/二茂铁阳离子(Fc/Fc^+)氧化还原峰作为参比。

2.3 铱(III)配合物的合成

新型黄色磷光铱(III)配合物(Ir1)的合成路线如图 1 所示。

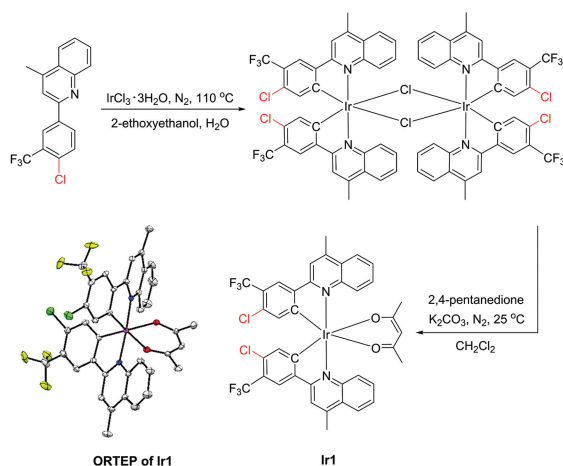


图 1 新型黄色磷光铱(III)配合物(Ir1)的合成路线及其单晶热椭球图

Fig.1 Synthetic route of novel yellow iridium(III) complex (Ir1) and its ORTEP diagram

取 $\text{IrCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (1.0 mmol)、2-(4-氯-3-(三氟甲基)苯基)-4-甲基喹啉(2.2 mmol)、蒸馏水 5 mL 以及 2-乙氧基乙醇 15 mL。将上述反应物和溶剂依次加入单口烧瓶中,氮气气氛下,加热至 110 °C 搅拌反应 24 h,自然冷却至室温,向反应液中加入 200 mL 去离子水,析出橙色絮状固体,过

滤,水洗,乙醇洗涤,45 °C 真空干燥得到橙色铱氯桥二聚体。取 2-(4-氯-3-(三氟甲基)苯基)-4-甲基喹啉合铱(III)氯桥二聚体(0.3 mmol)、乙酰丙酮(1.2 mmol)、无水碳酸钾粉末(3.0 mmol)和二氯甲烷 30 mL,将上述反应物、催化剂和溶剂依次加入到单口烧瓶中,氮气气氛下,室温下搅拌 24 h 后,过滤得橙色澄清液,二氯甲烷充分洗涤滤渣后合并有机相,减压旋干后经硅胶柱层析(石油醚:二氯甲烷 = 5:1)得到目标配合物橙色固体,产率 70%, ^1H NMR (400 MHz, CD_2Cl_2 , 298 K) δ : 8.36 (d; J = 8.76 Hz; 2H); 8.15 (s; 2H); 8.10 (d; J = 8.04 Hz; 2H); 8.02 (s; 2H); 7.64 (t; J = 7.12 Hz; 2H); 7.56 (t; J = 8.36 Hz; 2H); 6.64 (s; 2H); 4.75 (s; 1H); 3.02 (s; 6H); 1.55 (s; 6H). ^{19}F NMR (376 MHz, CD_2Cl_2 , 298 K) δ : -67.99 (s). MALDI-TOF-MS (m/z): calcd for $\text{C}_{39}\text{H}_{27}\text{Cl}_2\text{F}_6\text{IrN}_2\text{O}_2$, 932.10; found, 932.15.

3 结果与讨论

3.1 合成与结构表征

合成路线如图 1 所示,2.2 倍当量的 2-(4-氯-3-(三氟甲基)苯基)-4-甲基喹啉环金属配体与 $\text{IrCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 在体积比为 1:3 的水和 2-乙氧基乙醇混合溶剂中高温反应得到橙色 2-(4-氯-3-(三氟甲基)苯基)-4-甲基喹啉合铱(III)氯桥二聚体。使用温和的配位方法^[12],常温下,以无水碳酸钾粉末作为缚酸剂,在二氯甲烷溶剂中,铱(III)氯桥二聚体可以顺利地与乙酰丙酮发生配位反应,生成目标铱(III)配合物 Ir1。

配合物 Ir1 的 ^1H NMR 显示 7 组等积分强度的芳香质子信号,归属于环金属配体上 7 种不同化学环境的质子共振信号,同时, ^{19}F NMR 显示唯一尖锐单重共振信号(-67.99),表明配合物分子结构具有对称性。此外,配合物的质谱峰值与理论分子量一致。通过以上谱学方法证实了目标铱(III)配合物的分子结构,也证明了在合成铱(III)氯桥二聚体的剧烈反应条件下,芳香性碳氯键具有足够的稳定性,氯原子没有被溶剂 2-乙氧基乙醇取代。

使用二氯甲烷和甲醇混合溶剂溶解适量的配合物 Ir1,经自然挥发溶剂得到 Ir1 的单晶,通过单晶 X-射线衍射解析晶体结构,Ir1 的单晶热椭

球图如图 1 所示 (CCDC No. 2036200)。晶体结构清楚地表明 $C_{aryl}-Cl$ 键的存在, 两个 $C_{aryl}-Cl$ 键的键长分别为 0.172 8 nm 和 0.173 nm。其中, 两个 $C-Ir$ 键键长均为 0.196 7 nm, 两个 $N-Ir$ 键键长分别为 0.208 nm 和 0.208 5 nm, 其键长略长于 $C-Ir$ 键。所有键长和键角都在正常值范围之内, 中心铱原子采取畸变八面体配位构型, 其中与铱成键的氮原子则采取反式配位方式, 碳原子和氧原子都采取顺式配位方式。

3.2 光物理与电化学性质

配合物 Ir1 的紫外-可见吸收光谱如图 2(a) 所示, 在二氯甲烷中的浓度为 1.0×10^{-5} mol/L, 在 250~380 nm 之间主要有两个相对较强的吸收峰, 分别在 $\lambda_{max} = 275$ nm 和 308 nm, 主要归

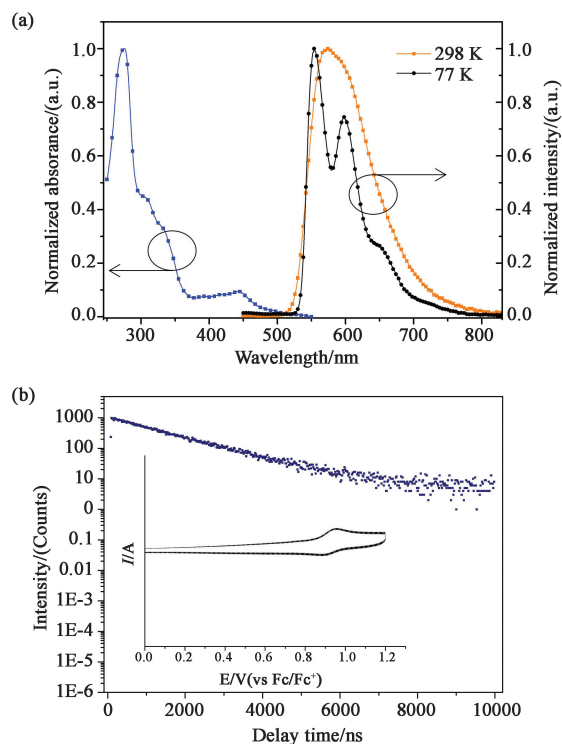


图 2 (a) 298 K 下 Ir1 在除气的 CH_2Cl_2 中的紫外-可见吸收光谱、发射光谱和 77 K 下在 2-MeTHF 中的发射光谱; (b) 298 K 下 Ir1 在除气的 CH_2Cl_2 中的发光强度随时间衰减曲线。(插图: 在乙腈中的循环伏安曲线 (扫描速度 100 mV/s))

Fig. 2 (a) UV-visible absorption, photoluminescence spectra of Ir1 at 298 K (in degassed CH_2Cl_2) and at 77 K (in 2-MeTHF); (b) Luminescent decay of Ir1 in degassed CH_2Cl_2 at 298 K. Inset: cyclic voltammogram under a scan rate of 100 mV/s in CH_3CN .

因于环金属配体内自旋允许的配体内单重态 (^1LC) 的跃迁; 在 380~490 nm 之间主要有一个中等强度的吸收峰, $\lambda_{max} = 443$ nm, 可归属于自旋允许的金属到配体电荷转移单重态 (^1MLCT) 的跃迁; 在 490 nm 以上的较弱的吸收带主要归因于自旋禁阻的金属到配体电荷转移三重态 (^3MLCT) 和配体内三重态 (^3LC) 的跃迁^[12]。常温下, 在 365 nm 的激发下, 配合物 Ir1 在二氯甲烷溶液中发射光谱如图 2(a) 所示, 可以看出 Ir1 在 574 nm 附近有强的无精细结构的宽谱带发射, 归属于 ^3MLCT 态的退激辐射, 光学带隙为 2.16 eV, 发射波长略长于对应的氟原子功能化铱 (III) 配合物 ($\lambda_{max} = 560$ nm)^[12], 表明氯原子的吸电子效应弱于氟原子, 与他们的电负性强弱顺序一致。该配合物在二氯甲烷的除氧溶液中激发态的寿命为 1.29 μs , 绝对溶液量子效率为 51%, 具有较高的发光效率。与常温下不同, 在 77 K 低温下, 配合物 Ir1 在 2-甲基四氢呋喃中显示具有精细结构的肩峰发射, 发射峰分别为 554 nm 和 598 nm, 同时发射半峰宽显著降低, 仅为 73 nm。表明温度对该铱 (III) 配合物的发射光谱具有显著影响。根据低温光谱可得出 Ir1 的三线态能级为 2.24 eV。

利用电化学工作站测试配合物 Ir1 的电化学性质。配合物 Ir1 在乙腈溶液中的循环伏安曲线如图 2(b) 所示, 从图中可以得出: Ir1 的起始氧化电位为 0.85 V, 通过计算得到: Ir1 的最高占据分子轨道 (HOMO) 能级为 -5.65 eV, 最低未占据分子轨道 (LUMO) 能级为 -3.49 eV。

3.3 电致发光性能

将配合物 Ir1 用于制备宽谱带黄色磷光有机发光二极管。Ir1 作为磷光客体材料, 通过真空热蒸镀法制备了结构为 ITO/MoO₃ (3 nm)/TAPC (40 nm)/TCTA (5 nm)/CBP: Ir1 (质量分数 6%) (20 nm)/TmPyPB (50 nm)/LiF (1 nm)/Al (120 nm) 的器件, 掺杂质量分数为 6%。其中 ITO 为氧化铟锡 (阳极), MoO₃ 为三氧化钼 (空穴注入层), TAPC 为 4,4'-环己基二 (N,N-二 (4-甲基苯基) 苯胺) (空穴传输层), TCTA 为 4,4',4''-三 (咔唑-9-基) 三苯胺 (激子阻挡层和电子阻挡层), CBP 为 4,4'-二 (9-咔唑) 联苯 (发光层主体材料), TmPyPB 为 3,3'-(5'-(3-(3-吡啶基) 苯基) (1,1':3',1''-三联苯)-3,3''-二

基)二吡啶(电子传输层),LiF为氟化锂(电子注入层),Al为金属铝(阴极)。黄光器件各功能层能级示意图如图3所示。使用美国SpectraScan PR655型光谱辐射仪测试了电致发光(EL)光谱,利用BM-7A型光度计及Keithley 2400数字源表测量器件的亮度(L)-电压(V)-电流密度(J)曲线。

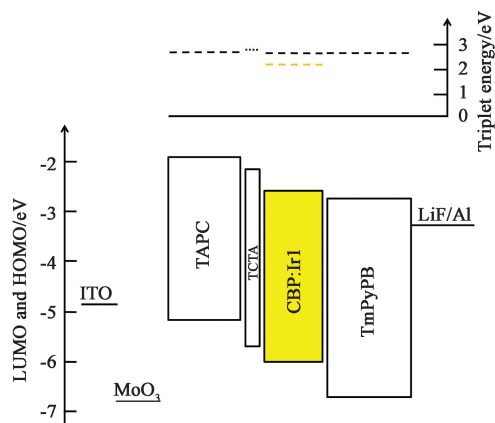


图3 黄光器件各功能层能级示意图

Fig.3 Schematic diagram of the energy levels of the yellow OLEDs

器件的电致发光光谱如图4(a)所示,器件掺杂浓度为6%,器件具有低的启动电压(3.3 V),在不同驱动电压(4~8 V)下电致发光峰值均为568 nm,1931 CIE色坐标为(0.51, 0.48),为黄光发射,6 V电压下发光器件照片如图4(a)所示。电致发光光谱不存在主体材料CBP的发射,表明器件的电致发光来源于Ir1的客体发光,实现了CBP到Ir1的完全能量传递。此外,我们注意到器件的电致发光峰值比Ir1的溶液发射光谱稍微蓝移,与对应的氟功能化铱(III)配合物器件不同,对应的氟功能化铱(III)配合物器件的电致光谱与溶液光谱几乎完全一致^[12],而基于Ir1的电致发光光谱半峰宽(88 nm)比对应溶液发射光谱半峰宽(101 nm)减小了13 nm,我们初步推测可能有两个因素:其一,氟功能化配合物Ir1与主体材料CBP之间存在相互作用,降低了配合物肩峰发射强度;其二,该器件存在微腔效应,窄化了器件发射半峰宽。

在该掺杂浓度下(见图4(a)),当电压由4 V变化至8 V时,电致发光光谱的峰位不变,1931 CIE色坐标稳定在(0.51, 0.48)。

器件的外量子效率(EQE)-电流密度(J)曲

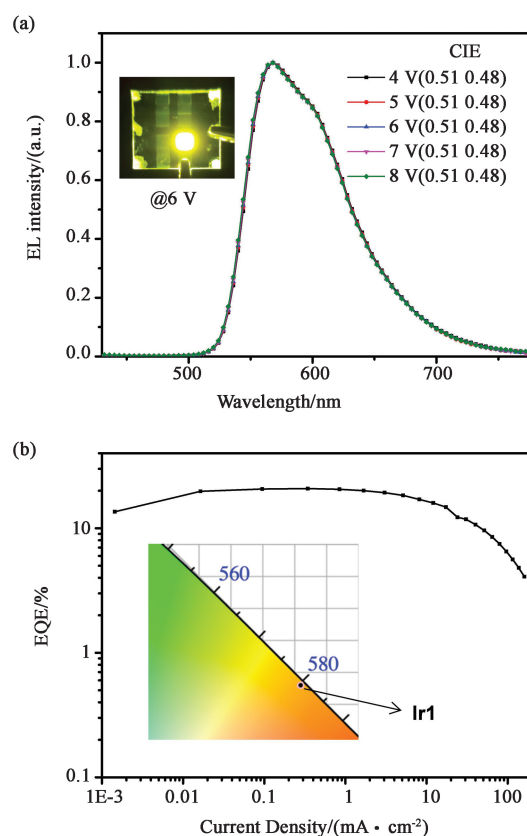


图4 黄光器件的电致发光光谱(a)和外量子效率-电流密度曲线(b)。插图:6 V电压下电致发光器件照片(上)和1931 CIE色坐标(下)。

Fig.4 EL spectra (a) and EQE- J curve (b) of yellow OLED. Inset: EL photograph (up) and 1931 CIE coordinate (down) of device at 6 V.

线如图4(b)所示,器件最大EQE为20.8%,表明该配合物具有高的电致发光效率。在器件效率方面,与我们近期报道的黄光氟功能化铱(III)配合物相比,器件性能略有降低,这可能是由器件结构的差异造成的^[12]。但是尽管如此,我们的初步器件性能亦超过了20%,表明该配合物是一种可用于高效电致发光的新型磷光材料。我们相信可通过优化器件结构进一步提高器件性能。

从电流效率(CE)-亮度(L)-功率效率(PE)曲线(见图5(a))可以看出,当电流密度为0.34 mA/cm²时,达到最大电流效率58.2 cd/A,当电流密度为0.02 mA/cm²时,达到最大功率效率48.3 lm/W。器件的 J -电压(V)-亮度(L)曲线如图5(b)所示,当驱动电压为9 V时,达到最大亮

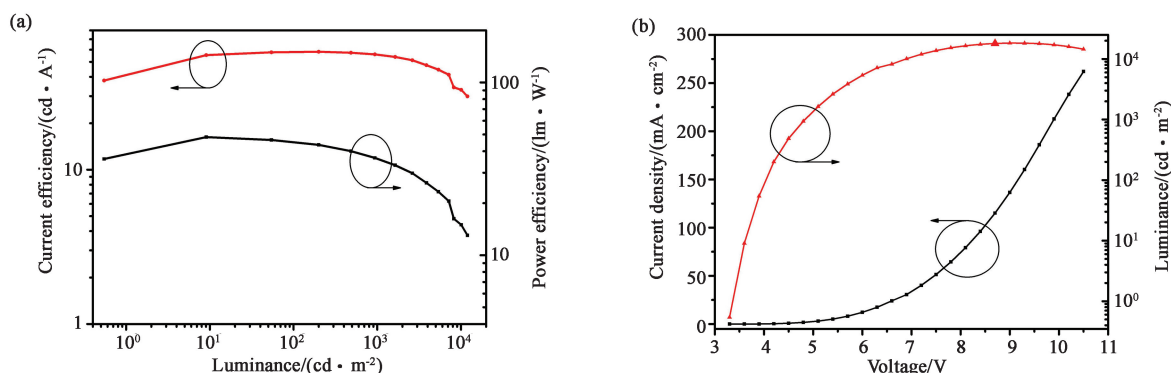


图 5 黄光器件的电流效率-亮度-功率效率曲线(a)和电流密度-电压-亮度曲线(b)

Fig.5 CE-L-PE curves (a), J -V-L curves (b) of yellow OLED.

度 $18\,310\text{ cd/m}^2$ 。通过选择优化主体材料的种类,器件的发射半峰宽有望得到进一步提高。 C_{aryl} -F 键对器件稳定性的影响及其机理分析正在进行中,该工作将做为独立工作后续报道。

4 结 论

本文使用温和的合成方法制备了一种新型氯原子功能化的宽谱带黄色磷光铱(III)配合物,并通过核磁共振谱以及 X-射线单晶衍射确认了配合物的分子结构。该配合物在二氯甲烷中具有明

亮的黄色宽谱带单分子磷光发射(高达 101 nm),最大发射峰位于 574 nm ,发射寿命为 $1.29\text{ }\mu\text{s}$,量子效率达到 51% 。基于该磷光材料的高性能黄光 OLEDs 最大发射峰位于 568 nm ,电致发光半峰宽达到 88 nm ,器件最大亮度、外量子效率、电流效率和功率效率分别达到 $18\,310\text{ cd/m}^2$, 20.8% , 58.16 cd/A 和 48.3 lm/W 。证明了氯功能化策略可以有效实现高性能宽谱带发射黄光磷光铱(III)配合物。初步器件结果表明合成的宽谱带黄色磷光铱(III)配合物有望应用于高性能互补色白光有机发光器件。

参 考 文 献:

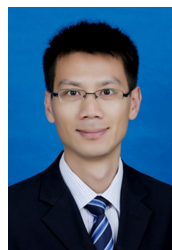
- [1] FAN C, YANG C L. Yellow/orange emissive heavy-metal complexes as phosphors in monochromatic and white organic light-emitting devices [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2014, 43(17): 6439-6469.
- [2] WU Z B, LUO J J, SUN N, *et al.* High-performance hybrid white organic light-emitting diodes with superior efficiency/color rendering index/color stability and low efficiency roll-off based on a blue thermally activated delayed fluorescent emitter [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(19): 3306-3313.
- [3] 黄国斌, 骆登峰, 张茂升. 多色高发光效率 CsPbX_3 ($X = \text{Cl, Br, I}$) 钙钛矿量子点的制备及其在发光二极管中的应用 [J]. *应用化学*, 2019, 36(8): 932-938.
HUANG G B, LUO D F, ZHANG M S. Preparation of CsPbX_3 ($X = \text{Cl, Br, I}$) perovskite quantum dots with multicolor and high luminescence efficiency and its application in light emitting diode devices [J]. *Chin. J. Appl. Chem.*, 2019, 36(8): 932-938. (in Chinese)
- [4] YAM V W Y, AU V K M, LEUNG S Y L. Light-emitting self-assembled materials based on d^8 and d^{10} transition metal complexes [J]. *Chem. Rev.*, 2015, 115(15): 7589-7728.
- [5] 张宏科, 孙军, 杨丹丹, 等. 基于 13,13-二甲基 N,N'-二-对甲苯基-13H-茚并[1,2-b]蒽-2-胺高效长寿命蓝光有机电致发光二极管 [J]. *液晶与显示*, 2019, 34(12): 1136-1142.
ZHANG H K, SUN J, YANG D D, *et al.* High-efficiency long-life blue organic electro-luminescent diode based on 13, 13-dimethyl-N, N-di-*p*-tolyl-13 H-indeno[1, 2-b] anthracen-2-amine [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2019, 34(12): 1136-1142. (in Chinese)
- [6] LIU Y C, LI C S, REN Z J, *et al.* All-organic thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-

- emitting diodes [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2018, 3(4): 18020.
- [7] LAI S L, TAO S L, CHAN M Y, *et al.* Iridium(Ⅲ) bis[2-(2-naphthyl)pyridine] (acetylacetonate)-based yellow and white phosphorescent organic light-emitting devices [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011, 21(13): 4983-4988.
- [8] ZHANG Z S, YUE S Z, WU Y K, *et al.* Low driving voltage blue, green, yellow, red and white organic light-emitting diodes with a simply double light-emitting structure [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(2): 1815-1823.
- [9] CHANG Y L, KAMINO B A, WANG Z B, *et al.* Highly efficient greenish-yellow phosphorescent organic light-emitting diodes based on interzone exciton transfer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2013, 23(25): 3204-3211.
- [10] ZHANG B H, TAN G P, LAM C S, *et al.* High-efficiency single emissive layer white organic light-emitting diodes based on solution-processed dendritic host and new orange-emitting iridium complex [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(14): 1873-1877.
- [11] DUMUR F, LEPELTIER M, SIBONI H Z, *et al.* Highly efficient organic light-emitting devices prepared with a phosphorescent heteroleptic iridium(Ⅲ) complex containing 7,8-benzoquinoline as the cyclometalated ligand [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2014, 2(3): 262-266.
- [12] TAO P, LI W L, ZHANG J, *et al.* Facile synthesis of highly efficient lepidine-based phosphorescent iridium(Ⅲ) complexes for yellow and white organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(6): 881-894.
- [13] BARANOFF E, CURCHOD B F E. FIrpac: archetypal blue phosphorescent emitter for electroluminescence [J]. *Dalton Trans.*, 2015, 44(18): 8318-8329.
- [14] TAO P, ZHANG Y B, WANG J, *et al.* Highly efficient blue phosphorescent iridium(Ⅲ) complexes with various ancillary ligands for partially solution-processed organic light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(36): 9306-9314.
- [15] ZHENG Y H, BATSANOV A S, EDKINS R M, *et al.* Thermally induced defluorination during a *mer* to *fac* transformation of a blue-green phosphorescent cyclometalated iridium(Ⅲ) complex [J]. *Inorg. Chem.*, 2012, 51(1): 290-297.
- [16] SIVASUBRAMANIAM V, BRODKORB F, HANNING S, *et al.* Fluorine cleavage of the light blue heteroleptic triplet emitter FIrpac [J]. *J. Fluorine Chem.*, 2009, 130(7): 640-649.

作者简介:



陶 鹏(1989—),男,江苏淮阴人,博士,2017年于太原理工大学获得博士学位,主要从事新型光功能材料分子设计及光电器件方面的研究。E-mail: iamptao@njupt.edu.cn



赵 强(1978—),男,山东淄博人,博士,教授,2007年于复旦大学获得博士学位,主要从事有机与生物光电子学研究。E-mail: iamqzhao@njupt.edu.cn



苗艳勤(1987—),男,山西临县人,副教授,2015年于太原理工大学获得博士学位,主要从事光电子器件及其物理机制方面的研究。E-mail: miaoyanqin@tyut.edu.cn