

以2-(2-吡啶基)苯并噻吩为主配体的 两种蓝紫光二价铂配合物的合成与性质

王登强¹ 陈宇² 刘小庆¹ 卞健健¹ 尹新颖¹ 滕明瑜^{*1} 戎梅竹^{*1} 汪正良^{*2}

(¹云南师范大学化学化工学院,昆明 650500)

(²云南民族大学化学与环境学院,昆明 650504)

摘要: 以2-(2-吡啶基)苯并噻吩(2-(2-pyridyl)benzothiophene, btp)作为主配体,分别以邻二氮菲[1,10]并咪唑联苯酚(2-(1*H*-imidazo[4,5-*f*][1,10]phenanthrolin-2-yl)phenol, ipap)和3-甲基-6-苯基咪唑[2,1-*b*]噻唑(3-Methyl-6-phenylimidazo[2,1-*b*]thiazole, mpmt)作为辅助配体,成功合成了2个二价铂配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与[(btp)Pt(mpmt)]Cl,并得到了配合物[(btp)Pt(mpmt)]Cl的晶体结构。由金属-配体电荷转移引起的2种配合物发光,具有60%左右的内量子效率,发射峰在426 nm(蓝色)与381 nm(紫色)处。HOMO/LUMO轨道能级分别为-4.69 eV/-2.55 eV与-4.80 eV/-2.21 eV。单晶衍射结果表明,较低的共轭程度导致了该类配合物的短波长发射。

关键词: 有机光电功能材料;二价铂配合物;2-(2-吡啶基)苯并噻吩;邻二氮菲[1,10]并咪唑联苯酚;

3-甲基-6-苯基咪唑[2,1-*b*]噻唑

中图分类号: O614.82*5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4861(2021)01-0033-06

DOI: 10.11862/CJIC.2021.012

Synthesis and Properties of Two Blue and Violet Light-Emitting Platinum(II) Complexes

WANG Deng-Qiang¹ YU Chen² LIU Xiao-Qing¹ BIAN Jian-Jian¹

YIN Xin-Ying¹ TENG Ming-Yu^{*1} RONG Mei-Zhu^{*1} WANG Zheng-Liang^{*2}

(¹Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

(²School of Chemistry & Environment, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

Abstract: With 2-(2-pyridyl)benzothiophene (btp) as the primary ligand, 2-(1*H*-imidazo[4,5-*f*][1,10]phenanthrolin-2-yl)phenol (ipap) and 3-methyl-6-phenylimidazo[2,1-*b*]thiazole (mpmt) as the auxiliary ligands, two platinum(II) complexes, [(btp)Pt(ipap)]Cl and [(btp)Pt(mpmt)]Cl were synthesized, and the crystal structure of [(btp)Pt(mpmt)]Cl was determined. The luminescence of the complexes which is attributed to the metal-to-ligand charge transfer (MLCT) emission has internal quantum efficiency about 60% with emission peaks at 426 nm (blue) and 381 nm (purple). The orbital energy levels of HOMO/LUMO were -4.69 eV/-2.55 eV and -4.80 eV/-2.21 eV, respectively. The crystal structure discloses that the low conjugation of these complexes results in their short wavelength emission. CCDC: 1978721, [(btp)Pt(mpmt)]Cl.

Keywords: organic photoelectric functional materials; platinum(II) complexes; 2-(2-pyridyl)benzothiophene;

2-(1*H*-imidazo[4,5-*f*][1,10]phenanthrolin-2-yl)phenol; 3-methyl-6-phenylimidazo[2,1-*b*]thiazole

收稿日期: 2020-01-24。收修改稿日期: 2020-10-28。

国家自然科学基金(No.21461030, 21662047)资助。

*通信联系人。E-mail: myteng@ynnu.edu.cn, meizhurong@foxmail.com, wangzhengliang@foxmail.com

0 引言

二价铂配合物能通过旋轨耦合作用利用单线态和三线态激子混合发光^[1],从而达到100%的内量子理论效率,成为继三价铱^[2-10]与一价铜^[10-15]配合物之后的另一个有机磷光材料研究热点。早在1997年,Forrest课题组就报道了最早的二价铂配合物磷光材料^[6]。自2004年起,支志明课题组开发了一系列具有强的三线态发射和高量子效率的基于salen及salophen型席夫碱配体的二价铂配合物^[17-20]。但同时也发现它们的磷光寿命相对较长,从而引起三线态激子之间的磷光淬灭,导致其量子效率比三价铱配合物要低;并且由于这一类铂配合物是四配位的平面型配合物,存在强烈的Pt-Pt作用,容易形成激基复合物,导致发光效率及色纯度的降低。但是铂配合物的发射波长可以覆盖蓝光到红光整个范围,同时具有满足蒸镀工艺、颜色可调、便捷的合成路线等独特优势,也被认为是很有前景的电致磷光材料。张杰课题组通过在该类二价铂配合物上引入叔丁基及三苯氨基等空间位阻,能有效地减弱激基复合物的产生,提高材料的效率及色纯度^[1,21-23]。

除了上述多见的salen及salophen型席夫碱配体的二价铂配合物,以C[^]N、N[^]N型配体和三齿型配体构成的二价铂配合物性能相对比较优异^[24]。C[^]N和N[^]N型配体可以引入大体积空间位阻基团到配体上,三齿型配体由于其结构有较大的刚性,从而能破坏铂配合物的平面四边形结构,两者都能够抑制Pt-Pt间相互作用;但是前者可以有更多的配体组合方式,或者通过修饰配体来提高配合物的发光性能。

本课题组近期报道了以3-甲基-6-苯基咪唑[2,1-*b*]噻唑(mpmt)为主配体的三价铱配合物,发现该类配体具有较强的配位能力,此外配合物的发光颜色能够随着辅助配体的不同在红光至绿光之间调节^[3]。尽管目前关于二价铂配合物的配合物比较多,但基于C[^]N和N[^]N型配体的二价铂配合物的最大发射峰主要集中在红光及黄光区间。我们使用2-(2-吡啶基)苯并噻吩(2-(2-pyridyl)benzothiophene, btp)作为主配体,分别用3-甲基-6-苯基咪唑[2,1-*b*]噻唑(3-methyl-6-phenylimidazo[2,1-*b*]thiazole, mpmt)和邻二氮菲[1,10]并咪唑联苯酚(2-(1*H*-imidazo[4,5-*f*][1,10]phenanthrolin-2-yl)phenol, ipap)作为辅助配体,制备了2种结构新颖的、具有蓝光及紫光发射的

二价铂配合物。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

实验所用的试剂及溶剂均为市售分析纯。红外光谱在Bruker TENSOR27红外光谱仪测得。核磁共振数据在Bruker公司500 MHz核磁共振波谱仪测得(以TMS为内标,CDCl₃或DMSO-d₆做溶剂)。单晶结构在装有Cu K α (λ =0.154 18 nm)源的Bruker D8 Venture TXS PHOTON II衍射仪上测定,以CCD收集衍射数据。紫外可见吸收光谱在上海美谱达UV-3100紫外可见分光光度计测得。荧光光谱数据在Hitachi F-4600荧光分光光度计测得。循环伏安图(CV)在上海华辰电化学工作站测得。

1.2 配合物的合成

将0.28 g(1.3 mmol)的btp和0.42 g(1 mmol)的K₂PtCl₄加入100 mL圆底烧瓶中,再加入7.5 mL的蒸馏水和22.5 mL的乙二醇乙醚($V_{\text{水}}:V_{\text{醚}}=1:3$),反复抽充氮气几次,在氮气保护下搅拌回流24 h。反应结束后冷却到室温,得到红黄色浑浊溶液。然后抽滤,分别以乙醇和乙醚洗涤后,收集滤饼,得到的棕黄色固体为桥联二聚体,产率68.7%。反应如图1所示。

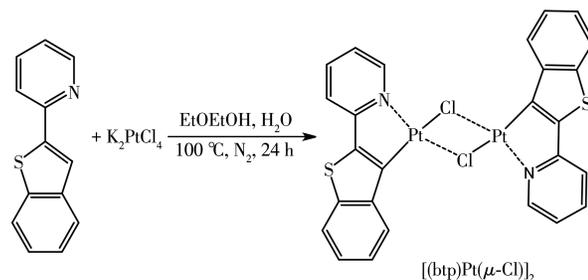
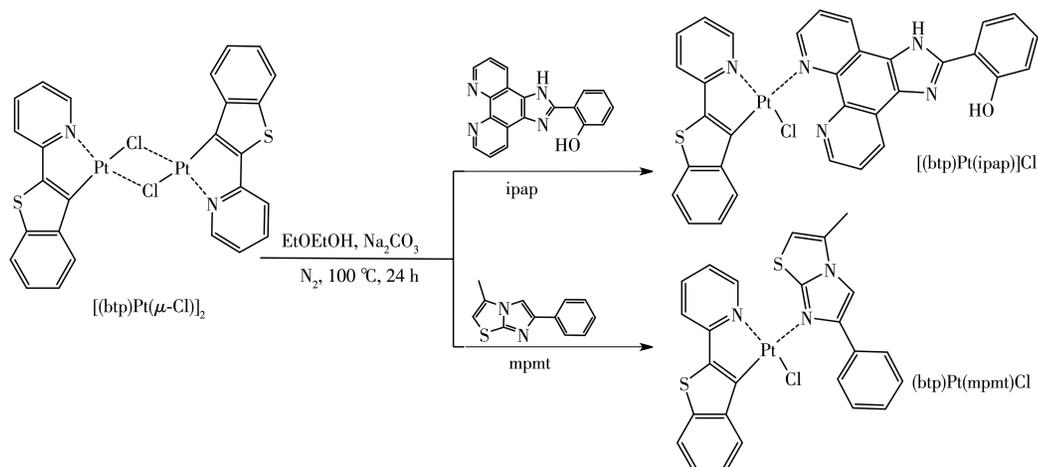


图1 [(btp)Pt(μ -Cl)₂]的合成

Fig.1 Synthesis of [(btp)Pt(μ -Cl)₂]

将0.18 g(0.2 mmol)的桥联二聚体[(btp)Pt(μ -Cl)₂]与0.5 mmol的辅助配体(0.11 g的mpmt、0.16 g的ipap)加入100 mL圆底烧瓶中,加入0.21 g(2 mmol)无水碳酸钠后,再加入乙二醇乙醚13 mL,反复抽充氮气几次,在氮气保护下搅拌回流24 h。反应结束后冷却到室温,蒸除溶剂,通过柱层析得到目标产物。反应如图2所示。

通过乙醚扩散法获得配合物(btp)Pt(mpmt)Cl的单晶。具体步骤是将(btp)Pt(mpmt)Cl样品配成从低到高3种浓度的溶液装到小试管中,将乙腈与二氯甲烷的混合溶剂沿着试管壁小心地滴入,洗干净吸

图2 配合物 $[\text{PtCl}(\text{ipap})(\text{btp})]\text{Cl}$ 与 $[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$ 的合成Fig.2 Synthesis of titled complexes $[\text{PtCl}(\text{ipap})(\text{btp})]\text{Cl}$ and $[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$

附在试管壁上的样品粉末。将3支不同浓度的试管轻轻放进广口锥形瓶中,再往锥形瓶中加入80 mL乙醚。用多层保鲜膜与锡箔纸先后扎好瓶口,密封静置,整个过程避免剧烈晃动样品。

$[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$: 黄色固体,产率:40.3%。 ^1H NMR(500 MHz, DMSO): δ 9.44(d, $J=6.4$ Hz, 1H), 8.62(s, 1H), 8.47(d, $J=7.2$ Hz, 2H), 8.03(t, $J=8.1$ Hz, 1H), 7.88(d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.62(d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.38(t, $J=7.7$ Hz, 2H), 7.31(dt, $J=14.7, 7.2$ Hz, 2H), 7.17(t, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.07(s, 1H), 6.90(t, $J=7.2$ Hz, 1H), 6.10(d, $J=8.2$ Hz, 1H), 2.56(s, 3H)。 ^{13}C NMR(125 MHz, DMSO- d_6): δ 150.25, 143.73, 140.67, 129.79, 128.51, 128.30, 127.99, 126.97, 125.19, 124.37, 123.89, 120.77, 118.43, 110.38, 12.60。IR(KBr, cm^{-1}): 3 429, 3 114, 3 052, 2 914, 1 960, 1 602, 1 483, 1 441, 1 401, 1 296, 1 180, 1 156, 1 130, 1 057, 914, 817, 759, 727, 691, 616。ESI-MS m/z : 620.059 3(100%) $[\text{M}+\text{H}]^+$ 。

$[\text{PtCl}(\text{ipap})(\text{btp})]\text{Cl}$: 棕色固体,产率:32.1%。 ^1H NMR(500 MHz, CDCl_3): δ 9.20(d, $J=8.2$ Hz, 1H), 8.01(s, 1H), 7.93(d, $J=4.0$ Hz, 1H), 7.83(d, $J=8.2$ Hz, 1H),

7.69(q, $J=7.6, 7.0$ Hz, 2H), 7.62~7.49(m, 2H), 7.33(d, $J=5.7$ Hz, 1H), 7.29(s, 2H), 7.22(t, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.08(d, $J=8.0$ Hz, 1H), 6.97(t, $J=7.4$ Hz, 1H), 6.90(t, $J=7.6$ Hz, 1H), 6.68~6.63(m, 1H), 6.15(d, $J=8.1$ Hz, 1H)。 ^{13}C NMR(125 MHz, CDCl_3): δ 165.45, 162.65, 149.50, 146.20, 145.93, 143.27, 142.96, 138.96, 136.50, 133.09, 129.13, 125.93, 125.56, 124.89, 124.48, 123.33, 120.58, 119.52, 116.75。IR(KBr, cm^{-1}): 3 373, 3 076, 2 047, 1 818, 1 605, 1 482, 1 409, 1 369, 1 297, 1 254, 1 159, 1 089, 1 030, 997, 836, 756, 671, 560。ESI-MS m/z : 718.101 0(100%) $[\text{M}+\text{H}]^+$ 。

1.3 晶体结构测定

所选样品为质量好的透明没有裂纹的黄色块状单晶,尺寸为0.20 mm×0.18 mm×0.18 mm。选好的单晶装载在衍射仪上后以 φ - ω 扫描方式收集衍射数据,用APEX III软件获取晶胞参数并还原衍射数据。通过SHELXS软件^[25]用直接法解析结构并进行结构精修,加氢方式为理论加氢。相关晶体学数据如表1所示。

CCDC: 1978721, $[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$ 。

表1 配合物 $[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$ 的晶体学数据Table 1 Crystal data of complex $[\text{PtCl}(\text{mpmt})(\text{btp})]\text{Cl}$

Formula	$\text{C}_{27}\text{H}_{24}\text{ClN}_3\text{OPtS}_2$	$2\theta_{\text{max}} / (^\circ)$	135
Formula weight	701.15	Reflection collected	25 249
Crystal system	Monoclinic	Independent reflection (R_{int})	5 035 (0.063)
Space group	$P2_1/c$	$D_c / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.686
a / nm	1.703 89(8)	μ / mm^{-1}	11.998
b / nm	1.047 20(5)	$F(000)$	1 368
c / nm	1.566 15(7)	T / K	173(2)

续表1

$\beta / (^{\circ})$	98.753(2)	R_1, wR_2	0.067, 0.175
V / nm^3	2.762 0(2)	S	1.088
Z	4	$(\Delta\rho)_{\max}, (\Delta\rho)_{\min} / (\text{e} \cdot \text{nm}^{-3})$	3 019, -1 790

1.4 吸收与发射光谱测试

将2种二价铂配合物分别溶解配制为浓度 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的二甲基甲酰胺(DMF)溶液,在25 mL棕色容量瓶中定容。然后使用紫外-可见分光光度计扫描测试,可得到2种配合物的吸收光谱。用测得的配合物吸收峰作为参考,通过使用荧光分光光度计以MLCT吸收带激发,即可得到配合物在DMF溶液中的发射光谱。

配合物的发光内量子效率由下述公式计算得到: $\Phi_s = \Phi_{\text{std}} [I_{\text{s}} A_{\text{std}} / (I_{\text{std}} A_{\text{s}})] (\eta_s / \eta_{\text{std}})^2$,其中, Φ_s 和 Φ_{std} 分别代表测试样品和标准物质的发光内量子产率, I_s 和 I_{std} 表示测试样品和基准物质在最大激发波长下的荧光积分强度, A_{std} 和 A_s 分别代表测试样品和基准物质在激发波长下的吸光度, η_s 和 η_{std} 分别代表测试样品和基准物质的溶剂折光率。计算时用 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 作为基准物质,其磷光量子效率为 $0.4^{[26]}$ 。

1.5 循环伏安测试

称量3.29 mg的铁氰化钾和1.00 g的硝酸钾加到电解槽中,再加入10 mL蒸馏水溶解,用来检测电极是否磨好。以DMF为溶剂配制 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $n\text{Bu}_4\text{NPF}_6$ 溶液作为支持电解质。进一步将样品配制成浓度为 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的DMF溶液,在25 mL容量瓶中定容。以二茂铁为内标,使用玻碳电极(工作电极)、铂电极(对电极)和饱和 Ag/Ag^+ 离子电极(参比电极)的三电极体系,扫描样品溶液测得CV曲线,扫描范围为 $-2 \sim 1 \text{ V}$,扫描速度为 $0.1 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 (btp)Pt(mpmt)Cl的晶体结构

晶体结构椭球图如图3所示,中心离子 $\text{Pt}(\text{II})$ 的几何配位构型为平面四边形,其四边形是由btp的一个C和N,mpmt的吡啶型N以及Cl构成。该结构与最初设想的二价铂分别与btp和mpmt的C和N配位的结构有所不同,相较于最初设想的结构,该结构的共轭程度有所降低。配合物中, $\text{Pt}-\text{C}$ 键为 $0.199 6(10) \text{ nm}$, $\text{Pt}-\text{N}$ 键分别为 $0.203 2(9)$ 和 $0.204 9(9) \text{ nm}$, $\text{Pt}-\text{Cl}$ 键为 $0.239 5(3) \text{ nm}$,配合物中其他的键长和键角均处在正常的范围之内。

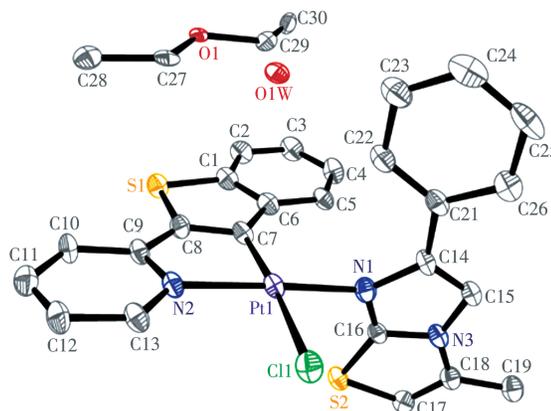


图3 (btp)Pt(mpmt)Cl晶体的30%概率水平椭球图
Fig.3 ORTEP diagram of (btp)Pt(mpmt)Cl showing 30% probability level ellipsoids

2.2 配合物的光物理性质

两种配合物的紫外吸收如图4所示。通过图中2种配合物的紫外吸收曲线能够看出[(btp)Pt(ipap)]Cl在250~360 nm范围内有多个较强的吸收峰,这是由于配体电子自旋允许的 $\pi-\pi^*$ 跃迁引起的,其中在330~360 nm的范围内的吸收峰,是由于辅助配体ipap具有较大的分子共轭平面,增强了 $\pi-\pi^*$ 跃迁吸收,使其在350 nm处有很强的吸收。[(btp)Pt(ipap)]Cl在450~520 nm范围内有一个较弱的宽吸收峰,这是由于配合物中自旋禁阻的中心金属到配体间电荷转移跃迁($^3\text{MLCT} \leftarrow ^0\text{S}$)引起的^[27],由于中心金属Pt具有较强烈的自旋与轨道的耦合作用,

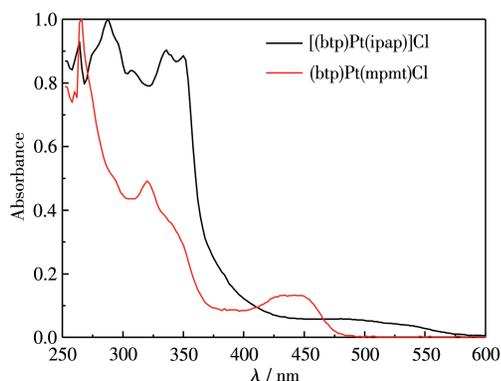


图4 配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的紫外-可见吸收光谱

Fig.4 UV-visible absorption spectra of complexes [(btp)Pt(ipap)]Cl and (btp)Pt(mpmt)Cl

解禁了部分自旋禁阻。(btp)Pt(mpmt)Cl在250~330 nm范围内有2个较强的吸收峰,这是由于配体电子自旋允许的 $\pi-\pi^*$ 跃迁引起的;在410~460 nm处有一个较弱的吸收峰,这是由于配合物中自旋允许的中心金属到配体间电荷转移跃迁($^1\text{MLCT} \leftarrow ^0\text{S}$)引起的^[28]。

两种配合物的荧光发射光谱如图5及表2所示。[(btp)Pt(ipap)]Cl在426 nm处有最强荧光发射峰,是蓝光发射。(btp)Pt(mpmt)Cl在381 nm处有最强荧光发射峰,是紫光发射。由于(btp)Pt(mpmt)Cl与二价铂原子中心仅形成了一个双齿配位结构,共轭程度显著降低,并且[(btp)Pt(ipap)]Cl的辅助配体共轭结构更大,结果导致(btp)Pt(mpmt)Cl的最大发射波长比前者蓝移了45 nm,罕见地进入了紫光发射区。同时也表明通过改变辅助配体,可以较显著

地调节配合物的发射波长。

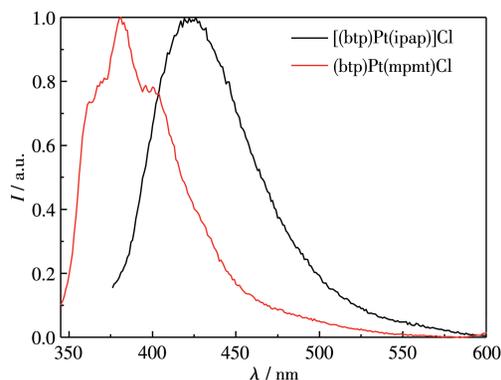


图5 配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的发射光谱

Fig.5 Emission spectra of complexes [(btp)Pt(ipap)]Cl and (btp)Pt(mpmt)Cl

表2 配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的光物理性质

Table 2 Photophysical properties of complexes [(btp)Pt(ipap)]Cl and (btp)Pt(mpmt)Cl

Complex	Absorption λ / nm	Emission λ_{max} / nm	CIE (x, y)	Purity / %	Φ_{em} / %
[(btp)Pt(ipap)]Cl	262, 288, 336	426	(0.28, 0.23)	32.7	63.8
(btp)Pt(mpmt)Cl	266, 320, 434	381	(0.21, 0.10)	72.4	58.0

2.3 电化学性质

使用电化学工作站,测得的CV曲线如图6所示。通过循环伏安法测得配合物的初始氧化电位,计算得出配合物的HOMO能级^[29]。利用紫外分光光度计测得的紫外带边吸收,计算出配合物的能级间

隙 E_g ,进而计算得到配合物的LUMO能级,所得数据如表3所示。[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的HOMO/LUMO轨道能级分别为-4.69 eV/-2.55 eV与-4.80 eV/-2.21 eV。

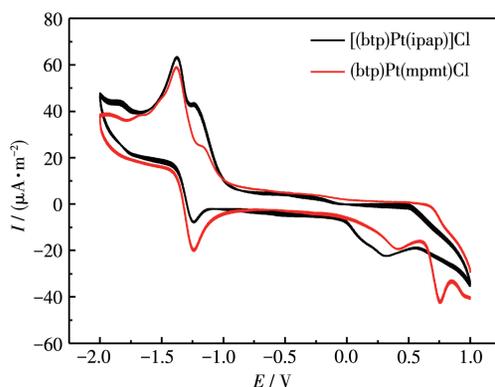


图6 配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的CV图

Fig.6 Cyclic voltammogram of complexes [(btp)Pt(ipap)]Cl and (btp)Pt(mpmt)Cl

表3 配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl与(btp)Pt(mpmt)Cl的电化学性质

Table 3 Electrochemical properties of complexes [(btp)Pt(ipap)]Cl and (btp)Pt(mpmt)Cl

Complex	λ_{onset} / nm	E_{ox} / eV	E_{HOMO} / eV	E_g / eV	E_{LUMO} / eV
[(btp)Pt(ipap)]Cl	578	0.31	-4.69	2.14	-2.55
(btp)Pt(mpmt)Cl	479	0.42	-4.80	2.59	-2.21

3 结论

以2-(2-吡啶基)苯并噻吩(btp)为主配体,分别用3-甲基-6-苯基咪唑[2,1-*b*]噻唑(mpmt)和邻二氮菲[1,10]并咪唑联苯酚(ipap)作为辅助配体,与二价铂配位合成得到了2种新型的铂配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl和(btp)Pt(mpmt)Cl,并进行了结构表征和理化性质研究。

结果表明,配合物[(btp)Pt(ipap)]Cl的最大发射波长位于426 nm处,处在深蓝光区,内量子效率为63.8%。而配合物(btp)Pt(mpmt)Cl由于共轭程度进一步降低,相较于前者最大发射波长蓝移至了381 nm处,罕见地处于紫光区,内量子效率为58.0%。

参考文献:

- [1] Zhang J, Wang L, Zhong A G, Huang G B, Wu F S, Li D, Teng M Y, Wang J L, Han D M. *Dyes Pigm.*, **2019**,**162**:590-598
- [2] Lu J J, Liang X, Luo X F, Wu Z G, Zheng Y X. *New J. Chem.*, **2020**,**44**:530-536
- [3] Yin X Y, Yang Z Y, Huang G L, Bian J J, Wang D Q, Wang Q, Teng M Y, Wang Z L, Zhang J. *New J. Chem.*, **2019**,**43**:5849-5856
- [4] Ma X F, Luo X F, Yan Z P, Wu Z G, Zhao Y, Zheng Y X, Zuo J L. *Organometallics*, **2019**,**38**(19):3553-3559
- [5] Zhang L, Yan Z P, Tu Z L, Wu Z G, Zheng Y X. *J. Mater. Chem. C*, **2019**,**7**:11606-11611
- [6] Su N, Shen C Z, Zheng Y X. *J. Organomet. Chem.*, **2019**,**896**:188-193
- [7] Yan Z P, Liao K, Han H B, Su J, Zheng Y X, Zuo J L. *Chem. Commun.*, **2019**,**7**:8215-8218
- [8] Li T Y, Wu J, Wu G Z, Zheng Y X, Zuo J L, Pan Y. *Coord. Chem. Rev.*, **2018**,**374**:55-91
- [9] Li X M, Zhang J, Huang G L, Wang Y F, Rong M Z, Teng M Y, Liu J. *Dyes Pigm.*, **2017**,**141**:1-4
- [10] 张松, 薛丽莎, 吴晨, 郑佑轩, 左景林. *无机化学学报*, **2014**,**30**(1):134-141
ZHANG S, XUE L S, WU C, ZHENG Y X, ZUO J L. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2014**,**30**(1):134-141
- [11] Hamze R, Peltier J L, Sylvinson D, Jung M, Cardenas J, Haiges R, Soleilhavoup M, Jazzar R, Djurovich P I, Bertrand G, Thompson M E. *Science*, **2019**,**363**(6427):601-606
- [12] Li X Y, Zhang J Y, Zhao Z F, Yu X, Li P C, Yao Y H, Liu Z W, Jin Q H, Bian Z Q, Lu Z H, Huang C H. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**,**11**(3):3262-3270
- [13] Lin L, Chen D H, Yu R M, Chen X L, Zhu W J, Liang D, Chang J F, Zhang Q, Lu C Z. *J. Mater. Chem. C*, **2017**,**5**:4495-4504
- [14] Wu F S, Tong H B, Wang K, Zhang X L, Zhang J, Wong W K, Zhu X J. *J. Coord. Chem.*, **2016**(6):69:926-933
- [15] Wu F S, Tong H B, Wang K, Zhang J, Xu Z B, Zhu X J. *Inorg. Chem. Commun.*, **2015**, **58**:113-116
- [16] Gu G, Shen Z L, Burrows P E, Forrest S R. *Adv. Mater.*, **1997**,**9**(9):725-728
- [17] Zhou L, Kwong C L, Kwok C C, Cheng G, Zhang H J, Che C M. *Chem. Asian J.*, **2014**,**9**(10):2984-2994
- [18] Che C M, Kwok C C, Lai S W, Rausch A F, Finkenzeller W J, Zhu N Y, Yersin H. *Chem. Eur. J.*, **2010**,**16**(1):233-247
- [19] Xiang H F, Chan S C, Wu K K Y, Che C M, Lai P T. *Chem. Commun.*, **2005**,**11**(11):1408-1410
- [20] Che C M, Chan S C, Xiang H F, Chan M C W, Liu Y, Wang Y. *Chem. Commun.*, **2004**,**10**(13):1484-1485
- [21] Zhang J, Zhu X J, Zhong A G, Jia W P, Wu F S, Li D, Tong H B, Wu C L, Tang W Y, Zhang P, Wang L, Han D M. *Org. Electron.*, **2017**,**42**:153-162
- [22] Zhang J, Dai G L, Wu F S, Li D, Gao D C, Jin H W, Chen S, Zhu X J, Huang C X, Han D M. *J. Photochem. Photobiol. A*, **2016**,**316**:12-18
- [23] Zhang J, Zhao F C, Zhu X J, Wong W K, Ma D G, Wong W Y. *J. Mater. Chem.*, **2012**,**22**:16448-16457
- [24] Sheldrick G M. *SHELXS-97, Program for the Solution of Crystal Structures*, University of Göttingen, Germany, **1997**.
- [25] Zhang J, Xu L L, Wong W Y. *Coord. Chem. Rev.*, **2018**,**355**:180-198
- [26] King K A, Spellane P J, Watts R J. *J. Am. Chem. Soc.*, **1985**,**107**(5):1431-1432
- [27] 潘森, 李思华, 程茂玲, 胡媛媛, 时鹏, 徐靖宇, 童碧海, 冯敏强, 张千峰. *无机化学学报*, **2018**,**34**(4):627-632
PAN M, LI S H, CHENG M L, HU Y Y, SHI P, XU J Y, TONG B H, FENG M Q, ZHANG Q F. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2018**,**34**(4):627-632
- [28] Wong W Y, Ho C L, Gao Z Q, Mi B X, Chen C H, Cheah K W, Lin Z Y. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2006**,**45**(46):7800-7803
- [29] Ashraf R S, Shahid M, Klemm E, Al-Ibrahim M, Sensfuss S. *Macromol. Rapid Commun.*, **2006**,**27**(17):1454-1459