[Article]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201411212

www.whxb.pku.edu.cn

一种吡嗪铱(III)配合物的晶体结构及光物理性质

韦传东¹ 葛国平^{1,*} 李春艳¹ 雷克微¹ 梁洪泽¹ 禹 钢² 刘志伟^{2,*}⁽¹⁾宁波大学材料科学与化学工程学院, 宁波市新型功能材料及其制备科学实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 浙江 宁波 315211; ⁽²⁾北京大学化学与分子工程学院, 稀土材料化学与应用国家重点实验室, 北京 100871

摘要: 合成了一种铱配合物二(4,4'-二氟-5-甲基-2,3-二苯基吡嗪)(乙酰丙酮)合铱[(MDPPF)₂Ir(acac)]的有机电致发光器件(OLED), 利用X射线单晶衍射仪测定了该化合物的晶体结构. 利用紫外-可见吸收光谱、发射光谱对其光物理性质进行研究. 结果表明: (MDPPF)₂Ir(acac)的单晶结构属于三斜晶系, $P\bar{1}$ 空间群, 晶胞参数 $a=1.13984(3)$ nm, $b=1.26718(3)$ nm, $c=1.29541(3)$ nm, $\alpha=93.7181(19)^\circ$, $\beta=101.638(2)^\circ$, $\gamma=110.853(3)^\circ$, $V=1.69336(7)$ nm³; (MDPPF)₂Ir(acac)在二氯甲烷溶液中的发射峰为 555 nm. 以(MDPPF)₂Ir(acac)为客体材料, 制备了结构为 ITO/NPB(40 nm)/CBP: (MDPPF)₂Ir(acac) (20 nm)/TPBi(10 nm)/Alq₃ (30 nm)/LiF(1 nm)/Al (100 nm)的一系列不同掺杂浓度器件, 器件的发射峰位于 558 nm, 最大亮度达到 32700 cd·m⁻², 最大电流效率 44.3 cd·A⁻¹, 最大功率效率 20.7 lm·W⁻¹.

关键词: 铱(III)配合物; 吡嗪; 磷光材料; 有机电致发光器件

中图分类号: O641

Crystal Structure and Photophysical Properties of an Iridium(III) Pyrazine Complex

WEI Chuan-Dong¹ GE Guo-Ping^{1,*} LI Chun-Yan¹ LEI Ke-Wei¹
LIANG Hong-Ze¹ YU Gang² LIU Zhi-Wei^{2,*}

⁽¹⁾State Key Laboratory Base of Novel Functional Materials and Preparation Science, Faculty of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang Province, P. R. China; ⁽²⁾State Key Laboratory of Rare Earth Materials Chemistry and Applications, College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China

Abstract: An iridium(III) complex of (MDPPF)₂Ir(acac) (MDPPF=4,4'-difluoro-5-methyl-2,3-diphenylpyrazine, acac=acetylacetone) has been prepared and characterized by X-ray single crystal diffraction. The photophysical properties of (MDPPF)₂Ir(acac) were investigated using UV-Vis spectroscopy and photoluminescence (PL) techniques. X-ray diffraction (XRD) studies revealed that the complex belongs to a triclinic system of the $P\bar{1}$ space group with cell dimensions $a=1.13984(3)$ nm, $b=1.26718(3)$ nm, $c=1.29541(3)$ nm, $\alpha=93.7181(19)^\circ$, $\beta=101.638(2)^\circ$, $\gamma=110.853(3)^\circ$ and $V=1.69336(7)$ nm³. A solution of the (MDPPF)₂Ir(acac) complex in dichloromethane was found to emit yellow light with a maximum peak at 555 nm at room temperature. Furthermore, (MDPPF)₂Ir(acac) was used as a phosphorescence dopant in organic light-emitting diodes (OLEDs) with the structures of ITO/NPB (40 nm)/CBP:(MDPPF)₂Ir(acac) (20 nm)/TPBi (10 nm)/Alq₃ (30 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm). These devices showed yellow emission at 558 nm, a maximum brightness of 32700 cd·m⁻², current efficiency of 44.7 cd·A⁻¹ and power efficiency of 20.7 lm·W⁻¹.

Received: October 23, 2014; Revised: November 21, 2014; Published on Web: November 21, 2014.

*Corresponding authors. GE Guo-Ping, Email: geguoping@nbu.edu.cn; Tel: +86-574-87608784. LIU Zhi-Wei, Email: zwliu@pku.edu.cn; Tel: +86-10-62757156.

The project was supported by the Ningbo Municipal Natural Science Foundation, China (2010A610164, 2010A610187), Ningbo Social Development Project, China (2012C5002), and K. C. Wong Magna Fund of Ningbo University, China.

宁波市自然科学基金(2010A610164, 2010A610187), 宁波市重大择优委托项目(2012C5002)和宁波大学王宽城基金资助

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

Key Words: Iridium(III) complex; Pyrazine; Phosphorescent material; Organic light-emitting diode

1 引言

自从Forrest等¹报道了第一个高效的电致磷光材料八乙基卟啉铂(PtOEP)以来,研究和开发新型的电致磷光材料引起人们极大兴趣.有机电致磷光材料常用的重金属原子多为第VIII族的金属,如铱(Ir)、²⁻⁵铂(Pt)、⁶⁻⁹铱(Ir)¹⁰⁻¹⁶等,由于它们强烈的自旋轨道耦合,使得其配合物的单线态激子和三线态激子混杂,三线态具有某些单线态特征,三线态激子的对称性被破坏,缩短了磷光寿命,减少了磷光猝灭,增强了单线态到三线态之间的系间窜跃和磷光效率.其中金属铱配合物具有相对较短的三线态寿命和更高的发光效率,能在室温下发出较强的磷光,是研究得最多的一种磷光材料.¹⁴铱配合物的激发态包括金属与配体之间的能量传递(MLCT)态,配体与配体之间的能量传递(LLCT)态和配体内部的能量传递(ILCT)态等,¹⁷⁻¹⁹使得重金属铱配合物的发射波长、强度以及电化学性能会随着配体结构的改变而发生明显的变化.²⁰通过选择合适的配体(包括C^N型环金属配体和辅助配体),金属铱配合物已实现可见光全波段范围的发光.^{14,21}

吡嗪铱(III)配合物是一类优良的电致磷光材料,在有机电致磷光器件中有优异表现.2003年Cheng等²²报道了基于吡嗪铱配合物Ir(DBQ)₂(acac)和Ir(MDQ)₂(acac)的电致发光器件,外量子效率分别达到11.9%和12.4%.Bian等²³制备的以铱配合物Ir(DPQ)₂(CBDK)为发光层的无掺杂器件的最大外量子效率为6.2%,最大流明效率为3.49 lm·W⁻¹.Ge等²⁴报道的吡嗪铱配合物(MPPZ)₂Ir(acac),其最大外量子效率为13.2%,最大电流效率为37.3 cd·A⁻¹,最大流明效率为20.3 lm·W⁻¹.张国林等^{25,26}报道了一系列吡嗪铱配合物,基于(DPP)₂Ir(acac)和(DPQ)₂Ir(acac)的电致发光器件的外量子效率分别达到13.85%和5.14%;基于(MDPP)₂Ir(acac)^{27,28}的器件的外量子效率为6.02%,流明效率为9.89 lm·W⁻¹,亮度为78924 cd·m⁻².但总的来说,目前文献上报道的吡嗪铱配合物磷光材料还不多.

据文献^{29,30}报道,在分子内引入C—F键能够减小非辐射失活的速率,改变分子堆积,减少自淬灭几率,从而显著增加了分子的发光量子效率.在本文中,通过在(MDPP)₂Ir(acac)的主配体上引入F,得到一种吡嗪铱(III)配合物(MDPPF)₂Ir(acac),报道了

其晶体结构及电致发光性能.

2 实验部分

2.1 仪器

晶体结构采用 Rigaku Mercury 70 CCD 型 X 射线衍射(XRD)仪测试.紫外-可见(UV-Vis)吸收光谱采用 Shimadzu UV-2550 型紫外-可见光谱仪测定,样品浓度为1×10⁻⁵ mol·L⁻¹.光致发光(PL)光谱由 Hitachi F-4600 荧光光谱仪测定.电致发光(EL)器件的电致发光光谱采用 Ocean Optics 2000 光谱仪测量.电流-电压-亮度曲线由 R6145(Advantest)电压计、multimeter 2000(Keithley)电流计和 LS-110(Minolta)亮度计测定.

2.2 配合物(MDPPF)₂Ir(acac)的晶体结构测定

按文献³¹方法合成配合物(MDPPF)₂Ir(acac).以二氯甲烷-乙醇为溶剂,配制适量(MDPPF)₂Ir(acac)配合物的饱和溶液,在室温下缓慢挥发,约四周析出桔黄色单柱形晶体,选择尺寸为0.41 mm×0.23 mm×0.12 mm 大小的晶体用于结构测定.在293(2) K 温度下,在 Rigaku Mercury 70 CCD X 射线单晶衍射仪上收集衍射数据,共收集独立衍射点6921个.用 SHELXS-97 程序完成结构解析,用 SHELXL-97 程序完成结构精修.对于所有非氢原子采用各向异性和全矩阵最小二乘法进行修正.

3 结果与讨论

3.1 晶体结构的描述

单晶结构测定的结果表明,配合物晶体属于三斜晶系,*P* $\bar{1}$ 空间群,*R*=0.0239,*wR*=0.0599.配合物主要的晶体学数据见表1,主要键长、键角见表2,晶体结构见图1.

从表2可以看出,所有键长和键角都在正常值范围之内,其中,Ir—C键长分别为1.985(3)、1.989(3) nm;Ir—N键长分别为2.017(2) nm、2.024(2) nm,略长于Ir—C键.O—I—O键角为87.85(8)°;C—I—O键角为175.05(10)°;N—I—C键角为121.5(3)°;N—I—O键角分别为95.17(9)°、84.87(9)°,其键角的变化范围较大,此外,从椭球图可知,分子具有中心对称性,另一个重要特征是环金属配体上的吡嗪环和两个苯环平面的二面角分别为13.78°、44.4°.

从图1的晶体结构图中可以看出,铱原子与其

表1 (MDPPF)₂Ir(acac)的晶体学数据
Table 1 Crystal data of (MDPPF)₂Ir(acac)

Item	Value	Item	Value
complex	(MDPPF) ₂ Ir(acac)	<i>F</i> (000)	842.0
empirical formula	C ₃₉ H ₂₉ F ₄ IrN ₄ O ₂	μ/mm^{-1}	4.006
formula weight	853.88	<i>T</i> /K	293(2)
crystal color	orange	scan mode	multi-scan
crystal size/mm ³	0.41×0.23×0.12	diffraction angle range/(°)	2.77–26.37
crystal system	triclinic	reflections collected	28168
space group	$P\bar{1}$	independent reflections	6921
(<i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i>)/nm	1.13984(3), 1.26718(3), 1.29541(3)	observable diffraction point	6451
(<i>α</i> , <i>β</i> , <i>γ</i>)/(°)	93.7181(19), 101.638(2), 110.853(3)	<i>R</i> , <i>wR</i>	0.0239, 0.0599
<i>V</i> /nm ³	1.69336(7)	parameter (<i>S</i>)	1.093
<i>Z</i>	2	<i>D</i> _{calc} /(g·cm ⁻³)	1.675

表2 配合物(MDPPF)₂Ir(acac)的主要的键长(*l*)和键角(*θ*)
Table 2 Selected bond lengths (*l*) and bond angles (*θ*) of the complex (MDPPF)₂Ir(acac)

Bond	<i>l</i> /nm	Bond	<i>θ</i> /(°)
Ir1—O1	2.159(2)	O1—Ir1—O2	87.85(8)
Ir1—O2	2.145(2)	N1—Ir1—O1	95.17(9)
Ir1—N1	2.017(2)	N1—Ir1—O2	84.87(9)
Ir1—N3	2.024(2)	C17—Ir1—O1	175.05(10)
Ir1—C17	1.985(3)	C17—Ir1—N3	98.74(11)
Ir1—C34	1.989(3)	C17—Ir1—C34	88.59(12)
F1—C8	1.366(4)	N2—C2—C1	120.1(3)
F2—C15	1.359(4)	N2—C2—C3	117.5(3)
F3—C35	1.370(3)	N2—C4—C11	121.5(3)

相邻的原子构成一个不规则的八面体。

3.2 光谱分析

配体(MDPPF)和配合物(MDPPF)₂Ir(acac)的紫

外-可见吸收光谱如图2所示。在配体的紫外-可见吸收光谱中, 226, 272 和 312 nm 处有 3 个吸收峰, 可归属为配体分子中($\pi-\pi^*$)和($n-\pi^*$)跃迁的吸收。在配合物的吸收曲线上, 在 227, 276 和 332 nm 处出现 3 个吸收峰, 可归属为自旋允许的¹LC 跃迁的吸收。此外, 在 379 和 486 nm 处还有两个吸收峰, 可以分别归属于配合物的¹MLCT (金属到配体的电荷跃迁) 和³MLCT 的吸收峰。

在 25 °C 下, 二氯甲烷溶液中(MDPPF)₂Ir(acac)的光致发光光谱如图 2 所示, 可以看出, 配合物(MDPPF)₂Ir(acac)的发射峰波长在 555 nm。从特征的吸收峰和无特征的发射峰以及较小的斯托克位移(67 nm)可以推断出, 555 nm 处的发光主要来自金属配合物³MLCT 的磷光发射。¹⁵ 与(MDPP)₂Ir(acac)²³

图1 (MDPPF)₂Ir(acac)的晶体结构图
Fig.1 Crystal structure of (MDPPF)₂Ir(acac)

图2 MDPPF的紫外-可见吸收(abs)光谱和在 CH_2Cl_2 溶液中 $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ 的紫外-可见吸收和发射(em)光谱
Fig.2 UV-Vis absorption (abs) spectrum of MDPPF and UV-Vis absorption spectra and emission (em) spectra of $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ in CH_2Cl_2 solution

相比,其发射波长蓝移了27 nm,原因是由于在苯环中引入强吸电子的氟原子,会降低配合物的HOMO能级,使得配合物的HOMO与LUMO能隙变大,使发光峰蓝移。

3.3 电致发光性能分析

为了表征 $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ 的电致发光特性,以 $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ 为客体材料制备了结构为ITO/NPB(40 nm)/CBP: $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ (5%/7%/10%/15%, 20 nm)/TPBi(10 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)的器件(如图3所示)。器件中NPB作为空穴传输材料,CBP作为主体材料,TPBi作为空穴阻挡材料和电子传输材料,Alq₃作为电子传输材料。

配合物 $(\text{MDPPF})_2\text{Ir}(\text{acac})$ 在不同电压驱动下器件的电致发光光谱如图4所示。器件的电致发光峰均位于558 nm,我们没有观察到空穴传输层NPB或者电子传输层Alq₃的发射,表明TPBi起到了空穴阻挡和电子传输的作用,空穴和电子能够同时有效地注入到发光层中。另外,我们也没有观察到CBP的特征发射峰,这说明主客体之间能够进行完全的能量转移,进而产生较强的磷光发射。电致发光峰的位置在8–14 V的电压范围内基本不随驱动电压的变化而变化,色坐标(CIE)基本稳定在(0.47, 0.52),属黄光区域,表明器件发光性能比较稳定。电致发光光谱与磷光材料的光致发光光谱基本一致,但是EL相对于PL,右侧肩峰突起,这个可能是三重态的配体为中心的跃迁(³LC)的发射增强所致。文献中曾报道过类似现象,原因可能是在电场作用下配合物和主体材料的相互作用引起的,²²另外,分子间发光也可能导致长波部分的发射增强。³²图5为电压为8 V

图3 器件结构及所用材料的分子结构
Fig.3 Device configurations and molecular structures of the materials
ITO: indium-tin oxide

图4 掺杂7% (w)的器件在不同电压下的电致发光光谱及色坐标
Fig.4 EL spectra of device and CIE coordinates at dopant concentration of 7% (w) at different voltages
CIE: International Commission on Illumination

图5 不同掺杂浓度(w)在8 V时的电致发光光谱
Fig.5 EL spectra of device under 8 V at different dopant concentrations (w)

时不同掺杂浓度的器件的EL光谱,不同掺杂浓度下的EL光谱基本相同,说明长波部分的发射增强不是来自于分子间发光.

表3是不同掺杂浓度的器件性能参数,图6是器件的电压-电流密度-亮度(V - J - L)特性曲线.从表3和图6可以看出,当电压达到4.0 V左右时,器件有明显的黄光发射,电流密度和亮度随电压的增大而增大,当驱动电压达到14.5 V时,掺杂浓度为10%

表3 不同掺杂浓度(w)的器件性能参数
Table 3 Device performance based on different dopant concentrations (w)

w	V_{on}/V	L_{max} ($cd \cdot m^{-2}$)	CE_{max} ($cd \cdot A^{-1}$)	PE_{max} ($lm \cdot W^{-1}$)	CE^a ($cd \cdot A^{-1}$)	CE^b ($cd \cdot A^{-1}$)	CIE coordinate
15%	3.9	28120	32.2	14.0	32	24	(0.47, 0.52)
10%	3.8	32700	28.7	10.2	28	26	(0.47, 0.52)
7%	4.1	29830	44.3	20.7	44	31	(0.47, 0.52)
5%	4.0	31750	38.0	13.3	37	34	(0.47, 0.52)

V_{on} : turn-on voltage; L_{max} : maximum brightness; CE_{max} : maximum current efficiency; PE_{max} : maximum power efficiency; CE^a : current efficiency at 1000 $cd \cdot m^{-2}$; CE^b : current efficiency at 10000 $cd \cdot m^{-2}$

图6 不同掺杂浓度器件的电压-电流密度-亮度图
Fig.6 V - J - L curves of devices based on different dopant concentrations

图7 不同掺杂浓度器件的亮度-电流效率图
Fig.7 Luminance-current efficiency characteristics of devices based on different dopant concentrations

的器件的最大亮度可达32700 $cd \cdot m^{-2}$.

图7是不同掺杂浓度器件的亮度-电流效率曲线.可以看出高亮度下掺杂浓度低的器件具有更高的效率,这是因为低浓度发光中心降低了三重态-三重态湮灭发生的概率.而在7%掺杂浓度时,器件在最低亮度附近有最高电流效率44.3 $cd \cdot A^{-1}$,功率效率20.7 $lm \cdot W^{-1}$.

4 结 论

成功合成了一种新型蓝色磷光二嗪铱配合物(MDPPF)₂Ir(acac),并利用X射线单晶衍射仪测定了该化合物的晶体结构.(MDPPF)₂Ir(acac)的单晶结构属于三斜晶系, $P\bar{1}$ 空间群,在二氯甲烷溶液中呈黄光发射,发射峰为555 nm.制备了基于(MDPPF)₂Ir(acac)的器件,器件的发射峰位于551 nm,最大亮度达到32700 $cd \cdot m^{-2}$,最大电流效率为44.3 $cd \cdot A^{-1}$,最大功率效率为20.7 $lm \cdot W^{-1}$,色坐标保持在(0.47, 0.52).(MDPPF)₂Ir(acac)是一种性能优良的黄色磷光材料,可用于制备高效的黄色电致磷光器件,或与蓝光材料复合用于制备白光发光器件.

References

- (1) Baldo, M. A.; O'Brien, D. F.; You, Y.; Shoustikov, A.; Sibley, S.; Thompson, M. E.; Forrest, S. R. *Nature* **1998**, 395 (6698), 151. doi: 10.1038/25954
- (2) Chi, Y.; Chou, P. T. *Chem. Soc. Rev.* **2007**, 36 (9), 1421. doi: 10.1039/b608951h
- (3) Carlson, B.; Phelan, G. D.; Kaminsky, W.; Dalton, L.; Jiang, X. Z.; Liu, S.; Jen, A. Y. *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124 (47), 14162.
- (4) Cheng, Y. M.; Yeh, Y. S.; Ho, M. L.; Chou, P. T. *Inorg. Chem.* **2005**, 44 (13), 4594. doi: 10.1021/ic0505347
- (5) Wu, P. C.; Yu, J. K.; Song, Y. H.; Chi, Y.; Chou, P. T.; Peng, S.

- M.; Lee, G. H. *Organometallics* **2003**, 22 (24), 4938. doi: 10.1021/om034037e
- (6) Moussa, J.; Wong, K. M. C.; Chamoreau, L. M.; Amouri, H.; Yam, V. W. W. *Dalton. Trans.* **2007**, No. 32, 3526.
- (7) Kavitha, J.; Chang, S. Y.; Chi, Y.; Yu, J. K.; Hu, Y. H.; Chou, P. T.; Peng, S. M.; Lee, G. H.; Tao, Y. T.; Chien, C. H.; Carty, A. J. *Adv. Funct. Mater.* **2005**, 15 (2), 223.
- (8) Brooks, J.; Babayan, Y.; Lamansky, S.; Djurovich, P. I.; Tsyba, I.; Bau, R.; Thompson, M. E. *Inorg. Chem.* **2002**, 41 (12), 3055. doi: 10.1021/ic0255508
- (9) Graham, K. R.; Yang, Y. X.; Sommer, J. R.; Shelton, A. H.; Schanze, K. S.; Xue, J. G.; Reynolds, J. R. *Chem. Mater.* **2011**, 23 (24), 5305. doi: 10.1021/cm202242x
- (10) Wiegmann, B.; Jones, P. G.; Wagenblast, G.; Lennartz, C.; Münster, I.; Metz, S.; Kowalsky, W.; Johannes, H. H. *Organometallics* **2012**, 31 (15), 5223. doi: 10.1021/om300458f
- (11) Gong, X.; Ostrowski, J. C.; Bazan, G. C.; Moses, D.; Heeger, A. J.; Liu, M. S.; Jen, A. K. Y. *Adv. Mater.* **2003**, 15 (1), 45.
- (12) Chen, X.; Liao, J. L.; Liang, Y. M.; Ahmed, M. O.; Tseng, H. E.; Chen, S. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125 (3), 636. doi: 10.1021/ja0211151
- (13) Tsuboyama, A.; Iwawaki, H.; Furugori, M.; Mukaide, T.; Kamatani, J.; Igawa, S.; Moriyama, T.; Miura, T.; Takiguchi, T.; Okada, S.; Hoshino, M.; Ueno, K. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125 (42), 12971. doi: 10.1021/ja034732d
- (14) Lamansky, S.; Djurovich, P.; Murphy, D.; Feras, A. R.; Lee, H. E.; Adachi, C.; Burrows, P. E.; Forrest, S. R.; Mark, E. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123 (18), 4304. doi: 10.1021/ja003693s
- (15) Hwang, F. M.; Chen, H. Y.; Chen, P. S.; Liu, C. S.; Chi, Y.; Shu, C. F.; Wu, F. L.; Chou, P. T.; Peng, S. M.; Lee, G. H. *Inorg. Chem.* **2005**, 44 (5), 1344.
- (16) Su, Y. J.; Hung, H. L.; Li, C. L.; Chien, C. H.; Tao, Y. T.; Chou, P. T.; Datta, S.; Liu, R. S. *Adv. Mater.* **2003**, 15 (11), 884. doi: 10.1002/adma.200304630
- (17) King, K. A.; Watts, R. J. *J. Am. Chem. Soc.* **1987**, 109, 1589. doi: 10.1021/ja00239a060
- (18) Ayala, N. P.; Flynn, C. M., Jr.; Sacksteder, L.; Demas, J. N.; DeGraff, B. A. *J. Am. Chem. Soc.* **1990**, 112, 3837. doi: 10.1021/ja00166a018
- (19) Polson, M.; Fracasso, S.; Bertolasi, V.; Ravaglia, M.; Scandola, F. *Inorg. Chem.* **2004**, 43, 1950. doi: 10.1021/ic0351848
- (20) Guo, Y. H.; Mei, Q. B.; Yan, F.; Wang, L. X.; Weng, J. N.; Zhang, B.; Huang, W. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2012**, 28 (4), 739. [郭远辉, 梅群波, 颜芳, 王玲霞, 翁洁娜, 张彬, 黄维. 物理化学学报, **2012**, 28 (4), 739.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201112222
- (21) Holmes, R. J.; Forrest, S. R.; Tung, Y. J.; Kwong, R. C.; Brown, J. J.; Garon, S.; Thompson, M. E. *Appl. Phys. Lett.* **2003**, 82 (15), 2422. doi: 10.1063/1.1568146
- (22) Duan, J. P.; Sun, P. P.; Cheng, C. H. *Adv. Mater.* **2003**, 15 (3), 224. doi: 10.1002/adma.200390051
- (23) Liu, Z. W.; Min, G.; Bian, Z. Q.; Nie, D. B.; Gong, Z. L.; Li, Z. B.; Huang, C. H. *Adv. Funct. Mater.* **2006**, 16 (11), 1441.
- (24) Ge, G. P.; He, J.; Guo, H. Q.; Wang, F. Z.; Zou, D. C. *J. Organomet. Chem.* **2009**, 694 (19), 3050. doi: 10.1016/j.jorganchem.2009.05.037
- (25) Zhang, G. L.; Liu, Z. H.; Guo, H. Q.; Chuo, Y. T.; Zhen, C. G.; Zou, D. C. *Chem. J. Chin. Univ.* **2004**, 25 (3), 397. [张国林, 刘泽华, 郭海清, 啜玉涛, 甄常刮, 邹德春. 高等学校化学学报, **2004**, 25 (3), 397.]
- (26) Zhang, G. L.; Guo, H. Q.; Chuo, Y. T.; Zou, D. C. *Acta Chim. Sin.* **2005**, 63 (2), 143. [张国林, 郭海清, 啜玉涛, 邹德春. 化学学报, **2005**, 63 (2), 143.]
- (27) Zhang, G. L.; Liu, Z. H.; Guo, H. Q. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2003**, 19 (10), 889. [张国林, 刘泽华, 郭海清. 物理化学学报, **2003**, 19 (10), 889.] doi: 10.3866/PKU.WHXB20031001
- (28) Zhang, G. L.; Guo, H. Q.; Chuo, Y. T.; Zou, D. C. *Materials Letters* **2005**, 59 (24–25), 3002. doi: 10.1016/j.matlet.2005.05.004
- (29) Ho, C. L.; Wong, W. Y.; Wang, Q.; Ma, D. G.; Wang, L.; Lin, Z. Y. *Adv. Funct. Mater.* **2008**, 18 (6), 928.
- (30) Wang, Y.; Herron, N.; Grushin, V. V.; LeClouxand, D.; Petrov, V. *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 79 (4), 449. doi: 10.1063/1.1384903
- (31) Ge, G. P.; Zhang, G. L.; Guo, H. Q.; Chuo, Y. T.; Zou, D. C. *Inorg. Chim. Acta* **2009**, 362 (7), 2231. doi: 10.1016/j.ica.2008.10.001
- (32) Wang, J.; Zhang, F. J.; Xu, Z.; Wang, Y. S. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2012**, 28 (4), 949. [王建, 张福俊, 徐征, 王永生. 物理化学学报, **2012**, 28 (4), 949.]