

文章编号: 1000-7032(2024)11-1794-17

## 中性蓝光铱配合物及其 OLED 研究进展

吴少华<sup>1,2</sup>, 陆光照<sup>1\*</sup>, 钟祥永<sup>1</sup>, 谢启飞<sup>1</sup>, 于 胜<sup>1\*</sup>,  
祁彦宇<sup>2\*</sup>, 韩华博<sup>3\*</sup>, 周 亮<sup>4\*</sup>

(1. 深圳信息职业技术学院 信息技术研究所, 广东 深圳 518172;

2. 河北师范大学 化学与材料科学学院, 河北 石家庄 050024;

3. 商丘师范学院 化学化工学院, 河南 商丘 476000;

4. 中国科学院长春应用化学研究所 稀土资源利用国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 近年来, 有机发光二极管(OLED)的急速发展源于磷光材料的商业化应用。与荧光材料相比, 磷光材料的理论内量子效率提高了3倍。而铱原子的原子序数大、d轨道分裂大、性质稳定等优点使得铱(III)配合物成为最具潜力的 OLED 发光材料。相比于红光和绿光发光材料, 高效稳定的蓝光发光材料的开发仍然是制约 OLED 显示技术发展的难题。本文将蓝光铱配合物按其配位结构进行精细分类, 并对每种配位构型的蓝光铱配合物的发光性质和器件性能进行了全面分析, 期望为研究人员和行业专业人士后续开发具有高色纯度、高效率 and 长寿命的蓝光 OLED 提供有价值的参考和借鉴。

**关键词:** 电致发光; 有机发光二极管; 磷光; 蓝光; 铱(III)配合物

中图分类号: O482.31; TN383

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240167

## Research Progress of Neutral Blue Iridium Complexes in OLEDs

WU Shaohua<sup>1,2</sup>, LU Guangzhao<sup>1\*</sup>, ZHONG Xiangyong<sup>1</sup>, XIE Qifei<sup>1</sup>, YU Sheng<sup>1\*</sup>,  
QI Yanyu<sup>2\*</sup>, HAN Huabo<sup>3\*</sup>, ZHOU Liang<sup>4\*</sup>

(1. Institute of Information Technology, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China;

2. College of Chemistry and Materials Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China;

4. State Key Laboratory of Rare Earth Resource Utilization, Changchun Institute of Applied Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: lugz@szit.edu.cn; yus@szit.edu.cn; hbsdqy@hebtu.edu.cn;

1412272575@qq.com; zhoul@ciac.ac.cn

**Abstract:** In recent years, the rapid development of organic light-emitting diodes (OLEDs) stems from the commercial application of phosphorescent materials, which have a 3-fold increase in theoretical internal quantum efficiency compared to fluorescent materials. Iridium(III) complexes are the most promising OLED luminescent materials due to their large atomic number, large d orbital splitting and stable properties. Compared with red and green light-emitting materials, the development of efficient and stable blue light-emitting materials is still a problem restricting the development of OLED display technology. In this paper, the blue iridium complexes are classified

收稿日期: 2024-07-06; 修订日期: 2024-07-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(52203231); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110478); 深圳市高校稳定支撑计划项目(20220818172424009); 深圳市科技计划(JCYJ20220818095816036); 广东省高校研究平台与项目(2022KQNCX230); 河北省省级科技计划(B2022205014, 22567622H); 河北省教育厅科学研究项目(BJK2023014); 河北省博士后科研择优资助项目(B2023005008); 河北师范大学科技基金(L2022B12)

Supported by National Natural Science Foundation of China(52203231); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2021A1515110478); Shenzhen University Stability Support Program Project(20220818172424009); Shenzhen Science and Technology Program(JCYJ20220818095816036); Guangdong Province University Research Platform and Project(2022KQNCX230); S&T Program of Hebei(B2022205014, 22567622H); Science Research Project of Hebei Education Department(BJK2023014); Postdoctoral Research Projects Merit-based Funding Programs of Hebei Province(B2023005008); Science Foundation of Hebei Normal University(L2022B12)

according to their coordination structures, and the luminescence properties and device properties of each blue iridium complex are analyzed. As a result, this comprehensive analysis provides researchers and industry professionals with a valuable resource for the development of blue OLEDs with high color purity, high efficiency and long lifetime.

**Key words:** electroluminescence; organic light-emitting diode; phosphorescence; blue emission; iridium complex

## 1 引言

有机电致发光(Organic electroluminescence)是在外加电场的作用下,空穴和电子分别从阳极、阴极注入,克服界面势垒传输至发光层,在发光层中复合产生激子,激子将能量传递给有机发光材料激发其发光的现象。由于有机电致发光器件的工作原理与传统的无机发光二极管相似,因此也被称为有机发光二极管(Organic light-emitting diode, OLED)。

由于具有自发光、超薄、低功耗、柔性等优异特征,OLED在平板显示、照明等方面有着巨大的优势,在信息时代占据举足轻重的地位。就有机电致发光器件而言,发光层中发光材料的性能至关重要。按照发光机制,发光材料主要分为普通荧光材料<sup>[1]</sup>、磷光金属配合物<sup>[2]</sup>和热活化延迟荧光材料<sup>[3]</sup>等。由于跃迁禁阻,在电激发下,75%的三线态激子在荧光材料中会以热能的形式散发掉,使其内量子效率不超过25%。但在重金属配合物中,重原子诱导产生的自旋轨道耦合(Spin-orbital coupling, SOC)效应使三线态激子可辐射跃迁产生磷光,其器件理论内量子效率能达到100%<sup>[4-6]</sup>。在磷光重金属配合物中,金属铱具有多方面优点,例如,原子序数较大,能产生很强的自旋轨道耦合效应,有利于磷光发射;铱金属离子中的d轨道分裂较大,避免与配合物的MLCT态相互作用而降低磷光发射效率;三价铱离子可与二齿、三齿、四齿配体形成稳定的中性分子,有利于蒸镀或溶液加工方式的器件制备;同时铱配合物具有相对短的激发态寿命,高发光效率,以及发光颜色易调节等特点<sup>[7-12]</sup>。因此,金属铱(Ⅲ)配合物具有广阔的

潜在应用前景,成为广大学者的研究重点。

随着研究的深入和科技的发展,红光和绿光铱配合物已成功实现商业化应用。遗憾的是,由于蓝光铱配合物的器件寿命达不到要求,目前商用的蓝光材料仍然是普通荧光材料,其内量子效率的极限值25%,严重制约了产品的品质。此外,人们对高品质生活日益增长的需求,也对产品高性能、高稳定性和低能耗等不断提出新挑战。因此,开发可商业应用的蓝光铱配合物迫在眉睫。

为了满足显示行业的要求,蓝光铱配合物在色纯度、高性能、长寿命和稳定性等方面需要进一步提升:(1)色彩要求:波长在450~490 nm内,半峰宽在20~40 nm之内,色坐标在(0.15, 0.06)左右;(2)效率要求:CE大于 $9 \text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ ,启动电压小于5 V;(3)寿命:LT<sub>95</sub>在1 000 h以上。此外,蓝光铱配合物还需要进一步满足环保安全、成本低、可制造性强、对环境变化具有相对良好的稳定性等。

目前,蓝光铱配合物的发展受限于其更高的发射能量需求所造成的不稳定性和低发光效率。实现蓝色磷光材料的最佳色纯度、发光效率和器件稳定性之间的平衡可助力 OLED 技术的再次腾飞,特别是深蓝光铱配合物发光材料。根据大量文献调研,近些年来中性蓝光铱(Ⅲ)配合物发光材料的结构分类有:[2+2+2]型、[3+2+1]型、[3+3]型、[4+2]型和[4+1+1]型等(图1)。本文以结构类型为切入点总结蓝光铱(Ⅲ)配合物的研究概况,阐明不同的结构及其相应的发光性质和器件性能之间的关系,希望能为蓝光铱配合物的设计和探究提供一定的理论基础,进而促进 OLED 技术的发展。

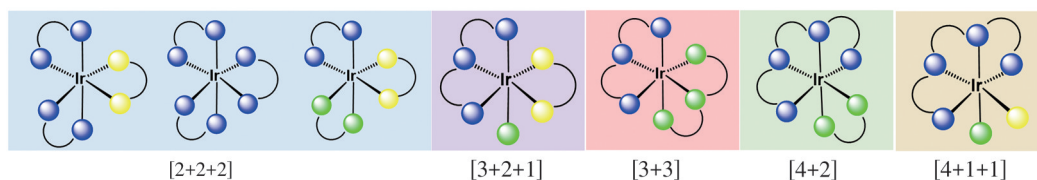


图1 中性蓝光铱配合物的分类

Fig. 1 Classification of neutral blue iridium complexes

## 2 [2+2+2]型蓝光铱(Ⅲ)配合物研究进展

[2+2+2]型铱配合物由三个双齿配体(也称为环金属配体)组成,因为其结构丰富、合成难度适中、性能易调节等优点成为研究的主流构型。根据配体结构差异,[2+2+2]型配合物可分为:部分异配型、均配型和三异配型三种结构。

部分异配型铱配合物由两种双齿配体构成。其中,两个相同的双齿配体作为发色基团,为主配体;其余一种双齿配体为辅助配体。均配铱配合物中只有一种双齿配体,即三个双齿配体结构完全相同。但是,根据双齿配体的相对方向,均配铱配合物会形成异构体:面式构型和经式构型(通常用*fac-mer*-或*f-m*-表示),且两种构型可通过热或光化学方式相互转化。通常而言,经式构型的发光效率比面式构型低。三异配铱配合物由三种结构不同的二齿配体构成,结构调整空间更大,进而可实现对配合物光物理性质的精细调节。遗憾的是,该结构的铱配合物在合成和提纯上有一定的难度。

### 2.1 部分异配 $\text{Ir}(\text{C}^*\text{N})_2(\text{LX})$ 蓝光铱(Ⅲ)配合物研究进展

$\text{Ir}(\text{C}^*\text{N})_2(\text{LX})$ 铱配合物的光物理性质(如发射波长、发射带形状和激发态寿命)主要取决于 $\text{C}^*\text{N}$ 配体。改变 $\text{C}^*\text{N}$ 配体的结构可调控配合物的发光颜色、色坐标以及发光效率。目前,三种广泛使用的策略为:(1)调整其芳香共轭程度;(2)在芳香环中引入杂原子;(3)在芳香环外周引入不同取代基。理论研究表明,这些结构修饰主要通过改变配合物的最高已占据分子轨道(HOMO)和最低未占据分子轨道(LUMO)能级、分子堆积方式、分子取向性等改变配合物的发光性能。

2-(2,4-二氟苯基)吡啶是蓝光铱配合物最经典的主配体,使得 $\text{FIrpic}(\text{Ir1})$ (图2)成为研究最多的蓝色磷光材料之一。通过合理的器件结构优化,基于 $\text{FIrpic}$ 的器件最大外量子效率( $\text{EQE}_{\text{max}}$ )可以达到34.1%<sup>[13-14]</sup>。但是, $\text{FIrpic}$ 的电致发光峰在474 nm和496 nm,为天蓝光发射。

为了进一步提高色纯度,将具有吸电子能力的氟原子( $-\text{F}$ )、氰基( $-\text{CN}$ )、三氟甲基( $-\text{CF}_3$ )、羰基( $-\text{C}=\text{O}$ )、磷氧基团( $-\text{P}=\text{O}$ )等引入到芳基部分降低HOMO能级;或将供电子基团:甲基( $-\text{CH}_3$ )、三甲基硅基( $-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ )等引入到吡啶

部分提高LUMO能级,从而增加带隙宽度,使材料发射光谱蓝移。2015年,Reddy等<sup>[15]</sup>通过在主配体中引入吸电子基团( $-\text{CHO}$ 、 $-\text{CF}_3$ 和 $-\text{CN}$ )和供电子基团( $-\text{OMe}$ 和 $-\text{NMe}_2$ ),以吡啶甲酸(pic)为辅助配体,合成了五例配合物( $\text{Ir2} \sim 6$ ),配合物的热分解温度( $T_d$ , 5%质量损失)为362~415℃。铱配合物基态和激发态特征分析结果表明,配合物拥有较小的 $\text{S}_1\text{-T}_1$ 能级差,且 $^3\text{MLCT}$ 跃迁比率较高,进而使得配合物拥有更高的量子产率、更好的色纯度。采用掺杂型器件,设计了多层磷光有机发光二极管(PHOLEDs)。其中, $\text{Ir5}$ 的掺杂量为5%时表现出最佳性能,最大亮度为33 180  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,色坐标为(0.15, 0.17)。

在改变配合物前线轨道能级、调整发射波长的基础上调控配合物堆积方式以及取向性对提升其发光性能也至关重要。2015年,Kim等<sup>[16]</sup>以全氟烷基苯基吡啶作为主配体,吡啶甲酸盐(pic)/4-甲基吡啶甲酸盐(mpica)/三氟甲基三氮唑(ftz)为辅助配体,报道了三种深蓝光铱配合物( $\text{HFP})_2\text{Ir}(\text{pic})$ 、( $\text{HFP})_2\text{Ir}(\text{mpica})$ 和( $\text{HFP})_2\text{Ir}(\text{ftz})$ ( $\text{Ir7} \sim 9$ ),配合物的 $T_d$ 为355~368℃。七氟烷基的引入调控了前线轨道能级,进而实现了配合物波谱的蓝移。密度泛函理论(DFT)计算结果证明,七氟烷基对HOMO能级的影响大于对LUMO能级的影响,导致能隙变大,发射蓝移;此外,在主配体全氟烷基的大位阻空间结构基础上,辅助配体中不同位阻基团的修饰进一步影响了配合物的堆积方式,进而实现对配合物发光性能的调控。其中,以( $\text{HFP})_2\text{Ir}(\text{mpica})$ 为掺杂剂的器件 $\text{EQE}_{\text{max}}$ 能达到21.4%,CIE为(0.14, 0.16)。2019年,Kang等<sup>[17]</sup>以2',6'-二氟-2',3-联吡啶为主配体骨架并在吡啶基的4位或5位引入大位阻基团三甲基硅基(TMS),同时以乙酰丙酮(acac)辅助配体,合成了两种蓝色磷光铱配合物 $\text{Ir10} \sim 11$ ,配合物的 $T_d$ 为324~334℃,激发态寿命为1.5~2.2  $\mu\text{s}$ 。这两种配合物通过氢键和 $\pi\text{-}\pi$ 堆积具有较强分子间相互作用。以 $\text{Ir10}$ 为掺杂剂的蓝光器件 $\text{EQE}_{\text{max}}$ 能达到30.9%,CIE坐标为(0.14, 0.24)。同年, Kim等<sup>[18]</sup>在二氟苯基吡啶的吡啶单元中引入一个三甲基硅基,在苯基单元中引入氮原子,合成了具有较好水平偶极取向的深蓝光铱配合物( $\text{dfpysipy})_2\text{Ir}(\text{pic})$ 、( $\text{dfpysipy})_2\text{Ir}(\text{mpica})$ 和( $\text{dfpysipy})_2\text{Ir}(\text{ftz})$ ( $\text{Ir12} \sim 14$ )。通过提高LUMO和降低HOMO能级来增加

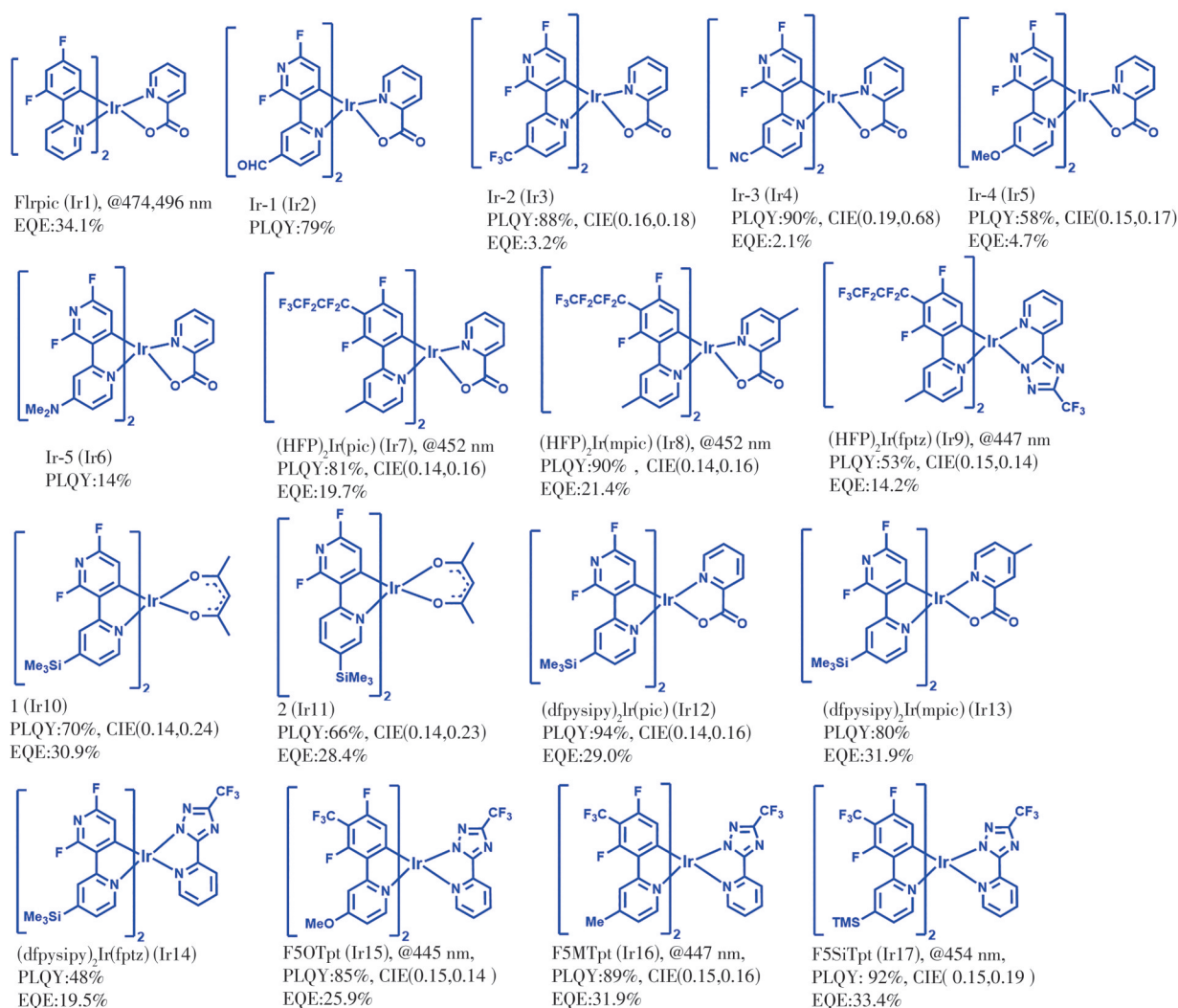


图 2 部分异配蓝光铱配合物

Fig. 2 Bis-cyclometalated blue iridium complexes

带隙,从而产生深蓝光发射。配合物(dfpsipy)<sub>2</sub>Ir-(mpic)具有最高的水平偶极取向率 86%,以其制备的蓝光 OLED 的 EQE<sub>max</sub> 达到 31.9%,在已报道的 CIE<sub>y</sub><0.2 的深蓝 OLED 中是最高的器件效率之一。2023 年,王悦等<sup>[19]</sup>在主配体苯环中引入吸电子三氟甲基、在吡啶环引入具有不同给电子能力的甲氧基(—OMe)、甲基(—Me)和三甲基硅基(—TMS)基团,合成了三种纯蓝光材料 F5OTpt、F5MTpt 和 F5SiTpt (Ir15~17),配合物的 *T<sub>d</sub>* 为 358~388 °C,激发态寿命为 1.2~2.1 μs。不同给电子基团实现了配合物发光颜色的精细调谐,而且有利于通过减少分子间聚集提高其 PLQYs,以 F5SiTpt 为掺杂剂制作的器件 EQE<sub>max</sub> 进一步提高至 33.4%,CIE 坐标为(0.15,0.19)。

对于大多数部分异配 Ir(C^N)<sub>2</sub>(LX)蓝光铱配合物而言,是以 2-(2,4-二氟苯基)吡啶和 2',6'-二氟

2',3-联吡啶为主流的骨架结构。为了进一步调控配合物的发射波长和器件性能,常见分子设计策略是在配体骨架中引入不同的基团,进而调控前线轨道能级、分子堆积方式及分子的取向性等。该设计策略通常可实现相关分子性能的提升。但是,如何更好地协同调控各种效应,实现色纯度和器件性能的同时提升,仍需进一步深入研究。

## 2.2 均配 Ir(C^N)<sub>3</sub>/Ir(C^C)<sub>3</sub>蓝光铱(Ⅲ)配合物研究进展

### 2.2.1 含芳基咪唑衍生物的均配 Ir(C^N)<sub>3</sub>蓝光铱配合物研究进展

苯基咪唑是均配蓝光铱配合物重要的配体母核之一。相对苯基吡啶,咪唑单元的引入可以提高配合物的 LUMO 能级,拓宽能带差,实现发射光谱蓝移。理论研究表明,芳基咪唑的 HOMO 和 LUMO 分别分布在芳环部分和五元杂环部分。在

芳基或者五元杂环部分引入相应的取代基来调节配合物的 HOMO/LUMO 能级、分子堆积形式等,进而获得高效率的纯蓝光发射。

以苯基咪唑为基础,在咪唑 N 原子上可引入大位阻基团,调控分子的热稳定性和发光性能。2013 年,Zhuang 等<sup>[20]</sup>引入二异丙基二苯并呋喃,合成了配合物 Ir(dbi)<sub>3</sub>(Ir18)(图 3)。虽然其发射峰的位置和 FIrpic 相似,为天蓝光发射,但配合物 Ir(dbi)<sub>3</sub>具有更高的热稳定性, $T_d$ 为 429 °C;且基于 Ir(dbi)<sub>3</sub>的单色器件实现了 23.1% 的器件外量子效

率。2014 年,Udagawa 等<sup>[21]</sup>引入 2,4,5-三甲基苯基团合成了 Ir(mpim)<sub>3</sub>(Ir19),配合物的  $T_d$ 为 412 °C,激发态寿命为 1.50 μs。基于该配合物制备了高效的天蓝光器件,器件 EQE<sub>max</sub>达到 29.6%。2015 年,Zhuang 等<sup>[22]</sup>又分别引入了二异丙基苯基和二甲基苯基,合成了两个天蓝光铱配合物 Ir20~21,配合物的  $T_d$ 分别为 363 °C 和 276 °C。实验结果证明,具有更大空间位阻的二异丙基苯基的引入对发光量子效率和热分解温度有更好的提升效果,且基于 Ir21 的器件实现了高电流效率 35.7 cd·A<sup>-1</sup>。

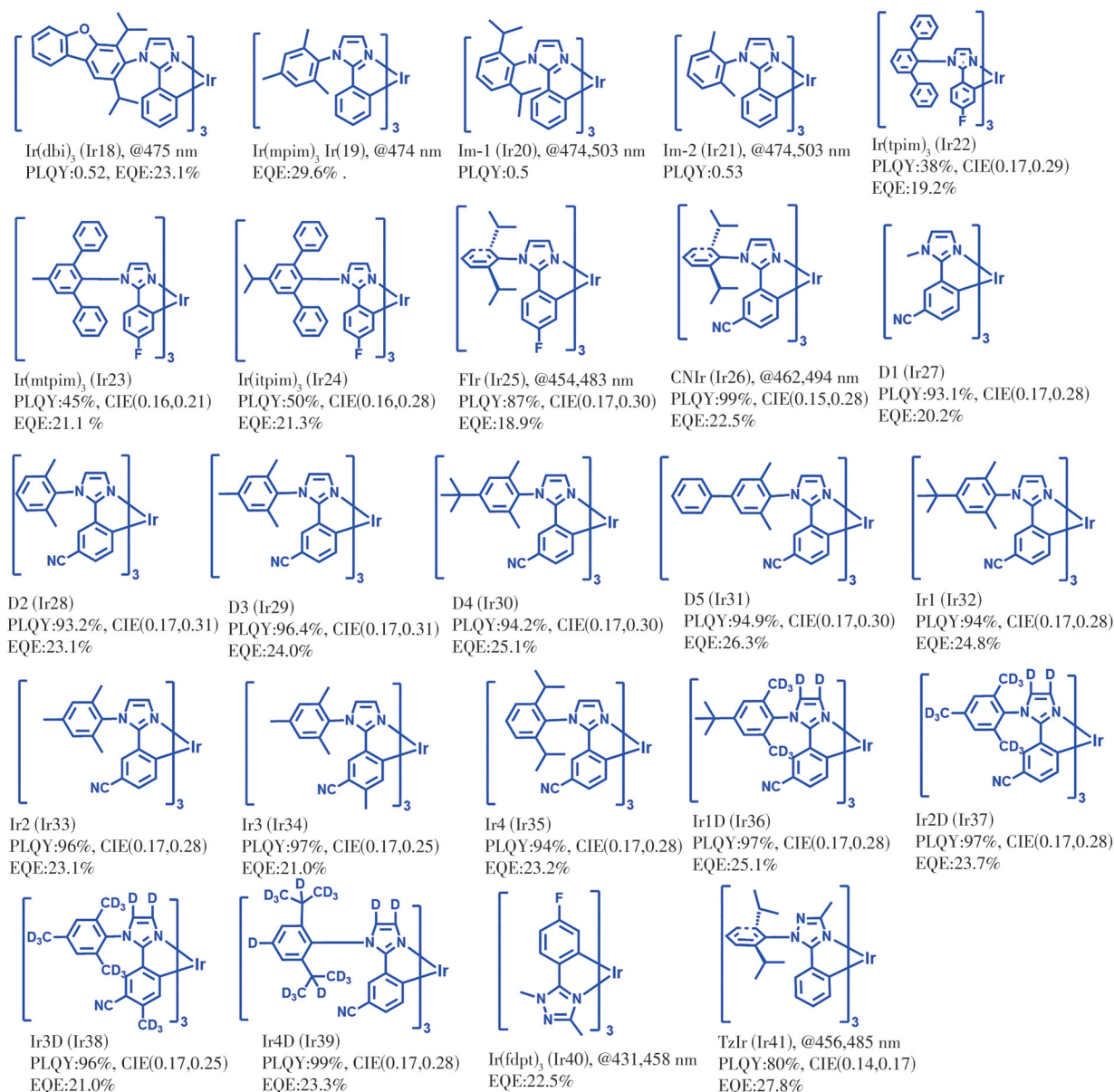


图 3 含芳基咪唑衍生物的均配蓝光铱配合物

Fig. 3 Homoleptic tris-cyclometalated blue iridium complexes containing arylimidazole derivatives

在苯基咪唑的苯环部分引入吸电子基团可以改变前线轨道能级,增大能级差,实现波谱蓝移。

2016 年,Kang 等<sup>[23]</sup>以 4-氟苯基咪唑(pim)为基础,在配体中引入间三联苯及其衍生物等取代基,合

成了铱配合物  $\text{Ir}(\text{tpim})_3$ 、 $\text{Ir}(\text{mtpim})_3$  和  $\text{Ir}(\text{itpim})_3$  (Ir22 ~ 24)。因为 pim 中氟的存在, 使得铱配合物的能级发生改变, 且能更好地与主体材料的能级相匹配, 进而提升器件效率。此外, 间三联苯修饰的配合物  $\text{Ir}(\text{tpim})_3$  在器件寿命方面表现优异, 在  $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  下, 器件寿命  $\text{LT}_{50}$  超过 300 h。结果表明, 无烷基取代的配体更有利于配合物的稳定性和器件寿命的提高; 而异丙基间三联苯修饰的配合物  $\text{Ir}(\text{itpim})_3$  在发光效率方面表现得更好, 其器件  $\text{EQE}_{\text{max}}$  能达到 21.3%。2018 年, Lee 等<sup>[24]</sup>在 pim 的基础上引入 2,6-二异丙基苯基, 合成了  $\text{FIr}(\text{Ir25})$ , 配合物的  $T_d$  为  $393\text{ }^\circ\text{C}$ , 激发态寿命为  $1.1\text{ }\mu\text{s}$ 。2,6-二异丙基苯基单元的引入有效地抑制了分子聚集, 防止三重态湮灭等自猝灭现象, 提升其发光效率 ( $\varphi_{\text{FIr}}$  为 87%)。2018 年, Lee 等<sup>[24]</sup>以 3-氰基苯基咪唑为基础, 引入 2,6-二异丙基苯基, 合成了  $\text{CNIr}(\text{Ir26})$ 。和 Ir25 相比, 氰基更强的吸电子能力对配合物的能级和发光性能的影响更强 ( $\varphi_{\text{FIr}}$  为 87%,  $\varphi_{\text{CNIr}}$  为 99%), 氰基的引入也更加提高了配合物的热稳定性,  $\text{CNIr}$  的  $T_d$  高达  $417\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外, 基于  $\text{CNIr}$  制备的器件  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 22.5%, CIE 坐标为 (0.15, 0.28); 且在  $200\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  下, 寿命  $\text{LT}_{50}$  大于 550 h。该结果表明, 相对于氟原子, 氰基的引入更容易提高配合物的热稳定性, 提升器件寿命。2020 年, Kim 等<sup>[25]</sup>分别引入甲基、二甲苯基、三甲苯基、叔丁二甲苯基、二甲基联苯等合成了 Ir27 ~ 31。发现引入联苯取代基的 Ir31 具有最高的水平偶极取向率 91%, 高的水平偶极取向能改变掺杂剂和主体基质之间的范德华和库仑相互作用, 减少掺杂剂聚集, 从而抑制三线态-三线态湮灭 (TTA), 提高器件寿命。基于 Ir31 制备的器件性能较好,  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 26.3%, 色坐标为 (0.17, 0.30); 在  $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  下, 寿命  $\text{LT}_{80}$  为 169 h, 也是 5 个配合物中最长的器件寿命。这种通过改变取代基来提高配合物的水平偶极取向率的策略可以用于设计新型高性能磷光材料。2021 年, Baik 等<sup>[26]</sup>通过将 C—H 氟化为 C—D, 利用同位素效应提高器件寿命, 报道了 8 种含苯基咪唑配体的铱配合物 (Ir32 ~ 35) 及其氟化类似物 (Ir36 ~ 39), 8 个配合物的  $T_d$  为  $415\sim 475\text{ }^\circ\text{C}$ , 激发态寿命为  $2.15\sim 2.69\text{ }\mu\text{s}$ 。与 Ir32 ~ 35 相比, 氟化后的 Ir36 ~ 39 保持了较高的器件效率, 器件寿命得到翻倍的提高。其中, 使用 Ir36 制备的器件, 其  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 25.1%, CIE 坐标为 (0.17,

0.28); 起始亮度为  $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 器件寿命  $\text{LT}_{70}$  为 355 h。结果表明, 氟掺入是一种有效的、非侵入性的修饰手段, 在不改变掺杂剂的化学成分和光物理性质的前提下可显著提高器件寿命。若将该策略与其他修饰策略结合使用, 可为高效率、高稳定性的蓝光 OLED 的制备提供一定的理论依据。

为了进一步提高配合物的色纯度, 可进一步增加配体的杂化程度, 将咪唑修饰为三氮唑。2018 年, 黄春辉院士课题组<sup>[27]</sup>以 4-氟苯基三氮唑为基础, 合成了蓝光配合物  $\text{Ir}(\text{fdpt})_3$  (Ir40), 配合物的  $T_d$  为  $356\text{ }^\circ\text{C}$ , 激发态寿命为  $1.35\text{ }\mu\text{s}$ 。三氮唑的引入进一步提高了  $T_1$  态能级, 材料发射蓝移, 发射主峰在 458 nm, 器件的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  达到了 22.5%。2021 年, Lee 等<sup>[28]</sup>在 1,2,4-三氮唑的 N5 和 C3 位置分别引入了 2,6-二异丙基苯基和一个甲基, 进而防止分子间聚集, 抑制磷光自猝灭, 合成了铱配合物  $\text{TzIr}(\text{Ir41})$ , 配合物的  $T_d$  为  $362\text{ }^\circ\text{C}$ , 激发态寿命为  $1.1\text{ }\mu\text{s}$ 。该材料在溶液和薄膜状态下都表现出纯蓝光发射。以  $\text{TzIr}$  为掺杂剂制作的 OLED 具有较低的启动电压 ( $<3.5\text{ V}$ )、较高的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  (27.8%), CIE 坐标为 (0.14, 0.17)。这些结果有力地表明, 1,2,4-三唑为母核的铱配合物可以作为蓝光 OLED 优异的潜在材料。

均配  $\text{Ir}(\text{C}^{\wedge}\text{N})_3$  蓝光铱配合物通常以芳基咪唑为基础, 引入不同的基团调控能级差以及分子空间堆积形式, 或者构建含不同杂原子的骨架结构调控分子电子传输性能, 进而实现对配合物光电性能的调节, 得到高效的器件性能。

### 2.2.2 含卡宾的均配 $\text{Ir}(\text{C}^{\wedge}\text{C})_3$ 蓝光铱配合物研究进展

氮杂环卡宾基团 (*N*-heterocyclic carbene, NHC) 是具有强  $\sigma$ -供电子能力的强场配体, 可以增强金属-卡宾配体 ( $\text{Ir}-\text{C}_{\text{carbene}}$ ) 的反键轨道强度, 提高 LUMO 轨道能级, 从而确保配合物具有宽的能带和高能发射。因此, NHC 是蓝光铱配合物中经典且具有高潜力的配体基团。

2005 年, Thompson 和 Forrest 等<sup>[29]</sup>以苯基-*N*-咪唑为基础, 报道了面式 (*fac*-) 和经式 (*mer*-) 异构体 *fac/mer*- $\text{Ir}(\text{pmi})_3$  (Ir42 ~ 43) (图 4), 配合物的发射都在近紫外区, 需要进一步调节发射波长得到蓝光发射。2023 年, Zysman-Colman 等<sup>[30]</sup>在之前报道的深蓝色配合物 *mer*- $\text{Ir}(\text{tfpmi})_3$  (Ir44) 结构基础上,

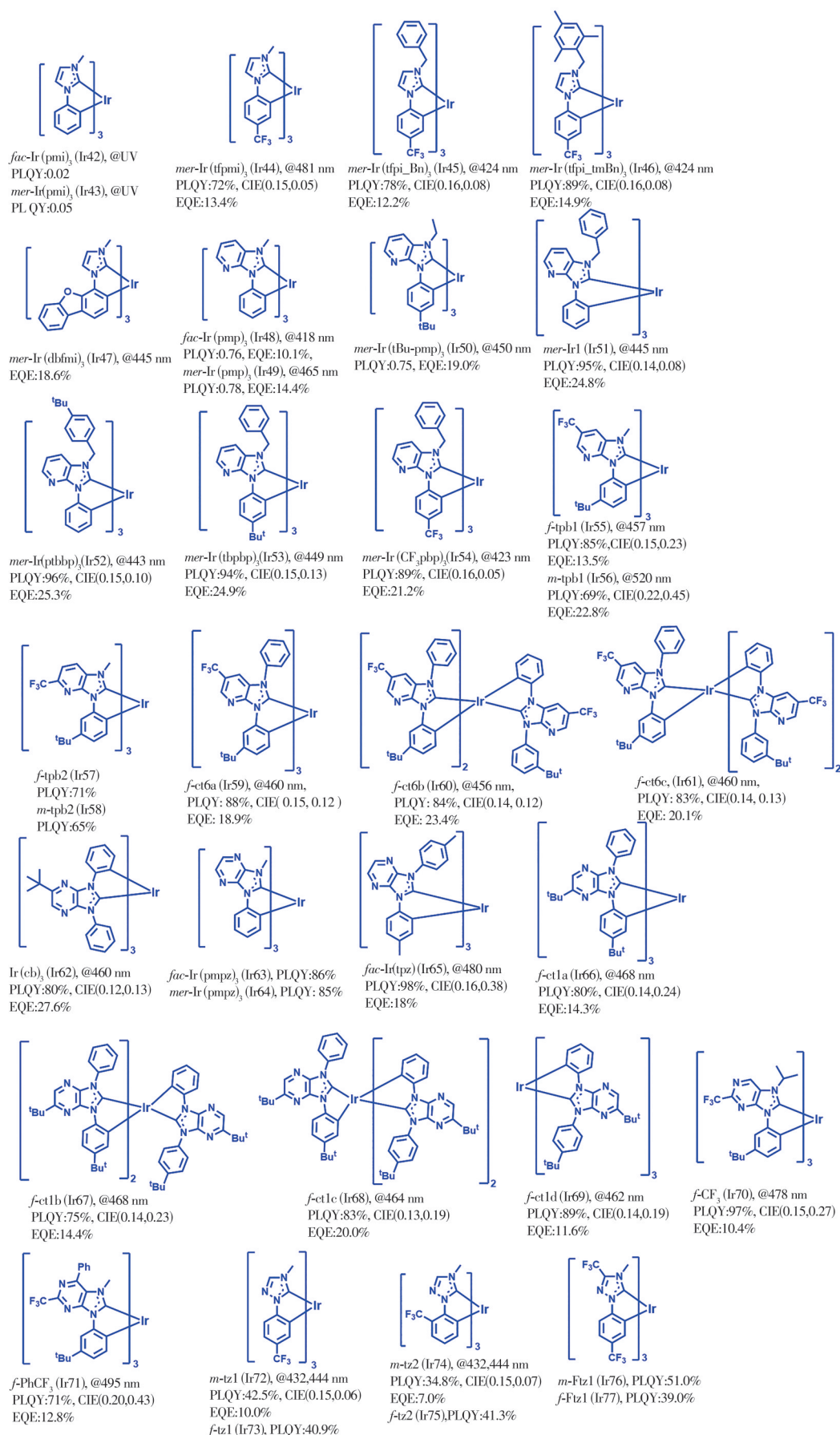


图 4 含卡宾的均配蓝光铱配合物

Fig. 4 Homoleptic tris-cyclometalated blue iridium complexes containing carbene

为提高 PLQY, 将体积较大苄基和三甲基苄基分别连接到卡宾配体的咪唑环上合成了  $mer\text{-Ir}(\text{tfpi\_Bn})_3$  和  $mer\text{-Ir}(\text{tfpi\_tmBn})_3$  (Ir45 ~ 46), 配合物的  $T_d$  都超过 380 °C, 激发态寿命为 2.75 ~ 2.85  $\mu\text{s}$ 。使用  $mer\text{-Ir}(\text{tfpi\_tmBn})_3$  为掺杂剂, 采用梯度掺杂的 OLED 结构, 这些器件具有深蓝光发射 ( $\lambda_{\text{EL}}$  为 424 nm, CIE 为 (0.16, 0.08)),  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 14.9%, 在 100  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时降至 11.7%, CIE 坐标已经非常接近蓝光 BT. 2020 标准。研究表明, 将大体积  $N\text{-Bn}$  或  $N\text{-tmBn}$  基团连接到蓝光铱卡宾配合物上, 对高性能深蓝光铱配合物的合成有帮助。2010 年, Kido 等<sup>[31]</sup>基于二苯并咪唑- $N$ -甲基咪唑配体合成了纯蓝光铱配合物  $mer\text{-Ir}(\text{dbfmi})_3$  (Ir47), 发射主峰在 445 nm, 器件  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 18.6%。

吡啶基团具有良好的电子传输性能和化学稳定性, 为了进一步平衡载流子的复合, 提高配合物的光电性能, 将吡啶基团引入苄基- $N$ -咪唑骨架中构建苄基- $N$ -咪唑并吡啶。以此为基础, 2015 年, Thompson 和 Forrest 等<sup>[32]</sup>在咪唑 N 原子上引入甲基, 合成了配合物  $fac\text{-Ir}(\text{pmp})_3$  (Ir48 ~ 49), 其发射主峰分别在 418 nm 和 465 nm, 为深蓝光发射; 溶液中的发光效率高达 78%; 采用掺杂型的器件结构, 其  $\text{EQE}_{\text{max}}$  分别为 10.1% 和 14.4%。2017 年, Chen 等<sup>[33]</sup>在苯环上引入叔丁基, 在咪唑 N 原子上引入乙基, 合成了蓝光配合物  $mer\text{-Ir}(\text{tBu-pmp})_3$  (Ir50), 其发射峰位在 450 nm。以其为客体材料并通过器件结构优化, 制备的器件实现了深蓝光发射, CIE 色坐标为 (0.14, 0.18),  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 19.0%。2020 年, Jin 等<sup>[34]</sup>合成了  $mer\text{-Ir}1$  (Ir51), 配合物的  $T_d$  为 392 °C, 利用苄基单元较大的空间结构, 有效地抑制了配合物的分子间相互作用和 TTA, 使其在高掺杂比下也能实现高的器件效率。基于 Ir51 的 OLED 在高掺杂比 (40%) 下,  $\text{EQE}_{\text{max}}$  仍保持在 24.8%。此外, 其 CIE 为 (0.14, 0.08), 为深蓝光发射, 满足了国家电视系统委员会 (NTSC) 蓝光色坐标要求。2022 年, Jin 等<sup>[35]</sup>基于课题组之前报道的吡啶并咪唑铱配合物 Ir51, 在苄基取代的苄基咪唑并吡啶的合适位置引入体积较大的叔丁基和三氟甲基, 成功设计了三个新的铱配合物  $mer\text{-Ir}(\text{ptbbp})_3$ 、 $mer\text{-Ir}(\text{tbpbp})_3$  和  $mer\text{-Ir}(\text{CF}_3\text{pbp})_3$  (Ir52 ~ 54), 配合物的  $T_d$  为 394 ~ 420 °C。以  $mer\text{-Ir}(\text{ptbbp})_3$  为发光材料制备溶液加工器件, 掺杂比为 50% 时,  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 25.3%, CIE 为 (0.15, 0.10)。

以  $mer\text{-Ir}(\text{CF}_3\text{pbp})_3$  为掺杂剂的深蓝 OLED 的 CIE 坐标为 (0.16, 0.05),  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 21.2%。这是第一次报道含卡宾深蓝光铱配合物的溶液加工器件, 具有极高的 EQE 值和较小的 CIE<sub>y</sub> 坐标。同年, Chi 等<sup>[36]</sup>基于母体 pmp, 在  $N$ -苄基和吡啶并咪唑中分别引入叔丁基和三氟甲基, 合成了 4 个铱配合物  $f\text{-tpb1}$ 、 $m\text{-tpb1}$ 、 $f\text{-tpb2}$  和  $m\text{-tpb2}$  (Ir55 ~ 58), 配合物的激发态寿命为 0.76 ~ 0.87  $\mu\text{s}$ 。经式异构体可以通过酸诱导异构化转化为面式异构体。经式异构体表现出相对宽的蓝绿光发射, 而面式异构体表现出较窄的蓝光发射峰。基于  $f\text{-tpb1}$  和  $m\text{-tpb1}$  制备的器件,  $\text{EQE}_{\text{max}}$  分别为 13.5% 和 22.8%, CIE 坐标分别为 (0.15, 0.23) 和 (0.22, 0.45)。以  $t\text{-DABNA}$  为发光客体,  $f\text{-tpb1}$  为敏化剂, 制备的超磷光 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  提高至 29.6%, 半峰宽为 30 nm, CIE 坐标为 (0.13, 0.11), 证实了高效的 Förster 共振能量传递 (FRET) 过程。这些结果表明,  $\text{CF}_3$  取代的咪唑并 [4,5- $b$ ] 吡啶-2-亚基铱配合物可用于产生蓝色电致磷光和超磷光。2023 年, Chi 等<sup>[37]</sup>合成了一系列含有不对称二- $N$ -芳基-6-(三氟甲基)-2H-咪唑并 [4,5- $b$ ] 吡啶-2-亚基配体的铱卡宾配合物, 即  $f\text{-ct6a-c}$  (Ir59 ~ 61), 配合物的  $T_d$  为 332 ~ 387 °C, 激发态寿命为 0.69 ~ 0.82  $\mu\text{s}$ , 所有配合物均表现出良好的光致发光量子产率 (PLQY 为 83% ~ 88%), 基于材料  $f\text{-ct6b}$  制备的 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 23.4%; 利用  $f\text{-ct6a}$  作为敏化剂、 $v\text{-DABNA}$  作为发光材料制备的超磷光 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 26.2%, FWHM 为 22 nm, CIE 坐标为 (0.12, 0.13)。最后, 以  $f\text{-ct6b}$  为掺杂剂的串联 OLED 的最大亮度超过 10 000  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 、最大 EQE 为 42.1%, 证实了它们可作为纯蓝光 OLED 的潜在应用材料。

相对吡啶, 吡嗪杂化程度更高, 具有更高的电子亲和性以及反应活性位点, 可更好地调控光物理性能。因此, 2020 年, Lee 等<sup>[38]</sup>以苄基- $N$ -咪唑并吡嗪为基础, 引入空间位阻大、吸电子能力更强的叔丁基吡嗪并咪唑单元, 合成了蓝光铱配合物  $\text{Ir}(\text{cb})_3$  (Ir62)。采用  $\text{SiCzTrz}:\text{mCBP}$  激基复合物为主体制备的 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 27.6%、器件寿命  $\text{LT}_{50}$  超过 10 000 h、CIE 坐标为 (0.12, 0.13)。这项工作克服了纯蓝色磷光有机发光二极管的寿命极限。2021 年, Thompson 等<sup>[39]</sup>以  $N$ -芳基吡嗪并咪唑为母体, 在咪唑的氮上分别引入甲基和甲基苯, 分别合成了  $fac\text{-Ir}(\text{pmpz})_3$  和  $fac\text{-Ir}(\text{tpz})_3$  (Ir63 ~

65)。使用具有较大空间位阻的 *fac*-Ir(tpz)<sub>3</sub> 制备的蓝色磷光 OLED 获得了优异的 EQE<sub>max</sub> (18%) 和高亮度 (29 000 cd·m<sup>-2</sup>)。2023 年, Chi 等<sup>[40]</sup> 利用咪唑并[4,5-*b*]吡嗪亚基配位单元与一个 *N*-苯基或 *N*-叔丁基苯基的特定配位点报道了 4 个铱配合物材料 *f*-ct1a、*f*-ct1b、*f*-ct1c 和 *f*-ct1d (Ir66 ~ 69), 配合物具有较短的辐射寿命 0.52~2.29 μs。6 个叔丁基提供了较大的空间位阻, 抑制铱配合物与主客体材料之间的相互作用。以 *f*-ct1c 为材料制备的 OLED 发射峰为 464 nm, EQE<sub>max</sub> 为 20.0%。以 *t*-DABNA 为发光客体、*f*-ct1c 为敏化剂的 OLED 显示出窄带蓝色超磷光, 色坐标为 (0.12, 0.11), FWHM 为 18 nm, EQE<sub>max</sub> 高达 35.5%, 并在 5 000 cd·m<sup>-2</sup> 时保持了 20.3% 的高 EQE。该研究结果为蓝光 OLED 的创新奠定了良好的基础。

嘧啶和吡嗪具有极为相似的分子结构, 但是杂原子位置的差异可引起电子性能不同。因此, 以苯基-*N*-咪唑并嘧啶为基础, 2022 年, Su 等<sup>[41]</sup> 引入 8H-嘌呤-8-亚基报道了蓝光铱配合物 *f*-CF<sub>3</sub> 和 *f*-PhCF<sub>3</sub> (Ir70 ~ 71), 材料具有稳定的最低未占据分子轨道能级, 在室温下具有 71%~97% 的高量子产率和较短的辐射寿命 (0.72 ~ 0.76 μs)。器件 EQE<sub>max</sub> 分别为 10.4% 和 12.8%。用 *f*-CF<sub>3</sub> 作为敏化剂、*t*-DABNA 为发光材料时, 敏化器件 EQE<sub>max</sub> 达到 23.8%, FWHM 为 30 nm, CIE 坐标为 (0.13, 0.14)。结果表明, 含嘌呤-8-亚基的蓝光铱配合物在 OLED 中具有巨大的应用潜力。

三氮唑是含有三个氮原子的五元环结构, 更高的杂原子程度使其具有更大的极性和更好的电子接受性和传输性能。因而, 以苯基-*N*-三氮唑为基础, 2021 年, Chi 等<sup>[42]</sup> 报道了含 1,2,4-三氮唑-3-亚基和 5-(三氟甲基)-1,2,4-三氮唑-3-亚基环金属酸盐的两个系列深蓝铱配合物 *m*-tz1、*f*-tz1、*m*-tz2、*f*-tz2、*m*-Ftz1 和 *f*-Ftz1 (Ir72~77), 配合物的 *T<sub>d</sub>* 为 244 ~ 398 °C, 激发态寿命为 1.43 ~ 6.41 μs。在三氮唑中引入 CF<sub>3</sub> 取代基后, 得到衍生物 *m*-Ftz1 和 *f*-Ftz1, 发射峰只有很小的变化。基于 *m*-tz1 制备的器件 EQE<sub>max</sub> 为 10%, 色坐标为 (0.15, 0.06)。而使用 *m*-tz2 为敏化剂、*t*-DABNA 为发光材料的超磷光 OLED 显著提高了 EQE<sub>max</sub>, 为 19.7%, FWHM 为 31 nm, 色坐标为 (0.12, 0.13)。这些结果表明, 缺电子的卡宾三氮唑配位片段可用于合成纯蓝光铱配合物。

通过引入不同极性、不同吸电子能力的基团, 研究人员分别以苯基-*N*-咪唑、二苯并咪唑-*N*-甲基咪唑、苯基-*N*-咪唑并吡啶、苯基-*N*-咪唑并吡嗪、苯基-*N*-咪唑并嘧啶、苯基-*N*-三氮唑为主配体骨架, 逐步调控配合物的结构, 实现了对配合物光电性能的调控。

### 2.3 三异配蓝光铱 (III) 配合物研究进展

相对于部分异配和均配的蓝光铱配合物, 由三种不同配体组成的三异配 [Ir(C<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)(C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>)(LX)] 蓝光铱配合物由于合成难度较大而鲜有报道。但是, 三异配 [Ir(C<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)(C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>)(LX)] 蓝光铱配合物结构调整空间更大, 可更加精细地调控配合物的光电性能, 得到高性能的蓝光 OLED。

2012 年, Nazeeruddin 等<sup>[43]</sup> 利用酸诱导降解反应有效合成了三异配环金属铱配合物 Ir(ppy)(diFppy)(acac) (Ir78) (图 5)。两种结构不同主配体的存在有效改善了单中心宽发射体的现象, 提升了配合物的色纯度。

2017 年, Baranof 等<sup>[44]</sup> 以 2-苯基吡啶 (ppy)、2-(2,4-二氟苯基)吡啶 (dFppy)、1-苯基吡啶 (ppz) 和 1-(2,4-二氟苯基)吡啶 (dFppz) 为配体, 合成了一系列结构为 Ir(C<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)(C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>)(acac) 的三异配铱配合物 (Ir79 ~ 83)。配合物在 CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 溶液中的发射峰为 483 ~ 519 nm, 量子产率为 22% ~ 69%。然后, 用吡啶甲酸 (pic) 取代 acac, 得到两对非对映异构体 (Ir84 ~ 87)。每对的非对映异构体之间光电性质差异极其微小。因此, 可以使用非对映异构体的混合物作为发光材料制备器件, 不需要繁琐的纯化过程。

2023 年, 陆光照等<sup>[45]</sup> 以 dfbpy(2',6'-二氟-2,3'-联吡啶) 和 dfppy 为主配体, 以 fptz 为辅助配体, 设计并合成了两种新型三异配蓝光铱配合物 dfbpy-Ir-dfppy 和 dfppy-Ir-dfbpy (Ir88 ~ 89)。配合物在溶液中的发射峰分别在 450 nm 和 452 nm; PLQYs 分别为 32% 和 36%; 辐射寿命短, 为 1.67 ~ 3.26 μs。基于两个配合物制备的 OLED 的 EQE<sub>max</sub> 分别为 5.6% 和 8.5%。

同年, 陆光照等<sup>[46]</sup> 以传统的苯基吡啶类的 dfbpy 和 medfppy(2-(2,4-二氟苯基)-4-甲基吡啶) 为主配体、fptz 为辅助配体制备了三种新型蓝光铱配合物, 即 Ir(medfppy)<sub>2</sub>(fptz) (Ir-mm)、Ir(dfppy)(medfppy)(fptz) (Ir-dm) 和 Ir(medfppy)(dfbpy)(fptz) (Ir-md) (Ir90 ~ 92)。其中 DFT 计算表明, 当配体

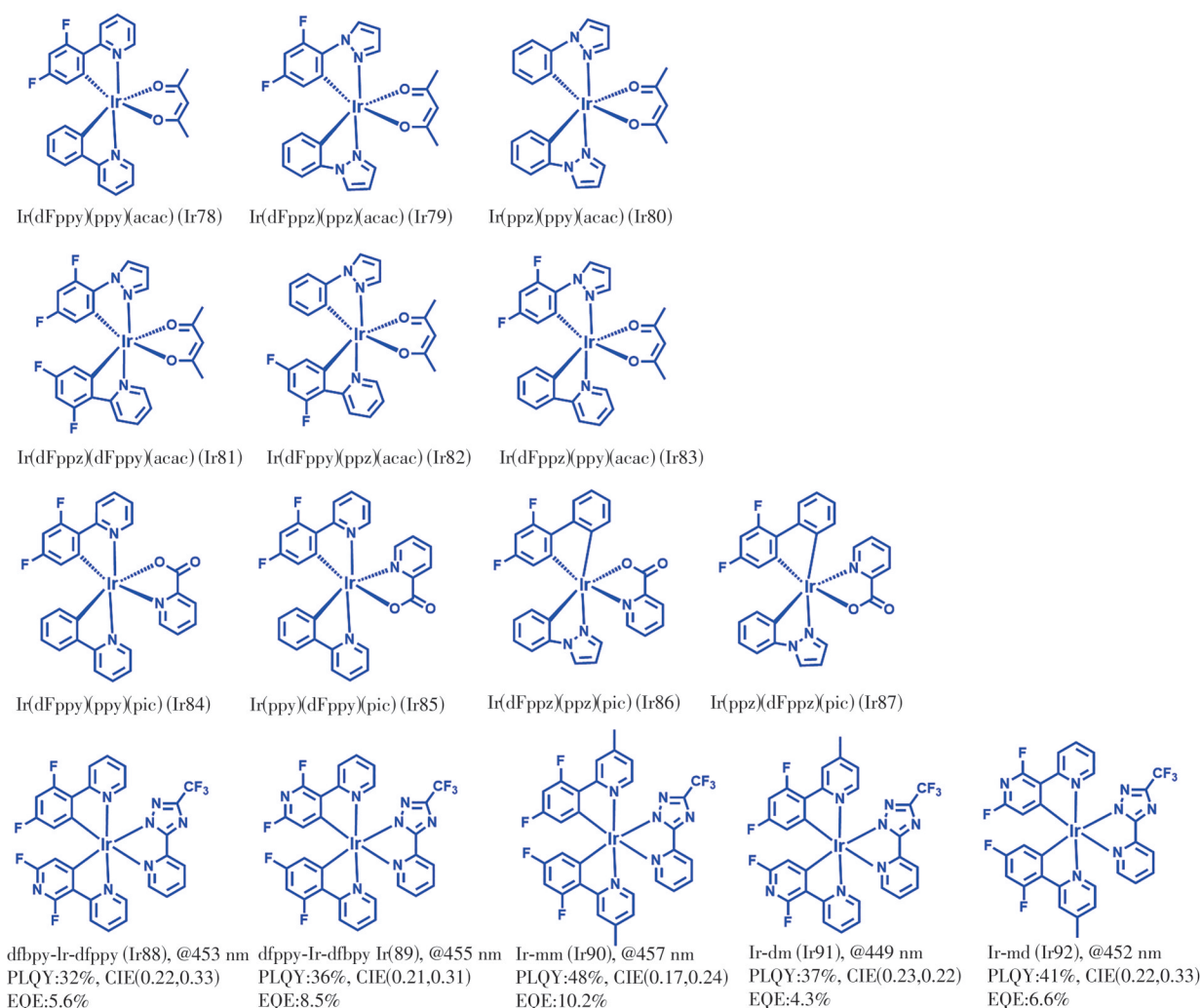


图 5 三异配蓝光铱配合物

Fig. 5 Tris-heteroleptic blue iridium complexes

medfppy 被更强的吸电子配体 dfbpy 取代时, 同分异构体 *Ir*-dm 和 *Ir*-md 显示出完全不同的前沿分子轨道。TD-DFT 计算表明, 配合物的  $T_1$  态以空穴到电子的跃迁为主, 三个材料中  $^3LC$  辐射跃迁的贡献均大于 78%。基于这三种材料制备的 OLED 的  $EQE_{max}$  最高达 10.2%, CIE 坐标为 (0.17, 0.24)。

不对称的三元全异配铱配合物具有更好的分子调控空间, 拥有更加精细的光电性能。同时, 还有助于跳脱国外专利的壁垒, 因而相关研究意义重大。可惜的是, 由于合成和提纯难度大, 三元全异配铱配合物的研究工作相对较少, 仍具有较大的发展潜力。

### 3 [3+2+1] 型蓝光铱(Ⅲ)配合物研究进展

将三齿、双齿和单齿配体分别与铱原子配位

可形成 [3+2+1] 型蓝光铱配合物。因为配体特殊的结构差异, 使 [3+2+1] 型铱配合物在化学结构上具有高度的不对称性。其中, 三齿配体的刚性结构保证了整个配合物的稳定性; 双齿配体很大程度决定了配合物的发射波长; 单齿配体多为卤素和氰化物。三个负一价配体和铱正离子相结合使整个配合物呈现电中性。

2008 年, Haga 等<sup>[47]</sup>报道了 [3+2+1] 型蓝光铱配合物 *Ir*(dfbpzb)(ppy)CN (*Ir*93) (图 6)。由于双吡唑苯衍生物这类 N<sup>-</sup>C<sup>-</sup>N 三齿配体的引入, 配合物表现出独特的蓝光发射, 在 77 K 时溶液主发射峰为 447 nm, 且低温下, 该配合物的衰减寿命仅为 13.1  $\mu$ s。

2011 年, Chang 等<sup>[48]</sup>将亚磷酸盐引入到铱配合物中, 以 2-吡啶基三氮唑为蓝光发色团、结合 P<sup>-</sup>C<sup>-</sup>C 三齿配体、单齿磷给体, 制备了 [3+2+1] 型铱

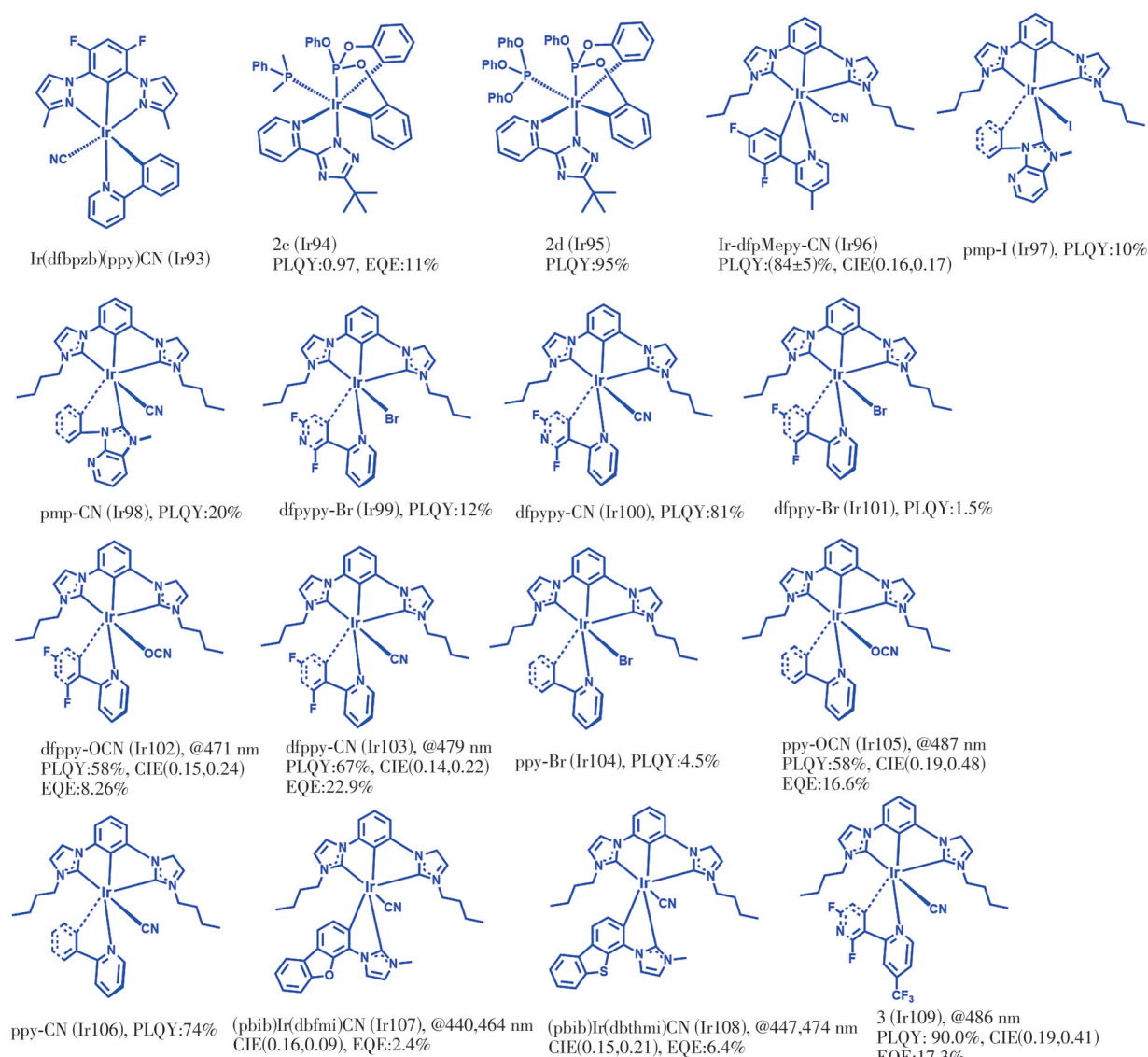


图 6 [3+2+1]型蓝光铱配合物

Fig. 6 [3+2+1] type blue iridium complexes

配合物 Ir94 ~ 95, 其中 P<sup>+</sup>C<sup>-</sup>C<sup>-</sup> 三齿配体的引入确保了配合物分子的稳定性, 这对在器件中的应用至关重要。在 CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 溶液中, Ir94 ~ 95 主发射峰分别为 473 nm、472 nm, 最大量子效率分别为 0.97 和 0.95。其中基于 Ir94 器件的 CIE 坐标为 (0.17, 0.28), 最大电流效率 ( $\eta_{c,max}$ ) 为 22.3 cd·A<sup>-1</sup>, EQE<sub>max</sub> 为 11%。实验结果揭示了 P<sup>+</sup>C<sup>-</sup>C<sup>-</sup> 和吡啶基唑酸盐螯合物在制备蓝色磷光体方面的巨大潜力。

2021 年, Wei 等<sup>[49]</sup>以双卡宾(NHC)三齿配体取代了先前的 N<sup>+</sup>C<sup>-</sup>N<sup>-</sup> 三齿配体, 采用三齿配体 1,3-二(1-丁基咪唑-2-基)苯基卡宾(pbib)、双齿配体 2-(2,4-二氟苯基)-4-甲基吡啶(dfpmepy)和单齿配体(-CN)设计并合成了[3+2+1]型铱配合物 Ir-dfpmepy-CN(Ir96), 配合物的  $T_d$  超过 280 °C (2% 质

量损失)。其中, 三齿卡宾配体通过与中心铱原子形成强配位键来增强分子的稳定性, 双齿配体(dfpmepy)和单齿配体(-CN)中的吸电子基团能降低 HOMO 能级。该配合物在 CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 中的 PLQY 可达 89%。基于该材料制备的器件 EQE<sub>max</sub> 为 4.2%, CIE 坐标 (0.16, 0.17), 实现了更深的蓝光发射。

同年, Che 等<sup>[50]</sup>同样在高稳定性 NHC(pbib)三齿配体的基础上, 以 pmp/dfppy/dfppy/ppy 为双齿环金属配体(C<sup>-</sup>N)、I/Br/CN/OCN 为单齿配体报道了一系列具有从深蓝到天蓝发射的[3+2+1]型铱配合物 pmp-I、pmp-CN、dfppy-Br、dfppy-CN、dfppy-Br、dfppy-OCN、dfppy-CN、ppy-Br、ppy-OCN 和 ppy-CN(Ir97 ~ 106)。相对氰酸酯和卤素, 具有强

$\sigma$ -给体和弱  $\pi$ -受体性质的氰基基团能够进一步提高铱原子 d-d 态的能量, 减少金属在 HOMO 轨道和激发态中的参与程度, 从而使得配合物具有更强以配体为中心的跃迁特征。因而, 以氰基配体生成的配合物具有更高的 PLQY、更好的热稳定性 ( $T_d$  为 355 ~ 372 °C)。基于 dppy-CN 制备的蓝光 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 22.9%, CIE 坐标为 (0.14, 0.24), 在 1 000  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时观察到 5.7% 的低效率滚降。

2022 年, Wei 等<sup>[51]</sup>也以 pbib 为三齿配体、以二苯并咪唑咪唑 ( $\text{C}^{\text{C}}$ )/二苯并噻吩咪唑 ( $\text{C}^{\text{C}}$ ) 为双齿配体、以氰基为单齿配体合成了两例 [3+2+1] 型铱配合物 (pbib)Ir(dbfmi)CN 和 (pbib)Ir(dbthmi)CN ( $\text{Ir107} \sim \text{Ir108}$ ), 配合物的  $T_d$  都超过 300 °C, 激发态寿命为 1.43 ~ 6.41  $\mu\text{s}$ 。通过结构修饰, 拓宽了双齿  $\text{C}^{\text{C}}$  配体的  $\pi$  共轭程度。基于 (pbib)Ir(dbfmi)CN 制备的器件发射主峰为 440 nm、CIE 坐标为 (0.16, 0.09), CIE 中  $\gamma$  值与国家电视系统委员会标准的蓝色 CIE 坐标 (0.14, 0.08) 非常接近, 为饱和蓝色发射。

同年, Wei 等<sup>[52]</sup>在二齿  $\text{C}^{\text{N}}$  配体的吡啶中氮原子的对位引入吸电子的三氟甲基, 报道了 [3+2+1] 型铱配合物 Ir109, 配合物的  $T_d$  超过 350 °C, 其在 2% PMMA 膜中的量子产率高达 90%, 激发态寿命仅为 3.3  $\mu\text{s}$ 。基于 Ir109 的器件  $\text{EQE}_{\text{max}}$  可提高至 17.3%。通过将主体材料和电子传输材料分别从 mCBP: B4PyMPM 和 B4PyMPM 替换为 mCBP: PO-T2T 和 PO-T2T, 进一步优化器件结构, 在 1 000  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的亮度下, 效率滚降小于 5%。

目前, 在 [3+2+1] 型蓝光铱配合物的研究中, 配合物分子结构设计策略多以对双齿配体结构的调控为主; 三齿配体结构较少, 多以双卡宾 (NHC) 三齿配体为主。这主要是因为三齿配体的设计和合成都较为困难。如何设计平衡空间效应和电子效应、简化合成步骤、提升合成产率是开发三齿配体的难题, 是制约 [3+2+1] 型配合物商用的重要因素。

#### 4 [3+3] 型蓝光铱 (III) 配合物研究进展

与典型的 [2+2+2] 型铱配合物的畸变八面体几何结构不同, 刚性三齿配体将配位限制在畸变的平面结构中。相比其他构型, 由两个钳形螯合

配体形成 [3+3] 型铱配合物会有更加刚性的分子结构。其刚性结构可以限制分子的运动, 降低分子结构的振动耦合, 从而抑制非辐射衰减, 提高配合物的量子效率。

由于分子的电荷呈中性的原因, [3+3] 型中性铱配合物为异配型结构。如图 7, 2019 年, Chi 等<sup>[53]</sup>报道了双-三齿卡宾配合物 Px-21、Px-22、Px-23、Cz-4 和 Cz-5 (Ir110~114), 配合物的  $T_d$  为 372 ~ 478 °C, 激发态寿命为 2.08 ~ 8.13  $\mu\text{s}$ 。与具有环金属化苯氧基单元的 Px 系列材料相比, 含咪唑 Cz 系列铱配合物具有更好的载流子传输能力。其中, 基于 Cz-5 的器件  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 18.7%、CIE 为 (0.14, 0.21), 在 100  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时,  $\text{EQE}$  略有下降, 为 13.7%。尽管这里获得的性能仍然落后于商用标准, 但这些具有双-三齿结构的铱磷光体, 特别是具有两个稠合的五-六元金属环的铱配合物, 显示出较好的效率和稳定性, 性能也有进一步提升的潜力。

2021 年, Lee 等<sup>[54]</sup>用苄基、吡啶环、吡唑/三唑形成配体母体, 同时在吡啶环的 4 取代位上用不同给电子基 (叔丁基、甲氧基和吡咯烷基) 进行修饰, 设计合成了 5 种蓝光双-三齿铱配合物材料 Flu-1、Flu-2、Flu-3、Flu-4 和 Flu-5 (Ir115~119), 配合物的  $T_d$  为 384 ~ 417 °C, 激发态寿命为 1.98 ~ 60  $\mu\text{s}$ 。苄基的引入可以降低配合物的 HOMO 能级, 实现波谱蓝移。而且, 随着取代基给电子能力的提升, 配合物光谱会进一步蓝移。其中, 基于 Flu-4 的器件性能最好,  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 22.3%、CIE 坐标为 (0.17, 0.19)。遗憾的是, 就 Ir115 ~ 119 而言, 光物理性质以及理论计算表明, 随着带隙的增加, 波谱蓝移, 磷光效率会下降。

2022 年, Zhou 等<sup>[55]</sup>拓宽了咪唑单元的共轭, 引入了三氟甲基吡啶并咪唑单元, 并且接入了给电子能力更强的二甲氨基, 使配合物发射进一步蓝移。利用简单的一锅法合成了四例双-三齿蓝光铱配合物 B1、B2、B3 和 B4 (Ir120~123), 配合物的  $T_d$  为 408 ~ 459 °C, 且拥有较短的激发态寿命 0.60 ~ 1.09  $\mu\text{s}$ , 并将材料作为掺杂剂和敏化剂用于 OLED 的制备。这些围绕铱原子的两个双-三齿配体具有相互正交的配位排列。以 B3 为掺杂剂的蓝光 OLED 的  $\text{EQE}_{\text{max}}$  为 21.9%, CIE 坐标为 (0.14, 0.15), 在 1 000  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的高亮度下, 其效率滚降仅为 10%。以 B3 为敏化剂、 $\nu$ -DABNA 作为

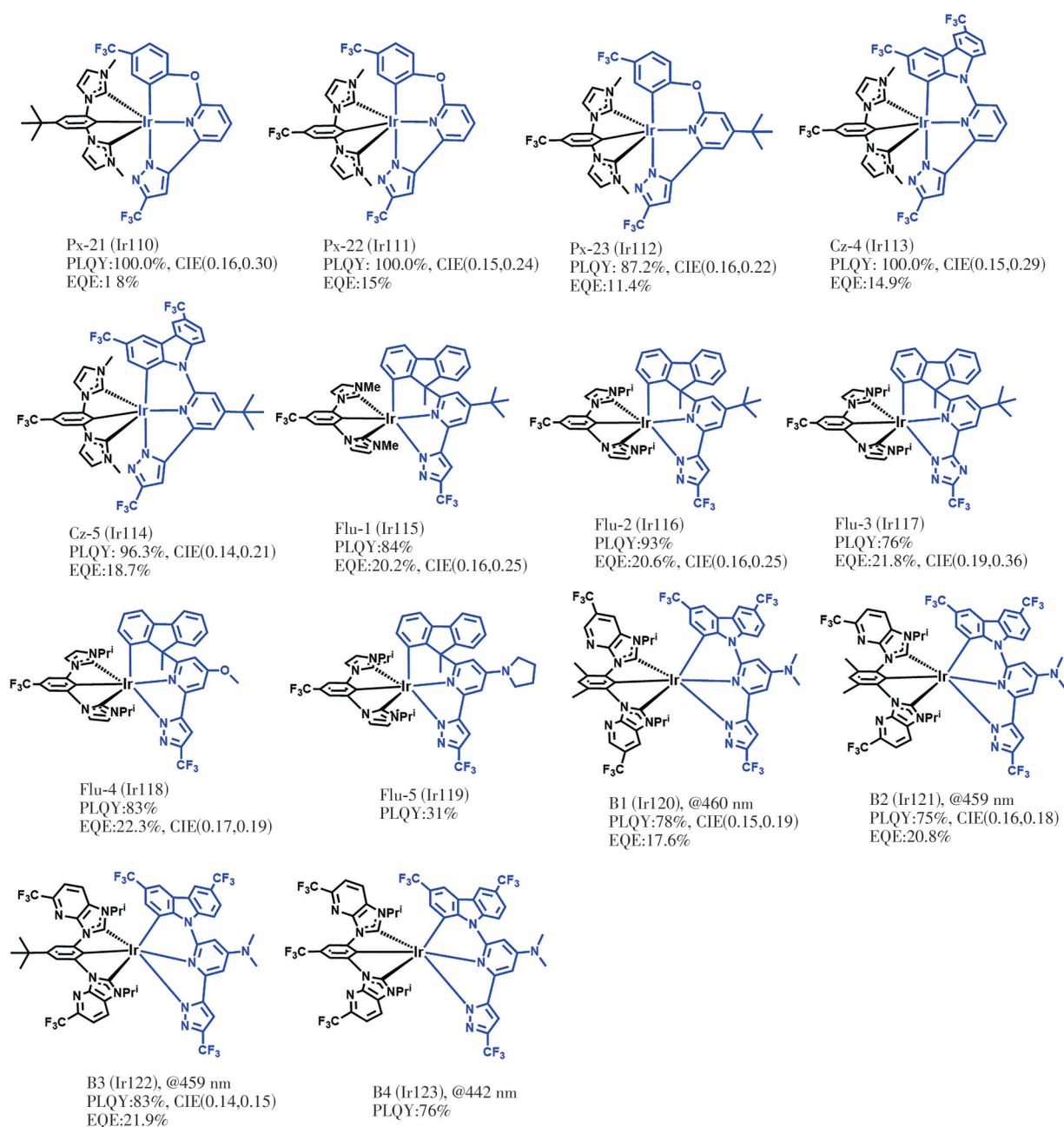


图7 [3+3]型蓝光铱配合物

Fig. 7 [3+3] type blue iridium complexes

发光材料,也获得了窄带超磷蓝光发射,EQE<sub>max</sub>提高到了26.1%,色坐标为(0.11,0.14)。值得注意的是,B3纯蓝发射带较窄(FWHM为2862 cm<sup>-1</sup>)、效率高、辐射寿命短(或辐射衰减速率常数快)等优点,都是高效稳定蓝光材料的基本特征。

尽管[3+3]型铱配合物的刚性结构会抑制非辐射跃迁,提升分子的发光效率,得到良好的器件性能;但是,与[3+2+1]结构类型的铱配合物相比,[3+3]型铱配合物更加受限于三齿配体的设计和合成的发展。而且,其分子结构和性能调控的空

间更小。因此,[3+3]结构类型铱配合物发展较为缓慢。

## 5 [4+1+1]、[4+2]型蓝光铱(Ⅲ)配合物研究进展

和[3+3]、[3+2+1]型配合物的现状相同,[4+1+1]、[4+2]这两种类型的配合物发展相对缓慢。如何保证四齿配体在较为扭曲空间结构上维持相对强的刚性、稳定性、配位性能以及如何提高四齿配体和对应配合物合成产率是制约[4+1+1]型和[4+

2]型配合物发展的难题。在少数报道蓝色磷光[4+1+1]和[4+2]型铱配合物的文献中,均采用非平面的四齿配体。但四齿配体在[4+1+1]或[4+2]型配合物中仍难以实现纯蓝光发射。2017年,Chi等<sup>[56]</sup>引入含有三元排列联吡啶和吡唑单元的四齿螯合物为主配体,制备了[4+2]型蓝光铱(Ⅲ)配合物[Ir(L1)(bipz)]和[Ir(L2)(bipz)](Ir124~125)(图8)。

以 Ir124 为掺杂客体制备了天蓝色有机发光二极管,  $EQE_{\max}$  为 10.1%, CIE 为 (0.17, 0.31)。2020 年, Tsai 等<sup>[57]</sup>引入了 2-苯基-6-(1-苯基-1-(吡啶-2-基)乙基)吡啶为四齿配体,合成了[4+1+1]型蓝光铱配合物(Ir126),该配合物在溶液中的发射峰为 484 nm,在 PMMA 膜中的 PLQY 高达 87%。

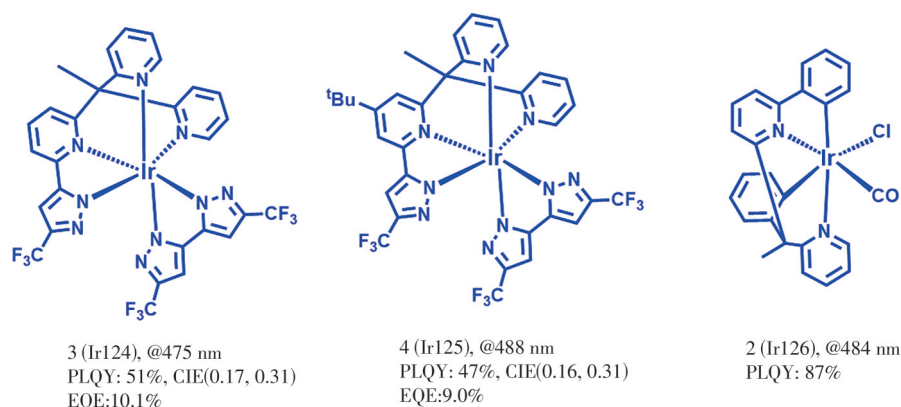


图 8 [4+2]、[4+1+1]型蓝光铱配合物

Fig. 8 [4+2] and [4+1+1] type blue iridium complexes

## 6 总结与展望

蓝光材料仍然是限制 OLED 发展最主要的因素,如何实现高色纯度、高性能、高稳定性、低成本蓝光材料的设计至关重要。本文对[2+2+2]、[3+2+1]、[3+3]、[4+2]和[4+1+1]构型的蓝光铱配合物进行了充分的调研。从分子设计策略的角度出发,充分分析了每种构型的优势以及相对应的光电性能调控手段,期望对后续的研究发展增砖添瓦。

目前,各种类型中常见的分子结构调控策略主要有:调节分子共轭结构、引入不同强度的给电子/吸电子基团调控能级差和电子亲和能力;通过大位阻基团调控分子的刚性和堆积方式;调控分子取向性和水平偶极矩等。但是,就如何实现各种调控策略的协同作用,对铱配合物光电性能的精细调控需要进一步深入研究。此外,含三齿配体和四齿配体铱配合物的配体结构设计也需要进行不断的尝试和探索,期望实现弯道超车。

总体而言,蓝光铱配合物的稳定性及其器件寿命仍然是 OLED 领域最重要的课题之一。虽然

提高蓝光材料的稳定性和器件寿命的统一策略尚未出现,但就材料的构效关系,广大研究人员之间形成了共同的观点:材料中化学键的稳定性极大程度上决定了器件的稳定性。当材料受外界激发时,其化学键断裂所形成的激发态物质会导致深电荷陷阱、非辐射复合中心和发光猝灭剂的产生,进而缩短器件寿命。因此,配合物中应避免引入大量的强极性键、强极性基团以及高活性的官能团。反之,增强分子键的稳定性可提高器件寿命。比如,分子氟化后,化学键的裂解减缓,分子稳定性增强,器件寿命得到提升。

虽然目前从该角度进行分析和探究的工作不多,但是,我们坚信,随着研究人员的持续探索和研究的不断深入,该研究领域一定会有更多更大的突破,将有更深入更全面的理论共识。我们也将持续关注总结,为该领域的研究添砖加瓦。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240167>

## 参 考 文 献:

- [1] TASAKI S, NISHIMURA K, TOYOSHIMA H, *et al.* Realization of ultra-high-efficient fluorescent blue OLED [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2022, 30(5): 441-451.

- [ 2 ] LI T Y, WU J, WU Z G, *et al.* Rational design of phosphorescent iridium(Ⅲ) complexes for emission color tunability and their applications in OLEDs [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2018, 374: 55-92.
- [ 3 ] WEI Q, KLEINE P, KARPOV Y, *et al.* Conjugation-induced thermally activated delayed fluorescence (TADF): from conventional non-TADF units to TADF-active polymers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(7): 1605051.
- [ 4 ] MA Y G, ZHANG H Y, SHEN J C, *et al.* Electroluminescence from triplet metal-ligand charge-transfer excited state of transition metal complexes [J]. *Synth. Met.*, 1998, 94(3): 245-248.
- [ 5 ] BALDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, *et al.* Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices [J]. *Nature*, 1998, 395(6698): 151-154.
- [ 6 ] LAMANSKY S, DJUROVICH P, MURPHY D, *et al.* Highly phosphorescent bis-cyclometalated iridium complexes: synthesis, photophysical characterization, and use in organic light emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2001, 123(18): 4304-4312.
- [ 7 ] 马东阁. OLEDs中的激子及其高效利用 [J]. 发光学报, 2023, 44(1): 174-185.  
MA D G. Excitons and their efficient utilization in OLEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 174-185. (in Chinese)
- [ 8 ] 刘美惠, 彭谦. OLED发光材料的理论计算与分子设计 [J]. 发光学报, 2023, 44(1): 115-128.  
LIU M H, PENG Q. Theoretical calculation and molecular design of light-emitting materials for OLED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 115-128. (in Chinese)
- [ 9 ] LEE J H, CHENG S H, YOO S J, *et al.* An exciplex forming host for highly efficient blue organic light emitting diodes with low driving voltage [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25(3): 361-366.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] WANG Q, OSWALD I W H, YANG X L, *et al.* A non-doped phosphorescent organic light-emitting device with above 31% external quantum efficiency [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(48): 8107-8113.
- [ 12 ] 唐振宇, 郭浩清, 肖静, 等. OLED电子传输材料研究进展 [J]. 发光学报, 2023, 44(1): 26-36.  
TANG Z Y, GUO H Q, XIAO J, *et al.* Recent advances on electronic transport materials in OLEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 26-36. (in Chinese)
- [ 13 ] HOLMES R J, FORREST S R, TUNG Y J, *et al.* Blue organic electrophosphorescence using exothermic host-guest energy transfer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(15): 2422-2424.
- [ 14 ] SHIN H, LEE J H, MOON C K, *et al.* Sky-blue phosphorescent OLEDs with 34.1% external quantum efficiency using a low refractive index electron transporting layer [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(24): 4920-4925.
- [ 15 ] BEJOYMOHANDAS K S, KUMAR A, VARUGHESE S, *et al.* Photophysical and electroluminescence properties of bis(2', 6'-difluoro-2, 3'-bipyridinato-*N*, *C*4') iridium(picolinate) complexes: effect of electron-withdrawing and electron-donating group substituents at the 4' position of the pyridyl moiety of the cyclometalated ligand [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(28): 7405-7420.
- [ 16 ] KIM J B, HAN S H, YANG K, *et al.* Highly efficient deep-blue phosphorescence from heptafluoropropyl-substituted iridium complexes [J]. *Chem. Commun.*, 2015, 51(1): 58-61.
- [ 17 ] ZAEN R, PARK K M, LEE K H, *et al.* Blue phosphorescent Ir(Ⅲ) complexes achieved with over 30% external quantum efficiency [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(24): 1901387.
- [ 18 ] SHIN H, HA Y H, KIM H G, *et al.* Controlling horizontal dipole orientation and emission spectrum of Ir complexes by chemical design of ancillary ligands for efficient deep-blue organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(21): 1808102.
- [ 19 ] XUE J N, CHEN S N, LIANG J, *et al.* Finely-tuned heteroleptic phosphorescent Ir(III) complexes for CIEy < 0.2-based pure blue organic light-emitting diodes with external quantum efficiencies > 30% [J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 463: 142493.
- [ 20 ] ZHUANG J Y, LI W F, SU W M, *et al.* Highly efficient phosphorescent organic light-emitting diodes using a homoleptic iridium(Ⅲ) complex as a sky-blue dopant [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(10): 2596-2601.
- [ 21 ] UDAGAWA K, SASABE H, CAI C, *et al.* Low-driving-voltage blue phosphorescent organic light-emitting devices with external quantum efficiency of 30% [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(29): 5062-5066.
- [ 22 ] ZHUANG J Y, LI W F, WU W C, *et al.* Homoleptic tris-cyclometalated iridium(Ⅲ) complexes with phenylimidazole ligands for highly efficient sky-blue OLEDs [J]. *New J. Chem.*, 2015, 39(1): 246-253.
- [ 23 ] CHO H, LEE J, LEE J I, *et al.* Phenylimidazole-based homoleptic iridium(Ⅲ) compounds for blue phosphorescent

- organic light-emitting diodes with high efficiency and long lifetime [J]. *Org. Electron.*, 2016, 34: 91-96.
- [24] KWON Y, HAN S H, YU S, *et al.* Functionalized phenylimidazole-based *facial*-homoleptic iridium(III) complexes and their excellent performance in blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(16): 4565-4572.
- [25] KIM J S, JEONG D, BAE H J, *et al.* Improved efficiency and stability of blue phosphorescent organic light emitting diodes by enhanced orientation of homoleptic cyclometalated Ir(III) complexes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(22): 2001103.
- [26] BAE H J, KIM J S, YAKUBOVICH A, *et al.* Protecting benzylic C-H bonds by deuteration doubles the operational lifetime of deep-blue Ir-phenylimidazole dopants in phosphorescent OLEDs [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(16): 2100630.
- [27] LI X Y, ZHANG J Y, ZHAO Z F, *et al.* Deep blue phosphorescent organic light-emitting diodes with CIE<sub>y</sub> value of 0.11 and external quantum efficiency up to 22.5% [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(12): 1705005.
- [28] RYU C H, LIM J, KIM M B, *et al.* Tris(5-phenyl-1*H*-1, 2, 4-triazolyl)iridium(III) complex and its use in blue phosphorescent organic light-emitting diodes to provide an external quantum efficiency of up to 27.8% [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(7): 2001957.
- [29] SAJOTO T, DJUROVICH P I, TAMAYO A, *et al.* Blue and near-UV phosphorescence from iridium complexes with cyclometalated pyrazolyl or *N*-heterocyclic carbene ligands [J]. *Inorg. Chem.*, 2005, 44(22): 7992-8003.
- [30] MACKENZIE C F R, ZHANG L, CORDES D B, *et al.* Bulky iridium NHC complexes for bright, efficient deep-blue OLEDs [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(2): 2201495.
- [31] SASABE H, TAKAMATSU J I, MOTOYAMA T, *et al.* High-efficiency blue and white organic light-emitting devices incorporating a blue iridium carbene complex [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(44): 5003-5007.
- [32] LEE J, CHEN H F, BATAGODA T, *et al.* Deep blue phosphorescent organic light-emitting diodes with very high brightness and efficiency [J]. *Nat. Mater.*, 2016, 15(1): 92-98.
- [33] CHEN Z, WANG L Q, SU S K, *et al.* Cyclometalated iridium(III) carbene phosphors for highly efficient blue organic light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(46): 40497-40502.
- [34] PARK H Y, MAHESHWARAN A, MOON C K, *et al.* External quantum efficiency exceeding 24% with CIE<sub>y</sub> value of 0.08 using a novel carbene-based iridium complex in deep-blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(29): 2002120.
- [35] KUMARESAN R, PARK H Y, MAHESHWARAN A, *et al.* High performance solution-processed deep-blue phosphorescence organic light-emitting diodes with EQE over 24% by employing new carbenic Ir(III) complexes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(2): 2101686.
- [36] YANG X L, ZHOU X W, ZHANG Y X, *et al.* Blue phosphorescence and hyperluminescence generated from imidazo[4, 5-*b*]pyridin-2-ylidene-based iridium(III) phosphors [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(25): 2201150.
- [37] YAN J, FENG Z Q, WU Y X, *et al.* Blue electrophosphorescence from iridium(III) phosphors bearing asymmetric di-*N*-aryl 6-(trifluoromethyl)-2*H*-imidazo[4, 5-*b*]pyridin-2-ylidene chelates [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(17): 2305273.
- [38] JUNG M, LEE K H, LEE J Y, *et al.* A bipolar host based high triplet energy electrophor for an over 10 000 h lifetime in pure blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Mater. Horiz.*, 2020, 7(2): 559-565.
- [39] IDRIS M, KAPPER S C, TADLE A C, *et al.* Blue emissive *fac/mer*-iridium(III) NHC carbene complexes and their application in OLEDs [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(8): 2001994.
- [40] YAN J, ZHOU D Y, LIAO L S, *et al.* Electroluminescence and hyperphosphorescence from stable blue Ir(III) carbene complexes with suppressed efficiency roll-off [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 6419.
- [41] QIN Y Y, YANG X L, JIN J B, *et al.* Facially coordinated, *Tris*-bidentate purin-8-ylidene Ir(III) complexes for blue electrophosphorescence and hyperluminescence [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(23): 2201633.
- [42] YOU C F, WANG X Q, ZHOU X W, *et al.* Homoleptic Ir(III) phosphors with 2-phenyl-1, 2, 4-triazol-3-ylidene chelates for efficient blue organic light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(49): 59023-59034.
- [43] BARANOFF E, CURCHOD B F E, FREY J, *et al.* Acid-induced degradation of phosphorescent dopants for OLEDs and its application to the synthesis of *tris*-heteroleptic iridium(III) bis-cyclometalated complexes [J]. *Inorg. Chem.*, 2012, 51(1): 215-224.
- [44] CUDRÉ Y, FRANCO DE CARVALHO F, BURGESS G R, *et al.* *Tris*-heteroleptic iridium complexes based on cyclometalated ligands with different cores [J]. *Inorg. Chem.*, 2017, 56(19): 11565-11576.
- [45] LU G Z, LI S B, LONG Y K, *et al.* Asymmetric *tris*-heteroleptic iridium(III) complexes towards blue phosphorescence:

- synthesis, photophysics and OLED application [J]. *Dyes Pigm.*, 2023, 220: 111731.
- [46] GU L, LI S B, HAN H B, *et al.* Asymmetric  $[\text{Ir}(\text{C}_1\text{N}_1)(\text{C}_2\text{N}_2)(\text{L}^{\text{X}})]$ -tris-heteroleptic iridium(III) complexes enable deep blue phosphorescent emission [J]. *New J. Chem.*, 2023, 47(40): 18603-18609.
- [47] YANG L F, OKUDA F, KOBAYASHI K, *et al.* Syntheses and phosphorescent properties of blue emissive iridium complexes with tridentate pyrazolyl ligands [J]. *Inorg. Chem.*, 2008, 47(16): 7154-7165.
- [48] LIN C H, CHANG Y Y, HUNG J Y, *et al.* Iridium(III) complexes of a dicyclometalated phosphite tripod ligand: strategy to achieve blue phosphorescence without fluorine substituents and fabrication of OLEDs [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, 50(14): 3182-3186.
- [49] LIU Z J, ZHANG S W, ZHANG M, *et al.* Highly efficient phosphorescent blue-emitting  $[3+2+1]$  coordinated iridium(III) complex for OLED application [J]. *Front. Chem.*, 2021, 9: 758357.
- [50] WU Y, YANG C, LIU J, *et al.* Phosphorescent  $[3+2+1]$  coordinated Ir(III) cyano complexes for achieving efficient phosphors and their application in OLED devices [J]. *Chem. Sci.*, 2021, 12(30): 10165-10178.
- [51] ZHANG M, ZHANG S W, WU C C, *et al.* Fine emission tuning from near-ultraviolet to saturated blue with rationally designed carbene-based  $[3+2+1]$  iridium(III) complexes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(1): 1546-1556.
- [52] WU C C, TONG K N, ZHANG M, *et al.* Low efficiency roll-off blue phosphorescent OLEDs at high brightness based on  $[3+2+1]$  coordinated iridium(III) complexes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(13): 2200356.
- [53] HSU L Y, LIANG Q M, WANG Z H, *et al.* Bis-tridentate  $\text{Ir}^{\text{III}}$  phosphors bearing two fused five-six-membered metallacycles: a strategy to improved photostability of blue emitters [J]. *Chem. Eur. J.*, 2019, 25(67): 15375-15386.
- [54] ZHU Z L, CHEN W C, NI S F, *et al.* Constructing deep-blue bis-tridentate Ir(III) phosphors with fluorene-based dianionic chelates [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(4): 1318-1325.
- [55] ZHU Z L, GNANASEKARAN P, YAN J, *et al.* Efficient blue electrophosphorescence and hyperphosphorescence generated by bis-tridentate iridium(III) complexes [J]. *Inorg. Chem.*, 2022, 61(23): 8898-8908.
- [56] LI Y S, LIAO J L, LIN K T, *et al.* Sky blue-emitting iridium(III) complexes bearing nonplanar tetradentate chromophore and bidentate ancillary [J]. *Inorg. Chem.*, 2017, 56(16): 10054-10060.
- [57] BENAVENT L, BOUDREAULT P L T, ESTERUELAS M A, *et al.* Phosphorescent iridium(III) complexes with a dianionic C, C', N, N'-tetradentate ligand [J]. *Inorg. Chem.*, 2020, 59(17): 12286-12294.



吴少华(1998-),女,河北唐山人,硕士研究生,2021年于河北师范大学汇华学院获得学士学位,主要从事有机电致发光材料的设计合成及其器件性能的研究。

E-mail: 838039718@qq.com



祁彦宇(1991-),男,河北张家口人,博士,副教授,2019年于陕西师范大学获得博士学位,主要从事含硼功能有机分子光物理性质、荧光传感及光电器件性能的研究。

E-mail: hbsdqyy@hebtu.edu.cn



陆光照(1990-),男,江苏扬州人,博士,讲师,2018年于南京大学获得博士学位,主要从事有机电致发光材料的设计合成及其器件性能的研究。

E-mail: lugz@szit.edu.cn



韩华博(1990-),女,河南新乡人,博士,讲师,2019年于南京大学获得博士学位,主要从事有机电致发光材料的设计合成及其器件性能的研究。

E-mail: 1412272575@qq.com



于胜(1988-),男,湖北荆州人,博士,讲师,2016年于美国乔治梅森大学获得博士学位,主要从事第一性原理计算与分子动力学的研究。

E-mail: yus@szit.edu.cn



周亮(1982-),男,江苏徐州人,博士,研究员,博士生导师,2011年于中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位,主要从事稀土配合物设计合成及提纯、稀土配合物光电器件开发、稀土配合物生物医学应用、工艺优化及工艺装备研发。

E-mail: zhoul@ciac.ac.cn