

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-13

手性铂配合物与圆偏振发光

张 哲¹, 靳毅岗^{1*}, 吴四海^{2*}, 钟羽武^{1*}

(1. 福州大学 化学学院分子工程+研究院, 福建 福州 350108;

2. 华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 圆偏振发光(Circularly Polarized Luminescence, CPL)材料因兼具发光与偏振调控功能,在三维显示、信息加密、生物成像及圆偏振有机发光二极管(CP-OLED)等领域具有广阔的应用前景。铂配合物凭借强自旋-轨道耦合效应带来的高效磷光发射,以及易于构筑有序聚集结构等优势,已成为开发高性能CPL材料的重要研究体系。本文以手性源结构为主线,系统综述了点手性、轴手性及螺旋手性铂配合物在圆偏振发光领域的研究进展,重点分析了不同手性策略对激发态性质、手性传递、聚集态手性光学性质放大及CP-OLED器件性能的影响规律,并总结了各类体系的优势与局限。最后,本文对高发光不对称因子与高量子产率的协同优化、跨尺度手性传递机制及高性能器件构筑等关键问题进行了展望,以期对新型手性铂配合物的理性设计与实际应用提供参考。

关键词: 手性; 铂配合物; 圆偏振发光; 不对称因子; 发光量子产率

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260223

CSTR: 32170.14.CJL.20260223

Circularly Polarized Luminescence of Chiral Platinum Complexes

ZHANG Zhe¹, JIN Yigang^{1*}, WU Si-Hai^{2*}, ZHONG Yu-Wu^{1*}

(1. Institute of Molecular Engineering Plus, College of Chemistry, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China;

2. School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian Province, China)

* Corresponding Authors, E-mail: jinyigang@fzu.edu.cn; wusihai@hqu.edu.cn; zhongyuwu@fzu.edu.cn

Abstract: Circularly polarized luminescence (CPL) materials, integrating luminescence with polarization modulation, have attracted considerable attention owing to their promising applications in three-dimensional displays, information encryption, bioimaging, and circularly polarized organic light-emitting diode (CP-OLED). Benefiting from strong spin-orbit coupling that leads to efficient phosphorescence, and their ability to readily assemble into ordered aggregated structures, platinum complexes serve as an important research system for developing high-performance CPL materials. This review systematically summarizes recent advances in chiral platinum complexes for CPL based on the structural origin of chirality, including point chirality, axial chirality, and helical chirality. Particular emphasis is placed on the effects of different chiral strategies on excited-state properties, chirality transfer, aggregation-induced amplification of chiroptical responses, and CP-OLED performance, while highlighting the advantages and limitations of each system. Finally, remaining challenges and future perspectives, including the synergistic optimization of luminescence dissymmetry factors and photoluminescence quantum yields, elucidating multiscale chirality transfer mechanisms, and developing high-performance optoelectronic devices, are discussed to provide guidance for the rational design and practical applications of next-generation chiral platinum complexes.

Keywords: chiral; platinum complexes; circularly polarized luminescence; dissymmetry factor; photoluminescence quantum yield

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(22305251, 22004041)和国家重点研发计划(2023YFE0125200)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (22305251, 22004041); National Key R&D Program of China (2023YFE0125200)

1 引 言

手性是自然界中普遍存在的一种几何属性,指一个物体与其镜像之间不能通过平移或旋转实现完全重合,类似于左手与右手之间的关系(图1a)^[1-3]。手性广泛存在于生物大分子(如DNA双螺旋、蛋白质 α -螺旋)以及小分子(如氨基酸、糖类)之中^[4],在生命活动、药物识别、信息传递等过程中扮演着至关重要的角色。随着对微观体系认知的不断深化,手性科学的研究范畴已由传统的

不对称合成与手性拆分,逐渐拓展至手性光学、手性电子学等交叉前沿领域。其中,圆偏振发光(Circularly Polarized Luminescence, CPL)作为连接分子手性与光学功能的重要桥梁,因能够直接反映激发态手性信息,并实现手性光子的产生与调控,近年来受到广泛关注^[5-6]。圆偏振发光是指手性发光体系在激发态下对左旋与右旋圆偏振光表现出不同发射能力的现象(图1b),通常采用发光不对称因子 g_{lum} 对这种差异进行定量表征,其定义如公式(一)所示:

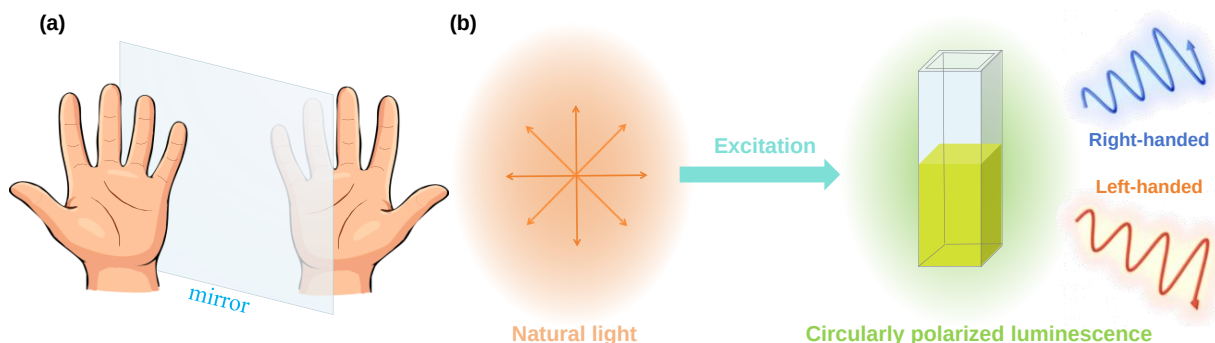


图1 (a) 手性示意图;(b) 圆偏振发光示意图

Fig.1 (a) Schematic of chirality; (b) Schematic of circularly polarized luminescence

$$g_{lum} = \frac{2(I_L - I_R)}{I_L + I_R} \quad (一)$$

其中 I_L 和 I_R 分别代表左旋和右旋圆偏振光的发射强度; g_{lum} 的理论取值范围在-2到+2之间,取值的正负对应着手性构型,绝对值反映CPL圆偏振度的高低。从这一表达式可以看出,实现较大的 g_{lum} 值要求材料在发光跃迁过程中能够有效区分左、右旋圆偏振光子态,这种不对称发光行为本质来源于跃迁偶极矩之间的耦合作用。理论研究表明, g_{lum} 与电偶极跃迁矩(μ)和磁偶极跃迁矩(m)的点积(及空间相对取向)密切相关,其表达式如公式(二)所示:

$$g_{lum} = \frac{4|\mu||m|\cos\theta}{|\mu|^2 + |m|^2} \quad (二)$$

对于大多数纯有机分子,其辐射跃迁主要由电偶极跃迁主导,即电偶极跃迁贡献远大于磁偶极跃迁贡献,因此,公式二可进一步近似为公式(三):

$$g_{lum} = \frac{4|m|\cos\theta}{|\mu|} \quad (三)$$

由公式(二)和(三)可以看出,增大磁偶极跃迁矩、减小电偶极跃迁矩并优化两者夹角,是增强

CPL性能的重要理论依据。此外,手性发光体系所形成的左旋或右旋圆偏振发射光不仅能够反映激发态的手性结构特征,还在三维显示、信息加密与存储、光电器件、生物成像以及不对称光催化等领域展现出广阔的应用前景^[7-11]。

目前,CPL活性材料的研究已涵盖有机小分子、共轭聚合物、超分子组装体以及金属配合物等多种体系。不同类型材料在发光效率、手性不对称度及结构可调性等方面各具优势,但同时也存在不同程度的性能制约,因此构建兼具高发光效率和高 g_{lum} 的新型CPL材料始终是该领域的重要研究目标。有机小分子和聚合物具有结构可调、易于加工等优点,但其发光通常来自 π - π^* 跃迁,属于电偶极跃迁允许而磁偶极跃迁禁阻的过程,因此发光不对称因子通常较低(10^{-5} 至 10^{-3} 数量级);同时,由于缺乏强自旋-轨道耦合效应,其激发态通常以单重态为主,三重态激子难以得到有效利用,从而限制了器件内量子效率的提升^[12-13]。手性镧系配合物具有宇称禁阻跃迁特性,其电偶极跃迁贡献受到显著抑制,而磁偶极跃迁占据相对主导地位,因此能够获得较大的 g_{lum} (可达 10^{-1} 数量级);然而,宇称禁阻效应同时也导致其辐射

跃迁速率较低、发光亮度有限;此外,由于4f轨道受到外层电子的有效屏蔽,其发射波长对配体场调控响应较弱,难以通过分子设计实现大范围光谱调节^[14]。相比之下,光功能过渡金属配合物因其卓越的光致发光量子产率和激发态寿命^[15],同时具有较好的手性调控能力,被认为是目前最具发展潜力的一类CPL发光体系。引入过渡金属中心的本质,在于实现电偶极跃迁强度与磁偶极跃迁贡献之间的有效平衡。一方面,重过渡金属原子所带来的强自旋-轨道耦合效应能够促进系间窜越(ISC)过程,使三重态激子参与辐射跃迁,从而提高激子利用效率;另一方面,金属d轨道参与前线轨道的构筑,使跃迁过程中磁偶极贡献显著增强,为获得较高 g_{lum} 提供了可能^[16-19]。

在众多手性金属发光体系中, d^8 电子构型的铂配合物因其独特的平面四方几何结构而受到广泛关注。该类配合物不仅能够通过引入手性配体构筑分子固有手性,还可借助金属-金属相互作用($Pt \cdots Pt$)及 π - π 堆积形成高度有序的超分子组装结构,从而在聚集态或液晶相中实现手性光学信号的有效放大。此外,铂中心较强的自旋-轨道耦合效应能够显著促进系间窜越过程,赋予体系高效磷光发射特性,使其在圆偏振磷光领域展现出独特优势。近年来,研究人员围绕手性铂配合物的分子设计、手性传递机制、聚集态手性放大以及其在圆偏振有机发光二极管(CP-OLED)、智能响应材料和生物成像等领域的应用开展了大量研究工作。总体来看,该领域的发展已由早期单纯追求CPL信号的产生,逐渐转向兼顾高 g_{lum} 、高发光量子产率(PLQY)及器件性能的综合优化。为了深入分析上述性能优化过程,需引入PLQY的理论表达式,其如公式(四)所示:

$$\phi = \frac{k_r}{k_r + k_{nr}}; k_r = \frac{\omega^3 e^2}{3\pi \epsilon_0 \hbar c^3} \mu^2 \quad (四)$$

其中, k_r 与 k_{nr} 分别代表辐射与非辐射跃迁速率常数, ω 是发射光子的角频率, e 是基本电荷, ϵ_0 是真空介电常数, $\hbar$ 是约化普朗克常数, c 是真空中光速。

由上述PLQY与 g_{lum} 的表达式所揭示的物理机制可知,聚集态材料中通常存在 g_{lum} 与PLQY之间固有的权衡制约:实现高PLQY通常需要较大的 μ 以提升辐射速率 k_r ,但这会直接导致 g_{lum} 的降低;而在聚集态中,强分子间激子耦合虽能通过增强磁偶极贡献 m 或优化 μ 和 m 的相对取向来提升

g_{lum} ,却往往伴随由 π - π 相互作用诱导的非辐射衰变通道(如振动弛豫、激基复合物形成等),从而大幅提高 k_{nr} ,最终导致PLQY下降。因此,如何在保持高PLQY的同时进一步提高 g_{lum} ,实现手性信息在分子、聚集体及器件层面的高效传递,并由此提升CP-OLED等器件的综合性能,仍是未来研究的重要挑战与方向。

鉴于不同类型手性源在手性诱导方式、激发态调控机制及圆偏振发光性能方面具有显著差异,本文以手性源结构为主线,系统综述近年来基于点手性、轴手性及螺旋手性的铂配合物在圆偏振发光领域的研究进展。重点分析不同手性策略对激发态性质、手性传递、聚集态手性光学性质放大及器件性能的影响规律,并结合代表性工作比较其优势与局限。与此同时,本文还总结了其在刺激响应材料、超分子组装体系及CP-OLED中的最新应用进展,以期梳理该领域的发展脉络,并为未来高性能手性铂配合物的理性设计与应用拓展提供参考。

2 讨 论

2.1 点手性铂配合物研究进展

点手性策略作为最常用的手性设计策略之一,通过在配体上引入手性碳中心诱导整个铂配合物产生手性光学性质,具有合成便捷、结构易调以及手性源丰富等优势。由于点手性配体易于与不同类型配位骨架相结合,因此该策略成为最早应用于手性铂配合物圆偏振发光研究的重要设计路线。目前,点手性体系的发展已由早期验证分子手性能够诱导CPL产生,逐渐演变为利用聚集态结构调控、超分子自组装及器件集成实现手性信号放大和综合性能提升。

在超分子自组装与激发态手性传递机制研究方面,Shinozaki课题组通过研究铂配合物(+)-Pt1的单体、二聚体和三聚体的发射性质,揭示了 $Pt \cdots Pt$ 相互作用在聚集体形成中的核心作用。其单体的金属到配体的电荷转移(Metal-to-Ligand Charge Transfer, 3MLCT)发射几乎无CPL信号,而通过 $Pt \cdots Pt$ 相互作用形成的激基缔合物和三聚体的 3MMLCT (Metal-to-Metal-to-Ligand Charge Transfer)发射则表现出明显的CPL活性($g_{PL} = +5.0 \times 10^{-4}$),说明手性经过激发态聚集得以传递与放大(图2和表1)^[20]。该工作首次揭示了 $Pt \cdots Pt$ 相互作用不仅能够改变激发态性质,还能够促

进手性信息在聚集体中的有效传递,为后续利用聚集诱导增强CPL性能奠定了基础。

通过引入特定的功能化取代基或调控外部环境,可以精准操控分子的非共价相互作用与组装形貌。例如,Zhang等通过在异腈配体中引入长烷基链构筑了配合物(-)-Pt2,于非极性溶剂中形成螺旋堆积聚集态,显著增强了圆二色信号和不对称因子($g_{\text{PL}} = +1.8 \times 10^{-4}$),在固态下研磨后PLQY高达99.26%,呈现出高对比度的力致发光变色性质(图2和表1)^[21]。He和Zhu课题组则通过微调手性樟脑酮连接基团,实现了对三齿铂配合物(D/L)-Pt3组装路径的精准控制。利用溶剂诱导的超分子聚合实现了从纳米环、纳米扭带到微带的多级组装调控;组装体CD信号较单体增强约70倍,聚集诱导的³MMLCT发射呈现圆偏振发光活性,不对称因子达 ± 0.013 ,证实了分子手性向超分子螺旋结构的有效传递与放大(图3a-b和表1)^[22]。De Cola研究团队通过在辅助配体中引入手性单元合成了三齿铂配合物S-Pt4,其单体在溶液中无CD信号,自组装成螺旋纤维后,CD信号

由0显著增强至30 mdeg,并呈现出与其对映体镜像对称的多重Cotton效应峰,实现了从分子手性到超分子螺旋结构的高效传递与放大(图2和表1)^[23]。

此外,Zhang等人通过在三齿配体上引入氟原子合成配合物(-)-Pt5,从而增强分子间Pt···Pt相互作用并促进更高聚合度螺旋组装体形成,在水相聚集态中实现CPL从极弱到可测(PLQY = 43.89%, $g_{\text{PL}} = -1.2 \times 10^{-3}$)(图2和表1)^[24]。Haino等人同样构建了手性三齿铂配合物(R/S)-Pt6,其在甲苯中形成螺旋堆积结构,表现出强烈的聚集诱导发光增强和聚集诱导圆偏振发光特征($g_{\text{PL}} = \pm 0.01$, PLQY = 2.5%)(图2和表1)^[25]。上述研究表明,点手性本身所产生的圆偏振发光通常较弱,而通过Pt···Pt相互作用、 π - π 堆积以及超分子自组装形成有序聚集结构后,可显著增强激发态手性耦合,实现CPL信号放大。由表1可知,大多数点手性单分子体系的 g_{PL} 主要集中于 10^{-4} 数量级,而具有高度有序聚集结构的体系已能够达到 10^{-2} 数量级以上,充分体现了聚集态工程的重要作用。

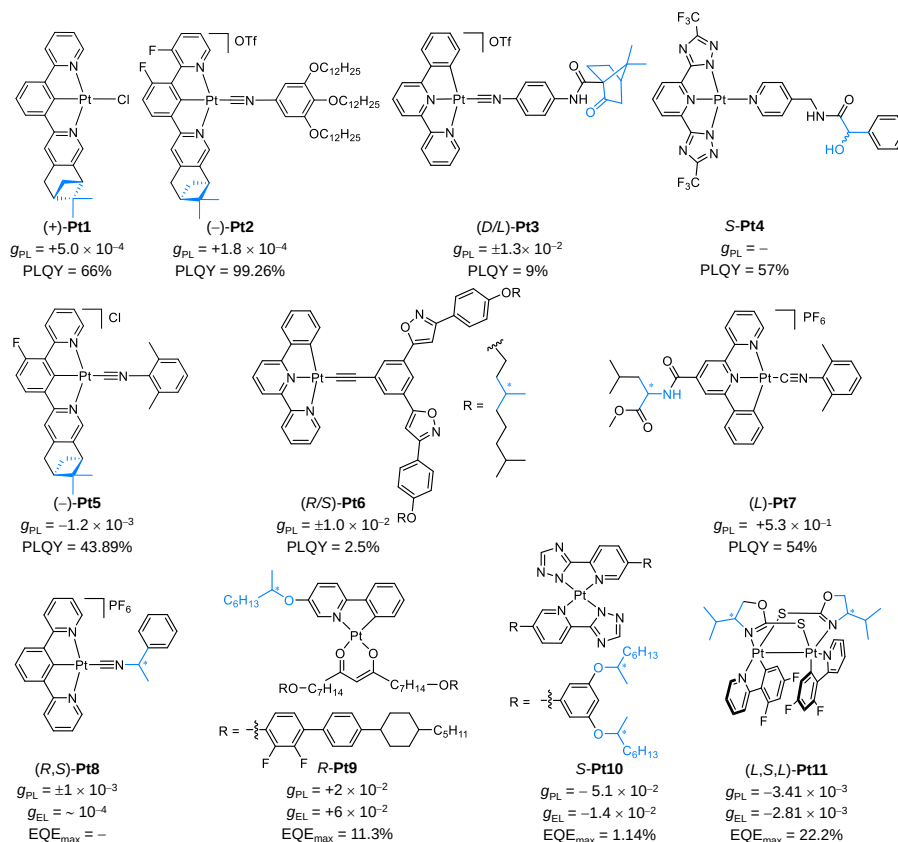


图2 点手性铂配合物的化学结构与光物理性质数据

Fig.2 Chemical structures and photophysical data of point-chiral platinum complexes

表 1 手性铂配合物的光物理与手性光学数据

Table 1 Photophysical and chiro-optical data of chiral platinum complexes

Complex	State	λ_{PL} (nm)	τ (μs)	PLQY (%)	$g_{\text{PL}}/g_{\text{EL}}$	EQE _{max} (%)	Refs.
(+)-Pt1	Aggregate	675	8.4	66	$+5.0 \times 10^{-4} / -^a$	—	[20]
(-)-Pt2	Assembly	640	—	99.26	$+1.8 \times 10^{-4} / -$	—	[21]
(D/L)-Pt3	Assembly	687	0.23	9	$\pm 1.3 \times 10^{-2} / -$	—	[22]
S-Pt4	Assembly	560	0.58	57	—	—	[23]
(-)-Pt5	Assembly	650	—	43.89	$-1.2 \times 10^{-3} / -$	—	[24]
(R/S)-Pt6	Assembly	580	—	2.5	$\pm 1.0 \times 10^{-2} / -$	—	[25]
(L)-Pt7	Film	655	0.53	54	$+5.3 \times 10^{-1} / -$	—	[26]
(R/S)-Pt8	Doped-film	550	—	—	$\pm 1 \times 10^{-3} / \sim 10^{-4}$	—	[27]
R-Pt9	Annealed-film	504	13.2	75	$+2 \times 10^{-2} / +6 \times 10^{-2}$	11.3	[28]
S-Pt10	Annealed-film	615	11.3	86	$-5.1 \times 10^{-2} / -1.4 \times 10^{-2}$	1.14	[29]
(L,S,L)-Pt11	Powder	619	2.73	100	$-3.41 \times 10^{-3} / -2.81 \times 10^{-3}$	22.2	[30]
S-Pt12	Film	656	1.37	2.2	$+6.0 \times 10^{-3} / -$	—	[31]
R-Pt13	Assembly	640	—	—	$+1.33 \times 10^{-1} / -$	—	[32]
R-Pt14	Doped-film	540	21	25	$+1.0 \times 10^{-3} / +1.09 \times 10^{-4}$	1.2	[33]
R-Pt15	Doped-film	715	0.5	66	$+2.6 \times 10^{-3} / +1.1 \times 10^{-3}$	2.15	[34]
(R/S)-Pt16	Doped-film	610	7.9	21	$\pm 1.9 \times 10^{-3} / \pm 2.0 \times 10^{-3}$	3.1	[35]
S-Pt17	Doped-film	627	30.5	86.4	$-1.31 \times 10^{-3} / -2.98 \times 10^{-3}$	12.6	[36]
(R,R,R)-Pt18	Doped-film	605	3.43	80.3	$+2.2 \times 10^{-3} / +2.0 \times 10^{-3}$	14.3	[37]
(P/M)-Pt19	Solution	720	—	0.15	$\pm 3.0 \times 10^{-4} / -$	—	[38]
(-)-Pt20	Solution	501	—	73.2	$+1.05 \times 10^{-3} / -$	—	[39]
(R/S)-Pt21	Solution	600	0.21	1	$\pm 1.0 \times 10^{-2} / -$	—	[40]
(RR)-Pt22	Solution	668	4.8	4	$+3.2 \times 10^{-3} / -$	—	[41]
(-)-Pt23	Doped-film	625	—	10	$-0.22 / -0.38$	—	[42]
M-Pt24	Solution	612	15.7	27	$+3.7 \times 10^{-3} / +1.4 \times 10^{-3}$	18.81	[43]
M-Pt25	Solution	650	—	—	$+6.0 \times 10^{-3} / +1.3 \times 10^{-3}$	4.6	[44]
R-Pt26	Solution	616	0.14	1.99	$-3.5 \times 10^{-3} / -$	—	[45]
P-Pt27	Solution	608	4.6	51	$+6.83 \times 10^{-3} / +6.81 \times 10^{-4}$	12.6	[46]

a. Not determined.

Zhong课题组采用旋涂法制备了三齿铂配合物(L)-Pt7的薄膜。在乙腈中,该配合物薄膜分级组装形成由纳米纤维相互缠结而形成高度结晶纤维网状结构,对应SEM图像中显示的致密交织纤维形貌,实现了优异的CPL性能($g_{\text{PL}} = +0.53$, PLQY = 50%)。相比之下,以二氯乙烷为溶剂旋涂得到的薄膜几乎观察不到明显的组装结构,且CPL信号发生反转,说明不同分子堆积模式与结晶度是决定手性放大方向与幅度的关键^[26](图3c-e和表1)。这一工作获得了目前纯手性三齿铂配合物薄膜中最高的 g_{PL} 纪录之一,有力地证明了微观组装形貌对CPL性能的影响甚至超过单分子结构本身,为后续利用组装工程调控圆偏振发光提供了新的设计思路。

随着点手性体系聚集态CPL性能不断提升,研究重点进一步由基础光物理研究拓展至圆偏振电致发光器件。如何在保持较高发光效率的同时实现稳定、高效的圆偏振电致发光信号输出,成为近年来该方向的重要研究目标。例如,Zhao课题组合成了以手性异氰基为辅助配体的离子型铂配合物(R/S)-Pt8,通过提高浓度或掺杂比促使激基

缔合物形成,使CPL的 g_{PL} 值从 10^{-4} 放大至 10^{-3} 量级,初步验证了三齿铂配合物溶液加工CP-OLED的可行性($g_{\text{EL}} = \sim 10^{-4}$)(图2和表1)^[27]。

为突破点手性策略难以获得高不对称因子的天然局限,研究者开始引入协同放大机制。例如,Wang和Duan等人采用液晶性与点手性的协同设计策略,实现了配合物在液晶态的有序组装,构建了具有高发光不对称因子($g_{\text{PL}} = +2 \times 10^{-2}$)的铂配合物R-Pt9。基于R-Pt9的溶液加工型CP-OLED实现了高的外量子效率(EQE_{max} = 11.3%)和发光不对称因子($g_{\text{EL}} = +6 \times 10^{-2}$),代表了当前铂配合物溶液加工绿光CP-OLED的最高性能之一(图4a-b和表1)^[28]。类似的,Cheng等人也利用上述策略并将其拓展至同手性均配型三唑铂体系,合成了具有液晶特性的手性二齿铂配合物S-Pt10,实现了手性信号放大($g_{\text{PL}} = -5.1 \times 10^{-2}$),基于配合物S-Pt10的溶液加工型CP-OLED同样具有高的发光不对称因子($g_{\text{EL}} = -1.4 \times 10^{-2}$)(图4c-d和表1)^[29]。

除了上述单核手性铂配合物,Song等人提出“软桥联”策略构筑了性能优异的双核手性铂配合

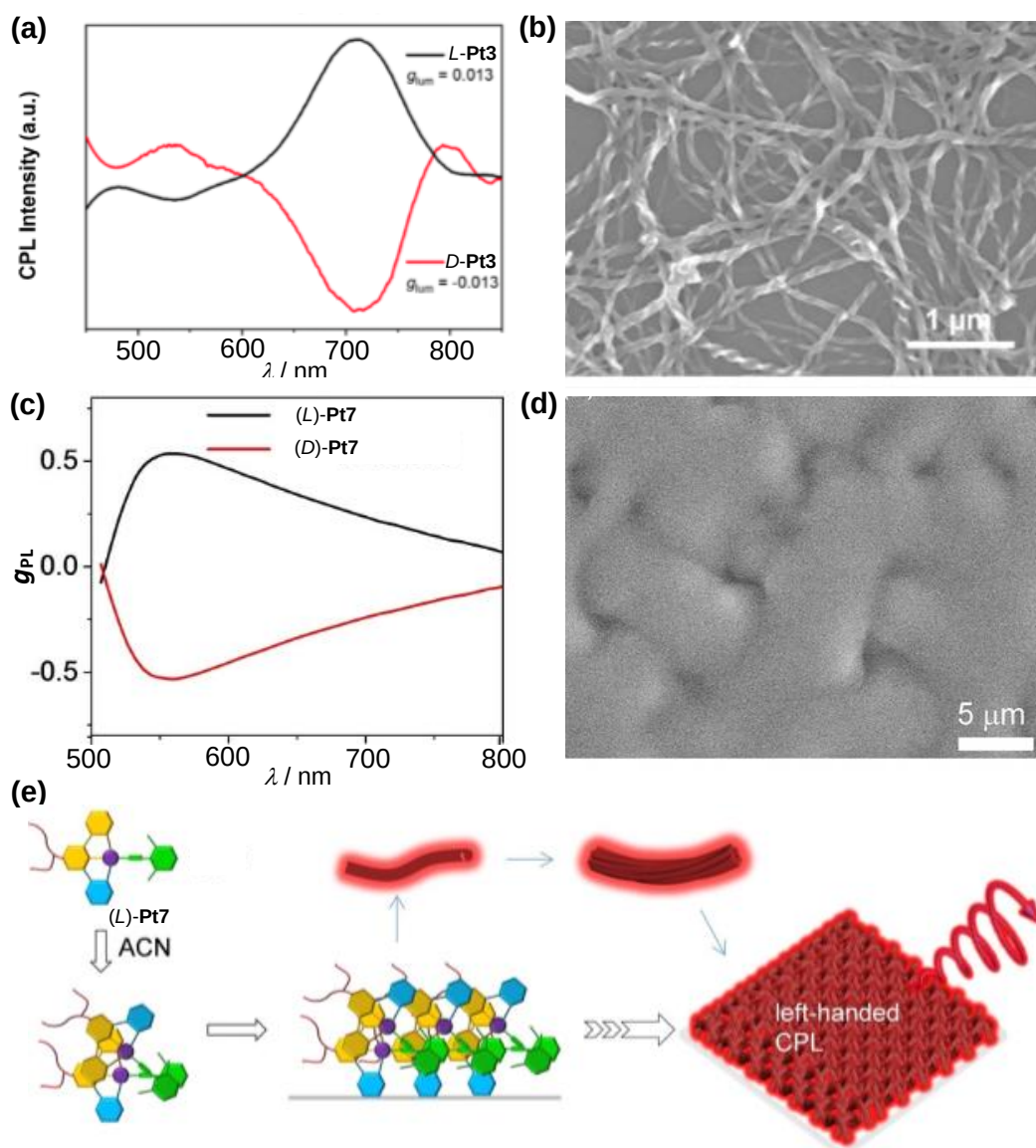


图3 (a) (D/L) -Pt3 的 CPL 光谱图^[22]; (b) (D) -Pt3 组装体的扫描电镜图^[22]; (c) (L) -Pt7 的 g_{PL} 谱图^[26]; (d) (L) -Pt7 以乙腈为溶剂旋涂薄膜的扫描电镜图^[26]; (e) (L) -Pt7 的组装机理示意图^[26]

Fig.3 (a) CPL spectra of (D/L) -Pt3^[22]; (b) SEM image of (D) -Pt3 assemblies^[22]; (c) g_{PL} spectra of (L) -Pt7^[26]; (d) SEM image of the spin-coated (L) -Pt7 thin film prepared from acetonitrile^[26]; (e) Schematic illustration of the assembly mechanism of (L) -Pt7^[26]

物 (L,S,L) -Pt11, 通过缩短 Pt···Pt 距离实现了近 100% 的磷光量子产率。基于 (L,S,L) -Pt11 的溶液加工型 CP-OLED 展现出优异的综合性能($E_{QE-max} = 22.2\%$, $g_{EL} = -2.81 \times 10^{-3}$) (图 4e-f 和表 1)^[30]。总体来看, 近年来点手性策略的发展已逐渐由单纯依赖手性碳中心诱导, 转向液晶有序排列、双核结构设计及超分子协同放大等多种策略相结合。特别是液晶态有序组装和双核铂配合物的引入, 在提升激子利用效率的同时进一步增强了手性信息传递, 使 CP-OLED 器件的 EQE 和 g_{EL} 同步提高, 标志着点手性体系开始由基础研究迈向实际光电

应用。

2.2 轴手性铂配合物研究进展

尽管点手性策略具有设计简单、配体来源丰富等优势, 但由于手性中心与发光中心通常相距较远, 其手性诱导效率和构型刚性仍存在一定局限。为了进一步增强手性信息传递并提高体系稳定性, 研究者逐渐将目光转向构型更加刚性的轴手性体系。相较于点手性诱导, 基于联萘骨架等平台的轴手性策略, 凭借其手性环境稳定、分子结构易修饰及聚集态发光可调控等优势, 成为提升铂配合物手性光学性质和 CP-OLED 性能的另一

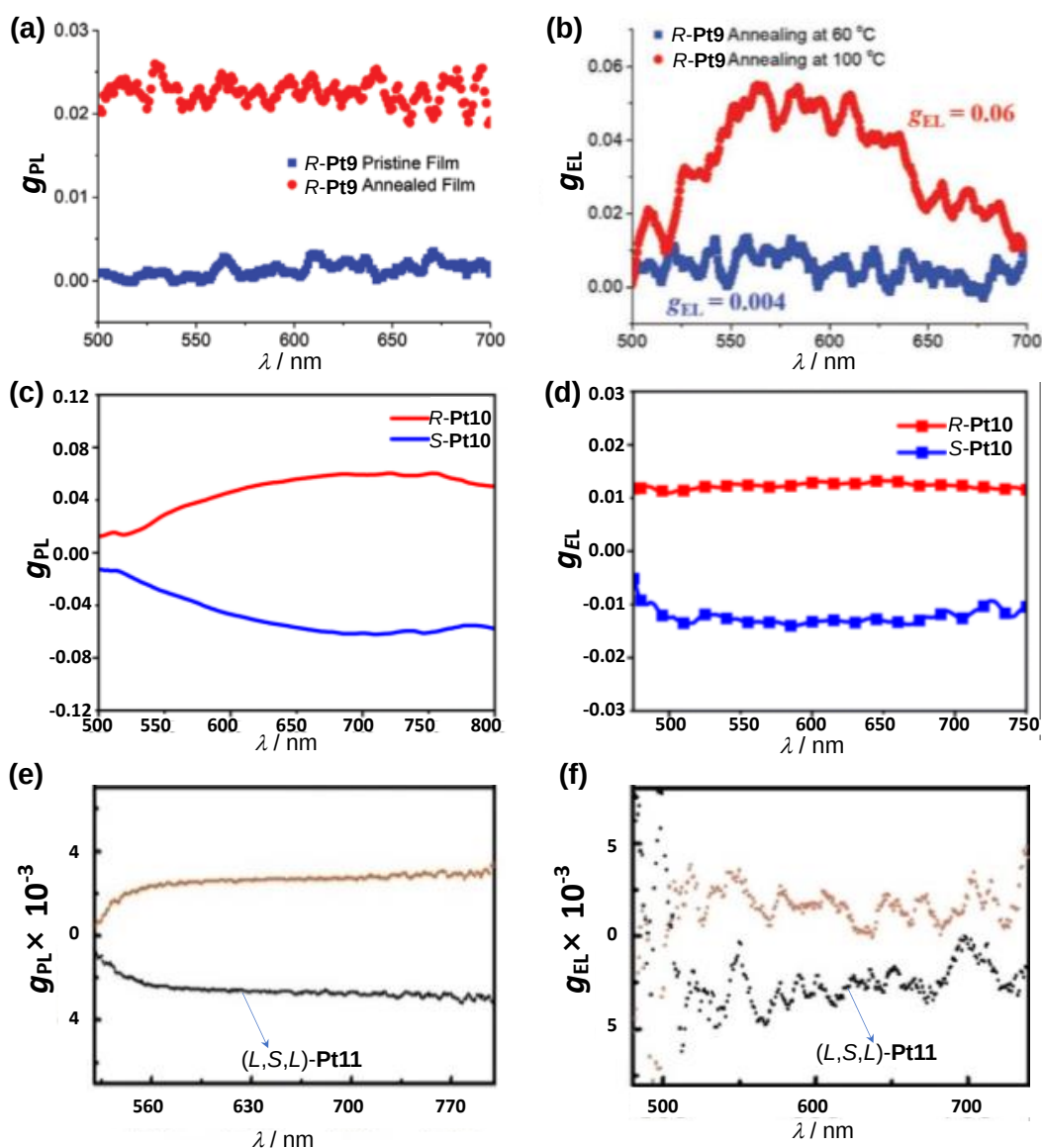


图4 (a) *R*-Pt9 的 g_{PL} 谱图^[28]; (b) *R*-Pt9 的 g_{EL} 谱图^[28]; (c) 在 140 °C 热退火处理后 *S*-Pt10 薄膜的 g_{PL} 谱图^[29]; (d) *S*-Pt10 的 g_{EL} 谱图^[29]; (e) (*L, S, L*)-Pt11 粉末的 g_{PL} 谱图^[30]; (f) (*L, S, L*)-Pt11 的 g_{EL} 谱图^[30]

Fig.4 (a) g_{PL} spectra of *R*-Pt9^[28]; (b) g_{EL} spectra of *R*-Pt9^[28]; (c) g_{PL} spectra of *S*-Pt10 thin film after annealing at 140 °C^[29]; (d) g_{EL} spectra of *S*-Pt10^[29]; (e) g_{PL} spectra of (*L, S, L*)-Pt11 powder^[30]; (f) g_{EL} spectra of (*L, S, L*)-Pt11^[30]

有效途径。例如, Xiang 等人利用轴手性的 1,1'-联二萘酚作为桥连配体, 2-苯基吡啶作为辅助配体, 构建了具有手性发光性能的双核铂配合物 *S*-Pt12, 其在聚集态下展现的红色圆偏振磷光发射 ($\lambda_{PL} = 656 \text{ nm}$, $g_{PL} = 6.0 \times 10^{-3}$) 主要源于配体内的电荷转移三重态 (Intraligand Charge Transfer, ³ILCT) 以及金属铂到 2-苯基吡啶的电荷转移三重态 (图 5a 和表 1)^[31]。该工作证明了轴手性骨架能够稳定地将手性信息传递至铂中心, 为后续利用刚性桥连结构提高 CPL 性能提供了新的设计思路。

Cheng 等人将铂配合物液晶 *R*-Pt13 与锚定型

手性联萘诱导剂共组装, 构建了手性共组装体系, 该体系薄膜在室温下仅呈现微弱的 CPL 信号, 经 180 °C 退火后形成扭曲纳米带, 展现出绿光 CPL 信号 ($\lambda_{PL} = 545 \text{ nm}$, $g_{PL} = 0.038$), 进一步升高温度至 260 °C 退火后转化为螺旋纳米纤维, 最终转变为强的红光 CPL 信号 ($\lambda_{PL} = 640 \text{ nm}$, $g_{PL} = 0.133$) (图 5a 和表 1)^[32]。值得注意的是, 该体系实现了由退火诱导的发光颜色和 CPL 性能的同步调控, 说明液晶有序结构不仅能够增强手性信号, 还可实现刺激响应型圆偏振发光, 为智能光学材料的发展提供了新的可能。You 等人报道了含联萘衍生物的单核铂配合物 *R*-Pt14, 利用手性聚合

物主体的非对映异构增强策略,有效实现手性信号的放大($g_{\text{PL}} = +1.0 \times 10^{-3}$, $g_{\text{EL}} = +1.09 \times 10^{-4}$) (图 5a 和表 1)^[33]。类似的,Chen 和 Liu 等人也设计合成了基于联萘酚衍生物的单核铂配合物 *R*-Pt15, 利用配合物的聚集诱导特性,有效增强了发光效率 (PLQY = 66%) 和不对称因子 ($g_{\text{PL}} = +2.6 \times 10^{-3}$), 以此作为发光层溶液加工制备了 *R*-Pt15 的

CP-OLED 器件 ($\text{EQE}_{\text{max}} = 2.15\%$, $g_{\text{EL}} = +1.1 \times 10^{-3}$) (图 5a-c 和表 1)^[34]。上述研究表明,轴手性体系不仅具有稳定的构型优势,而且能够与聚集诱导发光、液晶有序排列等策略相结合,实现发光效率和手性信号的同步提升。相比点手性体系,其手性环境更加刚性,构型保持能力更强,因此能够在较高发光效率下维持稳定的 CPL 性能。

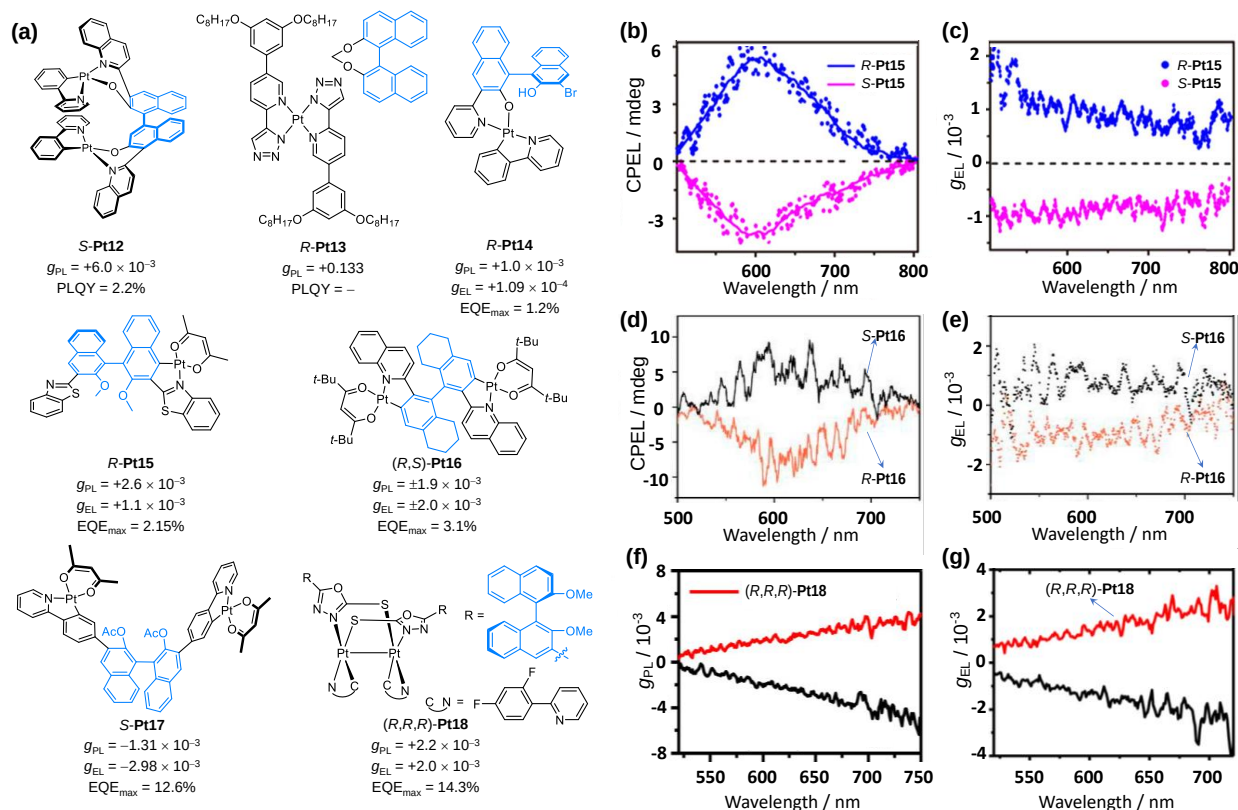


图 5 (a) 轴手性铂配合物的化学结构与光物理性质数据; (b) *R*-Pt15 的圆偏振电致发光光谱图^[34]; (c) *R*-Pt15 的 g_{EL} 谱图^[34]; (d) (*R,S*)-Pt16 的圆偏振电致发光光谱图^[35]; (e) (*R,S*)-Pt16 的 g_{EL} 谱图^[35]; (f) (*R,R,R*)-Pt18 的 g_{PL} 光谱^[37]; (g) (*R,R,R*)-Pt18 的 g_{EL} 谱图^[37]

Fig.5 (a) Chemical structures and photophysical data of axial chiral platinum complexes; (b) CPEL spectra of *R*-Pt15^[34]; (c) g_{EL} spectra of *R*-Pt15^[34]; (d) CPEL spectra of (*R,S*)-Pt16^[35]; (e) g_{EL} spectra of (*R,S*)-Pt16^[35]; (f) g_{PL} spectra of (*R,R,R*)-Pt18^[37]; (g) g_{EL} spectra of (*R,R,R*)-Pt18^[37]

然而,单核轴手性体系在器件效率和发光不对称因子之间仍存在一定权衡关系,因此近年来研究重点进一步转向双核铂配合物的构筑,希望通过增强 $\text{Pt} \cdots \text{Pt}$ 相互作用和调控激发态行为实现综合性能的提升。例如,为了进一步提升联萘骨架轴手性铂配合物 CP-OLED 的器件性能, Xiang 和 Xu 等人系统发展了双核铂策略,合成出以氢化联萘为桥连配体的双核铂配合物 (*R,S*)-Pt16。通过将配位点远离手性轴,减少了构型扭曲,同时调控分子堆积,有效实现手性信号放大 ($g_{\text{PL}} = \pm 1.9 \times 10^{-3}$), 相应的溶液法 CP-OLED 实现

了 3.1% 的最大外量子效率与 2.0×10^{-3} 的发光不对称因子 (图 5d-e 和表 1)^[35]。随后,该团队进一步利用轴手性联萘桥连的双核铂配合物 *S*-Pt17 实现了浓度依赖的多色圆偏振电致发光,在 5 wt% 低掺杂浓度下 EQE_{max} 高达 12.6%, g_{EL} 为 -2.98×10^{-3} (图 5 和表 1)^[36]。此后,该团队采用“软桥联”策略构筑了双核铂配合物 (*R,R,R*)-Pt18, 通过引入手性联萘衍生物基团,实现了高达 99% 的非对映选择性自组装,避免了复杂的手性高效液相色谱拆分步骤。基于该配合物的溶液加工型 CP-OLED 综合性能优异 ($\text{EQE}_{\text{max}} = 14.3\%$, $L_{\text{max}} = 32200 \text{ cd m}^{-2}$,

$g_{EL} = +2.0 \times 10^{-3}$) (图 5f-g 和表 1)^[37]。该研究表明, 基于双核铂配合物的轴手性策略, 有效解决了单核体系效率与不对称因子的矛盾, 为实现高效圆偏振电致发光提供了新思路。同时, 也进一步说明桥连方式、双核间距及空间构型协同调控, 是影响轴手性体系激发态性质及器件性能的重要因素, 为今后高性能双核手性铂配合物的设计提供了理论依据。

2.3 螺旋手性铂配合物研究进展

随着研究的不断深入, 提高发光中心与手性中心之间的耦合程度成为获得高 g_{PL} 的关键。相比于点手性与轴手性策略, 螺旋手性(如螺烯骨架)能够将手性源直接融入发光共轭体系中, 实现两者的本征融合。这种独特的扭曲共轭结构显著增强了磁偶极跃迁贡献, 从而大幅放大了圆偏振发光不对称因子并提升整体手性光学活性。例如, Avarvari 和 Hauser 等人合作利用螺烯二硫醇配体构建了铂配合物(*P/M*)-Pt19, 在乙腈溶液中, 该配合物呈现近红外手性发光($\lambda_{PL} = 720 \text{ nm}$, $g_{PL} = \pm 3.0 \times 10^{-4}$), 光物理归属为 $^3ILCT/^3MLCT$ 的混合激发态(图 6a 和表 1)^[38]。Zhang 等人合成了含蒽烯修饰的四齿手性铂配合物(-)-Pt20。单晶结构显示其金属中心呈扭曲四方平面, 并形成了铂中心螺旋手性, 该配合物在 DMSO/H₂O 中表现出显著的聚集诱导发光增强行为, 聚集态的量子产率达 73.2%; 其二氯甲烷溶液可检测到明显的圆偏振发光信号($g_{PL} = +1.05 \times 10^{-3}$), 其源于 $^3IL/^3MLCT$ 混合激发态(图 6a 和表 1)^[39]。Ikeshita 等人合成了基于螺烯席夫碱配体的手性铂配合物(*R/S*)-Pt21。单晶研究表明, 金属铂中心的扭曲四方配位与螺烯共同定义了其绝对构型, 其在稀二氯甲烷溶液中表现出强烈的红色圆偏振磷光($\lambda_{PL} = 600 \text{ nm}$, $g_{PL} = \pm 1.0 \times 10^{-2}$) (图 6b 和表 1)^[40]。Inoue 与 Morisaki 等人利用 1,2-二氨基环己烷为点手性源, 合成了 C₂ 对称的螺旋型铂(II)配合物(*RR*)-Pt22, 并建立了三重态子能级动力学模型, 成功预测了 g_{lum} 值, 实验测得 $g_{PL} = +3.2 \times 10^{-3}$ (图 6c 和表 1), 理论与实验结果高度吻合, 为理论指导高不对称因子的圆偏振磷光材料设计提供了新思路^[41]。上述研究主要围绕螺旋手性配体的构筑及其激发态光物理机制展开, 证明螺旋共轭骨架能够有效增强磁偶极跃迁贡献, 并实现较大的 g_{PL} 。其中, 理论计算与实验结果的结合进一步揭示了螺旋构

型、电子结构及圆偏振发光性能之间的内在联系, 为高性能螺旋手性材料的理性设计提供了重要依据。

在实现较大 g_{PL} 的基础上, 近年来研究重点进一步转向高效率 CP-OLED 器件开发。Fuchter 等人构建了螺烯二齿铂配合物(-)-Pt23, 得益于螺烯本征手性的高效手性传递, (-)-Pt23 在光致发光和电致发光中均表现出高发光不对称因子, 并初步验证了其在溶液加工 CP-OLED 中的可行性(图 6d-e 和表 1)^[42]。针对螺烯铂配合物溶液法器件效率低的问题, Zheng 研究团队开展了系统的研究工作。该团队首先通过在螺烯中引入 -F 和 -CF₃ 等强吸电子基团, 显著提升了螺烯二齿铂配合物(*M*-Pt24)的热稳定性, 采用真空蒸镀工艺, 实现了 *M*-Pt24 的 CP-OLED 器件性能的显著提升($EQE_{max} = 18.81\%$, $L_{max} = 11590 \text{ cd m}^{-2}$, $g_{EL} = +1.4 \times 10^{-3}$), 体现了蒸镀工艺在实现高效圆偏振电致发光方面的巨大优势(图 6f-g 和表 1)^[43]。随后, 该团队进一步优化螺烯中取代基的位置(*M*-Pt25), 将溶液状态的不对称发光因子提升至 $+6.0 \times 10^{-3}$, 并实现了深红色电致发光($EQE_{max} = 4.6\%$, $\lambda_{EL} = 653 \text{ nm}$, $g_{EL} = +1.3 \times 10^{-3}$) (图 6a 和表 1)^[44]。此外, 该团队利用非手性配体与铂离子配位时通过空间位阻诱导产生螺旋手性的策略, 成功获得了构型稳定的螺旋手性四齿铂配合物 *R*-Pt26(图 6a 和表 1)和 *P*-Pt27, 并利用真空蒸镀工艺制备了 *P*-Pt27 的 CP-OLED($EQE_{max} = 12.6\%$, $g_{EL} = +6.81 \times 10^{-4}$) (图 6a 和表 1)^[45-46]。上述研究表明, 通过提高螺旋构型稳定性、优化电子结构以及采用真空蒸镀等器件制备工艺, 可有效兼顾器件效率和圆偏振发光性能, 推动螺旋手性铂配合物逐渐走向实际应用。

总体而言, 螺旋手性策略能够将手性中心与发光中心高度耦合, 因此通常可获得高于点手性和轴手性体系的圆偏振发光性能。其中, 以螺烯为代表的本征螺旋手性体系已实现目前铂配合物中最高水平的 g_{PL} 和 g_{EL} 之一, 充分体现了其在高性能 CPL 材料中的优势。然而, 该类体系仍存在配体合成复杂、成本较高及器件稳定性有待进一步提高等问题。因此, 未来可结合新型螺旋骨架设计、理论计算及激发态调控策略, 实现高效率、高不对称因子及高稳定性的协同优化。

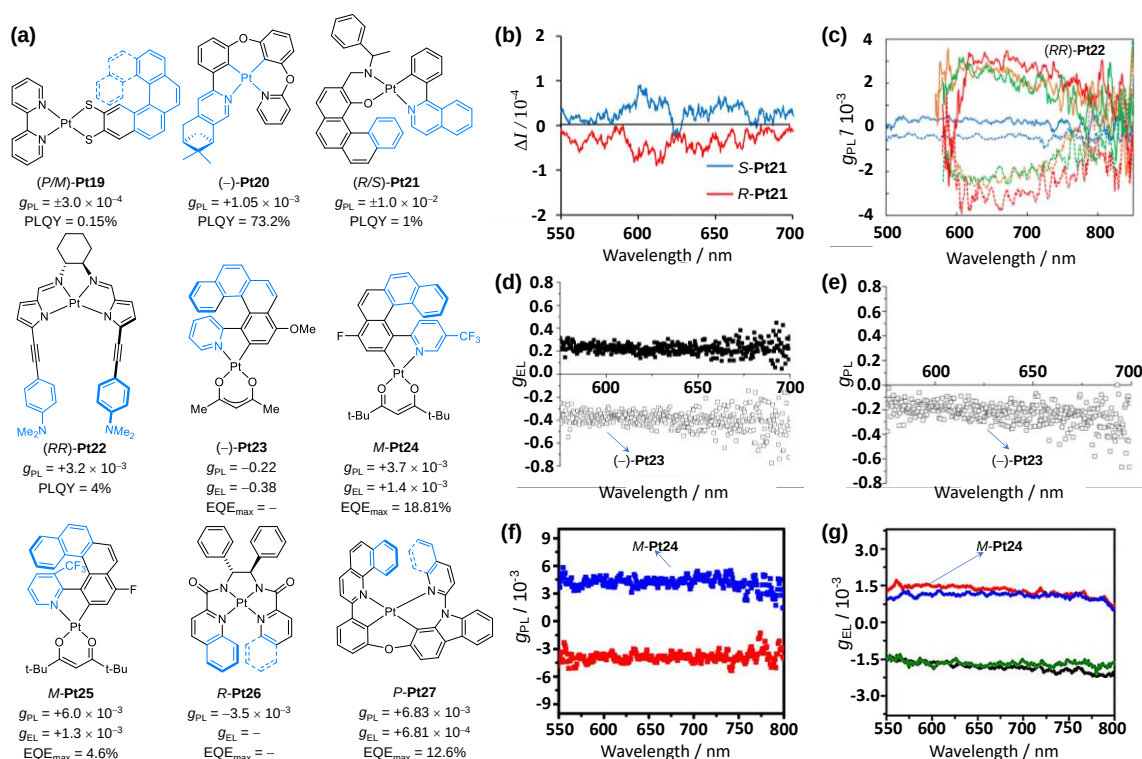


图6 (a) 螺旋手性铂配合物的化学结构及光物理性质数据; (b) (R/S)-Pt21的CPL光谱图^[40]; (c) (RR)-Pt22的 g_{PL} 谱图^[41]; (d) (-)-Pt23的 g_{EL} 谱图^[42]; (e) (-)-Pt23的 g_{PL} 谱图^[42]; (f) M-Pt24的 g_{PL} 谱图^[43]; (g) M-Pt24的 g_{EL} 谱图^[43]

Fig.6 (a) Chemical structures and photophysical data of helical chiral platinum complexes; (b) CPL spectra of (R/S)-Pt21^[40]; (c) g_{PL} spectra of (RR)-Pt22^[41]; (d) g_{EL} spectra of (-)-Pt23^[42]; (e) g_{PL} spectra of (-)-Pt23^[42]; (f) g_{PL} spectra of M-Pt24^[43]; (g) g_{EL} spectra of M-Pt24^[43]

3 结 论

本文围绕手性源结构这一主线,系统综述了近年来点手性、轴手性及螺旋手性铂配合物在圆偏振发光领域的研究进展。总体来看,手性铂配合物的发展已由早期的单分子手性诱导逐渐拓展至聚集态手性放大、多级超分子有序组装以及高性能光电器件开发,研究目标也由实现圆偏振发光逐步转向兼顾发光效率、发光不对称因子及器件性能的综合优化。

不同类型手性策略各具特点。点手性体系具有结构设计灵活、合成简便及配体来源广泛等优势,是目前研究最为成熟的体系,其研究重点已由单分子设计逐渐转向聚集态调控和超分子手性放大;轴手性体系依托刚性骨架能够提供更加稳定的手性微环境,在维持较高发光效率的同时有效提升圆偏振发光性能,并推动了双核铂配合物及高性能CP-OLED的发展;螺旋手性体系则通过将手性中心与发光中心高度耦合,实现了较大的发光不对称因子,已成为目前最具潜力的高性能圆偏振发光体系之一。综观近年来的发展可以发

现,Pt···Pt相互作用、 $\pi-\pi$ 堆积、超分子有序组装及液晶态调控等聚集态工程已成为提升圆偏振发光性能的重要共性策略,而多核结构设计和器件工程则进一步推动了手性铂配合物由基础光物理研究向实际光电应用的发展。

尽管如此,手性铂配合物的发展仍面临若干关键科学问题。首先,目前高 g_{PL} 往往依赖于聚集态或高度有序结构,而高PLQY与高 g_{PL} 之间仍存在一定程度的耦合制约,实现两者的协同提升仍是该领域亟待突破的核心问题。其次,不同层级手性结构之间的传递机制及其对激发态动力学的影响尚未完全阐明,分子结构、聚集态结构与圆偏振发光性能之间仍缺乏普适性的构效关系。此外,目前高性能体系仍主要集中于少数经典配体骨架和手性平台,新型手性构筑单元及更加高效、稳定的器件体系仍有待进一步开发。

展望未来,手性铂配合物的发展应更加注重理论指导与理性设计。一方面,可结合理论计算、激发态动力学分析及原位表征技术,深入揭示手性传递、聚集态结构演化与圆偏振发光之间的内在关

联,为高性能材料设计提供理论依据;另一方面,可进一步探索点手性、轴手性及螺旋手性等多重手性元素的协同作用,并结合超分子自组装、液晶有序排列及多核结构设计,实现圆偏振发光性能的进一步放大。同时,将机器学习与高通量计算引入分子筛选,建立分子结构—聚集态结构—光物理性质—

器件性能之间的数据模型,有望推动高性能手性铂配合物由经验驱动向数据驱动和智能设计转变。随着手性光电子学、人工智能和精准合成策略的不断发展,未来手性铂配合物有望在高性能 CP-OLED、智能响应材料、生物成像、信息加密及量子光学等领域展现更加广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] MASON S. The origin of chirality in nature [J]. *Trends Pharmacol. Sci.*, 1986, 7: 20-23.
- [2] HEGSTROM R A, KONDEPUDI D K. The handedness of the universe [J]. *Sci. Am.*, 1990, 262(1): 108-115.
- [3] KONDEPUDI D K, DURAND D J. Chiral asymmetry in spiral galaxies? [J]. *Chirality*, 2001, 13(7): 351-356.
- [4] SALAM A. The role of chirality in the origin of life [J]. *J. Mol. Evol.*, 1991, 33(2): 105-113.
- [5] SHI C M, LU H L, WANG J Y, *et al.* Stepwise amplification of circularly polarized luminescence in indium-based metal halides by regulating their structural dimension [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16: 1505.
- [6] LI Z Q, ZHANG D C, WANG H X, *et al.* Circularly polarized luminescence: materials, photophysics, devices, and applications [J]. *Sci. China Chem.*, 2026, 69(5): 2127-2192.
- [7] HAN J M, GUO S, LU H, *et al.* Recent progress on circularly polarized luminescent materials for organic optoelectronic devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(17): 1800538.
- [8] SANG Y T, HAN J L, ZHAO T H, *et al.* Circularly polarized luminescence in nanoassemblies: generation, amplification, and application [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(41): 1900110.
- [9] GREENFIELD J L, WADE J, BRANDT J R, *et al.* Pathways to increase the dissymmetry in the interaction of chiral light and chiral molecules [J]. *Chem. Sci.*, 2021, 12(25): 8589-8602.
- [10] IKESHITA M, IMAI Y, TSUBOMURA T. Recent advances in circularly polarized luminescent materials based on phosphorescent platinum(II) complexes [J]. *Chem. Lett.*, 2025, 54(4): upaf066.
- [11] GONG Z L, LI Z Q, ZHONG Y W. Circularly polarized luminescence of coordination aggregates [J]. *Aggregate*, 2022, 3(5): e177.
- [12] POP F, ZIGON N, AVARVARI N. Main-group-based electro- and photoactive chiral materials [J]. *Chem. Rev.*, 2019, 119(14): 8435-8478.
- [13] GONG Z L, ZHU X F, ZHOU Z H, *et al.* Frontiers in circularly polarized luminescence: molecular design, self-assembly, nanomaterials, and applications [J]. *Sci. China Chem.*, 2021, 64: 2060-2104.
- [14] LUNKLEY J L, SHIROTANI D, YAMANARI K, *et al.* Extraordinary circularly polarized luminescence activity exhibited by cesium tetrakis(3-heptafluoro-butylryl-(+)-camphorato) Eu(III) complexes in EtOH and CHCl₃ solutions [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130(42): 13814-13815.
- [15] 潘庆军, 龚忠亮, 钟羽武. 光功能铁配合物激发态调控的研究进展 [J]. *无机化学学报*, 2025, 41(1): 45-58.
PAN Q J, GONG Z L, ZHONG Y W. Advances in modulation of the excited states of photofunctional iron complexes [J]. *Chin. J. Inorg. Chem.*, 2025, 41(1): 45-58. (in Chinese)
- [16] WONG H Y, LO W S, YIM K H, *et al.* Chirality and chiroptics of lanthanide molecular and supramolecular assemblies [J]. *Chem*, 2019, 5(12): 3058-3095.
- [17] DOISTAU B, JIMÉNEZ J-R, PIGUET C. Beyond chiral organic (p-block) chromophores for circularly polarized luminescence: the success of d-block and f-block chiral complexes [J]. *Front. Chem.*, 2020, 8: 555.
- [18] KITAGAWA Y, TSURUI M, HASEGAWA Y. Steric and electronic control of chiral Eu(III) complexes for effective circularly polarized luminescence [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(8): 3786-3791.
- [19] PONCET M, BENCHOHRA A, JIMENEZ J, *et al.* Chiral chromium(III) complexes as promising candidates for circularly polarized luminescence [J]. *ChemPhotoChem*, 2021, 5(10): 880-892.
- [20] TANAKA S, SATO K, ICHIDA K, *et al.* Circularly polarized luminescence of chiral Pt(pppb)Cl (pppbH=1-pyridyl-3-(4,5-pinenopyridyl)benzene) aggregate in the excited state [J]. *Chem. Asian J.*, 2016, 11(2): 265-273.

- [21] ZHANG H H, XU G, LV X S, *et al.* Mechanochromism and circularly polarized luminescence of chiral cyclometalated platinum(II) complexes with different configurations and aggregated forms [J]. *Dyes Pigm.* , 2024, 221: 111833.
- [22] ZHU X L, WANG Z, JIA Y H, *et al.* Supramolecular polymerization of chiral platinum (II) complexes: transformable nanoassemblies and their amplified circularly polarized luminescence [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(34): 11671-11680.
- [23] ALIPRANDI A, CROISSETU C M, MAURO M, *et al.* Chiral amplification by self-assembly of neutral luminescent platinum(II) complexes [J]. *Chem. Eur. J.* , 2017, 23(37): 5957-5961.
- [24] JING J, XU G, ZHANG H H, *et al.* Enhanced circularly polarized luminescence in fluoro-substituted N[^]C[^]N-coordinating platinum(II) complexes [J]. *Inorg. Chim. Acta*, 2022, 541: 121067.
- [25] IKEDA T, TAKAYAMA M, KUMAR J, *et al.* Novel helical assembly of a Pt(II) phenylbipyridine complex directed by metal-metal interaction and aggregation-induced circularly polarized emission [J]. *Dalton Trans.* , 2015, 44(29): 13156-13162.
- [26] GONG Z L, DAN T X, CHEN J C, *et al.* Boost the circularly polarized phosphorescence of chiral organometallic platinum complexes by hierarchical assembly into fibrillar networks [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.* , 2024, 63(25): e202402882.
- [27] HAN J M, LU H, XU Y N, *et al.* Concentration-dependent circularly polarized luminescence of chiral cyclometalated platinum(II) complexes for electroluminescence [J]. *J. Organomet. Chem.* , 2020, 915(7): 121240.
- [28] QIAN G W, YANG X F, WANG X B, *et al.* Chiral platinum-based metallomesogens with highly efficient circularly polarized electroluminescence in solution-processed organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.* , 2020, 8(20): 2000775.
- [29] ZOU G, JIANG Z H, LI D, *et al.* Efficient helical columnar emitters of chiral homoleptic Pt(II) metallomesogens for circularly polarized electroluminescence [J]. *Chem. Sci.* , 2024, 15(44): 18534-18542.
- [30] SONG J T, XIAO H, ZHANG B, *et al.* Metal-induced planar chirality of soft-bridged binuclear platinum(II) complexes: 100% phosphorescence quantum yields, chiral self-sorting, and circularly polarized luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.* , 2023, 62(21): e202302011.
- [31] SONG J T, WANG M, XU X M, *et al.* 1D-helical platinum(II) complexes bearing metal-induced chirality, aggregation-induced red phosphorescence, and circularly polarized luminescence [J]. *Dalton Trans.* , 2019, 48(13): 4420-4428.
- [32] ZOU G, LI Q H, JIANG Z H, *et al.* Fast emission color switching of circularly polarized luminescence in platinum(II) liquid crystalline co-assembly [J]. *Chem. Sci.* , 2025, 16(24): 11049-11057.
- [33] HONG J E, KIM S, PARK G, *et al.* Chiral polymer hosts for circularly polarized electroluminescence devices [J]. *Chem. Sci.* , 2021, 12(25): 8668-8681.
- [34] JIANG Z Y, WANG J, GAO T T, *et al.* Rational design of axially chiral platinabinaphthalenes with aggregation-induced emission for red circularly polarized phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* , 2020, 12(8): 9520-9527.
- [35] WANG L, XIAO H, QU L, *et al.* Axially chiral bis-cycloplatinated binaphthalenes and octahydro-binaphthalenes for efficient circularly polarized phosphorescence in solution-processed organic light-emitting diodes [J]. *Inorg. Chem.* , 2021, 60(17): 13557-13566.
- [36] SONG J T, ZENG R, XIAO H, *et al.* Multicolor circularly polarized phosphorescence of axially chiral binuclear platinum (II) complexes [J]. *Sci. China Chem.* , 2024, 67(11): 3757-3766.
- [37] SONG J T, XIAO H, FANG L Z, *et al.* Highly phosphorescent planar chirality by bridging two square-planar platinum (II) complexes: chirality induction and circularly polarized luminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.* , 2022, 144(5): 2233-2244.
- [38] BIET T, CAUCHY T, SUN Q C, *et al.* Triplet state CPL active helicene-dithiolene platinum bipyridine complexes [J]. *Chem. Commun.* , 2017, 53(66): 9210-9213.
- [39] ZHANG H H, JING J, XU G, *et al.* Circularly polarized luminescence of pinene-modified tetradentate platinum(II) enantiomers containing fused 5/6/6 metallocycles [J]. *Heliyon* , 2022, 8(11): e11358.
- [40] IKESHITA M, WATANABE S, SUZUKI S, *et al.* Circularly polarized phosphorescence with a large dissymmetry factor from a helical platinum(II) complex [J]. *Chem. Commun.* , 2024, 60(17): 2413-2416.

- [41] INOUE R, KONDO R, MORISAKI Y. Helical induction, chiroptical properties, and quantitative prediction of the dissymmetry factor on the circularly polarized phosphorescence of iminopyrrolyl platinum(II) complexes [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(17): 7959-7970.
- [42] BRANDT J R, WANG X H, YANG Y, *et al.* Circularly polarized phosphorescent electroluminescence with a high dissymmetry factor from PHOLEDs based on a platinahelicene [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2016, 138(31): 9743-9746.
- [43] YAN Z P, LUO X F, LIU W Q, *et al.* Configurationally stable platinahelicene enantiomers for efficient circularly polarized phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Eur. J.*, 2019, 25(12): 5672-5676.
- [44] YAN Z P, LUO X F, LIAO K, *et al.* Rational design of the platinahelicene enantiomers for deep-red circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *Front. Chem.*, 2020, 8: 501.
- [45] YUAN L, DING Q J, TU Z L, *et al.* Molecular self-induced configuration for improving dissymmetry factors in tetradentate platinum(II) enantiomers cycloaddition [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2022, 33(3): 1459-1462.
- [46] YUAN L, LIU T T, MAO M X, *et al.* Configurationally stable helical tetradentate Pt(II) complexes for organic light-emitting diodes with circularly polarized electroluminescence [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(41): 14669-14674.



张哲(2002—),男,河南焦作人,硕士研究生,2025年于华侨大学获得学士学位,主要从事手性发光金属配合物的合成与应用研究。

E-mail: 2501320123@fzu.edu.cn



吴四海(1988—),男,湖南华容人,博士,副教授,硕士生导师,2015年于中国科学院化学研究所获博士学位,主要从事发光功能金属配合物的合成与应用研究。

E-mail: wusihai@hqu.edu.cn



靳毅岗(1996—),男,甘肃秦安人,博士,副研究员,硕士生导师,2022年于中国科学院化学研究所获博士学位,主要从事过渡金属配合物发光材料的构筑及其应用研究。

E-mail: jinyigang@fzu.edu.cn



钟羽武(1977—),男,浙江松阳人,博士,教授,博士生导师,2004年于中国科学院上海有机化学研究所获博士学位,主要从事光/电功能分子材料的研究。

E-mail: zhongyuwu@fzu.edu.cn