

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-18

基于给受体结构的自组装圆偏振发光材料: 组装机理与功能集成

刘昕悦¹, 裴璟泓¹, 陈炫颖^{1*}, 朱亮亮^{2*}

(1. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海市电力材料防护与新材料重点实验室, 上海 201306;

2. 复旦大学 高分子科学系, 聚合物分子工程全国重点实验室, 上海 200438)

摘要: 本文聚焦具有给体-受体(D-A)结构手性自组装策略, 系统梳理两类研究路径: 一是单分子型 D-A 体系, 将给体与受体以共价键整合, 通过分子折叠调控构象; 二是多组分 D-A 共组装体系, 利用非共价作用有序组装独立分子。在阐明两类体系能量与电子传递路径差异的基础上, 重点剖析了圆偏振荧光共振能量转移(CP-FRET)、空间电荷转移(CP-CT)等核心机制。进而, 梳理了 D-A 共组装与刺激响应、超分子聚合策略的交叉融合, 展示其在 CP-OLED、动态防伪和生物检测等领域的前沿应用。最后展望了该领域的关键挑战与未来方向, 旨在为理性设计高性能手性发光材料提供策略参考。

关键词: 圆偏振发光; 给体-受体; 手性; 自组装; 共组装

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260185

CSTR: 32170.14.CJL.20260185

Self-assembled Circularly Polarized Luminescent Materials Based on Donor-Acceptor Structures: Assembly Mechanism and Functional Integration

Liu Xinyue¹, Pei Jinghong¹, Chen Xuanying^{1*}, Zhu Liangliang^{2*}

(1. Shanghai Key Laboratory of Materials Protection and Advanced Materials in Electric Power, College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China;

2. State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, Department of Macromolecular Science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

* Corresponding Authors, E-mail: xychen@shiep.edu.cn; zhuliangliang@fudan.edu.cn

Abstract: This review focuses on donor-acceptor (D-A) chiral self-assembly strategies and systematically categorizes two research paradigms: (i) single-molecule D-A systems, wherein donors and acceptors are covalently integrated into a single molecular skeleton and their conformations are regulated through intramolecular folding; and (ii) multicomponent D-A co-assembly systems, which utilize non-covalent interactions to achieve ordered assembly of discrete donor and acceptor molecules. On the basis of elucidating the differences in energy and electron transfer pathways between the two types of systems, we highlight the core mechanisms of circularly polarized fluorescence resonance energy transfer (CP-FRET) and circularly polarized charge transfer (CP-CT). Furthermore, we review the integration of D-A co-assembly with stimulus-responsive and supramolecular polymerization strategies, and demonstrate their cutting-edge applications in CP-OLEDs, dynamic anti-counterfeiting, and biosensing. Finally, we discuss the key challenges and future directions in this field, aiming to provide strategic guidance for the rational design of high-performance chiral luminescent materials.

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 青年科学基金项目(22405087)

Supported by National Natural Science Foundation of China (22405087)

Keywords: Circularly Polarized Luminescence; Chirality; Self-Assembly; Co-Assembly

1 引 言

手性是自然界的基本属性之一,指物质系统在空间几何构型上与其镜像体无法通过旋转或平移操作实现完全叠合的不对称属性,已在多个领域中得到广泛利用^[1-6]。当手性与发光特性相融合时,便催生了圆偏振发光(Circularly Polarized Luminescence, CPL),即左旋和右旋圆偏振光的不对称发射。发光不对称因子(Luminescence Dissymmetry Factor, g_{lum})是衡量 CPL 性能的关键参数,其绝对值的最大值为 $2^{[7-12]}$ 。然而,大多数手性发光小分子的 g_{lum} 值通常较低,且固态下常因聚集导致猝灭(Aggregation-Caused Quenching, ACQ),对其实际应用造成严重制约^[9-16]。超分子自组装为突破上述瓶颈提供了创新性思路^[17-21]。相较于传统的单一分子设计,超分子自组装通过非共价相互作用(如氢键、 π - π 堆积、范德华力、疏水作用等),将简单的分子单元构建为具有复杂有序结构的一维纤维、二维片层或三维螺旋结构,从而实现 CPL 性能的放大、调控与功能集成。这不仅能显著放大手性信号(g_{lum} 可提升至 10^{-1} 甚至接近 1),还能赋予材料动态响应性与可逆调控能力。

尽管近年来涌现了大量关于手性发光材料的优秀综述,它们或聚焦于特定的材料类别,如手性钙钛矿、手性聚合物,或关注某一类光物理过程,如热激活延迟荧光、圆偏振荧光共振能量转移,但鲜有从超分子组装策略尤其是功能单元协同这一更高维度,对不同体系的构筑逻辑、调控机制与功能集成进行系统性的比较与归纳。特别地,给体-受体(Donor-Acceptor, D-A)组装策略,即利用具有给体-受体电子结构的分子单元(无论手性来源于 D-A 分子本身,还是通过手性环境传递至非手性 D-A 发光体),通过非共价相互作用集成到手性超分子框架中,已成为当前实现高效、可调、多功能 CPL 材料最具潜力的设计范式之一。本文聚焦于体系中存在 D-A 电子结构(包括分子内 D-A 和分子间 D-A 对)的手性自组装 CPL 材料。在此过程中,“军士-士兵”原则(Sergeants-and-Soldiers Principle)被广泛应用,即少量手性掺杂剂可指挥大量非手性发光分子定向排列,实现手性从分子到超分子尺度的传递与放大。如图 1c 所示,这种长程有序的组装体(如螺旋纤维)能产生显著的超分子

手性,将微弱的分子手性信号转化为强而可调的 CPL^[22-30]。

本文旨在填补现有综述的空白,聚焦于 D-A 手性自组装体系,包括:(1)单分子内自组装,即分子通过共价连接的 D-A 结构发生折叠或构象变化,形成手性发光组装体;(2)多组分共组装,即独立的给体与受体分子通过非共价相互作用在手性模板或手性环境中自发组织。如图 1d 所示,我们从两类体系的设计逻辑出发,重点剖析其核心物理机制圆偏振荧光共振能量转移(CP-FRET)、空间电荷转移(CP-CT)以及与 D-A 体系交叉的前沿拓展机制手性诱导自旋选择性(CISS),系统梳理 D-A 体系与刺激响应策略、超分子聚合策略的交叉融合,并总结其在 CP-OLED、信息加密、生物检测等领域的前沿应用,以期合理设计高性能多功能有机手性自组装圆偏振发光材料提供系统的理论指导和实践思路。

2 给体-受体手性自组装的设计逻辑与核心机制

给体-受体手性自组装发光材料代表了从单一组分向多功能集成设计的关键跨越。这类材料通过非共价相互作用将电子给体与电子受体集成到手性超分子框架中,利用手性环境对激发态过程,如电荷转移、能量转移、系间窜越的精细调控,实现从分子手性到超分子手性、再到激发态手性光学信号的多级传递与放大^[31-34]。值得强调的是,对于手性来源于手性诱导剂或手性模板、而发光功能单元本身具有 D-A 结构的情形(无论该 D-A 单元是小分子、寡聚物还是聚合物),只要 CPL 信号源自该 D-A 单元的激发态行为,仍属于本文综述范畴。

2.1 设计逻辑与功能分工

给体-受体手性自组装的设计遵循功能集成与协同原则。在手性源层面,手性单元(如手性烷基链、手性双萘、手性胺等)承担诱导整个组装体产生超分子手性的核心作用。在功能单元层面,发光/能量给体通常是宽能隙、高荧光量子产率的发色团,作为能量的供体向体系内注入能量;而能量/电子受体则多为窄能隙、强吸收或具有独特发光特性的发色团,作为能量的接收者实现能量的

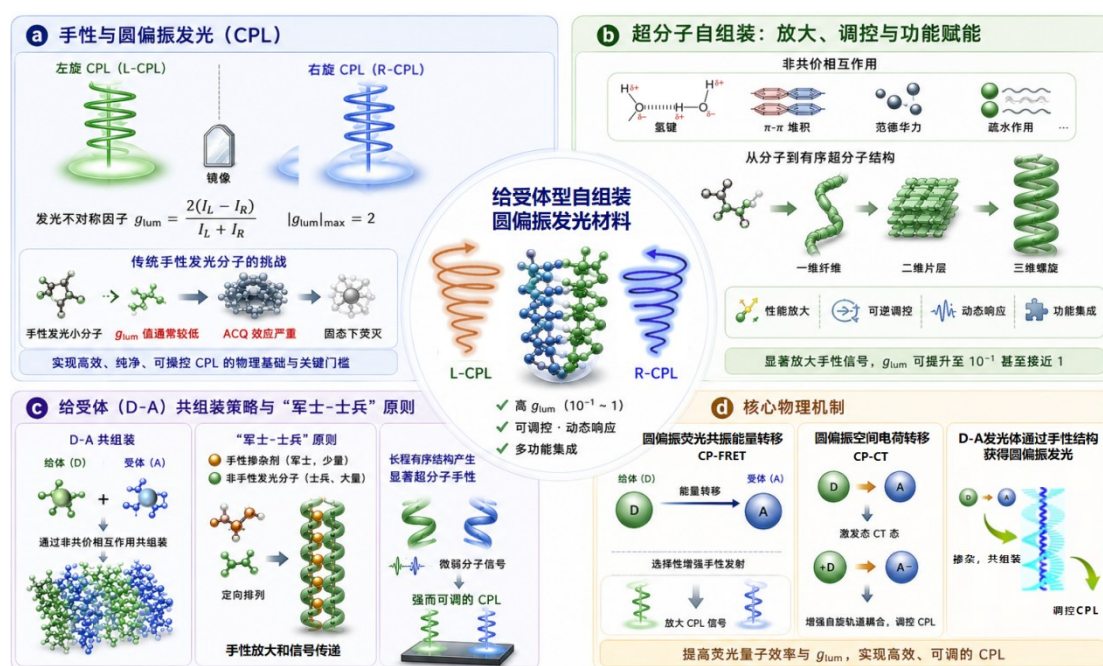


图 1 给受体型自组装圆偏振发光材料概念图: (a) 手性与圆偏振发光示意图, 展示左/右旋圆偏振光的产生; (b) 超分子自组装的手性放大、调控与功能赋能示意图, 说明从分子到超分子尺度的信号增强; (c) 给受体自组装的策略和基本规则, 概括单分子与多组分两条路径; (d) 给受体型自组装圆偏振发光材料的核心机制示意图, 总览 CP-FRET、CP-CT 与 D-A 发光体环境诱导 CPL 三种机制

Figure 1 Schematic illustration of donor - acceptor-type self-assembled circularly polarized luminescent materials: (a) schematic diagram of chirality and circularly polarized luminescence, illustrating the generation of left- and right-handed circularly polarized light; (b) schematic representation of chiral amplification, regulation, and functional empowerment via supramolecular self-assembly, highlighting signal enhancement from the molecular to the supramolecular scale; (c) strategies and fundamental rules for donor - acceptor self-assembly, outlining the two pathways of single-molecule and multicomponent systems; (d) schematic overview of the core mechanisms underlying donor - acceptor-type self-assembled circularly polarized luminescent materials, summarizing the three mechanisms of CP-FRET, CP-CT, and D - A luminophore environment-induced CPL

捕获与转换。实现协同组装的关键在于分子结构的精确设计, 通过引入互补的分子形状和相互作用 (如电荷互补、氢键配对、空间匹配), 使给体与受体能形成异质、交替排列或微相分离的有序结构, 避免简单物理混合带来的功能紊乱。基于上

述设计逻辑与协同机制, 近年来研究者围绕给体-受体手性自组装体系开展了大量探索, 从分子封装、能量转移、电荷转移到器件集成, 不断拓展其功能边界 (图 2a)。一个典型的 D-A 手性共组装范例来自于手性大环主体的客体封装策略, 例如,

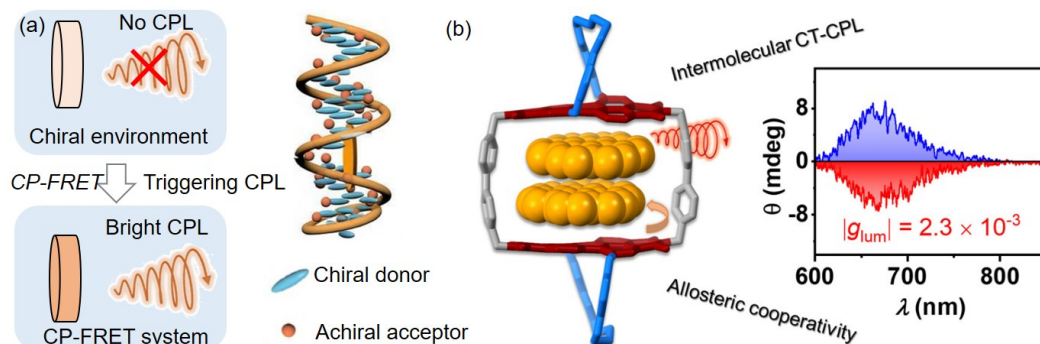


图 2 (a) 圆偏振荧光共振能量转移 CP-FRET 过程示意图; (b) 共组装大环产生 CT-CPL 发光原理示意图^[35]

Figure 2 (a) Schematic illustration of the circularly polarized Förster resonance energy transfer (CP-FRET) process; (b) schematic diagram illustrating the principle of CT-CPL emission generated through co-assembled macrocycles^[35]

2024年, Sukumaran 等人^[35]发现一种中性茈萘双酰亚胺环状化合物, 其手性空腔可通过 π - π 堆积结合两个芳香客体。该手性大环的萘双酰亚胺本身为缺电子体系, 作为电子受体; 封装的冠烯客体为富电子体系, 作为电子给体, 二者构成分子间 D-A 对。在基态时, 给体冠烯与受体大环之间即发生部分电荷转移, 激发态下电子从给体向受体转移, 形成电荷转移激发态 (CT 态), 该 CT 态的手性由手性大环空腔诱导, 从而发射源自 CT 态的 CPL。如图 2b 所示, 该环对第二个客体的封装显著优于第一个, 冠烯二聚体封装中协同因子 ($\alpha = K_2/K_1$, 即第二个客体与第一个客体的结合常数之比) 高达 485, 协同封装增强了 D-A 间的电子耦合, 使得磁性跃迁偶极矩增大, 进一步提高 $|g_{lum}|$ 值。除了大环封装, 线性二肽体系也为 D-A 能量转移提供了可调控的平台, 山东大学邢鹏遥等人^[36]于同年将萘酰亚胺以不同长度烷基连接至含酪氨酸二肽骨架, 构建了超声响应发光二肽体系。未取代与胺基取代萘酰亚胺二肽构成能量转移给体-受体对。超声激活手性后, 给体与受体间发生高效能量转移, 实现 CPL 从蓝色 (给体) 到黄色 (受体) 的转移, 并将给体的奇偶定律手性信息传递至受体。这是基于 D-A 结构的手性自组装圆偏振发光的一个实例。D-A 手性自组装体系中的能量与电子传递行为, 与单组分手性发光材料存在本质区别。在单组分体系中, 给体与受体通过共价键连接于同一分子骨架内, 能量或电子传递路径固定、距离恒定, 其手性光学响应主要来源于分子本征手性构象或分子内通过空间的给-受体相互作用。该类体系的优势在于结构明确、传递效率高, 但手性调控的自由度相对有限, 且通常难以实现信号的显著放大。

与之相比, 多组分 D-A 共组装体系通过非共价相互作用将独立的给体和受体分子集成到手性超分子框架中, 其能量与电子传递具有以下显著特征: (1) 传递路径的可设计性: 通过调控给体与受体的空间排列 (如堆积距离、取向角), 可灵活调节传递速率与效率; (2) 手性环境的集体效应: 手性来源于组装体的长程有序排列, 而非单一分子的手性中心, 因此可产生远超分子本征值的手性光学放大效应; (3) 动态可逆性: 非共价相互作用的弱键本质使得传递行为可对外界刺激产生响应, 实现功能的动态调控。值得强调的是, 两类体

系并非对立, 而是互补的。单一分子体系提供了明确的传递机制与结构模型, 是理解 D-A 相互作用的基础; 而多组分共组装体系则在此基础上引入超分子手性环境与集体效应, 是实现高 $|g_{lum}|$ 、多功能集成与动态响应的有效途径。二者的协同发展, 将推动手性发光材料从分子内设计向超分子编程的范式跨越。

2.2 核心物理机制

该体系的工作机制可概括为手性环境对激发态过程的赋能与放大。根据体系中手性来源与 D-A 发光功能单元之间关系的不同, 可将核心物理机制划分为三类: 圆偏振荧光共振能量转移 (CP-FRET)、空间电荷转移 (CP-CT), 以及 D-A 结构发光体与手性体的共组装诱导 CPL。三类机制的共同点在于, 手性单元的结构信息通过超分子相互作用传递给相邻的给体和/或受体发色团, 使其排列具有手性序, 确保光学活性来源于发色团的集体手性排列 (图 3)。

CP-FRET 是该体系中最经典的机制之一。手性给体被激发后产生的圆偏振激发能, 通过 Förster 共振能量转移高效且手性保持地传递给受体, 使受体发射的荧光不仅继承给体的手性信号, 还往往表现出显著放大的 CPL 强度和不同的发光颜色, 实现 CPL 的波长转换与信号放大。FRET 的发生需要满足两个基本条件: 给体的发射光谱与受体的吸收光谱之间存在显著重叠, 以及给体与受体在空间上足够靠近 (通常 <10 nm)。在 D-A 手性自组装体系中, 超分子组装恰好为这两个条件的满足提供了结构基础——通过非共价相互作用将给体与受体有序排列在纳米尺度的手性框架内, 既保证了光谱匹配单元的空间邻近, 又提供了手性传递的结构模板。此外, 在热激活延迟荧光 (TADF) 体系中, 给体-受体的空间和电子结构设计可调控单重态-三重态能隙, 组装优化堆积方式, 在保持手性的同时实现高效的反向系间窜越, 获得长寿命、高效率的 CPL。

空间电荷转移机制通过给体与受体之间的直接电子耦合产生圆偏振发光。在非共价组装体中, 给体分子与受体分子通过 π - π 堆积等相互作用形成面对面的 D-A 堆叠构型, 使得给体的 HOMO 与受体的 LUMO 在空间中产生直接的波函数重叠。激发后, 电子从给体向受体发生通过空间的电荷转移 (Through-Space CT), 形成电荷转移激

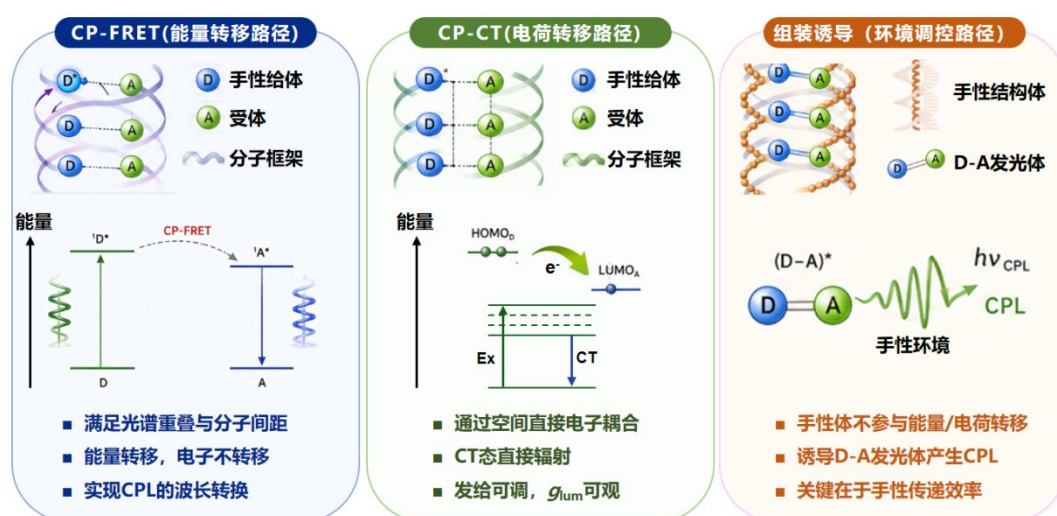


图3 给受体自组装圆偏振发光材料的三类核心机制示意图:CP-FRET(通过 Förster 共振能量转移实现手性传递与波长转换)、CP-CT(通过面对面 D-A 堆叠实现空间电荷转移直接产生 CPL),以及 D-A 发光体与手性体共组装(手性模板诱导非手性或弱手性 D-A 发光体产生 CPL)

Figure 3 Schematic illustration of the three core mechanisms of donor - acceptor self-assembled circularly polarized luminescent materials: CP-FRET, which enables chirality transfer and wavelength conversion via Förster resonance energy transfer; CP-CT, which directly generates CPL through spatial charge transfer via face-to-face D-A stacking; and co-assembly of D-A luminophores with chiral motifs, in which chiral templates induce CPL from achiral or weakly chiral D-A luminophores.

激发态,该CT态的辐射跃迁直接产生CPL。与共价键连接的分子内电荷转移相比,非共价组装体系中的CP-CT具有显著优势:通过调控组装条件可灵活调节D-A堆积距离与取向角,从而连续调控CT态能级与CPL发光颜色;同时,手性组装体的长程有序性可将微弱的手性信息放大至CT态的跃迁偶极矩中,获得较高的 $|g_{lum}|$ 值。例如,Garain等人^[37]于2025年通过手性重原子取代均苯四甲酸二酰亚胺PmDI受体与苯基咪唑给体的非共价共组装,即利用该机制在红光区实现了 $|g_{lum}|$ 高达 3.6×10^{-2} 、光致发光量子产率(PLQY)46%的优异圆偏振TADF与磷光发射。

第三类机制与前两者的本质区别在于:手性源与D-A发光功能单元分属不同分子,手性单元本身不参与能量或电荷转移过程,而是作为手性模板或手性溶剂诱导D-A发光体产生CPL。该机制的核心流程为:D-A结构发光体(无论是分子内D-A的小分子/聚合物,还是分子间D-A对)提供高荧光量子产率的发光性能;手性体通过非共价相互作用与D-A发光体共组装,形成手性超分子框架;D-A发光体被锚定在该手性环境中,其分子构象、堆积方式或跃迁偶极取向受到手性排列的约束,使得原本非手性或手性微弱的D-A发光体的

激发态获得显著的光学活性,从而发射CPL。该机制的关键在于手性传递效率,它取决于手性体与D-A发光体之间的界面耦合强度以及组装体的长程有序度。例如,2025年,中国科学院化学研究所陈传峰、李猛团队^[38]通过发光液晶LLCs与手性掺杂剂共组装,构建了本征发光的手性向列相N*-LC薄膜。他们将联苯骨架作为弱电子给体与作为弱电子受体的二辛基功能化苄结合,合成了五种具有分子内D-A特征的本征LLCs,兼具优异向列相与高亮度PLQY最高99%。在该体系中,手性掺杂剂P/M-THH作为手性模板诱导LLC分子排列成手性向列相,LLC自身的D-A共轭骨架则负责高效发光,二者功能协同实现了高亮度CPL。Kim等人^[39]于2025年基于n型手性有机单晶CICPDI-Ph作为电子受体,与p型聚合物P3HT作为电子给体的分子间D-A异质结,构建了对圆偏振光响应的柔性突触晶体管。利用界面电荷俘获与分离效应,该器件模拟了短时程可塑性、长时程增强及脉冲频率依赖可塑性。其对左/右旋圆偏振光具有显著差异化光电流响应, $|g_{lum}|$ 高达0.22-0.23。手性CICPDI-Ph单晶作为手性源,通过D-A界面耦合将手性选择性传递至光电流响应中,实现了CPL光信号的直接电学读出。除溶液

和液晶体系外,具有规整孔道的超分子有机框架也能通过主客体 D-A 相互作用增强 CPL。中科院欧阳光辉、刘鸣华团队^[40]于 2025 年基于手性双萘双脲构建了超分子有机框架(SOF),其手性孔道尺寸可调,通过尺寸匹配选择性封装客体染料并增强 CPL。该 SOF 中,手性双萘双脲骨架作为电子给体,封装的 Thioflavin T(ThT)客体作为电子受体,二者构成主客体 D-A 对。封装尺寸匹配的 Thioflavin T(ThT)后,实现了手性主体向客体的手性转移,CPL 的 $|g_{lum}|$ 值高达 1.6×10^{-2} 。DFT 计算表明,ThT 在手性孔道中形成稳定手性构象,其发射增强部分归因于主客体间的电荷转移相互作用,D-A 电子耦合进一步稳定了 ThT 的手性构象并增强了其辐射跃迁速率。

除了 CP-FRET 和空间电荷转移机制外,手性

自组装还可通过调控分子激发态能级结构实现光物理路径的原位转换(图 4)。本课题组叶丹峰等人^[41]设计了一系列 D-A-D 型手性分子,将六硫苯核心与两个吩噻嗪给体共价连接。在稀溶液中,该分子主要表现为磷光发射;经紫外光照射后,光激发诱导的分子聚集驱动了手性自组装过程,圆二色光谱在 340 nm 和 409 nm 处呈现特征性变化。伴随这一组装过程,分子的单重态-三重态能隙从较大值缩小至 0.12 eV,促使反向系间窜越过程高效发生,实现了从磷光到 TADF 的原位转变。理论计算表明,手性自组装通过增强氢键网络稳定了激发态结构,使 T1 态寿命延长并激活了多个与 S1 态共振的三重态能级。该工作不仅揭示了手性自组装对激发态能级的精细调控能力,还将 D-A 体系的应用从常规 CPL 拓展至时间分辨成像领域。

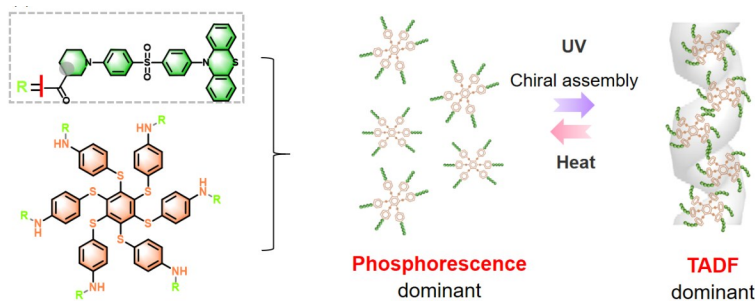


图 4 手性自组装通过增强氢键网络稳定激发态,揭示了手性自组装对激发态能级的精细调控能力^[41]

Figure 4 Chiral self-assembly stabilizes the excited state through an enhanced hydrogen-bonding network, revealing its capability for fine regulation of excited-state energy levels^[41]

值得注意的是,上述三类机制在实际体系中常常协同共存。例如,在 D-A 共组装体系中,手性体诱导 D-A 发光体排列的同时,给体与受体之间也可能同时发生 FRET 或空间 CT,三者共同贡献于最终的 CPL 信号。此外,手性诱导自旋选择性(CISS)效应为 D-A 手性自组装体系在自旋电子学中的应用提供了独特的物理基础。CISS 效应是指手性分子或手性超结构作为自旋过滤器,使得通过其中的电子自旋发生极化,一种自旋取向优先透过,而相反自旋取向被阻挡。这一效应揭示了手性、电荷与自旋之间的本征耦合关系,为非磁性材料实现自旋极化开辟了新路径^[42]。在 D-A 手性自组装体系中,CISS 效应可以与上述三类机制产生协同:手性组装体通过 CISS 效应产生自旋极化的载流子,这些自旋极化电子在 D-A 界面发生复合时,倾向于发射特定手性的圆偏振光;反之,CPL 激发产生的自旋极化激子也可通过 CISS 效应被手性电极选择性收集。例如,Naaman 等人^[43]

发现,自组装手性寡肽薄膜在室温下即可实现超过 60% 的自旋极化率,且该极化率可通过 D-A 单元的引入进一步调控。将 CISS 效应与 CP-FRET、CP-CT 及手性体共组装机制相融合,有望发展出自旋-光子界面新型器件,推动手性光电子学从被动发射向主动自旋调控跨越。

综上所述,本节所述研究通过环状主体封装、二肽给体-受体对、空间电荷转移共组装、液晶-掺杂剂复合、光激发诱导自组装以及超分子聚合等策略,不仅展示了给体-受体体系在手性共组装构筑高效圆偏振发光材料中的广泛适用性与调控潜力,更进一步揭示了 CP-FRET、空间电荷转移、TADF 协同、手性诱导自旋选择性、激发态能级调控及微相分离可视化等多重物理机制对手性信号放大与功能集成的协同贡献。

2.3 D-A 自组装与刺激响应策略的融合

刺激响应型手性自组装发光材料是指其 CPL 性能包括发光强度、不对称因子 $|g_{lum}|$ 、手性符号等

能够对外部环境刺激如溶剂、pH、温度、金属离子等产生动态、可逆响应的智能材料。当这一概念与 D-A 共组装相结合时,便催生了可在能量转移过程中实现 CPL 信号动态调控的新型体系。其调控本质是通过改变分子间的非共价相互作用,达到对手性结构的形成、取向、有序度及手性传递过程的精确控制^[45-49]。

溶剂极性是调控 D-A 共组装手性最直接的外部参数之一。在溶剂诱导方面,南京邮电大学张敬团队^[50]以非手性 BNF 与 TCAF 分子为构筑单元,利用极性溶剂诱导的手性自组装策略,成功构建

了有机共晶螺旋结构(5a)图。该体系中,BNF 作为电子给体、TCAF 作为电子受体,二者构成分子间 D-A 对。在强极性溶剂乙腈中,溶剂效应通过增强分子间氢键和超分子偶极相互作用,驱动受体 TCAF 与给体 BNF 形成交替堆叠的 D-A 柱状排列,这种有序的 D-A 堆积是螺旋形貌择优形成的结构基础。进一步加入手性添加剂(R/S)-1,1'-联萘酚后,溶剂诱导的自组装过程被导向至特定手性路径,实现了对螺旋手性的精确调控,获得单一手性的 M-型或 P-型螺旋结构,并展现出红色 CPL 特性, $\lg I_{\text{lum}}$ 达 0.005。

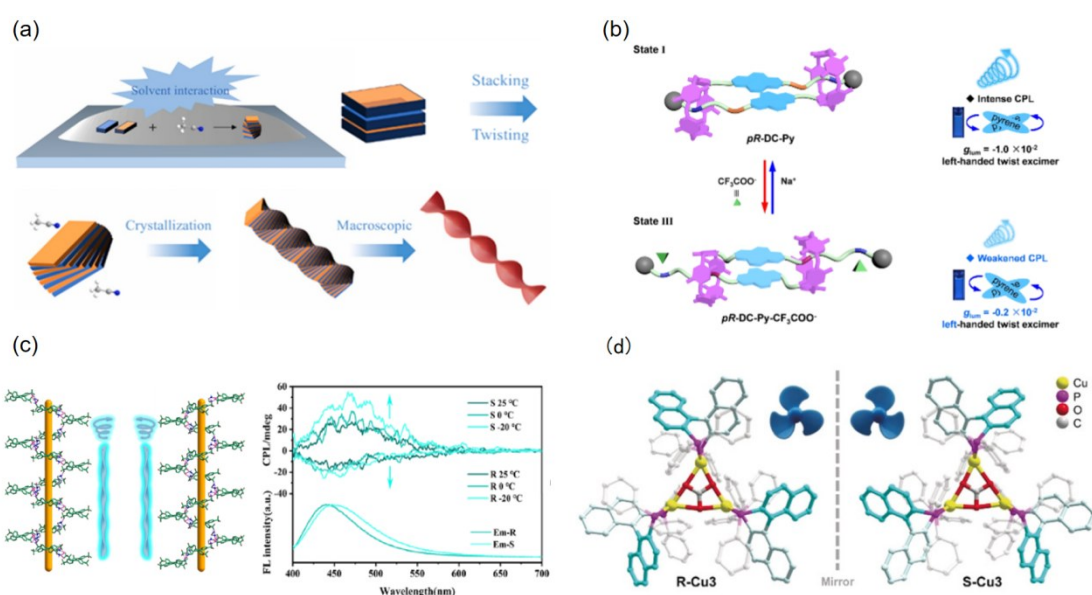


图5 (a)非手性BNF和含有D-A结构的TCAF分子通过极性溶剂诱导自组装成功构建手性发光材料示意图^[50]; (b)pH响应型手性雏菊链D-A超分子自组装体系:柱芳烃给体与茈基受体构筑D-A骨架,pH调控分子滑移实现CPL可逆切换; (c)可通过温度调控的手性离子氢键有机框架,展现出CPL发光^[52]; (d)D-A电荷转移跃迁及紫外光诱导CPL的手性三核Cu(I)簇合物(R/S-Cu₃)的螺旋桨状结构示意图^[54]

Figure 5 (a) Schematic illustration of the successful construction of chiral luminescent materials through polar solvent-induced self-assembly of achiral BNF and D-A-structured TCAF molecules^[50]; (b) pH-responsive chiral daisy-chain D-A supramolecular self-assembly system: a D-A skeleton constructed from pillararene donors and pyrene-based acceptors, enabling reversible CPL switching via pH-regulated molecular sliding; (c) temperature-tunable chiral ionic hydrogen-bonded organic framework exhibiting CPL emission^[52]; (d) schematic representation of the propeller-like structure of chiral trinuclear Cu(I) clusters (R/S-Cu₃) featuring D-A charge-transfer transitions and UV-light-induced CPL^[54]

pH响应则可以从更精密的分子层面(如质子化)逆转手性结构。在pH诱导方面,由华东师范大学杨海波教授团队^[51]开发的基于手性雏菊链的超分子自组装体系,是pH响应型D-A结构圆偏振发光领域的代表性成果。该体系依托机械互锁超分子的精准自组装策略,将平面手性柱芳烃作为手性电子给体、茈基元功能化的缺电子发光单元作为电子受体,通过非共价主客体识别一步构筑起空间排布高度可控的D-A型手性超分子骨架,

同时在互锁轴段精准嵌入可质子化的仲胺响应位点。该体系的CPL产生依赖于D-A间的空间电子耦合。酸性条件下仲胺质子化,雏菊链发生定向滑移从收缩态转为伸展态,D-A间距从收缩态拉大至伸展态,D-A间的电子波函数重叠显著减小,空间电荷转移效率大幅下降;间距增大也导致能量传递效率骤降。两方面共同作用使得手性传递效率被削弱。碱性中和后构象恢复,D-A间距复原,CPL信号可逆切换。

当金属离子直接作为电子给体(或受体)参与电荷转移时,其与配体之间构筑的给体-受体(D-A)电子耦合通道能够对CPL信号产生更直接的调控。斯特拉斯堡大学Meskers等人^[53]对光学纯双铜(I)三叶结的研究表明,Cu(I)中心作为电子给体、邻菲罗啉配体作为电子受体,二者之间构成明确的金属到配体电荷转移(MLCT)跃迁通道,其可见区MLCT吸收带表现出显著圆二色信号。发光寿命分析证实其圆偏振发光源于³MLCT态,即电子从Cu(I)给体向邻菲罗啉受体转移后的三重态复合发光;该手性D-A框架还对Tb(III)/Eu(III)手性配合物发光表现出对映选择性猝灭,证明其手性D-A结构可在能量传递过程中实现手性识别。郑州大学臧双全团队^[54]进一步将金属-配体D-A构筑单元与AIE特性相集成,设计了螺旋桨状手性三核Cu(I)簇合物(R/S-Cu₃):三个Cu(I)离子构成集体电子给体,手性BINAP配体作为电子受体,DFT计算清晰揭示HOMO定域于给体铜原子、LUMO定域于配体受体,能隙与MLCT发射波长高度吻合。该D-A电子耦合驱动MCC与³MLCT协同发光,聚集态下分子内运动受限使D-A电荷转移发射高效发生, $|g_{lum}|$ 高达 2×10^{-2} 。这一光响应过程直接证明D-A电子耦合的存在是CPL产生的必要条件,CPL的开/关与D-A电荷转移通道的通/断直接关联,为设计动态可切换的刺激响应型手性D-A发光材料提供了清晰依据。

2.4 D-A共组装与超分子聚合的协同

超分子聚合是指单体分子通过多重、可逆的非共价相互作用,在特定条件下发生一维或二维的线性生长,形成具有高分子量特征的超分子聚合物或纤维网络。当D-A体系与超分子聚合相结合时,便形成了兼具手性放大与功能协同的D-A超分子聚合物^[55-61]。

当D-A体系与超分子聚合相结合时,手性信号可以获得几何级数的放大。2023年,北京化工大学邓建平团队^[62]通过光学惰性螺旋聚乙炔与手性小分子荧光团共混,构建了一类典型的超分子聚合物体系。三对1,8-萘酰亚胺衍生物虽具分子手性与强荧光,但本身无CPL活性。与PM1共混成膜后,手性从小分子传递至螺旋聚合物并被显著放大,最大 $|g_{lum}|$ 达-0.028。聚合与聚集的双重协同是实现CPL显著增强的有效路径。同年,香

港中文大学唐本忠院士团队^[63]开发了AIEgen功能化的柱[5]芳烃超分子配位聚合物,代表了超分子聚合中聚合-聚集双协同的典型范例。如图6a所示,将Py-TPE引入柱[5]芳烃两端,利用空间位阻锁定平面手性(分离出*pR/pS*对映体),并赋予AIE特性。与Ag⁺配位形成超分子聚合物后,CD增强约1.5倍,PLQY从~0.9%升至~2.0%,出现CPL信号, $|g_{lum}| \approx 1.3 \times 10^{-4}$ 。AIE诱导水相聚集后,PLQY大幅升至~49%。

2024年,中国科学技术大学汪峰课题组^[64-65]基于三苯胺给体与萘单酰亚胺受体的超分子电荷转移配合物,构建了典型的给体-受体型超分子聚合物体系。三苯胺给体通过三叉氢键驱动形成单手性螺旋超分子聚合物,发射蓝色CPL。与萘单酰亚胺受体形成非共价给体-受体配合物后,通过调节HOMO/LUMO能级实现全可见光谱CPL可调。随后,该团队又开发了乙炔基修饰的蒽醌衍生物,通过乙炔间隔基降低扭转角,促进J-型超分子聚合。酰胺氢键形成长程有序超分子聚合物,实现手性从外围向蒽醌发光核的高效传递。该超分子聚合物实现BCPL达 $13.8 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$,并引入FRET构建颜色可调圆偏振电致发光器件。与此同时,Kimizuka等人^[66]开发了手性茈二酰亚胺,通过不对称衍生化引入L/D-谷氨酸单元及烷基链,向谷氨酸-PDI-线性烷基链的THF溶液加水时,动力学形成H-聚集体纳米颗粒,随后自发转化为热力学稳定的FE/CTE耦合螺旋纳米管,转化过程中CD、PLQY及CPL显著增强, $|g_{lum}|$ 明显提升。超声或添加晶种可加速转化,体现活体超分子聚合特性。

2025年,中国科学院国家纳米科学中心段鹏飞等人^[67]开发了基于室温磷光液晶聚合物的圆偏振磷光光波导材料(图6b),该液晶聚合物主链含有给体-受体结构单元,掺杂手性诱导剂R5011/S5011诱导螺旋排列,光交联固定后获得稳定CPP聚合物,其 $|g_{lum}|$ 达0.16-0.17。2026年,上海交通大学张书宇团队^[68]发现,通过调控氢键位点与稠合环位置,给体-受体型螺环手性荧光团(SCFs)可模拟 α -螺旋超分子堆积,为小分子构建超分子聚合物提供了新范式(图6c)。该方法显著增强CPL,组装态 $|g_{lum}|$ 达0.18并实现手性反转,在分子溶液中实现约 10^{-3} 量级 $|g_{lum}|$ 。

除传统超分子聚合外,嵌段共聚物的微相分

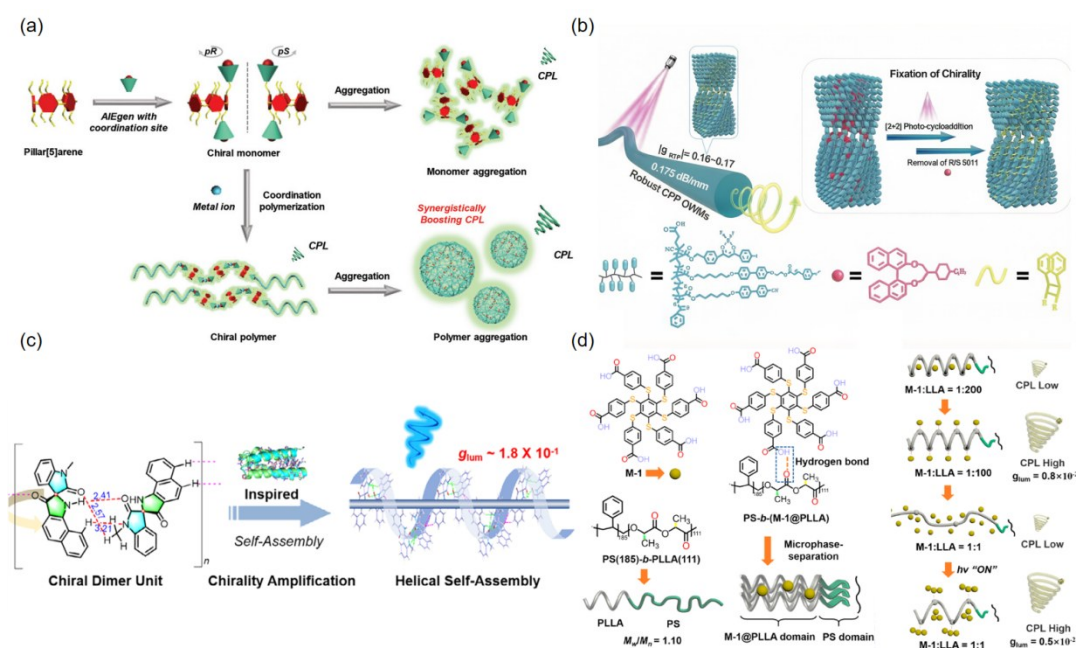


图6 (a)超分子聚合中“聚合-聚集双协同”的典型范例(AIEgen功能化的柱[5]芳烃超分子配位聚合物)^[63]; (b) 室温磷光液晶聚合物的圆偏振磷光(CPP)光波导材料^[67]; (c) 小分子构建超分子聚合物的范例(调控氢键位点与稠合环位置, 给体-受体型螺环手性荧光团(SCFs)可模拟 α -螺旋超分子堆积)^[68]; (d)多硫芳烃和嵌段共聚物共组装, 建立了超分子手性结构与CPL信号之间的定量关联^[69]

Figure 6 (a) A typical paradigm of the ‘polymerization – aggregation dual synergy’ in supramolecular polymerization, exemplified by AIEgen-functionalized pillar[5]arene supramolecular coordination polymers^[63]; (b) circularly polarized phosphorescent (CPP) optical waveguide materials based on room-temperature phosphorescent liquid crystalline polymers^[67]; (c) an example of constructing supramolecular polymers from small molecules; donor – acceptor-type spirocyclic chiral fluorophores (SCFs) capable of mimicking α -helical supramolecular packing through modulation of hydrogen-bonding sites and fused-ring positions^[68]; (d) co-assembly of polythioaromatics and block copolymers, establishing a quantitative correlation between supramolecular chiral structures and CPL signals^[69].

离也为CPL调控提供了全新的可视化研究平台(图6d)。本课题组岳兵兵等人^[69]将六硫苯基具有给体-受体结构的发光体M-1与手性嵌段共聚物PS-b-PLLA通过氢键共组装, 构建了一类独特的D-A型超分子复合薄膜。该体系中, M-1作为给体-受体单元与PLLA链段形成氢键网络, 手性从PLLA骨架传递至非手性M-1, 实现了CPL信号的手性诱导与放大。通过调节M-1与PLLA的比例, 微相分离的螺旋间距可从20 nm拉伸至60 nm, CPL信号呈现先增强后减弱的非单调变化, $|g_{lum}|$ 最高达 0.8×10^{-2} 。尤为重要的是, 利用M-1的光激发诱导分子聚集特性, 紫外光照射可使过度拉伸的螺旋间距恢复至25 nm, 同步实现CPL信号的原位恢复。该工作首次将微相分离形貌作为可视化探针, 建立了超分子手性结构与CPL信号之间的定量关联。

上述研究表明, D-A共组装与超分子聚合的协同可通过手性传递与放大、聚合-聚集协同增

强、动态手性反转、电荷转移调控、J-型聚集诱导磷光等多种机制, 高效诱导产生圆偏振发光, 为D-A超分子聚合诱导CPL材料的发展提供了丰富的设计范式。

2.5 小结

综上, D-A手性自组装体系的核心优势在于其功能协同与多级放大。通过CP-FRET和空间电荷转移等机制, 该体系可实现CPL的波长转换与信号放大; 与刺激响应策略融合后可实现CPL信号的动态可逆调控; 与超分子聚合策略协同后可实现手性信号的几何级数放大。三类子策略在实际研究中并非严格独立, 而是存在广泛的交叉与融合。可以预见, 随着对非共价相互作用动力学和手性传递机制的深入理解, 基于D-A结构的自组装体系将催生出兼具实时可编程性、高信号放大效率和环境适应性的下一代圆偏振发光超分子材料。

3 给体-受体手性共组装 CPL 材料的应用

有机手性自组装 CPL 材料的应用已从概念验证阶段拓展至多个前沿技术方向,其核心优势在于:手性光学活性(CPL 信号)、超分子结构的动态可调性,以及有机材料本身的柔性、低成本与良好加工性能^[70-72]。特别地,D-A 共组装体系因其在能量转移和电荷转移方面的独特优势,在以下应用场景中表现尤为突出。

3.1 光学信息加密与防伪

传统光学加密与防伪技术面临仿制与破解风险日益凸显的挑战。基于 D-A 结构的手性自组装 CPL 材料将发光颜色、发光强度以及圆偏振手性方向作为三个独立的信息维度,构建多层级的动态加密系统,显著提升信息的安全性与载密度。

圆偏振发光材料因其手性信息需通过特定圆偏振片才能读取,在光学信息加密与防伪领域展现出独特优势。在信息加密领域,D-A 共组装体系可将手性、颜色和发光寿命作为正交编码维度。例如,南京大学成义祥团队^[70]利用手性联萘基聚合物与苾-萘酰亚胺染料共组装形成螺旋纳米纤

维,作为发光层制备 CP-OLED 器件,CPL 信号需经特定手性圆偏振片才能检测,实现了信息加密显示, $|g_{lum}| = 4.8 \times 10^{-2}$ 。可印刷的 CPL 材料进一步拓展了加密图案的制备灵活性。中国科学院张军、张金明团队^[71]利用离子型纤维素衍生物与有机小分子发光体复合,通过丝网印刷和喷墨打印制备全彩圆偏振室温磷光图案,在不同激发波长和酸气刺激下,图案的荧光/磷光颜色及手性信号发生差异化变化,需结合圆偏振片才能完整读取。

华东理工大学马骧课题组^[75-78]将振动诱导发光(VIE)分子的构象动态特性作为核心驱动力,在超分子手性发光材料的动态防伪领域取得了系统性突破(图 7a)。该团队巧妙地将 VIE 分子与手性聚合物、凝胶化及 FRET 策略相结合,成功构筑了对光、时间及环境变化响应的多色可调 CPL 材料体系,利用光调控 FRET 构建了以 CPL 为可切换输出的逻辑门,实现了信息的动态加密。华东理工大学曲大辉课题组^[78-81]在配位超分子聚合物的动态手性调控及可逆 CPL 反转方面取得系列突破,基于多重刺激响应机制,开发了多种具有高安全性的动态防伪策略,包括利用热刺激诱导氯桥解离实现可逆 CPL 反转(图 7b),以及结合 ATP/苾

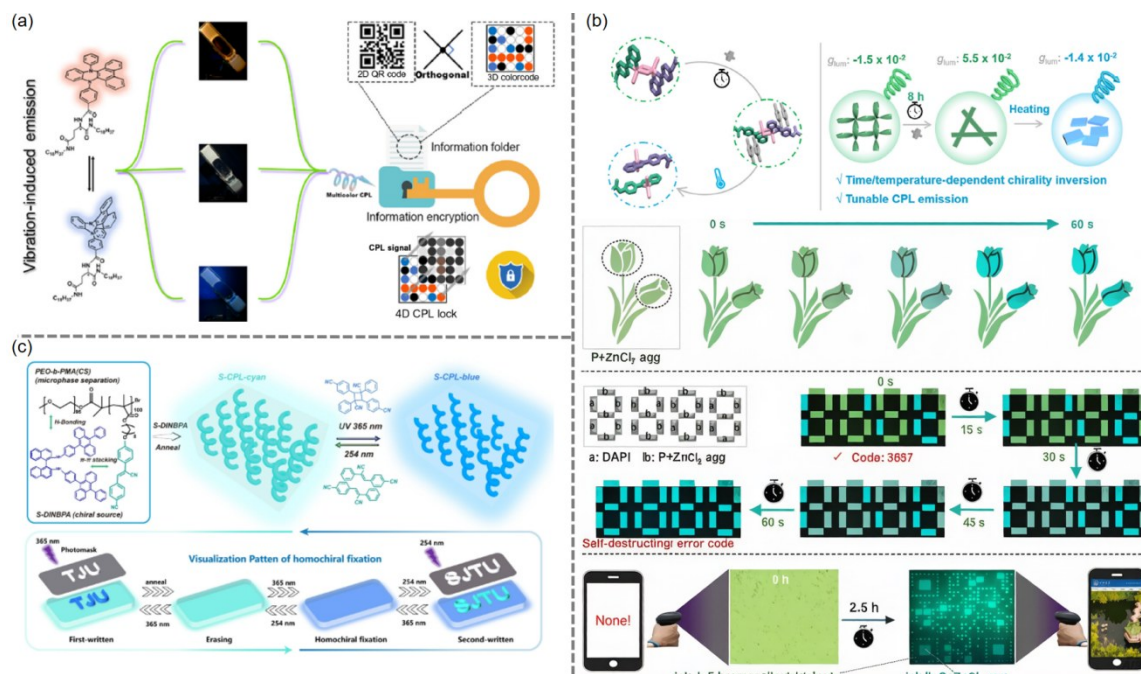


图 7 (a) 利用振动诱导发光分子构筑的圆偏振发光动态加密材料示意图^[76]; (b) 利用时间分辨的手性翻转材料构筑圆偏振发光动态加密材料的示意图^[79]; (c) 利用氰基二苯乙烯基团的光控可逆交联特性,实现 CPL 信号的动态调控^[86]

Figure 7 (a) Schematic illustration of circularly polarized luminescent dynamic encryption materials constructed from vibration-induced emission (VIE) molecules^[76]; (b) schematic illustration of circularly polarized luminescent dynamic encryption materials constructed using time-resolved chiral inversion materials^[79]; (c) dynamic regulation of CPL signals achieved through the photo-controlled reversible crosslinking properties of cyanostilbene groups^[86]

衍生物共组装与酶催化网络实现时间动态的近红外 CPL, 为时间维度的防伪编码开辟了新途径。

3.2 3D 显示与自发光型圆偏振光源

三维显示技术对光源的偏振状态有特殊要求。基于 D-A 结构的手性自组装 CPL 材料能够从源头直接发射高纯度圆偏振光, 省去传统方案中的额外光学元件, 为下一代三维显示技术开辟了更简洁高效的途径。

在显示领域中, 单波长激发下多色 CPL 输出是 D-A 共组装的重要优势。本课题组^[41, 82-84]在手性液晶体系中的 CPL 放大与光控调制方面开展了富有特色的研究工作。该课题组将一种敏化剂和两种手性湮灭剂共组装于手性向列相液晶中, 在 635 nm 单波长激发下同时实现了蓝色、黄色上转换 CPL 和近红外下转换 CPL, 上转换 CPL 的 $|g_{lum}|$ 高达 0.6。中国科学院陈传峰团队^[85]设计了一类

具有 TADF 特性的手性发光材料, 将手性联萘酚单元与给体-受体型 TADF 骨架相结合, 在掺杂型 CP-OLED 器件中实现了 g_{el} 值高达 2.3×10^{-2} 的圆偏振电致发光, 外量子效率达 19.7%。上海交通大学路庆华团队^[86]通过在具有给体-受体结构液晶嵌段共聚物薄膜中掺杂手性分子, 并利用氰基二苯乙烯基团的光控可逆交联特性, 实现了薄膜荧光颜色在青色和蓝色之间的可逆切换, 为 3D 显示提供了可切换的自发光型圆偏振光源。新加坡国立大学江东林团队^[87]以固有手性 [7] 螺烯为单元, 经羟醛缩合制备了纯手性共价有机框架, 从源头解决了手性不稳定问题。该材料兼具高结晶性、本征手性及高效发光。分散于聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 薄膜后, 圆偏振发光显著增强, $|g_{lum}|$ 达 $\sim 1.2 \times 10^{-3}$, 为开发高性能圆偏振发光二极管提供了新平台 (图 8a)。

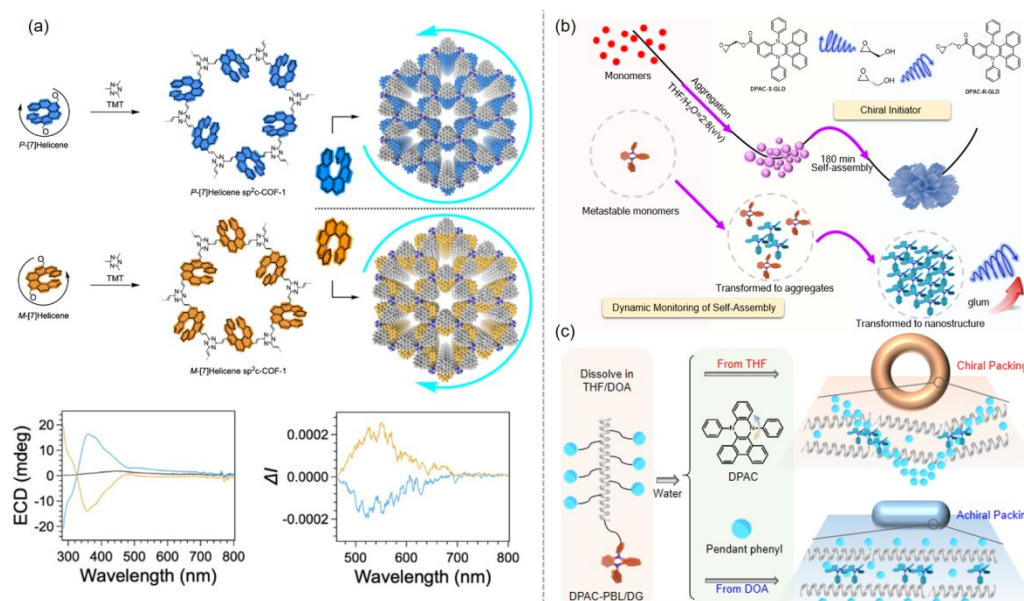


图 8 (a) 纯手性 [7] 螺烯 COFs 的构造及其在 PMMA 薄膜中的圆偏振发光^[87]; (b) 通过振动诱导发光分子实现圆偏振发光及对手性自组装过程的动态监测^[92]; (c) 动态监测手性均多肽组装过程同时进行 CPL 调控^[93]

Figure 8 (a) Construction of chiral [7]helicene-based COFs and their circularly polarized luminescence in PMMA films^[87]; (b) realization of circularly polarized luminescence and dynamic monitoring of chiral self-assembly processes via vibration-induced emission (VIE) molecules^[92]; (c) dynamic monitoring of chiral homopolypeptide assembly processes with simultaneous regulation of CPL^[93]

3.3 手性传感与生物检测

生物体系的本质特征之一是手性——从氨基酸、DNA 到蛋白质, 无不体现分子手性的精妙安排。基于 D-A 结构的手性自组装 CPL 材料能够与生物手性产生特异性相互作用, 在生物检测领域具有独特优势^[88-91]。

本课题组陈炫颖等人^[92-93]通过振动诱导发光

(VIE) 分子的构象动态特性, 充分利用了环境诱导 D-A 发光体 CPL 的特性。发展了自组装过程的实时可视化监控策略 (图 8b) 并成功构筑了水性 CPL 活性体系 (图 8c)。将 VIE 分子 DPAC 连接手性环氧丙烷基团, 在 THF/H₂O 混合溶剂中利用比率荧光实时追踪自组装进程, CPL 的 $|g_{lum}|$ 从 0 提升至约 1.1×10^{-2} 。Nam 等人^[94]将 L-苯丙氨酸修饰在

金纳米粒子表面,赋予其强圆二色信号。将该手性金纳米粒子组装到氧化铜镓锌半导体晶体管上,构建了可在 808 nm 近红外光激发下工作的圆偏振光探测器,当分别用左旋和右旋圆偏振光照射时,光电流比值高达 2.41 倍。中科院化学研究所刘鸣华课题组^[95]利用薄荷醇和月桂酸制备了手性深共晶溶剂(DES),并将其作为手性基质诱导非手性荧光分子产生 CPL,这种基于天然产物的手性 DES 具有良好的生物相容性和可调性。

3.4 自旋电子学与量子技术

圆偏振光与电子自旋之间存在深刻的内在联系。能够直接发射圆偏振光的手性发光材料,成为自旋电子学与量子信息技术研究中极具潜力的理想平台^[96-102]。

Alasdair 等人^[103]将($\pm$)-1-氮杂螺烯引入有机场效应晶体管中作为手性活性层,当交替使用左旋和右旋圆偏振光照射时,光电流从 1×10^{-10} A 增加到 1×10^{-9} A,表现出高圆偏振光敏感性。Ishii 等人^[104]设计了一维和二维手性钙钛矿材料 R-NEA)PbI₃,在 395 nm 圆偏振光照射下,一维手性钙钛矿器件的光电流不对称因子(g_{ph})高达 1.85,圆偏振光选择性比达 25.4。北京工业大学宋峰岩团队^[105]通过将手性双苊分子(R,R)-CPY 与不同客体共结晶,实现了构象驱动的 CPL 符号反演,制备的微晶具有低损耗光波导特性(光学损耗系数低至 0.0189 dB/ μ m),可用于集成光子电路和量子信息处理。

3.5 其他应用

基于 D-A 结构的手性自组装 CPL 材料在不对称光催化和智能响应器件等领域也展现出应用潜力。中国科学院刘鸣华团队^[106]将上转换纳米粒子与手性凝胶因子共组装,在 980 nm 近红外光激发下产生上转换 CPL,成功引发二炔酸衍生物的不对称光聚合。东北林业大学刘守新等人^[107]将碳点掺杂到聚乙烯醇/纤维素纳米晶复合薄膜中,实现了 CPL 对湿度的可逆响应。

4 结论与展望

有机手性自组装圆偏振发光材料的研究已从基础概念验证向原型器件开发快速迈进。本文聚焦于给体-受体(D-A)自组装这一核心策略,系统阐述了如何通过非共价相互作用将电子给体与受体集成到手性超分子框架中。我们重点剖析了 D-A 体系中的三大核心机制,即圆偏振荧光共振能量转移、圆偏振空间电荷转移与环境诱导 D-A

发光体 CPL 行为,并探讨了其如何协同实现 CPL 的波长转换、信号放大与功能集成。在此基础上,本文进一步梳理了 D-A 共组装与刺激响应策略、超分子聚合策略的交叉融合,展示了其在 CP-OLED、动态防伪、手性传感及自旋电子学等领域的前沿应用。



图9 总结和展望:现有应用和需要解决的关键问题及未来研究方向

Figure 9 Summary and outlook; current applications, key challenges to be addressed, and future research directions.

展望未来,基于 D-A 结构的手性自组装 CPL 材料领域仍面临若干关键挑战:(1)如何在固态或薄膜态下同时实现高 $|g_{lum}| (> 0.1)$ 与高 PLQY ($> 50\%$);(2)如何提升材料的长期稳定性(热稳定性、光稳定性)以满足实际应用需求;(3)如何发展大面积、低成本、高精度的手性自组装薄膜制备技术。未来研究方向可聚焦于:深入探索圆偏振电致发光(CPEL)机制,推动 CP-OLED 的商业化进程;开发外部刺激下可动态翻转手性(左/右旋切换)的智能 D-A 材料;将 CPL 与电导率、磁性等其他物理性质耦合,发展多功能手性光电子器件;此外,借助量子化学计算与机器学习建立分子结构参数(如给体-受体能级差、扭转角、堆积方式)与 $|g_{lum}|$ 之间的定量构效关系,有望实现手性发光材料的高通量虚拟筛选与性能预测,大幅缩短新材料从分子设计到实验验证的研发周期。总体而言,D-A 共组装策略正推动 CPL 材料从单一手性响应向多模态、可编程、功能集成方向跨越。

参 考 文 献:

- [1] Fan Yanqing, He Jing, Liu Lin, *et al.* Chiral Carbon Nanorings: Synthesis, Properties and Hierarchical Self-assembly of Chiral Ternary Complexes Featuring a Narcissistic Chiral Self-Recognition for Chiral Amines. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62: e202304623.
- [2] Jia Shiqi, Hao Yudong, Li Yuedi, *et al.* Chiral medium-sized rings beyond central chirality. [J]. *Nat Rev Chem*, 2025, 9: 617-633.
- [3] GabrielSchnoering, SamuelAlbert, AntoineCanaguier-Durand, *et al.* Chiral Thermodynamics in Tailored Chiral Optical Environments. [J]. *Phys Rev X*, 2021, 11: 041022.
- [4] Wen Yun, He Mengqi, Yu Yongliang, *et al.* Biomolecule-mediated chiral nanostructures: a review of chiral mechanism and application. [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2021, 289: 102376.
- [5] Feng Yuyi, Zeng Yifan, Bi Xin, *et al.* Chiral perovskites: From chirality mechanisms to photovoltaics. [J]. *Matter*, 2026, 9: 102758.
- [6] Yang See-Hun, RonNaaman, YossiPaltiel, *et al.* Chiral spintronics. [J]. *Nat Rev Phys*, 2021, 3: 328-343.
- [7] MadihaSaqlain, Zohaib Hafiz Muhammad, SaminaQamar, *et al.* Strategies for the enhancement of CPL properties. [J]. *Coord Chem Rev*, 2024, 501: 215559.
- [8] MacKenzie Lewis E, Lars-OlofPålsson, DavidParker, *et al.* Rapid time-resolved Circular Polarization Luminescence (CPL) emission spectroscopy. [J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 1676.
- [9] Kitzmann Winald R, JohnFreudenthal, Reponen Antti-Pekka M, *et al.* Fundamentals, Advances, and Artifacts in Circularly Polarized Luminescence (CPL) Spectroscopy. [J]. *Adv Mater*, 2023, 35: 2302279.
- [10] Guido Ciro A, FrancescoZinna, GennaroPescitelli, *et al.* Quantum Chemistry Calculations of Circularly Polarized Luminescence (CPL): From Spectral Modeling to Molecular Design. [J]. *Chem Rev*, 2025, 125: 10492-10656.
- [11] Zhang Run, Zhong Hai, Yang Kai, *et al.* Energy Transfer for Constructing Circularly Polarized Luminescence Materials: Recent Progress and Future Prospects. [J]. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2417308.
- [12] Zhang Liang, Geng Weihang, Ou Xinwen, *et al.* Boosting the brightness of aggregation-caused quenching chromophore-based covalent organic frameworks via energy level matching strategy. [J]. *Nat Commun*, 2025, 16: 9991.
- [13] Qi Jianping, Hu Xiongwei, Dong Xiaochun, *et al.* Towards more accurate bioimaging of drug nanocarriers: turning aggregation-caused quenching into a useful tool. [J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2019, 143: 206-225.
- [14] Wang Jingxiang, HassanHafeez, Chen Dongyang, *et al.* Chiral Selenium-Integrated Multi-Resonant Thermally Activated Delayed Fluorescent Emitters Showing Improved Reverse Intersystem Crossing Rate. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202506999.
- [15] Hu Ming, Feng Haitao, Yuan Yingxue, *et al.* Chiral AIEgens - Chiral recognition, CPL materials and other chiral applications. [J]. *Coord Chem Rev*, 2020, 416: 213329.
- [16] Zhang Xinyu, Liu Huiqing, Zhuang Guilin, *et al.* An unexpected dual-emissive luminogen with tunable aggregation-induced emission and enhanced chiroptical property. [J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 3543.
- [17] Liu Yi. Supramolecular basketry. [J]. *Nat Chem*, 2017, 9: 1037-1038.
- [18] Zheng Han, Zhang Zaiyong, Cai Suzhi, *et al.* Enhancing Purely Organic Room Temperature Phosphorescence via Supramolecular Self-Assembly. [J]. *Adv Mater*, 2024, 36: 2311922.
- [19] AritraSarkar, RanjanSasmal, CharlyEmpereur-mot, *et al.* Self-Sorted, Random, and Block Supramolecular Copolymers via Sequence Controlled, Multicomponent Self-Assembly. [J]. *J Am Chem Soc*, 2020, 142: 7606-7617.
- [20] Song Qiao, Cheng Zihe, MariaKariuki, *et al.* Molecular Self-Assembly and Supramolecular Chemistry of Cyclic Peptides. [J]. *Chem Rev*, 2021, 121: 13936-13995.
- [21] Han Lili, Sun Yuwei, Li Zhanwei, *et al.* Unveiling the Synergistic and Perforation-Dominant Self-Assembly Mechanisms of Supramolecular Chiral Helical Microtoroids. [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147: 36793-36804.
- [22] JaeyongAhn, WonbinChoi, Lee Sang Hyuk, *et al.* Chirality amplification in semiconductors for advanced optoelectronics. [J]. *Chem Soc Rev*, 2026, 55: 400-432.
- [23] NozomuSuzuki, DaisukeTaura, YusukeFuruta, *et al.* Amplification of Asymmetry for Dynamic Helical Polymers through

- 1:1 Host – Guest Interactions: Theoretical Models for Majority Rule and Sergeants and Soldiers Effects. [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147: 19751-19761.
- [24] Sun Meng-En, Wang Fei, He Manman, *et al.* Pressure-Driven Circularly Polarized Luminescence Enhancement and Chirality Amplification. [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147: 10706-10714.
- [25] Hu Weilin, Li Mingyao, Xiong Wan, *et al.* Real-Time Direct Monitoring of Chirality Fixation and Recognition at the Single-Molecule Level. [J]. *J Am Chem Soc*, 2024, 146: 17765-17772.
- [26] FlorisHelmich, Lee Cameron C, Schenning Albertus P H J, *et al.* Chiral Memory via Chiral Amplification and Selective Depolymerization of Porphyrin Aggregates. [J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 16753-16755.
- [27] FélixFreire, Seco José Manuel, EmilioQuiñoá, *et al.* Chiral Amplification and Helical-Sense Tuning by Mono- and Divalent Metals on Dynamic Helical Polymers. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 11692-11696.
- [28] Yuan Jun, Po-TingChiu, Liu Xiang, *et al.* Cross-domain Chirality Transfer in Self-Assembly of Chiral Block Copolymers. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202317102.
- [29] Nam Seong Ryong, Lee Ho Yong, Hong Jong-In. Control of Macroscopic Helicity by Using the Sergeants-and-Soldiers Principle in Organogels. [J]. *Chem Eur J*, 2008, 14: 6040-6043.
- [30] Kaiser Theo E, VladimirStepanenko, FrankWürthner, *et al.* Fluorescent J-Aggregates of Core-Substituted Perylene Bisimides: Studies on Structure-Property Relationship, Nucleation – Elongation Mechanism, and Sergeants-and-Soldiers Principle. [J]. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 6719-6732.
- [31] Shi Zhaotao, Sheng Lan, Tan Shiyu, *et al.* Photo-Activated Emission and Chirality Transfer Based on Host – Guest Chemistry of a Motorized All-Benzene Nanohoop. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e25767.
- [32] Guo Chenhao, Zhang Yuewei, Zhao Wenlong, *et al.* Chiral Co-Assembly with Narrowband Multi-Resonance Characteristics for High-Performance Circularly Polarized Organic Light-Emitting Diodes. [J]. *Adv Mater*, 2024, 36: 2406550.
- [33] An Yu, Shen Zhaocun, Zhang Fang, *et al.* Inversion of Circularly Polarized Luminescence in the Left-Handed Chitosan-Templated Co-assemblies. [J]. *Adv Sci*, 2025, 12: 2415260.
- [34] Liu Fan, Cao Yuanyuan, Sun Zichao, *et al.* Chiral Photoswitch with a Reversible Photofluorochromic Enhancement and Circularly Polarized Luminescence for Optical Encryption. [J]. *Adv Funct Mater*, 2026, 36: e11230.
- [35] SukumaranDivya P, KazutakaShoyama, Dubey Rajeev K, *et al.* Cooperative binding and chirogenesis in an expanded perylene bisimide cyclophane. [J]. *J Am Chem Soc*, 2024, 146: 22077-22084.
- [36] Wang Zhuoer, Lu Jiahui, Hao Aiyu, *et al.* Odd-Even Law Mediated Supramolecular Chirality of Luminescent Dipeptides for Chiroptical Energy Transfer. [J]. *Small*, 2024, 20: 2405698.
- [37] SwadhinGarain, Kongasseri Anju Ajayan, Wagalgave Sopan M, *et al.* Supramolecular Charge-Transfer Approach for Tunable and Efficient Circularly Polarized Delayed Fluorescence and Phosphorescence. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202501330.
- [38] Yu Zhenxing, Chen Xuwei, Chen Chuanfeng, *et al.* Intrinsically luminescent nematic liquid crystals enabling high-brightness full-color and white circularly polarized luminescence via chiral coassembly. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202507802.
- [39] Kim Boram, JaeyongAhn, Gao Ke, *et al.* Circularly Polarized Light-Responsive Flexible Synapses Based on Supramolecular n-Type Chiral Organic Single Crystal/p-Type Polymer Heterojunctions. [J]. *ACS Nano*, 2025, 19: 28478-28490.
- [40] Li Tiejun, Niu Dian, Zhang Jingdan, *et al.* Dimension-Tunable Supramolecular Organic Frameworks with Chiral Pore Channels for Selective Guest Encapsulation and Enhanced Circularly Polarized Luminescence. [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147: 33223-33231.
- [41] Ye D, Jiang R, Yang H, *et al.* Photoexcitation-Induced Chiral Self-Assembly for Phosphorescence-to-Thermally Activated Delayed Fluorescence Transformation. *Angew. Chem Int Ed*, 2025, 64: e16591.
- [42] RonNaaman, Waldeck David H. Spintronics and Chirality: Spin Selectivity in Electron Transport Through Chiral Molecules. [J]. *Annu Rev Phys Chem*, 2015, 66: 263-281.
- [43] MatthiasKettner, Maslyuk Volodymyr V, DanielNürenberg, *et al.* Chirality-Dependent Electron Spin Filtering by Molecular Monolayers of Helicenes. [J]. *J Phys Chem Lett*, 2018, 9: 2025-2030.

- [44] Dong Yifan, Hautzinger Matthew P, Haque Md Azimul, *et al.* Chirality-Induced Spin Selectivity in Hybrid Organic-Inorganic Perovskite Semiconductors. [J]. *Annu Rev Phys Chem*, 2025, 76: 519-537.
- [45] TakaoNoguchi, Roy Bappaditya, DaisukeYoshihara, *et al.* A Chiral Recognition System Orchestrated by Self-Assembly: Molecular Chirality, Self-Assembly Morphology, and Fluorescence Response. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 12518-12522.
- [46] Yan Jijun, Kang Chuanqing, Bian Zheng, *et al.* Sequence-Dependent Self-Assembly of Chiral Polyimides. [J]. *Chem Asian J*, 2017, 12: 841-845.
- [47] He Zixiang, Cheng Xiaoxiao, Zhang Wei, *et al.* Helix-Sense Selective Polymerization versus Polymerization-Induced Helix-Sense Selective Self-Assembly: From Controlled Synthesis to in Situ Chiral Self-Assembly. [J]. *Acc Chem Res*, 2026, 59: 1012-1025.
- [48] Cheng Xiaoxiao, Tang Zeyu, He Zixiang, *et al.* Conventional versus three-state helicity in chiral copolymers: Reversal dynamics and programmable chiroptical switches. [J]. *Chem*, 2026, 60: 102988.
- [49] Cheng Qihong, Hao Aiyu, Xing Pengyao, *et al.* A chemosensor-based chiral coassembly with switchable circularly polarized luminescence. [J]. *Nat Commun*, 2021, 12: 6320.
- [50] Ye Yuhao, Yao Lei, Chen Shulei, *et al.* Polar solvent-induced self-assembly of organic cocrystal helices based on achiral molecules. [J]. *J Solid State Chem*, 2025, 352: 125602.
- [51] Li Xue, Xu Wei-Tao, Xu Xiao-Qin, Wang Yu, Wang Xu-Qing, Yang Hai-Bo, Wang Wei, *et al.* Lighting up Bispirene-Functionalized Chiral Molecular Muscles with Switchable Circularly Polarized Excimer Emissions. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202412548.
- [52] Zhou Bin, Cao Lihui, Huang Mingfeng, *et al.* Temperature and solvent dual switch photochromic chiral ionic hydrogen-bonded organic framework for circularly polarized luminescence and advanced encryption. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202504645.
- [53] Meskers Stefan C. J., Dekkers Harry P. J. M., Rapenne Gwénaél, Sauvage Jean-Pierre. Chiroptical Properties of an Optically Pure Dicopper(I) Trefoil Knot and Its Enantioselectivity in Luminescence Quenching Reactions. [J]. *Chem Eur J*, 2000, 6: 2129-2134.
- [54] Kong Yu-Jin, Yan Zhi-Ping, Li Si, Su Hui-Fang, Li Kai, Zheng You-Xuan, Zang Shuang-Quan. Photoresponsive Propeller-like Chiral AIE Copper(I) Clusters. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2020, 59: 5336-5340.
- [55] Zhao Wenlong, Guo Weichen, Tan Keke, *et al.* Chiral Co-assembly Based on a Stimuli-Responsive Polymer towards Amplified Full-Color Circularly Polarized Luminescence. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202416863.
- [56] Liu Kerui, Shen Yihao, Li Xiaojing, *et al.* Strong CPL of achiral liquid crystal fluorescent polymer via the regulation of AIE-active chiral dopant. [J]. *Chem Commun*, 2020, 56: 12829-12832.
- [57] Zhang Gong, Bao Yinglong, Ma Haotian, *et al.* Precise Modulation of Circularly Polarized Luminescence via Polymer Chiral Co-assembly and Contactless Dynamic Chiral Communication. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202401077.
- [58] Yuan Jianan, Lu Xuemin, Lu Qinghua. Large-scale chiral spherulites with controllable circularly polarized luminescence in liquid crystal block copolymers film. [J]. *Aggregate*, 2024, 5: e431.
- [59] Sun Peng, Qin Bo, Xu Jiangfei, *et al.* Supramonomers for controllable supramolecular polymerization and renewable supramolecular polymeric materials. [J]. *Prog Polym Sci*, 2022, 124: 101486.
- [60] Qin Bo, Zhang Shuai, Song Qiao, *et al.* Supramolecular Interfacial Polymerization: A Controllable Method of Fabricating Supramolecular Polymeric Materials. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 7639-7643.
- [61] Wang Hu, Ji Xiaofan, Li Zhengtao, *et al.* Fluorescent Supramolecular Polymeric Materials. [J]. *Adv Mater*, 2017, 29: 1606117.
- [62] Ma Shuo, Zhao Biao, Deng Jianping. Helical Polymer Working as a Chirality Amplifier to Generate and Modulate Multi-color Circularly Polarized Luminescence in Small Molecular Fluorophore/Polymer Composite Films. [J]. *ACS Cent Sci*, 2023, 9: 1409-1418.
- [63] Yan Hewei, Yin Xiaojun, Wang Dong, *et al.* Synergistically Boosting the Circularly Polarized Luminescence of Functionalized Pillar[5]arenes by Polymerization and Aggregation. [J]. *Adv Sci*, 2023, 10: 2305149.

- [64] Guo Yuchen, Zhang Yifei, Ma Jianfei, *et al.* Wide-range tunable circularly polarized luminescence in triphenylamine supramolecular polymers via charge-transfer complexation. [J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 9303.
- [65] Gao Laiwei, Liao Rui, Ao Lei, *et al.* Enhancing Circularly Polarized Luminescence of Anthraquinones via J-Type Supramolecular Polymerization. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202505776.
- [66] Han Jianlei, ShigenoriFujikawa, NobuoKimizuka, *et al.* Living hybrid exciton materials: Enhanced fluorescence and chiroptical properties in living supramolecular polymers with strong Frenkel/charge-transfer exciton coupling. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202410431.
- [67] Li Jie, Guan Yan, Hao Tiantian, *et al.* Phosphorescent Liquid Crystalline Polymer-based Circularly Polarized Luminescence Optical Waveguides for Enhanced Photonic Signal Processing and Information Encryption. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202423395.
- [68] Wei Shiqiang, Li Zihao, Sun Chunlin, *et al.* Circularly polarized luminescence with large dissymmetry factor over 10^{-1} based on flexible point-chirality via programming at molecular level. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2026, 65: e23152.
- [69] Yue B, Feng X, Wang C, *et al.* In Situ Regulation of Microphase Separation-Recognized Circularly Polarized Luminescence via Photoexcitation-Induced Molecular Aggregation. *ACS Nano*, 2022, 16: 16201-16210.
- [70] Zhang Mingyue, Kim Minju, WoosungChoi, *et al.* Chiral macromolecules and supramolecular assemblies: Synthesis, properties and applications. [J]. *Prog Polym Sci*, 2024, 151: 101800.
- [71] Wang Xujie, Zhao Biao, Deng Jianping, *et al.* Liquid Crystals Doped with Chiral Fluorescent Polymer: Multi-Color Circularly Polarized Fluorescence and Room-Temperature Phosphorescence with High Dissymmetry Factor and Anti-Counterfeiting Application. [J]. *Adv Mater*, 2023, 35: 2304405.
- [72] Yan Hewei, He Youling, Wang Dong, *et al.* Aggregation-induced emission polymer systems with circularly polarized luminescence. [J]. *Aggregate*, 2023, 4: e331.
- [73] Geng Zhongxing, Zhang Yuxia, Zhang Yu, *et al.* Amplified Circularly Polarized Electroluminescence Behavior Triggered by Helical Nanofibers from Chiral Co-assembly Polymers. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2022, 61: e202202718.
- [74] You Jingxuan, Yin Chunchun, Wang Sihuan, *et al.* Responsive circularly polarized ultralong room temperature phosphorescence materials with easy-to-scale and chiral-sensing performance. [J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 7149.
- [75] Hu Ying, Huang Zizhao, ItamarWillner, *et al.* Multicolor Circularly Polarized Luminescence of a Single-Component System Revealing Multiple Information Encryption. [J]. *CCS Chem*, 2024, 6: 518-527.
- [76] Huang Zizhao, Hu Ying, Jin Xin, *et al.* Light-Responsive Circularly Polarized Luminescence Polymers with INHIBIT Logic Function. [J]. *Adv Opt Mater*, 2021, 9: 2100135.
- [77] He Zhenyi, Huang Zizhao, Ma Xiang, *et al.* Lifetime-tunable circularly polarized luminescent system based on triplet-to-singlet Förster resonance energy transfer. [J]. *Sci China Chem*, 2024, 67: 2918-2922.
- [78] Xu Hui, Ma Changshun, Yu Chengyuan, *et al.* Reversible Inversion of Circularly Polarized Luminescence in a Coassembled Supramolecular Structure with Achiral Sulforhodamine B Dyes. [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 25201-25211.
- [79] He Menglu, Chen Peiwen, Wang Qian, *et al.* Reversible Circularly Polarized Luminescence Inversion and Tunable Emission in Chloride-Bridge-Linked Supramolecular Polymers. [J]. *Adv Funct Mater*, 2026, 36: e10772.
- [80] Wang Qian, Xu Hanren, Qi Zhen, *et al.* Dynamic Near-Infrared Circularly Polarized Luminescence Encoded by Transient Supramolecular Chiral Assemblies. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202407385.
- [81] Shi Zhaotao, Wang Qian, Yi Jinhao, *et al.* Encoding Supramolecular Chiral Self-Assembly with Photo-Controlled Circularly Polarized Luminescence by Overcrowded Alkene-Based Bis-PBI Modulators. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2022, 61: e202207405.
- [82] Ji Honghan, Wu Bin, Tian Enquan, *et al.* Upconverting and downshifting circularly polarized luminescence in a superstructural helix. [J]. *Sci China Chem*, 2024, 67: 2571-2577.
- [83] Wu Bin, Wu Hongwei, Gong Yifan, *et al.* A chiral single-component sol-gel platform with highly integrated optical properties. [J]. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 4275-4280.
- [84] He Menglu, Sun Hao, Zhu liangliang, *et al.* Dynamic Circularly Polarized Luminescence Switching of Metal-Organic Su-

- pramolecular Polymers Directed by the Competition of Solvent-Assisted Nucleation and Thermal Nucleation. [J]. *Chem Mat*, 2024, 3: 2508-2519.
- [85] Li Meng, Li Sihua, Zhang Dongdong, *et al.* Stable Enantiomers Displaying Thermally Activated Delayed Fluorescence: Efficient OLEDs with Circularly Polarized Electroluminescence. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57: 2889-2893.
- [86] Yuan Jianan, He Xiaojie, Chen Lianjie, *et al.* Dynamic Covalent Bonds-Mediated Color-Switchable Circularly Polarized Luminescence in Helical Assemblies of Achiral Liquid Crystal Block Copolymer Films. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: 202419924.
- [87] Yan Qianqian, Ye Xingyao, Tao Shanshan, *et al.* Homochiral Helicene Covalent Organic Frameworks. [J]. *J Am Chem Soc*, 2026, 148: 821-827.
- [88] Ju Peng, Zhou Shanding, Chi Jingtian, *et al.* Chiral-Specific Recognition-Based Organic Photoelectrochemical Transistor Biosensor for Ultrasensitive Detection of Okadaic Acid. [J]. *Anal Chem*, 2026, 98: 10031-10041.
- [89] Cheng Yujie, Liang Bicong, Cao Wei, *et al.* Modulating Fluorescent and Chiral Properties of Luminescent Self-Assemblies by Supramolecular Interactions. [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2026, 18: 11699-11709.
- [90] Wen Xin, Wang Runjia, Wang Tao, *et al.* Eccentrically Twisted and Helical Nanoarchitectonics by Sequence-Defined Peptide- π Conjugates. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64: e202518813.
- [91] Liu Chenchen, Yang Juncheng, Lam Jacky W Y, *et al.* Chiral assembly of organic luminogens with aggregation-induced emission. [J]. *Chem Sci*, 2022, 13: 611-632.
- [92] Chen Xuanying, Chen Jiacheng, Su Wenyan, *et al.* Dynamic monitoring of self-assembly by confining conformational changes of butterfly-motion-based molecules. [J]. *Chem Commun*, 2023, 59: 11999-12002.
- [93] Wu Yifan, Shen Ruizi, Wang Qiaochun, *et al.* Tracking Dual-Pathway Self-Assembly via Butterfly-Motion-Based Molecular Fragment Conformational Transformation in Aqueous Homopolypeptides. [J]. *Chem Eur J*, 2025, 31: e02820.
- [94] Namgung Seok Daniel, Kim Ryeong Myeong, Yae-ChanLim, *et al.* Circularly polarized light-sensitive, hot electron transistor with chiral plasmonic nanoparticles. [J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 5081.
- [95] Wen Xin, Du Sifan, Zhang Li, *et al.* Chiral Deep Eutectic Solvents Enable Full-Color and White Circularly Polarized Luminescence from Achiral Luminophores. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62: e202311816.
- [96] Mu Xijiao, Wang Jingang, Duan Guoqiang, *et al.* The nature of chirality induced by molecular aggregation and self-assembly. [J]. *Spectrochim Acta A*, 2019, 212: 188-198.
- [97] Han Haojie, Li Wei, Zhang Qinghua, *et al.* Electric Field-Manipulated Optical Chirality in Ferroelectric Vortex Domains. [J]. *Adv Mater*, 2024, 36: 2408400.
- [98] JahnuSaikia, Dharmalingam K, Anandalakshmi R, *et al.* Electric field modulated peptide based hydrogel nanocatalysts. [J]. *Soft Matter*, 2021, 17: 9725-9735.
- [99] GurAminadav, OmerShoseyov, ShyleeBelsey, *et al.* Chiral Nematic Cellulose Nanocrystal Films for Enhanced Charge Separation and Quantum-Confined Stark Effect. [J]. *ACS Nano*, 2024, 18: 28609-28621.
- [100] Man-HinKwok, Bohannon Caleb A, Li Ruipeng, *et al.* Ordered hexagonal columnar liquid crystalline self-assembly of mesogen-free sulfonylated side-chain chiral polyethers and their high dielectric property. [J]. *Giant*, 2021, 8: 100079.
- [101] Niu Xiaohui, Yan Simeng, Zhao Rui, *et al.* Chiral template - induced porphyrin-based self-assembled materials for electrochemical chiral sensing. [J]. *Microchim Acta*, 2023, 190: 61.
- [102] Ki-JaeJeong, Lee Dong Kyu, Van TanTran, *et al.* Helical Magnetic Field-Induced Real-Time Plasmonic Chirality Modulation. [J]. *ACS Nano*, 2020, 14: 7152-7160.
- [103] Yang Ying, da Costa Rosenildo Correa, Fuchter Matthew J, *et al.* Circularly polarized light detection by a chiral organic semiconductor transistor. [J]. *Nat Photonics*, 2013, 7: 634-638.
- [104] Ishii A, Miyasaka T. Direct detection of circular polarized light in helical 1D perovskite-based photodiode. [J]. *Sci Adv*, 2020, 6: eabd3274.
- [105] Wang Ke, Ren Shizhe, Ou Xinwen, *et al.* Conformation-Driven Circularly Polarized Luminescence Sign Inversion in Chiral Bispyrene Based Cocrystals with Optical Waveguide. [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2026, 65: e20826.

- [106] Jin Xue, Sang Yutao, Shi Yonghong, *et al.* Optically Active Upconverting Nanoparticles with Induced Circularly Polarized Luminescence and Enantioselectively Triggered Photopolymerization. [J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 2804-2811.
- [107] Xu Mingcong, Wu Xueyun, Yang Yang, *et al.* Designing Hybrid Chiral Photonic Films with Circularly Polarized Room-Temperature Phosphorescence. [J]. *ACS Nano*, 2020, 14: 11130-11139.



刘昕悦(1992-),女,江苏盐城人,硕士,助理研究员,主要研究方向:有机光电功能材料。

Email: qwe_zt@163.com



裴璟泓(2007-),男,上海人,在校本科生,主要从事有机超分子自组装圆偏振发光材料的研究。

Email: p148136912468@163.com



陈炫颖(1993-),男,江苏靖江人,博士,副教授,2023年于华东理工大学获得博士学位,主要研究方向:有机光电功能材料、超分子自组装材料。

Email: xychen@shiep.edu.cn



朱亮亮(1983-),男,浙江舟山人,博士,复旦大学教授,博士生导师,2011年于华东理工大学获得博士学位,主要从事自组装光功能材料的研究。

Email: zhuliangliang@fudan.edu.cn