

基于非手性聚合物的共组装圆偏振发光材料

武宇乾, 夏 阳, 李琬卉, 王小野

(南开大学化学学院, 元素有机化学全国重点实验室, 天津 300071)

摘要 圆偏振发光(Circularly polarized Luminescence, CPL)材料在三维显示、信息加密以及生物成像等领域展现出广阔的应用前景,近年来备受关注.其中,发光不对称因子(g_{lum})是衡量CPL材料的关键参数.如何有效地提升 g_{lum} ,不仅是当前研究的核心问题之一,也是推动CPL技术走向实际应用的重要前提.研究表明,基于非手性聚合物与手性掺杂剂的共组装策略能够诱导形成有序的螺旋超分子结构,从而显著放大CPL响应,并在不改变聚合物主体结构前提下实现对CPL性质的精准调控.本文综合评述了非手性聚合物共组装CPL材料的最新研究进展,并根据手性来源不同,将体系划分为手性小分子共组装、手性高分子共组装以及手性对称性破缺共组装3类,重点围绕其共组装机理与构效关系研究展开了评述.此外,进一步概述了该类材料在光电器件中的应用与探索,并讨论了当前面临的主要挑战与未来的发展方向.本文旨在为新型高性能CPL材料的设计与开发提供有价值的参考与思路.

关键词 圆偏振发光; 非手性聚合物; 共组装; 发光不对称因子; 非共价相互作用

中图分类号 O621.22

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20260006

Achiral-polymer-based Co-assembled Circularly Polarized Luminescent Materials

WU Yuqian, XIA Yang, LI Wanhui*, WANG Xiaoye*

(State Key Laboratory of Elemento-Organic Chemistry, College of Chemistry,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Circularly polarized luminescence (CPL) materials have attracted considerable attention in recent years owing to their promising applications in 3D displays, information encryption, and bioimaging. The luminescence dissymmetry factor (g_{lum}) is a key parameter to evaluate CPL materials. Effectively enhancing g_{lum} is not only one of the core challenges but also a crucial prerequisite for advancing CPL technologies toward practical applications. Recent studies have demonstrated that a co-assembly strategy involving achiral polymers and chiral dopants can induce the formation of ordered helical supramolecular structures, thereby significantly amplifying CPL responses while enabling precise modulation of CPL properties without altering the polymer backbone. This review provides a systematic overview of recent advances in achiral-polymer-based co-assembled CPL materials. According to the chiral source, these systems are categorized into three types: co-assembly with chiral small molecules, co-assembly with chiral macromolecules, and co-assembly induced by chiral symmetry breaking. Particular emphasis is placed on their co-assembly mechanisms and structure-property relationships. In addition, this review outlines recent progress in the application of these materials in optoelectronic devices and discusses the major challenges currently faced in the

收稿日期: 2026-01-01. 网络首发日期: 2026-02-13.

联系人简介: 王小野, 男, 博士, 研究员, 主要从事有机光电材料方面的研究. E-mail: xiaoye.wang@nankai.edu.cn

李琬卉, 女, 博士, 助理研究员, 主要从事有机光电器件方面的研究. E-mail: liwanhui@mail.nankai.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(批准号: 2022YFB4200600)和国家自然科学基金(批准号: 22375106, 92256304)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China(No.2022YFB4200600) and the National Natural Science Foundation of China(Nos.22375106, 92256304).

field, as well as future development directions. This review aims to offer valuable insights and guidance for the rational design and development of next-generation high-performance CPL materials.

Keywords Circularly polarized luminescence; Achiral polymer; Co-assembly; Luminescence dissymmetry factor; Noncovalent interaction

在垂直于光传播方向的平面上,圆偏振光矢量端点的轨迹是一个正圆形.圆偏振光作为一类特殊的偏振光,凭借其显著的抗干扰能力、丰富的信息量以及对人眼更加友好等优势,在三维显示^[1]、量子通信^[2]、信息存储^[3]和生物成像^[4]等领域具有广阔的应用前景^[5-7].目前,产生圆偏振光的主要方法是通过光学元件^[8](基于线偏振片筛选偏振分量和四分之一波片相位延迟原理)和液晶材料体系^[9,10](基于布拉格反射原理),但得到的圆偏振光均存在显著的能量损耗.

为了克服能量损耗,研究人员致力于开发圆偏振发光(Circularly polarized luminescence, CPL)材料^[11-17][图1(A)].发光不对称因子(Luminescence dissymmetry factor, g_{lum})是衡量圆偏振光中左旋与右旋分量相对差异的核心参数,取值范围为 $-2\sim 2$. g_{lum} 的绝对($|g_{\text{lum}}|$)值越大,表明圆偏振光的选择性越高^[18].目前,CPL材料的设计与研究主要聚焦于:(1)本征CPL材料,包括手性小分子体系^[19-21]和金属配合物体系^[22],其CPL来源于发光分子激发态的固有不对称性,具有高效发光和精确调控光色的优势;(2)组装CPL材料,包括手性组装聚合物体系^[23]、水凝胶体系^[24]、上转换体系^[25]和纳米材料体系^[26]等.与本征CPL材料相比,组装CPL材料通过非共价相互作用构建具有特定手性结构的超分子组装体,其CPL来源于有序介质尺度上的结构不对称性,能显著提高 $|g_{\text{lum}}|$ 值.

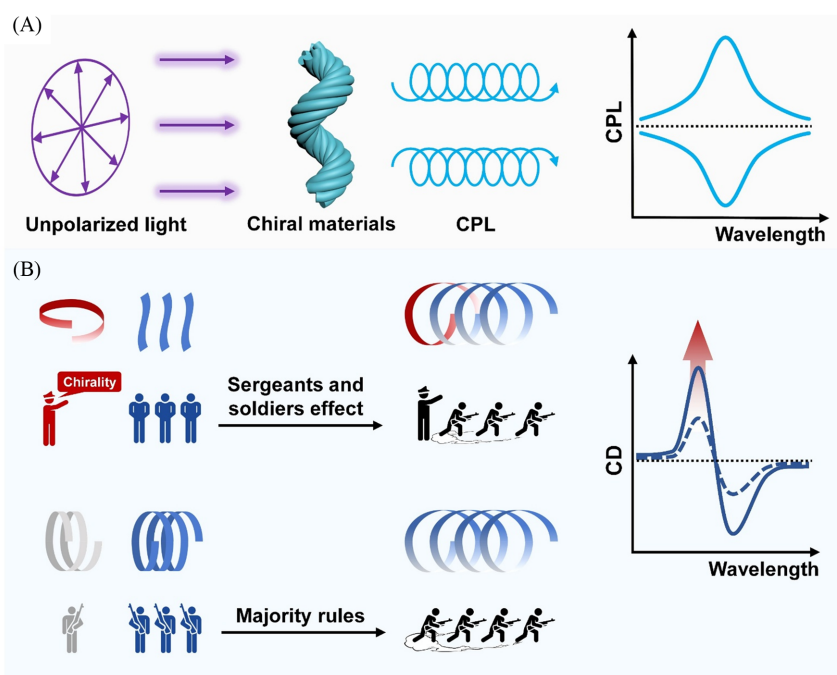


Fig. 1 Schematic diagram of CPL(A) and mechanism of chiral co-assembly(B)

推动CPL材料走向实际应用的关键在于提升其 $|g_{\text{lum}}|$ 值.该参数由公式 $g_{\text{lum}}=4 \cos\theta|\mu||m|/(\mu^2+|m|^2)$ 决定,其中 $|\mu|$ 和 $|m|$ 分别代表电跃迁偶极矩(D)和磁跃迁偶极矩, $\theta(^{\circ})$ 为二者的夹角.对于本征CPL材料,大多数纯有机小分子的 $|m|$ 通常远小于 $|\mu|$,致使其 $|g_{\text{lum}}|$ 值普遍偏低.尽管部分镧系化合物由于独特的磁偶极允许而电偶极禁阻的 $4f\rightarrow 4f$ 跃迁,可实现高 $|g_{\text{lum}}|$ 值,但其低发光效率不利于实际应用.相比之下,组装CPL材料能够有效克服上述瓶颈,通过分子间相互作用增强自旋轨道耦合诱导自旋极化和自旋选择性,显著提升材料的 $|g_{\text{lum}}|$ 值^[27-29].在众多组装CPL材料中,聚合物共组装材料因其更大的结构尺寸,能够实现高效的手性传递与协同放大,近年来备受关注^[30].基于非手性聚合物通过非共价相互作用构建的共组装材料体系兼具设计灵活、制备简便与性能优异等优势^[31,32].该体系的独特之处在于可直接

赋予发光材料独特的手性光学特性,避免了复杂的手性合成过程,同时保持优异的溶液加工特性.然而,目前尚缺乏对这类非手性聚合物共组装CPL材料的系统性总结.因此,本文聚焦于非手性聚合物共组装产生CPL的材料体系,综合评述其组装原理与构效关系,并讨论当前面临的挑战与未来应用前景,旨在为新型高性能CPL材料的设计与开发提供有价值的参考与思路.

手性放大包括军官与士兵效应^[33]和大多数规则^[34]等两个基本原理.军官与士兵效应中,体系的手性由少数手性单元(“军官”)控制,而主要单元(“士兵”)则为非手性.后者则指体系手性由一对对映异构体中过量存在的异构体决定[图1(B)].这两个原理最初在构筑手性高分子时被发现,现已扩展至组装聚合物领域^[35].有研究指出,此类现象源于螺旋反转惩罚机制与错配惩罚机制^[36],在由大量构建单元组成的体系(如聚合物体系及扩展的宏观/纳米尺度聚集体)中,该效应可能被放大.

本文围绕基于非手性聚合物的共组装CPL材料,按手性来源将其分为手性小分子共组装、手性高分子共组装及手性对称性破缺共组装3类体系,综合评述了其研究进展与应用前景,以期推动有机CPL材料的进一步发展.

1 手性小分子与非手性聚合物共组装体系

手性小分子作为手性掺杂剂与非手性聚合物共组装,是构建高性能CPL材料的有效策略之一[图2(A)].根据手性小分子结构的不对称性,共组装体系可分为非手性聚合物与中心手性掺杂剂、非手性聚合物与轴手性掺杂剂和非手性聚合物与螺旋手性掺杂剂共组装等3类[图2(B)].该体系具有分子结构多样及易于合成与修饰等优势,适用于聚芴及聚乙炔等共轭聚合物及其衍生物,通过中心手性、轴手性与螺旋手性等不同手性源,实现对CPL信号强度、旋向及发光颜色的精准调控.

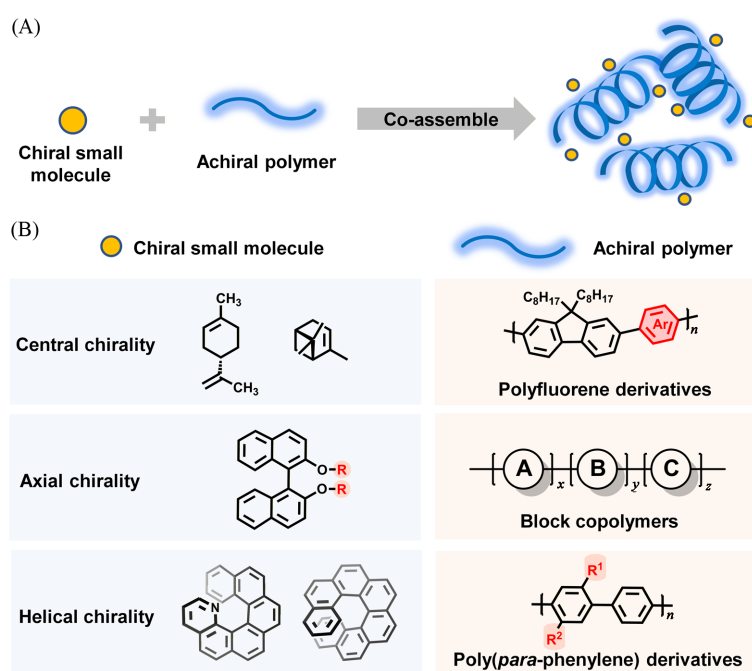


Fig. 2 Co-assembly systems of chiral small molecules and achiral polymers(A) and structure of chiral small molecules and achiral polymers(B)

1.1 非手性聚合物与中心手性掺杂剂共组装

氨基酸、糖、柠檬烯及萜烯等天然化合物中具有多个手性中心,是一类优良的手性掺杂剂^[37,38].在共组装过程中,主要通过氢键及范德华力等弱相互作用,驱动聚芴、聚乙炔及其衍生物等非手性聚合物中形成有序分子堆积结构,进而实现CPL信号的产生与放大.该体系的优势在于手性掺杂剂来源丰富、加工简便,尤其适用于构建具有生物相容性的CPL薄膜.受到这些天然化合物共组装的启发,

研究人员进一步利用中心手性化合物与非手性聚合物进行共组装,并对共组装体的空间取向加以限制,使其特定的手性构型得以稳定存在^[39].中心手性掺杂剂需满足以下条件:(1)具有稳定的手性中心;(2)含有能与聚合物主体形成分子间相互作用的官能团;(3)具有良好的溶解性;(4)与聚合物形成均相溶液.目前,基于中心手性掺杂剂的共组装体系的 $|g_{lum}|$ 值多在 10^{-3} ~ 10^{-2} 量级.如何通过分子设计与组装工程进一步提升手性传递与放大效率,是优化其性能的关键方向.

在CPL共组装中,最常用和最有效的非手性聚合物是聚芴及其衍生物,通过在聚芴主链中引入苯并噻二唑(F8BT)^[40]、噻吩^[41]、咪唑^[42]、硅芴^[42]、苯^[43]及乙炔^[44]等单元实现对共组装堆积方式和CPL光色的调控[图3(A)].2010年,Fujiki等^[38]将非手性聚芴溶解于由手性柠檬烯/良溶剂/不良溶剂组成的三元手性溶剂体系中,得到了具有圆二色(Circular dichroism, CD)和CPL特性的共组装材料.聚芴主链在 π - π , C—H $\cdots\pi$ 及范德华力等分子间作用力下形成 β 构象,在434 nm处产生CPL信号,其 $|g_{lum}|$ 值约为 2.33×10^{-3} .在此基础上,Zhang等^[45]通过在手性柠檬烯中冷却聚(9,9-二辛基芴)溶液制备了具有CPL特性的固体薄膜[图3(B)].原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)测试结果表明,螺芴聚集体呈现螺旋扭曲结构,证实了该结构是体系产生CD和CPL响应的根本原因.此外,螺旋结构在溶剂挥发后形成的固体薄膜中完整保留,基于此制备了一种以非手性 π 共轭聚合物薄膜为基础、针对柠檬烯手性进行对映选择性识别的多级传感器.2024年,Zhang等^[40]在聚芴主链中引入不同的缺电子体调控分

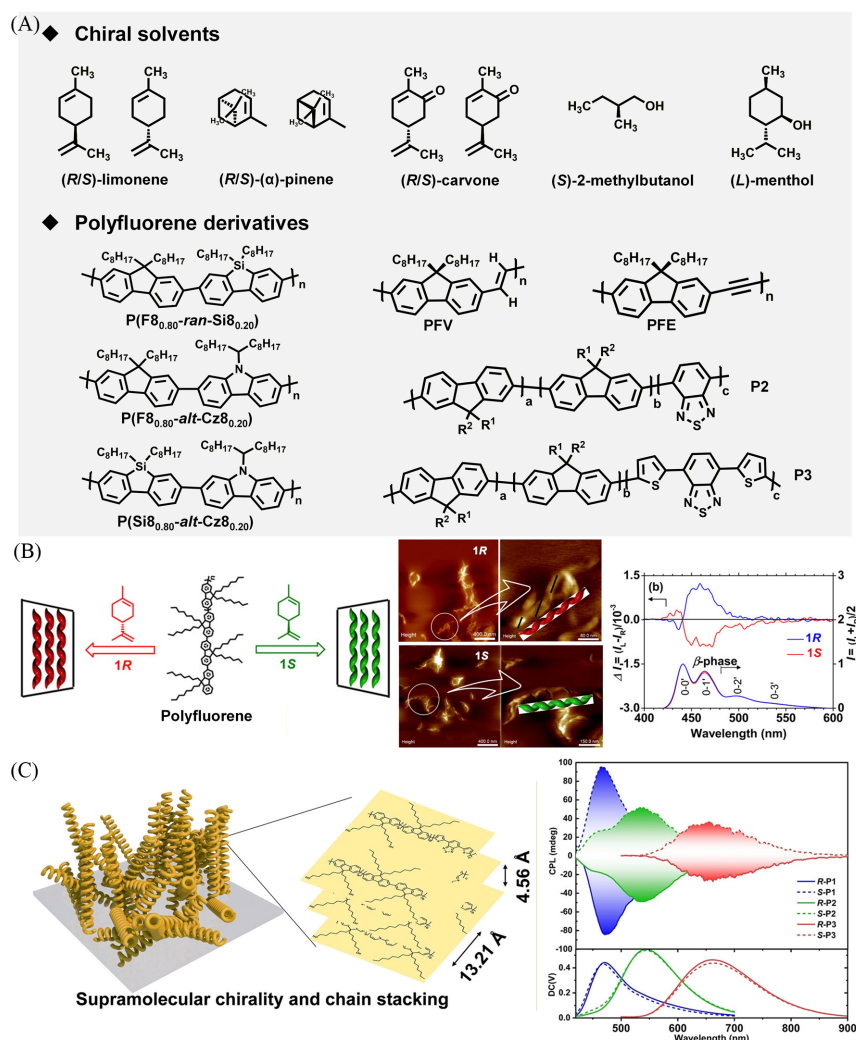


Fig. 3 Polyfluorene derivatives co-assembled with central-chiral dopants(A), polyfluorene co-assembled with central-chiral dopants(B)^[45], and structural characterization and CPL spectra of P2 and P3(C)^[40]

(B) Copyright 2016, American Chemical Society; (C) Copyright 2024, John Wiley and Sons.

子内电荷转移, 最终通过共组装获得了具有红绿蓝三色的CPL薄膜[图3(C)]. 并通过三色薄膜共混实现量子产率高达80.8%和 $|g_{lum}|$ 值为 1.4×10^{-2} 的理想白光发射CPL薄膜[CIE坐标: (0.33, 0.33)].

近年来, 螺旋聚合物以其独特的螺旋结构和旋光活性成为CPL领域的热门材料. 2023年, Deng等^[46]报道了一种非手性螺旋聚合物共组装实现多色可调谐CPL的策略. 该研究首先利用手性苯乙胺对映体合成了1,8-萘酰亚胺衍生的手性荧光小分子, 随后将其与消旋聚乙炔和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)共组装制备了蓝绿黄多色CPL复合薄膜, 最大 $|g_{lum}|$ 值为0.028[图4(A)]. 在共组装过程中, 随着溶剂的挥发, 手性荧光小分子与聚乙炔之间逐渐形成氢键、 π - π 及C—H $\cdots\pi$ 相互作用, 分子间相互作用促使聚乙炔形成螺旋结构, 并使其在PMMA基质中有序排列与聚集. 最终, 通过圆偏振荧光能量转移, 将共组装CPL薄膜与含有尼罗红的PMMA薄膜简单堆叠, 赋予复合物薄膜从无到有的高效CPL, $|g_{lum}|$ 值为0.011. 该研究为未来研究多色可调谐CPL材料提供了一个实用的思路.

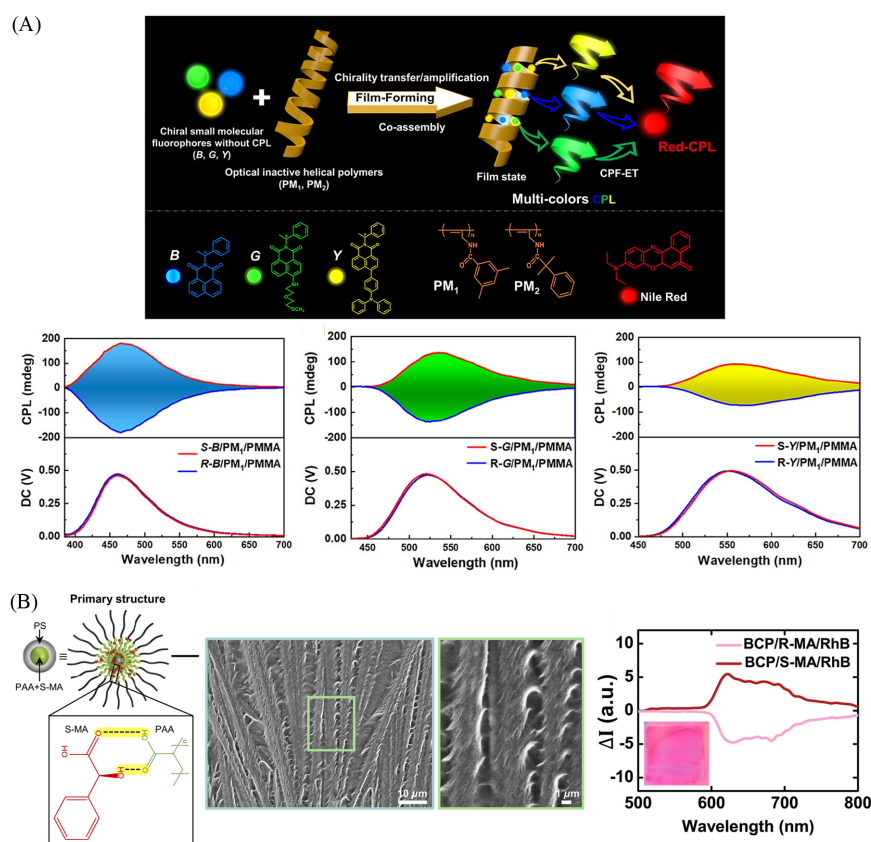


Fig. 4 Synthesis route of polyacetylene derivatives co-assembled with central-chiral dopants(A)^[46], structural characterization and CPL spectra of block copolymers co-assembled with central-chiral dopants(B)^[47]

(A) Copyright 2023, American Chemical Society; (B) Copyright 2025, American Association for the Advancement of Science.

2025年, Lin等^[47]通过非手性两亲性星形嵌段共聚物(Block Copolymers, BCPs)与(R/S)-扁桃酸(MA)的共组装, 构建了具有层级手性结构的共组装体[图4(B)]. 该材料展现出 $|g_{lum}|$ 值高达0.11的高效红光CPL, 并可通过浓度调节实现CPL信号反转. 扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)照片显示R-MA形成右手螺旋结构, S-MA形成左手螺旋结构. 通过分子动力学模拟进一步揭示了聚丙烯酸-嵌段-聚苯乙烯(PAA-b-PS)与MA通过氢键及 π - π 相互作用共组装的机制.

1.2 非手性聚合物与轴手性掺杂剂共组装

轴手性源于分子轴周围基团旋转受阻所形成的稳定构象异构体, 对映异构体互为不可重合的镜像, 从而与中心手性形成明确区分. 常见的轴手性掺杂剂为联萘及其衍生物, 在共组装过程中, 通过 π - π 堆积和静电相互作用, 与非手性聚合物形成高度有序的螺旋纳米纤维, 从而获得较高的 $|g_{lum}|$ 值, 通

常位于 10^{-2} ~ 10^{-1} 量级。近年来,轴手性化合物因其在调控手性共组装方面展现出的独特潜力与价值而受到关注。

2012年, Akagi等^[48]利用阳离子型 π -共轭聚合物[聚(对-亚苯基)衍生物PPP]与阴离子型轴手性化合物(联萘衍生物BNP)通过静电相互作用和 π - π 相互作用共组装成功构筑了具有蓝色CPL特性的球晶[图5(A)]. 偏光显微镜图像显示, 聚合物球晶平均尺寸约为200 nm, 并呈现马耳他十字图案, 表明聚合物链的螺旋轴方向与球晶的径向方向平行. PPP-BNP在甲醇和水的溶液中, 表现出高达 3×10^{-2} 的 $|g_{lum}|$ 值. 然而, 由于聚集引起的猝灭(Aggregation-caused quenching, ACQ), PPP-BNP共组装体的发光强度低于单独的PPP.

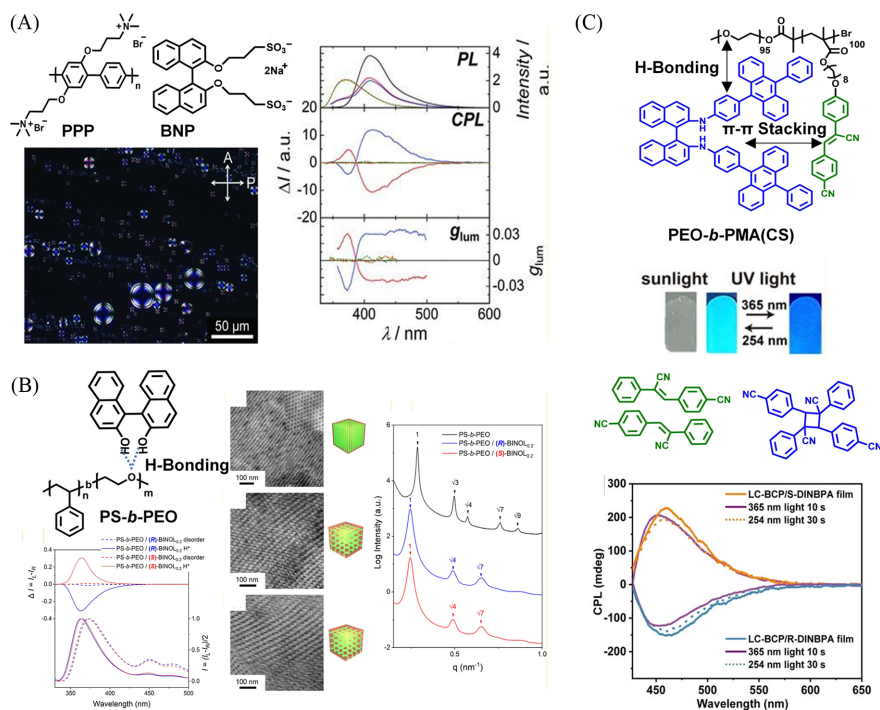


Fig. 5 Poly(*para*-phenylene) derivatives co-assembled with axial-chiral dopants(A)^[48], PS-*b*-PEO co-assembled with axial-chiral dopants along with their corresponding CPL spectra(B)^[51], PEO-*b*-PMA co-assembled with axial-chiral dopants along with their corresponding CPL spectra(C)^[52]

(A) Copyright 2012, John Wiley & Sons; (B) Copyright 2024, American Chemical Society; (C) Copyright 2025, John Wiley & Sons.

得益于BCPs的组装特性, 其与轴手性掺杂剂的共组装已成为实现高性能CPL的有效策略. 2022年, Cheng等^[49]发现具有柔性主链的非手性苊基聚合物(LC-P3)易通过分子间 π - π 堆积作用与刚性联萘基手性掺杂剂结合, 优先构筑手性共组装体(*R/S*-M-P3), 其量子产率为48.5%, $|g_{lum}|$ 值为 6.47×10^{-2} . 2024年, 他们进一步利用轴手性*R/S*-I与BCPs共组装, 制备的(*R/S*-I)_{0.23}-(P2)_{0.77}-UV薄膜呈现出规则螺旋纳米纤维结构, 并在373 K下发出 $|g_{lum}|$ 值为 7.84×10^{-2} 的明亮室温磷光^[50]. 2024年, Ho等^[51]将非手性嵌段聚合物(PS-*b*-PEO)与(*R/S*)-1,1'-联-2-萘酚(BINOL)通过氢键共组装[图5(B)]. $|g_{lum}|$ 值实现大幅提升, 可达到0.3. 2025年, Lu等^[52]利用具有动态共价键的BCP与轴手性二胺衍生物(DINBPA)共组装, 制备了具有高 $|g_{lum}|$ 值(0.11)的CPL薄膜[图5(C)]. 氰基二苯乙烯基团的动态共价键不仅赋予薄膜手性固定能力, 还能在紫外光辐照下调控CPL发光波段, 为构建手性信息存储可视化模型提供了可能.

基于手性联萘衍生物共组装体系的卓越的CPL性能, 研究人员设计合成了一系列联萘衍生物手性掺杂剂. 2020年, Cheng等^[53]通过引入具有高载流子迁移率的苊基团, 设计了基于1,1'-联萘基的对映异构体(*R/S*-3), 其与F8BT共组装的材料实现了0.01的 $|g_{lum}|$ 值, 电致发光不对称因子($|g_{el}|$)值为 9.8×10^{-3} . 2024年, Murata等^[54]报道了F8BT与BINOL的共组装材料, 该材料也实现了0.01的 $|g_{lum}|$ 值.

聚芴衍生物在轴手性掺杂剂的共组装中依然扮演重要角色[图6(A)]. 2017年, Kim等^[55]采用F8BT与商用手性掺杂剂R-5011共组装, 实现了高达0.72的 $|g_{lum}|$ 值和1.13的 $|g_{el}|$ 值. R-5011的高螺旋扭曲力(Helical twisting power, HTP)驱动F8BT主体发生宏观扭曲堆积, 且 $|g_{lum}|$ 值随膜厚度增加而提升. 理论分析表明, 共组装薄膜中双折射率对光致和电致CPL贡献相同, 而器件结构中阴极处的反射现象造成CPL信号增强, 导致 $|g_{el}|$ 大于 $|g_{lum}|$ 值. 基于此, 通过引入第三组分荧光小分子, 该体系成功实现了多色CPL. Murata等^[56]和Li等^[57]分别实现了量子产率大于90%、 $|g_{lum}|$ 值为0.27的红色CPL和量子产率为79%、 $|g_{lum}|$ 值为0.26的黄色CPL[图6(B)]. 为了实现共组装体系的高 $|g_{lum}|$ 值的多光色CPL, 研究者在聚芴主链中引入吡啶^[58]、异氰基苯^[59]、异喹啉^[60]、噻吩^[61]及苊^[62]等基团. 其中, 苊及其衍生物具有优异的发光性质和共组装能力, 在聚芴主链中引入苊单元有助于提升CPL性能. 2024年, Geng等^[63]将2,7位取代的苊基引入聚芴主链得到聚合物LC-P, 将其与3,3位取代的手性联萘基掺杂剂R/S-3共组装, (R/S-3)_{0.05}-(LC-P)_{0.95}共组装体发出 $|g_{lum}|$ 值为0.31的蓝色CPL. 理论计算表明, R/S-3与LC-P通过 π - π 相互作用(距离约0.37 nm)形成螺旋纳米结构. 2024年, Chu等^[64]系统比较了苊基在聚芴主链上不同取代位置的影响[图6(C)]. 研究发现, 经过退火处理后, 基于2,7位取代聚合物BP-2的共组装薄膜

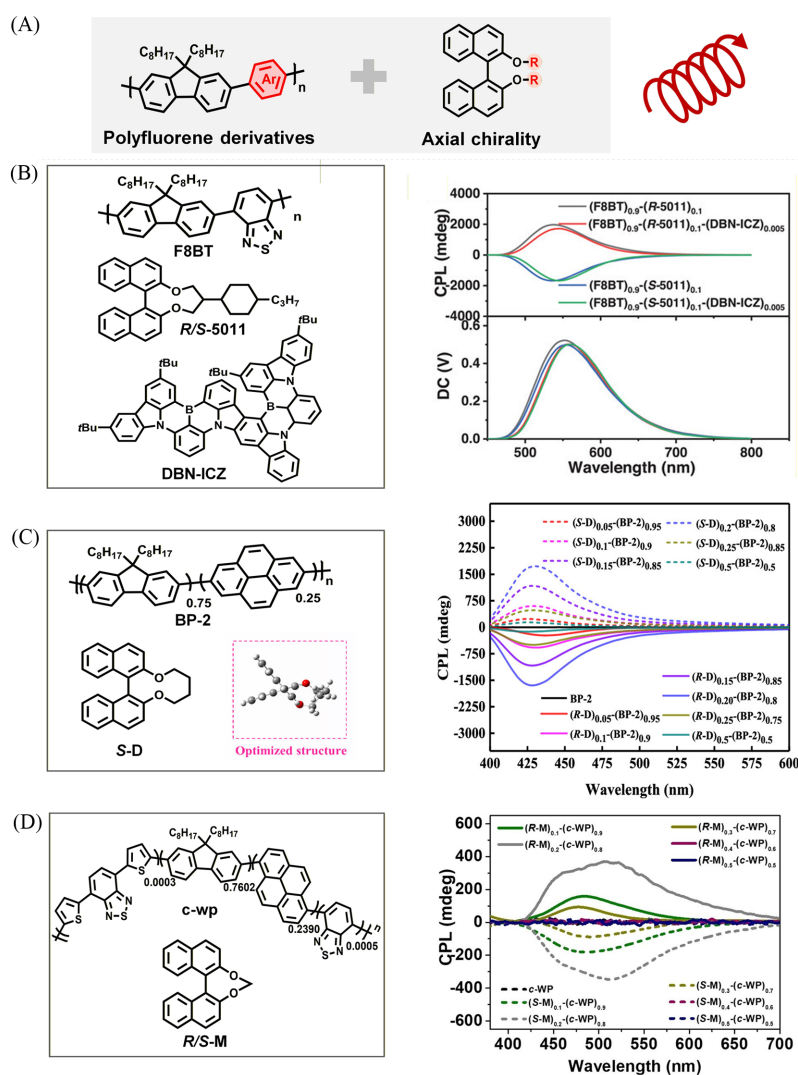


Fig. 6 Schematic diagram of polyfluorene derivatives co-assembled with axial-chiral dopants(A), F8BT co-assembled with R/S-5011 and the CPL spectra(B)^[57], BP-2 co-assembled with S-D and the CPL spectra(C)^[64], and c-WP co-assembled with R/S-M and the CPL spectra(D)^[61]

(B) Copyright 2024, John Wiley & Sons; (C) Copyright 2024, American Chemical Society; (D) Copyright 2023, John Wiley & Sons.

的 $|g_{lum}|$ 值高达0.71, 是基于1,6位取代聚合物BP-1共组装薄膜($|g_{lum}|=0.12$)的6倍. 分子动力学模拟证实更紧密的堆积更有利于提升 $|g_{lum}|$ 值. 2023年, Cheng等^[61]通过将刚性联萘衍生物(*S*-/*R*-*M*)与主链共轭的芘基聚合物(*c*-WP)共组装[图6(D)], 构建了能够发出白光的CPL薄膜, 其 $|g_{lum}|$ 值可达到0.053. 这些研究通过对聚芘主链进行精准设计与调控, 阐明了分子堆积与CPL性能之间的内在关联, 为设计高性能、多色CPL共组装材料提供了一种有效的分子设计策略.

1.3 非手性聚合物与螺旋手性掺杂剂共组装

螺烯是一类由苯环在邻位稠合形成的非平面多环芳烃, 其独特的螺旋构象赋予分子固有的螺旋手性与显著的旋光性, 在共组装体系中能有效形成特定的螺旋结构^[65][图7(A)]. 该类掺杂剂在共组装体系中不仅能通过空间位阻与 π - π 相互作用发挥作用, 还可以借助激发态杂化和Förster共振能量转移等机制显著放大CPL信号, $|g_{lum}|$ 值最高可达0.5. 螺旋手性掺杂剂适用于F8BT等多种聚合物基质, 该组装体在CPL信号产生与放大、多色调控等方面展现出独特优势.

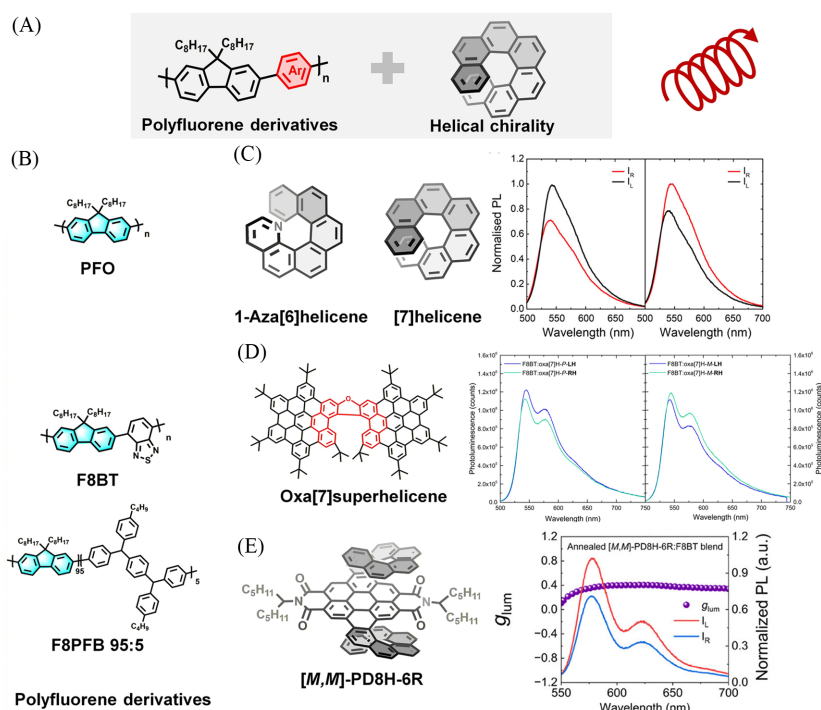


Fig. 7 Schematic diagram of polyfluorene derivatives co-assembled with helical-chiral dopants(A), structure of polyfluorene derivatives(B), CPL spectra of the achiral polymers co-assembled with 1-aza[6]helicene and [7]helicene(C)^[66], CPL spectra of the achiral polymers co-assembled with oxa[7]superhelicene(D)^[72], and CPL spectra of the achiral polymers co-assembled with PD8H-6R(E)^[73]

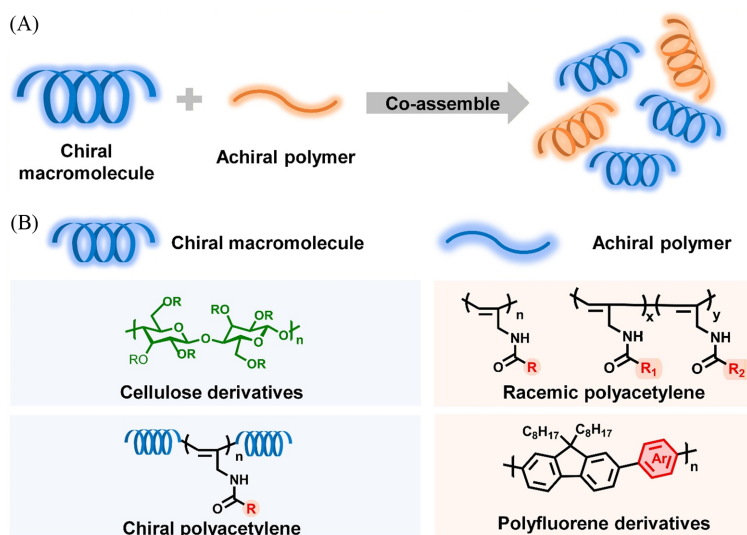
(C) Copyright 2013, John Wiley & Sons; (D) Copyright 2021, John Wiley & Sons; (E) Copyright 2025, John Wiley & Sons.

2013年, Fuchter等^[66]首次将具有螺旋手性的1-氮杂[6]螺烯分子与聚合物F8BT[图7(B)]进行共组装, 制备了CPL薄膜. CPL的旋向直接由螺烯分子的手性决定, 且共组装薄膜的 $|g_{lum}|$ 值与1-氮杂[6]螺烯的掺杂浓度呈正相关, 而与薄膜厚度无关. 当掺杂浓度达到53%时, $|g_{lum}|$ 值可提升至0.5. 高 $|g_{lum}|$ 值以及掺杂前后的荧光光谱均表明, 螺烯分子有效驱动聚合物形成宏观螺旋构象. 螺旋手性掺杂剂与聚芘及其衍生物共组装产生CPL具有普适性, [7]螺烯与F8BT的共组装薄膜同样具有0.5的高 $|g_{lum}|$ 值[图7(C)]. 此外, 由聚芘衍生物和1-氮杂[6]螺烯共组装的CPL材料同样表现出较高的 $|g_{lum}|$ 值^[67-71]. 2021年, Fuchter等^[72]利用非手性聚合物到发光螺烯分子oxa[7]superhelicene的Förster共振能量转移成功将螺烯的 $|g_{lum}|$ 值从溶液中的 3×10^{-3} 提升至共组装薄膜状态下的0.15[图7(D)]. 研究表明, 这种CPL放大效应并非直接源于主体聚合物的手性环境, 而是由于聚合物供体与螺烯受体间发生了电-磁跃迁偶极子的电子动力学耦合. 实验表明该放大效应适用于多种非手性聚合物主体, 为放大发光小分子的手性光学响应提供了一种通用策略.

2025年, Coropceanu等^[73]提出了另一种机理. 他们通过在F8BT中掺入双[8]螺烯(PD8H-6R)得到了 $|g_{lum}|$ 值为0.4的CPL[图7(E)]. 通过系统的光物理表征, 排除了能量转移或固态薄膜形变等因素的影响, 证实了CPL信号的增强源于共组装体系中给体与受体的激发态杂化, 即发光体电子结构发生改变. 该研究为设计不受能量转移过程限制的手性发光体系开辟了新途径.

2 手性高分子与非手性聚合物共组装体系

在非手性聚合物共组装体系中, 除手性小分子外, 手性高分子同样可作为有效的手性掺杂剂. 例如, 纤维素衍生物、手性聚乙炔衍生物等在与聚合物共组装时通过螺旋共组装显著提升CPL材料的 $|g_{lum}|$ 值(图8). 该策略还适用于PMMA及PAN等成膜性优良的聚合物基质, 不仅易于加工, 还能在宏观尺度上稳定组装体的螺旋结构, 显著提升体系的 $|g_{lum}|$ 值, 并具备良好的机械性能.



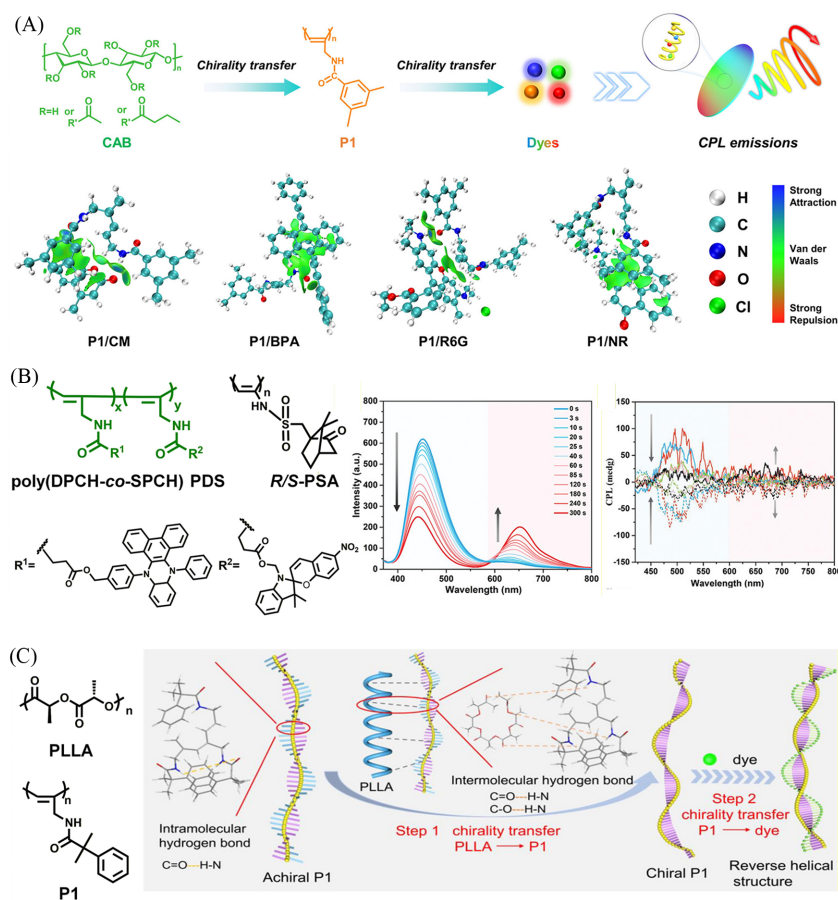


Fig. 9 Process of chirality transfer in composite films to generate full-color CPL emissions and IGMH analysis of the intermolecular interactions between P1 and emitters in the ground state(A)^[75], PL and CPL spectra of PDS/(R/S)-PSA mixtures(B)^[76], and schematic diagram of the chirality transfer process of PLLA/P1(C)^[77]

(A) Copyright 2025, John Wiley & Sons; (B) Copyright 2021, John Wiley & Sons; (C) Copyright 2022, American Chemical Society.

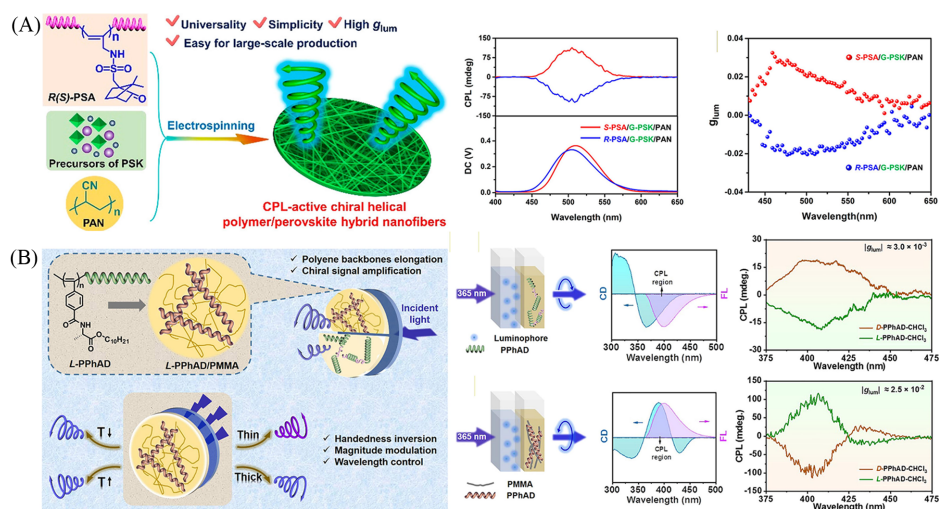


Fig. 10 Schematic illustration of the preparation of chiral helical polymer/perovskite hybrid/PAN nanofibers and the CPL spectra of the corresponding films(A)^[79], and the preparation of PPhAD/PMMA films and corresponding chiroptical properties(B)^[81]

(A) Copyright 2021, American Chemical Society; (B) Copyright 2022, American Chemical Society.

“匹配规则”^[80]. 2022年, Zou等^[81]在手性聚苯乙炔中掺入PMMA基质, 将 $|g_{\text{lim}}|$ 值提升约10倍, 达到 2.5×10^{-2} [图10(B)]. $|g_{\text{lim}}|$ 值的提升归因于PMMA促进了聚苯乙炔主链伸展与螺旋结构的规整化. 同年, Ma等^[82]采用同样的策略, 以PMMA为基质与P(phNA-co-BrNpA)制备了共组装薄膜, 也获得了较大的 $|g_{\text{lim}}|$ 值, 为 1.9×10^{-2} . 上述研究结果均表明, 非手性聚合物组分的引入能够显著稳定并优化共组装体的螺旋结构, 有助于提升 $|g_{\text{lim}}|$ 值.

3 对称性破缺的非手性聚合物共组装体系

手性掺杂剂与非手性聚合物共组装是构建CPL材料的有效策略, 其本质是通过引入手性组分, 打破体系的镜像对称性. 而另一种策略则无需引入手性组分, 通过施加不对称物理场(如涡流、机械扭转)或特定的分子间相互作用, 驱动非手性组分发生不对称堆积分布, 从而实现手性对称性破缺(图11). 此类基于对称性破缺的非手性聚合物共组装体系为实现“无手性掺杂”的CPL材料提供了新颖且具有前景的方案, 尤其适用于具有柔性主链或强界面作用的聚合物(如PVB, PVA及PEN等). 这类体系展现出多功能集成的潜力, 然而, 此类对称性破缺材料体系在设计上仍面临巨大的挑战, 其核心是需要同时调控分子对称性、构象稳定性以及非共价相互作用之间的平衡.

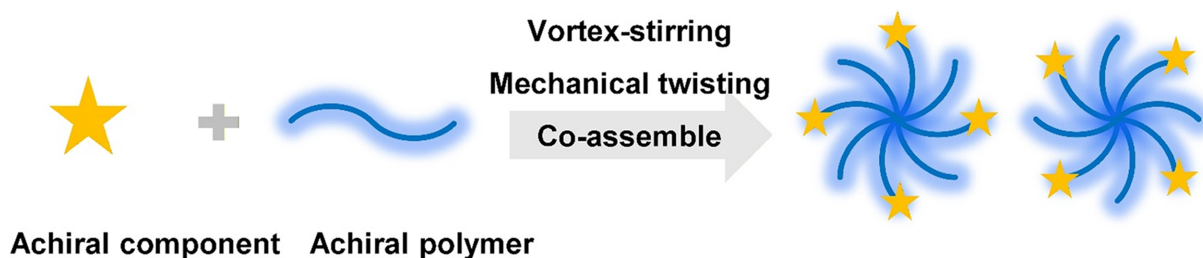


Fig. 11 Co-assembly systems of achiral polymers with symmetry breaking

2022年, Zou等^[83]提出一种基于机械搅拌产生对称性破缺的共组装策略. 他们将银纳米线(AgNWs)分散于PVA基质中, 通过控制搅拌方向驱动AgNWs沿涡流方向定向排列, 再进一步掺杂RhB荧光分子, 最终得到 $|g_{\text{lim}}|$ 值为 2×10^{-2} 的共组装薄膜. 2025年, Hong等^[84]在机械搅拌的基础上结合快速淬火处理, 进一步发展了该策略. 该研究以非手性聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)为基质, 蔻(COR)为发光体, 构筑了对称性破缺的共组装薄膜[图12(A)]. 其中, COR@PEN和H-COR@PEN薄膜的 $|g_{\text{lim}}|$ 值分别为 1.23×10^{-2} 和 6.93×10^{-3} . CPL信号的产生主要归因于掺杂剂与聚合物界面处的电荷转移、快速淬火固定的聚合物取向以及涡流诱导的沿厚度方向的取向不对称性等3个因素. 该策略超越了传统手性掺杂的局限性, 为实现可编程图案化CPL材料的规模化制备提供了新途径. 聚集诱导发射(Aggregation-induced emission, AIE)具有克服传统荧光分子在聚集态下发荧光猝灭问题的独特优势^[85-87], 使其能在固态或高浓度下实现高效发光, 这一特性有利于螺旋共组装体获得较强的光学信号. 2024年, Zhu等^[88]利用机械扭转策略将具有聚集诱导发光特性的荧光分子与非手性聚合物基质共组装CPL材料, 其 $|g_{\text{lim}}|$ 值约为 5×10^{-2} [图12(B)]. 通过调节扭转工艺参数(扭转方向、扭转密度及扭转纤维数量等), 使PLLA、PVA及聚碳酸丙烯酯(PPC)等聚合物形成螺旋结构, 产生自上而下的手性传递, 进而促进共组装体系中AIE荧光分子不对称分布. 这种由宏观扭转方向直接决定CPL旋转方向的机制, 为光学活性的调控提供了直观且可靠的物理手段.

除了以上策略之外, Deng等^[89]通过分子间相互作用制备了对称性破缺的共组装薄膜. 该研究以外消旋聚乙炔衍生物(Poly1)为发光体, 聚乙烯醇缩丁醛(PVB)中的含氧官能团与Poly1的酰胺官能团形成分子间氢键作用, 驱动Poly1产生微小的构象偏移, 并沿着聚合物主链不断传递, 最终形成具有手性的螺旋结构, 共组装薄膜的 $|g_{\text{lim}}|$ 值可达 1.6×10^{-3} .

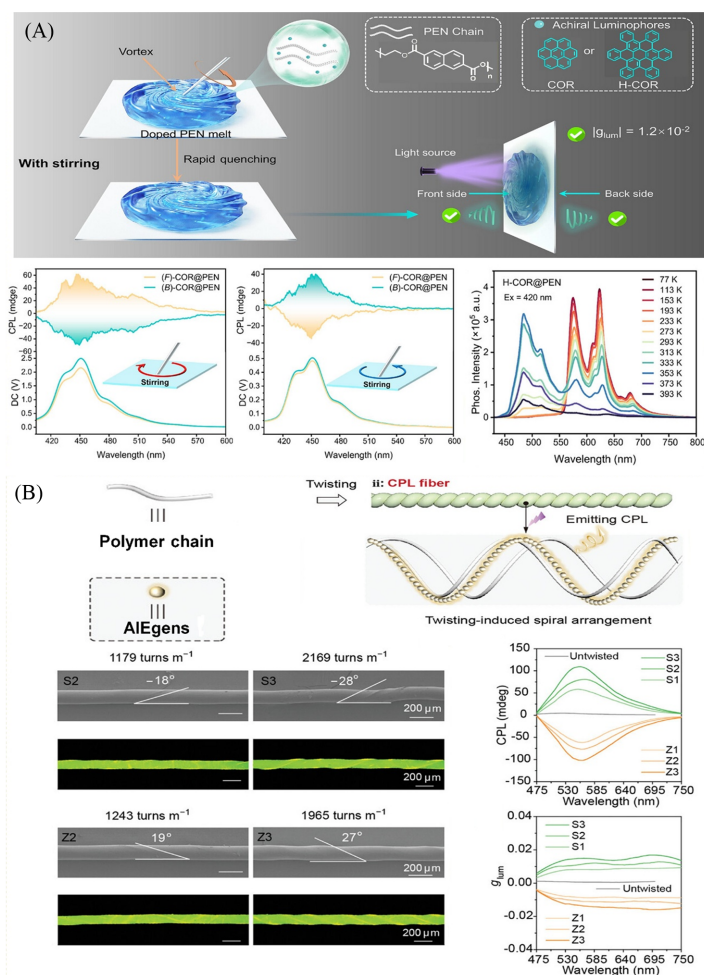


Fig. 12 CPL and delayed PL spectra of vortex-enabled CPL polymers(A)^[84], SEM, fluorescence microscopy images and CPL spectra of polymer chain co-assembled with AIEgens(B)^[88]

(A) Copyright 2026, John Wiley & Sons; (B) Copyright 2025, John Wiley & Sons.

4 应用

有机CPL材料具有自发光、轻薄、柔性以及独特的手性光学特性，在三维显示、信息加密与生物传感等领域展现出重要的应用前景。基于非手性聚合物的共组装CPL材料不仅显著提升了 $|g_{lum}|$ 值，更因其在固态薄膜下保持高效发光，大幅推进了CPL材料从实验室走向实际应用的进程。

4.1 圆偏振有机发光二极管

目前，基于手性小分子的圆偏振有机发光二极管(Circularly polarized organic light-emitting diodes, CP-OLEDs)普遍存在 $|g_{EL}|$ 值偏低的问题。此外，在制备过程中热蒸镀工艺会导致手性小分子发生消旋，在一定程度上限制了CP-OLEDs的发展。相比之下，基于非手性聚合物共组装材料可通过溶液加工法制备器件，能够有效提升CP-OLEDs的 $|g_{EL}|$ 值。

Cheng等^[61]通过调控蓝光单元(9,9-二正辛基芴与芘)、绿光单元(苯并噻二唑)和红光单元[4,7-双(噻吩-2-基)苯并二唑]的组成比例，构建了全色发光层，制备了白光CP-OLEDs[图13(A)]。其中， $(S/R-M)_{0.2}-(w-WP)_{0.8}$ 表现出暖白光发射， $(S/R-M)_{0.2}-(c-WP)_{0.8}$ 则呈现冷白光，且 $(S/R-M)_{0.2}-(c-WP)_{0.8}$ 的 $|g_{EL}|$ 值为 6.2×10^{-2} ，CIE坐标为(0.33, 0.33)，具备较高的白光质量，满足实际光源需求。为了进一步提升 $|g_{EL}|$ 值，Deng等^[78]以非手性共轭聚合物PFO与手性螺旋聚乙炔共组装作为手性发射层，通过溶液加工法构建了高效的CP-OLEDs。进一步采用PET作为器件基板，验证了柔性CP-OLEDs的可行性，并且其 $|g_{EL}|$ 值可达到0.11[图13(B)]。该研究不仅展示了共组装体系在实现较高 $|g_{EL}|$ 值方面的潜

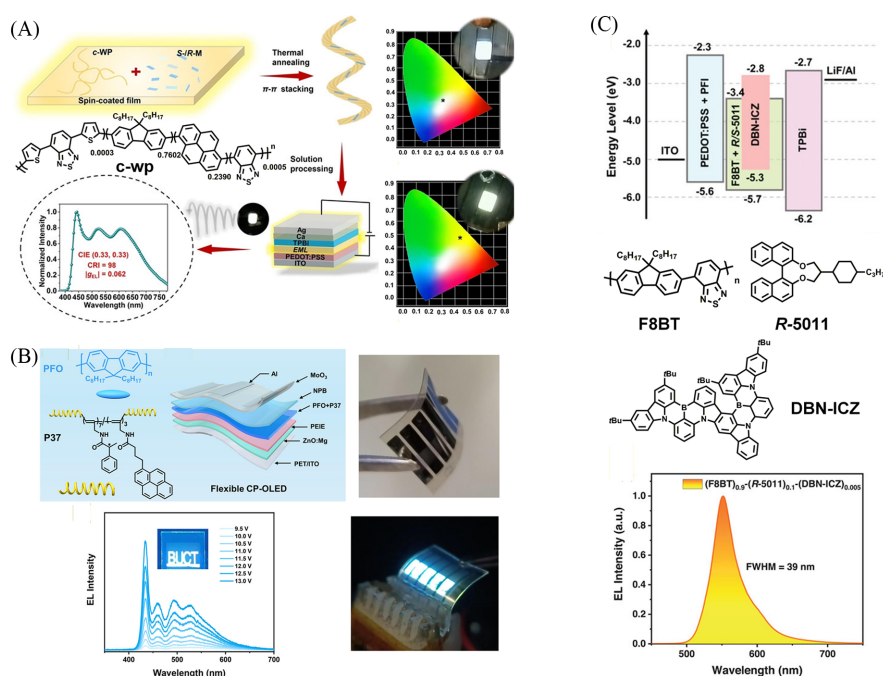


Fig. 13 Schematic diagram and electroluminescence spectra of the white OLED structure(A)^[61], schematic diagram and electroluminescence spectra of the flexible OLED structure(B)^[78], and energy diagram, molecular structures of emitting-layers and narrowband electroluminescence spectra(C)^[57]

(A) Copyright 2023, John Wiley & Sons; (B) Copyright 2025, American Chemical Society; (C) Copyright 2024, John Wiley & Sons.

力,还突出了该类材料在机械柔性及溶液加工方面的优势,为发展可穿戴、可弯曲光电器件提供了材料基础.为了提升发光色纯度,Chen等^[57]开发了一类兼具窄谱带发射、高 $|\lg_{\text{lim}}|$ 值和高量子产率的共组装CPL材料,可作为CP-OLEDs中的电致发光层[图13(C)].他们以R/S-5011为手性掺杂剂,F8BT为非手性聚合物并引入DBN-ICZ为FRET能量受体.由于(F8BT)_{0.9}-(R-5011)_{0.1}的发射光谱与DBN-ICZ的吸收光谱重叠,体系可发生有效的FRET能量转移.基于溶液加工工艺,以手性共组装体(F8BT)_{0.9}-(R/S-5011)_{0.1}-(DBN-ICZ)_{0.005}作为发光层所制备的CP-OLEDs表现出4.6%的外量子效率(EQE,%),且 $|\lg_{\text{EL}}|$ 值高达0.16.

基于非聚合物组装的CP-OLEDs体系已能实现较高的 $|\lg_{\text{EL}}|$ 值,比传统手性小分子体系可高出2~3个数量级,但在外量子效率方面仍存在提升空间.尽管如此,聚合物组装的体系凭借其在 $|\lg_{\text{EL}}|$ 值上的显著优势,仍展现出更优秀的机械柔性及溶液加工等特性,有望为高性能、柔性化的CP-OLEDs提供材料支撑.

4.2 信息加密

CPL材料携带大量的信息密度与交互维度,其在视觉外观上与普通发光材料无异,而其中携带的偏振信息只有在特定检测条件下才能被读取与解码.基于这一特性,CPL材料成为信息加密与高级防伪应用的新材料方案.

Cheng等^[88]通过刺绣技术实现了CPL的多级加密模式,并赋予CPL全彩发射特性,能够在信息加密方面带来更显著的优势.如图14(A)所示的莲池鱼刺绣,在紫外光照射下,非荧光部分被遮蔽,使得汉字“平安”、小鱼以及色彩斑斓的莲叶清晰呈现.随后使用CPL扫描仪对画布进行扫描,仅莲叶图案保持可见.通过为每个色块分配基于发射波长和手性方向的编码,即可实现信息加密.例如,沿莲叶图案的缺口顺时针读取对应颜色与CPL信号,可解密出十位数字序列“4093615278”.这种基于刺绣设计的光学加密图案,融合了荧光、CPL及发光颜色等多重编码维度,比传统加密方式具有更高的安全等级.

Ma等^[76]发现了一种光刺激响应材料,将其与PMMA掺杂后制备出复合薄膜.该薄膜具有光打印、

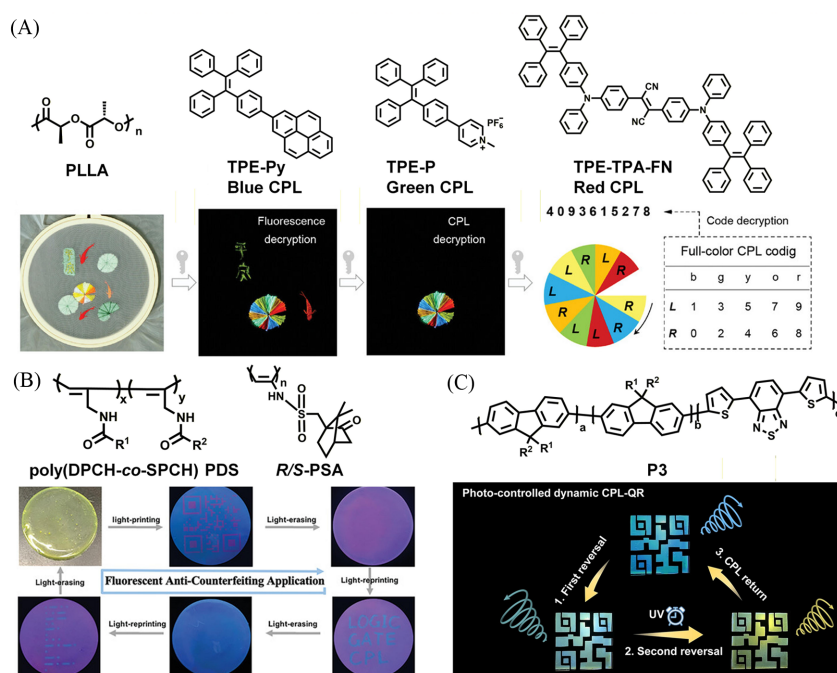


Fig. 14 Information encryption using fluorescence, CPL, and emission color codes of CPL fiber bundles(A)^[88], photochromic photographs of the PMMA composite film with light-printing, light-erasing and light-re-printing functions(B)^[76], and the switchable CPL and fluorescence color change of QR code(C)^[40]

(A) Copyright 2025, John Wiley & Sons; (B) Copyright 2021, John Wiley & Sons; (C) Copyright 2024, John Wiley & Sons.

光擦除与光重印的特性[图 14(B)], 可实现多次的光写入与擦除循环, 适用于二维码和摩斯密码等多层信息加密. 此外, Zhang 等^[40]设计了一种基于紫外光控制的 CPL 动态切换二维码[图 14(C)]. 其光学响应过程分为 3 个阶段: (1) 将 PAzo 薄膜覆盖于 P1 薄膜上时, 左旋 CPL 信号反转为右旋, 同时颜色由蓝色变为绿色; (2) 用紫外线照射 PAzo 薄膜, 右旋 CPL 信号转为弱左旋, 颜色由绿色变为黄色; (3) 移除 PAzo 薄膜后, 恢复为初始的蓝色的左旋 CPL.

通过结合荧光颜色、CPL 旋向及刺激响应行为, 基于非聚合物组装的 CPL 材料不仅提升了信息储存的安全性, 也为发展新型防伪、信息存储及动态加密系统提供了富有前景的技术路径.

5 总结与展望

本文系统总结了基于非共价相互作用驱动的非手性聚合物共组装 CPL 材料体系. 根据共组装手性源的不同, 体系可分为手性小分子共组装、手性高分子共组装以及手性对称性破缺共组装 3 类, 其 $|g_{lum}|$ 值可提升至 10^{-2} ~ 10^{-1} 量级. 与基于手性小分子的本征 CPL 体系相比, 非手性聚合物共组装策略展现出显著的优势. 一方面, 非手性聚合物具有长程、规则的结构, 适合作为手性共组装的受体与放大单元, 不仅有利于在宏观尺度上形成和固定手性特征, 提升材料的 $|g_{lum}|$ 值, 也为调控发光性能提供了更多的维度. 另一方面, 借助 π - π 堆积、静电相互作用、氢键等非共价相互作用, 可将刺激响应、室温磷光等功能与 CPL 高效集成, 从而构建出新型多功能 CPL 材料体系. 文中还简要描述了该类材料在 CP-OLEDs 和信息加密方面的应用潜力.

尽管基于非手性聚合物的共组装 CPL 材料在 CP-OLEDs 和信息加密领域中得到了概念性的验证, 但是其走向实际应用仍面临一系列艰巨的挑战. 首先, 多数材料体系的 $|g_{lum}|$ 值仍然远低于理论极限值 (2), 且难以同时维持高光致发光量子产率, 这严重限制了高性能圆偏振发光器件的发展. 因此, 未来需要从提升 $|g_{lum}|$ 值与增强发光强度两方面进行材料设计, 比如可尝试利用天然螺旋高分子结构和高效发光分子进行共组装, 从而实现高 $|g_{lum}|$ 值和高效发光. 其次, 共组装 CPL 体系手性传递和放大的物理机制仍不清晰, 亟需结合分子动力学和量子力学计算建立定量模型, 从而实现对高性能 CPL 共组装体

系的预测。此外, 还需要利用先进的表征技术对分子堆积方式进行验证。最后, 共组装CPL材料的实际应用受限于器件稳定性, 其CPL性能受热、电及力等因素的影响而衰减。未来, 需要通过封装技术的升级与材料自身的稳定化设计来协同解决这一难题。

总之, 基于非手性聚合物的共组装材料体系在提升CPL性能上取得了显著进展。通过分子设计与合成、超分子化学与材料科学的交叉融合, 有望推动CPL材料从基础研究走向实际应用, 在未来3D显示、生物医学、光通信等先进光电子器件中发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Zheng M. Y., Jin Z. B., Ma Z. Z., Gu Z. G., Zhang J., *Adv. Mater.*, **2024**, 36(25), 2313749
- [2] Zhang T., Wu W., Sun S. H., *Phys. Eng.*, **2024**, 34(2), 19—24(张婷, 吴伟, 孙仕海. 物理与工程, **2024**, 34(2), 19—24)
- [3] Hu Y., Huang Z., Willner I., Ma X., *CCS Chem.*, **2024**, 6(2), 518—527
- [4] Li D., Jiang Z., Liu X., Cheng Y., *Chem. Biomed. Imaging*, **2026**, 4(2), 144—166
- [5] Zinna F., Pasini M., Galeotti F., Botta C., Di Bari L., Giovannella U., *Adv. Funct. Mater.*, **2017**, 27(1), 1603719
- [6] Guo Q., Zhang M., Tong Z., Zhao S., Zhou Y., Wang Y., Jin S., Zhang J., Yao H. B., Zhu M., Zhuang T., *J. Am. Chem. Soc.*, **2023**, 145(7), 4246—4253
- [7] Shen P., Jiao S., Zhuang Z., Dong X., Song S., Li J., Tang B. Z., Zhao Z., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(32), e202407605
- [8] Mun S. E., Hong J., Yun J. G., Lee B., *Sci. Rep.*, **2019**, 9(1), 2543
- [9] Yao W., Lan R., Li K., Zhang L., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(1), 1424—1430
- [10] Li W. S., Shen Y., Chen Z. J., Cui Q., Li S. S., Chen L. J., *Appl. Opt.*, **2017**, 56(3), 601—606
- [11] Takaishi K., Matsumoto T., Kawatake M., Ema T., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(18), 9968—9972
- [12] Jia S., Yang B., Du J., Zhang J., Xie Y., Tao T., Tang J., Tang W., Gong J., *Small*, **2025**, 21(6), 2408219
- [13] Wei S. Q., Li Z. H., Sun C. L., Li Y., Wang X. Y., Ding T. M., Zhu X., Tu Y. Q., Zhang S. Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2026**, 65(3), e23152
- [14] Wang H. X., Zhu X., Liu M., *Chem. Soc. Rev.*, **2025**, 54(11), 5516—5550
- [15] Li X., Xie Y., Li Z., *Adv. Photonics Res.*, **2021**, 2(4), 2000136
- [16] Hamada H., Itabashi Y., Shang R., Nakamura E., *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, 142(4), 2059—2067
- [17] Ji M. J., Li M., Chen C. F., *Chem. Sci.*, **2025**, 16(27), 12277—12292
- [18] Nayani K., Kim Y. K., Abbott N. L., *Nat. Mater.*, **2018**, 17(1), 14—15
- [19] Chen N., Yan B., *Molecules*, **2018**, 23(12), 3376
- [20] Li J. K., Chen X. Y., Guo Y. L., Wang X. C., Sue A. C. H., Cao X. Y., Wang X. Y., *J. Am. Chem. Soc.*, **2021**, 143(43), 17958—17963
- [21] Li J. K., Chen X. Y., Zhao W. L., Guo Y. L., Zhang Y., Wang X. C., Sue A. C. H., Cao X. Y., Li M., Chen C. F., Wang X. Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(4), e202215367
- [22] Willis O. G., Zinna F., Bari L. D., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(25), e202302358
- [23] Zhang G., Cheng X., Wang Y., Zhang W., *Aggregate*, **2023**, 4(1), e262
- [24] Wang F., Ji W., Yang P., Feng C. L., *ACS Nano*, **2019**, 13(6), 7281—7290
- [25] Zhao T., Duan P., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(27), e202406524
- [26] Yuan W., Lu S., Li X., Li Z., Gu X., Liu X., Ren Z., Wang F., Chen X., *Aggregate*, **2025**, 6(7), e70042
- [27] Michaeli K., Kantor-Uriel N., Naaman R., Waldeck D. H., *Chem. Soc. Rev.*, **2016**, 45(23), 6478—6487
- [28] Wang Z., Gao M., Ren S., Hao X., Qin W., *Adv. Mater.*, **2019**, 31(48), 1904857
- [29] Harris J., Grillo V., Mafakheri E., Gazzadi G. C., Frabboni S., Boyd R. W., Karimi E., *Nat. Phys.*, **2015**, 11(8), 629—634
- [30] Wang M., Yang K., Wang X., Tan Z., Pan K., Deng J., Zhao B., *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 12(3), 2301513
- [31] Ryan K. R., Down M. P., Hurst N. J., Keefe E. M., Banks C. E., *eScience*, **2022**, 2(4), 365—381
- [32] Shi C. Y., Zhang Q., Tian H., Qu D. H., *SmartMat*, **2020**, 1(1), e1012
- [33] Lifson S., Green M. M., Andreola C., Peterson N. C., *J. Am. Chem. Soc.*, **1989**, 111(24), 8850—8858
- [34] Green M. M., Garetz B. A., Munoz B., Chang H., Hoke S., Cooks R. G., *J. Am. Chem. Soc.*, **1995**, 117(14), 4181—4182
- [35] Suzuki N., Taura D., Furuta Y., *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, 147(23), 19751—19761
- [36] van Gestel J., *Macromolecules*, **2004**, 37(10), 3894—3898
- [37] Yang H., Ma S., Zhao B., Deng J., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(10), 13668—13677
- [38] Nakano Y., Liu Y., Fujiki M., *Polym. Chem.*, **2010**, 1(4), 460—469
- [39] Yang K., Ma S., Zhang Y., Zhao B., Deng J., *Macromol. Rapid Commun.*, **2022**, 43(11), 2200111
- [40] Zhang G., Bao Y., Ma H., Wang N., Cheng X., He Z., Wang X., Miao T., Zhang W., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(17), e202401077
- [41] Kawagoe Y., Fujiki M., Nakano Y., *New J. Chem.*, **2010**, 34(4), 637—647

- [42] Wang L., Suzuki N., Liu J., Matsuda T., Rahim N. A. A., Zhang W., Fujiki M., Zhang Z., Zhou N., Zhu X., *Polym. Chem.*, **2014**, 5(20), 5920—5927
- [43] Fujiki M., Kawagoe Y., Nakano Y., Nakao A., *Molecules*, **2013**, 18(6), 7035—7057
- [44] Fujiki M., Jalilah A. J., Suzuki N., Taguchi M., Zhang W., Abdellatif M. M., Nomura K., *RSC Adv.*, **2012**, 2(16), 6663—6671
- [45] Zhao Y., Abdul Rahim N. A., Xia Y., Fujiki M., Song B., Zhang Z., Zhang W., Zhu X., *Macromolecules*, **2016**, 49(9), 3214—3221
- [46] Ma S., Zhao B., Deng J., *ACS Cent. Sci.*, **2023**, 9(7), 1409—1418
- [47] Kim M., Zhang M., Zhu Y. L., Yan Y., Pu X., Choi W., Chung S., Cho K., Kim J., Tsukruk V., Yang Z., Kotov N. A., Lu Z. Y., Kim D. H., Lin Z., *Science*, **2025**, 389(6761), eadu0296
- [48] Watanabe K., Iida H., Akagi K., *Adv. Mater.*, **2012**, 24(48), 6451—6456
- [49] Zhang Y., Li H., Geng Z., Zheng W. H., Quan Y., Cheng Y., *ACS Nano*, **2022**, 16(2), 3173—3181
- [50] Liu C., Li H., Chen Y., Xu D., Cheng Y., *Chem. Eng. J.*, **2024**, 486150442
- [51] Shao S. W., Puneet P., Li M. C., Ikai T., Yashima E., Ho R. M., *ACS Macro Lett.*, **2024**, 13(6), 734—740
- [52] Yuan J., He X., Chen L., Lu X., Lu Q., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(5), e202419924
- [53] Zhang X., Xu Z., Zhang Y., Quan Y., Cheng Y., *J. Mater. Chem. C*, **2020**, 8(44), 15669—15676
- [54] Yuan C., Eguchi K., Murata H., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **2024**, 63(2), 02SP10
- [55] Lee D. M., Song J. W., Lee Y. J., Yu C. J., Kim J. H., *Adv. Mater.*, **2017**, 29(29), 1700907
- [56] Sun H., Yuan C., Nishimura T., Ikai T., Murata H., *Jpn. J. Appl. Phys.* **2025**, 64(10), 10SP30
- [57] Guo C. H., Zhang Y., Zhao W. L., Tan K. K., Feng L., Duan L., Chen C. F., Li M., *Adv. Mater.*, **2024**, 36(38), 2406550
- [58] Zhang Y., Li D., Li Q., Quan Y., Cheng Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(44), 2309133
- [59] Zou H., Zhao S., Han C., Hu M., Zhou L., Chu B., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(18), 27289—27298
- [60] Zhao W. L., Guo W. C., Tan K. K., Yu Z. X., Li M., Chen C. F., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(4), e202416863
- [61] Zhang Y., Li Y., Quan Y., Ye S., Cheng Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(1), e202214424
- [62] Zhang Y., Tian G., Li D., Jiang Z., Quan Y., Cheng Y., *Laser Photonics Rev.*, **2024**, 18(11), 2400223
- [63] Chu B., Song F., Wang P., Cheng Y., Geng Z., *ACS Appl. Mater. Interface*, **2024**, 16(20), 26604—26612
- [64] Geng Z., Wang Z., Zhu S. E., Hu K., Yao K., Chu B., *Macromolecules*, **2024**, 57(9), 4567—4575
- [65] Wan L., Wade J., Wang X., Campbell A. J., Fuchter M. J., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10(13), 5168—5172
- [66] Yang Y., da Costa R. C., Smilgies D. M., Campbell A. J., Fuchter M. J., *Adv. Mater.*, **2013**, 25(18), 2624—2628
- [67] Wan L., Wade J., Shi X., Xu S., Fuchter M. J., Campbell A. J., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, 12(35), 39471—39478
- [68] Wan L., Liu Y., Fuchter M. J., Yan B., *Nat. Photonics*, **2023**, 17(2), 193—199
- [69] Brandt J. R., Salerno F., Fuchter M. J., *Nat. Rev. Chem.*, **2017**, 1(6), 0045
- [70] Wan L., Wade J., Salerno F., Arteaga O., Laidlaw B., Wang X., Penfold T., Fuchter M. J., Campbell A. J., *ACS Nano*, **2019**, 13(7), 8099—8105
- [71] Yan H., Wade J., Wan L., Kwon S., Fuchter M. J., Campbell A. J., Kim J. S., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10(25), 9512—9520
- [72] Wade J., Brandt J. R., Reger D., Zinna F., Amsharov K. Y., Jux N., Andrews D. L., Fuchter M. J., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(1), 222—227
- [73] Wan L., Cho E., Zhang R., Brock-Nannestad T., Wang Z., Brédas J. L., Coropceanu V., Gao F., *Adv. Mater.*, **2025**, 37(40), 2506941
- [74] Duan H., Li S., Zhao J., Li J., *Chem. Eng. J.*, **2024**, 483149130
- [75] Zhong H., Zhao B., Deng J., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(17), e202418463
- [76] Huang Z., Hu Y., Jin X., Zhao Y., Su J., Ma X., *Adv. Opt. Mater.*, **2021**, 9(12), 2100135
- [77] Gao X., Wang J., Yang K., Zhao B., Deng J., *Chem. Mater.*, **2022**, 34(13), 6116—6128
- [78] Wang N., Zhong H., Duan M., Gao X., Tan Z., Deng J., Zhao B., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(15), 23025—23035
- [79] Zhao B., Gao X., Pan K., Deng J., *ACS Nano*, **2021**, 15(4), 7463—7471
- [80] Zhong H., Gao X., Zhao B., Deng J., *Acc. Chem. Res.*, **2024**, 57(8), 1188—1201
- [81] Zhang H., Yang C., Shan S., Wen L., Chen D., Zou G., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(31), 36157—36165
- [82] Huang Z., He Z., Ding B., Tian H., Ma X., *Nat. Commun.*, **2022**, 13(1), 7841
- [83] Li J., Xie Y., Feng Z., Zhang C., Zhang H., Chen X., Zou G., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10(43), 16556—16563
- [84] Jin L., Mo W., Wang Z., Hong W., *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(15), e21524
- [85] Sun Z., Yin P., He S., Zhang K., Pan X., Wang J., Hao P., Zhou Z., Yang X., Ma L., Tan C., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, 41(3), 519—524
- [86] Xiong J., Wu M., Yao L. Y., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, 40(5), 887—893
- [87] Chen P., Zhang G., Li J., Ma L., Zhou J., Zhu M., Li S., Wang Z., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, 40(2), 293—304
- [88] Yu X., Chen L., Liu Q., Liu X., Qiu Z., Zhang X., Zhu M., Cheng Y., *Adv. Sci.*, **2025**, 12(4), 2412778
- [89] Li P., Gao H., Zhao B., Deng J., *Chem. Mater.*, **2022**, 34(16), 7503—7515

(Ed.: W, K, M)