

手性诱导制备聚合物圆偏振发光材料研究进展

刘梦阳, 高晓滨, 钟海, 赵彪*, 邓建平*

(北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 朝阳 100029)

摘要: 圆偏振发光(Circularly polarized luminescence, CPL)材料凭借其在三维显示、信息加密、生物传感及光电探测等前沿领域的巨大应用潜力,已成为手性光学与材料科学交叉领域的研究热点。其中,聚合物基CPL材料兼具高热稳定性、良好加工性与优异溶解性,在制备低成本、可溶液加工型、大面积和柔性手性发光器件方面展现出独特优势。近年来,手性诱导策略通过非共价键相互作用或纯物理相互作用(如选择性吸收与反射),将外部环境或诱导源的手性信息有效传递至非手性聚合物,已发展成为一种简便且灵活的CPL材料构建方法。本文系统综述了基于手性诱导策略制备聚合物CPL材料的最新研究进展,重点讨论了几种不同的手性诱导机制与所制备材料的性能优势,并介绍了该类材料在光电器件、生物医学及信息安全等领域的应用成果。最后,对该领域当前面临的挑战及未来发展方向进行了总结与展望。

关键词: 圆偏振发光; 聚合物; 手性诱导; 发光不对称因子

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260172

CSTR: 32170.14.CJL.20260172

Advances in polymeric circularly polarized luminescent materials based on chiral-induced strategy

LIU Mengyang, GAO Xiaobin, ZHONG Hai, ZHAO Biao*, DENG Jianping*

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Chaoyang 100029, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhaobiao@mail.buct.edu.cn, dengjp@mail.buct.edu.cn

Abstract: Circularly polarized luminescence (CPL) materials have become a research hotspot at the intersection of chiral optics and materials science, owing to their enormous application potential in cutting-edge fields such as 3D displays, information encryption, biosensing, and photodetection. Among them, polymer-based CPL materials combine high thermal stability, good processability, and excellent solubility, offering unique advantages in the fabrication of low-cost, solution-processable, large-area, and flexible chiral light-emitting devices. In recent years, chiral induction strategies, which facilitate the transfer of chiral information from an external environment or an inducer to achiral polymers through non-covalent interactions or purely physical interactions (such as selective absorption and reflection), have emerged as simple and flexible method for constructing CPL materials. This paper systematically reviews the latest research progress in utilizing chiral induction strategies to fabricate polymer-based CPL materials. It focuses on discussing several different chiral induction mechanisms and the performance advantages of the resulting materials, while highlighting their applications in optoelectronic devices, biomedicine, and information security. Finally, the current challenges and future development prospects in this field are discussed and summarized.

Keywords: circularly polarized luminescence; polymer; chiral induction; luminescence dissymmetry factor

收稿日期: 2026-05-11; 修订日期: 2026-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(52273165); 中央高校基本科研业务费专项资金(buctrc202225)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52273165); Fundamental Research Funds for the Central Universities (buctrc202225).

1 引 言

手性不仅是生命体系的核心属性,也是物质世界中最为迷人的几何特征之一^[1-5]。手性是指一个物体与其镜像无法重合的几何属性,这一特征在生命科学中具有至关重要的意义,例如DNA的双螺旋结构和蛋白质的二级结构等均表现出显著的手性特征。受此启发,研究者设计合成了一系列手性材料,并开发了其在手性催化^[6-11],手性传感^[12-18],手性分离^[19-25]等领域的应用。近年来,手性光学材料成为研究热点,其中具有CPL特性的材料在光电器件、生物医学、3D显示技术和信息防伪等方面展现出巨大应用潜力^[26-32],引发了手性科学领域工作者的广泛关注。当前,基于有机小分子^[33-36],聚合物^[37-40],聚集诱导发光体系^[41-44],超分子组装体^[45-48],金属有机框架^[49-52]及手性液晶^[53-56]的CPL材料研究取得了长足进展。其中,以聚炔^[57-62]、聚噻吩^[63-66]、聚苻^[67-72]等为代表的聚合物,不仅具有高稳定性和良好易加工性,同时主链为 π -共轭结构,兼具优异发光或电学性能,因而在构筑高性能CPL材料方面具有突出优势。衡量CPL性能的关键参数是 g_{lum} ,其定义为左旋和右旋圆偏振光强度之差与平均发光总强度之比: $g_{lum}=2\times(I_L-I_R)/(I_L+I_R)$,其中 I_L 和 I_R 分别为左旋和右旋圆偏振光的强度, g_{lum} 值大小介于-2与+2之间。

圆二色性(Circular dichroism, CD)和CPL分别反映物质在基态和激发态下的手性信息。根据Rosenfeld理论^[73], $g_{lum}=4\mu m \cos\theta/(|\mu|^2+|m|^2)$,其中 m , μ , θ 分别代表磁跃迁偶极矩、电跃迁偶极矩以及两者之间的夹角。受限于较小的磁跃迁偶极矩,小分子CPL材料的 g_{lum} 值较低,通常处于 10^{-5} - 10^{-3} 的水平。为克服小分子体系 g_{lum} 值偏低的局限,聚合物基CPL材料因其在手性放大方面的优势而受到广泛关注。早在1995年,Meijer教授^[74]提出了“长官与士兵”效应(Sergeants and Soldiers effect),揭示了超分子聚合物体系中显著的手性放大现象。几乎同一时期,Yashima教授^[75]通过实验证明,非手性聚苯乙炔衍生物在手性溶剂或小分子的诱导下,可通过非共价相互作用形成单一手性螺旋构象。这些开创性工作为后续高性能聚合物CPL材料的设计奠定了理论基础。聚合物不仅具备优异的成膜性、热稳定性及机械加工性能,更重要的是其长链结构可以通过多级超分子自组

装实现手性信号的逐级放大(即手性放大效应)^[76],从而将 g_{lum} 值提升至 10^{-2} 量级,甚至通过液晶相的协同作用接近理论极限。手性诱导策略是指利用外部手性源或手性环境,将手性信息传递至非手性或消旋聚合物体系,从而诱导其形成稳定的手性聚集态或螺旋构象,并赋予CPL活性。该策略已成为近年来聚合物CPL材料制备领域的研究重点。相比于通过复杂化学合成将手性发光单体共聚制备本征手性聚合物的直接构筑策略,手性诱导策略由于无需繁琐的分子设计和合成步骤,在材料组分选择和加工上更具灵活性。

本文系统综述了手性诱导制备聚合物CPL材料的研究进展。根据手性诱导过程中不同相互作用力的类型,我们将手性诱导策略分为两大类:基于非共价键相互作用的体系,以及基于纯物理机制的诱导体系。随后,介绍了这些材料在光电器件、生物医学和信息安全等领域的应用成果。最后,我们展望了该领域面临的挑战与未来的发展前景,以期新型高性能CPL材料的设计与应用提供参考。

2 非共价键相互作用体系

非共价键相互作用是目前制备聚合物CPL材料最常用的方法之一,这是由于该策略无需复杂的化学反应,操作简便,且非共价键的动态可逆特性赋予了材料优异的加工灵活性与环境响应性。其核心是利用手性源与聚合物之间的非共价键相互作用(如氢键、 π - π 堆积、疏水作用、范德华力等),实现手性信息的高效传递,从而诱导聚合物形成稳定的手性构象或聚集态,进而产生CPL信号。在该类策略中,由于手性源与聚合物之间无共价键连接,手性信息传递具有可逆性,并且可通过调控非共价键相互作用强度来实现CPL性能的精准调控。根据手性源类型的不同,可将其进一步分为手性溶剂、手性小分子、手性大分子三个体系。

2.1 手性溶剂

手性溶剂诱导法作为一种灵活高效的手性诱导策略,为构建高性能聚合物CPL材料提供了重要途径。天然存在的萜烯类化合物(如柠檬烯、 α -蒎烯)因其有明确的对映异构体,被广泛用作手性诱导源。例如,Liu等人^[77]利用天然萜烯作为手性源,通过 π - π 堆积、范德华力及CH- π 弱相互作用进行手性传递,采用相分离法诱导聚(9,9-二正癸

基芴)(PF10)形成手性聚集体(图1a)。在该过程中,PF10在外源手性分子作用下形成具有CD和CPL特性的手性聚集结构。Zhao等人^[78]使用R/S-柠檬烯对聚(9,9-二正辛基芴)(PF8)进行诱导,通过低温冷却处理,使PF8发生手性溶胶-凝胶转变成富含 β 相的螺旋聚集体(图1b)。将所得聚集体制备为固体薄膜,并经真空干燥去除柠檬烯后发现,即使在近300°C的高温条件下,PF8薄膜中仍保留了稳定的螺旋超结构,并表现出显著的CD和CPL信号(图1c)。该策略无需引入手性单体即可在非手性 π -共轭聚合物中高效诱导出手性,实现了超分子手性从液态聚集态到固态薄膜的稳定转移,并赋予了可耐受高温的手性记忆效应。

Yoshifum等人^[79]构建了一种基于手性萘烯的三元溶剂体系,成功诱导非手性 π -共轭聚合物聚[(9,9-二正辛基芴-2,7-二基)-交替-联苯](F8P2)形成光学活性结构。研究发现,在25°C条件下,将甲醇添加至含非手性发光聚合物聚[(9,9-二正辛基芴-2,7-二基)-交替-联噻吩](F8T2)的氯仿与S-柠檬烯或R-柠檬烯混合体系中时,F8T2会析出产生光学活性聚集体。该聚集体呈现强绿色CPL特性,在510-517nm波长范围内的 $|g_{lum}|$ 为0.06-0.07,荧光量子产率(PLQY)高达85-90%。进一步研究发现,当以乙醇替代甲醇作为不良溶剂时,CD信号发生反转,表明聚集体的螺旋构象发生改变。

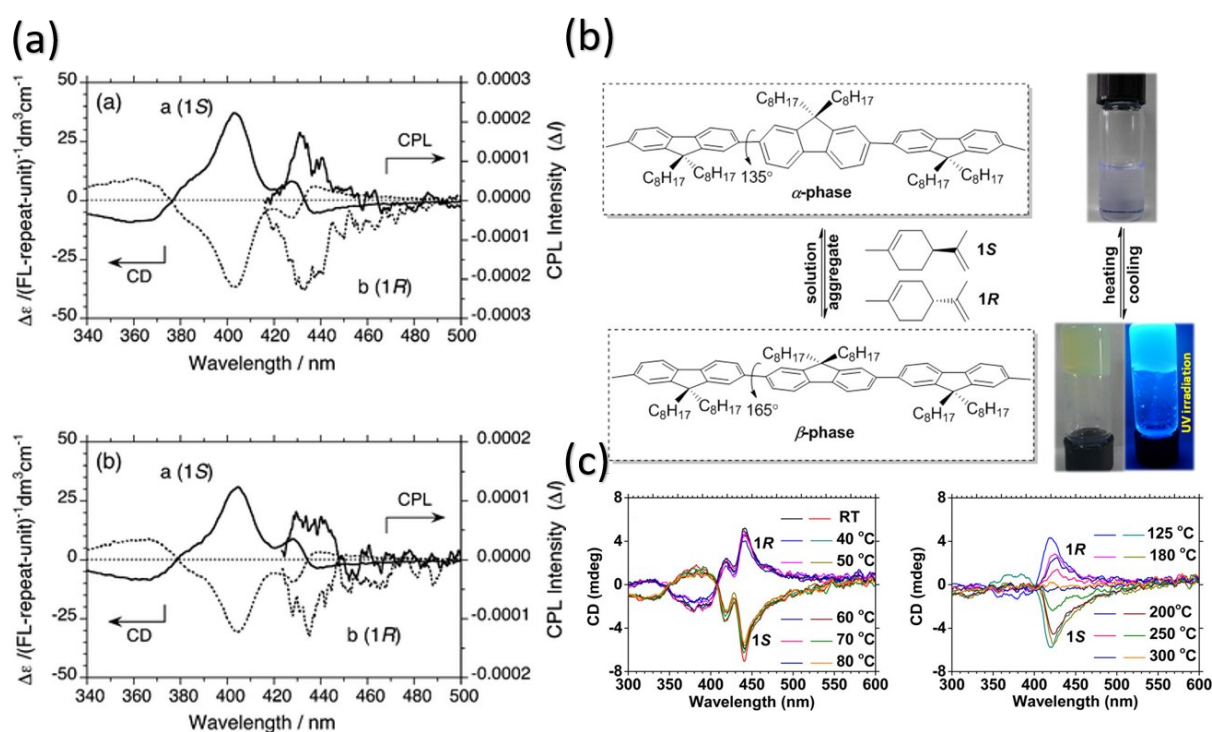


图1 (a) PF10在手性混合溶剂中CD与CPL谱图^[77]; (b) PF8的 β 相螺旋聚集体示意图; (c) F8在室温至300°C范围内的CD谱图^[78]

Fig. 1 (a) CD and CPL spectra of PF10 in chiral mixed solvents^[77]; (b) Schematic diagram of β phase helical aggregates of PF8; (c) CD spectra of F8 from room temperature to 300°C^[78]

Deng课题组^[80]设计合成了两类非手性取代炔单体:一类是易发生螺旋构象选择性聚合的三苯基取代炔单体(M1),作为手性诱导与螺旋结构构建的主体单元;另一类是带有四苯乙烯(TPE)聚集诱导发光(AIE)单元的荧光取代炔单体(M2),作为功能发光单元。以手性 α -蒎烯为唯一手性源(图2a),通过手性溶剂与聚合物主链之间的范德华力、 π - π 相互作用、C-H/ π 相互作用,实现手

性从 α -蒎烯向共聚物主链的高效传递,进而构筑了功能化CPL材料。

手性传递与荧光共振能量转移(FRET)的结合为多色CPL材料的制备提供了巨大灵活性。例如,Pan等人^[81]以非手性PF8为基质,利用R/S-柠檬烯作为手性源,将香豆素6(Cou6)、尼罗红(NR)作为非手性发射体,通过蒸发诱导自组装构建出P型和M型螺旋纳米纤维结构的聚合物薄

膜,通过多级手性转移(MCT)与顺序荧光共振能量转移(SFRET)过程实现了蓝、绿、红全色CPL发射(图2b)。该方法不仅避免了复杂的化学修饰,所制备的薄膜在移除手性源后依然具备 10^{-2} 量级的高不对称因子(图2c),为制备全色手性CPL薄

膜材料提供了便捷策略。此外, Daehoon 等人^[82]以手性柠檬烯为手性源,诱导非手性聚二苯基乙炔(PDPA)衍生物产生稳定的分子内轴向手性(图2d),获得了高达 1.40×10^{-3} 的吸收不对称因子(g_{abs})与强CPL信号。

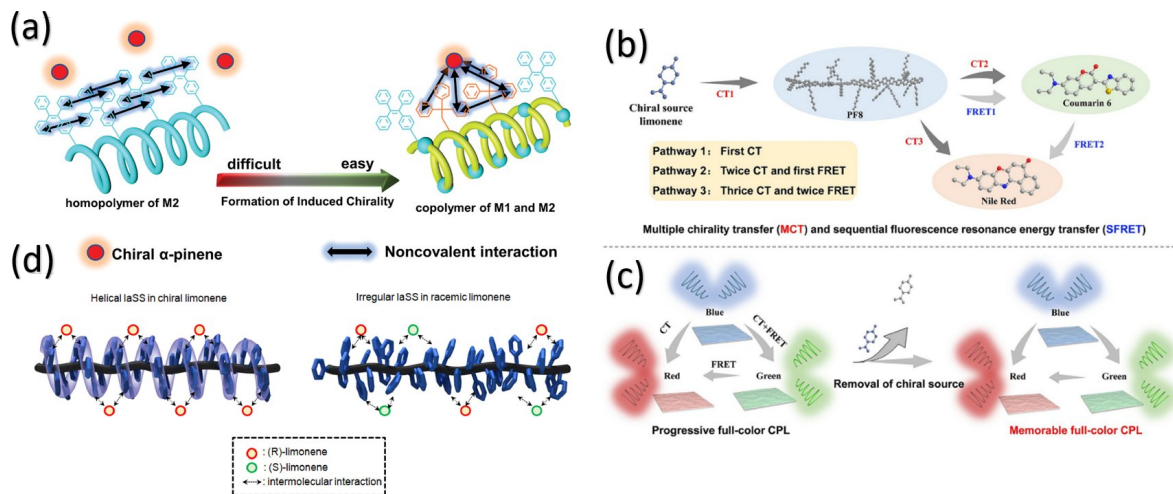


图2 (a) 手性蒎烯诱导荧光螺旋取代聚炔的示意图^[80]; (b) 多级手性转移(MCT)与顺序荧光共振能量转移(SFRET)的示意图; (c) 手性柠檬烯诱导制备全色CPL薄膜的示意图^[81]; (d) 手性柠檬烯与PDPA分子内堆叠结构的示意图^[82]
Fig. 2 (a) Schematic diagram of chiral pinene-induced fluorescent helical substituted polyacetylenes^[80]; (b) Schematic of multistep chirality transfer (MCT) and sequential fluorescence resonance energy transfer (SFRET); (c) Schematic illustration of the preparation of full-color CPL films induced by chiral limonene.^[81]; (d) Schematic diagram of the intramolecular stacking structure of chiral limonene and PDPA^[82]

2.2 手性小分子

在非手性聚合物体系中掺杂具有特定手性中心的小分子,利用分子间相互作用将手性信息有效传递给聚合物,同样能够诱导聚合物形成螺旋构象并发出圆偏振光。相较于其他类型的手性诱导剂,手性小分子具有结构简单、种类丰富、价格低廉等优势,并且可通过分子设计灵活调控其手性中心及相互作用位点,从而实现CPL性能的精准调控。

Deng 和 Zhao 课题组^[83]在该领域展开了系统性的研究工作。他们以非光学活性的螺旋聚炔(PM₁、PM₂)作为手性放大介质,将合成的蓝、绿、黄三色手性荧光小分子与PM₁、PM₂进行复合(图3a)。通过分子间氢键、 π - π 相互作用及CH- π 相互作用,手性小分子诱导聚炔主链形成稳定的手性螺旋构象,从而显著增强了其CD信号,使原本无CPL活性的聚合物获得了高效CPL发射,最大 g_{lum} 可达0.028。在此基础上,通过圆偏振荧光能量转移策略,以该三色CPL薄膜为给体、尼罗红为非手性荧光受体,实现了红光CPL发射,最大 $|g_{\text{lum}}|$

值达0.011。该方法无需复杂的分子修饰,仅通过简单的复合与组装过程即可实现手性信号的高效转移与放大。此外,该课题组还构建了一系列具有不同凝聚态结构(如溶液、薄膜、微纳粒子以及纳米纤维)的聚合物CPL材料^[95,108-112],为多色、可调谐CPL材料的开发提供了简便可行的方案。

在另一项研究中,Sun 等人^[84]利用手性诱导剂R/S-5011的高螺旋扭曲力,通过热退火处理诱导非手性聚合物F8BT形成超分子手性结构,从而赋予体系本征CPL特性,其 $|g_{\text{lum}}|$ 可达0.4。进一步利用FRET机制,使激发能量从F8BT高效传递至邻苯二甲酸甲酯(DBP),产生发射中心波长为615 nm的红色CPL发射,并显著提升了整体发光效率。当DBP掺杂量为0.25mol%时,三元体系的PLQY超过0.9,615 nm处的 g_{lum} 值达到0.27。此外,Geng 等人^[85]以两种取代位置不同的非手性苊基主链聚合物(BP-1和BP-2)为发光基元,以桥联烷基链的手性联萘诱导剂(S/R-D)为手性源,通过“手性共组装+热退火”策略实现了CPL信号的反转与放大(图3b)。该体系借助分子间 π - π 堆积

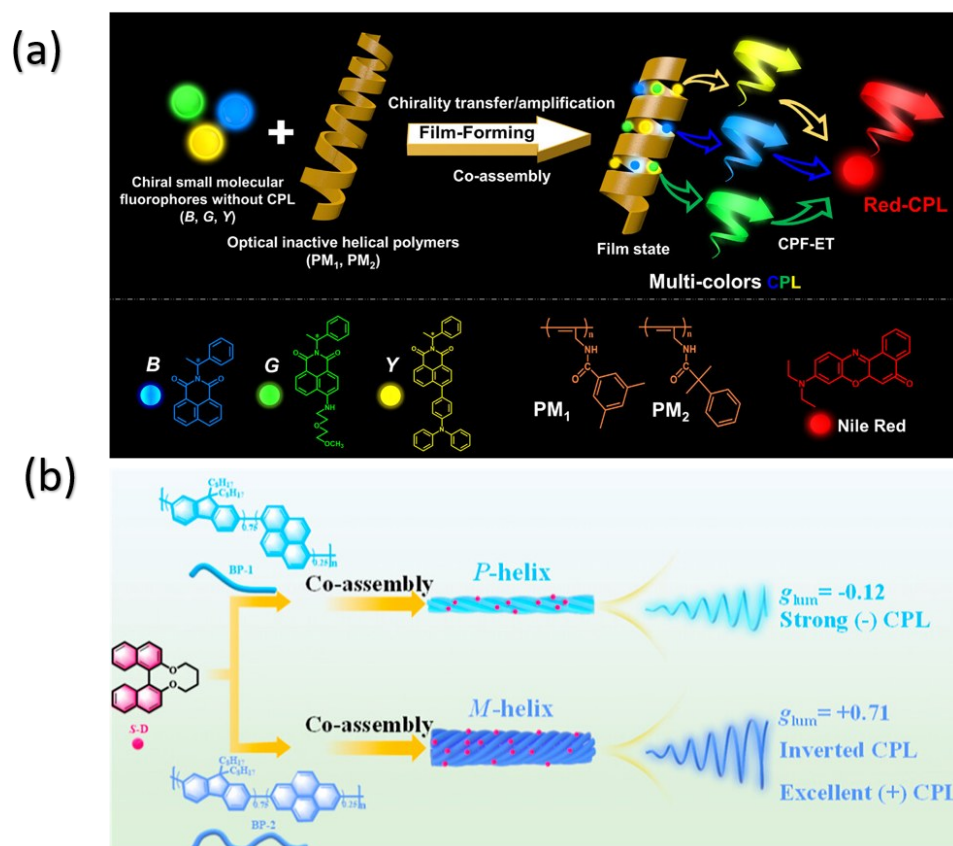


图3 (a) 手性荧光小分子/聚炔薄膜实现多色CPL发射示意图^[83]; (b) 基于手性共组装和热退火实现CPL信号的反转与放大示意图^[85]

Fig. 3 (a) Process description for the preparation of multicolor CPL in small molecular fluorophore/polyacetylene composite films^[83]; (b) Schematic diagram of the inversion and amplification of CPL signal based on chiral co-assembly and thermal annealing process^[85]

作用实现手性传递,并结合热退火处理诱导形成有序的螺旋纳米纤维。同时,通过调控聚合物的取代位置,所构建的茈基CPL材料的 g_{lum} 高达0.71。

除上述体系外,一些结构明确且具备较强氢键供受能力的手性小分子,如BINOL衍生物、薄荷醇、苯乙胺等,也已广泛应用于螺旋聚合物CPL材料的构筑。Shen, Duan等人^[86]以手性BINOL同时作为手性源和荧光源,利用与聚炔侧链之间的氢键和 $\pi-\pi$ 作用,诱导聚炔主链发生无规构象向单手螺旋构象的转变(图4a)。所诱导形成的螺旋聚合物在390 nm处呈现镜像对称的CPL信号,其 $|g_{lum}|$ 值为 1.6×10^{-3} ,PLQY为17.9%。Wu等人^[87]合成了一系列消旋聚联苯二烯,并以手性胺和手性醇作为手性诱导剂,借助螺旋构象转变引起的荧光发射红移,构筑了具有开关可调CPL性能的聚合物材料,其 $|g_{lum}|$ 最高可达 2.4×10^{-3} (图4b)。值得注意的是,即使在完全去除手性诱导剂的条

件下,所诱导产生的单手螺旋结构仍可在室温下稳定保持至少1个月。

在光响应CPL材料方面,传统体系普遍存在 g_{lum} 增强有限、室温响应性不足以及可逆性与抗疲劳性较差等问题。同时,已有基于偶氮苯的CPL液晶物理凝胶(LCPGs)通常需要高温辅助才能实现光调控^[88]。针对上述问题,Wang等人^[89]开发出一种兼具室温光响应、显著 g_{lum} 增强、优异可逆性与抗疲劳性能的CPL-LCPGs材料。该体系以无氢键基元的手性偶氮苯侧链液晶聚合S-PAzoIsoxy为凝胶因子,结合发光单元MBHB与向列相液晶4-氰基-4'-戊基联苯(5CB),通过加热-冷却物理共混法构筑一系列CPL-LCPGs,有效克服了传统光响应CPL材料的多重性能缺陷。在器件层面,Wan等人^[90]提出了一种通过调控活性层厚度并结合热退火实现圆偏振电致发光器件CPL手性反转的策略。该体系以非手性F8BT为基质,掺杂单一对映体的手性螺烯,通过厚度调控与热退火

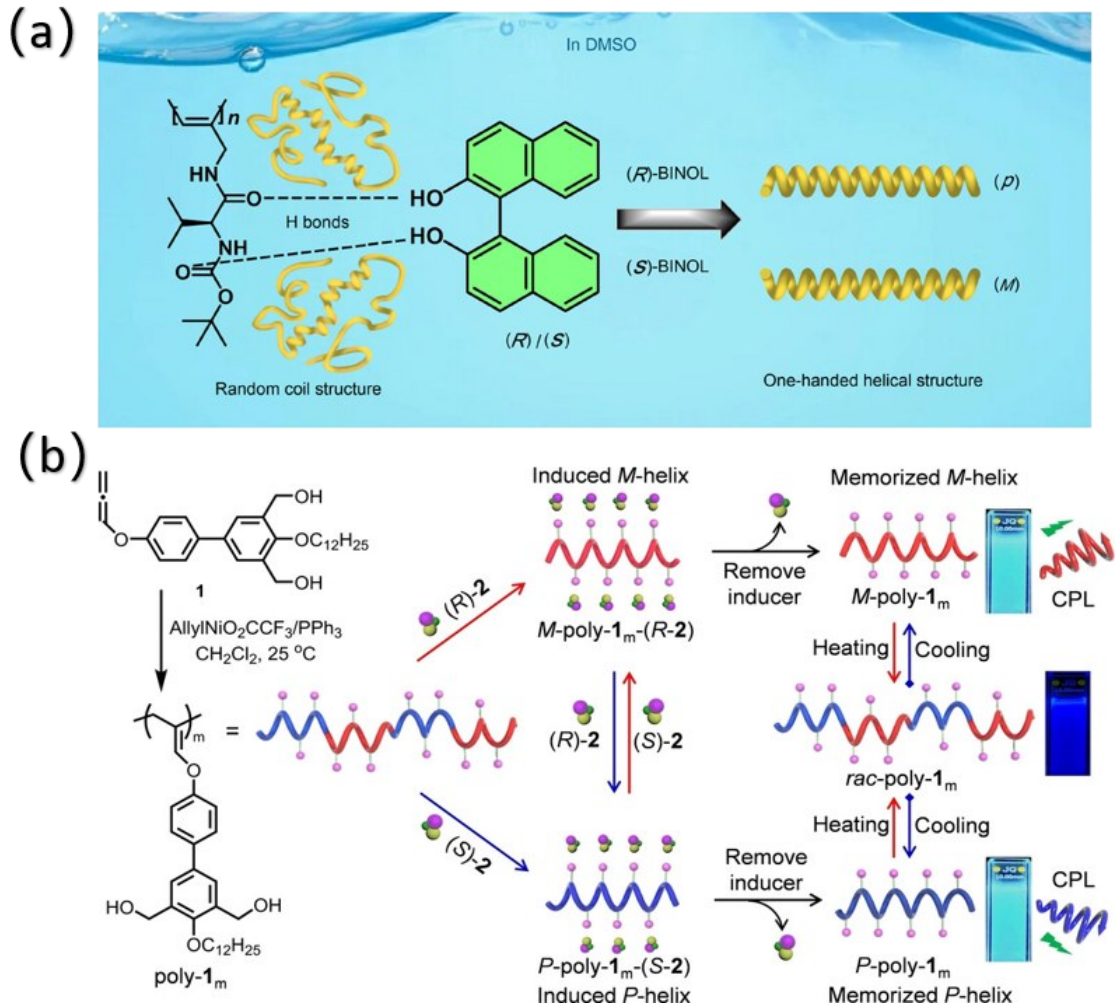


图4 (a) 手性BINOL诱导聚肽主链发生无规结构-螺旋结构构象转变的示意图^[86]; (b) 消旋聚聚苯二烯的手性诱导及螺旋记忆示意图^[87]

Fig. 4 (a) Schematic Illustration for the transformation of amino acid-based polymer from a coil-structure to helix-structure induced by chiral BINOL^[86]; (b) Schematic diagram of the chiral induction and helix memory of racemic helical poly(diphenyl allene)s^[87]

的协同作用,实现了CPL信号的可控反转。

2.3 手性大分子

手性小分子诱导策略虽可显著提升聚合物的CPL性能,但在长期使用过程中,小分子的迁移及由此引发的相分离问题仍不容忽视。为进一步提高材料的形态稳定性与力学性能,研究者逐渐转向以手性大分子作为模板或诱导源。相比之下,手性大分子不仅能够提供更加稳定的手性微环境,还可通过长程链段间的协同作用实现更高效的手性传递,从而推动了该策略的快速发展。

利用生物大分子作为手性诱导平台,是近年来构筑高性能CPL材料的一条绿色、高效的发展路径。纤维素纳米晶体(CNC)及纤维素衍生物(如三醋酸纤维素(CTA)和醋酸丁酸纤维素

(CAB))不仅来源广泛、环境友好,而且本身具有稳定的手性骨架。Deng,Zhao课题组^[91]以CAB为手性源、非手性螺旋聚炔(P1)为手性放大介质,通过调节溶剂的氢键受体能力,实现了手性传递效率的有效调控。当CAB/P1与蓝(CM)、绿(BPA)、橙(R6G)、红(NR)等非手性染料共组装时,手性可从P1进一步传递至各染料,实现覆盖412 - 608 nm范围的全彩CPL发射(图5a),其中CAB/P1/R6G体系的 g_{lum} 可达 1.5×10^{-2} 。通过进一步优化ACA与R6G染料的比例,成功构筑了白光CPL材料,其CIE坐标为(0.33,0.35), g_{lum} 为 1.6×10^{-2} 。此外,利用手性层与荧光层的空间隔离策略,可实现了基于选择性吸收机制的CPL信号反转。

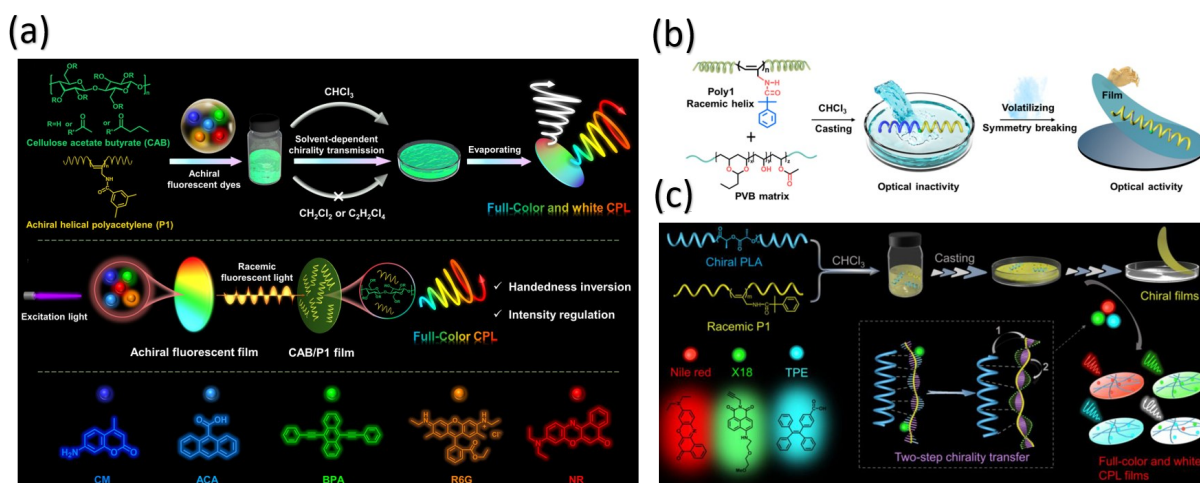


图5 (a) 采用手性诱导策略构筑全彩CPL发射的示意图^[91]; (b) 手性聚炔与PVB复合膜膜制备工艺示意图^[94]; (c) 聚合物复合薄膜中手性转移和全色CPL生成的示意图^[95]

Fig. 5 (a) Schematic illustration of the construction of full-color CPL emission via a chirality-induction strategy^[91]; (b) Schematic diagram of the preparation process for chiral polyacetylene/PVB films^[94]; (c) Schematic diagram of chiral transfer and panchromatic CPL generation in polymer composite films^[95]

此外,具有刚性扭曲骨架和丰富微孔结构的自具微孔聚合物(PIMs)在构筑新型手性发光平台方面也展现出巨大潜力。例如,Wang等人^[92]先将非共轭的PIMs引入CPL材料的设计中,进一步拓宽了聚合物基质的选择范围。在此基础上,他们探索了手性PIMs与钙钛矿量子点的共组装策略^[93],该体系不仅实现了手性信息向无机发光基元的高效传递,还通过精确调控组装行为,成功诱导了CPL信号的可控翻转。这些工作为开发基于新型微孔聚合物骨架的杂化CPL材料提供了重要借鉴。”

此外,Deng,Zhao等人^[94]发展了一种以消旋螺旋取代聚炔为手性构筑单元、以富含含氧官能团的极性聚合物(如聚乙烯醇缩丁醛,PVB)为基体的手性光学材料构筑策略。通过流延成膜过程,极性基体与聚炔侧链之间的氢键作用打破了消旋螺旋的手性平衡状态,从而在非手性体系中诱导自发的不对称破缺(图5b)。进一步通过调控成膜温度及循环浇铸次数可有效放大手性,并将螺旋手性稳定于固态薄膜中,实现螺旋手性的长期存储与循环复用。通过该手性光学薄膜与非手性荧光源的复合,成功获得了CPL发射。在此基础上,该课题组^[95]进一步以手性聚乳酸(PLA)为手性源,通过两步法手性传递策略:首先通过氢键作用将PLA的手性传递至消旋螺旋聚炔,诱导其形成稳定的单一手性螺旋;随后,以手性P1为桥梁,通过氢键和 $\pi-\pi$ 堆积相互作用,将手性进一步

传递给红/绿/蓝(RGB)非手性荧光团,实现全色CPL发射($|g_{lum}|$ 达 8×10^{-3})(图5c)。通过调控RGB组分质量比(1/2/80),并结合FRET过程,进一步构筑了白光CPL薄膜,其 $|g_{lum}|$ 为 4.5×10^{-3} 。此外,Deng,Zhao等人^[96]通过在硬段结构诱导聚合物取向产生线性二色性(LD)和线性双折射(LB),实现了无需机械拉伸条件下的角度依赖非互易手性/CPL响应。在该体系中,通过掺杂非手性聚炔(PY),借助分子间氢键作用实现手性从聚氨酯(PU)向PY的传递,并导致CD信号发生红移。进一步引入荧光分子9-蒽甲酸(ACA),并基于匹配规则,在复合膜体系中实现了角度依赖的非互易CPL发射,其 g_{lum} 达 10^{-3} 。此外,该课题组^[97]以热塑性聚氨酯为柔性基质,手性螺旋聚炔为手性源,通过共混旋涂制备柔性复合薄膜。将该复合薄膜与非手性荧光膜组合构建CPL器件,实现了正反两侧呈相反手性的CPL发射, g_{lum} 最高达 ± 0.64 ,且其发光强度可通过拉伸程度调控。

Quan,Chen等人^[98]合成了三种含联萘基手性单元和不同烷基侧链的手性聚合物(*R/S*-P1、*R/S*-P2、*R/S*-P3),并以非手性苝基荧光团(Bpy)为发光单元,通过 $\pi-\pi$ 堆积作用实现手性聚合物与Bpy的共组装。通过调控手性聚合物掺杂比例(10%~60%)并结合热退火处理,诱导体系形成规整的螺旋纳米纤维结构,从而实现手性由聚合物向Bpy的高效传递,在旋涂薄膜中实现深蓝CPL发射,其发光不对称因子 $g_{lum}=0.042$ ($\lambda_{em}=420\text{nm}$)。进

一步将该共组装体系作为发光层应用于 CP-OLED 器件中,器件表现出稳定的深蓝光 CP-EL 发射($\lambda_{em}=418\text{ nm}$),电致发光不对称因子 $|g_{EL}|$ 为 0.021。

Qiu 等人^[99]合成了两种具有不同联萘基二面角的手性聚合物作为手性诱导剂,并与非手性苝-萘酰亚胺染料(NPy)通过 π - π 堆积作用构筑手性共组装体系。通过优化聚合物与 NPy 的质量比(最优为 6:4),并结合 120°C 热退火处理,诱导形成有序螺旋纳米纤维结构,其中 R/S-P2_{0.6}-NPy_{0.4} 体系表现出更强的链刚性堆砌与更高的手性传递效率,其 $|g_{lum}|$ 高达 5.6×10^{-2} 。基于该共混膜构筑的 CPL 探测器在 405 nm、532 nm、750 nm 三波段均实现了有效区分,其响应不对称因子(g_{res})分别为 0.125±0.011、0.132±0.008、0.155±0.010,且经 1000 次循环测试后电流保留率超 95%。

此外,Xin 等人^[100]以手性谷胱甘肽(GSH)修饰的铜纳米簇(CuNCs)为功能单元,构筑了原子级精确的手性 CuNCs,并以聚乙烯醇(PVA)为聚合物基体,通过溶液浇筑法制备出高透明、柔性自支撑的 CuNCs/PVA 复合薄膜。在该体系中,PVA 链段的羟基与 CuNCs 表面配体的氨基、羧基之间形成的强氢键网络,从而诱导体系产生手性,获得最高达 0.036 的 g_{lum} 值。进一步将该复合体系与蓝、绿荧光粉结合,可构筑显色性能优异的白光发光二极管。

3 基于纯物理机制的诱导体系

与上述依赖非共价相互作用(如氢键、范德华力及 π - π 堆积等)的诱导体系不同,基于纯物理机制的诱导体系是指通过物理过程(如选择性吸收或反射)实现 CPL 信号的产生与放大。例如,可利用手性向列相液晶中的胆甾相结构对圆偏振光的选择性反射,或借助手性结构对荧光的选择性吸收效应,从而在宏观尺度上放大手性发光信号。该类策略突破了发光单元必须具备特定官能团或手性中心的限制,使得几乎所有高性能的非手性发光体(如无机荧光粉、纯有机磷光体等)均可通过简单的物理复合转化为 CPL 材料。

3.1 选择性吸收

在该类体系中,手性的产生不再依赖于诱导源与发光基元之间的分子级接触(如共价键或氢键),而是基于手性材料对左旋与右旋圆偏振光的选择性吸收程度不同。选择性吸收主要源于手性

介质(如螺旋聚合物)的本征圆二色性,即材料由于手性基态/激发态电子跃迁规律,对左旋和右旋圆偏振光的消光系数不同,从而像“手性滤光片”一样消耗某一旋向的光子能量;这一策略显著拓宽了材料体系的选择范围,并有助于实现高偏振度发射。其中,螺旋聚合物(如取代聚炔、聚异氰酸酯等)由于其主链固有的螺旋手性与手性放大效应,被视为研究选择性吸收机制的理想模型体系。

Deng 课题组^[91]以非手性螺旋聚合物作为“手性放大器”,显著提升了手性小分子的微弱手性信号。在该复合体系中,手性小分子提供初始手性信息,而螺旋聚合物则将该信息在体系中有效传递并放大,最终在本征不具备 CPL 活性的非手性荧光团中诱导出强烈的 CPL 发射。此外,基于荧光选择性吸收机制,该团队进一步设计了分离式复合薄膜器件,其体系 $|g_{lum}|$ 最高可达 0.323^[101]。此外,Deng 等人^[102]通过构建由手性有机聚合物纳米纤维、有机-无机杂化纳米花以及无机纳米花等组成的手性纳米架构,实现了对非手性染料发光的有效调控。该类结构可作为高效荧光滤光器,将非手性荧光转换为 CPL,且无需组分之间发生直接相互作用,仅通过调控二者的相对空间位置(即荧光层位于前、手性层位于后),即可实现蓝、绿、黄、红全色 CPL 发射(图 6a), $|g_{lum}|$ 最高达 2.5×10^{-2} 。除荧光材料外,磷光材料同样适用于选择性吸收机制^[58]。例如,作者以单手性螺旋聚炔(PSA)作为手性源,以蓝色长余辉磷光体 Sr₂MgSi₂O₇:Eu,Dy(BP)作为发光体,基于 PSA 的手性选择性吸收效应,在无需手性单元与发光单元之间发生手性传递的条件下,制备了 g_{lum} 最高达 3×10^{-2} 的蓝色圆偏振长余辉(CPLA)薄膜(图 6b)。此外, Ma 等人^[103]合成了光响应型非手性聚炔,并将其与手性 PSA 进行物理共混,利用手性聚合物的选择性吸收效应获得了 CPL 发射,其薄膜态 g_{lum} 最高达 8.39×10^{-3} 。

3.2 选择性反射

选择性反射是指利用手性介质(如手性液晶)对左旋或右旋圆偏振光的选择性反射特性,将非手性发光体系与该手性介质复合,荧光物质发射的非偏振光经过手性介质后,特定旋向的圆偏振光被选择性反射,进而产生 CPL 信号。与选择性吸收诱导不同,选择性反射机制主要基于胆甾相

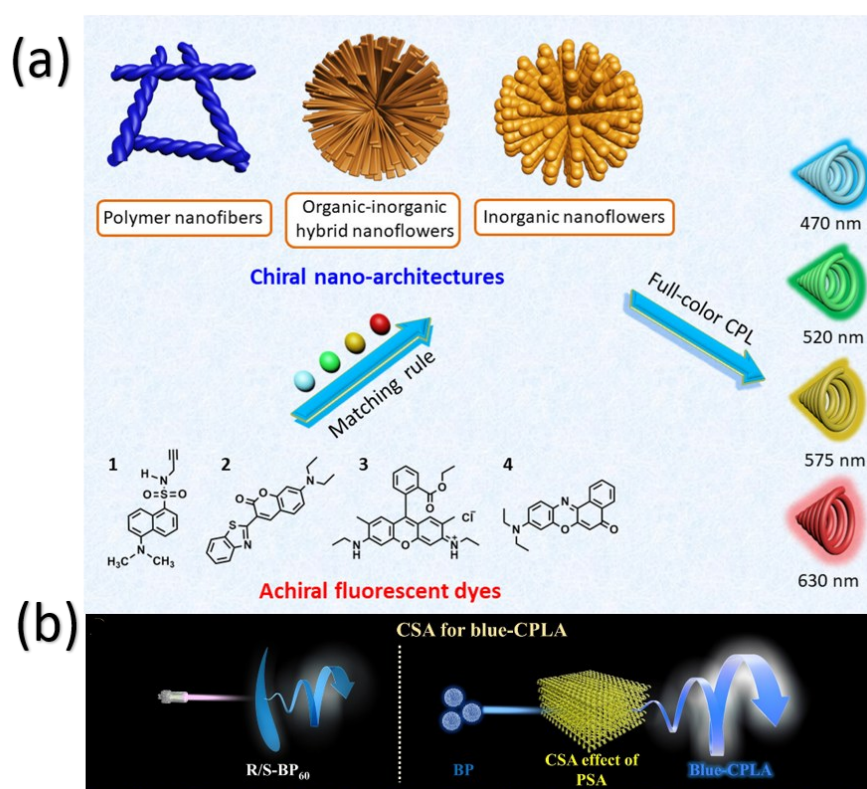


图6 (a) 以手性纳米材料作为荧光选择性过滤器制备全色CPL材料的示意图^[102]; (b) 基于手性聚炔的选择性吸收效应实现蓝色CPLA的示意图^[58]

Fig. 6 (a) Schematic illustration for preparing full-color CPL materials by taking chiral nanoarchitectures as handed selective fluorescence filters^[102]; (b) Schematic diagram of blue CPLA based on the chiral selective absorption effect of chiral polyacetylene^[58]

液晶(Cholesteric liquid crystal, CLC)或手性光子晶体的布拉格反射特性。当光子禁带(PBG)与发色团的发射光谱重叠时,与其结构旋向相同的圆偏振光被反射,而相反旋向的光则被透射,从而在透射方向产生CPL信号,其PBG还可通过温度、电场、pH及浓度等外界条件进行调控,从而实现与发射光谱的有效匹配。在构筑CPL材料时,小分子液晶(如5CB)响应速度快,但成膜性与力学稳定性较差;聚合物液晶兼具选择性反射特性与优异的机械及热稳定性,更适用于制备柔性、大面积的固态CPL器件。

Deng等人^[104]首次以手性荧光螺旋聚炔(CHP)作为高螺旋扭曲力手性掺杂剂,制备了具有稳定超分子螺旋结构的聚合物CLC薄膜。通过调控CHP的掺杂浓度以调节薄膜的布拉格反射带,实现了手性的高效传递与放大,并在单一组分薄膜中获得了最高 $|g_{lum}|$ 达1.45的圆偏振荧光发射。随后,他们进一步构建了“非手性室温磷光(RTP)薄膜+CLC手性滤光膜”的双层复合体系,通过匹配CLC反射带与蓝、绿、黄、红四色RTP发

射峰,成功实现了全彩色CP-RTP发射(图7a),其 $|g_{lum}|$ 最高分别达1.43、1.39、1.09和0.84。

Tang, Zhu等人^[105]通过溶剂挥发诱导结晶,基于左旋聚乳酸(PLLA)制备了具有手性超结构的复合薄膜(图7b)。研究发现,PLLA可自发形成径向组装的扭曲微晶与手性球晶,掺杂的AIE分子被限域于微晶晶层之间。通过简单调控薄膜倾斜角度,可选择性反射或透射不同CPL组分,从而在单一固态薄膜中实现CPL手性的切换,并同步调控 g_{lum} 值。此外,Yan等人^[59]利用温度调控实现手性向列相液晶(Chiral nematic liquid crystal, N*-LC)在室温胆甾相与高温各向同性相之间的可逆相变。室温下仅透射与N*-LC螺旋手性相反的CPL,而在高温下由于各向同性相的形成,选择性反射消失,发光膜的本征CPL信号得以释放。他们将手性双取代液晶聚乙炔(di-LCPA)构成的CPL发光膜与N*-LC复合,制备了CPL开关器件(图7c);借助N*-LC的手性过滤效应,将di-LCPA的CPL信号放大超过一个数量级,室温下获得了 $|g_{lum}|$ 高达1.79的CPL发射。Guo等人^[106]将氮、磷

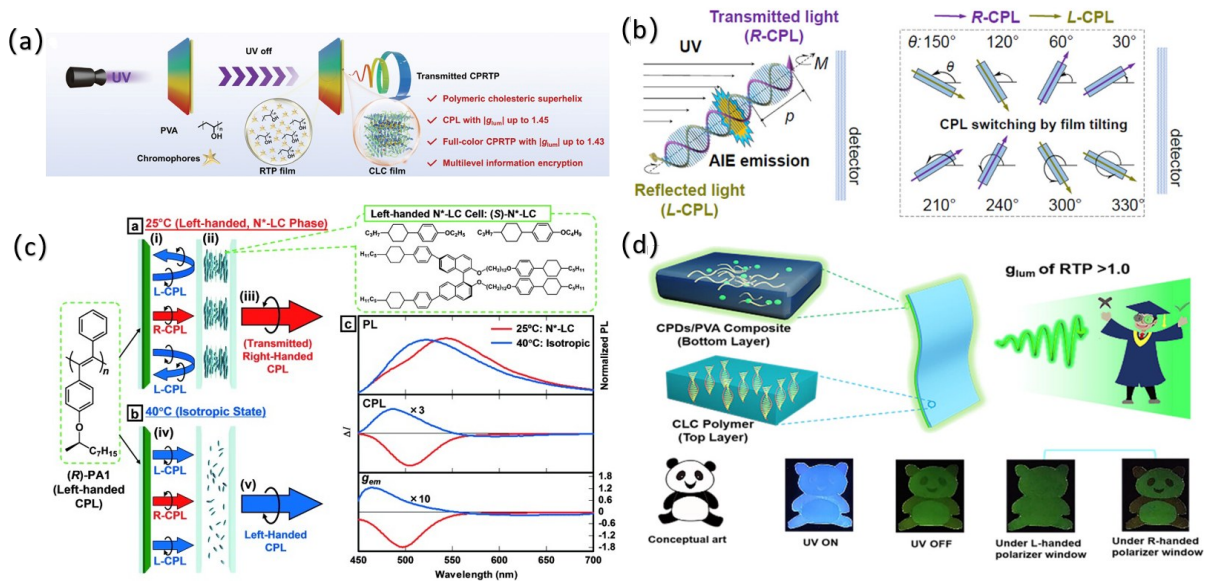


图7 (a) 通过由 RTP 薄膜(掺杂生色团的聚乙烯醇薄膜)和 CLC 薄膜组成的双层薄膜实现全色 CPRTTP^[104]; (b) 基于布拉格反射效应制备的复合薄膜^[105]; (c) 基于选择性反射效应制备的 CPL 开关器件^[59]; (d) 堆叠双层光子结构的示意图^[106]

Fig. 7 (a) Full-color CPRTTP achieved through double-layered films consisting of RTP film (chromophores-doped polyvinyl alcohol film) and CLC film^[104]; (b) Composite thin films prepared based on the Bragg reflection effect^[105]; (c) CPL switching devices based on selective reflection effect^[59]; (d) Schematic diagram of stacked bilayer photonic structure^[106]

共掺杂的碳化聚合物点(NP-CPDs)嵌入聚乙烯醇基质中,并在其上方叠层手性结构的胆甾相聚合物反射膜(图7d)。通过调节胆甾相聚合物的螺距,使反射带覆盖 NP-CPDs 的发射峰,获得了 g_{num} 高达 1.09 的超强 CPL,同时该体系表现出优异的柔韧性与环境稳定性。

4 应用

4.1 光电器件

圆偏振光在光电子学领域具有重要应用价值,尤其在提升显示器亮度、降低功耗以及实现直接偏振探测等方面具有不可替代的作用。对于传统 OLED 显示器,为了消除环境反射光并获得目标偏振光,通常需在器件外部额外增设偏振片,这一过程会造成部分光损耗,从而降低光利用率。相比之下,CP-OLED 能够直接发射与偏振方向一致的圆偏振光,从而显著提高光输出效率并降低能耗。

Wan 等人^[28]构建了 ITO/PEIE-ModifiedZnO/F8BT+10wt% aza[6]H/TCTA/MoO₃/Au 结构的倒置型 CP-OLED 器件(图8),通过调控器件内载流子注入平衡与发光复合区位置实现了较高的电致发光不对称因子($g_{\text{EL}} = 0.57$),并获得了 16.4 cd/A 的电流效率和 16.61 m/W 的功率效率。这一工作

为通过器件工程调控发光特性提供了新的思路。

此外,Deng, Zhao 等人^[27]以高螺旋扭曲力的手性螺旋取代聚炔(P37)作为手性诱导剂,诱导 F8BT 实现了高效 CPL 发射,并进一步构建了结构为 ITO/ZnO/F8BT+25%R-P37/TCTA/MoO₃/Al 的 CP-OLED。通过优化载流子注入与复合过程,实现了器件性能的显著提升,器件的 \lg_{EL} 为 2.0×10^{-2} 。该研究为基于手性螺旋聚合物构筑高性能 CP-OLED 器件提供了一种通用且高效的途径。

4.2 生物医学

由于生物体内的核心大分子(如蛋白质、多糖和核酸)普遍具有手性,聚合物 CPL 材料在生物环境中的相互作用已成为近年来的重要研究方向。Lu 等人^[107]开发了一种基于超声调控的手性光子 CNC 薄膜的可控制备策略。通过超声处理实现 CNC 聚集体的高效解聚与手性结构的精确调控,使薄膜的光子带隙由可见光区红移至近红外 II (NIR-II)窗口,成功制备出可稳定输出 NIR-II 右旋圆偏振光的自支撑透明 CNC 薄膜,其在 NIR-II 区的发光不对称因子 g_{num} 达 -0.330,输出圆偏振光的圆偏振度(DOCP)可达 0.317。该研究通过理论分析,系统阐明了手性光子结构中的结构缺陷及发光强度异质性是制约 CNC 材料 CPL 性能的关键因素,明确了其对带隙内 CPL 发光效率的削

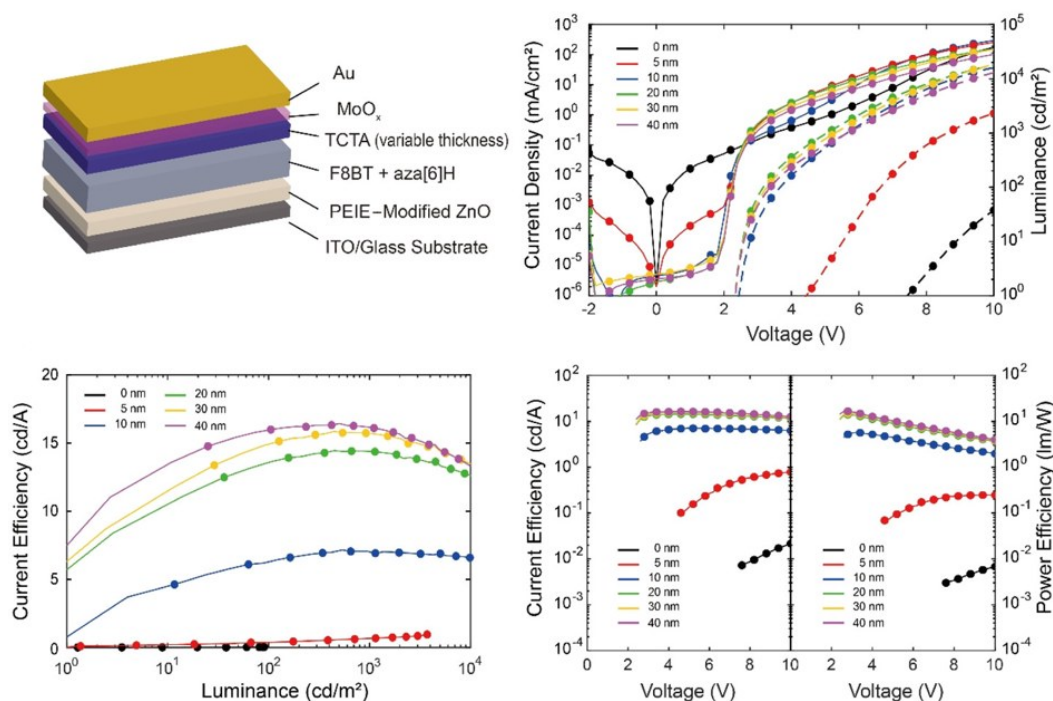


图8 倒置型CP-OLED的结构示意图和器件性能^[28]

Fig. 8 Structural diagram and device performance of inverted CP-OLED^[28]

弱作用以及对带边手性反转效应的抑制机制。在此基础上,研究者以乳腺癌小鼠模型为对象开展概念验证实验,结果表明该 NIR-II CNC 薄膜可通

过检测透射光圆偏振度的差异,实现对肺、肝及淋巴等部位癌变组织与正常组织的有效区分(图9),为肿瘤的无创光学检测提供了新的策略。

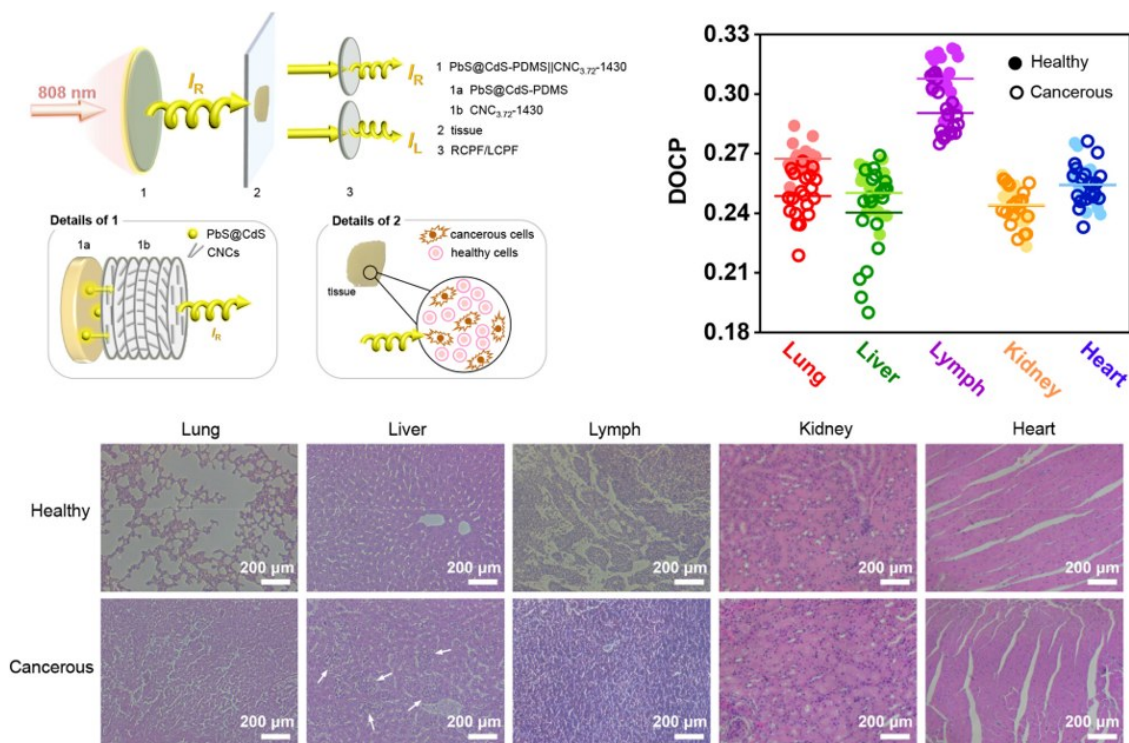


图9 基于手性调控将1430 RCP光用于癌症细胞辨别^[107]

Fig. 9 Utilizing RCP light for cancer cell discrimination based on chirality modulation^[107]

4.3 信息防伪

随着信息技术的快速发展,基于光强和波长的传统加密手段已难以满足高安全性需求。圆偏振光由于引入了额外的手性物理维度,且需借助特定检偏器方可识别,成为高级防伪技术的重要选择。基于CPL材料的防伪利用了人眼对圆偏振光旋向不敏感的特点,只有在佩戴特定的左旋或右旋圆偏振滤光片时,观察者才能看到截然不同或明暗对比显著的图像信息,从而实现高安全级别的信息加密。聚合物CPL材料能够集成多种刺激响应特性,为多级信息加密提供了新的实现路径。Deng, Zhao等^[26]基于兼具结构色、荧光及CP-RTP长余辉等光学特性的手性向列相液晶(N*-LCs)体系,探索了其在光学防伪领域的应用。通过构建由手性液晶体系组成的“BUCT”、风车等防伪图案,实现了在自然光下的结构色显示、紫外光激发下的荧光与CPL发射,以及紫外光关闭后的CP-RTP发射,为多级加密防伪提供了有效参考。

Yang, Li等人^[32]提出了一种基于钙钛矿发光层与胆甾相液晶聚合物网络(CLCN)薄膜复合的

高性能CPL材料构筑策略。通过将CsPbX₃钙钛矿掺杂于聚甲基丙烯酸甲酯或聚丙烯腈聚合物基体中,构建覆盖红、绿、蓝三基色的窄带发光层,并与不同反射波段的高反射CLCN薄膜复合,成功制备了一系列CPL复合薄膜(图10)。研究表明,得益于CLCN显著的手性光学过滤效应,复合膜的 I_{g1} / I_{m1} 最高可达1.73。同时,通过调控CLC中手性掺杂剂浓度可实现反射波长的精确调控,而改变发光层与CLCN的层叠顺序则可实现CPL手性的便捷反转,从而有效解决了传统手性钙钛矿材料中手性与发光性能难以协同调控的问题。在此基础上,研究者进一步结合光刻技术制备图案化CLCN薄膜,并与钙钛矿发光层复合,实现了日光条件下的结构色防伪与紫外激发下的CPL加密防伪双重信息表达,展现出在高端防伪领域的广阔应用前景。该工作不仅为大面积、柔性化及高 I_{g1} / I_{m1} 的CPL材料的制备提供了简便可行的技术路径,同时也阐明了CLCN手性过滤效应对CPL性能与手性调控的内在机制,为钙钛矿基CPL材料在柔性显示与信息加密等领域的应用奠定了重要的理论与实验基础。

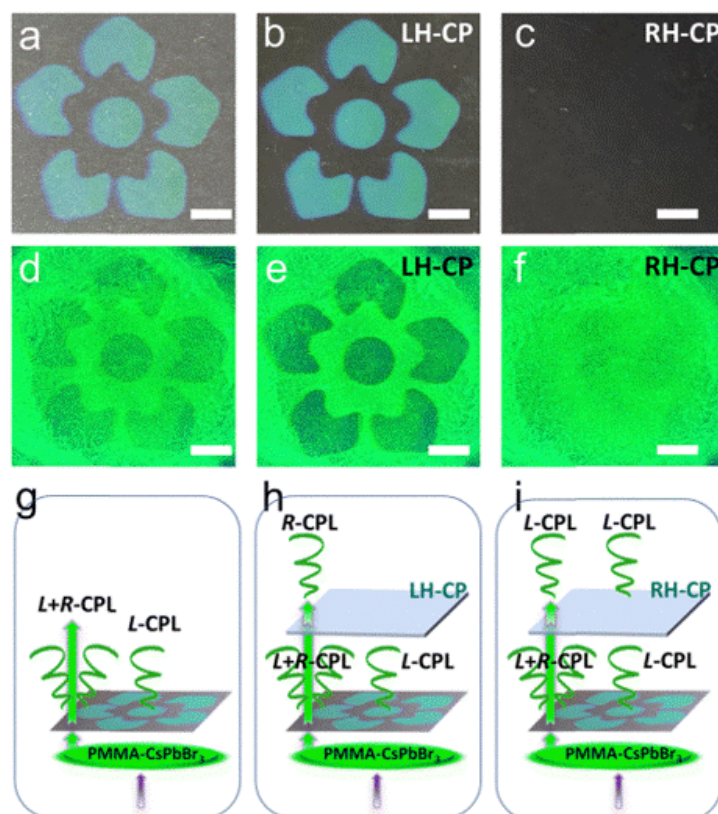


图10 钙钛矿/胆甾相液晶CPL复合薄膜用于偏振光加密,(a-c):日光;(d-f):紫外光;(g-i):复合薄膜CPL特性。^[32]

Fig. 10 Perovskite/cholesteric liquid crystal CPL composite films for polarized light encryption, (a-c):Sunlight; (d-f):Ultraviolet light; (g-i):Characteristics of CPL composite films.^[32]

5 总结与展望

综上所述,本文系统总结了手性诱导策略在聚合物 CPL 材料构筑中的最新研究进展。相较于复杂的手性单体设计与共聚方法,手性诱导策略在合成简便性及体系构筑灵活性方面展现出显著优势。在非共价相互作用诱导方面,研究重点在于利用外部手性源与非手性聚合物基体之间的氢键、静电作用及 $\pi - \pi$ 堆积等弱相互作用,实现手性从分子尺度向超分子尺度的有效传递与放大。该类策略不仅能够赋予非手性聚合物显著的手性光学活性,还可通过调控诱导源的种类、浓度及加工条件,实现对 CPL 性能参数(如 g_{lum} 值和发光方向)的有效调控。在物理机制诱导方面,主要包括基于手性光学选择性吸收与反射机制。此类策略摆脱了对发光体本征手性的依赖,显著拓展了发光材料体系的选择范围。在应用层面,具备高亮度、良好加工性能及可调光学特性的聚合物 CPL 材料,已在三维显示、防伪加密、生物传感及光电探测等前沿领域展现出广阔的应用前景。

尽管该领域已取得显著进展,开发高性能、多功能并具备产业化潜力的聚合物 CPL 材料仍面临

诸多关键挑战,这些问题亦构成未来的重要研究方向。首先,目前大多数通过手性诱导获得的聚合物材料,其 g_{lum} 仍处于 $10^{-3} - 10^{-2}$ 数量级。未来的研究应聚焦于如何增强手性传递的精确度,减少传递过程中的手性损耗。利用多级自组装技术构建手性微环境,或结合表面等离子体增强效应,是突破 g_{lum} 限制的重要方向。其次,在聚合物体系中,增强不对称因子往往伴随着发光效率的衰减。如何巧妙设计分子结构,利用 AIE 效应与稳定的手性螺旋结构相结合,通过抑制非辐射跃迁同时强化手性环境,实现 g_{lum} 值与量子产率(φ)的协同提升,是制备高效 CPL 材料的核心。另外,在 CPL 手性材料调控与功能化研究领域,目前已报道的 CPL 信号手性诱导体系多为结构与光学性能不可动态调控的静态体系,难以适配智能光电器件、动态信息加密、活体原位传感等前沿应用对 CPL 信号多维度动态调控的需求。因此,开发能够对外界光、电、热、磁或化学刺激产生快速、可逆、特异性响应的智能手性诱导体系,实现 CPL 信号的原位实时可逆开关、发射颜色精准切换及手性定向可控翻转,已成为当前 CPL 领域兼具基础科学意义与实际应用价值的关键研究方向。

参 考 文 献:

- [1] GERLACH H, Chirality: a relational geometric-physical property [J]. *Chirality*, 2013,25(11):684 - 685.
- [2] BRONDZ I, Is life based on chirality of pentavalent elements possible? resolution of stable isomers, enantiomers and diastereomers of pentavalent nitrogen [J]. *Voice Publ.*, 2021,07(01):44 - 55.
- [3] CINTAS P, Chirality of living systems: a helping hand from crystals and oligopeptides [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2002,41(7):1139 - 1145.
- [4] KAWASAKI T, SUZUKI K, HAKODA Y, *et al.* Achiral nucleobase cytosine acts as an origin of homochirality of biomolecules in conjunction with asymmetric autocatalysis [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008,47(3):496 - 499.
- [5] LUCIANO C, KÁROLY M, GYULA P, moleculesFirst, chiralitybiological, origin(s) of life [J]. *Chirality*, 2011,23(1):65 - 68.
- [6] YANG X, PHIPPS R J, TOSTE F D, Asymmetric fluorination of α -branched cyclohexanones enabled by a combination of chiral anion phase-transfer catalysis and enamine vatalysis using protected amino acids [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015,137(49):15576 - 15583.
- [7] OHMATSU K, ITO M, KUNIEDA T, *et al.* Ion-paired chiral ligands for asymmetric palladium catalysis [J]. *Nat. Chem.*, 2012,4:473 - 477.
- [8] LV J, ZHANG Q C, ZHONG X R, *et al.* Asymmetric latent carbocation catalysis with chiral trityl phosphate [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015,137(49):15576 - 15583.
- [9] LIU G F, SHENG J H, ZHAO Y L, Chiral covalent organic frameworks for asymmetric catalysis and chiral separation [J]. *Sci. China Chem.*, 2017,60:1015 - 1022.
- [10] BRODT N, NIEMEYER J, Chiral organophosphates as ligands in asymmetric metal catalysis [J]. *Org. Chem. Front.*, 2023,10:3080.
- [11] LI Z Z, WAN Z C, WANG W, *et al.* Chemoenzymatic sequential catalysis with carbonic anhydrase for the synthesis of

- chiral alcohols from alkanes, alkenes, and alkynes [J]. *ACS Catal.*, 2024, 14: 8786–8793.
- [12] WANG F, WANG X, LU X C, *et al.* Nanophotonic enhanced chiral sensing and its biomedical applications [J]. *Biosensors.*, 2024; 14(1): 39.
- [13] STASZAK K, WIESZCZYCKA K, MARTURANO V, *et al.* Lanthanides complexes – chiral sensing of biomolecules [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2019, 397: 76 – 90.
- [14] MANDAL M, YADAV A, MALIK M, *et al.* Induced chirality meets chiral amino acid for enhanced sensing: a concept of chiroelectronics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 3(21): e17488.
- [15] LI C, YANG X X, ZHENG M Y, *et al.* Layer-by-layer chiral induction of fluorene-based metal – organic framework films for circularly polarized luminescence sensing of enantiomers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34: 2401102
- [16] GUO P X, JIN R J, WANG M Z, *et al.* Chiral gold(I)-containing polymeric composites: chiroptical sensing and circularly polarized luminescence [J]. *J. Organomet. Chem.*, 2021, 931: 121616.
- [17] CHEN Y X, XIA S Y, DUAN J, *et al.* Stabilizing chiral gold nanorods from chiral-micelle-directed synthesis by sulfide treatment for chiroplasmonic sensing [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2024, 7(2): 1503–1508.
- [18] CHEN P Y, FAN H H, DU S F, *et al.* Supramolecular chiroptical sensing of chiral species based on circularly polarized luminescence [J]. *Soft Matter*, 2024, 20: 8937–8946.
- [19] ZHANG L, TAN Q G, FAN J Q, *et al.* Microfluidics for chiral separation of biomolecules [J]. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, 2023, 158: 116842
- [20] YANG M, LV W, CHEN Y L, *et al.* Chiral-induced covalent organic framework as novel chiral stationary phase for chiral separation using open-tubular capillary electrochromatography [J]. *J. Chromatogr. A.*, 2024, 1736: 465334.
- [21] QIAN H L, YANG C X, and YAN X P, Bottom-up synthesis of chiral covalent organic frameworks and their bound capillaries for chiral separation [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12104.
- [22] ONG C S, OOR J Z, TAN S J, *et al.* Enantiomeric separation of racemic mixtures using chiral-selective and organic-solvent-resistant thin-film composite membranes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(8): 10875 – 10885.
- [23] GAO X Y, BEN T, Chiral substrate-induced chiral covalent organic framework membranes for enantioselective separation of macromolecular drug [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16: 5210.
- [24] CHEN Y L, XIA L, LI G K, The progress on porous organic materials for chiral separation [J]. *J. Chromatogr. A.*, 2022, 1677: 463341.
- [25] LI H, LI K, CUI Y Y, *et al.* "Click" post-synthesis of chiral microporous organic network for chiral high-performance liquid chromatographic separation [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2024, 1332: 343377.
- [26] WANG X J, ZHAO B, DENG J P, 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(49): 2304405.
- [27] WANG M Y, YANG K, WANG X J, *et al.* Chiral helical polymer-induced efficient circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(3): 2301513.
- [28] WAN L, WADE J, SHI X Y, *et al.* Highly efficient inverted circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(35): 39471–39478.
- [29] LIU J J, XU L T, YANG N, *et al.* Enhancing circularly polarized luminescence in chiral fluorescent dyes via cholesteric liquid crystal polymer networks [J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2025, 7(6): 4029–4037.
- [30] LI J, GUAN Y, HAO T T, *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(13): e202423395.
- [31] GUO Q, ZHANG M J, TONG Z, *et al.* Multimodal-responsive circularly polarized luminescence security materials [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145: 4246–4253.
- [32] Xu L T, Lei H J, Li Z Q, *et al.* Circularly polarized luminescence with large dissymmetry factors based on perovskite and cholesteric liquid crystal polymer network films [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2025, 13(15): 7544 – 7549.
- [33] WADE J, BRANDT J R, REGER D, *et al.* 500-Fold Amplification of small molecule circularly polarised luminescence through circularly polarised FRET [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2021, 60(1): 222 – 227.
- [34] THAKUR D, VAIDYANATHAN S, Chirality inducing units in organic TADF molecules: a way to circularly polarized luminescence [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2024, 12(34): 13168 – 13229.
- [35] MA K, CHEN W J, JIAO T F, *et al.* Boosting the circularly polarized luminescence of small organic molecules via multi-

- dimensional morphology control [J]. *Chem. Sci.*, 2019, 10(28):6821 – 6827.
- [36] LIAN Z X, WANG X Z, ZHOU C W, *et al.* Producing circularly polarized luminescence by radiative energy transfer from achiral metal-organic cage to chiral organic molecules [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2024, 35(8):109063.
- [37] XU L, GAO B R, XU X H, *et al.* Controlled synthesis of cyclic-helical polymers with circularly polarized luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(28):e202204966.
- [38] WANG Y J, YU L B, LV T J, *et al.* Chiral carbonized polymer dots simultaneously achieving solid state luminescence and circularly polarized luminescence [J]. *Dyes Pigm.*, 2023, 220:111685.
- [39] GUO Y C, ZHANG Y F, MA J F, *et al.* Wide-range tunable circularly polarized luminescence in triphenylamine supramolecular polymers via charge-transfer complexation [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1):9303.
- [40] DAS A, GHOSH S, GEORGE S J, Chiroptical amplification of induced circularly polarized luminescence in nucleotide-templated supramolecular polymer [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(38):e202308281.
- [41] ZHANG X Y, ZHANG Y, ZHANG H P, *et al.* High brightness circularly polarized organic light-emitting diodes based on nondoped aggregation-induced emission (AIE)-active chiral binaphthyl emitters [J]. *Org. Lett.*, 2019, 21(2):439 – 443.
- [42] LI H K, CHENG J, ZHAO Y H, *et al.* l-Valine methyl ester-containing tetraphenylethene: aggregation-induced emission, aggregation-induced circular dichroism, circularly polarized luminescence, and helical self-assembly [J]. *Mater. Horiz.*, 2014, 1(5):518 – 521.
- [43] 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.
- [44] HAN F M, SHI F Y, LI H K, *et al.* Facile fabrication of helical hybrid silica ribbons with high-efficiency circularly polarized luminescence [J]. *Mater. Lett.*, 2022, 327:133026.
- [45] YANG Y H, WEI J J, ZHANG L, Water-regulated evolution of inversion, reinversion, and amplification of circularly polarized luminescence of supramolecular organogels based on glutamide-cyanostilbene amphiphile [J]. *Langmuir.*, 2024, 40(22):11548 – 11557.
- [46] TIAN E Q, CAO G H, DONG H H, *et al.* Triple circularly polarized luminescence of phenylalanine-based supramolecular gels regulated by kinetic and thermodynamic assembly pathways [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(14):2965 – 2968.
- [47] LAISHRAM R, SARKAR S, MAITRA U, *et al.* Lanthanide hydrogels with tunable circularly polarized luminescence (CPL) via supramolecular chirality induction [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(38):15418-15422
- [48] GU Z J, MA W Y, FENG J, *et al.* Enhancement of circularly polarized luminescence from Pulsating Nanotubules [J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2023, 44(22):2300428.
- [49] YING A, ZHAN L S, TAN Y, *et al.* Copper(I) complexes with planar chirality realize efficient circularly polarized electroluminescence [J]. *Sci. China Chem.*, 2023, 66(8):2274 – 2282.
- [50] LIU Y J, CHEN L, WANG Z Y, *et al.* Engineering intermolecular charge transfer in chiral organometallic crystals by rational doping for high-contrast CPL switches [J]. *Sci. China Chem.*, 2023, 66(7):2011 – 2018.
- [51] 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
- [52] DING C Y, ZHONG Y W, YAO J, frameworksMetalloligand-anion: tunable polarized luminescence and crystal-to-crystal transformation [J]. *Matter*, 2024, 7(10):3537 – 3553.
- [53] ZHANG X, LI L, CHEN Y H, *et al.* Mechanically tunable circularly polarized luminescence of liquid crystal-templated chiral perovskite quantum dots [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(22):202404202.
- [54] MA J Z, YANG Z Q, Chiral liquid crystal elastomers advance light modulation [J] *Light Sci Appl.*, 2024, 13(1):205.
- [55] LIU K, SHEN Y, LI X J, *et al.* Strong CPL of achiral liquid crystal fluorescent polymer via the regulation of AIE-active chiral dopant [J]. *Chem. Commun.*, 2020, 56(84):12829 – 12832.
- [56] CHEN L J, HE X J, YUAN J N, *et al.* Tunable circularly polarized luminescence through chiral dopant dihedral angle modulation in liquid crystal polymer films [J]. *Small.*, 2025, 21(35):2505269.
- [57] ZHAO B, PAN K, DENG J P, Intense circularly polarized luminescence contributed by helical chirality of monosubstituted polyacetylenes [J]. *Macromolecules.*, 2018, 51(18):7104 – 7111.
- [58] YANG K, ZHANG R, LIU Y Z, *et al.* Circularly polarized phosphorescence energy transfer combined with chirality-selective absorption for modulating full-color and ehite circularly polarized long afterglow [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024,

- 63(40):e202409514.
- [59] JOSE B ASAN, YAN J L, AKAGI K, Dynamic switching of the circularly polarized luminescence of disubstituted polyacetylene by selective transmission through a thermotropic chiral nematic liquid crystal [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53(40):10641 - 10644.
- [60] LIU Y Z, ZHONG H, ZHAO B, *et al.* Hydrogen-bond-directed chirality transfer in helical polyacetylene-perovskite-PDMS elastomeric films for stretching-tunable multicolor circularly polarized luminescence [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2025, 17(37):52488 - 52497.
- [61] LIU Y Z, YANG K, ZHAO B, *et al.* "Surface-Filming Assembly" strategy for facilely constructing and adjusting circularly polarized luminescence from perovskite/chiral helical polyacetylene films [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2024, 12(17):2303039.
- [62] JI Y J, YANG K, ZHAO B, *et al.* Fluorescence-selective absorption and circularly polarized fluorescence energy transfer assist the generation of multicolor circularly polarized luminescence in chiral helical polyacetylene-based janus nanofibers [J]. *ACS Macro Lett.*, 2024, 13(6):673 - 680.
- [63] WATANABE K, OSAKA I, YOROZUYA S, *et al.* Helically π -stacked thiophene-based copolymers with circularly polarized fluorescence: high dissymmetry factors enhanced by self-ordering in chiral nematic liquid crystal phase [J]. *Chem. Mater.*, 2012, 24(6):1011 - 1024.
- [64] TOKUTAKE A, MIYASHITA R, KUMAI R, *et al.* Antiferromagnetic optically active polythiophene derivatives showing circularly polarized luminescence, liquid crystallinity, and inversion helicity reorganization [J]. *Macromolecules*, 2025, 58(20):11370 - 11377.
- [65] 陈荣鹏, 冯仕亮, 郑天旭等. Ag纳米线增强硒微米管/聚噻吩自驱动光电探测器性能 [J]. *发光学报*, 2022, 43(08):1273-1280. (in Chinese)
CHEN R P, FENG S L, ZHENG T X, *et al.* Ag Nanowires enhance performance of self-powered photodetector based on selenium microtube/polythiophene [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(08):1273-1280. (in Chinese)
- [66] 薛守庆, 薛兆民, 二次掺杂聚吡咯/聚噻吩膜的制备及其光电性能 [J]. *发光学报*, 2016, 37(9):1124-1129. (in Chinese)
XUE S Q, XUE Z M, Preparation and anti-corrosive performance of Ppy/PTh composites redoped with zinc phosphate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(9):1124-1129. (in Chinese)
- [67] ZOU H, LIU W, WANG C, *et al.* Polyfluorene-block-poly(phenyl isocyanide) copolymers: one-pot synthesis, helical assembly, and circularly polarized luminescence [J]. *Macromolecules*, 2023, 56(5):1875 - 1883.
- [68] ZOU H, HAN S S, LI G Q, *et al.* Controlled synthesis, chiral assembly, and circularly polarized luminescence of poly(phenyl isocyanide)-block-polyfluorene copolymers [J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2023, 44(15):2300159.
- [69] LIU N, GAO R T, WU Z Q, Helix-induced asymmetric self-assembly of pi-conjugated block copolymers: from controlled syntheses to distinct properties [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2023, 56(21):2954 - 2967.
- [70] LI H, YU M N, LUO M M, *et al.* Reconfigurable amplified circularly polarized photo/electro-luminescence from simple solution self-assembly of a chiral deep-blue fluorene-based conjugated polymer [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2025, 13(27):13731 - 13741.
- [71] 徐延明, 杨凯祥, 李坚, 等. 羧酸型聚芴/二氧化钛杂化材料的制备及其荧光猝灭行为 [J]. *发光学报*, 2015, 36(12):1409-1415. (in Chinese)
XU Y M, YANG K X, LI J, *et al.* Preparation and fluorescence quenching behavior of carboxylated polyfluorene/titanium dioxide hybrid materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(12):1409-1415. (in Chinese)
- [72] 朱棣, 贺英, 潘照东, 等. 聚芴类发光材料的制备及其在柔性电致发光器件的应用 [J]. *发光学报*, 2012, 33(1):17-20. (in Chinese)
ZHU D, HE Y, PAN Z D, *et al.* Synthesis of the polyfluorene luminescent material and its application in flexible polymer light-emitting diode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(1):17-20. (in Chinese)
- [73] WILLIAM W. P, Modern optical spectroscopy. [M] Berlin, Heidelberg. Springer Verlag, 2015.
- [74] PRINCE R B, MOORE J S, BRUNSVELD L, *et al.* Cooperativity in the folding of helical m-phenylene ethynylene oligomers based upon the 'sergeants-and-soldiers' principle [J]. *Chem. Eur. J.*, 2001, 7(19):4150 - 4154.
- [75] YASHIMA E, MATSUSHIMA T, OKAMOTO T, Poly((4-carboxyphenyl)acetylene) as a probe for chirality assignment of amines by circular dichroism [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, 117(46):11596 - 11597.
- [76] GREEN M M, PARK J W, SATO T, *et al.* The macromolecular route to chiral amplification [J]. *Angew. Chem. Int.*

- Ed.*, 1999, 38(21):3138 – 3154.
- [77] NAKANO Y, LIU Y, FUJIKI M, Ambidextrous circular dichroism and circularly polarised luminescence from poly(9,9-dimethylfluorene) by terpene chirality transfer [J]. *Polym. Chem.*, 2010, 1(4):460 – 469.
- [78] YIN Z, AZURA A R N, YIJUN X, *et al.* Supramolecular chirality in achiral polyfluorene: chiral gelation, memory of chirality, and chiral sensing property [J]. *Macromolecules*, 2016, 49(9):3214 – 3221.
- [79] KAWAGOE Y, FUJIKI M, NAKANO Y, magicLimonene: noncovalent molecular chirality transfer leading to ambidextrous circularly polarised luminescent π -conjugated polymers [J]. *New J. Chem.*, 2010, 34(4):637 – 647.
- [80] YANG K, MA S, ZHANG Y J, *et al.* Helix-sense-selective polymerization of achiral monomers for the preparation of chiral helical polyacetylenes showing intense CPL in solid film state [J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2022, 43(11): 2200111.
- [81] ZHANG G, BAO Y L, PAN M H, *et al.* Memorable full-color circularly polarized luminescence from chiralco-assembled polymer films enabled by multipath transfer [J]. *Sci. China Chem.*, 2023, 66(13):1169 – 1178.
- [82] LEE D, JIN Y J, KIM H, *et al.* Solvent-to-polymer chirality transfer in intramolecular stack structure [J]. *Macromolecules*, 2012, 45(13):5379 – 5386.
- [83] MA S, ZHAO B, DENG J P, Helical polymer working as a chirality amplifier to generate and modulate multicolor circularly polarized luminescence in small molecular fluorophore/polymer composite films [J]. *ACS Cent. Sci.*, 2023, 9(7):1409 – 1418.
- [84] SUN H, YUAN C Y H, NISHIMURA T, *et al.* Achieving high circularly polarized red luminescence and photoluminescence quantum yield through chiral induction and energy transfer in F8BT-based systems [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2025, 64(10):10SP30.
- [85] GENG Z X, WANG Z T, ZHU S E, *et al.* Inverted and amplified circularly polarized luminescence behavior originated from structure – activity regulation of achiral pyrene-based polymers in chiral coassemblies [J]. *Macromolecules*, 2024, 57(9):4567 – 4575.
- [86] JI G Q, DUAN H M, WU X L, *et al.* Enantioselective induction of helical chirality in coil-structured amino acid-based polymers by conjugated molecules [J]. *Macromol. Chem. Phys.*, 2025, 226(11):2500007.
- [87] XU L, WU Y J, GAO R T, *et al.* Visible helicity induction and memory in polyallene toward circularly polarized luminescence, helicity discrimination, and enantiomer separation [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(13):e202217234.
- [88] WANG X C, JIN S K, GUI Q, *et al.* Preparation and properties of circularly polarized liquid crystal physical gel materials with photo-induced luminescence dissymmetry factor enhancement [J]. *Mater. Today Chem.*, 2025, 44:102537
- [89] WANG J N, JIN S K, YUAN Y J, *et al.* Photo-induced micro-phase separation structural changes for property regulation of circularly polarized luminescent liquid crystal physical gels [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2026, 14(6): 2317 – 2328.
- [90] WAN L, WADE J, SALERNO F, *et al.* Inverting the handedness of circularly polarized luminescence from light-emitting polymers using film thickness [J]. *ACS Nano.*, 2019, 13(7):8099 – 8105.
- [91] ZHONG H, ZHAO B, DENG J P, Solvent-dependent chirality transmission and amplification from cellulose derivative to achiral helical polymer for achieving full-color and white circularly polarized luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(17):e202418463
- [92] YU, C, ZHOU W S, LIU Z, *et al.* Inversion of circularly polarized luminescence in chiral PIM membranes via co-assembly with achiral perovskite quantum dots [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(96):19088 – 19091.
- [93] WANG X B, GUO H, YU C, *et al.* Practical enantioselective synthesis of chiroptical polymers of intrinsic microporosity with circular polarized luminescence [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(23):11180 – 11186
- [94] LI P P, ZHAO B, DENG J P, inductionEnantioselective, amplification, and storage of helical chirality in absolutely achiral polymer systems [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(16):7503 – 7515.
- [95] GAO X H, WANG J, YANG K, *et al.* Regulating the helical chirality of racemic polyacetylene by chiral polylactide for realizing full-color and white circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(13):6116 – 6128.
- [96] ZHANG R, SONG L J, YIN W B, *et al.* Generation and modulation of nonreciprocal chirality to realize nonreciprocal CPL emission in polyurethane films [J]. *Sci. China Chem.*, 2025, 68(7):1 – 13.
- [97] LI P P, DENG J P, Switchable chiroptical flexible films based on chiral helical superstructure: handedness inversion and dissymmetric adjustability by stretching [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(41):2105315.
- [98] GENG Z X, ZHANG Y X, ZHANG Y, *et al.* Circularly polarized electroluminescence from an achiral fluorophore induced by co-assembly with chiral polymers [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(36):12141 – 12147.

- [99] WANG X H, CHEN S Y, WU X C, *et al.* Near-infrared circularly polarized light detection through chiral polymer blends with enhanced spin selectivity [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(22):32742 – 32751.
- [100] SUN T, LI S L, SUN M D, *et al.* Chiral copper clusters-polyvinyl alcohol films with enhanced fluorescence and activated circularly polarized luminescence for dual applications in lighting and sensing [J]. *Chem. Eng. J.*, 2026, 531: 173806
- [101] ZHAO B, PAN K, DENG J P, Combining chiral helical polymer with achiral luminophores for generating full-color, on – off, and switchable circularly polarized luminescence [J]. *Macromolecules*, 2018, 52(1):376 – 384.
- [102] ZHAO B, YU H L, TAN Z A, *et al.* Multifarious chiral nanoarchitectures serving as handed-selective fluorescence filters for generating full-color circularly polarized [J]. *ACS nano.*, 2020, 14(3):3208 – 3218.
- [103] HUANG Z H, HU Y, JIN X, *et al.* Light-responsive circularly polarized luminescence polymers with INHIBIT logic function [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2021, 9(12):2100135.
- [104] WANG X J, YANG K, ZHAO B, *et al.* Polymeric cholesteric superhelix induced by chiral helical polymer for achieving full-color circularly polarized room-temperature phosphorescence with ultra-high dissymmetry factor [J]. *Small*, 2024, 20(43):2404576
- [105] KHORLOO M, YU X X, CHENG Y H, *et al.* Enantiomeric switching of the circularly polarized luminescence processes in a hierarchical biomimetic system by film tilting [J]. *ACS Nano.*, 2021, 15(1):1397 – 1406.
- [106] JIANG K D, FAN Q Y, GUO D K, *et al.* Circularly polarized room-temperature phosphorescence with an ultrahigh dissymmetry factor from carbonized polymer dots by stacked chiral photonic films [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(21):26037 – 26046.
- [107] LU, D, LI M F, GAO X Q, *et al.* Cellulose nanocrystal films with NIR-II circularly polarized light for cancer detection applications [J]. *ACS Nano.*, 2023, 17(1):461 – 471.
- [108] LIU Y Z, YANG S H, ZHAO B, *et al.* Nonconventional fluorescence-based circularly polarized luminescent core/shell particles: maleic anhydride copolymer as the core and chiral helical polyacetylene as the shell [J]. *ACS Macro Lett.*, 2023, 12(4):530 – 535.
- [109] LU N, GAO X B, PAN M, *et al.* Aggregation-induced emission-active chiral helical polymers show strong circularly polarized luminescence in thin films [J]. *Macromolecules*, 2020, 53(18):8041 – 8049.
- [110] PAN M, ZHAO R, ZHAO B, *et al.* Two chirality transfer channels assist handedness inversion and amplification of circularly polarized luminescence in chiral helical polyacetylene thin films [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(11):5043 – 5052.
- [111] SONG L J, YANG K, ZHAO B, *et al.* Chiroptical elastomer film constructed by chiral helical substituted polyacetylene and polydimethylsiloxane: multiple stimuli responsivity and chiral amplification [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(3):4601 – 4611.
- [112] ZHAO B, GAO X B, PAN K, *et al.* Chiral helical polymer/perovskite hybrid nanofibers with intense circularly polarized luminescence [J]. *ACS Nano.*, 2021, 15(4):7463 – 7471.



刘梦阳(2003-),男,湖北丹江口市人,硕士研究生,主要从事手性聚合物发光材料的研究。
E-mail: 2025200517@buct.edu.cn



邓建平(1969-),男,河北定州人,博士研究生,教授,主要从事手性高分子的研究。
E-mail: dengjp@mail.buct.edu.cn



赵彪(1992-),男,河南信阳人,博士研究生,副教授,主要从事手性聚合物发光材料与器件以及生物基高分子的研究。
E-mail: zhaobiao@mail.buct.edu.cn