

诱导非手性有机发光材料实现圆偏振电致发光

孙 静¹, 倪松潜², 朱卫国², 吴秀刚^{2*}

(1. 常州大学医学与健康工程学院实验中心, 江苏 常州 213164;

2. 常州大学材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 圆偏振有机发光二极管(CP-OLED)在三维显示、光学信息加密与量子通信等领域应用前景广阔。传统上,圆偏振电致发光(CP-EL)依赖手性发光客体材料,存在分子设计复杂、合成成本高、对映体分离困难,以及发光效率与不对称因子难以兼顾等瓶颈。作为一种“功能分离”的设计哲学,诱导非手性发光材料实现圆偏振电致发光将手性调控功能与高效发光功能解耦,为实现高性能CP-OLED提供了全新思路。本文系统梳理该领域研究进展,重点聚焦发光层中手性主体、手性分子组装体系及手性载流子传输层在诱导非手性发光材料产生CP-EL中的核心作用,剖析各类手性功能层的设计策略与手性诱导机制,总结器件在电致发光不对称因子(g_{EL})、外量子效率及色纯度等方面的性能表现,并展望未来发展方向,助力基于非手性发光材料的CP-OLED从实验室走向实际应用。

关键词: 手性材料; 圆偏振电致发光; 非手性发光材料

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260162

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260162

Inducing achiral organic luminescent materials to achieve circularly polarized electroluminescence

Sun Jing¹, Ni Songqian², Zhu Weigu², Wu Xiugang^{2*}

(1. Experimental Center, School of Medicine and Health Engineering, Changzhou, Jiangsu, China, 213164;

2. School of Materials Science and Engineering, Changzhou, Jiangsu, China, 213164)

* Corresponding Author, E-mail: xgwu16@cczu.edu.cn

Abstract: Circularly polarized organic light-emitting diodes (CP-OLEDs) hold great promise for applications in three-dimensional displays, optical information encryption, and quantum communication. Generally, circularly polarized electroluminescence (CP-EL) relies on chiral emitting guest materials, which face bottlenecks such as complex molecular design, high synthesis costs, difficulties in enantiomer separation, and trade-offs between luminescence efficiency and asymmetry factor. As a design philosophy of "function separation," the strategy of achieving CP-EL with achiral luminescent materials effectively decouples chiral regulation from high-efficiency luminescence, thereby providing a new pathway for developing high-performance CP-OLEDs. This article systematically reviews the research progress in this field, focusing on the key roles of chiral hosts in the emitting layer, chiral molecular assembly systems, and chiral carrier transport layers in inducing CP-EL from achiral luminescent materials. It analyzes the design strategies and chiral induction mechanisms of various chiral functional materials, summarizes device performance in terms of electroluminescence asymmetry factor (g_{EL}), external quantum efficiency, and color purity, and discusses future development directions, facilitating the transition of CP-OLEDs based on achiral luminescent materials from laboratory to practical applications.

Keywords: chiral materials; circularly polarized electroluminescence; achiral emitting materials

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(22271026, 52073035); 江苏省自然科学基金(BK20211335)。

Support by National Natural Science Foundation of China (22271026, 52073035), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20211335)

引 言

有机发光二极管(OLED)具有自发光、高对比度、宽视角、柔性可弯曲等卓越的显示性能,已成功在照明、显示等领域商用化^[1,2]。然而,在高端智能手机、高清显示等应用场景,一个长期存在的技术瓶颈日益凸显:在环境光(尤其是自然光)下,传统OLED器件发出的非偏振光会因显示屏表面(如玻璃或聚合物盖板)的反射而产生强烈的眩光,严重降低了显示的对对比度、色彩饱和度和可视性。目前,解决方案主要依赖在OLED屏外加装防眩光片,以过滤掉特定旋向的反射光。但这一附加层增

加了器件厚度、复杂性和成本,更因其选择性造成了超过50%的固有光损失,从根本上制约了器件的光取出效率和能量利用率^[3]。在此背景下,能够直接发射圆偏振光的OLED,即圆偏振有机发光二极管(Circularly Polarized OLED, CP-OLED)应运而生,并在三维立体显示、加密信息存储、生物传感以及自旋电子学等新兴领域展现出巨大的应用潜力^[4,5]。CP-OLED旨在通过器件内部产生圆偏振电致发光(CP-EL),从根源上产生具有取向选择的圆偏振光,从而有效抑制环境光反射的影响,还避免了外置偏振片造成的额外光损耗,进而为实现更高亮度、更低功耗的集成器件铺平道路(如图1)。

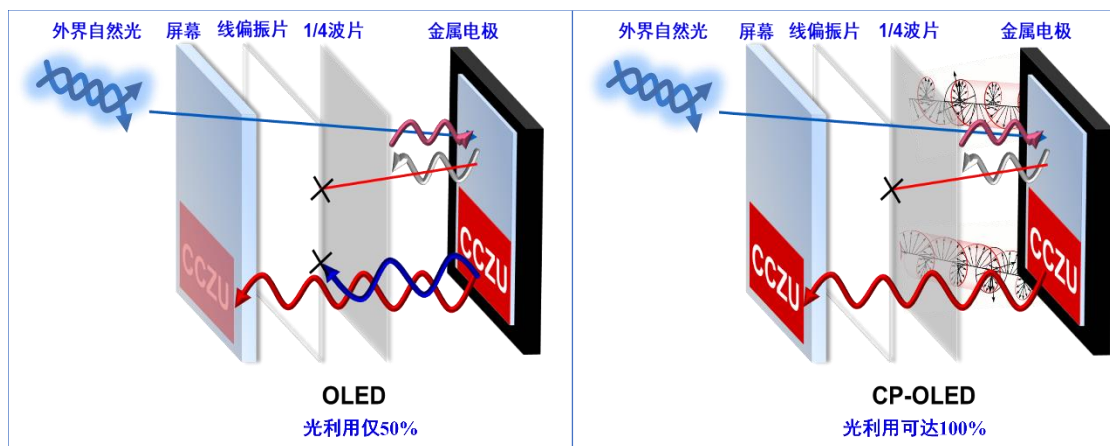


图1 参照文献绘制的CP-OLED概念示意图^[6]

Fig.1 Conceptual schematic diagram of the CP-OLED, modified according to reported literature sources^[6]

为实现高效的CP-OLED,研究主要沿着两大技术路径展开:一是开发新型的手性发光材料,如手性金属配合物、手性热激活延迟荧光材料(CP-TADF)、手性聚合物等,这些材料在激发态能级上即存在手性诱导的电子云分布差异,理论上能实现较高的电致发光不对称因子(g_{EL})^[7,8]。然而,这一路径面临巨大挑战:高性能发光团(如稠环芳烃、金属配合物)与手性源的高效耦合与协同优化极其困难;复杂的手性合成与纯化(如对映体拆分)导致成本高昂;手性中心在薄膜态或电激发下可能发生构型不稳定性,影响器件可靠性;二是通过器件功能层手性功能化^[9],诱导非手性发光材料产生CP-EL。此路径不要求发光分子本身具有手性,而是将高性能、易获得、成熟的非手性传统发光材料(如荧光、磷光、热激活延迟荧光(TADF)材料)作为发光“引擎”,在器件层次巧妙地将手性分子通过超分子组装或能量传输等手段引入器件功能层,赋予器件整体CP-EL特性。这好比为一

台高性能但非手性的发动机,安装了一个精密的“手性变速箱”,使其输出转变为圆偏振模式。

相较于手性发光材料实现CP-EL路径,基于非手性发光材料产生CP-EL的策略展现出独特且不可替代的优势:它能够直接继承和利用已有数十年积累的、性能高度优化的商用发光材料库,极大降低了材料开发的门槛与成本;通过优化功能层等器件工程实现多样化、多色彩的CP-EL,其制备过程更易于调控和规模化;手性功能与发光功能在一定程度上解耦,为独立优化发光效率(EQE)与 g_{EL} 提供了更大的设计自由度。因此,诱导非手性发光材料产生CP-EL策略被认为是目前最有可能率先实现高性能、低成本、产业化CP-OLED的务实且富有前景的路线。

鉴于此,本综述聚焦这一快速发展的新兴领域:基于非手性有机发光材料实现CP-EL(图2)。我们将系统梳理该领域的研究进展,并进行前瞻性展望。文章首先深入剖析非手性发光材料CP-

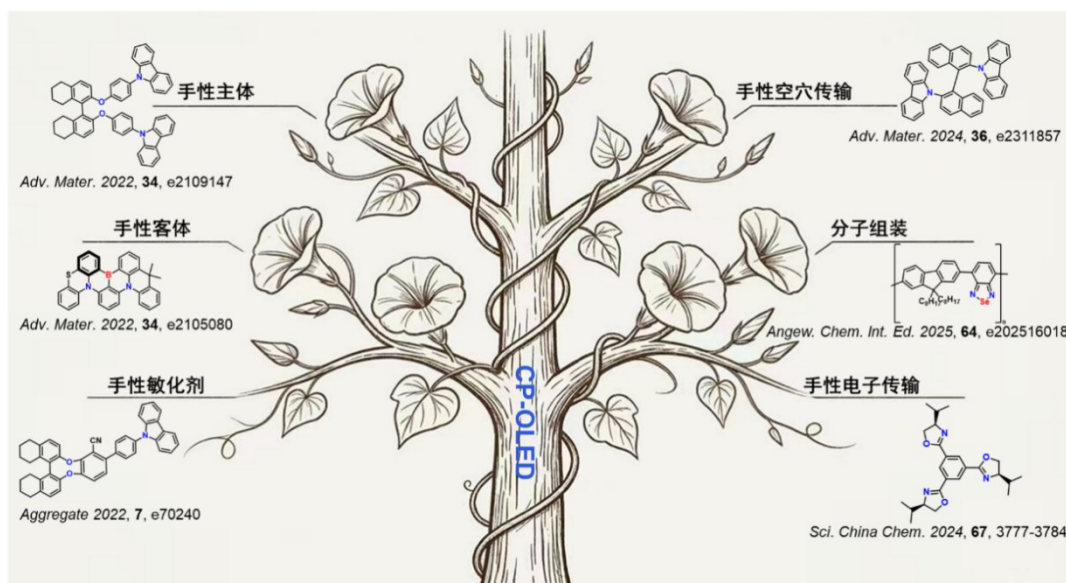


图2 基于非手性有机发光材料实现CP-EL途径

Fig.2 Realization of the CP-EL pathway via achiral organic luminescent materials

OLED的工作原理,继而将讨论重心拓展至手性发光客体材料以外的手性功能层构筑,旨在及时总结、梳理该手性功能层诱导非手性发光材料实现圆偏振电致发光进展。我们期望本综述能为显示技术、有机电子学、手性光子学及纳米科学领域的研究人员提供清晰的路线图,助力推动该变革性技术从实验室走向产业应用。

1 圆偏振电致发光(CP-EL)

OLEDs是一种有机半导体器件,其核心发光原理为:在电场作用下,电子和空穴分别被注入并传输到发光层,相遇后由库仑相互作用结合的电子-空穴对(称为激子),激子能量传递给发光材料后,激发态激子返回基态并伴随光的产生。这一整个过程称为OLEDs的电致发光。此外,如果发出的光具有一定的偏振性,即光的左旋和右旋圆偏振分量不同,则这一过程被称为基于OLEDs的圆偏振电致发光(CP-EL),这类OLEDs被称为圆偏振OLEDs(CP-OLEDs)。深入理解CP-EL的本质、量化标准及其产生机制,是设计与优化CP-OLED的基础。

圆偏振光是一种电磁波,其电场矢量在垂直于传播方向的平面上,随着时间推移呈现匀速旋转,轨迹末端构成一个圆。根据旋转方向,可分为左旋圆偏振光(LCP,顺时针旋转)和右旋圆偏振光(RCP,逆时针旋转)。不对称因子(g)用于量化多种手性光学响应,包括吸收(g_{abs})、光致发光(g_{PL})和电

致发光(g_{EL}),它是评价器件圆偏振特性的核心指标^[10]。 g 定义为:

$$g = \frac{2(I_L - I_R)}{I_L + I_R} [1]$$

其中, I_L 和 I_R 分别表示左旋和右旋圆偏振光的发光强度。 g 值范围从完全左旋圆偏振光对应的+2到完全右旋圆偏振光对应的-2,而 $g = 0$ 则表示完全非偏振光或等量的左右旋光混合。在CP-OLED中用 g_{EL} 量化CP-EL。通常要求器件的 g_{EL} 值达到0.7~1.0及以上,才能保障优异的环境光抑制能力。

从量子跃迁的角度看, g 值用[2]式表征:

$$g = 4|m||\mu|\cos\theta/(|m|^2+|\mu|^2) [2]$$

其中, m 为磁跃迁偶极矩, μ 为电跃迁偶极矩, θ 为 m 与 μ 之间的夹角。有机发光材料的激发态通常以电偶极跃迁为主导,磁偶极跃迁强度较电偶极小约3~4个数量级,这是传统手性有机分子 g 值普遍较低(10^{-4} ~ 10^{-2})的根本原因。此时,公式[2]可简化为[3]:

$$g = 4\cos\theta|m|/|\mu| [3]$$

$$\Phi = \frac{kr}{kr + knr} [4]$$

$$k_r \propto |\mu|^2 [5]$$

然而,由爱因斯坦系数可知, μ 值大小决定了辐射跃迁速率(k_r),进而影响发光效率(Φ)(如公式[4-5]所示)。这也决定了圆偏振发光的 g 与 Φ 之间存在着内在的物理拮抗关系。在分子尺度上同时实现高发光效率与大圆偏振不对称因子通用材料

挑战巨大^[11]。虽然镧系配合物可实现接近理论较高 g 值($\sim 10^{-1} \sim 1$), 源于其 f-f 跃迁中磁偶极与电偶极强度可比拟, 但 f-f 跃迁本质上属于宇称禁阻跃迁, 导致其 Φ 值偏低(通常 $< 10\%$)。因此, 打破“高 g 值与高效率”的拮抗, 需在材料设计上寻求两种跃迁强度匹配的“奇异点”, 或在器件层次通过手性 Purcell 效应, 绕开发光分子本征 g 值的限制。本文后续综述的多条路径(如手性主体敏化、超分子组装、手性载流子传输层等), 本质上均是在不同尺度上实现“电偶极主导发光”与“磁偶极主导手性”的功能解耦与协同。在实现电致发光器件中同步实现高 EQE 与高 g_{EL} 还会牵扯到凝聚态物理、电子学等深层次的问题影响, 需要多学科背景的人员加入到研究队伍中攻坚克难。

1.1 圆偏振电致发光的产生机制

CP-EL 的产生根源在于发光过程中存在的手性诱导。这种手性可以从微观的电子态波函数延伸到宏观的器件结构, 其机制主要可归结为两类: 一种是通过材料本身的手性来实现的圆偏振发光(CPL), 当发光材料本身具有手性元素(如手性基元或手性螺旋结构)时, 其基态与激发态的电子云分布会因手性环境而发生变化, 形成手性诱导的电子态分裂。同样, 在电激发下, 电子从阳极注入的空穴和从阴极注入的电子在手性发光分子上复合并形成激子, 该激子衰变辐射光子时, 其跃迁偶极矩受到分子手性结构的调制, 优先耦合到某一旋向的圆偏振光模式, 从而产生 CP-EL^[12]。这一机制直接“编码”在分子内, 但通常 g_{EL} 值受限于分子固有的手性光学强度(即 g_{abs} , 吸收不对称因子)。另一种是采用非手性发光材料实现 CP-EL。该机制不依赖于发光分子本身的手性, 而是通过构建一个手性光子学环境, 对非手性发光材料发出的非偏振光进行“后处理”或“原位调制”, 从而产生 CP-EL。其物理本质是手性模式选择, 主要路径包括: 1. 手性能量转移: 通过激发手性发光主体材料, 将其激发态能量, 选择性地传递给一个具有非手性光学响应的客体分子, 最终由客体发射出 CP-EL, 此路径同样适用于手性敏化剂、手性空穴传输材料和手性电子传输材料^[13]。2. 手性偏振转换: 在器件中引入各向异性与手性结构(如胆甾相液晶), 使得非手性发光材料发出的非偏振光通过该手性介质时被转换为圆偏振光^[14](类似外置四分之一波片功能, 但被集成在器件内部)。3.

手性普克尔(Purcell)效应: 将非手性发光体置于手性光学微腔或手性等离子体纳米结构中。这些结构对左右旋圆偏振光具有不对称的光子态密度(或局域态密度)。根据费米黄金定则, 发光材料在不同旋向模式的辐射衰减速率与其耦合的模式密度成正比。因此, 通过工程设计, 使器件结构增强某一旋向的光模式, 同时抑制另一旋向, 即可强制非手性发光体主要向增强的模式辐射, 从而产生高 g_{EL} 值的 CP-EL^[15]。

圆偏振电致发光是连接手性物质科学与先进光电器件的桥梁。将成熟的非手性发光材料与手性分子结构巧妙组合实现 CP-EL, 为高效 CP-OLED 的开发提供了一条兼具高性能与实用性的路径。目前, 对于 CP-OLED 的探索集中于手性发光材料实现 CP-EL^[16], 但是采用非手性发光材料实现 CP-EL 的策略未被充分探索, 而这一间接策略具有巨大潜力, 尚未有该题材的全面综述。因此, 本综述及时介绍了近期基于非手性有机发光材料实现圆 CP-EL 的进展, 聚焦于器件功能层的手性功能化构建策略实现 CP-EL。

2 多途径构筑 CP-EL

2.1 发光层构筑 CP-EL

自 Meijer 在手性荧光聚合物中实现 CP-EL 的开创性工作以来^[17], 该领域取得了显著进展。截至目前, 一些手性分子, 如手性螺烯衍生物、TADF 材料、手性聚合物以及手性配位化合物^[18-25], 已被应用于 CP-OLED 中。手性发光材料在发光层(EMLs)中作为发光客体是实现 CP-EL 的主要途径, 已有这方面的综述概括^[26], 基于非手性发光材料客体构筑 CP-EL 也取得了长足进展。

2.1.1 手性主体材料构筑 CP-EL

手性主体材料策略是一种巧妙的“功能分离”设计哲学。其核心思想是: 将“发光”与“手性”这两个功能角色分离, 并分别由两种材料高效承担。具体而言, 该策略采用显著手性光学活性的材料作为主体(Host), 而将高性能、商用化的非手性发光材料(荧光、磷光或 TADF 材料)作为客体(Dopant)掺杂其中。在电激发或光激发下, 手性主体通过高效的弗斯特共振能量转移(Förster Resonance Energy Transfer, FRET)或载流子俘获机制, 将激发态能量选择性地传递给非手性发光客体, 最终由客体发射出具有主体手性特征的圆偏振光, 这一过程被称为手性诱导圆偏振发光。

2.1.1.1 单一手性主体

此前,具有圆偏振发光活性基团的螺旋共轭聚合物已被用于制备具有高 g_{EL} 值的 CP-OLED。2021年,You 和 Kim 等人^[27]将 3-乙炔基咪唑与手性 N-烷基单元共聚,得到具有(P)-螺旋聚合物。该手性聚合物可与新型磷光(R)/(S)-Pt 掺杂剂产生强烈的对映选择性相互作用。其中,(R)-Pt 掺杂剂在(P)-螺旋聚合物薄膜中具有更高的 g_{abs} ,其 g_{abs} 相较(S)-Pt 掺杂薄膜高出约一个数量级。相比于

非手性聚合物基质,手性聚合物主体可实现向磷光掺杂剂的高效能量传递。光物理与形貌研究结果表明,高效能量传递源于手性聚合物更大的 FRET 作用半径,以及与掺杂剂之间良好的界面相容性。基于该手性聚合物主体与(R)/(S)-Pt 的多层 CP-OLED 器件,实现了在 540 nm 波长处的 g_{EL} 可达 1.09×10^{-4} 和 -1.02×10^{-4} 。该研究证明,开发手性聚合物主体是放大圆偏振发光性能、提升 CP-EL 输出效率的可行途径(如图 3)。

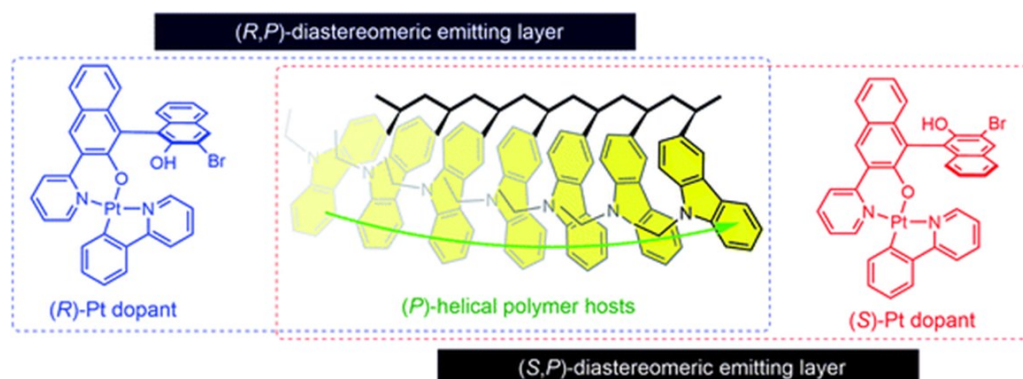


图 3 发光客体掺杂剂与具有富集螺旋取向的聚合物主体之间的非对映异构相互作用^[27]

Fig.3 The enantioselective interaction between the dopant emitters and the polymer core with enriched helical orientation^[27]

Fuchter 等人^[13]展示了一种手性聚合物主体和手性 TADF 发光客体之间能量转移的主-客体策略。基于聚苝类主体材料 cPF8PhO8 与性 TADF 发光材料(R/S)-BN-MDPA 组成发光层的 CP-OLED 器件实现了 g_{EL} 值高达 9.1×10^{-2} (图 4)。在这一体系中,主体材料与客体材料之间的偶极

矩耦合促进了高效的 FRET,从而增强了器件的 CP-EL。此外,主体材料对客体材料施加了独特的手性环境,进一步提高了体系的整体手性。这一机制有利于 CP-EL 的大幅度放大。该研究为进一步优化 CP-OLED 的综合性能提供了极具潜力的技术思路。

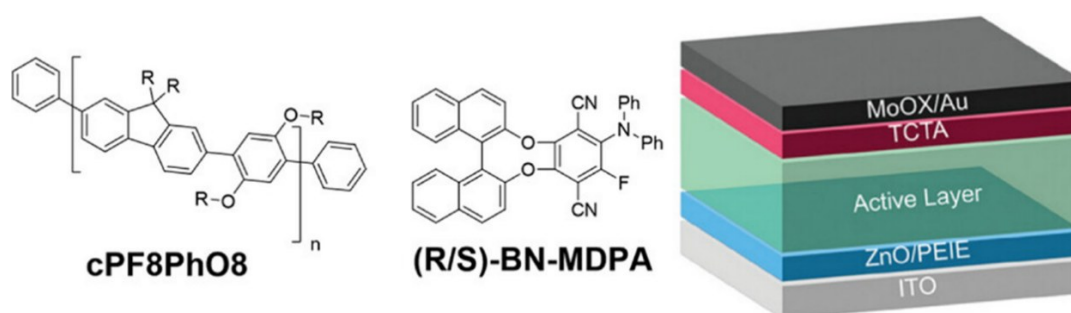


图 4 手性聚合物主体材料(R/S)-BN-MDPA 设计方案^[13]

Fig.4 The design scheme of chiral polymer host material (R/S)-BN-MDPA^[13]

除了手性聚合物主体材料外,小分子主体材料在 CP-OLED 领域的相关研究也取得了一定进展。王亚飞等人^[28,29]制备了(R/S)-BN-mCP 和(R/S)-BN-2mCP 两种手性主体材料(图 5)。基于该手性主体与非手性客体 $\text{Ir}(\text{mypp})_3$,通过溶液加工法制备的 CP-OLED,其 EQE_{max} 和 g_{EL} 分别为 $12.7\% / -1.7 \times 10^{-3}$ 和 $17.1\% / -1.3 \times 10^{-3}$ 。手性双极性主体(R/S)-L-

2mCPCN 具有较高的单重态/三重态能级,在该手性主体及非手性磷光、TADF 发光客体的溶液可加工 CP-OLEDs 中 EQE_{max} 为 10.7% 、 g_{EL} 值为 5.0×10^{-3} 。这两项工作说明了通过对经典结构的主体材料进行手性修饰,可以诱导出性能不错的 CP-EL,但是轴手性单元降低了手性主体的三线态能级,与之匹配的非手性发光材料仅限于单一光色。

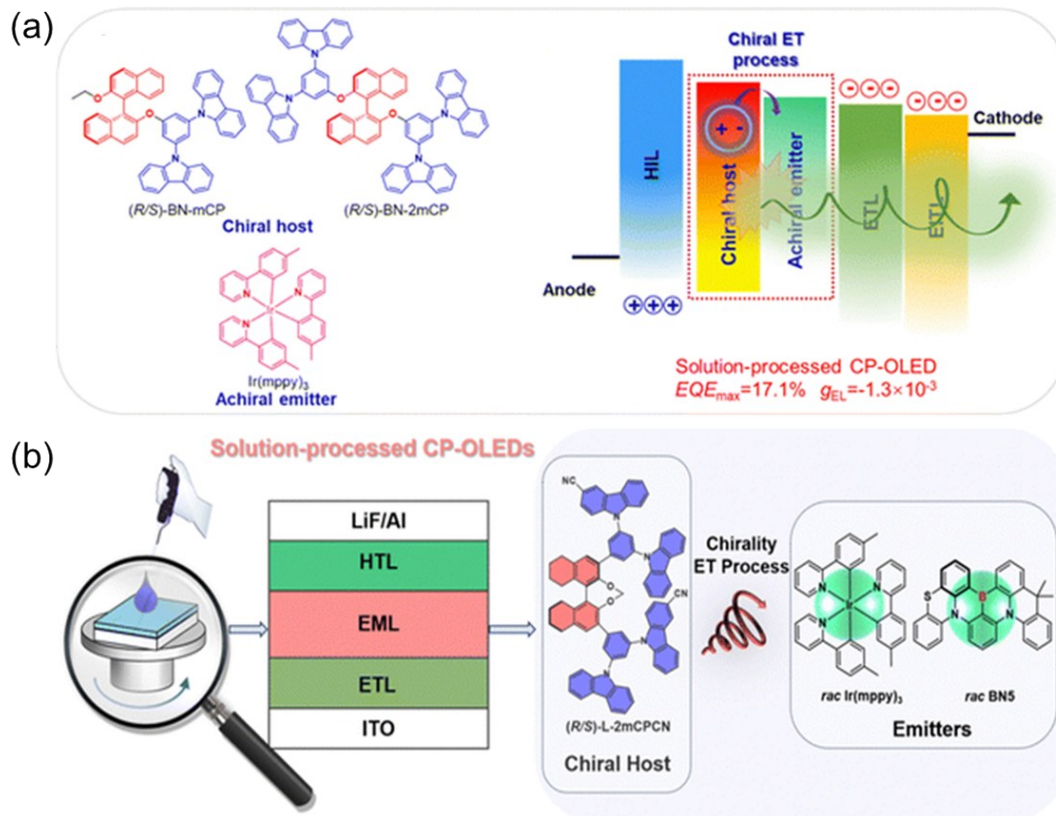


图5 手性主体材料设计方案 (a) (R/S)-BN-mCP和(R/S)-BN-2mCP; (b) (R/S)-L-2mCPCN^[28, 29]

Fig.5 Design scheme of chiral host material (a) (R/S)-BN-mCP and (R/S)-BN-2mCP; (b) (R/S)-L-2mCPCN^[28, 29]

2. 1. 1. 2 激基复合物主体

与传统的主客体体系不同,激基复合物主体材料与发光客体材料制备的 OLED 能有效扩大激子复合区域,成为获取高性能 OLED 一种有效手段。激基复合物诱导非手性性发光材料产生 CP-EL 的原理在于手性体系激基复合物具有的独特电子结构和特性,电子和空穴分别局域于受体和给体分子上,波函数通过空间相互作用发生交叠。当这个“电子-空穴对”中的一个具有手性时,波函数分布与演化会受不对称作用,调制辐射跃迁偶极矩,诱导电子与空穴复合过程中的空间不对称

性,从而为实现圆偏振光提供了基础。此外,激基复合物体系中相对较小的电偶极矩亦有助于提升发光不对称因子,进而显著增强 CP-EL 的性能表现。杨楚罗教授团队^[30]采用手性供体(R/S)-CzOBN 与非手性受体分子 POT2T 构成了手性激基复合物主体材料(如图6)。非手性绿色多重共振-热激活延迟荧光(MR-TADF)材料 BN1 基于该组合主体实现了高性能 CP-EL, EQE_{max} 和 g_{EL} 分别为 33.2%、 2.8×10^{-3} ,半峰全宽(FWHM)为 42 nm。这项工作提供了一种使用模块化构建非手性发射材料实现 CP-EL 的简便方法。

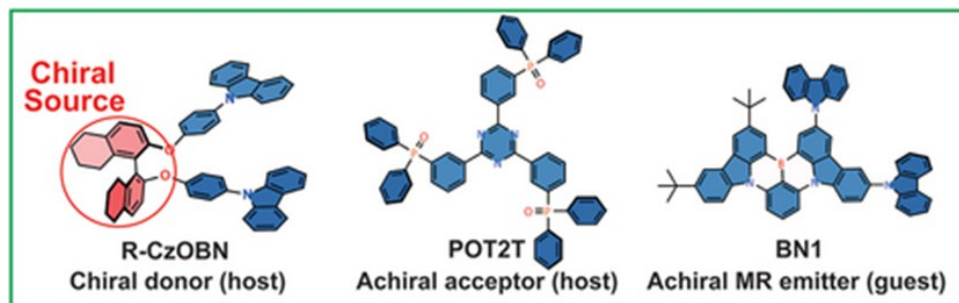


图6 手性供体 R/S-CzOBN 和非手性受体分子 POT2T 形成手性激基复合物共主体材料^[30]

Fig.6 The chiral exciplex host materials based on chiral donor R/S-CzOBN and achiral receptor molecule POT2T^[30]

苏仕健等人^[31]设计了手性受体材料(R/S)-TRZ, 并将其与非手性供体 TAPC 结合, 构建了手性激基复合物体系(如图 7)。理论计算结果表明, 该激基复合物体系中, 最高占据分子轨道(HOMO)与最低未占据分子轨道(LUMO)分别定域在供体分子与受体

分子, 实现了两轨道的有效分离, 进而产生了匹配的电跃迁偶极矩与磁跃迁偶极矩。该激基复合物体系作为发光层材料的 CP-OLED 展现出优异的器件性能: 启动电压低至 2.4 V, EQE_{\max} 达到 12.7%、9.3%, 对应的 g_{EL} 值分别为 $+7.25 \times 10^{-3}$ 、 -9.89×10^{-3} 。

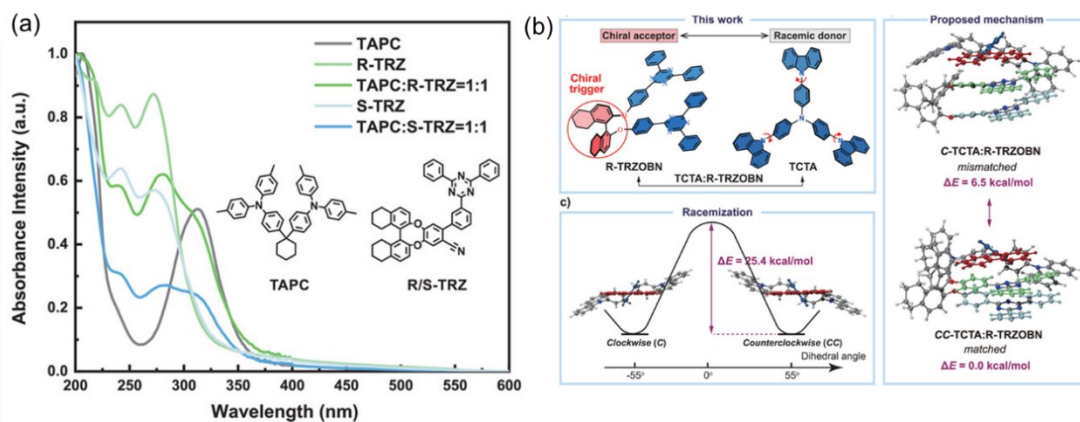


图 7 手性激基复合物体系(a)手性受体材料 R/S-TRZ 非手性供体 TAPC;(b)手性激基复合物受体 R/S-TRZOBN 和非手性供体 TCTA^[31, 32]

Fig.7 Chiral exciplex system: (a) chiral receptor material R/S-TRZ, achiral donor TAPC; (b) chiral exciplex receptor R/S-TRZOBN and achiral donor TCTA^[31, 32]

杨楚罗等人^[32]将手性激基复合物受体(R/S-TRZOBN)与非手性供体 TCTA 进行复合(如图 7), 成功构筑了手性激基复合物体系。该研究阐明了借助发光层内的级联手性转移机制实现稳定的 CP-EL。结合光谱分析与理论计算, 该手性转移过程可归因于非对映体相互作用的驱动。受益于该手性激基复合物体系与非手性发光材料之间高效的 FRET, 所制备的 CP-OLED 器件 EQE_{\max} 高达 32%, 同时 g_{EL} 也达到了 3.2×10^{-3} 。此外, 这些器件在高亮度下表现出优异的效率稳定性, 即使在亮度高达 $128\,000 \text{ cd m}^{-2}$ 时仍能维持 $EQE \geq 20\%$, 表现出极低的效率滚降特征。该工作通过协同的材料设计与器件工程策略, 为构筑高性能 CP-OLED 提供了重要参考。

2.1.1.3 分子组装主体

除了上述主-客体体系可实现 CP-EL 外, 手性分子组装体系已发展成为提升 CP-EL 性能的一种极具应用前景的策略^[33-37]。分子组装是指通过非共价相互作用(有时也结合可逆共价键), 将相对简单的分子结构单元, 在自发作用或特定条件引导下, 形成有序聚集体或超分子结构的过程。分子组装实现了手性从分子尺度向宏观尺度的传递与放大。其核心设计思想是: 以高性能非手性主体材料作为组装“基元”, 借助非共价相互作用、空

间限域或外场引导等手段, 可将手性诱导剂与发光材料有序编排, 构建具有螺旋构型、扭转结构或不对称排列特征的“超级结构”。在该集体手性环境中, 发光材料的跃迁偶极矩发生定向耦合, 或与手性电磁模式形成强烈相互作用, 进而使整个组装体系表现出显著的圆偏振发光特性^[40-44]。该策略巧妙地避开了分子合成层面的难题, 为充分利用现有丰富的非手性发光材料实现高性能 CP-EL 提供了强有力的技术支持。

2013 年, Fuchter 等人^[45]首次报道了基于非手性液晶聚合物(F8BT)自组装掺杂手性 1-氮杂[6]螺旋烯分子制备了 CP-OLED。此后, 已有多项研究围绕手性诱导机制对 CP-EL 进行了探讨。2021 年, 成义祥课题组^[38]提出了一种基于手性聚合物与非手性荧光团螺旋共组装诱导圆偏振发光的新策略。该团队合成了三种侧链烷基链长度不同的手性 1,1'-联苯基聚合物(R/S-P1、R/S-P2 和 R/S-P3), 并将其作为手性诱导剂与非手性苝基荧光团 Bpy 进行共组装(图 8)。研究发现, 当 R/S-P2 诱导剂与 Bpy 的掺杂质量比为 50% 时, 退火前手性聚合物与非手性荧光团呈现随机堆叠状态; 经退火处理后, 手性聚合物的柔顺链构象得以固定, 并通过分子间 π - π 堆叠作用与非手性 Bpy 共组装形成螺旋纳米纤维结构。以 R/S-P2-Bpy 组装体系作为

发光层制备的稳定 CP-OLED 器件展现出显著的 CP-EL 发光性能, g_{EL} 高达 2.1×10^{-2} 。随后, 成义祥等人^[46-48]进一步拓展研究, 开发出基于手性共组装的蓝光、绿光及白光的 CP-OLEDs, g_{EL} 均达到 10^{-2} 量级。基于分子组装的 CP-OLEDs 虽能实现较高的 g_{EL} 值, 但大多数器件的 EQE_{max} 仍低于 1%, 因此开发兼具高 g_{EL} 和 EQE 的手性共组装 CP-OLED 还面临很大的挑战。针对这一难题, 成义祥等人^[39]提出了一种有效的解决策略: 采用含有咪唑单元的轴向手性双萘基衍生物(S-/R-2Cz)作为手

性给体基团, 选取含吡啶的主链聚合物(PFpy)作为非手性吸电子基团, 在 140°C 下热退火, 借助分子间 $\pi-\pi$ 堆叠相互作用构建了手性共组装主体(S-/R-2Cz-PFpy)。基于该组装体, 以非手性 Ir(MDQ)₂ 红光材料作为客体材料, 采用溶液法制备 CP-OLED, 实现了 EQE_{max} 为 4.1%, g_{EL} 为 1.4×10^{-2} (图 8)。该研究是首个通过手性共组装主体材料实现优异综合性能的 CP-OLED 实例, 为利用市售非手性发光材料, 通过手性共组装与能量转移过程实现高性能 CP-EL 提供了有效方法。

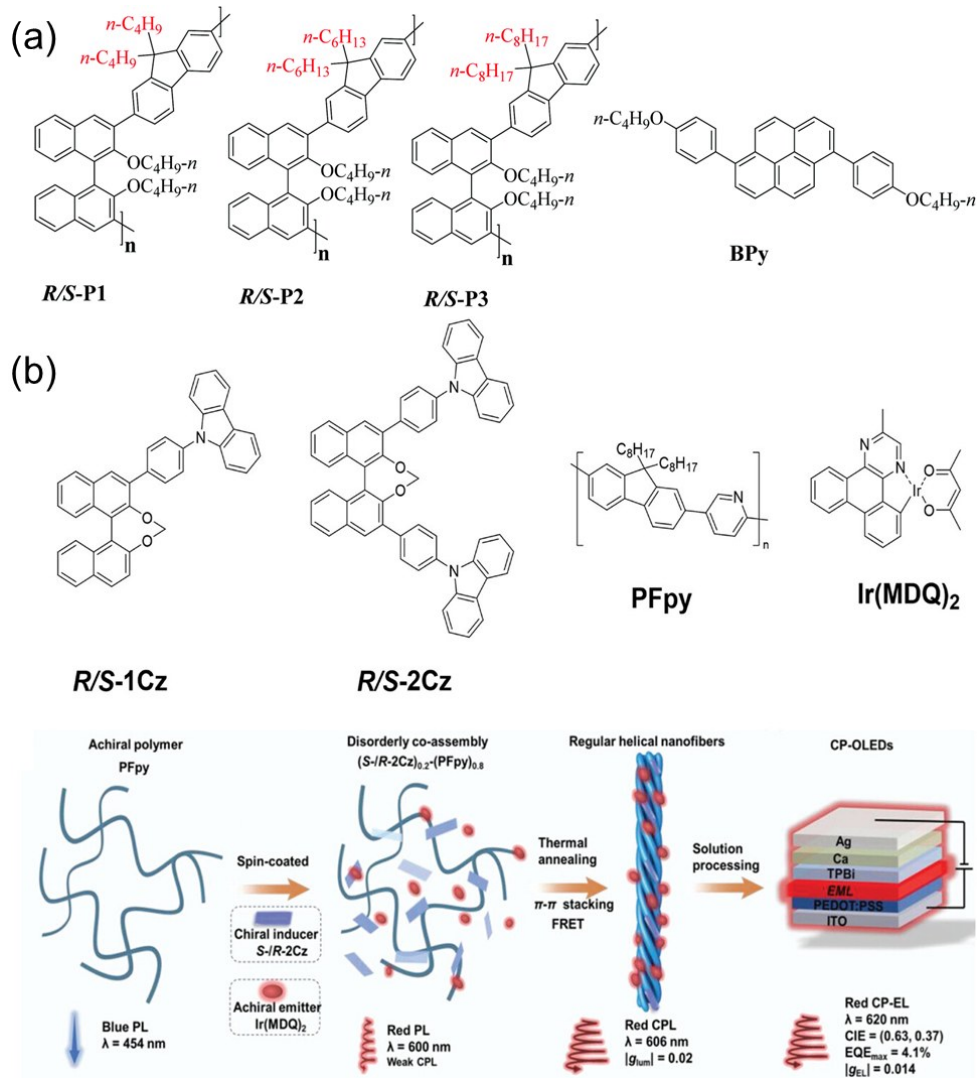


图 8 手性分子组装: (a) 手性诱导剂 R/S-P1、R/S-P2 和 R/S-P3; (b) 手性共组装主体 S-/R-2Cz-PFpy^[38, 39]

Fig.8 Chiral molecule assembly: (a) Chiral inducers R/S-P1, R/S-P2 and R/S-P3; (b) Chiral co-assembling host S-/R-2Cz-PFpy^[38, 39]

基于多色(如互补色或三基色)聚合物构建的多组分手性组装体, 作为具有高 g_{EL} 的白光 CP-OLED 发光层展现出巨大潜力, 但其器件效率仍有待提升。针对这一挑战, 李猛提出一种正交架

构策略^[14]: 将非手性蓝光 TADF 发光材料 DMAC-DPS 与手性橙光组装体(聚合物 F8BS 与手性诱导剂 R/S-5011 组装)协同集成于白光 CP-OLED 中。该设计巧妙结合了 TADF 材料在激子高效利用上

的突出优势与手性组装体在圆偏振发光放大方面的独特优势, 实现了性能的协调提升。F8BS:(R/S)-5011 共组装后形成具有螺旋有序结构的薄膜, 展现出优异的 CPL 性能。该组装薄膜可选择性透射非偏振蓝光中的单手性分量, 进而激发 F8BS 发射橙光, 同时透射正交手性分量; 透射的蓝光经组装体赋予手性后, 与组装体所产生的橙光 CPL 复合, 最终实现白光圆偏振发射。最佳手性组装薄膜 F8BS:(R/S)-5011(掺杂比为 0.08) 与蓝光 TADF

材料 DMAC-DPS 集成, 构筑了白光 CP-OLED(如图 9 所示)。该器件表现出优异的白光 CP-EL 性能, 其中 g_{EL} 高达 0.34, EQE_{max} 达 6.3%, CIE 色坐标为 (0.31, 0.34)。进一步优化 DMAC-DPS 掺杂浓度后, 获得了冷白光器件, 其中 CIE 为 (0.26, 0.27), EQE_{max} 提升至 14.7%, g_{EL} 达到 $+3.2 \times 10^{-1} / -1.7 \times 10^{-1}$ 。该研究工作所实现的 EQE_{max} 与 g_{EL} 是目前已报道的白光 CP-OLED 领域中较高值, 为该领域的性能突破提供了重要参考。



图 9 双发射层白光 CP-OLED 设计示意图(a)器件结构示意图;(b)分子及其光谱^[14]

Fig.9 Schematic diagram of the dual-emission layer white light CP-OLED design (a) device structure schematic; (b) molecules and their spectra^[14]

此外, 李猛等人^[49]以共组装手性向列相液晶 (N^* -LCs) 薄膜作为发光层来制备高性能 CP-OLED: 将手性诱导剂 (P/M-THH) 掺入 N^* -LC (2PFP) 主体材料中, 经热退火处理后, 确定了可产生最高 g 值的成膜最优条件, 并在该条件下引入 FRET 受体非手性发光材料 BCz-BN ($\Phi_{ET} =$

99%), 该三元共组装 N^* -LCs 薄膜保持向列有序结构, 同时继承了 BCz-BN 的窄光谱和高光致发光量子产率 (PLQY)。该制备方法实现了突破性的 CP-OLED 性能: g_{EL} 值为 0.61, EQE_{max} 为 9.0%, 以及 FWHM 为 32 nm 的窄带电致发光 (图 10)。

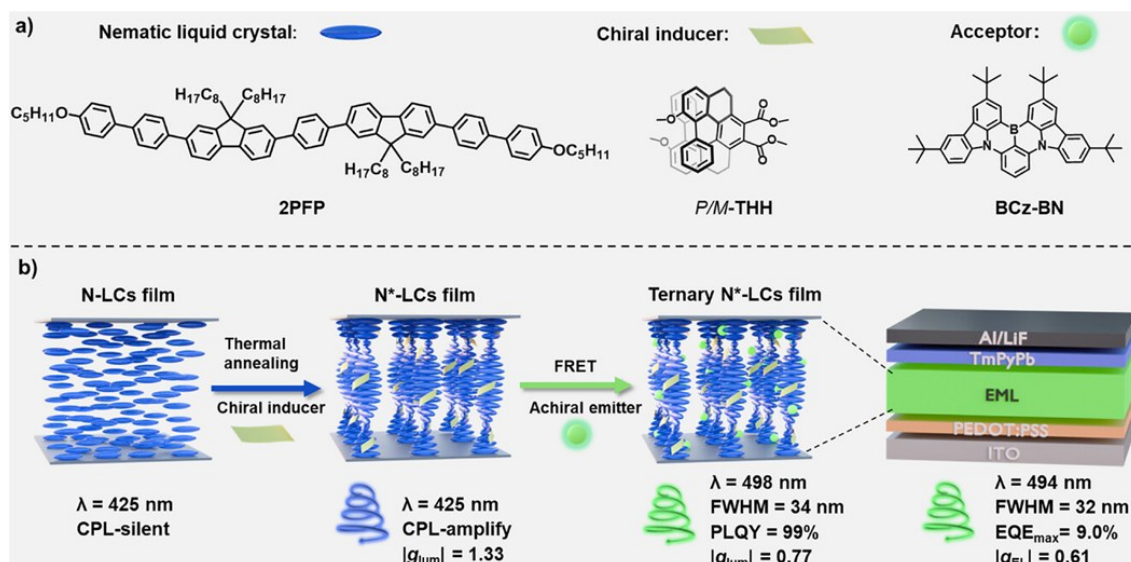


图 10 手性向列液晶 (N^* -LC) 薄膜诱导手性发射示意图^[49]

Fig.10 Schematic diagram of the generation of chiral emission induced by chiral nematic liquid crystal (N^* -LC) films^[49]

原位手性组装策略与工业 OLED 制备工艺完全兼容,具有重要研究价值。Chowdhury 等人^[50]通过真空共升华实现 TAT 分子与主体材料共沉积,并利用热退火诱导的纳米相分离,在薄膜中原位形成了具有明确螺旋堆积结构的手性超分子组装体(图 11)。该研究不同于依赖分子构型手性传递或手性添加剂诱导的传统体系不同,揭示了一种无需引入重原子或依赖复杂自旋-轨道耦合产生 CPL 的新颖机制:理论计算表明,螺旋堆积的 TAT 分子形成能带结构,其价带与导带因轨道角动量

$m_L = \pm 1$ 发生分裂,进而在低对称性 k 点处直接产生本征圆偏振发光。基于此策略制备的 CP-OLED, g_{EL} 可达 0.1, EQE_{max} 高达 15.7%, 亮度超过 $5 \times 10^4 \text{ cd m}^{-2}$ 。该工作不仅在高效 OLED 中实现了高不对称因子的手性发光,其采用的真空蒸镀工艺与现有 OLED 生产线高度兼容,为手性光电器件的产业化应用提供了可行路径。该研究表明,借助能带工程在有序超分子结构中直接赋予光子角动量,是破解传统体系“发光效率与不对称因子难以协同提升”瓶颈的有效途径。

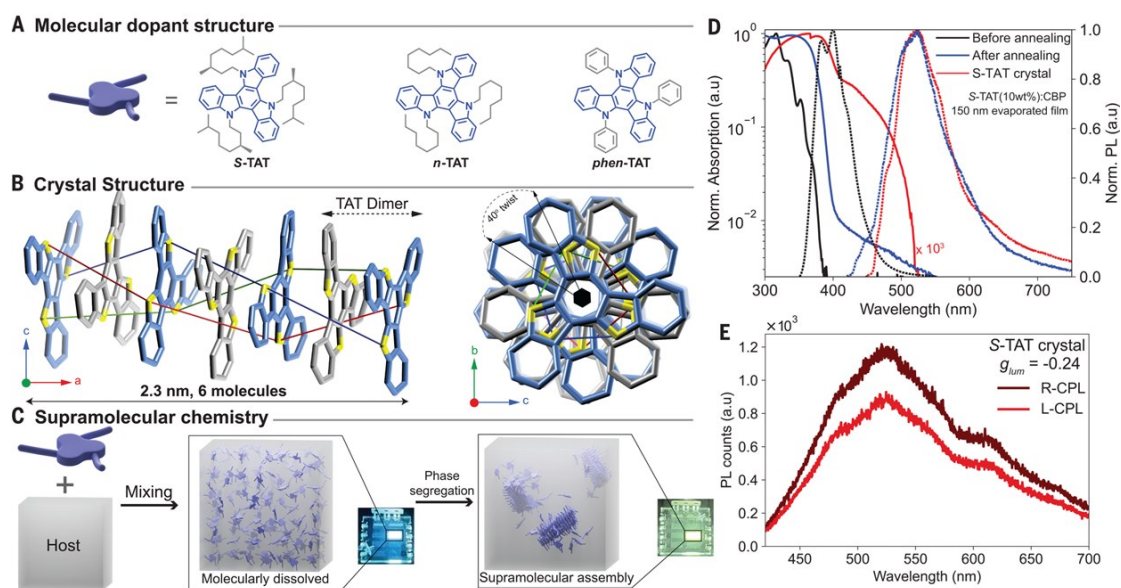


图 11 TAT 系列分子的超分子手性组装^[50]

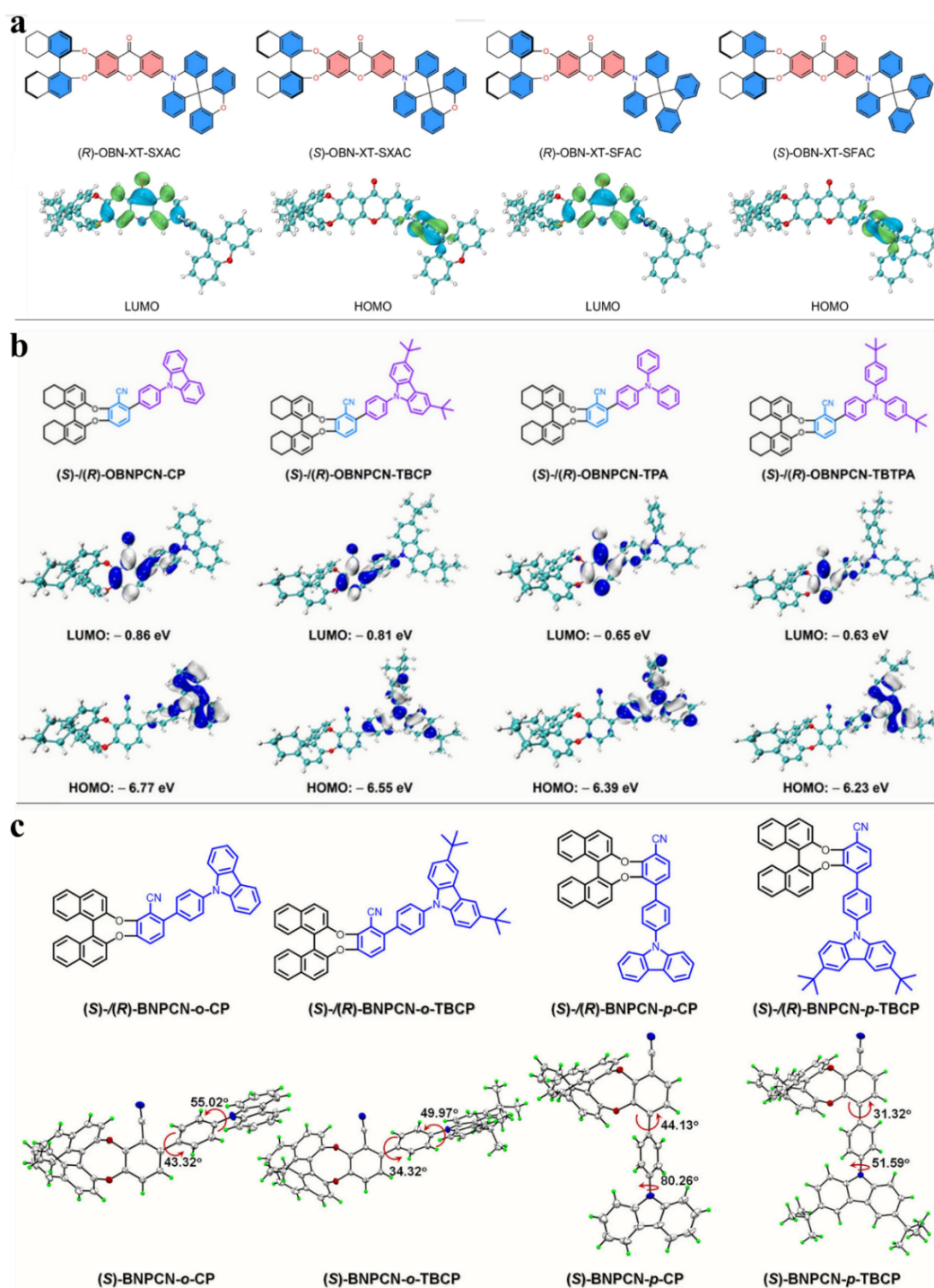
Fig.11 Supermolecular chiral assembly of TAT series molecules^[50]

2.1.2 手性敏化剂实现 CP-EL

前面主要阐述了手性主体诱导产生 CP-EL。在器件工艺进展方面, TADF 材料作为敏化剂应用于 OLED 中(即敏化荧光 OLED, TSF-OLED)可显著提升器件效率、稳定性^[51]。手性 TADF 敏化剂掺杂在主体中,通过 FRET 或 Dexter 能量转移,将其手性激子能量非辐射传递给邻近的非手性发光客体。手性敏化剂的激发态因手性微环境呈现特定空间取向偏好,更易将能量传递给空间匹配的受体发光分子,相当于对受体分子进行了一次“手性筛选”或诱导其形成手性排列,最终使客体发光分子“继承”了敏化剂的手性信息并产生 CPL。该策略将光物理过程与手性化学有机结合,为构建高效率、高偏振度、光谱可调的 CP-OLED 提供了重要思路。

目前,基于手性敏化剂的相关研究仍相对有限。CP-TADF 敏化剂所具备的圆偏振能量转移

特性与手性诱导自旋选择性效应,对实现非手性发光材料的 CP-EL 至关重要。赵祖金等人^[52]将手性联萘酚基团引入单咪唑修饰的苯腈骨架,开发了兼具有高 PLQY 和良好 CPL 性能的近紫外 CPL 材料 R/S-BNPCN-p-CP。以该类材料作为主体或敏化剂、商用非手性材料作为发光客体(包括黄橙色磷光材料、TADF 材料和 MR-TADF 材料)构筑的 CP-OLED,可同时实现高不对称因子和出色 EQE,证实该策略是实现高效 CP-EL 的简便通用途径(图 12)。随后,该团队^[53]设计合成了一系列紫外与深蓝光 CPL 材料 OBNPCN-CP、OBNPCN-TB-CP、OBNPCN-TPA、OBNPCN-TBTPA,实现了高 PLQY 与高效反向系间窜跃双重特性的协同。该类手性材料既可直接作为高效紫外及深蓝光 CP-OLED 的发光层,也可作为敏化剂与非手性 MR-TADF 绿光、黄光客体搭配制备出高 g_{EL} 的 CP-OLED。此外,该团队^[54]还制备了两类高效的圆偏

图 12 手性敏化剂的(a) (b)前线轨道分布,(c)单晶结构^[52-54]Fig.12 Chiral sensitizers of (a) (b) the frontier molecular orbitals distribution, (c) crystal structure^[52-54]

振 TADF 材料 (R/S)-OBN-XT-SXAC 与 (R/S)-OBN-XT-SFAC, 其兼具高 PLQY、短延迟荧光寿命、优异发光不对称因子及高水平偶极取向等优势。该类材料不仅可以应用于高效天蓝色 CP-OLED, 获得高 33.8 % 的 $E_{\text{QE,max}}$ 与 -2.64×10^{-3} 的 g_{EL} 值; 亦可作为敏化剂敏化非手性 MR-TADF 发光材料的敏化, 构筑高效窄光谱蓝色与绿色 CP-OLED, 其 $E_{\text{QE,max}}$

达 31.4 %。

上述结果表明, 手性敏化剂策略所实现的 g_{EL} 值普遍集中在 10^{-3} 量级, 同时器件的 $E_{\text{QE,max}}$ 可超过 30%, 展现出在保持较高不对称因子的前提下实现高效率发光的显著优势。因此, 手性敏化剂策略为构建高性能 CP-OLED 提供了简便、普适的方法。

2.2 手性载流子传输层

前文所述研究均聚焦于通过不依赖手性发光客体的发光层功能化这一技术路径实现 CP-EL。然而,目前基于发光层实现 CP-EL 的发展仍面临诸多瓶颈:不同波段的圆偏振发光通常需要匹配特定结构的手性主体、敏化材料,且多数手性材料需经过复杂的对映体拆分过程,增加了 CP-OLED 器件的制备复杂度与成本,严重制约了该领域的产业化推进。开发手性非发光层材料制备 CP-OLED 值得期待。在 OLED 器件结构中,发光层产生的激子需通过载流子传输层向外耦合输出,因此,在载流子传输层中引入具有手性特征的材料,可类比有机偏振片的作用,对器件出射光实现偏振调控,进而在不增加发光层额外能量损耗的前提下,高效获得 CP-EL 信号。换言之,借助手性载流子传输层的调控作用,可突破对手性发光材料的依赖,实现无手性发光层的 CP-EL,为降低器件成本、简化制备流程提供了新方向。其中,手性空穴传输层主要通过手性诱导的自旋选择性效应影响注入载流子的自旋态,进而调控激子复合过程中的手性传递;而手性电子传输层除了类似作用外,还可对阴极反射光进行二次调控,往往伴随手性翻转,有可能减弱器件圆偏振特性。

2.2.1 手性空穴传输层

基于手性空穴传输层诱导非手性发光材料实现 CP-EL 的有益尝试。郑佑轩等人^[55]通过一锅法合成了一对基于咪唑的不对称手性对映体 R/S-NPACZ(图 13),该材料展现出良好的手性光学性能:在甲苯溶液中呈现对称的 CPL 信号, g_{PL} 分别

为 $+5.7 \times 10^{-3}$ 与 -5.3×10^{-3} ,在纯膜中 g_{PL} 则为 $+5.4 \times 10^{-3}$ 与 -4.9×10^{-3} 。以该手性材料为空穴传输层,选用多种非手性磷光材料、MR-TADF 材料构筑 CP-OLED,实现了红、绿、蓝三原色 CP-EL, g_{EL} 值在 10^{-3} 级别。该器件实现 CP-EL 的核心机制的是:手性分子 R/S-NPACZ 的固有分子手性使其对左旋和右旋圆偏振光产生差异性响应,进而实现对发光层激子选择性激发或发射调控,最终使器件出射光获得由手性空穴传输材料的分子构型与光学活性所决定的圆偏振特性。该研究是首个基于非手性发光材料实现多波长 CP-OLED 的成功案例,为 CP-OLED 的低成本、规模化制备提供了全新的技术思路,也为手性空穴传输材料的设计与应用奠定了重要基础。

随后,赵强等人^[56]以 R/S-1,1'-联萘基-2,2'-二胺为手性前驱体,合成了两对手性空穴传输材料 R/S-CzTPA 和 R/S-BuCzTPA(图 14)。这些化合物通过整合咪唑与三芳胺官能团,将高效的空穴传输特性与轴向手性相结合,兼顾了材料的电荷传输能力与手性光学性能。其中, R-CzTPA 和 R-BuCzTPA 的空穴迁移率分别为 5.63×10^{-5} 和 $2.72 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。基于 R/S-CzTPA 作为手性空穴传输层,三(2-苯基吡啶)铱(III)作为非手性磷光发光材料的绿色 CP-OLED 器件,实现了 $94449/93661 \text{ cd m}^{-2}$ 的最大亮度、 $62/61 \text{ cd A}^{-1}$ 的最大电流效率、19%/18% 的最大外量子效率,以及 $-1.2 \times 10^{-3}/+1.6 \times 10^{-3}$ 的 g_{EL} 。该研究拓宽了手性空穴传输材料的种类,深入探究了取代基对器件效率及 g_{EL} 值的影响,为高性能 CP-OLED 的开发提供了有益参考。

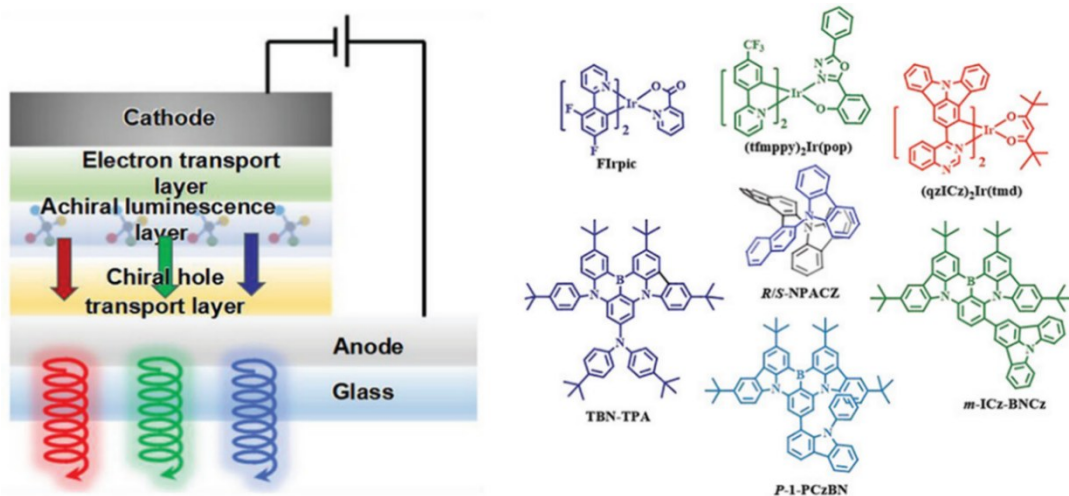
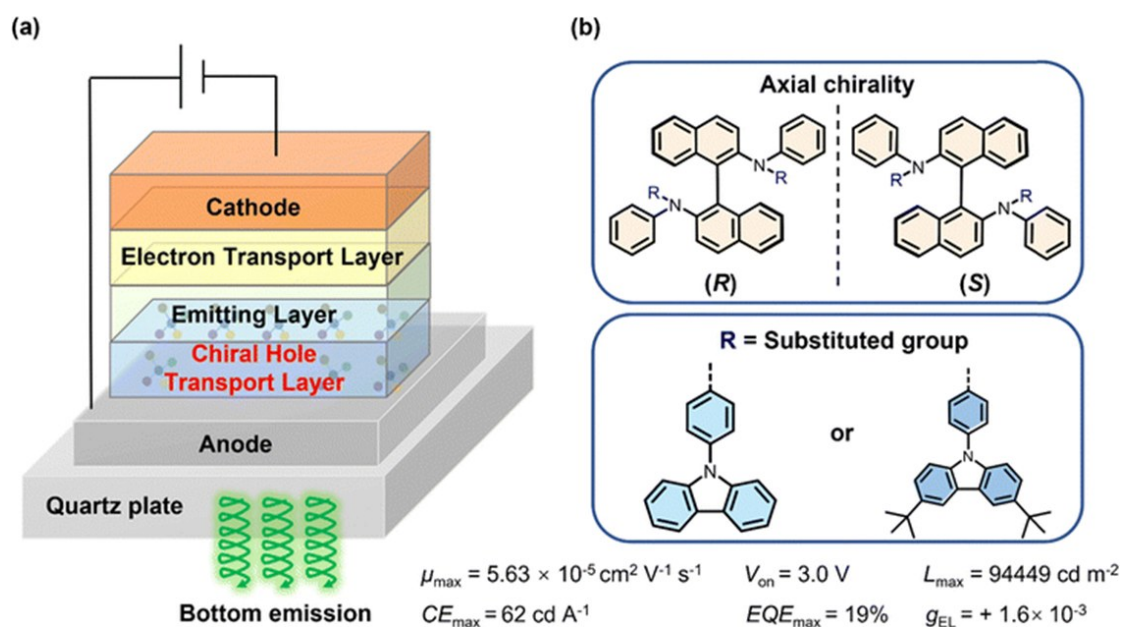


图 13 手性空穴传输材料 R/S-NPACZ^[55]

Fig.13 Chiral hole-transporting material R/S-NPACZ^[55]

图 14 手性空穴传输材料 R-CzTPA 和 R-BuCzTPA^[56]Fig.14 Chiral hole-transporting materials R-CzTPA and R-BuCzTPA^[56]

2.2.2 手性电子传输层

手性电子传输材料诱导 OLED 产生圆偏振发光的机制,与手性空穴传输材料在概念上对称,但在物理实现上存在独特而深刻的差异。其意义在于标志着手性工程的调控范畴从发光层前的功能层延伸至发光层后的功能层,实现了对器件功能层的全覆盖。与手性空穴传输材料主要作用于发光层前的传输通道不同,手性电子传输材料的作用贯穿电子注入、激子复合后光子的出射,以及阴极反射光的再次处理等多个环节。这类材料的 LUMO 能级及其分子轨道具有手性特征,可能对来自阴极的电子注入构成“手性依赖的势垒”。理论上,具有特定自旋(或更抽象地说,与手性电子传输材料手性匹配)的电子更容易注入并传输,从而在激子形成之前便赋予载流子手性偏好。这一机制是其在功能上与手性空穴传输材料的本质区别所在。

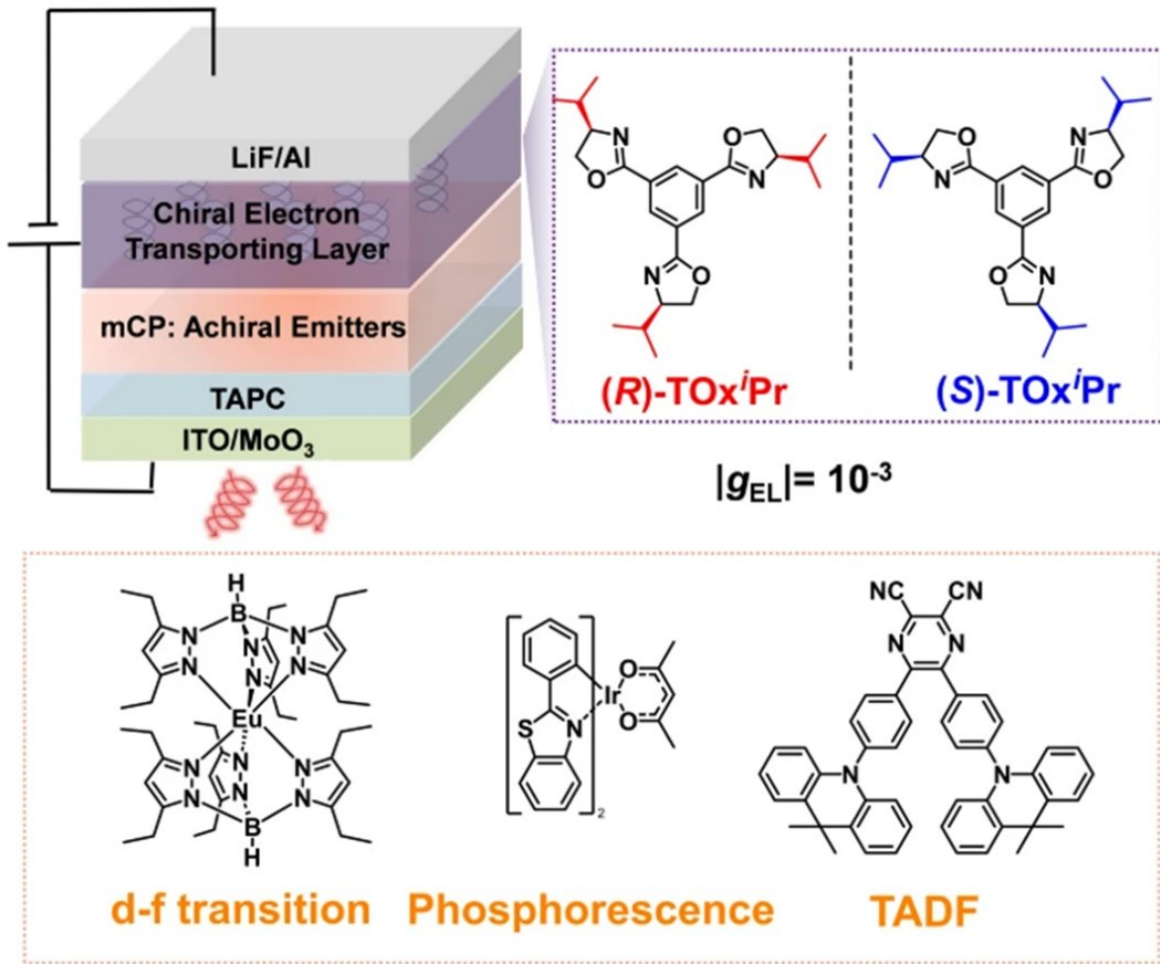
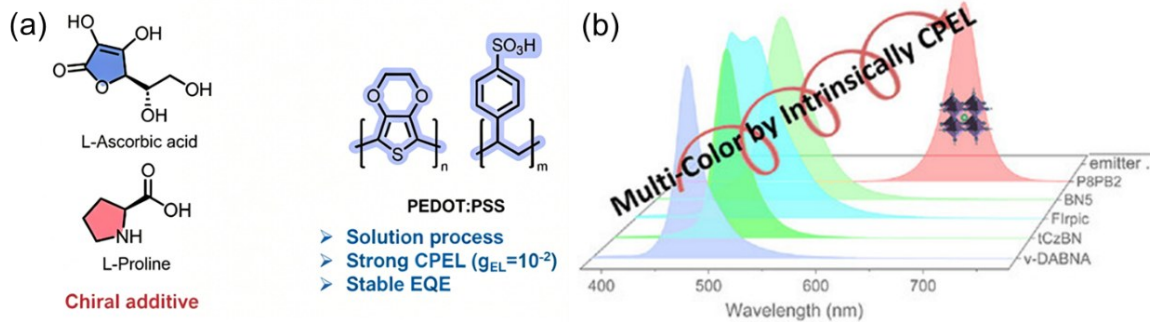
刘志伟等人^[57]采用手性电子传输材料(R/S-TOxiPr)与三种不同的非手性发光材料构建 CP-OLED(图 15)。这些器件表现出约 10^3 数量级的 CP-EL。其功能机制源于手性电子传输材料所促进的独特自旋极化电流。手性材料在自旋-轨道相互作用中引入不对称性,选择性地有利于某一种电子自旋状态,进而将自旋极化传递至非手性发光体的激子态,最终产生圆偏振电致发光。该研究验证了在器件功能层中进行手性修饰以实现 CP-EL 的可行性,并为获得高 g_{EL} 值提供了一种新

颖、普适的策略。

2.2.3 手性空穴注入功能层

手性相关分子结构复杂,导致合成路线冗长繁琐;手性分子易发生消旋化,且整体制备成本居高不下;各功能层只能跟某一光色非手性发光材料能级匹配,限制了多光色 CP-EL 的发展。这些问题极大限制了其实际应用场景拓展。

最近,我们课题组^[58]发展一种简便、普适的方法:在已商业化 PEDOT:PSS 空穴注入层(HIL)中掺杂环境友好型手性添加剂(如维生素 C 或脯氨酸),形成手性 HIL(图 16)。该手性 HIL 不仅保留了 PEDOT:PSS 的势垒能级,保障与各色非手性发光层的兼容性,同时提升了薄膜的导电性和表面平整度。更重要的是,手性添加剂的分子手性成功传递至 HIL 薄膜,并诱导了 HIL 实现自旋极化电荷注入。基于该手性 HIL 层诱导各色非手性发光材料自旋翻转产生 CP-EL。其中,以蓝光 MR-TADF 材料 ν -DABNA 为发光客体的湿法 CP-OLED,实现了高效率、高色纯度与高 g_{EL} 的三重特性, EQE_{\max} 达到 17.2% 的、FWHM 为 26 nm 与 g_{EL} 高达 $+2.0 \times 10^{-2}$ 。对于绿光 MR-TADF 材料 tCzBN 和绿光磷光材料 FIrpic,器件 EQE_{\max} 分别达到 20.3% 和 12.0%, g_{EL} 值分别为 6×10^{-3} 和 1×10^{-2} 。并且该策略还可拓展至深红光钙钛矿 LED 体系,使得基于 P8PB2 的 CP-LED 与空白对照组相比 EQE_{\max} 提升 6 倍(达 1.9%), g_{EL} 为 1×10^{-3} 。该工作的核心创新在于:将手性功能从传统的发光层或

图 15 手性电子传输材料 R/S-TOxiPr^[57]Fig.15 Chiral electron-transporting material R/S-TOxiPr^[57]图 16 手性添加剂掺杂在 PDOT:PSS 中构筑手性空穴注入层实现 CP-EL (a) 手性添加剂及 PDOT:PSS; (b) 多种颜色的非手性发光材料表现出 CP-EL^[58]Fig.16 Chiral hole-injection layer based on chiral additives doped in PDOT:PSS enabling CP-EL (a) chiral additives and PDOT:PSS; (b) Diverse color achiral emitters display CP-EL^[58]

载流子传输层前移至空穴注入层,通过低成本、环境友好的手性添加剂实现了自旋翻转诱导的 CP-EL。该方法避免了手性发光材料的复杂合成与对映体分离,且适用于从深蓝到深红、从有机到钙钛矿的多种非手性发光体系,为高性能、宽色域 CP-EL 器件的开发提供了全新平台。

3 总结与展望

本综述系统梳理了诱导非手性发光材料产生 CP-EL 的最新研究进展,明确揭示了 CP-EL 手性调控的范式转变,即从“依赖手性发光材料产生 CP-EL”向“通过手性功能层诱导产生 CP-EL”过

渡。这一巧妙的“功能分离”模块化设计成功构建了非手性发射材料实现 CP-EL, 为突破 CP-OLED 的性能瓶颈提供了全新思路, 展现出巨大的研究价值与应用潜力。尽管目前通过设计手性功能层诱导非手性发光材料来获得的 g_{EL} 值仍较低, 远未达到应用要求 (>0.1 , 表一总结了相关器件数据), 但其概念的创新性、策略的普适性为后续研究打开了广阔空间。这一领域仍处于探索阶段, 仍存在诸多亟待解决的问题。其一, 手性功能层材料体系亟待完善。当前已报道的手性功能层材料种类相对有限, 且其手性结构与载流子迁移率、能级匹配度及偏振调控能力之间的构效关系尚未明确, 导致材料性能难以精准优化。未来结合理论计算与高通量筛选技术, 精准设计并开发兼具高载流子迁移率、良好成膜性、强手性光学活性 (更高 g_{abs}/g_{PL}) 及优异电化学稳定性的新型手性功能材料, 并深入探索其作为偏振滤波器的微观物理极限, 为 CP-EL 性能提升奠定材料基础。其二, 器件结构的手性化拓展与新型调控方式需持续探索。当前 CP-OLED 的手性化改造主要集中于发光层, 其他功能层的手性化研究仍处于起步阶段, 尚未形成系统的手性化器件架构。将手性液晶、高 g 值的手性镧系配合物引入器件功能层, 或探索电场、磁场等外场辅助下的动态手性调控技术, 有望进一步突破现有性能极限, 丰富 CP-OLED 的功能与应用场景。

针对不同的应用目标, CP-OLED 的性能侧重点存在显著差异: (1) 三维显示: 要求 g 值通常需达到 0.1 以上以抑制左右眼串扰, 同时 EQE $> 20\%$ 、色纯度 (FWHM < 40 nm) 以满足高分辨、低功耗需求; 当前仅有 N*-LC 薄膜^[49]和 TAT 超分子组装^[50]等少数体系接近此目标。(2) 光学信息加密: 对 g 值要求相对宽松 (10^{-3} ~ 10^{-2} 即可), 但强调多色可调性与空间手性分布的可编程性, 手性空穴传输层^[55, 56]及手性添加剂注入层^[58]策略因其简便性和普适性更具优势。(3) 自旋电子学: 对 g 值绝对值不敏感, 但需实现电控自旋注入与手性诱导自旋选择性 (CISS) 效应的协同, 手性空穴/电子传输层^[55-57]是实现该功能的关键。研究者根据应用场景合理选择技术路线, 避免‘唯 g 值论’或‘唯效率论’的片面追求。

目前 CP-OLED 圆偏振发光主要依靠静态调控, 通过替换手性分子固定发光 g 值, 难以适配自

旋 LED、动态加密等应用对圆偏振发光原位、实时、可逆调控的要求。现存三大瓶颈: 缺少外场响应型手性材料、动态调控下手性层的稳定性与可逆性不足、器件缺乏动态调控集成方案。未来可从四方面突破: 研发光/电响应手性分子体系; 利用外场调控胆甾相液晶实现偏振动态切换; 结合可调介质打造手性等离激元与超表面; 借助铁磁电极等结构动态调制自旋极化注入, 实现圆偏振发光可控变化。

目前仅有胆甾相液晶^[49]、超分子螺旋堆积^[50]等少数体系实现 CP-OLED 的 $g_{EL} > 0.1$, 多数器件 g_{EL} 仍处于 10^{-4} ~ 10^{-2} 量级。为实现 g_{EL} 的显著提升, 未来可从四方面开展研究: 一是利用手性光子晶体与微腔工程, 借助手性 Purcell 效应选择性增强特定旋向辐射; 二是在空穴/电子传输层中增添手性诱导, 放大激子手性偏置; 三是开发手性敏化剂, 利用手性能量转移体系, 实现手性发光及放大; 四是探索磁偶极跃迁、拓扑边界态等新型手性发光机制, 拓展圆偏振电致发光的物理路径。上述策略的共同特征是绕开分子本征 g 值的物理上限, 通过宏观/介观尺度的手性光子学或自旋电子学手段实现 g_{EL} 的跃阶提升。我们期待这些方向的探索能够推动 CP-OLED 早日满足 3D 显示等应用对高偏振度的严苛要求。

当前多数 CP-OLED 存在 EQE 与 g_{EL} 相互制约的问题, 实现二者协同提升需平衡电偶极矩与磁偶极矩的竞争。可行思路如下: 一是设计手性发光材料时, 优先考虑材料的激子利用率, 尤其要充分三重态激子, 以确保其发光效率, 同时考虑增加手性环境中磁偶极矩分量, 尽量使激发态时的磁跃迁偶极矩与电跃迁偶极矩在一条直线上。二是构建级联手性能量传递网络, 利用 FRET 策略将高效率 (或者高 g 值或两者兼具) 的敏化剂能量传递给发光客体, 效率与 g 值的同步提升; 三是利用手性超分子组装的集体耦合效应, 依托有序手性环境实现效率与 g 值同步优化。

综上所述, 基于手性功能层诱导非手性发光材料实现 CP-EL 的策略, 可直接继承并利用现有高性能商用发光材料库, 其器件发光性能具备天然优势, 已展现出突破传统 CP-OLED 性能瓶颈的巨大潜力。随着手性材料科学、有机光电子学与自旋电子学的深度交叉融合, 手性光学性能有望突破, 并在实现高效率、高不对称因子、长寿命及

多色可调的 CP-OLED 方面取得系统性突破,推动 示与信息安全等实际应用领域,为相关产业的发展
圆偏振发光技术从实验室基础研究走向下一代显 展注入新的动力。

表 1 文中 CP-OLEDs 器件数据汇总

CP-EL 途径	手性化合物	客体材料	λ_{EL}	EQE_{max}	g_{EL}	文献	
发光层	JY ₀	(R/S)-Pt:JY0	540nm	1.20%	1.09×10^{-4}	[27]	
	JY ₁₀₀	(R/S)-Pt:JY100				[27]	
	单一手性主体	cPF8Ph08	(R/S)-BN-MDPA	553nm	0.18%	9.1×10^{-2}	[13]
		(R/S)-BN-mCP	Ir(mypp) ₃	518nm	12.70%	-1.7×10^{-3}	[28]
		(R/S)-BN-2mCP	Ir(mypp) ₃	518nm	17.10%	-1.3×10^{-3}	[28]
		(R/S)-L-2mCPCN	Ir(mypp) ₃	522nm	10.70%	1.5×10^{-3}	[29]
		BN5	BN5	524nm	9.00%	5.1×10^{-3}	[29]
	激基复合物主体	R/S-CzOBN:POT2T	BN1	510nm	33.20%	2.8×10^{-3}	[30]
		R/S-TRZ	R/S-TRZ:TAPC	520nm/ 516nm	12.7%/9.3%	$7.25 \times 10^{-3}/$ -9.89×10^{-3}	[31]
		R/S-TRZOBN:TCTA	Ir1	520-600nm	32%	3.2×10^{-3}	[32]
	分子组装主体	R/S-P2	R/S-P2:Bpy	420nm		2.1×10^{-2}	[38]
		S-/R-2Cz-Pfpy	Ir(MDQ) ₂	620nm	4.10%	1.4×10^{-2}	[39]
		F8BS:R/S-5011	DMAC-DPS		6.30%	3.4×10^{-1}	[14]
		P/M-THH:N-LC (2PPF)	BCz-BN	492nm	9.00%	6.1×10^{-1}	[49]
		TAT	TAT		15.70%	1×10^{-1}	[50]
	手性敏化剂	R/S-BNPCN-p-CP	Ir(tp ₂ py) ₂ acac	560nm	29.30%	-2.32×10^{-3}	[52]
			4CzTPNBu	558nm	20.40%	-2.87×10^{-3}	[52]
			BN3	572nm	23.80%	-2.7×10^{-3}	[52]
		R/S-BNPCN-o-CP	BN3	566nm	30.80%	-1.17×10^{-3}	[52]
		OBNPCN-TPA	BN2	542nm	34.50%	-0.49×10^{-3}	[53]
OBNPCN-TBTPA		BN3	566nm	35.30%	-0.5×10^{-3}	[53]	
(R/S)-OBN-XT-SXAC		v-DABNA	470nm	28.50%	2.93×10^{-3}	[54]	
(R/S)-OBN-XT-SFAC	BN2	542nm	31.40%	1.31×10^{-3}	[54]		
空穴传 输层	R/S-NPACZ	(qzICz) ₂ Ir(tmd)	616nm	14.90%	0.88×10^{-3}	[55]	
		(tfmpy) ₂ Ir(pop)	521nm	30.70%	2.3×10^{-3}	[55]	
		Firpic	479nm	14.10%	2×10^{-3}	[55]	
		TBN-TPA	475nm	24.10%	1×10^{-3}	[55]	
		P-1-PCzBN	492nm	17.90%	3.6×10^{-3}	[55]	
		m-ICz-BNCz	520nm	25.40%	2.2×10^{-3}	[55]	
	R/S-CzTPA	Ir(ppy) ₃	508nm	19.00%	-1.2×10^{-3}	[56]	
R/S-BuCzTPA	Ir(ppy) ₃	504nm	7.00%		[56]		
空穴注 入层	L/D-VC	v-DABNA	470nm	17.20%	2×10^{-2}	[58]	
		Firpic	474nm	12.00%	1×10^{-2}	[58]	
		tCzBN	488nm	20.30%	6×10^{-3}	[58]	
		BN5	506nm	23.00%	1×10^{-3}	[58]	
电子传 输层	L/D-Proline	v-DABNA	470nm	16.60%	1×10^{-3}	[58]	
	R/S-TOxiPr	Eu(Tp ^{2Et}) ₂	588nm	6.10%	1.4×10^{-3}	[57]	
		Ir(bt) ₂ acac	561nm	5.50%	1.2×10^{-3}	[57]	
	AC-CNP	605nm	1.50%	4.2×10^{-3}	[57]		

参 考 文 献:

- [1] HONG G, GAN X, LEONHARDT C, *et al.* A brief history of OLEDs-emitter development and industry milestones [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(9): e2005630.
- [2] O'BRIEN B. OLED's advantages provide alternative applications [J]. *Inf. Disp.*, 2024, 40(6): 15-19.
- [3] KIM B C, LIM Y J, SONG J H, *et al.* Wideband antireflective circular polarizer exhibiting a perfect dark state in organic light-emitting-diode display [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(S7): A1725-A1730.
- [4] HAN J, GUO S, LU H, *et al.* Recent progress on circularly polarized luminescent materials for organic optoelectronic devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(17): 1800538.
- [5] ZHANG D-W, LI M, CHEN C-F. Recent advances in circularly polarized electroluminescence based on organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49(5): 1331-1343.

- [6] FRÉDÉRIC L, DESMARCHÉLIER A, FAVEREAU L, PIETERS G. Designs and applications of circularly polarized thermally activated delayed fluorescence molecules [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(20): 2010281.
- [7] BI R, LIU Y, ZHANG X, *et al.* Recent advances in 3D printed smart chiral liquid crystals [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Dis.*, 2025, 40(1): 55-74.
- [8] 张友明, 邓益佳, 王练, *et al.* 基于四齿铂配位构型的圆偏振发光材料构筑及其深红光/近红外电致发光研究 [J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2036-2045.
- [9] ZHANG R, GAO J, LI N, *et al.* Circularly polarized organic light-emitting diode based on device functional layer materials [J]. *Small*, 2025, 21(8): 2409541.
- [10] SANG Y, HAN J, ZHAO T, *et al.* Circularly polarized luminescence in nanoassemblies: generation, amplification, and application [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 32(41): 1900110.
- [11] WU X, YAN X, CHEN Y, *et al.* Advances in organic materials for chiral luminescence-based OLEDs [J]. *Trends Chem.*, 2023, 5(10): 734-747.
- [12] ZHAO W-L, LI M, LU H-Y, CHEN C-F. Advances in helicene derivatives with circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(92): 13793-13803.
- [13] MORENO-NARANJO J M, FURLAN F, WANG J, *et al.* Enhancing circularly polarized electroluminescence through energy transfer within a chiral polymer host [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(33): 2402194.
- [14] GUO C H, FENG L, CHEN C F, LI M. White circularly polarized OLEDs enabled by orthogonal engineering of achiral thermally activated delayed fluorescence emitters and chiral assemblies [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2025, 64(41): e202516018.
- [15] GAO H, CHEN P-G, LO T W, *et al.* Selective excitation of polarization-steered chiral photoluminescence in single plasmonic nanohelicoids [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(30): 2101502.
- [16] WU X, NI S, WANG C-H, *et al.* Comprehensive review on the structural diversity and versatility of multi-resonance fluorescence emitters: advance, challenges, and prospects toward OLEDs [J]. *Chem. Rev.*, 2025, 125(14): 6685-6752.
- [17] PEETERS E, CHRISTIAANS M P T, JANSSEN R A J, *et al.* Circularly polarized electroluminescence from a polymer light-emitting diode [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1997, 119(41): 9909-9910.
- [18] WU X, HUANG J W, SU B K, *et al.* Fabrication of circularly polarized MR-TADF emitters with asymmetrical peripheral-lock enhancing helical B/N-doped nanographenes [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(1): e2105080.
- [19] YAN Z P, YUAN L, ZHANG Y, *et al.* A chiral dual-core organoboron structure realizes dual-channel enhanced ultra-pure blue emission and highly efficient circularly polarized electroluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(36): 2204253.
- [20] LIN F, ZHANG X, ZHAO J, *et al.* BODIPY-anthracene-binaphthyl compounds display aging-driven narrow-band circularly polarized luminescence enhancement with light-activated AIE-to-ACQ transformation [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2025, 65(2): e15768.
- [21] FURLAN F, ŠÁMAL M, RYBÁČEK J, *et al.* Electrical control of photon spin angular momentum in organic electroluminescent materials [J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(12): 1361-1366.
- [22] CHENG H, GUO C-H, LI M, *et al.* Facile access to spirobifluorene-fused chiral multi-resonance materials with ultra-narrowband blue emission [J]. *Science Bulletin*, 2025, 70(4): 529-535.
- [23] ZHUANG W, HUNG F F, CHE C M, LIU J. Nonalternant B,N-embedded helical nanographenes containing azepines: programmable synthesis, responsive chiroptical properties and spontaneous resolution into a single-handed helix [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2024, 63(42): e202406497.
- [24] ZHONG H, GAO X, ZHAO B, DENG J. "Matching Rule" for generation, modulation and amplification of circularly polarized luminescence [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2024, 57(8): 1188-1201.
- [25] ZHAO P, GUO W C, LI M, *et al.* Single-molecule white circularly polarized photoluminescence and electroluminescence from dual-emission enantiomers [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2024, 63(36): e202409020.
- [26] YUAN L, ZHANG Y-P, ZHENG Y-X. Chiral thermally activated delayed fluorescence materials for circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *Sci. China Chem.*, 2024, 67(4): 1097-1116.
- [27] HONG J, KIM S, PARK G, *et al.* Chiral polymer hosts for circularly polarized electroluminescence devices [J]. *Chem. Sci.*, 2021, 12(25): 8668-8681.

- [28] DONG Q, XIAO C, HE B, *et al.* Binaphthol-based chiral host molecules for efficient solution-processed circularly polarized OLEDs [J]. *Chem. Commun.*, 2023, 59(11): 1473-1476.
- [29] DONG Q, HE B, QIAO W, *et al.* A chiral bipolar host for efficient solution-processed circularly polarized OLEDs via a chirality energy transfer process [J]. *Chem. Commun.*, 2024, 60(25): 3421-3424.
- [30] CHEN Z, ZHONG C, HAN J, *et al.* High-performance circularly polarized electroluminescence with simultaneous narrowband emission, high efficiency, and large dissymmetry factor [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(17): e2109147.
- [31] GU Q, CHEN Z, XIE W, *et al.* Chiral exciplex acceptor enables circularly polarized electroluminescence with high dissymmetry factor close to 10^{-2} [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(23): 2201793.
- [32] CHEN Z, HUANG M, ZHONG C, *et al.* Cascade chirality transfer through diastereomeric interaction enables efficient circularly polarized electroluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(21): 2215179.
- [33] YASHIMA E, OUSAKA N, TAURA D, *et al.* Supramolecular helical systems: helical assemblies of small molecules, foldamers, and polymers with chiral amplification and their functions [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(22): 13752-13990.
- [34] ZHANG L, WANG H X, LI S, LIU M. Supramolecular chiroptical switches [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49(24): 9095-9120.
- [35] ZHANG Y, YU W, LI H, *et al.* Induced CPL-active materials based on chiral supramolecular co-assemblies [J]. *Chem.*, 2023, 29(22): e202204039.
- [36] WANG Y, NIU D, OUYANG G, LIU M. Double helical pi-aggregate nanoarchitectonics for amplified circularly polarized luminescence [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 1710.
- [37] MA M, WANG B, HAO A, XING P. Efficient chirality transfer from chiral amines to oligo(p-phenylenevinylene)s to fabricate chiroptical materials [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(22): 8163-8171.
- [38] GENG Z, ZHANG Y, 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.
- [39] ZHANG Y, LI D, LI Q, *et al.* High Comprehensive Circularly Polarized Electroluminescence Performance Improved by Chiral Coassembled Host Materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(44): 2309133.
- [40] WANG J Y, SI Y, LUO X M, *et al.* Stepwise amplification of circularly polarized luminescence in chiral metal cluster ensembles [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(13): e2207660.
- [41] ZHAO T, MENG D, HU Z, *et al.* Enhanced chiroptic properties of nanocomposites of achiral plasmonic nanoparticles decorated with chiral dye-loaded micelles [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 81.
- [42] SHANG W, ZHU X, JIANG Y, *et al.* Self-assembly of macrocyclic triangles into helicity-opposite nanotwists by competitive planar over point chirality [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2022, 61(41): e202210604.
- [43] KHANRA P, SINGH A K, ROY L, DAS A. Pathway complexity in supramolecular copolymerization and blocky star copolymers by a hetero-seeding effect [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(9): 5270-5284.
- [44] CHENG X, MIAO T, ZHANG G, *et al.* Switchable phase helicity independent of the absolute configuration of the stereocenter: anomalous induction between sergeants and soldiers in chiral liquid-crystalline polymers [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(30): 16474-16487.
- [45] YANG Y, COSTA R C D A, SMILGIES D M, *et al.* Induction of circularly polarized electroluminescence from an achiral light-emitting polymer via a chiral small-molecule dopant [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(18): 2624-2628.
- [46] GENG Z, ZHANG Y, ZHANG Y, *et al.* Amplified circularly polarized electroluminescence behavior triggered by helical nanofibers from chiral co-assembly polymers [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2022, 61(23): e202202718.
- [47] GENG Z, LIU Z, LI H, *et al.* Inverted and amplified CP-EL behavior promoted by aie-active chiral co-assembled helical nanofibers [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(8): e2209495.
- [48] ZHANG Y, LI Y, QUAN Y, *et al.* Remarkable white circularly polarized electroluminescence based on chiral co-assembled helix nanofiber emitters [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2023, 62(1): e202214424.
- [49] YU Z X, CHEN X W, CHEN C F, LI M. Chiral nematic liquid crystal films for high-performance circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2025, 64(47): e202517906.
- [50] CHOWDHURY R, PREUSS M D, CHO H-H, *et al.* Circularly polarized electroluminescence from chiral supramolecular semiconductor thin films [J]. *Science*, 2025, 387(6739): 1175-1181.
- [51] ZHANG D, DUAN L, LI C, *et al.* High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using sensitizing hosts with a

- small singlet-triplet exchange energy [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(29): 5050-5055.
- [52] XU L, LIU H, PENG X, *et al.* Efficient circularly polarized electroluminescence from achiral luminescent materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2023, 62(20): e202300492.
- [53] XU L, LI Y, LIU H, *et al.* Efficient chiral ultraviolet and deep-blue materials for high-performance circularly polarized OLEDs [J]. *Aggregate*, 2025, 7(1): e70240.
- [54] CHEN L, ZOU P, CHEN J, *et al.* Hyperfluorescence circularly polarized OLEDs consisting of chiral TADF sensitizers and achiral multi-resonance emitters [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 1656.
- [55] ZHONG X S, YUAN L, LIAO X J, *et al.* Circularly polarized organic light-emitting diodes based on chiral hole transport enantiomers [J]. *Adv. Mater.*, 2024: e2311857.
- [56] WANG Y, XU J, WANG X, *et al.* Chiral dicarbazole-ditriarylamine hole transport materials for circularly polarized electroluminescence [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2025, 13(27): 13978-13985.
- [57] HUO P, YANG T, FANG P, *et al.* Chiral electron transporting material for circularly polarized organic light-emitting diode [J]. *Sci. China Chem.*, 2024, 67(11): 3777-3784.
- [58] CHEN J, SU Z H, LIU D, *et al.* Intrinsically spin-flip-induced circularly polarized electroluminescence: a strategy spanning deep blue to deep red with achiral MR and perovskite emitters [J]. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2026: e2767710.



孙静(1983-),女,山东济南人,硕士,实验师,2012年于潍坊医学院获得硕士学位,主要从事纳米功能材料及其器件的研究。

E-mail: sunjing@cczu.edu.cn



吴秀刚(1981-),男,山东临沂人,博士,教授,2020年于常州大学获得博士学位,主要从事有机发光材料及其器件的研究。

E-mail: xgwu16@cczu.edu.cn