

文章编号: 1000-7032(2026)09-1638-16

手性 BODIPY 圆偏振发光材料: 分子设计及其应用

孟岩恒, 原焱焱, 薛雨婷, 陈磅宽*

(北京理工大学 化学与化工学院, 北京 102488)

摘要: 圆偏振发光(CPL)材料能够携带光的旋光性信息,在光电信息、生物医药及防伪材料等领域具有广阔的应用前景,其发光不对称因子(g_{lum})与量子产率的协同优化是实现高性能圆偏振发光的关键。在众多 CPL 分子中,手性硼二吡咯亚甲基(BODIPY)分子因其结构多样性、可调控的发光特性及高发光效率而备受关注。本文综述了具有 CPL 活性的手性 BODIPY 发光材料在设计、合成及光物理性质方面的最新进展,及其在生物成像与光电材料领域的研究,以期对手性发光材料的功能化设计与应用提供参考。

关键词: 圆偏振发光; 手性 BODIPY; 生物成像; 光电材料

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260128

CSTR: 32170.14.CJL.20260128

Chiral BODIPY Circularly Polarized Luminescence Materials:
Molecular Design and Applications

MENG Yanheng, YUAN Yanyan, XUE Yuting, CHEN Pangkuan*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

* Corresponding Author, E-mail: pangkuan@bit.edu.cn

Abstract: Circularly polarized luminescence (CPL) materials encode chiral optical information, showing promise for optoelectronics, biomedicine, and anti-counterfeiting. Achieving high-performance CPL requires concurrent optimization of the dissymmetry factor (g_{lum}) and quantum yield. Chiral boron dipyrromethene (BODIPY) derivatives have emerged as attractive candidates due to their structural versatility, tunable emission, and high brightness. This review summarizes recent advances in the design, synthesis, and photophysical properties of CPL-active chiral BODIPYs, alongside their applications in bioimaging and optoelectronic materials. This work aims to guide the functional design of chiral luminescent systems.

Keywords: circularly polarized luminescence; chiral BODIPY; bioimaging; optoelectronic materials

1 引言

手性是指物体或分子与其镜像不重叠的几何性质,是自然界中普遍存在的基本属性^[1-3]。在光学领域,当手性物质与光相互作用时,能够产生圆二色性(CD)与圆偏振发光(CPL)等光学现象^[4]。其中,CPL材料因其发射光具有特定的左旋或右

旋偏振特性,在三维立体显示、信息加密存储、手性传感识别及生物成像等领域展现出独特的应用潜力^[5-9]。评价 CPL 材料性能需综合考量发光不对称因子(g_{lum})与荧光量子产率(Φ_F)^[10-11]。 g_{lum} 反映发射过程的手性不对称程度,公式为 $g_{lum} = 2\Delta I/I = 2(I_L - I_R)/(I_L + I_R)$,该数值表示左旋与右旋圆偏振发射强度之间的相对差异。除实验定义外, g_{lum} 的

收稿日期: 2026-04-08; 修订日期: 2026-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(22271013,22471014); 中央高校基本科研业务费专项资金(2025CX11028)

Supported by National Natural Science Foundation of China(22271013,22471014); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2025CX11028)

理论描述可表示为 $g_{lum}=4(|\mu_e||\mu_m|\cos\theta_{e,m})/(|\mu_e|^2+|\mu_m|^2)$, 其中 $|\mu_e|$ 、 $|\mu_m|$ 和 $\theta_{e,m}$ 分别表示电跃迁偶极矩、磁跃迁偶极矩以及向量 μ_e 与 μ_m 之间的夹角^[12]。

Φ_F 反映荧光发射效率, 决定材料的光子输出能力, 二者协同定义了 CPL 亮度。图 1 展示了 CD 与 CPL 之间的基本区别示意图^[13]。

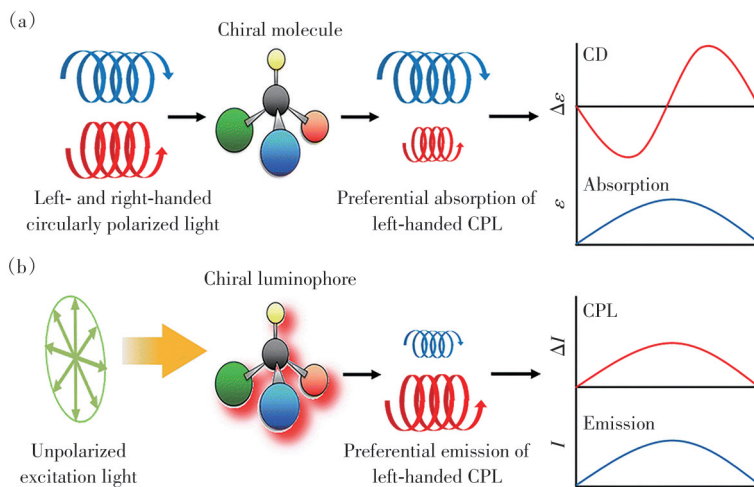


图 1 手性分子(a)圆二色性(CD)与(b)圆偏振发光(CPL)示意图^[13]

Fig.1 Schematic illustration of (a) circular dichroism (CD) and (b) circularly polarized luminescence (CPL) of chiral molecules^[13]

为实现高效率的圆偏振发光, 研究者们已开发出多种手性材料体系, 包括手性金属配合物^[14]、手性液晶、手性聚合物以及手性有机分子等^[15-19]。其中, 手性有机分子材料因其独特的优势而备受关注^[20]。相较于这些手性材料, 有机分子通常具有更低的生产成本、更低的生物毒性以及更灵活的分子设计空间, 且有机小分子结构明确、易于纯化、光物理性质可预测性强, 有利于系统研究分子结构与 CPL 性能之间的构效关系^[21-22]。因此, 设计合成新型的手性有机发光分子, 成为研究 CPL 材料性能的理想平台^[23]。

在众多有机 CPL 材料的研究中, 四配位硼配合物因其独特的光物理性质受到广泛关注。硼原子具有缺电子特性, 与合适配体配位时形成 sp^3 杂化的四配位构型, 构成四面体的几何构型, 从而开发出具有强荧光特性的四配位配合物^[24-25]。其中, 硼二吡咯亚甲基(BODIPY)分子已被公认为适用于 CPL 的发光硼化合物^[26-27]。该类分子具有刚性共轭四面体结构, 通常表现出高摩尔消光系数、高荧光量子产率及良好的光化学稳定性^[28-29]。同时, 其分子骨架可进行模块化修饰, 通过吡咯位、meso 位及硼中心的化学衍生, 能够实现吸收与发射波长的宽范围调控, 覆盖可见光至近红外区域^[30-32]。这些特性使 BODIPY 分子成为构建高性能 CPL 材料的理想候选体系。

基于上述研究背景, 本文对近年来手性 BODIPY 发光材料在分子设计与圆偏振发光应用方面所取得的进展进行了综述。针对当前手性 BODIPY 分子在高效 CPL 发光存在的问题, 如高发光不对称因子(g_{lum})与高量子产率难以兼顾、长波长近红外 CPL 材料匮乏以致生物组织穿透深度受限、超分子组装体系的手性稳定性不足, 以及硼中心手性 BODIPY 的催化不对称合成方法尚待丰富等, 进行了深入剖析与探讨, 并对其结构理性设计、性能协同优化及生物医学应用拓展等未来发展方向予以展望, 旨在为相关领域的研究提供新颖思路与参考依据。

2 手性 BODIPY 分子的构建策略

手性 BODIPY 分子的构建是实现其圆偏振发光性能的基础与核心。在分子设计层面, 通过精准的手性引入策略, 不仅能够赋予 BODIPY 固有的手性光学活性, 还可调控其激发态行为与组装特性, 为高性能 CPL 材料的开发提供结构保障^[33-37]。在合成方法层面, 从早期的手性拆分与手性源诱导^[38-47], 到近年来的不对称催化与超分子工程^[48-53], 手性 BODIPY 的构建手段日趋丰富与高效。一方面, 共价修饰策略通过在特定位点引入手性取代基, 实现分子内手性中心的直接调控与光谱性质的系统优化^[54-55]; 另一方面, 超分子组装

策略借助非共价相互作用,诱导BODIPY分子形成手性聚集结构,通过激子耦合效应显著放大手性信号^[56-58]。以下分别阐述这两类策略的最新进展。

2.1 共价手性策略

硼二吡咯亚甲基(BODIPY)分子作为经典荧光团,因其卓越的光学特性(包括高摩尔吸光系数、强荧光发射及窄吸收发射带)而备受关注^[59-62]。对BODIPY核心进行手性修饰已成为激发CPL活性的有前景策略^[63-67]。而BODIPY-蒽-联萘三元体系则展示了老化驱动的窄带圆偏振发光增强机制,Lin等^[68]通过分子内手性传递与聚集态演变实现CPL性能的动态调控,所得R/S-An-BDP在光触

发下呈现从聚集诱导发光(AIE)到聚集诱导猝灭(ACQ)的转变,并伴随CPL信号调控(图2(a))。该手性分子R/S-An-BDP整合蒽单元作为强组装模块,BODIPY核心作为窄带荧光团,手性联萘作为手性源,在聚集态表现出明显的AIE特性,其半峰宽达到14 nm,并具有老化诱导的荧光增强现象。值得注意的是,随着自组装过程的演变,R/S-An-BDP展现出老化驱动的圆偏振发光增强,不对称因子 g_{lum} 达到 4.8×10^{-2} 。该策略无需复杂的外场干预,可以通过简单的光激活和时间演化实现圆偏振发光的动态增强,为时间依赖的手性光学材料、信息加密和智能响应探针提供了新颖的方法。

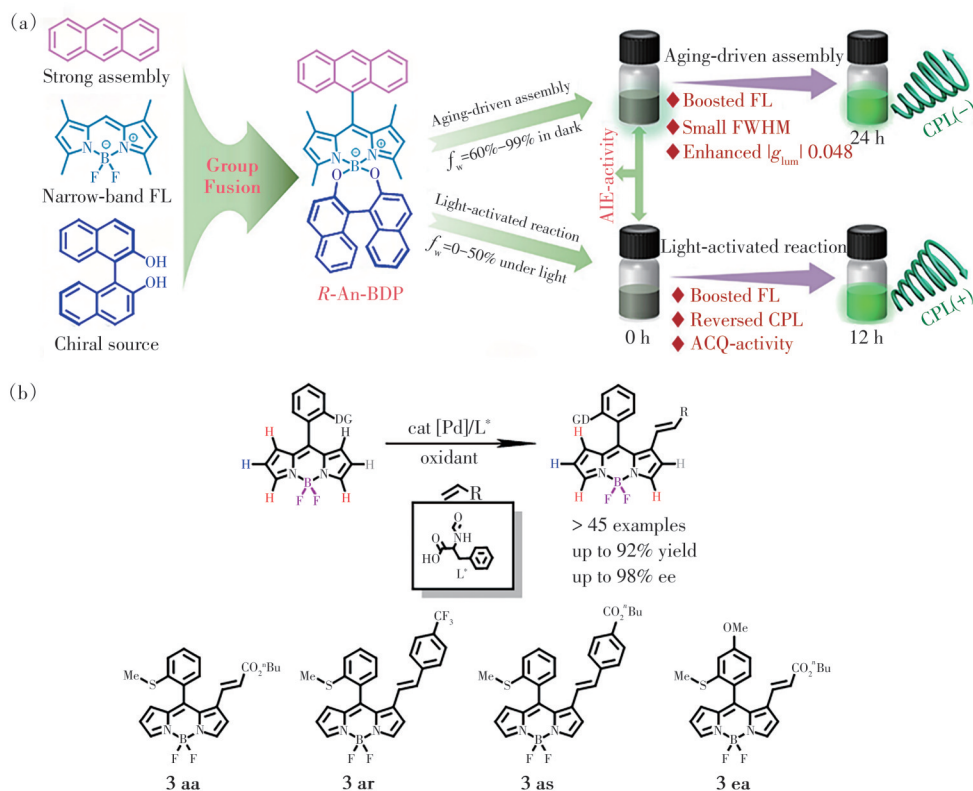


图2 (a)R-An-BDP分子结构示意图、设计策略及组装流程^[68]; (b)分子合成策略

Fig.2 (a) Molecular structure, design strategy, and assembly process of the R-An-BDP molecule^[68]. (b) Synthetic strategy of the molecule

碳中心手性主要通过在手性BODIPY的吡咯位(2,6位)或meso位(8位)引入手性取代基实现。近期,该方向在不对称催化合成和手性光学性能调控方面取得了进展。Yang等^[69]提出了钯催化 γ -C—H键烯基化的去对称化策略,通过远程C—H活化实现轴手性BODIPYs的精准构筑,合成了一系列具有近红外发射和圆偏振发光性能的轴手性分子,并进一步探究其在生物学环境中的适用性(图2(b))。具体而言,利用钯/手性氨基酸配体体系

对 γ -C—H键的高效活化能力(覆盖多种芳基取代模式),采用温和反应条件选择性实现C—H烯基化,避免了传统手性诱导策略对预安装手性源的依赖及立体选择性控制难题。通过引入硫醚导向基精准定位活化位点,结合手性配体调控过渡态构型,实现了轴手性的高效建立与E/Z选择性控制。该策略无需预先引入手性单元,可以通过催化剂控制实现轴手性BODIPYs的不对称合成,为手性荧光分子的多样化构筑提供了灵活的方法学平台。

与碳中心手性不同,硼中心手性将立体中心构建于BODIPY骨架的硼原子上,使手性中心与共轭体系直接相连,有望实现更强的手性光学响应^[70]。然而,硼中心手性BODIPYs的催化不对称合成面临着挑战,由于四配位硼中心的构型稳定性较低,且缺乏有效的立体控制手段,长期以来仅能通过手性拆分获得个别案例^[71-72]。近年来,这一难题取得了新的进展,多个研究团队通过不同的策略共同为硼手性BODIPYs的合成开辟了新路径。Zu等^[73]报道了一种钯催化方案,通过不对称分子内C—H芳基化反应实现硼立体BODIPYs的对映选择性合成。该方法可制备多种高度功能化硼立体BODIPYs,对映选择性良好。通过手性催化剂空腔中空间位阻效应与吸引力相互作用的协同作用,实现了对BODIPY核心中两个 α C—H键的精准区分,如图3(a)。具体而言,利用BODIPYs双吡咯环的电子离域特性,筛选出具有大位阻区域和有效活性中心的配体结构,通过氧化加成步骤的手性控制,

实现了从六元环到九元环的系列硼手性BODIPYs的高效构筑。基于上述策略优势,该团队制备的硼手性探针在手性二胺对映体识别中展现出良好的手性区分能力,为手性传感应用提供了新工具。之后,Ren等^[74]进一步发展了模块化对映选择性组装策略,以Pd/磷酸胺配体催化的去对称化Suzuki交叉偶联为基础,可以有效区分前手性BODIPY骨架的两个 α C—Cl键,实现了C3、C8、B4三个位点的高效多样化修饰(图3(b))。该策略从单一前手性核心出发,兼容芳基、烯基、炔基、烷基等获得系列多取代硼手性BODIPY。值得注意的是,所得5-氯硼手性BODIPY可经Heck、Suzuki、Sonogashira偶联及SNAr反应进行立体专一性后功能化,手性保持不流失,进一步拓展结构多样性。光物理研究表明,该类染料发射波长覆盖529~705 nm,其中含苕基取代基的化合物表现出良好的CD和CPL活性。此外,基于 α C—Cl键的硫醇-氯亲核取代反应,实现了对D/L-半胱氨酸甲酯的荧光识别。

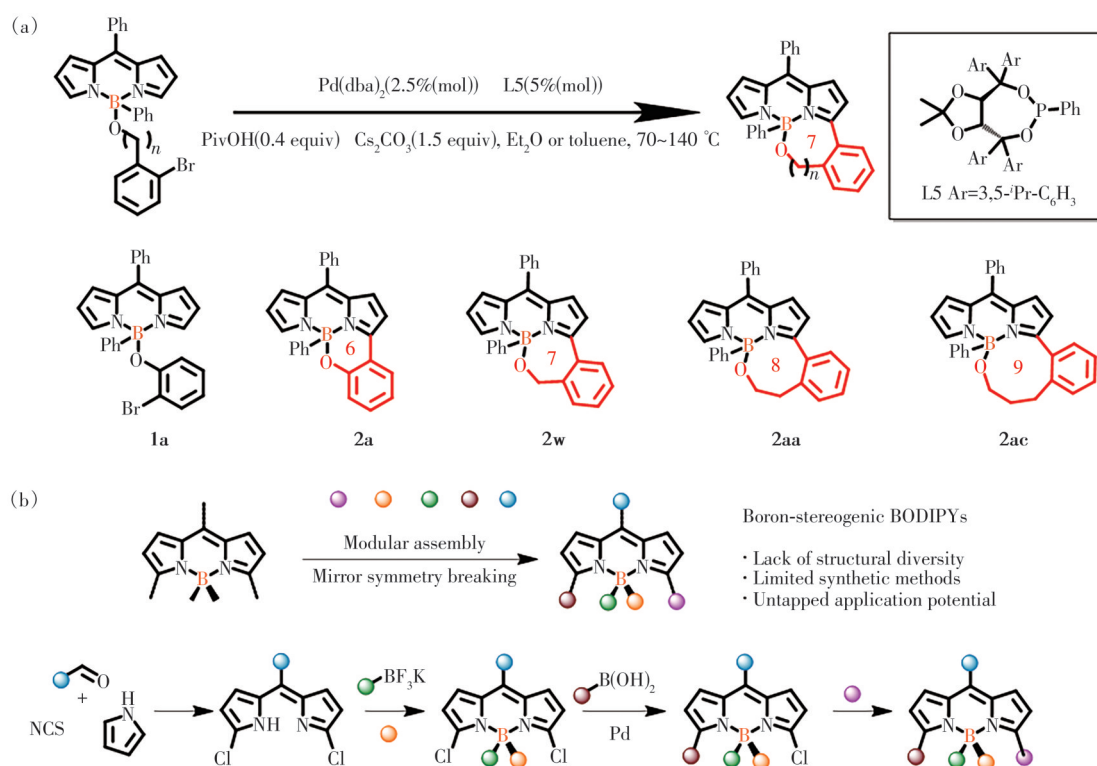


图3 (a)分子组装策略;(b)多种硼立体构型BODIPY的模块化对映选择性组装

Fig.3 (a)Molecular assembly strategy. (b)Modular enantioselective assembly of multiply boron-stereogenic BODIPYs

尽管过渡金属催化为硼立体中心的高效构筑提供了有力工具,但手性中心与BODIPY共轭体系的直接连接方式仍有待拓展。Fukami等^[75]发展了一种分子内B,O螯合策略,通过刚性环化锁定硼中心四面体构型,实现了手性中心与 π -共轭体

系的耦合,为调控手性光学响应提供了新途径(图4(a))。该研究以钛介导的氮杂BODIPY合成为基础,利用带有邻茴香基(*o*-anisyl)取代基的二酮吡咯并吡咯(DPP)前体,通过一锅法醚键断裂及所得亲核氧原子和硼原子的螯合作用,构建了B,O

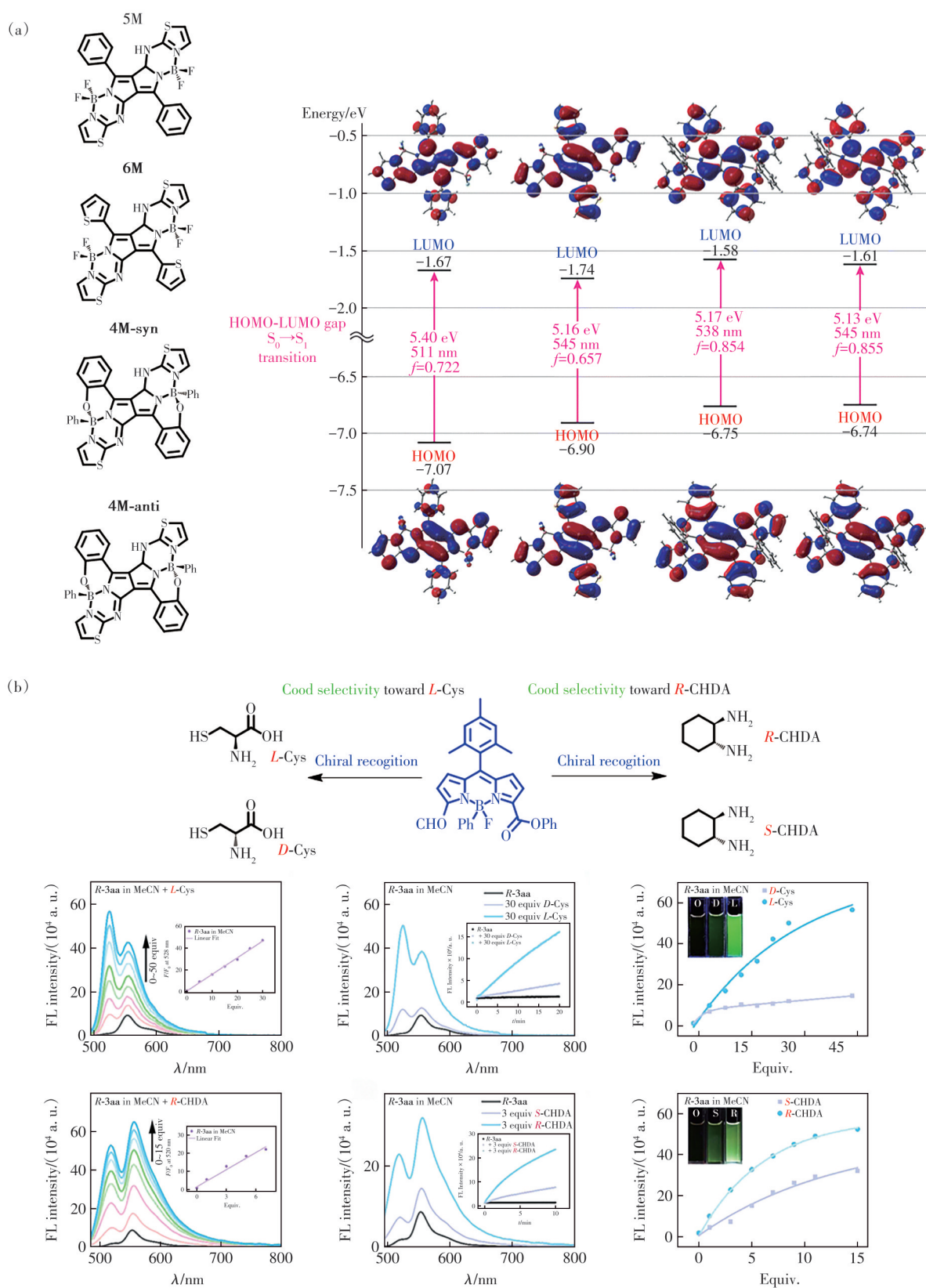


图 4 (a) 计算绘制的 4M 反式、4M 顺式、5M 及 6M 分子前线分子轨道图以及对应的 HOMO-LUMO 能隙及 S_0 至 S_1 跃迁能级^[75]; (b) 半胱氨酸与二氨基环己烷对映异构体的对映选择性识别^[76]

Fig. 4 (a) To calculate and draw the frontier molecular orbital diagrams of the 4M *trans*, 4M *cis*, 5M, and 6M molecules, as well as the corresponding HOMO-LUMO gaps and S_0 to S_1 transition energies^[75]. (b) Enantioselective recognition of cysteine and diaminocyclohexane enantiomers^[76]

螯合吡咯并吡咯氮杂BODIPY骨架。X射线晶体学分析证实,硼原子的螯合环将硼中心锁定于刚性手性环境中,形成稳定的立体构型。值得注意的是,这种螯合诱导的电子效应改变了分子的光物理性质。相较于非螯合类似物,B,O螯合后光谱出现红移(>650 nm),同时赋予分子圆二色性(CD)和圆偏振发光(CPL)信号,为设计远红/近红外手性荧光染料提供了新思路。随着硼立体中心构筑方法的不断发展,如何实现无金属残留的高效合成并保留后续修饰位点,成为推动手性BODIPY生物应用的关键。Ma等^[76]报道了一种N-杂环卡宾(NHC)催化的不对称酯化策略,在实现硼立体中心高效构筑的同时,保留活性甲酰基手柄,为后续衍生化与生物应用提供了可能(图4(b))。该研究以甲酰基功能化BODIPY为底物,利用NHC催化剂与醛基的可逆共价结合,诱导产生手性环境,通过动态动力学拆分机制实现分子内酯化反应的对映选择性控制。这一有机催化方案避免了过渡金属残留,生物相容性提升。值得注意的是,反应保留了甲酰基官能团,该基团既可以作为手性识别位点,也可作为分子手柄进行后续修饰。基于上述优势,作者将制备的硼立体甲酰基BODIPY应用于手性二胺和氨基酸的对映体识别,为开发新型手性荧光探针提供了新的机遇。

共价键策略通过精确的手性单元引入与催化不对称合成,实现了BODIPY从结构构建到功能集成的转变。无论是轴手性联萘的光激活响应、硼立体中心的催化构筑,还是B,O-螯合的光谱调控与有机催化的功能化保留,均体现了该策略在手性控制精度与性能调控维度上的独特优势,为手性光学材料的设计提供了坚实的化学基础。

2.2 超分子手性策略

超分子手性策略通过非共价相互作用实现BODIPY分子的手性组装,具有动态可逆、易于调控的优势,避免了共价修饰对分子电子结构的不可逆改变。与共价键策略相比,超分子方法的核心特征在于手性信息的动态传递与放大,手性来源可以是外部模板、溶剂环境或分子间相互作用,通过空间有序排列将手性从分子尺度传递至聚集体尺度,进而产生显著的圆二色性与圆偏振发光响应^[77-79]。通过手性模板实现手性转移,在非手性荧光团中诱导圆二色性(CD)的超分子方法,通过独立调控荧光分子的发射特性与模板的手性,拓

展了结构与性质分析的范围。

Show等^[80]研究者报道了一种肽诱导的卤键手性转移策略,实现了非手性BODIPY发射体的超分子手性组装与圆偏振发光(图5(a))。该体系以非手性碘代BODIPY为发光核心,通过手性二肽的卤键识别诱导其形成手性组装体。具体而言,BODIPY骨架上的碘原子作为卤键供体,与肽链中的卤键受体形成定向非共价相互作用,将肽的手性信息传递至BODIPY聚集体,产生圆二色性信号与CPL发射。该策略无需对BODIPY进行共价修饰,而是通过外部手性肽的替换即可调控手性光学性能,展现了超分子策略的模块化与可调控性。然而,卤键相对较弱,这限制了组装体的稳定性,且CPL发光不对称因子仍有提升空间。相比之下,通过分子工程设计的自组装策略可实现更精准的结构控制与更优异的手性光学性能。Pan等^[81]合成了一种带有两个手性疏水侧链的两亲性硼-氮二吡咯甲基(aza-BODIPY),在分子骨架中引入手性谷氨酰胺侧链与长烷基链,利用 π - π 堆积与氢键的协同驱动作用,通过动力学路径控制自组装形成螺旋J-聚集体。该体系展现近红外吸收与发射(>700 nm),并成功实现近红外圆偏振发光($g_{lum} = -4.7 \times 10^{-2}$),如图5(b)。值得注意的是,该研究系统阐明了J-聚集的动力学路径依赖性,热力学路径形成H-聚集体(无CPL),而动力学路径形成手性J-聚集体(强CPL),为超分子手性的可控构筑提供了新思路。

上述研究表明,超分子策略为BODIPY手性体系的构建提供了灵活且动态可控的化学工具。从肽诱导的卤键手性转移到分子工程驱动的J-聚集自组装,两种策略展现了超分子手性调控的不同维度。值得注意的是,超分子体系的动态可逆性既是其优势所在,也带来了稳定性挑战,卤键的相对弱相互作用限制了组装体的持久性,而J-聚集的动力学路径依赖性要求精准的实验条件控制。

2.3 手性源类型与CPL性能的构效关系

手性BODIPY的CPL性能来自于手性源对电偶极矩与磁偶极矩夹角的调控能力。基于现有研究(表1),可从手性源类型与聚集态行为两个维度梳理其构效规律。轴手性、中心手性与硼手性在电子结构层面具有差异性。轴手性依赖刚性螺旋骨架传递手性, g_{lum} 多在 10^{-3} ~ 10^{-2} 量级,但其与BODIPY平面的二面角若偏离最优值,反而会降低 g_{lum} 。中心手性通过柔性链连接时,构象自由

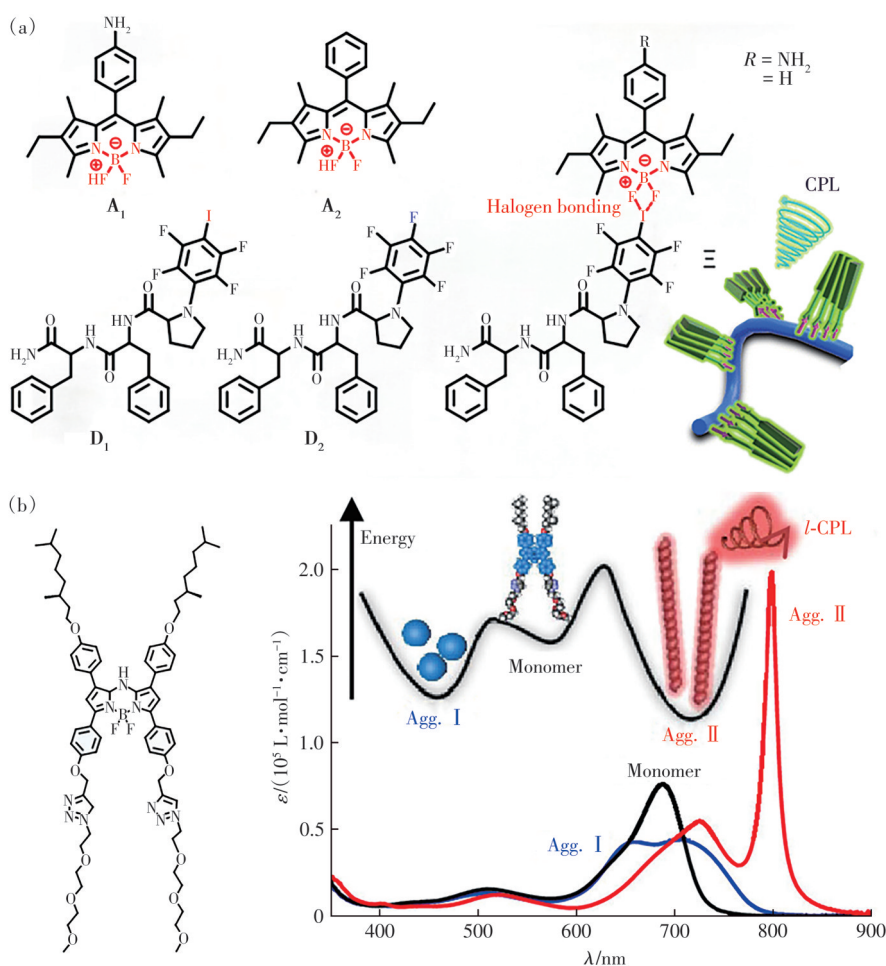


图5 (a) 胺类化合物(D1与D2)及非手性BODIPYs(A1与A2)的化学结构,以及通过卤键作用在其共组装体(D1-A1与D1-A2)中诱导CPL的现象^[80]; (b) aza-BODIPY分子及其超分子手性组装特性示意图^[81]

Fig. 5 (a) Chemical structures of peptides (D1 and D2) and achiral BODIPYs (A1 and A2) and CPL induction in their co-assemblies (D1-A1 and D1-A2) by halogen bonding^[80]. (b) Schematic illustration of aza-BODIPY molecules and their supramolecular chiral assembly properties^[81]

度大、手性传递效率低, 单体 g_{lum} 通常不高。硼手性因手性中心直接位于发光核内, 四配位硼的几何约束有效抑制构象异构化, 从而具有优异的 g_{lum} , 展现出三类手性源中最优的手性光学性能。

表1 手性BODIPY分子的光学性质

Tab. 1 Optical properties of the chiral BODIPY

	$\lambda_{\text{abs}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{em}}/\text{nm}$	$\Phi_{\text{PL}}/\%$	$ g_{\text{lum}} /10^{-2}$
R/S-An-BDP ^[68]	246, 276, 506	545		4. 8
3 ao ^[69]	529	605	42. 7	1. 2
2 aa ^[73]	524	551	48. 8	
4-anti, 4-syn ^[75]	689, 683	696, 690	0. 35, 0. 45	
3 aa ^[76]	541	555	0. 02	0. 020 6
D ₁ -A ₁ ^[80]	563	580	0. 36	1. 2
(R)-1 ^[81]	725	804	0. 31	4. 7

而分子刚性是保障高 g_{lum} 的关键。相对来说, 硼手性 BODIPY 因结构锁定效应, 溶液态即可表现高 g_{lum} , 中心手性 BODIPY 通常需借助刚性桥

连或超分子组装限制构象自由度。聚集态对 CPL 具有双重调控, J-聚集体中跃迁偶极矩同向耦合, 可增强磁偶极矩分量并提升 g_{lum} , 同时保持较高量子产率; H-聚集体虽可能产生较大 g_{lum} , 但通常伴随荧光猝灭。超分子组装可将低 g_{lum} 单体 ($< 10^{-3}$) 放大 1~2 个数量级, 但对本身具有高 g_{lum} 的砌手性体系, 放大效应有限。

3 手性 BODIPY 分子在生物成像和光电材料方面的应用

圆偏振发光(CPL)是手性发光体系在激发态的独特光学特征,反映了材料在激发态下的手性结构信息。相较于基态的圆二色性(CD)信号,CPL关联于发光过程,具有更高的检测灵敏度和更丰富的结构信息,在手性识别、生物传

感、信息加密及光电器件等领域展现出广阔的应用前景。手性BODIPY凭借其优异的光化学稳定性、高的荧光量子产率、可调的发射波长以及可控的手性结构,已成为CPL材料研究的重要平台。随着手性BODIPY分子构筑策略的不断丰富与超分子组装技术的进步,其CPL性能已实现从可见光到近红外区的全光谱覆盖,其应用领域也从基础研究拓展至生物成像与光电功能材料^[82-84]。

增大Stokes位移是抑制生物成像背景干扰的有效策略。在手性BODIPY体系中,可通过以下三种途径实现。构建分子内电荷转移(ICT)结构,在meso位或3,5位引入给电子基团,同时在硼中心修饰吸电子基团,利用ICT态降低激发态能级;硼中心配位调控,强配位场基团可增大骨架平面畸变,促进激发态结构重组,模块化合成便于进一步衍生化引入ICT基团;J-聚集诱导红移,手性模板诱导下BODIPY分子堆积形成J-聚集体,发射峰红移且半峰宽较窄,Stokes位移可有效增大。需指出的是,ICT引入可能降低分子刚性,对 g_{lum} 产生负面影响,需在Stokes位移与手性性能之间寻求平衡。

Ray等^[85]通过 BCl_3 活化策略发展了硼立体中心N-BODIPY体系,为CPL发光材料的设计提供了新思路。该研究利用 BCl_3 对氮杂BODIPY的活化作用,实现了硼中心的不对称修饰,构建了具有不同取代基的硼立体中心N-BODIPY(图6)。值得注意的是,通过调控硼中心取代基的电子性质

与空间位阻,成功实现了从光捕获多色阵列到CPL发光材料的性能切换。具体而言,对称修饰的N-BODIPY表现出优异的光捕获能力与能量传递效率,而不对称修饰的硼立体中心衍生物则展现出显著的圆偏振发光特性,发光不对称因子 g_{lum} 可达 10^{-3} 。该研究以合成的手性BODIPY分子NBDP-4为荧光探针,成功实现了在小鼠胚胎成纤维细胞(MEFs)中的溶酶体特异性靶向,该探针与商用LysoTracker™ Red成像一致,证明了硼立体中心BODIPY在活细胞中的靶向能力与成像稳定性。尽管该工作未直接实现CPL成像,但其建立的硼立体中心构筑策略与溶酶体靶向方法,为后续CPL显微镜探针的开发提供了关键材料基础。在Ray等的研究基础上,Stachelek等^[86]首次将手性BODIPY应用于活细胞CPL成像,建立了小分子全有机CPL探针的显微成像技术平台。该研究以手性BODIPY分子(BINOL-O-BODIPY)为模型骨架,通过圆偏振发光激光扫描共聚焦显微镜(CPL-LSCM)实现了活细胞内CPL信号的精准检测(图7)。与传统荧光成像相比,CPL信号具有自参考特性,可有效消除背景散射干扰,提升成像对比度。实验表明,该探针可特异性靶向脂滴与溶酶体等细胞器,在活细胞中展现出良好的生物相容性与光稳定性。值得注意的是,这是首例利用小分子全有机探针实现CPL活细胞成像的工作,证明了手性BODIPY作为CPL生物成像探针的可行性,为后续近红外CPL探针的开发提供了技术范式。

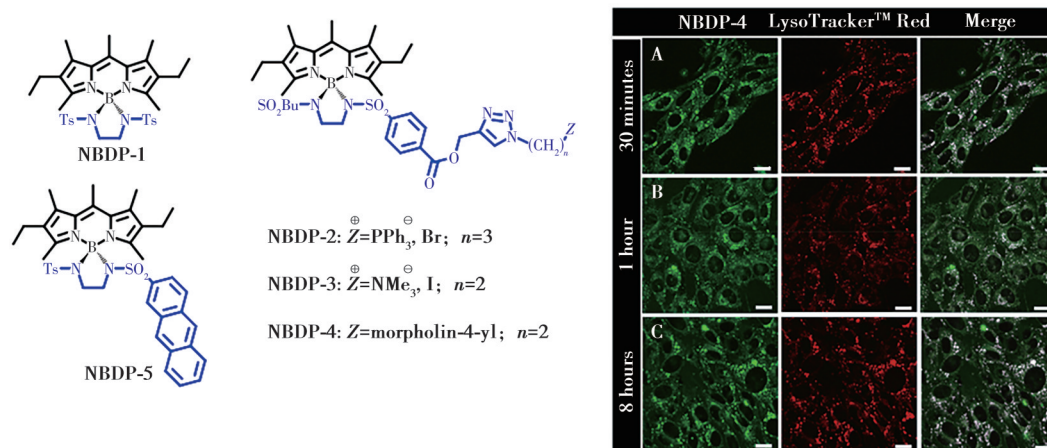


图6 含硼结构差异的N-BODIPY化合物(NBDP-1、NBDP-2、NBDP-3、NBDP-4和NBDP-5)以及NBDP-4分子标记的活体细胞中溶酶体的分布情况^[85]

Fig.6 N-BODIPY compounds with different boron-containing structures (NBDP-1, NBDP-2, NBDP-3, NBDP-4, and NBDP-5), as well as the lysosomal distribution in living cells labeled by NBDP-4 molecule^[85]

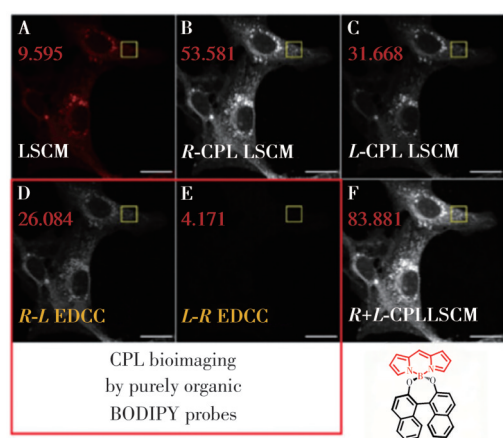
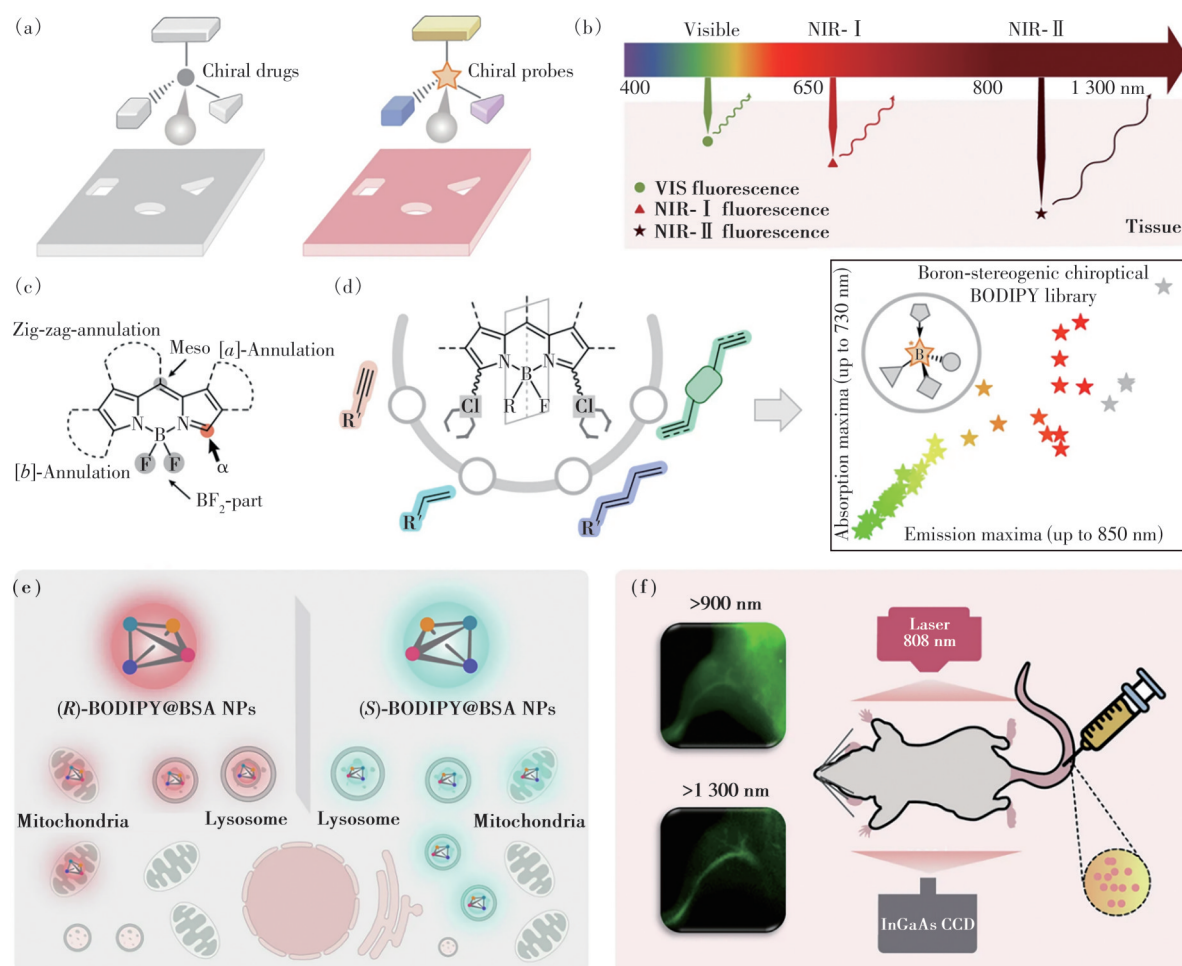
图 7 细胞内 CPL 成像^[86]Fig.7 Intracellular CPL imaging^[86]

图 8 BODIPY@BSA 纳米颗粒的小鼠体内成像^[87]。(a)手性在药物与荧光探针分子识别中的关键作用;(b)NIR 吸收/发射染料的优势及广泛应用;(c)调控 BODIPY 吸收至远红光与 NIR 区域的策略;(d)通过钯催化对映选择性交叉偶联反应构建手性光学 NIR BODIPY 库的优化方案;(e)BODIPY@BSA 在 U87 细胞中手性依赖性亚细胞定位研究;(f)BODIPY@BSA 高分辨率 NIR- II 成像技术用于体内血管可视化研究

Fig.8 *In vivo* imaging of BODIPY@BSA nanoparticles in mice^[87]. (a)The critical role of chirality in the molecular recognition of drugs and fluorescent probes. (b)Advantages and broad applications of NIR-absorbing/emitting dyes. (c)Strategies for tuning BODIPY absorption into the far-red and NIR regions. (d)Streamlined construction of chiroptical NIR BODIPY library *via* palladium-catalyzed enantioselective cross-coupling reactions. (e)Chiral-dependent subcellular localization of BODIPY@BSA in U87 cells. (f)High-resolution NIR- II imaging of BODIPY@BSA for *in vivo* vascular visualization

基于 CPL 显微镜技术的基础,Zhao 等^[87]进一步将手性 BODIPY 的生物成像拓展至近红外区域,实现了深层组织成像与手性依赖的精准定位(图 8)。该研究采用钯催化模块化合成策略,构建了硼立体中心 BODIPY 分子库,通过与牛血清白蛋白(BSA)共组装形成纳米颗粒 BODIPY@BSA,有效提升了水溶性与生物相容性。得益于近红外发射特性(>700 nm),该体系成功实现了高分辨率血管成像,穿透深度远超可见光探针。进一步研究表明,分子手性在细胞识别过程中起关键作用,手性 BODIPY 分子在细胞内表现出对映选择性摄取及独特的亚细胞定位,表现为 S 型对映体

富集于溶酶体,而R型对映体则分布于线粒体,展现了硼立体中心在靶向选择性调控中的独特作用。这一工作不仅将手性BODIPY的应用从细胞器成像推进至活体血管可视化,更为手性依赖的药物递送与诊疗一体化提供了新思路,标志着手性BODIPY生物成像向活体成像应用迈出了重要一步。除了近红外成像,手性BODIPY的水溶性与生物相容性优化也是其临床转化的关键。Werz等^[88]通过简单的四步合成路线制备出水溶性、无电荷的糖基化BODIPY(GlycoBODIPYs),这些分子不仅保持了糖单元的手性完整性,还具有高荧光效率,且该体系与多种后修饰反应表现出良好的兼容性(图9)。该策略通过糖基与BODIPY骨架的共价连接,赋予分子优异的水溶性和细胞靶向能力。与疏水性BODIPY相比,GlycoBODIPYs无

需有机共溶剂即可在水相中分散,且能通过糖-受体相互作用实现特异性细胞识别。这一工作拓展了手性BODIPY在生物相容性荧光探针领域的应用,为体内成像与诊疗一体化提供了新的方向。CPL成像相比传统荧光成像在生物样本中具有独特优势。传统荧光成像依赖强度信号,受生物组织自发荧光、激发光散射及光漂白等因素干扰,信噪比随深度的深入而下降。CPL信号基于发射光的旋光性而非强度,具有偏振选择性:只有与手性探针旋光性匹配的圆偏振分量被检测,而组织散射产生的非偏振背景光被有效滤除,从而抑制背景干扰。此外,近红外CPL兼具深层组织穿透能力与低光子散射特性,将空间分辨率提升至微米级,为肿瘤病灶的精准定位与高对比度可视化提供了新途径。

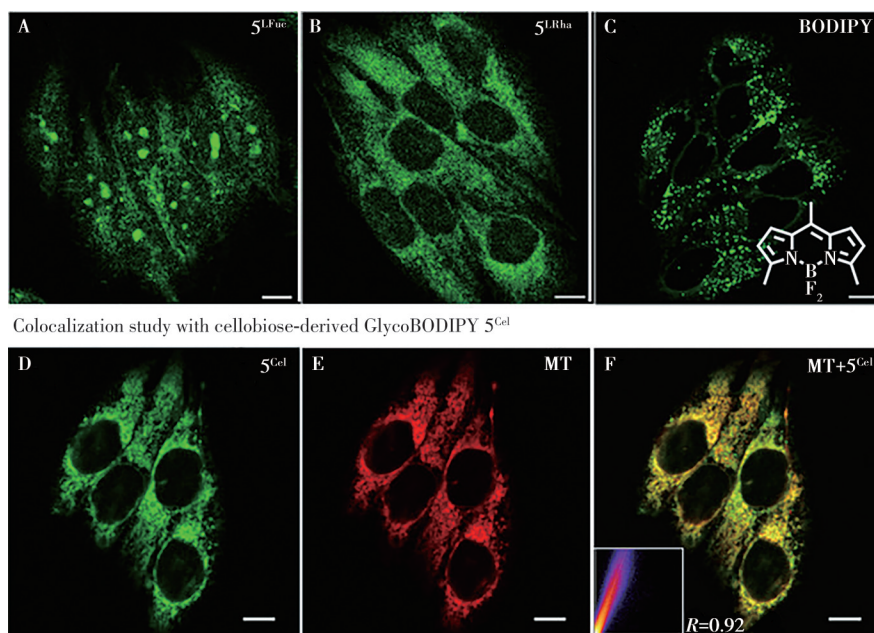


图9 GlycoBODIPYs的细胞成像实验^[88]

Fig.9 Cell imaging experiments of GlycoBODIPYs^[88]

手性BODIPY的应用不仅限于生物体系。神经形态计算技术通过模拟人脑的节能处理机制,已成为下一代人工智能领域的一项关键技术,采用圆偏振光(CPL)作为外部刺激源和信息载体,可实现功能强大且极具实用价值的尖端设备,其信息感知能力远超人类极限,而手性BODIPY在光电信息领域也展现出独特潜力。Won等^[89]报道了基于手性BODIPY/聚合物半导体异质结的神经形态器件,实现了CPL的检测与记忆功能。该系统采用溶液处理的体异质结(BHJ),由手性硼二吡咯甲基(BODIPY)与聚合物半导体(PBTTT-C12)

构成,将CPL手性转化为稳定的非易失性存储状态。将CPL信号转换为电信号并存储,能耗低至皮焦耳级别,为开发超低功耗的手性光电子器件奠定了基础(图10)。CPL照射下,手性BODIPY/聚合物异质结中光生激子在手性势场作用下发生方向依赖的电荷分离,产生与入射光旋向相关的光电流;该光电流通过铁电层调制半导体沟道的电导状态,实现非易失性存储,其电导高低与CPL的手性(左旋/右旋)相关联。这一工作展现了手性BODIPY分子在手性光通信、光学存储与类脑计算等前沿领域的应用前景。

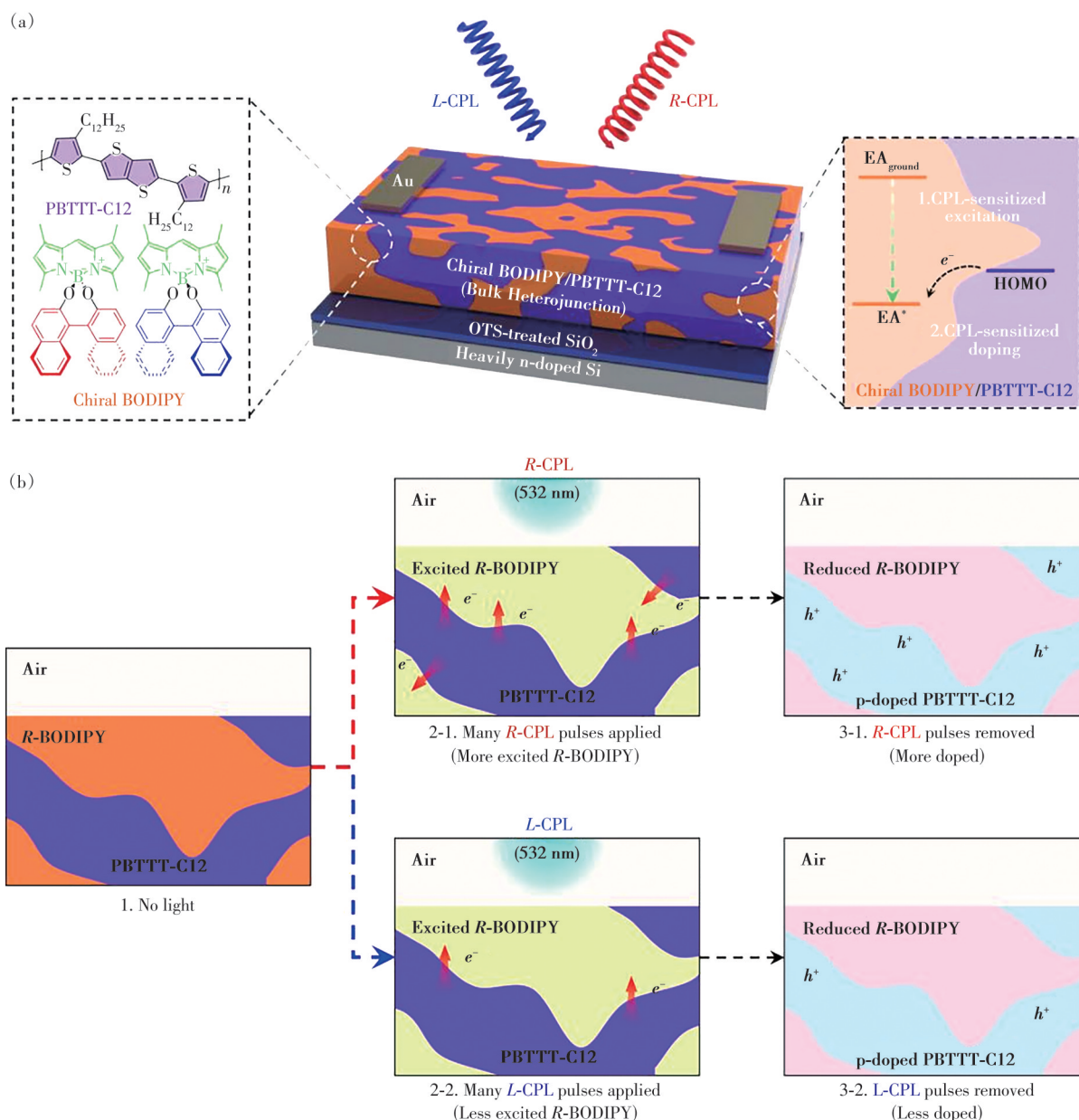


图 10 基于 CPL 敏化掺杂的手性神经形态器件概念示意图及其工作原理^[89]

Fig.10 Conceptual illustration of the chiropto-neuromorphic device and its operational mechanism based on CPL-sensitized doping^[89]

4 总结与展望

近年来,研究人员依据手性分子设计理念与合成策略,对手性 BODIPY 发光分子开展了系统性优化工作。通过技术路径的不断革新,该领域取得了新的进展。一方面,在分子设计层面展现出多样性,可实现硼立体中心与轴手性骨架的精准构筑,为圆偏振发光材料设计提供可靠依据;另一方面,成功实现在生物成像与光电信息等领域的应用,构建了一系列具有生物实用性与智能感知特征潜力的手性发光材料。这些研究为手性医

学材料与光电信息材料提供了新的解决方案,有望显著提高 CPL 信号强度与调控精度,为攻克深层组织成像与手性信息处理这一技术难题开辟具有前景的技术路线。

本综述聚焦于手性 BODIPY 发光材料,通过过渡金属催化、有机催化及超分子组装等策略,实现硼立体中心与轴手性骨架的高效构筑,突破传统手性染料合成效率与选择性限制。借助表面功能化修饰与多模态集成(可见光/近红外成像协同、CPL 检测与神经形态记忆整合),构建成像与信息处理的理想平台,解决了传统 CPL 材料中发

光效率与手性响应不平衡的问题。同时,通过分子工程优化提升材料生物相容性与水溶性,并探索近红外二区窗口拓展至1 000~1 700 nm,为深层组织诊疗提供新范式。但与此同时,如何提高手性BODIPY的CPL发光不对称因子,降低生物体内的背景干扰,仍是待解决的问题。此外,虽然硼立体中心BODIPY能够实现手性依赖的亚细胞定位,但平衡好其发光效率与组织穿透深度仍是一个需要讨论的问题。当前,手性BODIPY探针的 g_{lum} 普遍偏低,如何通过多重手性元素协同或超分子组装策略提升CPL信号强度已成为当前研究领域待突破的关键问题。生物安全性方面,尽管已有研究表明手性BODIPY具有良好的细胞相容性,但长期潜在的毒性问题尚未完全明确,其在体内的代谢途径和降解机制也需要进一步深入研究,以确保临床应用的安全性。而在实际应用中,手性BODIPY与生物体内复杂手性环境的相互作用机制尚不清楚,这可能影响其靶向特异性和诊疗效果。

面向未来,手性BODIPY的优化可从以下方向展开。开发新型多重手性协同设计(如硼立体

中心+轴手性+螺旋组装),通过手性放大工程提升 g_{lum} ,突破CPL信号强度瓶颈;设计可降解手性侧链(如含酯键的糖基或肽链修饰),降低BODIPY在肝脾等器官的蓄积率,同时引入无重金属有机催化合成体系以提升生物安全性;构建光/手性双响应诊疗体系,利用CPL信号动态追踪亚细胞定位,结合单细胞测序解析手性构型与生物效应的构效关系,实现成像与治疗的时空协同;建立手性BODIPY跨尺度评价模型,在3D肿瘤类器官中模拟探针渗透效率,结合机器学习优化分子设计参数,缩短临床前转化周期。通过材料手性性能、生物相容性与智能化功能的系统性提升,手性BODIPY有望在深层肿瘤精准诊疗与手性信息处理中实现突破。通过解决这些问题,有望进一步提升手性BODIPY发光材料在生物成像和光电信息领域中的应用价值,为人类健康与智能信息技术事业做出更多贡献。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.3724/CJL.20260128>

参 考 文 献:

- [1] ZHANG X, XU Y Y, VALENZUELA C, *et al.* Liquid crystal-templated chiral nanomaterials: from chiral plasmonics to circularly polarized luminescence [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 223.
- [2] PALOMO L, FAVEREAU L, SENTHILKUMAR K, *et al.* Simultaneous detection of circularly polarized luminescence and Raman optical activity in an organic molecular lemniscate [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(34): e202206976.
- [3] DUTTA C, NATARAJAN R V, KUMAR J. Intrinsically chiral thermoresponsive assemblies from achiral clusters: enhanced luminescence and optical activity through tailor-made chiral additives [J]. *Chem. Sci.*, 2025, 16(4): 1722-1729.
- [4] UMESH, BERA S, BHATTACHARYA S. Dual circularly polarized luminescence (CPL) and piezoelectric responses in self-assembled chiral nanostructures derived from a dipeptide based piezorganogel [J]. *Small*, 2024, 20(13): 2308104.
- [5] ZHAO T H, MENG D J, HU Z J, *et al.* Enhanced chiroptic properties of nanocomposites of achiral plasmonic nanoparticles decorated with chiral dye-loaded micelles [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 81.
- [6] 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.
- [7] GONG J, ZHANG X J. Coordination-based circularly polarized luminescence emitters: design strategy and application in sensing [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2022, 453: 214329.
- [8] SHI Y H, HAN J L, JIN X, *et al.* Chiral luminescent liquid crystal with multi-state-reversibility: breakthrough in advanced anti-counterfeiting materials [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(20): 2201565.
- [9] MACKENZIE L E, PÅLSSON L O, PARKER D, *et al.* Rapid time-resolved Circular Polarization Luminescence (CPL) emission spectroscopy [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 1676.
- [10] FENG L Z, WANG J J, MA T, *et al.* Biomimetic non-classical crystallization drives hierarchical structuring of efficient circularly polarized phosphors [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 3339.
- [11] GUO L F, ZHANG M Y, ZHAO C H. [(2-Dimesitylboryl) phenyl] ethynyl-substituted [2.2] paracyclophane exhibiting circularly polarized luminescence in both solution and solid-state [J]. *Molecules*, 2025, 30(2): 390.

- [12] TANAKA H, INOUE Y, MORI T. Circularly polarized luminescence and circular dichroisms in small organic molecules: correlation between excitation and emission dissymmetry factors [J]. *ChemPhotoChem*, 2018, 2(5): 386-402.
- [13] IKESHITA M, TSUNO T. Recent advances in circularly polarized luminescence (CPL) of chiral boron difluoride complexes [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2025, 27(33): 17116-17129.
- [14] LI X, YU L Y, LI S L, *et al.* Solvent-induced silver nanoclusters/BODIPY derivative assembly: self-sorting and multi-structures enhanced circularly polarized luminescence properties [J]. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2026, 728: 138616.
- [15] YANG X F, JIN X, ZHAO T H, *et al.* Circularly polarized luminescence in chiral nematic liquid crystals: generation and amplification [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2021, 5(13): 4821-4832.
- [16] LIU J, SONG Z P, SUN L Y, *et al.* Circularly polarized luminescence in chiral orientationally ordered soft matter systems [J]. *Responsive Mater.*, 2023, 1(1): e20230005.
- [17] WANG X J, MA S, ZHAO B, *et al.* Frontiers in circularly polarized phosphorescent materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(20): 2214364.
- [18] IKESHITA M, IMAI Y, TSUNO T. Recent advances in circularly polarized luminescent materials based on phosphorescent platinum(II) complexes [J]. *Chem. Lett.*, 2025, 54(4): upaf066.
- [19] LIU S P, KEPENEKIAN M, BODNAR S, *et al.* Bright circularly polarized photoluminescence in chiral layered hybrid lead-halide perovskites [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(35): eadh5083.
- [20] ZHUO H G, SHEN X F, ZHAO W K, *et al.* Group theory-guided materials design of chiral organic semiconductors for high-performance circularly polarized light detection [J]. *Matter*, 2025, 8(12): 102371.
- [21] ZHANG T W, ZHANG Y, HE Z Y, *et al.* Recent advances of chiral isolated and small organic molecules: structure and properties for circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Asian J.*, 2024, 19(9): e202400049.
- [22] SÁNCHEZ-CARNERERO E M, AGARRABEITIA A R, MORENO F, *et al.* Circularly polarized luminescence from simple organic molecules [J]. *Chem. Eur. J.*, 2015, 21(39): 13488-13500.
- [23] CHEN Z X, HUANG M L, ZHONG C, *et al.* Pivotal role of transition density in circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Sci.*, 2023, 14(22): 6022-6031.
- [24] MURALI A C, NAYAK P, VENKATASUBBAIAH K. Recent advances in the synthesis of luminescent tetra-coordinated boron compounds [J]. *Dalton Trans.*, 2022, 51(15): 5751-5771.
- [25] HU D F, HUANG R R, FANG Y. Recent advances in tetra-coordinate boron-based photoactive molecules for luminescent sensing, imaging, and anticounterfeiting [J]. *Precis. Chem.*, 2025, 3(1): 10-26.
- [26] GOMEZ A M, DAVID A H G, CAMPANA A G, *et al.* Enhanced circularly polarized luminescence of urea-bridged dimers of axially chiral BODIPY-carbohydrate hybrids [J]. *J. Org. Chem.*, 2024, 89(24): 18522-18528.
- [27] ULRICH G, ZIESSEL R, HARRIMAN A. The chemistry of fluorescent bodipy dyes: versatility unsurpassed [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, 47(7): 1184-1201.
- [28] LIU Y L, HUANG Y Z, HU R R, *et al.* AIE-active BODIPY derivatives [M]. TANG Y H, TANG B Z. *Handbook of Aggregation-Induced Emission*. Hoboken: Wiley, 2022: 493-535.
- [29] WANG F, SHEN C S, GAN F W, *et al.* Tunable multicolor circularly polarized luminescence *via* co-assembly of one chiral electron acceptor with various donors [J]. *CCS Chem.*, 2023, 5(7): 1592-1601.
- [30] YANG Q, FUSÈ M, BLOINO J. Theoretical investigation of the circularly polarized luminescence of a chiral boron dipyrromethene (BODIPY) dye [J]. *Front. Chem.*, 2020, 8: 801.
- [31] KOLI M, GUPTA S, CHAKRABORTY S, *et al.* Design and synthesis of BODIPY-hetero [5] helicenes as heavy-atom-free triplet photosensitizers for photodynamic therapy of cancer [J]. *Chem. Eur. J.*, 2023, 29(57): e202301605.
- [32] WANG H, ZHANG Y, GU W, *et al.* Tandem oxidative nucleophilic hydrogen substitution/B-O cyclization enables chiral near-infrared N, O, B-chelated BODIPYs [J]. *Org. Lett.*, 2026, 28(31): 10128-10133.
- [33] BOENS N, VERBELEN B, ORTIZ M J, *et al.* Synthesis of BODIPY dyes through postfunctionalization of the boron dipyrromethene core [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2019, 399: 213024.
- [34] SHENG W L, LV F, TANG B, *et al.* Toward the most versatile fluorophore: direct functionalization of BODIPY dyes *via* regioselective C-H bond activation [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2019, 30(10): 1825-1833.
- [35] BAÑUELOS J. BODIPY dye, the most versatile fluorophore ever? [J]. *Chem. Rec.*, 2016, 16(1): 335-348.

- [36] MENDIVE-TAPIA L, ZHAO C, AKRAM A R, *et al.* Spacer-free BODIPY fluorogens in antimicrobial peptides for direct imaging of fungal infection in human tissue [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7(1): 10940.
- [37] ZHU H, ZHANG Z, LONG S R, *et al.* Synthesis of an ultrasensitive BODIPY-derived fluorescent probe for detecting HOCl in live cells [J]. *Nat. Protoc.*, 2018, 13(10): 2348-2361.
- [38] LI X, ZHANG G, SONG Q L. Recent advances in the construction of tetracoordinate boron compounds [J]. *Chem. Commun.*, 2023, 59(26): 3812-3820.
- [39] ABDOU-MOHAMED A, AUPIC C, FOURNET C, *et al.* Stereoselective formation of boron-stereogenic organoboron derivatives [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2023, 52(13): 4381-4391.
- [40] GUO Y H, ZU B, CHEN C D, *et al.* Boron-stereogenic compounds: synthetic developments and opportunities [J]. *Chin. J. Chem.*, 2024, 42(19): 2401-2411.
- [41] KOLEMEN S, CAKMAK Y, KOSTERELI Z, *et al.* Atropisomeric dyes: axial chirality in orthogonal BODIPY oligomers [J]. *Org. Lett.*, 2014, 16(3): 660-663.
- [42] SÁNCHEZ-CARNERERO E M, MORENO F, MAROTO B L, *et al.* Unprecedented induced axial chirality in a molecular BODIPY dye: strongly bisignated electronic circular dichroism in the visible region [J]. *Chem. Commun.*, 2013, 49(99): 11641-11643.
- [43] SANCHEZ-CARNERERO E M, MORENO F, MAROTO B L, *et al.* Circularly polarized luminescence by visible-light absorption in a chiral *O*-BODIPY dye: unprecedented design of CPL organic molecules from achiral chromophores [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136(9): 3346-3349.
- [44] BRUHN T, PESCELLELLI G, JURINOVICH S, *et al.* Axially chiral BODIPY DYEmers: an apparent exception to the exciton chirality rule [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53(52): 14592-14595.
- [45] HAEFELE A, ZEDDE C, RETAILLEAU P, *et al.* Boron asymmetry in a BODIPY derivative [J]. *Org. Lett.*, 2010, 12(8): 1672-1675.
- [46] GOSSAUER A, NYDEGGER F, KISS T, *et al.* Synthesis, chiroptical properties, and solid-state structure determination of two new chiral dipyrin difluoroboryl chelates [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, 126(6): 1772-1780.
- [47] SAIKAWA M, NAKAMURA T, UCHIDA J, *et al.* Synthesis of figure-of-eight helical bisBODIPY macrocycles and their chiroptical properties [J]. *Chem. Commun.*, 2016, 52(71): 10727-10730.
- [48] FORBES K C, JACOBSEN E N. Enantioselective hydrogen-bond-donor catalysis to access diverse stereogenic-at-P(V) compounds [J]. *Science*, 2022, 376(6598): 1230-1236.
- [49] FORMICA M, ROGOVA T, SHI H Y, *et al.* Catalytic enantioselective nucleophilic desymmetrization of phosphonate esters [J]. *Nat. Chem.*, 2023, 15(5): 714-721.
- [50] HUANG S L, ZENG Z, ZHANG N, *et al.* Organocatalytic asymmetric deoxygenation of sulfones to access chiral sulfinyl compounds [J]. *Nat. Chem.*, 2023, 15(2): 185-193.
- [51] DENG T R, HAN X L, YU Y, *et al.* Organocatalytic asymmetric α -C—H functionalization of alkyl amines [J]. *Nat. Catal.*, 2024, 7(10): 1076-1085.
- [52] HAN J T, TSUJI N, ZHOU H, *et al.* Organocatalytic asymmetric synthesis of Si-stereogenic silacycles [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 5846.
- [53] YANG Y R, LI J R, LI H C, *et al.* Molecular insights into supramolecular self-assembly of chiral BODIPYs toward enhanced chiral optical activity [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2025, 129(15): 7358-7365.
- [54] SUN Y Z, YU C J, YU T T, *et al.* Supramolecular-assembly and surfactant-regulated circularly polarized luminescence from a spiranic BINOL-derived borate isoindolyl-indolenine (BBI) dye [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(18): 2500435.
- [55] WU Y P, WANG S S, LI Z F, *et al.* Chiral binaphthyl-linked BODIPY analogues: synthesis and spectroscopic properties [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(21): 4668-4674.
- [56] DING J H, PAN H F, WANG H C, *et al.* Asymmetric living supramolecular polymerization of an achiral aza-BODIPY dye by solvent-mediated chirality induction and memory [J]. *Org. Chem. Front.*, 2022, 9(15): 3949-3955.
- [57] PAN H F, HOU B K, JIANG Y Y, *et al.* Control of kinetic pathways toward supramolecular chiral polymorphs for tunable circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Eur. J.*, 2024, 30(32): e202400899.
- [58] HAN N X, MA J J, YU H, *et al.* Isomeric decker metallo-supramolecules with tunable luminescence and chiroptical properties [J]. *Chem. Sci.*, 2025, 16(44): 21010-21019.

- [59] CHEN Z W, NI Z G, CHEN X Y, *et al.* Helicene-type β -isoindigo-based boron-dipyrromethene analogs with strong near-infrared chiroptical activity [J]. *Aggregate*, 2024, 5(3): e498.
- [60] LOUDET A, BURGESS K. BODIPY dyes and their derivatives: syntheses and spectroscopic properties [J]. *Chem. Rev.*, 2007, 107(11): 4891-4932.
- [61] LU H, MACK J, NYOKONG T, *et al.* Optically active BODIPYs [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2016, 318: 1-15.
- [62] PODDAR M, MISRA R. Recent advances of BODIPY based derivatives for optoelectronic applications [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2020, 421: 213462.
- [63] LI F, WANG Y X, WANG Z Y, *et al.* Red colored CPL emission of chiral 1, 2-DACH-based polymers *via* chiral transfer of the conjugated chain backbone structure [J]. *Polym. Chem.*, 2015, 6(38): 6802-6805.
- [64] MAEDA C, SUKA K, NAGAHATA K, *et al.* Synthesis and chiroptical properties of chiral carbazole-based BODIPYs [J]. *Chem. Eur. J.*, 2020, 26(19): 4261-4268.
- [65] JIMÉNEZ J, SÁNCHEZ-CAMACHO J, MORENO F, *et al.* C^* -BODIPYs: exploring a new strategy to transfer chirality towards BODIPY Chiroptics [J]. *Proceedings*, 2019, 41(1): 53.
- [66] WANG Y X, LI Y Z, LIU S, *et al.* Regulating circularly polarized luminescence signals of chiral binaphthyl-based conjugated polymers by tuning dihedral angles of binaphthyl moieties [J]. *Macromolecules*, 2016, 49(15): 5444-5451.
- [67] ZHANG S W, WANG Y X, MENG F D, *et al.* Circularly polarized luminescence of AIE-active chiral *O*-BODIPYs induced *via* intramolecular energy transfer [J]. *Chem. Commun.*, 2015, 51(43): 9014-9017.
- [68] LIN F J, ZHANG X Y, ZHAO J Y, *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.*, 2026, 138(2): e15768.
- [69] YANG Y Q, WANG P, YUAN C L, *et al.* Atroposelective palladium-catalyzed γ -C-H olefination of BODIPYs [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2026, 65(1): e19324.
- [70] SIRBU D, BENNISTON A C, HARRIMAN A. One-pot synthesis of a mono-O, B, N-strapped BODIPY derivative displaying bright fluorescence in the solid state [J]. *Org. Lett.*, 2017, 19(7): 1626-1629.
- [71] LERRICK R I, WINSTANLEY T P L, HAGGERTY K, *et al.* Axially chiral BODIPYs [J]. *Chem. Commun.*, 2014, 50(36): 4714-4716.
- [72] GOBO Y, MATSUOKA R, CHIBA Y, *et al.* Synthesis and chiroptical properties of phenanthrene-fused N_2O -type BODIPYs [J]. *Tetrahedron Lett.*, 2018, 59(47): 4149-4152.
- [73] ZU B, GUO Y H, REN L Q, *et al.* Catalytic enantioselective synthesis of boron-stereogenic BODIPYs [J]. *Nat. Synth.*, 2023, 2(6): 564-571.
- [74] REN L Q, ZHAN B Q, ZHAO J Y, *et al.* Modular enantioselective assembly of multi-substituted boron-stereogenic BODIPYs [J]. *Nat. Chem.*, 2025, 17(1): 83-91.
- [75] FUKAMI S, MORI S, HARADA T, *et al.* Far-red fluorescence and chiroptical properties of pyrrolopyrrole aza-BODIPYs induced by the *B*, *O*-chelation [J]. *Chem. Commun.*, 2024, 60(48): 6170-6173.
- [76] MA J, GUO L Y, ZHANG X Q, *et al.* Enabling construction of boron-stereogenic formyl BODIPYs *via* *N*-heterocyclic carbene-catalyzed enantioselective esterification [J]. *JACS Au*, 2025, 5(6): 2837-2848.
- [77] SHANG W L, ZHU X F, LIANG T L, *et al.* Chiral reticular self-assembly of achiral AIEgen into optically pure metal-organic frameworks (MOFs) with dual mechano-switchable circularly polarized luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, 59(31): 12811-12816.
- [78] SENGUPTA A, ROY G, LIKHAR A R, *et al.* A supramolecular assembly-based strategy towards the generation and amplification of photon up-conversion and circularly polarized luminescence [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(47): 18999-19015.
- [79] DAS A, GHOSH S, GEORGE S J. Chiroptical amplification of induced circularly polarized luminescence in nucleotide-templated supramolecular polymer [J]. *Angew. Chem.*, 2023, 135(38): e202308281.
- [80] SHOW S, JAMADAR A, GORAI S, *et al.* Peptide-induced chirality transfer and circularly polarized luminescence in achiral BODIPY emitters *via* halogen bonding [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(9): 1826-1829.
- [81] PAN H F, HUANG H J, LIU Y, *et al.* Supramolecular chiral J-aggregates of an amphiphilic boron-azadipyrromethene dye: kinetic pathway and circularly polarized near-infrared luminescence [J]. *Chem. Mater.*, 2024, 36(8): 3745-3753.
- [82] YU L Y, LIU H L, FENG N, *et al.* Multi-step and switchable energy transfer in photoluminescent organosilicone

- capsules [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(31): 2402565.
- [83] CHEN K Y, XIONG Y, WANG D L, *et al.* A facile strategy for achieving polymeric afterglow materials with wide color-tunability and persistent near-infrared luminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(12): 2312883.
- [84] LI T Y, PAN Y, DING L L, *et al.* Chiral cage materials with tailored functionalities for enantioselective recognition and separation [J]. *Chem. Synth.*, 2024, 4(2): 35.
- [85] RAY C, AVELLANAL-ZABALLA E, MUÑOZ-ÚBEDA M, *et al.* Dissimilar-at-boron *N*-BODIPYs: from light-harvesting multichromophoric arrays to CPL-bright *chiral-at-boron* BODIPYs [J]. *Org. Chem. Front.*, 2023, 10(23): 5834-5842.
- [86] STACHELEK P, SERRANO-BUITRAGO S, MAROTO B L, *et al.* Circularly polarized luminescence bioimaging using chiral BODIPYs: a model scaffold for advancing unprecedented CPL microscopy using small full-organic probes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(49): 67246-67254.
- [87] ZHAO J Y, REN L Q, LAN D R, *et al.* Streamlined construction of boron-stereogenic BODIPY library for near-infrared bioimaging [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 9719.
- [88] PATALAG L J, AHADI S, LASHCHUK O, *et al.* GlycoBODIPYs: sugars serving as a natural stock for water-soluble fluorescent probes of complex chiral morphology [J]. *Angew. Chem.*, 2021, 133(16): 8848-8853.
- [89] WON Y, KWON B, CHIDCHOB P, *et al.* Chiropto-neuromorphic devices based on a photocatalytic dye/polymer semiconductor bulk heterojunction for circularly polarized light detection and memorization [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(15): e23436.



孟岩恒(1999–),男,安徽宿州人,博士研究生,2024年于温州大学获得硕士学位,主要从事功能有机光电材料的研究。

E-mail: 3120256775@bit.edu.cn



陈磅宽(1979–),男,湖北宜昌人,博士,教授,博士生导师,2012年于美国罗格斯大学获得博士学位,主要从事有机硼光功能材料、大环化学与手性功能分子的研究。

E-mail: pangkuan@bit.edu.cn