

文章编号: 1007-2780(2025)01-0095-16

发光盘状液晶：从分子设计到应用

杨心语, 王 猛*, 杨 洪*

(东南大学 化学化工学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 发光盘状液晶是一类兼具独特分子结构和优异发光性能的先功能材料。本文系统综述了发光盘状液晶的分子设计、性能调控及其在实际应用中的发展动态。首先, 概述了发光盘状液晶的基本概念、典型分子结构及其液晶相态特征。其次, 详细探讨了其在荧光和磷光发光机制中的卓越表现, 并结合分子设计策略, 实现了不同波长范围的高效光发射。随后, 重点分析了发光盘状液晶在有机电子器件领域的应用进展。最后, 对该领域的研究现状与发展趋势进行了总结, 提出未来的研究方向将聚焦于分子结构的精细优化、制备工艺的革新以及器件集成策略的探索, 以全面提升发光盘状液晶的综合性能, 推动其在有机电子器件中的实用化进程。

关键词: 盘状液晶; 发光性能; 有机光电材料; 共轭结构

中图分类号: O753⁺.2 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2024-0260 CSTR: 32172.14.CJLCD.2024-0260

Luminescent discotic liquid crystals: from molecular design to applications

YANG Xinyu, WANG Meng*, YANG Hong*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Luminescent discotic liquid crystals (L-DLCs) are advanced functional materials that exhibit remarkable characteristics in both molecular structure and luminescent properties. This review provides a comprehensive overview of the molecular design, performance modulation, and applications of L-DLCs. First, the basic concept, typical molecular structure, and liquid crystalline phases of these materials are introduced. The review then discusses in detail the excellent performance of L-DLCs in both fluorescence and phosphorescence mechanisms, with molecular design strategies enabling light emission across different wavelength ranges. Next, the applications of L-DLCs in organic electronic devices are highlighted. Finally, the current state and future trends in this field are summarized, with a focus on molecular structure optimization, improvements in fabrication processes, and the development of device integration strategies, aiming to enhance the overall performance of L-DLCs and accelerate their practical applications.

收稿日期: 2024-08-30; 修订日期: 2024-09-23.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFA1405000); 国家杰出青年科学基金(No.22325501); 国家自然科学基金(No.21971037, No.52173109, No.52473107)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1405000); China National Funds for Distinguished Young Scientists (No.22325501); National Natural Science Foundation of China (No.21971037, No.52173109, No.52473107)

*通信联系人, E-mail: wangm@seu.edu.cn; yangh@seu.edu.cn

in organic electronic devices.

Key words: discotic liquid crystal; luminescent property; organic optoelectronic materials; conjugated structure

1 引言

液晶是一种介于固体和液体之间的热力学稳定相态,其既能够像液体一样流动,同时也具有晶体的各向异性分子排列。液晶在外界刺激作用下,如电场、磁场、力、光、温度等,分子取向很容易发生变化,因此在光学显示、智能材料、软体机器人等领域具有广阔的应用前景。1974年, de Gennes 在其编著的“液晶物理学”中曾预言盘状分子可以形成液晶相^[1]。1977年,印度科学家 Chandrasekhar 等人首次报道了基于均苯六酚酯类化合物的盘状液晶分子,开启了这一领域的研究热潮^[2]。盘状液晶分子通常由一个刚性芳香核和多个柔性侧链组成。其中,高共轭芳香核的强 π - π 相互作用使盘状液晶能够自发形成柱状结构^[3],从而实现一维方向的有序排列;柔性侧链不仅提高了盘状液晶的溶解度,还允许在适当条件下调节分子堆积,诱导液晶状态的形成,并赋予材料结构缺陷的自修复功能^[4]。这种自组装盘状结构增强了长程 π 轨道重叠,使盘状液晶分子表现出高载流子迁移率。由于其低成本的溶液或熔融加工性、自组装能力以及结构缺陷自修复能力,盘状液晶已成为一种极具吸引力的有机半导体材料^[5]。

发光盘状液晶凭借独特的分子结构和发光性能,在材料科学与有机光电领域具有重要的研究价值。发光盘状液晶通过共轭体系吸收能量并产生激发态,再通过激发态到基态的辐射跃迁发射光子。根据发射机制的不同,盘状液晶的发光可以分为荧光和磷光两种主要类型。荧光涉及快速的辐射跃迁,通常具有纳秒级的发射寿命;而磷光则涉及三重态电子跃迁,发射寿命较长,通常在微秒到秒级别。发光盘状液晶在这两种发光机制中均展现出优异的性能,并且通过分子设计可以实现不同波长范围内的光发射。在有机电子器件,如液晶显示(liquid crystal display, LCD)和有机发光二极管(organic light emitting display, OLED)^[6]等,发光盘状液晶展现出提升

器件亮度、能效和发光效率的潜力。然而,发光盘状液晶的商业化面临制备成本、稳定性等方面的挑战。

本文综述了发光盘状液晶的分子设计、性能调控及应用。首先介绍了发光盘状液晶的基本概念、主要的分子结构组成以及液晶相态;接着详细综述了在荧光和磷光这两种不同的发光机制中,发光盘状液晶的分子设计及性能调控;然后着重介绍了发光盘状液晶在有机电子器件领域的应用情况;最后对发光盘状液晶领域的发展进行了总结,并展望了未来研究中需要进一步解决的一些关键科学问题和挑战。

2 发光盘状液晶的基本概念

2.1 分子结构

自从 Daniel Vorländer 提出“结晶液态是由尽可能线性的分子结构产生的”这一概念以来^[7],棒状液晶分子^[8]已成为液晶研究中一个被广泛认可的基本概念。然而,Chandrasekhar 等人在1977年的开创性研究中,报道了简单盘状分子纯化合物中观察到的热致液晶现象。这一发现不仅为液晶领域开辟了全新的研究方向,也引发了对盘状液晶的特别关注。与棒状液晶的结构特征不同,盘状液晶的分子组成通常由盘状介晶核和柔性侧链组成。通过深入研究这些结构因素的作用机制,有助于发现和设计出具有更高发光效率、更长发光寿命和更稳定结构的新型光致发光盘状液晶材料。

盘状介晶核通常是刚性的共轭芳核,这些共轭芳核包括但不限于苯、苯并菲^[9]、芘、六苯并蔻、星型苯衍生物、卟啉以及酞菁等^[10-12],如图1所示。在这些共轭芳核中,苯并菲是最早被文献报道的盘状核之一^[13]。Béguin 等人^[14]在1979年通过等压相图分析,首次推测了苯并菲具有形成盘状液晶的潜力。自此,对苯并菲盘状液晶的研究主要集中在大量的材料合成工作和应用上^[15]。Zhao 等人^[16]通过将酰亚胺单元与苯并菲核融合,



图 1 典型的盘状液晶共轭芳核

Fig. 1 Typical discotic mesogen cores

构建了一种新型的盘状介晶核,并进一步合成了能够自组装形成液晶相的目标化合物,其具有高清亮点温度和超过 200 °C 的宽液晶相温度范围,并且在溶液和固态下均表现出绿色发光。相比于红光和绿光发射材料,蓝光发射材料的开发仍然面临挑战。Pal 等人^[17]结合五炔苯和苯并菲单元,合成了新型非对称盘状液晶材料,其在稀溶液中显示蓝光发射,固态下由于聚集效应导致发射光谱向绿色红移。该材料用在 OLED 器件中,可以通过抑制聚集效应实现蓝光发射,其最大外量子效率达到 2.1%。

柔性侧链的性质(包括类型、数量和位置)对于调控盘状液晶材料的自组装行为、热稳定性以及光电性能具有重要作用。Asmita 等人^[18]在研究分子有序度对电荷传输的影响及其与介电性能的关系时发现,随着连接到苯并菲核心的烷基链中碳原子数(n)的增加,空穴迁移率呈现降低趋势。Chien 等人^[19]通过侧向取代策略成功制备了改性盘状液晶材料,这些材料表现出更低的转变温度和更宽的向列相范围。通过在六苯基乙炔苯核心的一个侧臂上进行侧向取代,增强了外围的分子间作用力,从而稳定了现有的向列相并防止了柱状相的形成。

2.2 盘状液晶相类型

盘状液晶分子形成的液晶相态主要有两种类型:向列相和柱状相。在盘状向列相中,分子展现出定向有序排列,但缺乏长程有序性。柱状相是一种具有二维位置序的液晶相态,大多数盘状液晶会形成柱状相。在柱状相中,液晶基元可能呈现有序、无序或倾斜等不同的堆积方式。柱状相的亚型取决于柱的二维晶格结构,主要包括矩形(Col_{rec})、四方(Col_{squ})、六方(Col_{hex})和斜方(Col_{obli})柱状相等。例如,含有 1,3,4-恶二唑环和烷氧基链的化合物表现出六方柱状相,具有高发射量子产率、优异的电子迁移率和良好的热稳

定性^[20-21]。

盘状液晶液晶相态的另一个特点是其内部排列容易受到外界刺激的影响^[22]。因此,通过对液晶相态的取向调控,可以实现对材料特性的精确调控。常用的取向调控方法主要有机械力^[23]、表面诱导^[24]、外场辅助^[25]和剪切取向^[26]等。一些盘状液晶分子在机械力刺激下可以实现不同液晶相之间的转变,进而会导致发射颜色发生变化^[27]。2011 年,Kato 及其团队^[28]设计了一种新型刺激荧光变色盘状液晶材料,选择了 9,10-双(苯乙炔基)蒽(BPA)作为荧光核心。该液晶材料由哑铃形蒽衍生物和树枝状化合物组成,可以通过热和机械刺激触发 3 种可切换的荧光颜色(黄色、绿色和红橙色)。

3 发光性能

3.1 荧光发光

荧光发射是一种常见的光致发光过程,其特征是电子快速返回基态。在发光盘状液晶中,激发态电子通过辐射跃迁快速返回基态,在此期间释放的能量形成光子,从而产生荧光。荧光的一个关键特征是发射光的快速衰减,其典型寿命范围为纳秒到微秒。对于盘状液晶荧光发射的研究可以追溯至 1989 年,Catalano 等人^[29]研究了荧光探针(如芘衍生物)在盘状液晶向列相中的取向有序性^[30]。此后,Kummar 等人致力于开发具有大芳香核心的盘状液晶化合物并探究了其荧光性能,例如三环喹啉^[31]、六烷氧基三环喹啉^[32]等。这些研究表明,更大的内核结构可以实现更有效的荧光发光,这为后续在设计 and 合成新型发光内核方面提供了重要指导。

3.1.1 传统发光分子构建新型发光盘状液晶

当前发光盘状液晶的研究重点依旧在于探索具有形成盘状液晶潜力的新型发光内核,并致

力于优化现有发光内核的性能,以提升其在光电应用中的效率和稳定性。新型发光内核的设计策略之一在于增强发光盘状核的共轭系统,其关键理论在于,较强的共轭系统能够降低分子的能隙,从而提升发光效率和改变发光颜色。一方面的研究工作主要集中于通过扩大刚性发光核以增强共轭系统。Geerts 等人^[33]的研究表明,随着多环芳烃(PAHs)芳香核中碳原子数量的增加,即共轭内核的增大,吸收峰的最大值会向红端移动约 2 nm,同时吸收带也会变宽。另一方面的研究工作主要是通过改变分子扭曲几何形状以实现共轭长度增加,进而增强共轭系统。2023年, Tian 等人^[34]合成了一种新型三臂盘状液晶分子,该分子倾向于扭曲出核心平面以适应六方柱状相中的有序分子堆积,从而产生亮绿色发射,而介晶荧光团的分子内平面化会导致共轭长度增

加^[35],从而实现了从绿光到黄光的热致红色发射,如图 2(a)所示。

新型发光内核的另一个更为简洁的设计策略是在常见的盘状核心上引入荧光团。Golemme 小组^[36]利用点击化学反应,合成了包含传统荧光基团香豆素的盘状液晶,引入的香豆素单元在受到光激发时能向卟啉核心传递能量,这种能量转移使卟啉核心产生荧光发光。此外,研究表明,许多传统的荧光团如苯乙烯^[37-38]、二苯乙炔^[39]、咪唑和三唑^[40]以及噻吩^[41]可以连接到三嗪核心以获得发光盘状液晶。如图 2(b)所示,在发光盘状液晶的发展中,除了传统的荧光团外,一系列新型荧光团被陆续开发出来。Achalkumar 等人^[42]在三(N-亚水杨基苯胺)(TSANs)上不对称取代引入 1,3,4-恶二唑得到新型盘状液晶分子,如图 2(c)所示,其在溶液中和稳定的柱状六方相中表现出

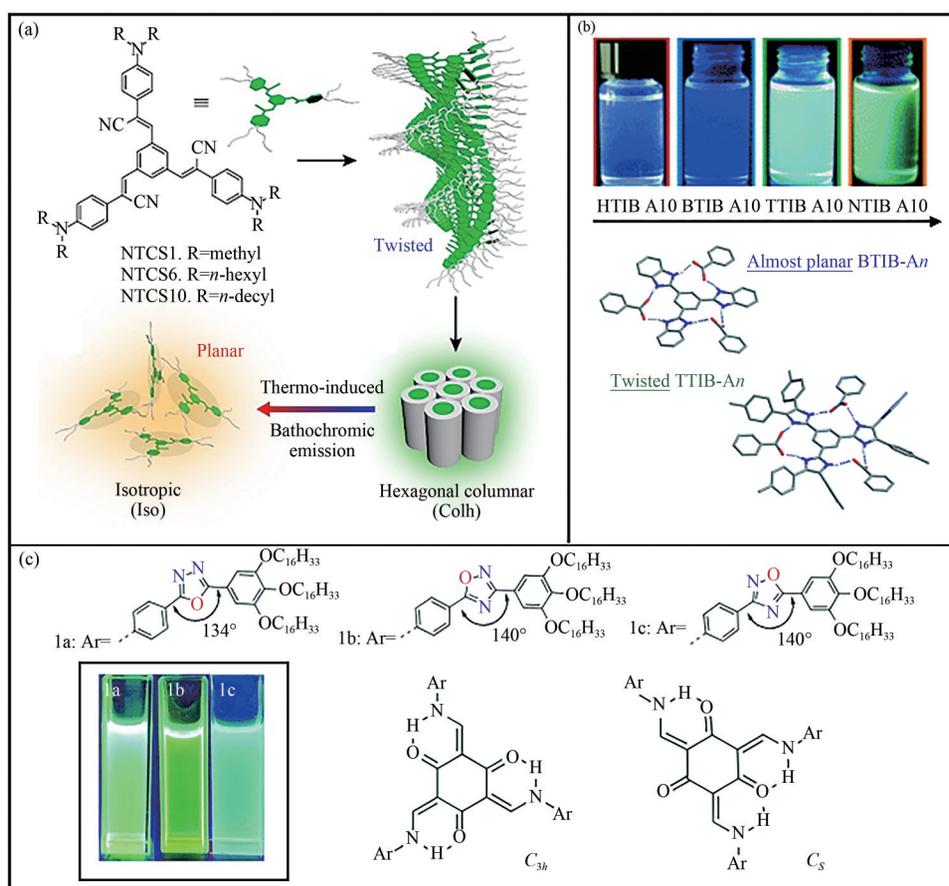


图 2 (a) 扭曲构象的盘状液晶分子内平坦化^[34]; (b) 具有不同 π 共轭长度的扭曲盘状分子的荧光特性^[35]; (c) TSAN 的 3 种异构体的分子结构及其在紫外线照射下的发光颜色^[42]。

Fig. 2 (a) Intramolecular planarization of discotic liquid crystal in twisted conformations^[34]; (b) Fluorescence properties of twisted discotic liquid crystals with different π conjugation lengths^[35]; (c) Molecular structures of the three regioisomeric TSANs and their luminescent color with UV illumination^[42].

绿蓝色发射。Yang 的团队^[43]构建了以苯并菲单元为核。分子外围带有硼二吡咯甲烷(BODIPY)单元的两新型盘状液晶化合物。这些化合物不仅展现出了高荧光量子产率,而且相较于其 BODIPY 前体,具有更大的斯托克斯位移。

3.1.2 聚集诱导发射分子构建新型发光液晶

仅仅在传统发光分子的基础上开发新型发光内核并不足以满足当前材料的性能需求。当前挑战在于难以在固态中实现高效的发光特性,主要原因是传统构筑策略中发光盘状液晶和大多数发光分子一样,在聚集时会出现荧光淬灭(aggregation-caused quenching, ACQ)现象^[44]。为了克服这一挑战,研究者们提出了新的策略:在分子设计中引入具有聚集诱导发射(Aggregation-Induced Emission, AIE)特性的分子^[45]。这些 AIE 分子在溶液状态下不发光或发光很弱,但在聚集状态下(如在固态或高浓度溶液中)发光显著增强。该现象最初于 2001 年由唐本忠等人^[46]在研究 1-甲基-1,2,3,4,5-五苯基噻咯的光学性质时发现并命名。这种现象通常与分子的运动受限有关,非辐射弛豫路径被抑制,从而提高了发光效率^[47]。迄今为止,可用于发光盘状液晶的 AIE 分子主要基于少量已知的荧光团,包括氰基二苯乙烯、二苯乙炔、四苯乙烯等。以氰基二苯乙烯为例,Bala 等人^[48]合成了含有氰基二苯乙烯荧光基团的盘状液晶材料,其具有 AIE 活性,在薄膜状态下表现出天蓝色荧光发射。Zhao

等人^[49]采用经典的 Knoevenagel 和 Suzuki 偶联反应合成了具有氰基二苯乙烯盘状液晶化合物,该化合物在溶液和薄膜状态下均具有优异的荧光发射,特别是在薄膜状态下表现出明显的聚集诱导发射增强效应,最大荧光强度比初始值提高了 4.2 倍,有效克服了盘状液晶分子聚集诱导猝灭的缺点。

在发光盘状液晶材料中,四苯乙烯(tetraphenylethylene, TPE)作为荧光基团的发光体是一类备受关注的 AIE 材料。2001 年, Laschat 及其同事^[50]首次报道了基于 TPE 的液晶材料,但这些材料的 AIE 特性尚未被揭示。经过十余年的研究, Tang 等人^[51]首次报道了具有 AIE 特性的 TPE 基液晶材料,并对其结构设计进行了详细阐述。2018 年, Yang 等人^[52]报道了一类 TPE 基盘状液晶材料,并证实了这些材料具有柱状相。在上述研究基础上,一些新型 AIE 活性分子被陆续开发出来。2021 年, He 等人^[53]设计并合成了两种 AIE 活性化合物,它们在粘稠固体状态时表现出强烈的荧光发射特性,此时最大发射波长约为 540 nm,长于其在 THF/H₂O 混合液($f_{H_2O}=10\%$)中的发射波长,如图 3(a)所示。进一步的,为提高室温下发光盘状液晶的荧光强度, Yang 等人^[54]合成了两类以四苯基噻吩为核的 AIE 发光盘状液晶,其分子构成如图 3(b)所示。这些化合物不仅表现出良好的热稳定性和窄带隙特性,还展现出显著的荧光增强行为,即在聚集状态下的

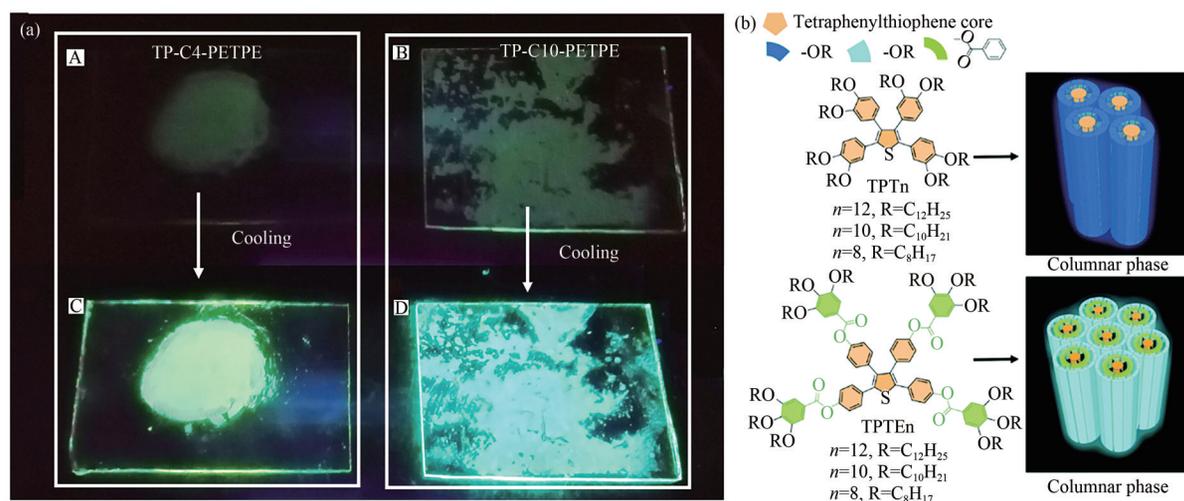


图 3 (a) 两种 TPE 基盘状液晶涂层(粘稠固态)在玻璃上的荧光性能^[52]; (b) 两种新型 AIE 活性盘状液晶的分子构成^[54]。
Fig. 3 (a) Fluorescence performance of two TPE-based discotic liquid crystals (viscous solid) coatings on glass^[52]; (b) Molecular composition of two novel AIE-activated discotic liquid crystals^[54].

荧光发射强度显著高于其在溶液中的发射强度, 荧光增强达到 105~180 倍。2024 年, Tang 等人^[55]探究了蓝相液晶体系中 AIE 分子的荧光性能的影响因素。他们将具有 AIE 特性的液晶添加到蓝相液晶体系中^[56], 并对复合体系的荧光性能进行了深入研究。结果表明, 调整手性添加剂的比例也可以控制荧光增强效应及其荧光强度的改变, 为新型 TPE 核心的 AIE 盘状液晶分子的设计与合成提供了新的思路。

3.1.3 利用超分子自组装构建发光液晶

超分子自组装是指通过分子间的非共价相互作用力(如氢键、范德华力、 π - π 相互作用等), 分子自发、有序地组装成特定结构的过程, 这种自组装过程通常是可逆且高度可控的。目前, 基于此策略的发光盘状液晶主要是通过超分子作用力: 氢键作用制备而成, 该氢键策略最早由 Kato、Fréchet^[57-58]和 Lehn^[59]提出。在早期研究中, Para-

schiv 等人^[60]合成了一种新型的柱状液晶材料, 该材料通过分子间氢键稳定化, 形成了一种不结晶的六方柱状相(Col_h)。该材料成功稳定了苯并菲单元的柱状排列, 同时保持了液晶相的易加工性, 并获得了高电荷载流子迁移率。此后, Tian 等人^[35]设计并合成了不同的荧光团核心, 与 3,4,5-三烷氧基苯甲酸通过氢键相互作用, 自组装形成发光盘状液晶复合物, 具有宽液晶相范围、高热稳定性和可调节的荧光发光特性。受上述工作的启发, Yang 等人^[61]设计并合成了一系列带有柔性长脂肪链的氢键互补化合物, 其组装过程如图 4(a)所示, 并通过筛选合适的氢键互补化合物, 用于构建三聚氰胺核超分子盘状液晶材料。此后, Huang 等人^[62]还报道了一种氢键配合物, 其在室温下具有矩形和六方柱状相, 并且由于螺旋柱状组织而表现出超分子光学活性。

Kato 等人^[63]的研究表明, 离子的存在会引起

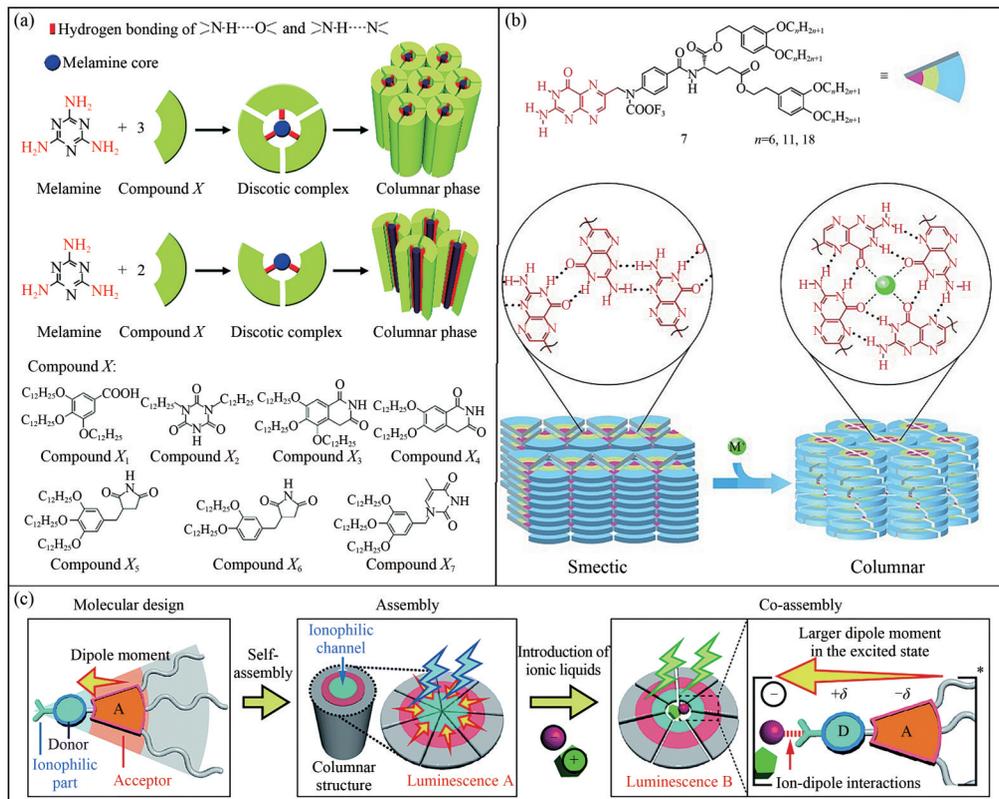


图 4 (a) 氢键诱导的三聚氰胺核超分子盘状液晶示意图及相关分子结构^[61]; (b) 离子的存在引起氢键模式的变化, 导致近晶状结构变为盘状结构^[63]; (c) 两亲液晶 π -共轭供体-受体发光材料的设计策略示意图^[64]。

Fig. 4 (a) Schematic illustration of hydrogen-bonding induced melamine-core supramolecular discotic liquid crystals and related the molecular structures^[61]; (b) Presence of an ion induces a change in the hydrogen-bonding pattern, leading to a transition from a smectic structure to a discotic structure^[63]; (c) Schematic illustration of the design strategy for amphiphilic liquid-crystal π -conjugated donor-acceptor luminescent materials^[64].

氢键模式的变化,导致近晶状结构变为盘状结构,如图4(b)所示,这为构建新型超分子发光盘状液晶提供了新的思路。与此前的超分子自组装的策略不同,在分子设计中引入具有内部电荷转移特性的两亲性结构,可以进一步通过改变外部条件(如溶剂极性、温度和离子液体类型、比例等)来有效调控盘状液晶分子的发光性能,为开发响应外界刺激的智能材料提供了新的途径。Kato等人^[64]的研究表明,他们通过向噁二唑基柱状液晶中掺入离子液体,成功利用极性分子稳定激发态分子内的电荷转移,将发光从浅蓝色调节至蓝绿色,其设计策略如图4(c)所示。通过对氢键自组装的发光盘状液晶的研究进展的探讨,可以明显看到此类策略存在一定的局限性。与共价键相比,超分子作用力通常较弱,限制了它们在需要高强度或稳定性的应用中的使用。此外,由于超分子作用力的多样性和条件依赖性,预测其行为和相互作用更具挑战性。Pal等人^[65]设计并合成了基于庚嗪的柱状液晶材料,具有双极性电荷传输能力,并通过X射线实验证明该化合物是通过氢键自组装形成。Zhao等人^[66]以1,3,5-均三嗪为电子受体刺激响应发光单元,苯并菲为电子给体液晶基元,通过钯催化Suzuki-Miyaura交叉偶联反应,简单高效地合成了兼具多刺激响应与液晶性的一系列盘状液晶分子,在90%含水量的溶液呈现耀眼的青绿色荧光。

3.2 磷光发光

金属配位液晶在发光盘状液晶这一领域展现出了独特的吸引力。金属配位液晶的研究历史可追溯至1855年,当时Heintz首次发现了十四烷酸镁的两个熔点现象^[67]。1992年,Lai^[68]和Lelj^[69]报道了第一批真正的金属配位盘状液晶化合物,包括双核三酮配合物以及镍、钴和锌的八烷基硫基四氮杂吡啶配合物,这些盘状液晶材料展现出磷光发光的特性。磷光发光与荧光发光不同,其过程主要包括电子从激发态单重态(S_1)通过系间窜跃(intersystem crossing, ISC)到达三重态(T_1),然后再返回到基态单重态(S_0)。由于从三重态到基态的跃迁是自旋禁阻的,电子在激发态的停留时间较长(从毫秒到数小时),因此磷光发光的寿命较长。目前,基于铂、钯、铱、镧系元素、金、银和锌等金属离子的发光盘状液晶已经取得了

一定的研究进展^[70-71]。

然而,开发高效的金属配位盘状液晶作为发光材料仍然存在技术挑战,主要由于ACQ效应会导致其在固相中发光效率降低^[72]。本文主要介绍一种具有代表性的磷光盘状液晶:基于铂的发光盘状液晶。这类材料具有高发光效率和稳定性,在有机光电应用中展现出巨大的应用潜力。早期对铂金属盘状液晶的研究主要集中在其基本发光性质的探索上。Kozhevnikov等人^[73]首次展示了三齿配体铂配合物在液晶状态下的高效磷光发射,并揭示了分子有序排列对发光特性的影响。更进一步,这类材料的发射特性受到温度的控制,并且通过热循环可以恢复到初始状态。近年来的研究热点主要集中在分子有序性、配体设计以及聚集诱导发光等方面。

具体来说,液晶态下的分子有序排列是实现高效磷光发射的关键。Hao等人^[74]通过调整铂(II)配合物与烷氧基链(如十二烷氧基和十六烷氧基链)的聚集行为,设计出了绝对量子产率高达88%的发光盘状液晶,如图5(a)所示。此前,基于有机AIEgens的铂(II)配合物盘状液晶的绝对量子产率较低,且在提高量子产率方面的研究相对较少。在这种方法中,方形平面核心的几何形状极大地增强了分子间的Pt-Pt和 π - π 相互作用,组装的铂(II)配合物可以形成高度有序的柱状结构。另一方面,通过预先设计具有不同柔性外围的复杂核心,可以获得不同的液晶相态,例如六方柱状和矩形柱状相。这些不同的液晶相态为研究分子有序性与发光性能之间的关系提供了新的视角,并为开发新型高性能发光材料提供了可能。

其次,通过精心设计不同配体和调节分子结构,可以显著地影响铂金属配合物的液晶性和发光特性。具体来说,不同配体的引入主要通过其类型和电子特性来影响铂金属盘状液晶的性质。例如,芳香配体如吡啶、噻吩和苯并咪唑等,由于其结构的刚性和 π - π 相互作用,能够增强分子的平面性和堆积性,从而促进柱状液晶相的形成。而卤素配体,如氯和溴,通过诱导重原子效应,可以提高配合物的磷光效率。在电子性质方面,电子给体配体(如氨基)和电子受体配体(如硝基)能够调节配合物的电子结构,进而影响其光吸收和发射特性。Liao等人^[75]开发了一系列基于吡啶

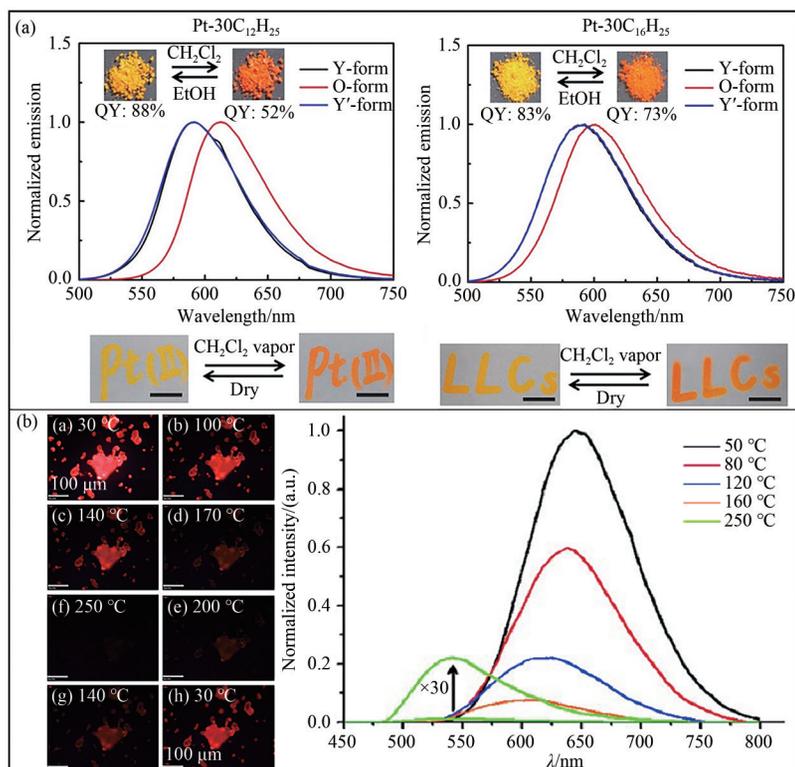


图5 (a) 两种不同的铂(II)配合物盘状液晶分子在不同固态下分别用不同的有机溶剂蒸汽气氛处理时的发射光谱及其在环境光下的可逆图案颜色变化^[74]; (b) 基于 fppz 的络合物在不同温度下的发光图像及其薄膜在不同温度下的发射光谱^[75]。

Fig. 5 (a) Emission spectra of two different Pt(II) complex discotic liquid crystals when fumed with different organic solvent vapors in different solid states, and their reversible gas color patterns observed under ambient light^[74]; (b) Temperature-dependent emission images of complexes under mercury lamp illumination and temperature-dependent emission spectra of their films based on fppz^[75].

基吡唑盐螯合物(fppz)的发光金属液晶材料,通过在配体上引入6个烷氧基苯基使铂配合物在较宽的温度范围内产生柱状相,并在约520 nm处显示出绿色磷光,同时由于Pt-Pt相互作用,在630~660 nm处观察到红色磷光,如图5(b)所示。

另外值得注意的是,光电器件的制造通常涉及气相沉积或旋涂等技术,这些技术对发射极的热稳定性提出了严格的要求。铂配位发光盘状液晶在应用中可能遭遇与ACQ现象类似的问题,严重限制了它们在OLED等领域的应用。因此,开发具有AIE性能的铂配位发光盘状液晶对于拓展其应用范围具有重要的意义,并在近年来取得了一定的进展。相比于其他具有AIE性能的金属配合物,如AIE铱(Ir)^[76]、AIE铼(Re)^[77]、AIE金(Au)^[78]、AIE锌(Zn)^[79]和AIE铜(Cu)配合物,AIE铂配合物由于其配体数量、配体结构、氧化态以及配位模式的差异,展现出了独特的光

电性质变化。Xiang等人^[80]在2018年报道了一种席夫碱-环金属化铂(II)络合物,该络合物中心具有较大的空间位阻,导致运动受限,在混合物或固态中表现出不寻常的近红外聚集诱导的磷光。通过在席夫碱框架中引入具有显著空间位阻的官能团,可以有效抑制 π - π 堆积,从而减弱ACQ效应,同时促进AIE性能的实现。2019年,Lodeiro^[81]等人报道了一种具有不对称双吡唑结构的环甲基化铂(II)配合物,其柱状堆叠是通过分子间的Pt-Pt相互作用形成的。该铂配位盘状液晶发光行为可通过外部刺激(例如温度、压力或蒸汽或溶剂的存在)控制。然而,现有的AIE铂(Pt)配合物研究仍存在一定的局限性。在研究AIE铂配合物的理化性质时,需要深入探讨聚集体环境、溶剂体系、浓度以及刺激响应条件的变化对分子性质的影响,以便进一步优化和提升其在光电器件中的应用潜力。

4 发光盘状液晶的应用

发光盘状液晶材料凭借其高量子效率、稳定发光、有序结构和可加工性等优势,在电子显示设备中展现出潜在的应用前景。本文主要讲述发光盘状液晶在LCD、OLED等领域的应用情况。

4.1 在LCD中的应用

发光盘状液晶有望成为下一代高性能显示技术的核心材料,广泛应用于电子显示设备中。发光盘状液晶展现出在宽广的温度范围和长时间的光照条件下保持其发光特性的稳定性,这种稳定性对于确保显示设备的可靠性能和延长其使用寿命至关重要。

一方面,发光盘状液晶具有优异的发光特性,即在受到刺激后能够迅速发射出光,其发光效率通常较高,且发光颜色可以通过分子结构的

设计进行调控。在传统LCD中,背光系统是通过冷阴极荧光灯或发光二极管来提供光源,然后经过偏振片、液晶层和滤光片调制光线,最终形成图像^[82]。优异的发光特性使得发光盘状液晶能够直接在LCD中作为发光层使用,从而取代传统的背光源系统或者与其结合,进一步减少背光模块的体积和能耗,同时提升亮度、对比度和色彩表现力。Kumar 等人^[83]发现基于三环喹唑啉(TCQ)的盘状液晶可以作为荧光探针用于光学成像,其能够在不同极性的环境中发出不同颜色的光(图6(a)),可以提高LCD的对比度和色彩表现力。此外,与传统液晶材料相比,发光盘状液晶在温度变化和环境条件波动下具有更好的稳定性。Tian 等人^[84]成功地将电导率和发光性能整合到基于三氰基三苯乙烯(TCS)的柱状盘状液晶中,如图6(b)所示,由于氢键的协同作用,展现出了热致变色发光调节行为,这为设计

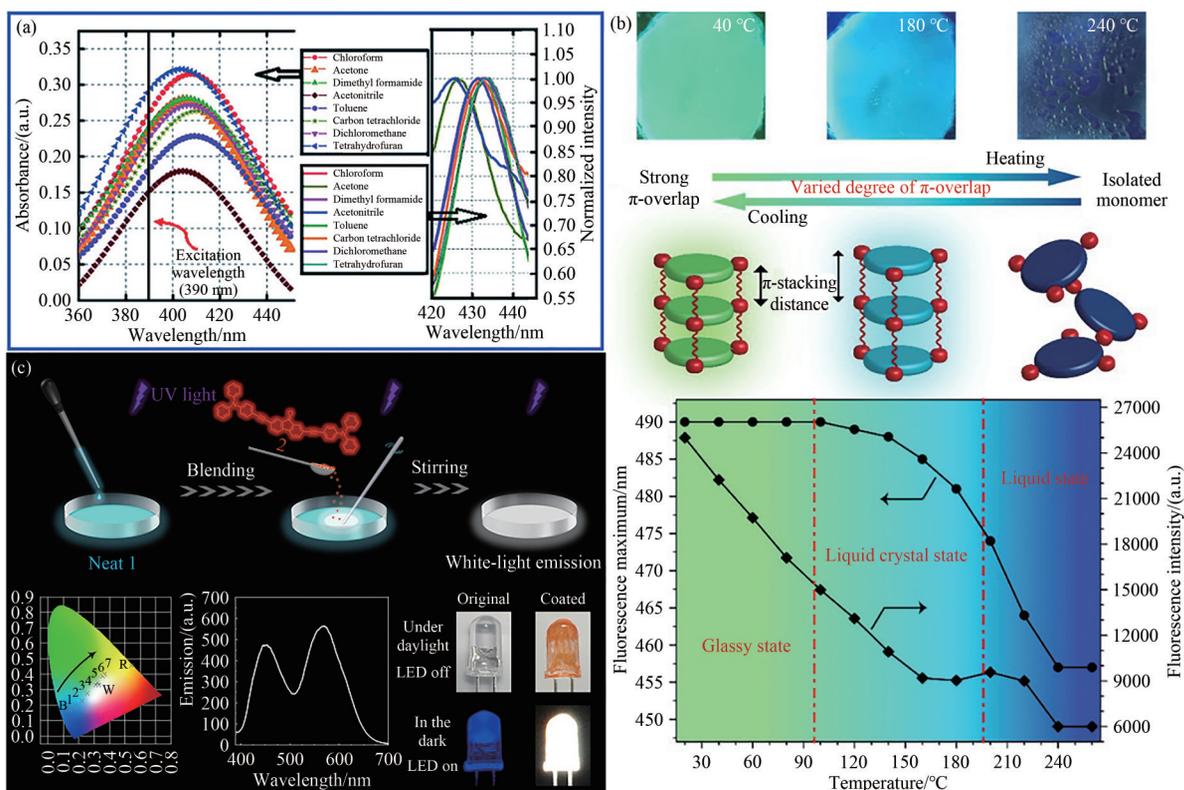


图6 (a) TCQ液晶在各种极性溶剂中的紫外-可见(左)和荧光(右)光谱^[83]; (b) 基于TCS的柱状液晶的温度依赖性发光特性^[84]; (c) 室温发光盘状液晶材料实现白光发射的颜色调整过程及其荧光性能的评价和应用^[85]。

Fig. 6 (a) UV-Vis (left) and fluorescence (right) spectra of the TCQ liquid crystal in various polar solvents^[83]; (b) Temperature-dependent luminescence properties of TCS-based columnar liquid crystals^[84]; (c) Evaluation and application of color-tuning process and its fluorescence properties for achieving white light emission from room temperature-emitting discotic liquid crystal materials^[85].

具有动态发光调节性能的多功能 LCD 提供了新的视角。

另一方面,发光盘状液晶的分子具有高度的各向异性,能够在电场或表面作用下形成有序的排列。通过精确控制这种分子取向^[86],发光盘状液晶可以有效地控制光的传播方向和偏振状态,能够用于改善 LCD 的视角特性^[87]。传统的 LCD 普遍面临能量效率不足和视角受限的问题^[88]。1999 年,Chandrasekhar 等人^[89]的实验研究表明,在高温下有类似向列盘状材料的设备具有宽广的对称视角。Kumar 等人^[90]的研究表明,含盘状向列相液晶的 LCD 具有视角宽且对称等优点,在任何方向上对比度都不会反转。富士胶片实验室^[91]使用盘状向列相液晶和棒状向列相液晶混合排列形式制备的负双折射光学补偿薄膜,扩大了常用的 LCD 的视角并提高了对比度,实现了商业化应用。此外,Yu 等人设计并合成了一种新型的室温发光盘状液晶材料,该材料通过掺杂红色荧光体实现了白光发射,如图 6(c)所示。由于其盘状液晶特性,该材料不仅可通过溶液加工,还与柔性基底兼容,成为下一代柔性和可穿戴显示技术的理想选择。

4.2 在 OLED 中的应用

相较于无机半导体,以共轭有机分子或者聚合物为主体的有机半导体材料展现出合成与制造的低成本优势,同时具备轻质、柔性^[92]等特性。盘状液晶作为具有大共轭结构的有机分子,是发展新型高效有机电子器件的关键材料,特别是柱状相盘状液晶可以自组装成柱状堆叠,充当一维分子线,显著改善 OLED 中的电荷传输。如图 7(a)所示, OLED 器件中用作发射极层的盘状液晶,其柱状自组装内的电荷载流子运动是通过“跳跃过程”实现的,从而促使空穴和电子更好地重组。这种双功能材料既是光发射器,又是电荷输送器^[93],与三层器件相比,双层器件的效率更高。

如图 7(b)所示,Dhingra^[94]和同事开发了一种基于三炔基苯核心的盘状聚合物,该分子在室温下表现出盘状向列相,可以作为 OLED 器件的纯深蓝色发光元件。Pal 等人^[95]报导了基于 3 对称 1,3,5-三(噻吩-2-基)苯的高光致发光盘状液晶衍生物,如图 7(c)所示,在溶液加工的 OLED 中展现出极高的外部量子效率和深蓝色发光。Chen 等人^[96]通过可逆加成断裂链转移聚合反应,合理地进行大分子工程,制备了一系列丁氧基取

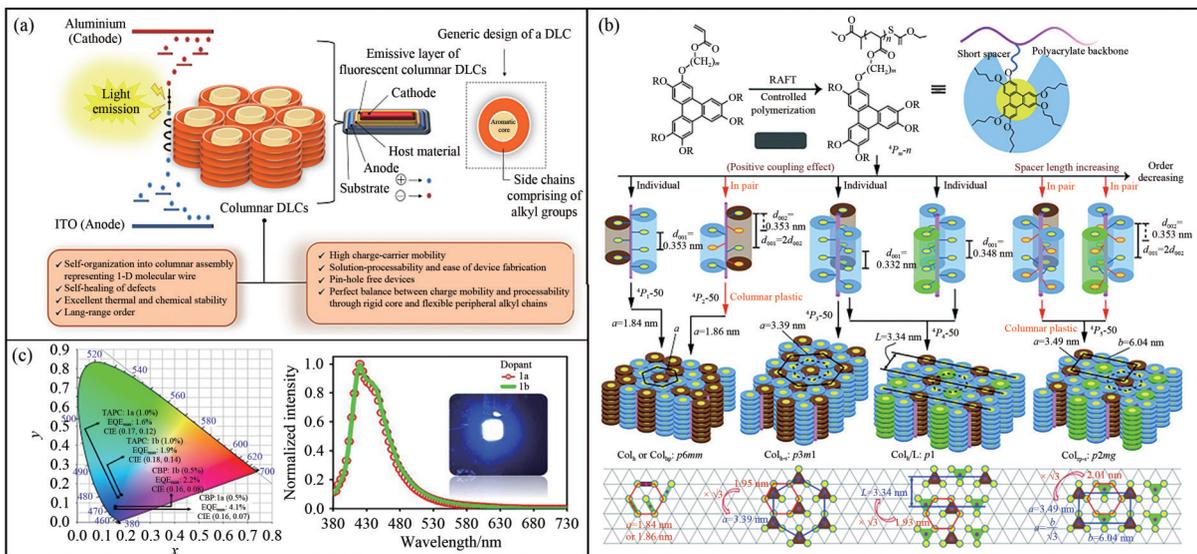


图 7 (a) 促进光致发光器件中电荷载流子迁移和再组合的盘状液晶的结构和自组装示意图^[93]; (b) 侧链盘状液晶聚合物的自组织超结构示意图^[94]; (c) 基于两种不同主体制成的 OLED 器件的 CIE 色谱图及其电致发光光谱(插图:显示深蓝色发射的器件照片)^[95]。

Fig. 7 (a) Schematic structure and self-assembly of discotic liquid crystals that promote charge carrier transport and recombination in photoluminescent devices^[93]; (b) Schematic representation of the self-organized superstructure of the side-chain discotic liquid crystal polymer^[94]; (c) CIE chromatograms of OLED devices made using two different host materials and their electroluminescence spectra (inset: device photograph showing deep blue emission)^[95].

代的三苯乙烯基侧链盘状液晶聚合物,其可以实现超过 $0.1\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高载流子迁移率,该材料有望提高OLED中电子和空穴的传输效率以及电致发光效率。

5 总结与展望

发光盘状液晶因其独特的分子结构和自组装行为,在有机光电领域具有广泛的应用潜力。从分子设计到发光性能的优化,再到在有机电子器件中的应用,发光盘状液晶的研究正在不断深入。在分子结构设计方面,通过增大共轭系统、引入AIE基元以及利用氢键等超分子作用力进行自组装等策略,可以有效提升发光盘状液晶的发光效率及稳定性。在盘状液晶相态中,柱状相和向列相具有独特的分子排列方式,这些相态的调控对发光盘状液晶及有机光电器件性能提升具有重要价值。发光盘状液晶的荧光发射具有快速衰减的特性,而磷光发射则拥有较长的寿命,使得不同类型的发光盘状液晶在有机光电器件中的应用前景广阔,能够满足不同显示需求。发光盘状液晶不仅可以作为发光层直接用于LCD,还可以作为固态发射器用于OLED,从而提高显示设备的亮度、对比度和色彩表现力。

未来的研究工作应聚焦于发光盘状液晶的

分子结构优化、制备工艺的改良以及器件集成策略的开发,提高材料的可加工性、稳定性及发光效率,同时降低制备成本,以进一步推动发光盘状液晶在有机光电器件领域的商业化应用。首先,借助机器学习模型设计具有高性能的发光盘状液晶,通过人工智能筛选潜在的分子系统,选择性地合成最有前途的目标分子,并通过自组装能力、载流子迁移率和发光效率等关键参数进一步评估材料的应用潜力。同时,需要进一步优化发光盘状液晶的合成方法,开发可以应用于工业化生产的制造策略,确保材料的可加工性和稳定性,以推动工业化应用。此外,利用软件辅助设计开发基于发光盘状液晶的新型有机电子器件,简化器件结构,提高器件效率,并显著减少成本、时间和劳动力,进一步开发更经济有效的溶液加工制造技术,加深对溶液加工成型薄膜中盘状液晶分子的排列和取向的理解,以推动未来器件的实际应用。

总而言之,发光盘状液晶作为一种新型的光电功能材料,凭借其独特的分子结构和卓越的发光性能,为有机电子器件的创新研发提供了新的理念与机遇。随着材料科学和光电子技术的持续进步,发光盘状液晶将在未来的高性能显示器件和光电子器件领域扮演更加关键的角色。通过不懈的研究努力和技术革新,发光盘状液晶有潜力在实际应用中开拓更广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] DE ROCCO A G. Mesophases: The physics of liquid crystals [J]. *Science*, 1974, 186(4170): 1199.
- [2] CHANDRASEKHAR S, SADASHIVA B K, SURESH K A. Liquid crystals of disc-like molecules [J]. *Pramana*, 1977, 9(5): 471-480.
- [3] 慕斌,陈科扬,谌东中. 盘状苯并菲丙烯酸酯中间体的合成与液晶相行为研究[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(6): 424-432.
MU B, CHEN K Y, CHEN D Z. Synthesis and liquid crystalline phase behavior investigation of triphenylene acrylate intermediates [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 424-432. (in Chinese)
- [4] HO C H, LIN Y S, HUNG C C, *et al.* Discotic liquid crystals with highly ordered columnar hexagonal structure for ultraviolet light-sensitive phototransistor memory [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(2): 1067-1076.
- [5] LIU L, LI J Y, ZHU H, *et al.* A novel multifunctional C_3 -symmetric triphenylamine discotic liquid crystal: synthesis, columnar self-assembly, organogel behavior, selective detection of PA and application in Si solar cells [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(18): 6450-6456.
- [6] 刘迪萱,钟锦耀,唐彪,等. 柔性印刷OLED研究进展[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(2): 217-228.
LIU D X, ZHONG J Y, TANG B, *et al.* Research progress of flexible and printed OLED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 217-228. (in Chinese)

- [7] VORLÄNDER D. Einfluß der molekularen Gestalt auf den kristallinisch-flüssigen Zustand [J]. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1907, 40(2): 1970-1972.
- [8] 李世伟, 胡旭, 罗晨潇, 等. 含氟三苯乙炔异硫氰酸酯液晶合成及其微波性能[J]. *应用化学*, 2023, 40(12): 1682-1692.
LI S W, HU X, LUO C X, *et al.* Synthesis and microwave properties of fluorinated triphenylacetylene isothiocyanate liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(12): 1682-1692. (in Chinese)
- [9] 张昭永, 李谦, 王大霖, 等. 含侧链盘状苯并菲和棒状偶氮苯的二嵌段液晶共聚物的可控合成及其光物理性质[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1340-1352.
ZHANG Z Y, LI Q, WANG D L, *et al.* Controlled synthesis and photophysical properties of liquid crystalline diblock copolymers with side-chain discotic triphenylene and calamitic azobenzene mesogens [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1340-1352. (in Chinese)
- [10] TAO L, XIE Y, ZHAO K X, *et al.* Triphenylene trimeric discotic liquid crystals: synthesis, columnar mesophase and photophysical properties [J]. *New Journal of Chemistry*, 2024, 48(26): 12006-12014.
- [11] SUN H Y, ZHAO Z, XING Y M, *et al.* Charge separation to facilitate the conversion of copper-phenylacetylide from aggregation-induced emission to efficient photocatalysis [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(9): 2311591.
- [12] PATRA A, BEHERA P K, SHAH A, *et al.* Exploring the ambipolar charge carrier mobility, mesomorphic, and gel properties in nitrile extended quinoxaline and phenanthro [*a*]phenazine discotic liquid crystals [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(7): 4891-4902.
- [13] SHARMA V S, SHARMA V S, GANGA V S R, *et al.* Room-temperature blue-light-emitting liquid crystalline materials based on phenanthroimidazole-substituted carbazole derivatives [J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(47): 22193-22201.
- [14] BÉGUIN A, BILLARD J, DUBOIS J C, *et al.* Discotic mesophases potentialities [J]. *Journal de Physique Colloques*, 1979, 40(C3): C3-15-C3-16.
- [15] 隋岩, 郭剑, 李正强, 等. 苯并菲类盘状液晶的合成及应用[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(1): 40-46.
SUI Y, GUO J, LI Z Q, *et al.* Synthesis and application of triphenylene discotic liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 40-46. (in Chinese)
- [16] FENG C, DING Y H, HAN X D, *et al.* Triphenylene 2, 3-dicarboxylic imides as luminescent liquid crystals: mesomorphism, optical and electronic properties [J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 139: 87-96.
- [17] BALA I, YANG W Y, GUPTA S P, *et al.* Room temperature discotic liquid crystalline triphenylene-pentaalkynylbenzene dyads as an emitter in blue OLEDs and their charge transfer complexes with ambipolar charge transport behaviour [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(19): 5724-5738.
- [18] SHAH A, SINGH D P, DUPONCHEL B, *et al.* Molecular ordering dependent charge transport in π -stacked triphenylene based discotic liquid crystals and its correlation with dielectric properties [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 342: 117353.
- [19] CHIEN S C, CHEN H H, CHEN H C, *et al.* Stable, low-temperature discotic nematic superstructures by incorporating a laterally substituted sidearm in Hexakis(phenylethynyl)benzene discogens [J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(12): 1896-1902.
- [20] AHIPA T N, KUMAR V, ADHIKARI A V. New columnar liquid crystal materials based on luminescent 2-methoxy-3-cyanopyridines [J]. *Structural Chemistry*, 2014, 25(4): 1165-1174.
- [21] HAN J. 1,3,4-Oxadiazole based liquid crystals [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 1(47): 7779-7797.
- [22] GUPTA R K, PATHAK S K, DE J, *et al.* Room temperature columnar liquid crystalline self-assembly of acidochromic, luminescent, star-shaped molecules with cyanovinylene chromophores [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(7): 1844-1852.
- [23] KUPFER J, FINKELMANN H. Nematic liquid single crystal elastomers [J]. *Die Makromolekulare Chemie, Rapid Communications*, 1991, 12(12): 717-726.
- [24] GELEBART A H, MULDER DJAN, VARGA M, *et al.* Making waves in a photoactive polymer film [J]. *Nature*, 2017, 546(7660): 632-636.
- [25] HERBERT K M, FOWLER H E, MCCRACKEN J M, *et al.* Synthesis and alignment of liquid crystalline

- elastomers [J]. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7(1): 23-38.
- [26] WANG M, WANG J, YANG H, *et al.* Homeotropically-aligned main-chain and side-on liquid crystalline elastomer films with high anisotropic thermal conductivities [J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(23): 4313-4316.
- [27] SAGARA Y, KOMATSU T, UENO T, *et al.* A water-soluble mechanochromic luminescent pyrene derivative exhibiting recovery of the initial photoluminescence color in a high-humidity environment [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(42): 5277-5284.
- [28] SAGARA Y, KATO T. Stimuli-responsive luminescent liquid crystals: change of photoluminescent colors triggered by a shear-induced phase transition [J]. *Angewandte Chemie*, 2008, 120(28): 5253-5256.
- [29] CATALANO D, CORRADO A, VERACINI C A, *et al.* Non-cylindrical symmetry of the ordering matrix of some spectroscopic probes in a lyotropic mesophase studied by ^2H N.M.R. spectroscopy [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 4(2): 217-221.
- [30] GÖLTNER C, PRESSNER D, MÜLLEN K, *et al.* Liquid-crystalline perylene derivatives as “Discotic Pigments” [J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1993, 32(11): 1660-1662.
- [31] KEINAN E, KUMAR S, SINGH S P, *et al.* New discotic liquid crystals having a tricycloquinazoline core [J]. *Liquid Crystals*, 1992, 11(2): 157-173.
- [32] KUMAR S, WACHTEL E J, KEINAN E. Hexaalkoxytricycloquinazolines: new discotic liquid crystals [J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1993, 58(15): 3821-3827.
- [33] SERGEYEV S, PISULA W, GEERTS Y H. Discotic liquid crystals: a new generation of organic semiconductors [J]. *Chemical Society Reviews*, 2007, 36(12): 1902-1929.
- [34] MU B, MA T S, ZHANG Z L, *et al.* Thermo-induced bathochromic emission in columnar discotic liquid crystals realized by intramolecular planarization [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2023, 29(27): e202300320.
- [35] MU B, QUAN X H, ZHAO Y, *et al.* Fluorophore core-engineered supramolecular discotic columnar liquid crystals with tunable fluorescent behavior [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2019, 3(8): 1671-1677.
- [36] CONCELLÓN A, TERMINE R, GOLEMME A, *et al.* High hole mobility and light-harvesting in discotic nematic dendrimers prepared *via* ‘click’ chemistry [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(10): 2911-2918.
- [37] MAJUMDAR K C, DE N, ROY B, *et al.* Synthesis and mesophase characterisation of a series of new triazine-based disc-shaped molecules [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(11): 1459-1464.
- [38] HOLST H C, PAKULA T, MEIER H. Liquid crystals in the series of 2,4,6-tristyryl-1,3,5-triazines [J]. *Tetrahedron*, 2004, 60(32): 6765-6775.
- [39] LEE C H, YAMAMOTO T. Synthesis and characterization of a new class of liquid-crystalline, highly luminescent molecules containing a 2,4,6-triphenyl-1,3,5-triazine unit [J]. *Tetrahedron Letters*, 2001, 42(24): 3993-3996.
- [40] BAI R K, LI S Q, ZOU Y F, *et al.* Synthesis and characterization of a trefoil-shaped liquid crystal based on 1,3,5-triazine with carbazole groups [J]. *Liquid Crystals*, 2001, 28(12): 1873-1876.
- [41] YASUDA T, SHIMIZU T, LIU F, *et al.* Electro-functional octupolar π -conjugated columnar liquid crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(34): 13437-13444.
- [42] PATHAK S K, NATH S, DE J, *et al.* The effect of regioisomerism on the mesomorphic and photophysical behavior of oxadiazole-based tris(*N*-salicylideneaniline)s: synthesis and characterization [J]. *New Journal of Chemistry*, 2017, 41(18): 9908-9917.
- [43] FENG H Y, GENG X T, LIN J R, *et al.* Novel fluorescent liquid crystals: synthesis, mesomorphism and fluorescence of triphenylene-Bodipy derivatives based on 1,3,5-triazine core [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(10): 1470-1476.
- [44] WANG Y F, SHI J W, CHEN J H, *et al.* Recent progress in luminescent liquid crystal materials: design, properties and application for linearly polarised emission [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(31): 7993-8005.
- [45] HONG Y N, LAM J W Y, TANG B Z. Aggregation-induced emission [J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(11): 5361-5388.
- [46] LUO J D, XIE Z L, LAM J W Y, *et al.* Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole [J]. *Chemical Communications*, 2001, (18): 1740-1741.
- [47] CHEN Y C, LAM J W Y, KWOK R T K, *et al.* Aggregation-induced emission: fundamental understanding and future developments [J]. *Materials Horizons*, 2019, 6(3): 428-433.

- [48] BALA I, KAUR H, MAITY M, *et al.* Electroluminescent aggregation-induced emission-active discotic liquid crystals based on alkoxy cyanostilbene-functionalized benzenetricarboxamide with ambipolar charge transport [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(3): 1163-1174.
- [49] 曾崇洋, 胡平, 汪必琴, 等. 氰基二苯乙烯桥联苯并菲二联体刺激响应盘状液晶: 合成、性质与应用[J]. *有机化学*, 2023, 43(9): 3287-3296.
- ZENG C Y, HU P, WANG B Q, *et al.* Cyanostilbene bridged triphenylene dyad stimuli-responsive discotic liquid crystal: synthesis, properties and applications [J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2023, 43(9): 3287-3296. (in Chinese)
- [50] SCHULTZ A, DIELE S, LASCHAT S, *et al.* Novel columnar tetraphenylethenes *via* McMurry coupling [J]. *Advanced Functional Materials*, 2001, 11(6): 441-446.
- [51] YUAN W Z, YU Z Q, LU P, *et al.* High efficiency luminescent liquid crystal: aggregation-induced emission strategy and biaxially oriented mesomorphic structure [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(8): 3323-3326.
- [52] JIANG S J, QIU J B, CHEN Y X, *et al.* Luminescent columnar liquid crystals based on AIE tetraphenylethylene with hydrazone groups bearing multiple alkyl chains [J]. *Dyes and Pigments*, 2018, 159: 533-541.
- [53] KONG X F, LUO R G, GONG H K, *et al.* Discotic liquid crystals with aggregation-induced emission properties based on tetraphenylethylene and triphenylene derivatives [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2021, 724(1): 26-37.
- [54] GUO L X, XING Y B, WANG M, *et al.* Luminescent liquid crystals bearing an aggregation-induced emission active tetraphenylthiophene fluorophore [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(16): 4828-4837.
- [55] YANG S Y, CHEN Y Y, KWOK R T K, *et al.* Platinum complexes with aggregation-induced emission [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(11): 5366-5393.
- [56] 郑成林, 孙莉, 王京霞, 等. 蓝相液晶逐层相变过程的表征与机理探究[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(12): 1679-1688.
- ZHENG C L, SUN L, WANG J X, *et al.* Characterization and mechanism investigation of layer-by-layer phase transition process in blue phase liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(12): 1679-1688. (in Chinese)
- [57] KATO T, FRECHET J M J. Stabilization of a liquid-crystalline phase through noncovalent interaction with a polymer side chain [J]. *Macromolecules*, 1989, 22(9): 3818-3819.
- [58] BRIENNE M J, GABARD J, LEHN J M, *et al.* Macroscopic expression of molecular recognition. Supramolecular liquid crystalline phases induced by association of complementary heterocyclic components [J]. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1989(24): 1868-1870.
- [59] FOUQUEY C, LEHN J M, LEVELUT A M. Molecular recognition directed self-assembly of supramolecular liquid crystalline polymers from complementary chiral components [J]. *Advanced Materials*, 1990, 2(5): 254-257.
- [60] PARASCHIV I, GIESBERS M, VAN LAGEN B, *et al.* H-bond-stabilized triphenylene-based columnar discotic liquid crystals [J]. *Chemistry of Materials*, 2006, 18(4): 968-974.
- [61] GUO L X, LIU Y H, WANG L, *et al.* Hydrogen-bonding induced melamine-core supramolecular discotic liquid crystals [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(35): 9165-9173.
- [62] HUANG Y J, NING L J, ZHANG X M, *et al.* Stimuli-fluorochromic smart organic materials [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(3): 1090-1166.
- [63] KATO T, MIZOSHITA N, KISHIMOTO K. Functional liquid-crystalline assemblies: self-organized soft materials [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, 45(1): 38-68.
- [64] MITANI M, YOSHIO M, KATO T. Tuning of luminescence color of π -conjugated liquid crystals through co-assembly with ionic liquids [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(38): 9972-9978.
- [65] BALA I, SINGH H, BATTULA V R, *et al.* Heptazine: an electron-deficient fluorescent core for discotic liquid crystals [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2017, 23(59): 14718-14722.
- [66] 曾崇洋, 胡平, 汪必琴, 等. 星型苯并菲-三嗪多刺激响应盘状液晶: 合成、性质与应用[J]. *化学学报*, 2023, 81(5): 469-479.
- ZENG C Y, HU P, WANG B Q, *et al.* Star-shaped triphenylene-triazine multi-stimuli responsive discotic liquid crystals: synthesis, properties and applications [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2023, 81(5): 469-479. (in Chinese)

- [67] HEINTZ W. Ueber die Fette [J]. *Journal für Praktische Chemie*, 1855, 66(1): 1-51.
- [68] LAI C K, SERRETTE A G, SWAGER T M. Discotic bimetallochromes: building blocks for the formation of new columnar arrangements of transition metals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1992, 114(20): 7948-7949.
- [69] LELJ F, MORELLI G, RICCIARDI G, *et al.* Discotic mesomorphism of 2,3,7,8,12,13,17,18-octakis (alkyl-thio) 5,10,15,20 tetraaza porphyrin and its complexes with some divalent transition metal ions Synthesis and characterization [J]. *Liquid Crystals*, 1992, 12(6): 941-960.
- [70] ZHAO L, YANG B, ZENG L W, *et al.* Tetradentate platinum(II) complexes: Synthesis, photophysical properties, liquid crystalline characteristics and charge transport behaviour [J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 164: 398-406.
- [71] KANG J S, PARK K M, LEE K H, *et al.* Improvement in color purity and lifetime of blue PHOLEDs using a homoleptic iridium(III) complex with fluorinated dibenzofuranyl-imidazole ligand [J]. *Dyes and Pigments*, 2021, 190: 109334.
- [72] XIE H, WANG J, LOU Z, *et al.* Mechanochemical fabrication of full-color luminescent materials from aggregation-induced emission prefluorophores for information storage and encryption [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(27): 18350-18359.
- [73] KOZHEVNIKOV V N, DONNIO B, BRUCE D W. Phosphorescent, terdentate, liquid-crystalline complexes of Platinum(II): stimulus-dependent emission [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47(33): 6286-6289.
- [74] HAO X T, XIONG B J, NI M L, *et al.* Highly luminescent liquid crystals in aggregation based on Platinum(II) complexes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(47): 53058-53066.
- [75] LIAO C T, CHEN H H, HSU H F, *et al.* Mesomorphism and luminescence properties of Platinum(II) complexes with Tris(alkoxy)phenyl-functionalized pyridyl pyrazolate chelates [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2011, 17(2): 546-556.
- [76] SONG W L, MAO H T, GAO Y, *et al.* Understanding AIE and ACQ phenomenon of organometallic iridium(III) complexes by simple cationization engineering [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2024, 35(2): 108309.
- [77] CALUPITAN J P, POIROT A, WANG J H, *et al.* Mechanical modulation of the solid-state luminescence of tricarbonyl Rhenium(I) complexes through the interplay between two triplet excited states [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2021, 27(12): 4191-4196.
- [78] XU P F, YU H, LIU Y, *et al.* Aggregation-induced emission (AIE) of Au(I)-GSH complexes is activated by optical manipulation and exhibits surprising 780 nm emission [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(12): 2302628.
- [79] JAVID T, ASSIRI M A, PERVAIZ A, *et al.* A twistable aggregation induced emission enhancement active multisite fluorescent sensor for targeted sensing of zinc ions, 4-nitrophenol and chloroform in diverse conditions [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 409: 125526.
- [80] SONG J T, WANG M, ZHOU X G, *et al.* Unusual circularly polarized and aggregation-induced near-infrared phosphorescence of helical Platinum(II) complexes with tetradentate salen ligands [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2018, 24(28): 7128-7132.
- [81] CUERVA C, CAMPO J A, CANO M, *et al.* Multi-stimuli-responsive properties of aggregation-enhanced emission-active unsymmetrical Pt^{II} metallomesogens through self-assembly [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2019, 25(52): 12046-12051.
- [82] KOBAYASHI S, MIYAMA T, AKIYAMA H, *et al.* Development of liquid crystal displays and related improvements to their performances [J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2022, 98(9): 493-516.
- [83] KARTHIK C, MANJULADEVI V, GUPTA R K, *et al.* Solvatochromism of a tricycloquinazoline based disk-shaped liquid crystal: a potential molecular probe for fluorescence imaging [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(103): 84592-84600.
- [84] MU B, ZHAO Y, LI X, *et al.* Enhanced conductivity and thermochromic luminescence in hydrogen bond-stabilized columnar liquid crystals [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(8): 9637-9645.
- [85] LI J H, WANG J H, CAO X J, *et al.* Peripherally modified tetraphenylethene: emerging as a room-temperature luminescent disc-like nematic liquid crystal [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(29): 35207-35213.

- [86] 王普红, 余建华, 李志军, 等. 基于液晶取向变化检测有机胺化合物的方法[J]. 分析化学, 2012, 40(5): 796-800.
WANG P H, YU J H, LI Z J, *et al.* Optical detection of organoamine based on orientation transition of liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2012, 40(5): 796-800. (in Chinese)
- [87] BISOYI H K, KUMAR S. Discotic nematic liquid crystals: science and technology [J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(1): 264-285.
- [88] KOHMOTO S, MORI E, KISHIKAWA K. Room-temperature discotic nematic liquid crystals over a wide temperature range: alkali-metal-ion-induced phase transition from discotic nematic to columnar phases [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(44): 13364-13365.
- [89] BALAGURUSAMY V S K, PRASAD S K, CHANDRASEKHAR S, *et al.* Quasi-one dimensional electrical conductivity and thermoelectric power studies on a discotic liquid crystal [J]. *Pramana*, 1999, 53(1): 3-11.
- [90] KUMAR S, VARSHNEY S K. A room-temperature discotic nematic liquid crystal [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2000, 39(17): 3140-3142.
- [91] KAWATA K. Orientation control and fixation of discotic liquid crystal [J]. *The Chemical Record*, 2002, 2(2): 59-80.
- [92] 刘博扬, 王冉冉, 孙静. 可视化柔性可穿戴传感器研究进展[J]. 分析化学, 2023, 51(3): 305-315.
LIU B Y, WANG R R, SUN J. Advances in visualization of flexible wearable sensors [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(3): 305-315. (in Chinese)
- [93] DE R, SHARMA S, SENGUPTA S, *et al.* Discs to a 'Bright' future: exploring discotic liquid crystals in organic light emitting diodes in the era of new-age smart materials [J]. *The Chemical Record*, 2022, 22(8): e202200056.
- [94] DHINGRA S, CHEN F R, SIDDIQUI I, *et al.* Room temperature tri-alkynyl benzene based discotic nematic mesophase enabling high-efficiency deep blue OLEDs [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 390: 122984.
- [95] KAAFARANI B R. Discotic liquid crystals for opto-electronic applications [J]. *Chemistry of Materials*, 2011, 23(3): 378-396.
- [96] MU B, HAO X T, CHEN J, *et al.* Discotic columnar liquid-crystalline polymer semiconducting materials with high charge-carrier mobility *via* rational macromolecular engineering [J]. *Polymer Chemistry*, 2017, 8(21): 3286-3293.

作者简介:



杨心语, 女, 硕士研究生, 2023年于辽宁石油化工大学获得学士学位, 主要从事盘状液晶材料的研究。E-mail: xyan0153@student.monash.edu



杨洪, 男, 博士, 教授, 2007年于美国科罗拉多大学博德分校获得博士学位, 主要从事功能材料的研究。E-mail: yangh@seu.edu.cn



王猛, 男, 博士, 副研究员, 2017年于东南大学获得博士学位, 主要从事功能液晶高分子材料的研究。E-mail: wangm@seu.edu.cn