

文章编号: 1007-2780(XXXX)XX-0001-14

胆甾相液晶中微结构的调控与应用

陈瑞鑫¹, 刘子龙¹, 陈佳浩¹, 马玲玲², 汤星舟^{1*}, 李炳祥^{1*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要:胆甾相液晶中的自组装微结构,如螺旋、位错线、指纹结构及拓扑孤子等,在软物质光子学领域中被广泛研究和应用。其中,微结构的精准构筑与基于外场的动态调控一直是科学家们关注的研究热点。本综述回顾了胆甾相液晶中典型微结构的构筑方法、稳定条件与调控策略的研究进展,总结了利用光场、电场及温度场控制螺旋轴取向和指纹结构演化的技术,介绍了微结构在可调光栅、反射式透镜、全彩显示及微粒操控等领域的应用探索。本文为胆甾相液晶微结构的大范围精确调控与功能化提供了思路,并对其在智能光子学、软体致动器等新兴领域的潜在应用进行了展望,为胆甾相液晶微结构的研究提供新的可能。

关键词:胆甾相液晶;螺旋结构;位错;指纹结构;光学应用;拓扑孤子;外场调控

中图分类号: 文献标识码:A **doi:**10.37188/CJLCD.2026-0088 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0088

Manipulation and applications of microstructures in cholesteric liquid crystals

CHEN Ruixin¹, LIU Zilong¹, CHEN Jiahao¹, MA Lingling², TANG Xingzhou^{1*}, LI Bingxiang^{1*}

(1. *College of Electronic and Optical Engineering and College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;*

2. *National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences, and Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)*

Abstract: Self-assembled microstructures in cholesteric liquid crystals, such as helices, dislocation lines, fingerprint textures, and topological solitons, have been widely studied and applied in the field of soft matter photonics. Among these, the precise construction of microstructures and their dynamic control using external fields have remained key research focuses. This review summarizes recent advances in the fabrication methods, stabilization conditions, and manipulation strategies for typical microstructures in

收稿日期:2026-05-18;**修订日期:**2026-06-15.

基金项目:国家重点研发计划资助(No.2022YFA1405000);国家自然科学基金(No.62375141);江苏省前沿引领技术基础研究专项(No.BK20212004)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1405000); National Natural Science Foundation of China (No.62375141); Natural Science Foundation of Jiangsu Province, Major Project (No.BK20212004)

*通信联系人, E-mail: xztang@njupt.edu.cn; bxli@njupt.edu.cn

cholesteric liquid crystals. It highlights techniques for controlling the orientation of helical axes and the evolution of fingerprint textures using optical, electric, and thermal fields. Furthermore, it introduces the application exploration of these microstructures in tunable gratings, reflective lenses, full-color displays, and particle manipulation. This review provides insights into achieving large-range precise control and functionalization of microstructures in cholesteric liquid crystals, and discusses their potential applications in emerging fields such as smart photonics and soft actuators, offering new possibilities for future research on cholesteric liquid crystal microstructures.

Key words: cholesteric liquid crystals; helical structure; dislocation; fingerprint texture; optical applications; topological solitons; external-field manipulation

1 引言

液晶(Liquid Crystals, LCs)材料是最具代表性的软物质之一^[1-3],兼具液体的流动性与晶体的有序性。液晶分子之间通过弱相互作用,在自由能系统中维持着熵贡献与焓贡献之间的微妙平衡^[4-6],这种平衡促进了多尺度微结构的自组装^[7-9]。这些丰富且可编程的微结构对外部刺激高度敏感,例如电场^[10-11]、光场^[12-13]、磁场^[14]、机械作用^[15]以及界面条件^[16-17]等。液晶分子具有各向异性及指向矢(分子的集体取向方向)的长程取向有序性,表现出优异的双折射光学性能,这一特性极大地推动了软物质光子学的发展^[18-22]。在各种液晶相中,向列相液晶(Nematic Liquid Crystals, NLCs)结构最为简单,因其在电场作用下具备快速响应能力,从而在显示领域获得了广泛应用和认可。

手性现象在自然界中无处不在,从中微子到DNA,从贝壳到星系^[23-24],衍生出众多丰富而重要的物理行为。当手性被引入向列相液晶后,便形成了具有一维螺旋结构的胆甾相液晶(Cholesteric Liquid Crystals, CLCs),也称为手性向列相液晶。这类结构普遍存在于生物体内,能够自组织形成多种迷人的螺旋形态。其中,螺距 p 定义为液晶分子旋转一整圈所经过的距离,是决定螺旋微结构的关键参数,可通过外场进行灵活调控^[25-31]。螺旋结构的引入还为构筑更复杂的微结构提供了平台,例如位错线^[32]、指纹织构^[33]、拓扑孤子^[34-35]等。这些复杂微结构的构建与调控展现出巨大的物理研究价值和光学应用潜力。

本文聚焦于胆甾相液晶中微结构的构建、调控及其应用。首先,介绍了胆甾相液晶中的典型

微结构,包括螺旋结构、线缺陷、指纹织构和拓扑孤子;其次,分析了这些微结构的主要调控方法,重点关注其动态调控策略;随后,综述了其在智能显示、光学成像及光场调制器件等新兴光学与光子学应用领域的研究进展;最后,讨论了当前该领域面临的挑战与未来机遇,并对胆甾相液晶微结构的发展前景进行了展望。

2 胆甾相液晶中的自组装微结构

胆甾相液晶凭借其自发形成的一维螺旋超结构,已成为软物质光子学研究的理想平台。通过调控边界条件与外场,可以获得从简单螺旋到复杂缺陷阵列的丰富微结构。近年来,研究者利用多种手段,系统构建并揭示了这些结构的形成规律及其指向矢构型。

2.1 螺旋结构

CLCs最基本的自组装形式是分子指向矢沿螺旋轴周期性旋转,螺距 p 决定其光学带隙位置,即 $\lambda = n \cdot p$,其中 n 为液晶的折射率。螺旋轴的方向依赖于基板锚定条件。一般情况下,平行取向的螺旋轴垂直于基板,因此在偏光显微镜(POM)下可以观察到大片均一取向的均匀织构。垂直取向下,螺旋轴平行于基板,在偏光显微镜下可以观察到周期性的条纹织构^[1],见图1(a)。

2.2 位错

当CLC被限制在小角度的楔形盒(Grandjean-Cano cell)中时,由于楔形几何与螺旋周期的不匹配,会产生线状的缺陷来释放弹性能^[36-37],这类缺陷类似于晶体中的“位错(dislocation)”,即分子层排列的错位。Ivan I. Smalyukh等人利用

荧光共焦偏光显微镜(FCPM),在三维空间直接重构了这些位错线的指向矢分布^[32],见图1(b)。楔形盒的上下基板均为强平面锚定。通过POM可以看到一系列平行于楔棱的暗线。FCPM清晰地揭示了两种不同类型的位错线:薄线和厚线。薄线位于楔形盒较薄的一端,这种位错携带的基本“错位量”,称为Burgers矢量,用来定量描述位错的大小和方向。薄线的Burgers矢量大小为 $b=p/2$,表示该位错携带的层错量等于胆甾相螺旋结构半个螺距的长度。其核心区域分裂成两条更基本的缺陷——向错(disclination),它对应指向矢的不连续变化。其中一条向错的核心

附近指向矢为奇异变化,另一条则连续过渡。这两条向错线靠得很近,共同组成了该位错。厚线位于楔形较厚的一端,其Burgers矢量大小为 $b=p$,表示该位错携带的层错量等于胆甾相螺旋结构整个螺距的长度。它的核心分裂成一对称向错对,这两条向错均为非奇异的,因此能量较低。此外,该课题组还观察到Burgers矢量为零的“Lehmann簇”(由四条向错组成)以及一些亚稳态的多重向错结构,见图1(b)。这些细致的三维重构工作,为理解软物质中拓扑缺陷的物理本质提供了直观依据,也可以作为软光子光学应用、微粒运输的基本执行单元。

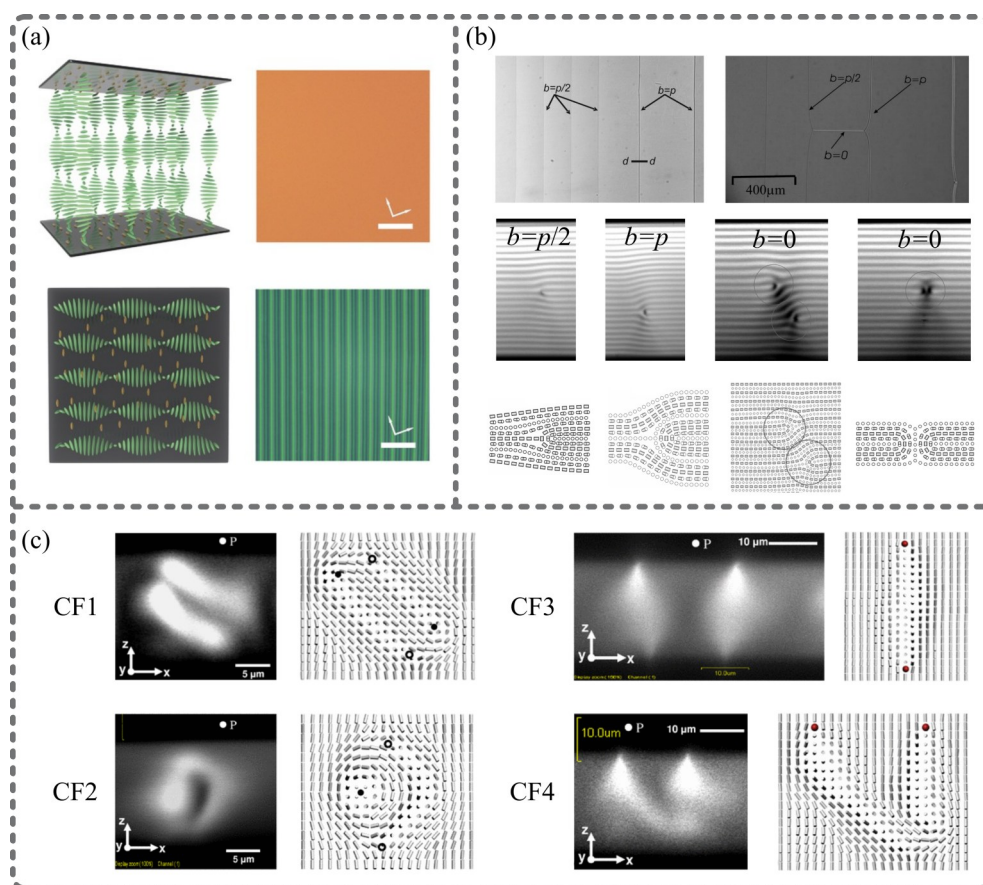


图1 (a)平行取向和垂直取向的胆甾相液晶指向矢分布和对应的POM图^[41]; (b)楔形盒中的位错线以及对应指向矢分布^[32]; (c)不同类型指纹结构的荧光共焦偏光显微截面图和对应的指向矢分布^[33]。

Fig. 1 (a) Director field of CLCs under planar and homeotropic alignments and the corresponding POM images^[41]; (b) Dislocation lines in a wedge cell and the corresponding director field^[32]; (c) FCPM cross-sectional images of different types of fingerprint textures and the corresponding director field^[33].

2.3 指纹结构

对于受限空间中的胆甾相液晶,其受限空间的大小(一般为液晶盒厚度 d)与螺距 p 的比值 d/p

决定了结构的形态。在垂直取向的液晶盒中施加适当电压,可以诱导出四种类型的指纹状结构(CF1-CF4),这些指纹结构能否稳定存在取决于

d/p 的大小^[30, 38-39]。CF1 出现在 $0.5 < d/p < 1$ 且低于转变为均一态的阈值电压条件下。CF1 中的指向矢在垂直于指纹结构长轴的截面内旋转了完整的一圈 (2π), 且整个核心区域由四条 $\pm 1/2$ 的非奇异向错组成, 没有任何奇点。因此 CF1 最为稳定, 在实验中最为常见。CF1 的两端形状不对称: 一端圆滑并倾向于分裂生长, 另一端尖锐而稳定, 见图 1(c)。CF2 同样可实现指向矢的 2π 旋转, 但其截面的三维构型与 CF1 不同, 不具备对称性。CF2 的核心包含一个 $+1$ 的非奇异向错和两个 $-1/2$ 的非奇异向错。CF2 通常需要尘埃或微粒作为成核中心, 因此出现频率较低, 见图 1(c)。CF3 和 CF4 极为罕见, 且只会在未摩擦的垂直取向液晶盒中短暂出现。CF3 中指向矢仅旋转半圈 (π), 并且每条 CF3 包含两条奇异的向错线。CF4 中指向矢旋转一圈 (2π), 但只在其中一个基板附近包含两条奇异的向错线。由于奇异向错核心的能量较高, 这两种指纹结构不稳定, 且在摩擦取向的液晶盒中完全消失——因为摩擦引入的对称性破坏与它们所需的结构不兼

容, 见图 1(c)。通过分析指纹结构显微成像的光强分布, 也可以分辨四种不同的指纹结构: CF1 和 CF2 结构的截面光强呈三个尖峰, CF3 出现两个尖峰, 而 CF4 则有四个尖峰^[40]。

2.4 拓扑孤子

CF1 和 CF2 还可进一步演化为具有粒子特性的拓扑孤子, 如斯格明子 (Skyrmion), 托容 (Toron), 霍普夫子 (Hopfion) 等^[42-50]。这些结构因拓扑保护性而在信息存储、微粒输运等领域具有应用潜力。指纹结构与拓扑孤子之间的转化是可逆的: Echeverria Alar 等发现受限于垂直取向液晶盒中的 CF1 指纹结构在热驱动下会发生尖端分裂和分支生长, 形成无序迷宫状图案, 图 2(a)。该过程可通过改变手性强度调控, 其中 CF1 尖端的不稳定性导致新尖端更容易生长, 从而自组织出分形网络^[42]。

拓扑孤子的指向矢量场是 CF 结构在空间上局域化、在拓扑上赋予非零荷的产物。通过引入外场也可以实现指纹结构和孤子之间的转化: Yu-an Shen 等人在平行取向液晶盒中发现升高交流

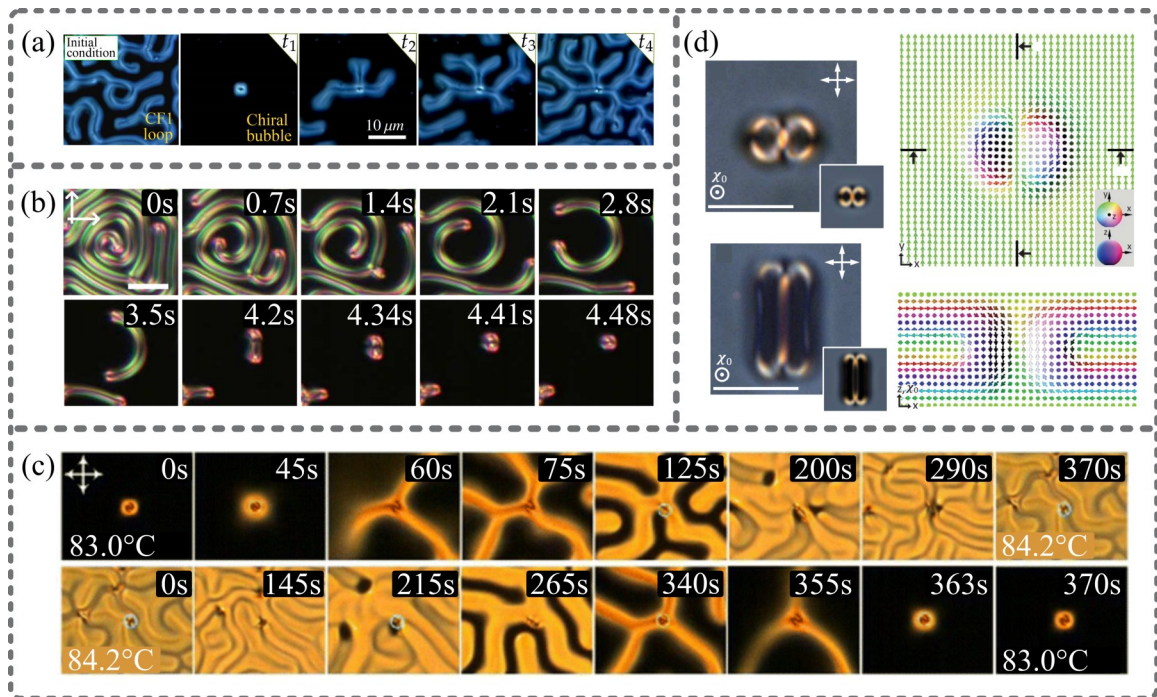


图 2 (a) CF1 指纹结构在热驱动下的分裂分支生长^[42]; (b) 电驱动 CF2 的收缩^[44]; (c) 温度驱动的 CF2 和 Toron 结构的相互转换^[43]; (d) 基于 Lehmann 簇的螺旋子^[51]。

Fig. 2 (a) Tip-splitting and branching growth of CF1 under thermal driving^[42]; (b) Electrically driven contraction of CF2^[44]; (c) Temperature-driven reversible transformation between CF2 and toron^[43]; (d) Heliknotons based on Lehmann clusters^[51].

电场可使CF2收缩并转化为Toron(低维斯格明子,又称Baby skyrmion,其斯格明子结构在接近基板的地方坍塌成两个奇点),且该转变可通过调节电场实现可逆^[44],图2(b)。此外,该团队利用一种温度诱导手性反转的液晶材料,仅改变温度即可实现CF2与Toron之间的可逆转变,尽管Toron在高温下形态严重扭曲,但其拓扑结构依然保持不变^[43],图2(c)。

线缺陷在电场驱动下也同样可以演化为拓扑孤子^[51-53]。Jung-Shen B. Tai等人展示了由Lehmann簇收缩形成的螺旋子(Heliknoton),图2(d)。Heliknoton的指向矢结构是一个嵌入在胆甾相液晶螺旋背景中的非奇异连续拓扑孤子,其中指向矢的闭合环相互链接形成具有不同Hopf指数的链环结构。这种拓扑孤子自组装成新的晶格,晶格常数可由电场控制。

3 胆甾相液晶中自组装结构的操控

对胆甾相液晶微结构进行外场调控的根本目的在于充分发挥其可编程的光学与力学响应能力,从而满足可调谐光子器件、动态反射式显示、光束偏转以及微尺度物质输运等应用需求。通过精确控制螺旋轴方向、螺距及拓扑缺陷的演化,能够实现从静态结构到动态功能的跨越,这也是推动胆甾相液晶走向实际应用的关键环节。调控胆甾相液晶中螺旋轴的取向与螺距,是实现可调光子器件的关键。传统方法通常利用电场

驱动螺旋轴在垂直与平行取向之间切换,但受限于预取向条件,切换后螺旋轴在平面内的取向往往具有随机性,不利于后续光学应用。近年来,研究者们发展了多种外场调控策略,实现了对螺旋轴的高精度、可编程操控。

Zhigang Zheng等人利用自行合成的二噻吩基环戊烯类手性分子开关掺杂向列相液晶E7,在平行取向液晶盒中实现了仅由光驱动的螺旋轴三维操控。紫外光照射会使分子开关发生异构化,导致手性反转和螺旋扭曲力增大,螺旋轴依次经历:垂直螺旋—向列相—反向垂直螺旋—平行螺旋;可见光则驱动逆向过程。该工作首次实现了螺旋轴的垂直态与平行态的切换与面内旋转的纯光控序列^[54]。

Lingling Ma等人采用光取向替代传统摩擦取向,在平行取向液晶盒中施加交流电场后,螺旋轴从垂直于基板翻转为平行于基板,形成大面积无缺陷的条纹结构,其周期为螺距的一半,并展示了高质量的衍射图案。光取向具有非接触、图案化、高分辨率、多畴取向、避免机械损伤等优点。进一步通过设计圆形光取向图案,电场诱导出径向排列的平躺螺旋轴,产生了阿基米德螺旋条纹^[41],见图3(a)。进一步,该课题组将光响应CLC制备成半自由膜:一面受平面锚定,另一面与空气接触形成准垂面锚定。利用光致螺距变化驱动平躺螺旋光栅的同步旋转^[55],见图3(b)。此外,Jintao Pan等人还发展了双光图案化技术,结合光取向预编程与结构光实时写入,动态生成

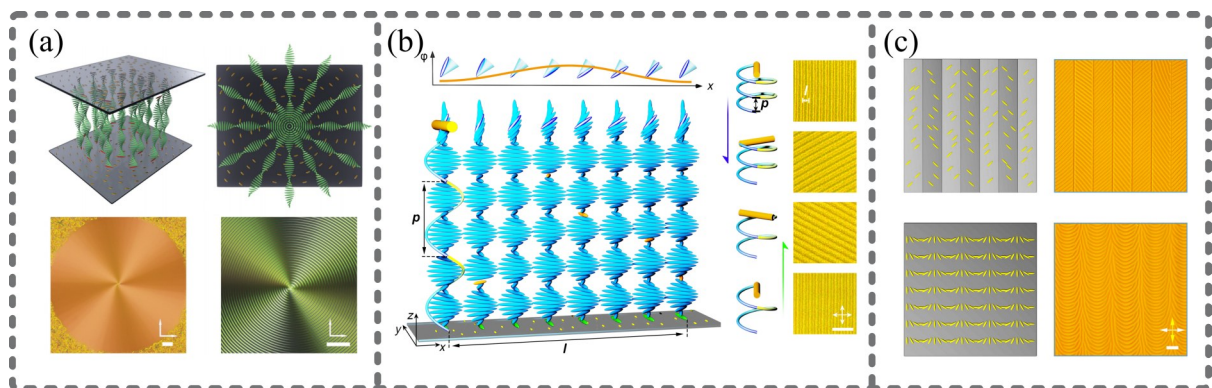


图3 (a)光控图案化胆甾相液晶螺旋超结构^[41]; (b)半自由空间中的胆甾相螺旋轴操控^[55]; (c)双重光图案化技术构建胆甾相液晶螺旋结构^[56]。

Fig. 3 (a) Light-controlled patterned helical superstructures of cholesteric liquid crystals^[41]; (b) Manipulation of the cholesteric helical axis in a semi-free space^[55]; (c) Construction of cholesteric liquid crystal helical structures via dual photopatterning technique^[56].

了辐射状、旋风状和阿基米德螺旋等旋转指纹超结构^[56],见图3(c)。

除了常规的平面螺旋结构,具有倾斜螺旋态的胆甾相液晶也已有报道,在这种特殊结构中,液晶指向矢并不垂直于螺旋轴,而是与螺旋轴呈一定夹角^[57-64]。倾斜螺旋胆甾相液晶具有反射波长范围宽、响应快、驱动电压低等优点,有望成为下一代液晶显示的主力。研究表明,倾斜螺旋胆甾相液晶的螺距可通过外电场、磁场及光场实现

连续调节。例如,Xiang Jie等人利用低驱动电场,在倾斜螺旋CLCs结构中实现了从紫外到可见光乃至红外区域的电可调选择性光反射^[65],图4(a)。此外,通过光场与电场的双重刺激,可以实现平面螺旋态与倾斜螺旋态之间的可逆动态转变,并伴随手性反转及动态光子带隙的调控^[66],图4(b)。上述工作丰富了软手性材料中微观分子自组装的科学内涵,有望激发基于CLCs超结构的潜在应用。

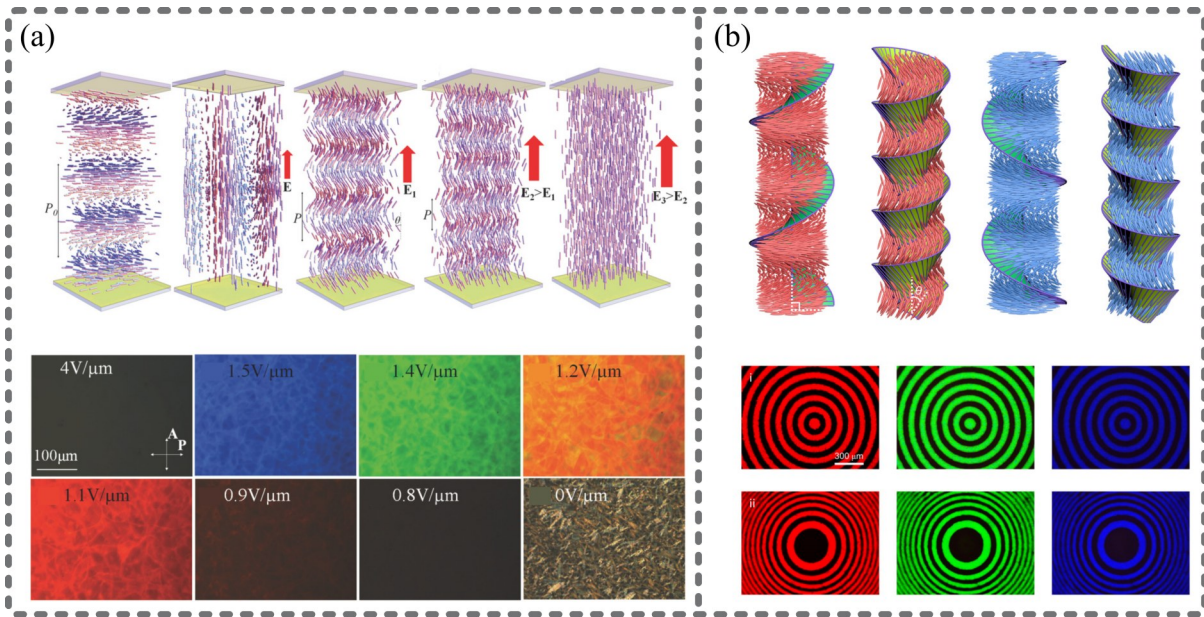


图4 (a)场控倾斜螺旋胆甾相液晶结构^[65];(b)电场刺激下倾斜螺旋胆甾相液晶的手性翻转^[66]。

Fig. 4 (a) Field-controlled oblique helicoidal CLCs^[65]; (b) Electric-field-stimulated handedness inversion of the oblique helicoidal CLCs^[66].

对于胆甾相液晶中由指纹织构收缩而形成的孤子,其也可以通过外场调控,实现动力学效应^[67-71]。Paul J. Ackerman等人发现,对负介电各向异性的胆甾相液晶施加高频载波叠加低频调制的交流电场,斯格明子会因电致指向矢旋转的非互易性而产生“蠕动”运动,实现定向平移,且运动方向可通过调制频率反转^[67],见图5(a);进一步,Haley Sohn等人结合光镊产生的定点障碍和图案化蓝光照射,可对集体运动的斯格明子进行引导、偏转、堵塞与解堵、路径重排等精准操控^[71],见图5(b)。此外,通过对液晶盒电极板进行表面化学处理,也可以实现孤子的转向^[72]。这些工作表明,电场和光场不仅能驱动孤子运动,还能实现其复杂集体行为的可编程调控,为拓扑

孤子动力学研究提供了新途径。

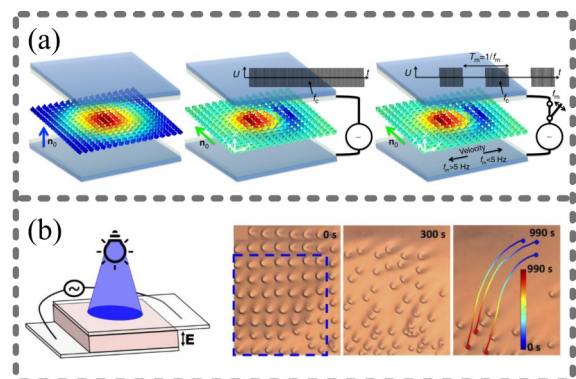


图5 胆甾相液晶拓扑孤子的(a)电学^[67]和(b)光学^[71]调控。
Fig. 5 (a) Electrical^[67] and (b) optical^[71] manipulation of topological solitons in cholesteric liquid crystals.

4 胆甾相液晶中自组装结构的应用

上述丰富多样的自组装微结构及其在外场下的可逆动态调控,为胆甾相液晶在多个领域的应用奠定了坚实基础。与传统显示器件中利用平面螺旋结构实现选择性反射不同,近年来研究者开始挖掘指纹织构、拓扑孤子以及周期性光栅等结构在光束偏转、动态衍射、可调透镜、全彩反射显示以及微尺度物质操控中的独特潜力。下文将从光学器件和微粒操控两个方面,分别介绍近期基于胆甾相液晶自组装结构的前沿应用进展。

4.1 光栅

胆甾相液晶中平行于玻璃基板的螺旋结构

形成的一维周期性结构可实现折射率调制,可作为高效衍射光栅使用^[73-75]。通过光取向技术,可制备高质量的CLC光栅,衍射实验清晰的展示了 ± 1 级及半整数衍射斑,且全区域均匀性远优于传统摩擦样品,图6(a)。此外,通过双面光取向技术(同时对液晶盒的两个内表面进行光取向处理)可实现光栅方向的可控旋转。改变泵浦光偏振方向即可任意旋转光栅矢量。同时,利用轴向对称光取向制备了径向和同心圆CLC光栅,通过移动探测光位置可获得不同方向的一维衍射,实现了可旋转、电调衍射角的多功能光栅^[41, 76],图6(b)。结合光敏分子开关等材料,实现螺距的可调,也可以进一步调控光栅的维度、周期、偏转等^[73]。此外,通过光镊定点生成斯格明子阵列也可以作为光栅^[77]。

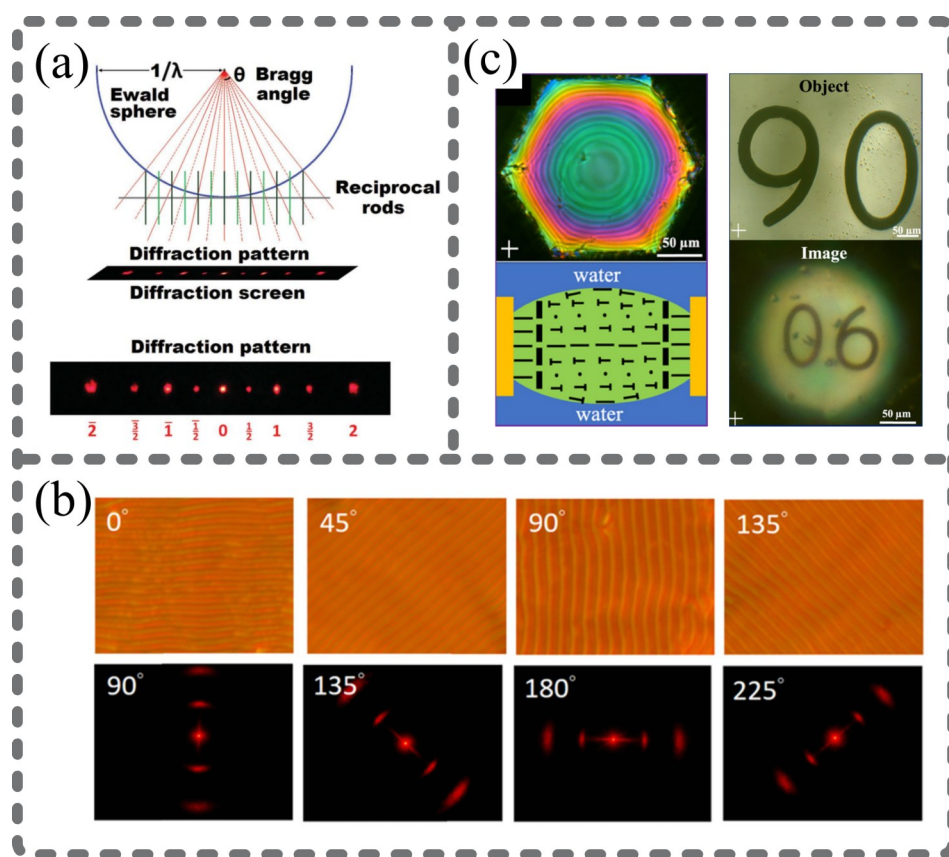


图6 (a, b)基于胆甾相液晶螺旋结构的可调光^[41, 76]。(c)基于胆甾相液晶的双凸微透镜^[80]。

Fig. 6 (a, b) Tunable gratings based on the helical structure of cholesteric liquid crystals^[41, 76]. (c) Biconvex microlens based on cholesteric liquid crystals^[80].

4.2 透镜

胆甾相液晶的螺旋结构与圆偏振选择性反射特性,使其成为反射式平面透镜的理想材料。

与传统折射透镜相比,CLC透镜具有厚度薄、重量轻、易于阵列化等优势,在成像、显示、光束调控等领域展现出独特价值^[78-79]。

将胆甾相液晶在方孔网格上铺展即可自发形成双凸微透镜阵列。透镜的焦距可通过改变手性剂浓度调控^[78]。肯特州立大学的Jakli课题组将胆固醇硫醇修饰的金纳米颗粒(直径约3 nm)掺杂入向列相液晶中,并悬浮于六边形网格内浸入水下,利用水下界面诱导的平面锚定与手性纳米颗粒的高螺旋扭曲力,自发形成了双凸微透镜阵列。该纳米颗粒的螺旋扭曲力远强于传统手性分子,仅需纳克级用量即可形成透镜^[80],图6(c)。该工作为利用手性纳米材料构建可调微光学器件提供了新思路。中佛罗里达大学Shin-Tson Wu课题组利用梯度螺距技术制备了宽带反射式CLC透镜,覆盖450~650 nm可见光波段。该透镜对圆偏振光具有90%的反射效率。将其与传统折射透镜组合,组成折反式透镜可用于虚拟现实显示。由于两种元件色散符号相反,显著抑制了色散现象^[79]。

除了上述自发形成和胶体掺杂的微透镜阵列外,研究者还利用光取向、偏振全息等技术制备了多种高性能反射式平面透镜。例如,通过模板曝光法制备了低f数的反射式CLC聚合物透

镜,实现了高分辨率成像与高衍射效率^[81];采用级联RGB选择性反射层的策略,实现了消色差、可变焦及颜色路由等多功能平面透镜^[82]。这些工作丰富了CLC透镜的功能,展示了其在紧凑成像、变焦系统和可重写光学中的广阔应用前景。

4.3 全彩显示

胆甾相液晶的选择性反射特性使其在反射式显示领域具有天然优势。通过调控螺距,可改变反射光波长,从而实现全彩显示^[83-84]。Lang Qin等人设计了一种含偶氮苯的三稳态手性光开关,利用光开关在不同波长的光(470 nm、530 nm、365 nm)下的异构化行为,使CLC获得三个稳定的构型。该体系实现了两个可独立调控的反射波段:470/530 nm光驱动反射波长在可见光范围(蓝→绿→红)连续调谐;530/365 nm光则进一步将反射波长从可见光红端延伸至近红外区(最大调谐范围超过2 000 nm)。基于此,他们首次在同一液晶盒中实现了红、绿、蓝三色图案与黑色背景共存,突破了传统双稳态开关的限制^[84],图7(a)。

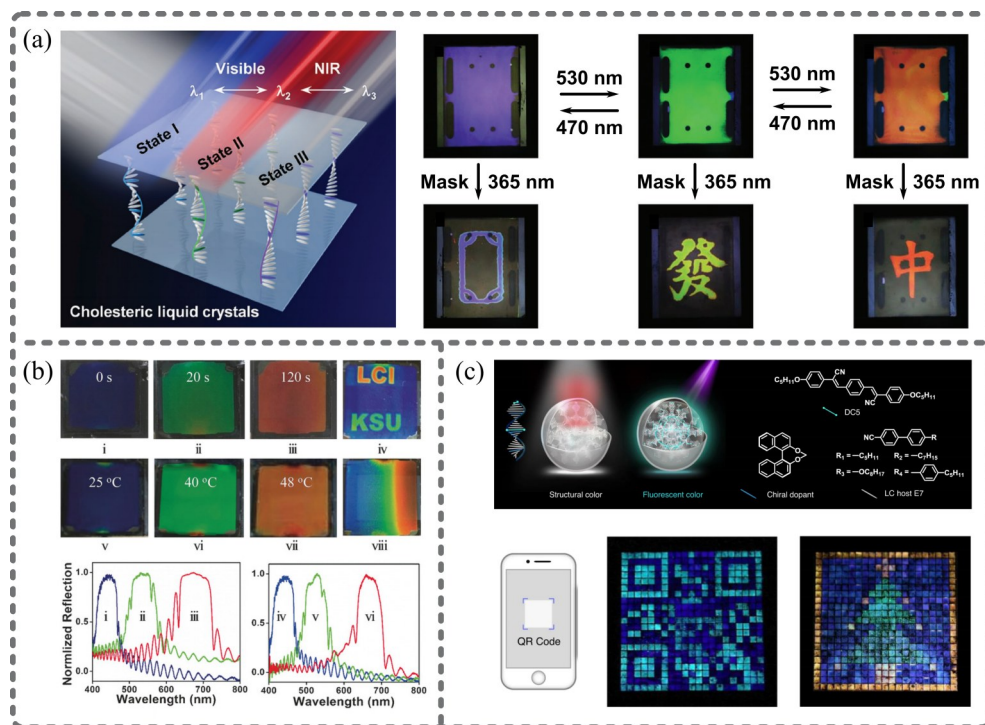


图7 (a)三稳态胆甾相液晶实现三色共存^[84]; (b)基于光响应胆甾相液晶的全彩显示^[83]; (c)基于双色调微滴的双子标签^[89]。

Fig. 7 (a) Three-color coexistence achieved by tristable cholesteric liquid crystals^[84]; (b) Full-color display based on photoresponsive cholesteric liquid crystals^[83]; (c) Geminate labels based on two-tone microdroplets^[89].

Hao Wang 等人利用卤键构筑了光响应轴手性分子开关,掺杂入向列相液晶后,在紫外光照射下发生反式—顺式异构,螺旋扭曲力从 $136 \mu\text{m}^{-1}$ 降至 $97 \mu\text{m}^{-1}$,驱动反射颜色从蓝到红连续变化,覆盖整个可见光谱;同时该体系还表现出温度依赖性,可在 $25\sim 48^\circ\text{C}$ 范围内依次呈现蓝、绿、红三色。这是首次将卤键光开关用于 CLC 全彩反射调控^[83],图 7(b)。利用毛细管微流控技术将胆甾相液晶制备成分散微滴是近年来的一种新策略。在各向同性环境中,胆甾相液晶受限于球形空间,螺旋轴自发径向分布,形成了具有光学应用潜力的新型微结构,这种微结构可作为显示单元、激光器谐振腔等^[85-88]。Lang Qin 等人将荧光分子与手性掺杂剂共同引入向列相液晶,制备了荧光 CLC 混合物。通过改变手性掺杂剂浓度,获得反射波长覆盖蓝色至近红外波段的系列体系,且所有样品在紫外光下均发射稳定的青色荧光。利用毛细管微流控技术将这些混合物制成分散微滴(直径约 $170 \mu\text{m}$),微滴可形成结构色;同时荧光分子赋予其紫外光下的发光特性。通过将不同反射色的荧光 CLC 微滴与不含荧光分子的对照微滴按预设蓝图填充至“像素化”阵列中,实现了不同条件下的多模态显示,这种多模态显示可进一步应用于高安全等级的防伪标签^[89],图 7(c)。

综上,胆甾相液晶凭借其可调的螺旋结构,在反射式全彩显示和高级防伪领域展现出独特优势。这些进展为下一代无背光、低功耗的反射式显示器和高安全性防伪技术奠定了材料基础。

4.4 微粒操控

胆甾相液晶的动态螺旋结构不仅可用于光学调控,还能实现对微纳物体的精确操控。这种将分子尺度的手性变化或超结构演化转化为宏观运动的策略,为微流体、微机器人和智能致动器提供了全新平台。

Javier Vicario 等人将光驱动分子马达掺杂入手性液晶薄膜中,在紫外光照射下,分子马达发生光致顺反异构和热螺旋反转,导致整个液晶纹理发生集体旋转,进而驱动放置于膜上的玻璃微棒同步旋转,转速可达 0.67 rpm 。原子力显微镜显示液晶膜表面存在约 20 nm 高的起伏结构,该表面形貌随分子马达构型变化而重排,产生扭矩

作用于微棒。这是首次实现单一分子马达驱动远超自身尺寸四个数量级的微物体旋转^[90]。Lingling Ma 等人利用掺杂手性分子开关的光响应胆甾相液晶在半自由膜中形成周期性拱形指纹纹理,拱形周期由光取向图案预先设定。蓝光照射下,分子开关发生异构化,螺距从 $2 \mu\text{m}$ 增大至 $4 \mu\text{m}$,导致拱形纹理整体沿预设方向横向平移,同时纹理中的位错线携带被捕获的微球同步移动。通过设计光取向图案(单向、径向、螺旋形等),实现了微球的汇聚、发散和绕行等多种可编程输运轨迹,最大平移距离超过 $600 \mu\text{m}$,且光强仅 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (约为光镊的 $1/500$),显著降低了对样品的光损伤。该工作将液晶螺旋的解旋运动转化为平动,模拟了细菌鞭毛的旋转-平动转换机制^[55]。液晶孤子的运动也可以被应用于微粒运输:Hayley 等人已经证明了孤子可携带纳米或微米大小的粒子在平面内运动^[91]。

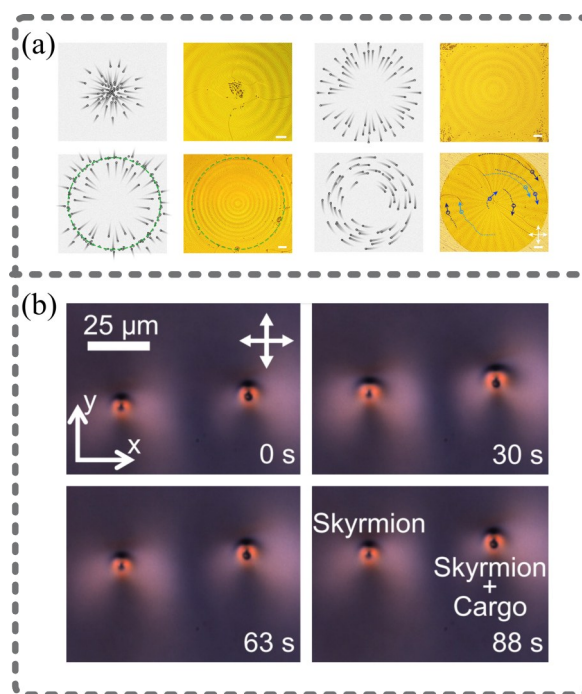


图 8 (a)基于动态螺旋的可编程微粒致动器^[55]; (b)孤子携带微粒的平移运动^[91]。

Fig. 8 (a) Programmable microparticle actuator based on dynamic helical structures^[55]; (b) Translational motion of microparticles carried by solitons^[91].

以上研究表明,胆甾相液晶中手性超结构的动态演化可被有效转化为宏观机械运动,无论是

旋转还是平动,均可通过分子马达或超结构形变实现。结合光取向预编程技术,未来的微机器人和微组装线有望在液晶薄膜上实现复杂、可编程、并行化的微尺度操控。

5 结 论

胆甾相液晶微结构研究的核心在于揭示手性、弹性与边界条件之间的协同竞争。通过将拓扑缺陷(位错、向错)与螺旋超结构耦合,研究者已能够在外场(电、光、热)下实现从一维周期条纹(如指纹织构)到三维孤立拓扑孤子(如托容、

斯格明子)的可逆、可编程转变。这一“拓扑—外场—功能”框架为软物质光子学提供了独特的设计范式,指导了可调光栅、反射式显示及微致动器等器件的开发。

尽管胆甾相液晶微结构研究已取得长足进展,但实现动态实时可重构、大面积均匀性、多外场协同精准调控以及向实际器件的低成本转化仍面临挑战。未来随着新材料(如手性纳米颗粒、光热响应材料)和新加工技术(如高分辨率光取向、3D激光直写)的发展,胆甾相液晶有望在可编程软体机器人、拓扑光子学、智能窗及片上光互连等领域发挥更重要作用。

参 考 文 献:

- [1] Gennes P G D, Prost J. The Physics of Liquid Crystals [M]. Oxford University Press, 1993.
- [2] Kleman M, Lavrentovich O D. Soft Matter Physics [M]. Springer New York Press, 2003.
- [3] 陆延青,李炳祥. 液晶,从胡萝卜开始的故事 [M]. 南京大学出版社, 2026.
- [4] Whitesides G M, Grzybowski B. Self-Assembly at All Scales [J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2418-2421.
- [5] Scacchi A, Nikkhah S J, Sammalkorpi M, *et al.* Self-assembly in soft matter with multiple length scales [J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(2): L022008.
- [6] Hough L E, Jung H T, Krüerke D, *et al.* Helical Nanofilament Phases [J]. *Science*, 2009, 325(5939): 456-460.
- [7] Wang X, Miller D S, Bukusoglu E, *et al.* Topological defects in liquid crystals as templates for molecular self-assembly [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(1): 106-112.
- [8] Chen Q, Bae S C, Granick S. Directed self-assembly of a colloidal kagome lattice [J]. *Nature*, 2011, 469(7330): 381-384.
- [9] Kara U I, Chen B, Čopar S, *et al.* Multistable polar textures in geometrically frustrated nematic liquid crystals [J]. *Nature Physics*, 2025, 21(9): 1404-1411.
- [10] Li B-X, Borshch V, Xiao R-L, *et al.* Electrically driven three-dimensional solitary waves as director bullets in nematic liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2912.
- [11] Li B-X, Xiao R-L, Paladugu S, *et al.* Three-dimensional solitary waves with electrically tunable direction of propagation in nematics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3749.
- [12] Bisoyi H K, Li Q. Light-Driven Liquid Crystalline Materials: From Photo-Induced Phase Transitions and Property Modulations to Applications [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(24): 15089-15166.
- [13] Shahsavani H, Aghakhani A, Zeng H, *et al.* Bioinspired underwater locomotion of light-driven liquid crystal gels [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(10): 5125-5133.
- [14] Hurault J P. Static distortions of a cholesteric planar structure induced by magnetic or ac electric fields [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1973, 59(4): 2068-2075.
- [15] Ge W, Zhang F, Wang D, *et al.* Highly Tough, Stretchable, and Solvent-Resistant Cellulose Nanocrystal Photonic Films for Mechanochromism and Actuator Properties [J]. *Small*, 2022, 18(12): 2107105.
- [16] Li X, Park K, Guzmán O, *et al.* Nucleation and growth of blue phase liquid crystals on chemically-patterned surfaces: a surface anchoring assisted blue phase correlation length [J]. *Molecular Systems Design & Engineering*, 2021, 6(7): 534-544.
- [17] Zhang H, Ma L, Zhang Q, *et al.* Azobenzene Sulphonic Dye Photoalignment as a Means to Fabricate Liquid Crystalline Conjugated Polymer Chain-Oriented Optical Structures [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(8): 1901958.

- [18] Chen W, Wang Z-Y, Yu X, *et al.* Soft Mattonics: harnessing light with liquid crystals [J]. *Photonics Insights*, 2026, 5(1): R03.
- [19] Li S-L, Chen Z-Y, Chen P, *et al.* Geometric phase-encoded stimuli-responsive cholesteric liquid crystals for visualizing real-time remote monitoring: humidity sensing as a proof of concept [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 27.
- [20] Wang Z-Y, Zhou Z, Zhang H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 5.
- [21] Du Y, Chen M R, Liu Y T, *et al.* Design and fabrication of liquid crystal wavefront corrector based on mask lithography [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 324-333.
- [22] 岱钦, 李漫, 王兴, 等. 梳状电极胆甾相液晶激光器的激光辐射谱 [J]. *发光学报*, 2018, 39(9): 1305-1309.
- [23] Lindahl T. Instability and decay of the primary structure of DNA [J]. *Nature*, 1993, 362(6422): 709-715.
- [24] Boyarsky A, Fröhlich J, Ruchayskiy O. Self-Consistent Evolution of Magnetic Fields and Chiral Asymmetry in the Early Universe [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(3): 031301.
- [25] Du F, Lu Y-q, Ren H-w, *et al.* Polymer-Stabilized Cholesteric Liquid Crystal for Polarization-Independent Variable Optical Attenuator [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(10R): 7083.
- [26] Li J, Bisoyi H K, Lin S, *et al.* 1, 2-Dithienyldicyanoethene-Based, Visible-Light-Driven, Chiral Fluorescent Molecular Switch; Rewritable Multimodal Photonic Devices [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(45): 16052-16056.
- [27] Xiang J, Varanytsia A, Minkowski F, *et al.* Electrically tunable laser based on oblique heliconical cholesteric liquid crystal [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(46): 12925-12928.
- [28] Medle Rupnik P, Lisjak D, Čopič M, *et al.* Field-controlled structures in ferromagnetic cholesteric liquid crystals [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1701336.
- [29] Kizhakidathazhath R, Geng Y, Jampani V S R, *et al.* Facile Anisotropic Deswelling Method for Realizing Large-Area Cholesteric Liquid Crystal Elastomers with Uniform Structural Color and Broad-Range Mechanochromic Response [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(7): 1909537.
- [30] Stumpel J E, Gil E R, Spoelstra A B, *et al.* Stimuli-Responsive Materials Based on Interpenetrating Polymer Liquid Crystal Hydrogels [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(22): 3314-3320.
- [31] 尚园园, 王京霞, 江雷. 胆甾相液晶图案的动态调控与应用 [J]. *液晶与显示*, 2024, 39(3): 349-368.
- [32] Smalyukh I I, Lavrentovich O D. Three-dimensional director structures of defects in Grandjean-Cano wedges of cholesteric liquid crystals studied by fluorescence confocal polarizing microscopy [J]. *Physical Review E*, 2002, 66(5): 051703.
- [33] Smalyukh I I, Senyuk B I, Palfy-Muhoray P, *et al.* Electric-field-induced nematic-cholesteric transition and three-dimensional director structures in homeotropic cells [J]. *Physical Review E*, 2005, 72(6): 061707.
- [34] Wu J-S, Smalyukh I I. Hopfions, heliknotons, skyrmions, torons and both abelian and nonabelian vortices in chiral liquid crystals [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2022, 10(1-2): 34-68.
- [35] 杨林, 邹鑫, 蒙翠玲. 软光子拓扑结构的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2024, 39(12): 1636-1656.
- [36] Zhao X, Zhou J, Li J, *et al.* Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: Electric analog to helimagnets [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(42): e2111101118.
- [37] Strömer J F, Marenduzzo D, Brown C V, *et al.* Electric-field-induced disclination migration in a Grandjean-Cano wedge [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(6): 064911
- [38] Oswald P, Baudry J, Pirkel S. Static and dynamic properties of cholesteric fingers in electric field [J]. *Physics Reports*, 2000, 337(1): 67-96.
- [39] Oswald P, Dequidt A. Thermomechanically driven spirals in a cholesteric liquid crystal [J]. *Physical Review E*, 2008, 77(5): 051706.
- [40] Kawachi M, Kogure O, Kato Y. Bubble Domain Texture of a Liquid Crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1974, 13(9): 1457.
- [41] Ma L-L, Li S-S, Li W-S, *et al.* Rationally Designed Dynamic Superstructures Enabled by Photoaligning Cholesteric Liquid Crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1691-1696.

- [42] Echeverria-Alar S, Clerc M G, Bordeu I. Emergence of disordered branching patterns in confined chiral nematic liquid crystals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120(15): e2221000120.
- [43] Shen Y, Qaiser M, Dierking I. Temperature reconfigurable skyrmionic solitons in cholesteric liquid crystals [J]. *Soft Matter*, 2023, 19(47): 9325-9331.
- [44] Shen Y, Dierking I. Electrically Driven Formation and Dynamics of Skyrmionic Solitons in Chiral Nematics [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 054023.
- [45] Guo Y, Afghah S, Xiang J, *et al.* Cholesteric liquid crystals in rectangular microchannels: skyrmions and stripes [J]. *Soft Matter*, 2016, 12(29): 6312-6320.
- [46] Smalyukh I I, Lansac Y, Clark N A, *et al.* Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(2): 139-145.
- [47] Ackerman P J, Trivedi R P, Senyuk B, *et al.* Two-dimensional skyrmions and other solitonic structures in confinement-frustrated chiral nematics [J]. *Physical Review E*, 2014, 90(1): 012505.
- [48] Ackerman P J, Smalyukh I I. Reversal of helicoidal twist handedness near point defects of confined chiral liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2016, 93(5): 052702.
- [49] Ackerman P J, Smalyukh I I. Diversity of Knot Solitons in Liquid Crystals Manifested by Linking of Preimages in Torons and Hopfions [J]. *Physical Review X*, 2017, 7(1): 011006.
- [50] Zhao H, Tai J-S B, Wu J-S, *et al.* Liquid crystal defect structures with Möbius strip topology [J]. *Nature Physics*, 2023, 19(3): 451-459.
- [51] Tai J-S B, Smalyukh I I. Three-dimensional crystals of adaptive knots [J]. *Science*, 2019, 365(6460): 1449-1453.
- [52] Hall D, Tai J-S B, Kauffman L H, *et al.* Fusion and fission of particle-like chiral nematic vortex knots [J]. *Nature Physics*, 2026, 22(1): 103-111.
- [53] Pieranski P, Smalyukh I, Zeghal M, *et al.* A skyrmionic topology perspective on Lehmann clusters [J]. *Soft Matter*, 2026, 22(8): 1825-1838.
- [54] Zheng Z-g, Li Y, Bisoyi H K, *et al.* Three-dimensional control of the helical axis of a chiral nematic liquid crystal by light [J]. *Nature*, 2016, 531(7594): 352-356.
- [55] Ma L-L, Liu C, Wu S-B, *et al.* Programmable self-propelling actuators enabled by a dynamic helical medium [J]. *Science Advances*, 2021, 7(32): eabh3505.
- [56] Pan J, Qian J, Ma L, *et al.* Dual photopatterning of rotational fingerprint superstructures [J]. *Chinese Optics Letter*, 2023, 21(4): 041603.
- [57] Yu G, Wilson M R. All-atom simulations of bent liquid crystal dimers: the twist-bend nematic phase and insights into conformational chirality [J]. *Soft Matter*, 2022, 18(15): 3087-3096.
- [58] Borshch V, Kim Y K, Xiang J, *et al.* Nematic twist-bend phase with nanoscale modulation of molecular orientation [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2635.
- [59] Feng C, Feng J, Saha R, *et al.* Manipulation of the nanoscale heliconical structure of a twist-bend nematic material with polarized light [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3): 032004.
- [60] Xiang J, Shiyankovskii S V, Imrie C, *et al.* Electrooptic Response of Chiral Nematic Liquid Crystals with Oblique Helicoidal Director [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(21): 217801.
- [61] Yuan C, Zhan Y, Liu H, *et al.* Room temperature stable twist-bend nematic materials without crystallization over 1 year [J]. *Giant*, 2024, 19: 100290.
- [62] Chen D, Porada J H, Hooper J B, *et al.* Chiral heliconical ground state of nanoscale pitch in a nematic liquid crystal of achiral molecular dimers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(40): 15931-15936.
- [63] Liu B, Yuan C-L, Hu H-L, *et al.* Dynamically actuated soft heliconical architecture via frequency of electric fields [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2712.
- [64] Iadlovská O S, Babakhanova G, Mehl G H, *et al.* Temperature dependence of bend elastic constant in oblique helicoidal cholesterics [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(1): 013248.
- [65] Xiang J, Li Y, Li Q, *et al.* Electrically Tunable Selective Reflection of Light from Ultraviolet to Visible and Infrared by Heliconical Cholesterics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(19): 3014-3018.

- [66] Yuan C-I, Huang W, Zheng Z-g, *et al.* Stimulated transformation of soft helix among helicoidal, heliconical, and their inverse helices [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax9501.
- [67] Ackerman P J, Boyle T, Smalyukh I I. Squirring motion of baby skyrmions in nematic fluids [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 673.
- [68] Sohn H R O, Smalyukh I I. Electrically powered motions of toron crystallites in chiral liquid crystals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(12): 6437-6445.
- [69] Sohn H R O, Liu C D, Wang Y, *et al.* Light-controlled skyrmions and torons as reconfigurable particles [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29055-29068.
- [70] Sohn H R O, Liu C D, Smalyukh I I. Schools of skyrmions with electrically tunable elastic interactions [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4744.
- [71] Sohn H R O, Liu C D, Voinescu R, *et al.* Optically enriched and guided dynamics of active skyrmions [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6306-6319.
- [72] Das S, Roh S, Atzin N, *et al.* Programming Solitons in Liquid Crystals Using Surface Chemistry [J]. *Langmuir*, 2022, 38(11): 3575-3584.
- [73] Ryabchun A, Yakovlev D, Bobrovsky A, *et al.* Dynamic Diffractive Patterns in Helix-Inverting Cholesteric Liquid Crystals [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(11): 10895-10904.
- [74] Sohn H-J, Oh S-W, Choi Y, *et al.* A Switchable Cholesteric Phase Grating with a Low Operating Voltage [J]. *Crystals*, 2021, 11(2): 100.
- [75] Xiang Y, Jing H, Chen H, *et al.* Light-driven rotation of gratings formed by electroconvection patterns in cholesteric liquid crystals [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 337: 116366.
- [76] Fuh A Y G, Lin T-H, Chen Y-Y, *et al.* Optical control of the rotation of cholesteric liquid crystal gratings [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10806-10812.
- [77] Ackerman P J, Qi Z, Smalyukh I I. Optical generation of crystalline, quasicrystalline, and arbitrary arrays of torons in confined cholesteric liquid crystals for patterning of optical vortices in laser beams [J]. *Physical Review E*, 2012, 86(2): 021703.
- [78] Khan M, Zhao B, Zhang M, *et al.* Construction of cholesteric liquid crystal microlens array at air/CLC/air and water/CLC/air interfaces [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 683: 133031.
- [79] Li Y, Zhan T, Yang Z, *et al.* Broadband cholesteric liquid crystal lens for chromatic aberration correction in catadioptric virtual reality optics [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6011-6020.
- [80] Perera K, Nemati A, Mann E K, *et al.* Converging Microlens Array Using Nematic Liquid Crystals Doped with Chiral Nanoparticles [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(3): 4574-4582.
- [81] Li Y, Zhan T, Wu S-T. Flat cholesteric liquid crystal polymeric lens with low f-number [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5875-5882.
- [82] Zhang D, Xu C-T, Chen Q-M, *et al.* Cascaded chiral birefringent media enabled planar lens with programable chromatic aberration [J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 17.
- [83] Wang H, Bisoyi H K, Wang L, *et al.* Photochemically and Thermally Driven Full-Color Reflection in a Self-Organized Helical Superstructure Enabled by a Halogen-Bonded Chiral Molecular Switch [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(6): 1627-1631.
- [84] Qin L, Gu W, Wei J, *et al.* Piecewise Phototuning of Self-Organized Helical Superstructures [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(8): 1704941.
- [85] Chen L, Li Y, Fan J, *et al.* Photoresponsive Monodisperse Cholesteric Liquid Crystalline Microshells for Tunable Omnidirectional Lasing Enabled by a Visible Light-Driven Chiral Molecular Switch [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(9): 845-848.
- [86] Ramou E, Roque A CA. . Textural landscapes of VOC-sensitive chiral liquid crystal-based materials [J]. *Applied Physics Reviews*, 2023, 10(1): 011411.
- [87] Darmon A, Benzaquen M, Čopar S, *et al.* Topological defects in cholesteric liquid crystal shells [J]. *Soft Matter*,

- 2016, 12(46): 9280-9288.
- [88] Lee S S, Kim J B, Kim Y H, *et al.* Wavelength-tunable and shape-reconfigurable photonic capsule resonators containing cholesteric liquid crystals [J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaat8276.
- [89] Qin L, Liu X, He K, *et al.* Geminate labels programmed by two-tone microdroplets combining structural and fluorescent color [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 699.
- [90] Eelkema R, Pollard M M, Vicario J, *et al.* Nanomotor rotates microscale objects [J]. *Nature*, 2006, 440 (7081): 163.
- [91] Sohn H R O, Ackerman P J, Boyle T J, *et al.* Dynamics of topological solitons, knotted streamlines, and transport of cargo in liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2018, 97(5): 052701.

作者简介:



陈瑞鑫,男,2023年于武汉工程大学获得学士学位,南京邮电大学在读硕士,目前从事液晶方面的相关研究。
E-mail: 2178301382@qq.com



李炳祥,男,博士,教授,2019年于肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位。主要从事液晶、刺激响应软材料、活性物质和生物物理等研究。
E-mail: bxli@njupt.edu.cn



汤星舟,男,博士,教授,2020年于肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位,主要从事液晶孤子、液晶物理模拟仿真等方面的研究。E-mail: xztang@njupt.edu.cn