

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-21

液晶光子晶体:从结构色显示到平面光学

陈全明*

(合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:液晶光子晶体是一类基于液晶分子自组装螺旋结构的软物质光子材料,其最显著的特征在于手性螺旋结构带来的选择性布拉格反射与几何相位调制能力。与传统刚性光子晶体不同,液晶光子晶体的周期性源于分子指向矢的旋转序而非质心平动序,这一本质差异赋予其两大核心优势:无需复杂微纳加工即可大面积自组制备,以及分子间弱相互作用支撑的外场可调谐性。本文系统综述了液晶光子晶体从结构色显示到平面光子学的演进脉络与研究进展。首先,从波长、振幅与手性三个维度梳理了液晶光子晶体在结构色显示领域的外场调控策略;然后,阐述了胆甾相液晶与蓝相液晶中几何相位的物理起源与实现方式,揭示其从光谱调控迈向波前调控的内在逻辑;在此基础上,重点介绍了液晶光子晶体在结构光场产生与调控、全息显示、增强现实、光计算及量子光学等前沿方向中的研究进展,展示了“结构—相位—功能”的构效关系;最后,围绕材料性能与器件结构等维度,简要讨论了液晶光子晶体平面光学走向实用化所面临的问题与应对思路。本文认为,液晶光子晶体作为兼具可调性与多维光场调控能力的平面光学平台,有望在新一代光子学与量子光学器件中发挥重要作用。

关键词:胆甾相液晶;蓝相液晶;结构色;几何相位;平面光学

中图分类号:O438.2;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3724/CJLCD.2026-0180 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0180

Liquid crystal photonic crystals: from structural color display to planar optics

CHEN Quanming*

(School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Liquid crystal photonic crystals are a class of soft-matter photonic materials based on self-assembled helical structures of liquid crystal molecules, distinguished by the selective Bragg reflection and geometric phase modulation arising from their chiral helical architectures. Unlike conventional rigid photonic crystals, the periodicity of liquid crystal photonic crystals originates from the rotational order of molecular directors rather than the translational order of molecular centers. This fundamental distinction endows them with two core advantages: large-area self-assembly fabrication without the need for complex nanolithography, and external-field tunability enabled by weak intermolecular interactions. This review systematically surveys the evolutionary trajectory of liquid crystal photonic crystals from structural color displays to planar optics. First, external-field tuning strategies for structural color displays are summarized from three perspectives—wavelength, amplitude, and chirality. Subsequently, the physical origins and

收稿日期:2026-09-04;修订日期:2026-09-29.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62405127)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62405127)

*通信联系人, E-mail: chenquanming@hfut.edu.cn

implementation schemes of geometric phase in cholesteric liquid crystals and blue phase liquid crystals are elaborated, revealing the intrinsic logic underlying the transition from spectral modulation to wavefront engineering. On this basis, recent advances in frontier research are highlighted, including structured light generation and manipulation, dynamic holographic displays, augmented reality waveguides, optical computing, and quantum optics, illustrating the structure-phase-function relationships. Finally, key challenges and potential solutions toward the practical deployment of liquid-crystal photonic crystal planar optics are briefly discussed from the perspectives of material performance optimization and device structural innovation. It is anticipated that liquid crystal photonic crystals, as a planar optical platform combining tunability with multidimensional light-field manipulation capabilities, will play a significant role in next-generation photonics and quantum optical devices.

Key words: cholesteric liquid crystals; blue phase liquid crystals; structural color; geometric phase; planar optics

1 引言

光子晶体(Photonic Crystal)是一类具有周期性介电常数调制的光学材料,其最显著的特征是存在光子带隙(Photonic Band Gap)—特定频率范围内的电磁波被禁止在晶体内传播。这一概念由Yablonovitch于1987年提出,至今已成为光子学领域最具影响力的研究方向之一^[1]。类似于半导体中周期性势场对电子的调控,光子晶体中周期性介电结构对光子同样具有调控能力,由此催生了光子禁带、光子局域、慢光效应等一系列新物理现象,为操控光与物质的相互作用提供了全新平台^[2,3]。根据介电常数周期性变化的维度,光子晶体可分为一维(如布拉格反射镜)、二维(如光子晶体光纤、光子晶体平板)和三维结构。天然光子晶体广泛存在于自然界中,如蛋白石宝石的绚丽色彩、蝴蝶翅膀的鳞片结构、孔雀尾羽的金属光泽,均源于其微观结构的布拉格衍射^[4]。在人工制备方面,光子晶体可通过自上而下的微纳加工技术(如电子束光刻、聚焦离子束刻蚀)或自下而上的自组装方法获得。其中,自组装方法凭借其并行加工特性,在低成本和宏观三维周期性结构上展现出优势^[5]。

在众多自组装光子晶体材料中,液晶(Liquid Crystal, LC)因其独特的软物质特性而别具一格。液晶兼具晶体的各向异性和液体的流动性,其分子可在热力学驱动下自发形成长程取向有序结构^[6-11]。当体系中引入手性时,相邻液晶分子之间产生均匀的扭转趋向;为了在“取向有

序”与“空间扭转”之间达到最小自由能态,液晶指向矢沿某一轴向连续旋转,从而自发形成螺旋超结构。这一螺旋结构沿轴向产生折射率的正弦式周期性调制,即构成了液晶光子晶体。

在液晶光子晶体中,胆甾相液晶(Cholesteric LC, CLC)和蓝相液晶(Blue Phase LC, BPLC)是两类典型体系。与常规光子晶体(如介质多层膜)相比,液晶光子晶体的关键区别在于其结构手性带来的Bragg反射的手性选择性:多层膜反射所有偏振的光,而液晶光子晶体仅反射与螺旋手性相同的圆偏振光,另一手性则完全透射。

与传统的刚性光子晶体(如半导体刻蚀结构或胶体晶体)不同,液晶光子晶体的周期性源于分子指向矢的旋转序,而非分子质心位置的平动序。这一本质差异带来了两个核心优势:其一,无需复杂昂贵的微纳加工设备,仅通过溶液处理和自组装即可实现大面积制备^[12];其二,分子间弱相互作用赋予液晶流动性,使得光子带隙对外部刺激(如温度、电场、光场等)高度敏感,可实现带隙位置与带宽的连续、可逆调谐。长期以来,液晶光子晶体的研究主要集中于静态结构色调控与动态色彩显示,应用于反射式显示、智能窗、温度传感及防伪标识等领域^[13]。2016年,研究发现CLC的Bragg反射光不仅保持圆偏振手性不变,且携带Pancharatnam-Berry几何相位。该相位大小精确等于反射界面处液晶分子指向矢取向角的两倍。这一发现从根本上拓展了液晶光子晶体的功能边界:其不再仅是“波长选择器”,而是可主动定制反射光波前的平面光学平

台^[14, 15]。借助光取向技术, 可对液晶分子的排列图案进行空间任意编程, 将任意相位分布编码至反射光中。因此, 液晶光子晶体的研究从“结构色显示”进入“平面光学”领域。

这些新兴应用的核心在于将几何相位编码与液晶的动态可调性相结合, 实现对光波前、偏振态及频谱响应的人工定制, 由此衍生出特种光场生成、动态全息显示、增强现实波导耦合、光学微分计算及量子调控等多样化光子学功能。尽管应用场景迥异, 其物理内核高度统一: 液晶分子取向的空间图案化决定几何相位分布, 而序参数的外场响应性赋予光场调控以时间维度灵活性。以此为线索, 本综述首先简要回顾基于液晶光子晶体的结构色显示——这一传统方向的核心在于利用其Bragg反射的选择性对特定波长进行开关式调控, 本质上限于光谱维度的操作。随后, 阐述几何相位在两类体系中的物理起源与实

现方式, 以此揭示从“光谱调控”迈向“波前调控”的内在逻辑。在此基础上, 选取特种光场生成、动态全息、增强现实波导、光计算及量子成像等典型方向, 展示“结构—相位—功能”的内在关联, 呈现液晶光子晶体作为可重构光学介质在光学与光子学的价值及优势, 并讨论其实用化面临的挑战。

2 液晶光子晶体的结构色显示

CLC是一种一维光子晶体结构^[16, 17]: 其分子指向矢沿螺旋轴呈周期性旋转排列, 相邻层间存在微小扭转角, 累积一周(即一个螺距 p)后分子指向矢旋转 2π (图1a)。这种螺旋结构产生沿螺旋轴方向的一维介电常数调制, 此处的“一维”指仅沿螺旋轴方向存在带隙。当光沿螺旋轴入射时, 与螺旋手性相同的圆偏振分量在满足Bragg条件时被反射。

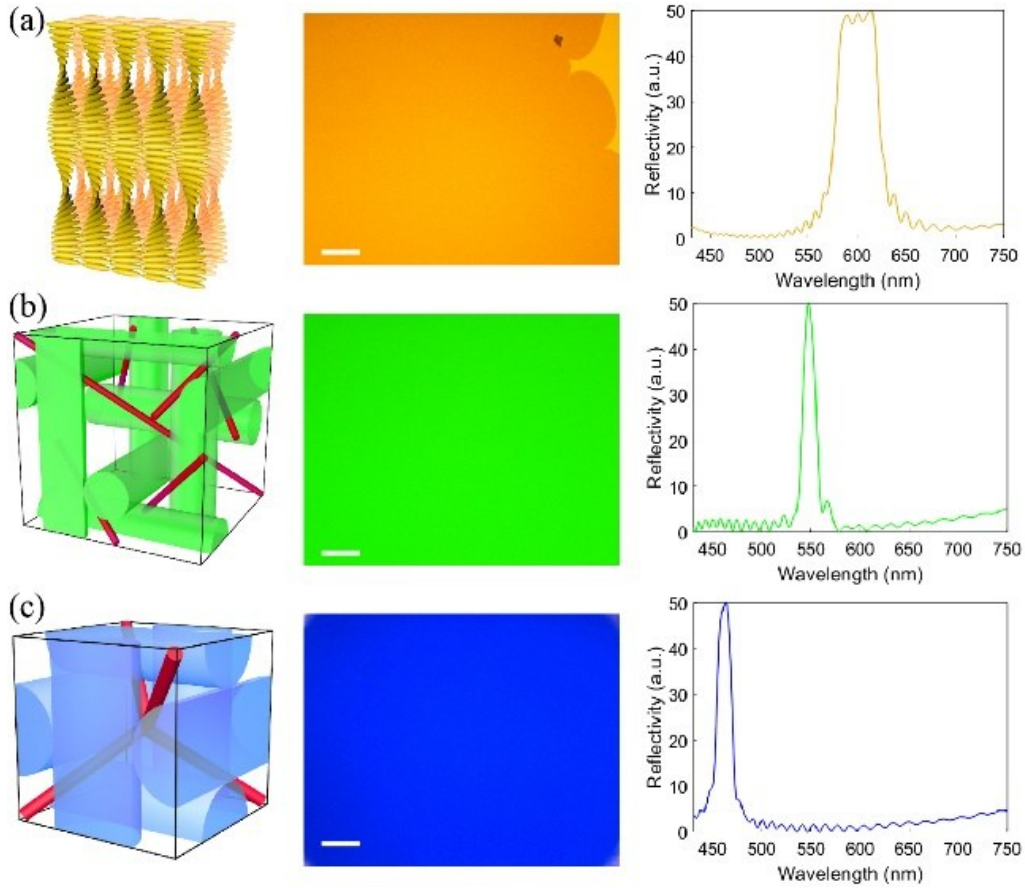


图1 胆甾相液晶(a), 蓝相I(b), 蓝相II(c)的结构单元、正交偏光显微图和反射谱(从左至右), 标尺: $100\ \mu\text{m}$ 。

Fig. 1 Structural units, polarized optical microscopy images, and reflectance spectra (from left to right) of (a) CLC, (b) BP I, and (c) BP II. Scale bar: $100\ \mu\text{m}$.

BPLC则是一种复杂的三维光子晶体结构：液晶分子自组装为双扭曲棱柱(Double-Twisted Cylinder, DTC),每个圆柱内分子指向矢沿径向连续旋转,并且这些棱柱进一步排列为体心立方(Body centered, BP I)或简单立方(Simple cubic, BP II)晶格,形成三维周期性介电调制^[18-21](图1b-c)。与CLC的一维螺旋不同,BPLC的三维晶格结构使其在多方向均存在Bragg衍射,其反射行为更加各向同性。

从信息显示的视角出发,结构色显示的调控维度具有多源性。反射波长直接决定色相,构成色彩呈现的基础维度;反射振幅则影响颜色的饱和度与对比度,关乎显示信息的清晰度与可辨识度;而液晶光子晶体反射光所携带的圆偏振手性,则提供了一个独立于强度和波长的自旋维度信息通道,可用于偏振编码与复用显示。基于此,本节从波长调制、振幅调制与手性调制三个维度,简要梳理液晶光子晶体在结构色显示领域的研究。

2.1 结构色波长调制

根据液晶光子晶体的Bragg反射波长的计算公式,调节波长的核心是调节结构基元的周期。目前通过技术和材料的发展,已覆盖光、电、热、力等多种外场响应机制。光调控提供了非接触、高空间分辨率的操控优势。Zheng等人设计了一种具有内禀手性的二芳基乙烯光开关分子^[22](图2a)。该分子在紫外和可见光交替照射下分子构型在轴向手性与中心手性之间变化,伴随着螺旋扭曲力(Helical Twisting Power, HTP)在36—130 μm^{-1} 范围内可逆变化,从而驱动胆甾相螺距连续调节,反射带可从近紫外拓展至近红外。得益于光开关分子优异的热稳定性,中间结构色状态在撤去光源后均可稳定保持,实现了多稳态的结构色调节。电调控因其响应速度快、便于集成而备受青睐。针对液晶光子晶体结构电场下易破坏导致电调范围不足的缺点,Xiang等人利用具有小弯曲弹性常数 K_3 的二聚体液晶混合物,在垂直电场驱动下实现了螺旋锥(heliconical)态,其中分子倾角随电场增大而减小,螺距随之缩短,反射带可从近紫外连续调至近红外(360—1520 nm)^[23](图2b)。Huang等人发现,当手性掺杂剂ZLI-811在BL006液晶主体中的浓度超过室温溶

解度时,过量掺杂剂发生析出与聚集,导致有效掺杂浓度降低、螺距增大,反射带红移;升高温度可提高掺杂剂溶解度,使析出的手性分子逐渐溶解,有效浓度增加、螺距缩短,反射带发生显著蓝移^[24]。力调控为液晶光子晶体提供了另一种方式^[25]。Min等人制备了BPLC弹性体薄膜,通过空间调控紫外曝光剂量实现模量的区域化编程^[26](图2c)。交联密度随曝光时间增加而增大,进而导致弹性模量增大。在双轴拉伸过程中,不同模量区域因泊松比差异而经历不同程度的晶格畸变,产生差异化的结构色蓝移,从而实现隐藏的双色或三色图案信息显现。此外,Yang等人基于液晶墨水在聚合物模板BP薄膜中的自发扩散,实现了结构色波长的时空编程^[27](图2d)。墨水沿厚度方向各向异性渗透,诱导BP I₍₁₁₀₎晶格发生非对称形变—水平方向晶格常数不变,垂直方向单向收缩,使光子带隙连续蓝移。通过调控打印参数(液滴间距、层数)与环境温度,可精确控制波长调谐速率与范围,覆盖全可见光谱。双手性薄膜中墨水扩散深度差异使双反射峰依次出现,实现了波长在空间与时间维度的协同编程,为液晶光子晶体的波长动态调控及多维光学编码提供了新思路。

2.2 结构色振幅调制

反射振幅的调控是结构色显示中不可忽视的维度。Chen等人利用单侧光配向基底构建非对称边界,冷却过程中竖直温度梯度使BP I随机成核并形成畴,反射微弱,信息被隐藏;施加交流电场使样品进入近相变点的垂直态,撤场后光配向区域诱导单晶畴外延生长,反射显著增强,信息得以清晰显示^[28]。通过交替加热与电场驱动,可实现反射振幅在高、低态之间的可逆切换,从而控制结构色图案的显隐(图2e)。Ouyang等人通过垂直施加交流电场实现BP I反射波长的连续调控^[31]。电场改变液晶指向矢的倾斜角,降低体系双折射,使光子带隙内的反射率随电压升高而逐渐减小,形成从亮到暗的灰度变化;当电场增强至螺旋结构完全解旋时,样品进入垂直态,反射完全消失。该过程中晶格常数保持不变,因而反射波长不发生漂移,实现了振幅的独立调节。撤去电场后,弱场下的变化可完全恢复,而强场破坏的晶格需热循环重建。

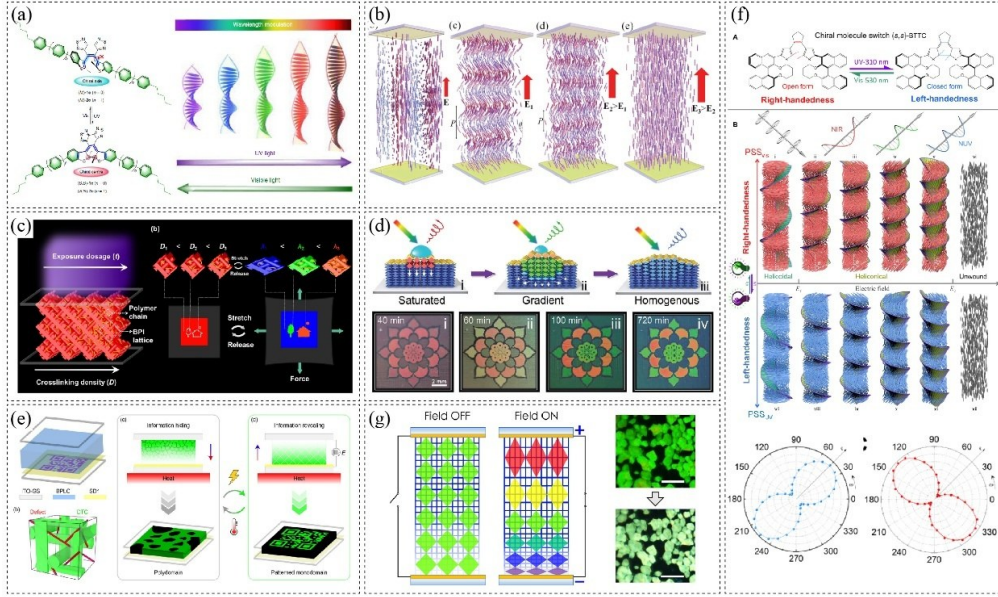


图 2(a) 光调 CLC^[22], (b) 电调 Heliconical CLC^[23], (c) 力调蓝相液晶弹性体^[26], (d) 利用流体扩散动力学调控 BPLC 的反射波长^[27], (e) 电调 BPLC 的反射强度^[28], (f) 光调控掺杂手性分子开关的 CLC 的反射手性^[29], (g) 电调 BPLC 的反射带宽^[30]。

Fig. 2 Tuning of reflection wavelengths (a~d) by light^[22] (CLCs), electric field^[23] (heliconical CLCs), mechanical force^[26] (BPLC elastomers), and fluid diffusion dynamics^[27] (BPLCs), respectively; (e) electrical tuning of reflection intensity of BPLC^[28], (f) optical tuning of chirality of CLC^[29], and (g) electrical tuning of bandwidth of BPLCs^[30].

2.3 结构色手性调制

手性调控赋予结构色以自旋维度的额外信息自由度, 是实现偏振编码与多功能光场调控的关键途径。手性调节的基础在于向液晶主体中引入具有手性可调功能的光响应掺杂剂, 通过其构型变化改变体系的净 HTP, 从而实现螺旋手性及螺距的动态控制。Chen 等人将左旋光敏分子开关 ChAD-3C-S 与右旋静态手性剂 R5011 共同掺杂于向列相液晶主体中, 体系净 HTP 由两者 HTP 的代数和决定^[32]。紫光照射诱导 ChAD-3C-S 发生反式向顺式异构, 其 HTP 逐渐降低, 净 HTP 减小导致螺距持续增大, 反射带红移; 当两者贡献完全抵消时, 体系处于消旋阈值的解旋态, 光子带隙消失; 继续辐照使顺式异构体进一步富集, 左旋贡献占主导, 净手性反转, 螺距重新缩短, 反射带蓝移, 从而实现左、右手性螺旋超结构之间的可逆切换。绿光照射则驱动顺式向反式逆向异构, 使体系恢复初始手性态。该方案在保持宏观螺旋结构完整性的前提下, 实现了手性的连续可逆调节, 并同步获得 1000 nm 超宽带的反射带调谐范围。类似地, Yuan 等人胆甾相

液晶中掺杂自主合成的光敏手性分子开关 (s, s)-BTTTC (开环态 HTP 为 $+8.0 \mu\text{m}^{-1}$, 闭环态为 $-16.0 \mu\text{m}^{-1}$) 及静态手性剂 R811^[29] (图 2f)。开环态下右旋贡献占优, 体系呈右手性, 反射右旋圆偏振光; 紫外光诱导开关由开环向闭环异构, 其 HTP 由正转负, 当闭环态左旋贡献超过静态右旋剂时, 净手性反转, 体系变为左手螺旋, 反射光切换为左旋圆偏振。

不同外场虽均可调控液晶光子晶体的反射光谱, 但具有不同的性能边界。光场通过光敏分子构型变化调节 HTP, 具有非接触和高空间分辨率优势, 但受光异构化及光化学稳定性制约; 电场直接耦合分子取向或晶格结构, 通常响应较快且易于集成, 但强场可能导致解旋或晶格重构; 热调控通过改变序参数、弹性常数及相稳定性实现光谱调节, 但响应受热扩散限制; 力调控通过应变直接改变晶格周期, 适用于柔性传感, 但受到黏弹性和机械疲劳影响。从更一般的角度看, 液晶光子晶体的高可调性与结构稳定性具有共同的软物质起源, 因此调谐范围、响应速度和循环稳定性之间往往存在内在权衡。不同外

场由此形成互补的控制自由度,而多场协同可进一步实现信息写入与动态调制功能解耦,从而缓解单一外场下不同性能之间的制约。

当然,对液晶光子晶体结构色的调节不仅限于上述三种光学性质^[33]。例如,Chen等人利用直流电场驱动聚合物稳定BPLC中离子迁移诱导聚合物网络发生非均匀形变,从而拓宽晶格常数的分布范围,进而大幅展宽光子带隙^[30](图2g)。在27 μm 厚的薄膜中,施加0.89 μm^{-1} 的电场后,带隙宽度由初始的34 nm扩展至310 nm,增宽约9倍,在实验上呈现出“白色”蓝相。此外,液晶光子晶体结构色的调节也不仅限于单一外场。例如,Yuan等人通过电-热协同调控实现结构色波长的调谐^[34]。温度变化通过影响弯曲弹性常数调控螺旋螺距,使反射波长以5 nm/0.05 $^{\circ}\text{C}$ 的灵敏度调谐;外加电场则通过介电扭矩调节 heli-conical 液晶的锥角和螺距,两者协同实现了宽范

围的波长调节。

3 几何相位

2016年,多个研究组从多方面系统地揭示了CLC的Bragg反射光携带几何相位^[35-37]。理论计算表明,在其螺旋结构表达式中考虑起始方位 ϕ 后,Bragg反射光的出射相位为^[35]:

$$\Phi = -\frac{\pi}{2} - 2\phi - \tan^{-1} \frac{s \cosh sL}{(\Delta k/2) \sinh sL}, \quad (1)$$

其中, Δk 是光波矢与螺旋倒格矢的失配量, L 是螺旋的长度, $s^2 = \kappa \kappa^* - (\Delta k/2)^2$, κ 是耦合系数。即含有一个相位因子 $\Phi = 2\phi$ 。值得注意的是,只要波长位于光子带隙内,几何相位调制效率均一旦为100%,无需满足向列型液晶所要求的半波条件(图3a~c)。由于该几何相位调制来源于Bragg反射,因此它也被称为Bragg-Berry相位。

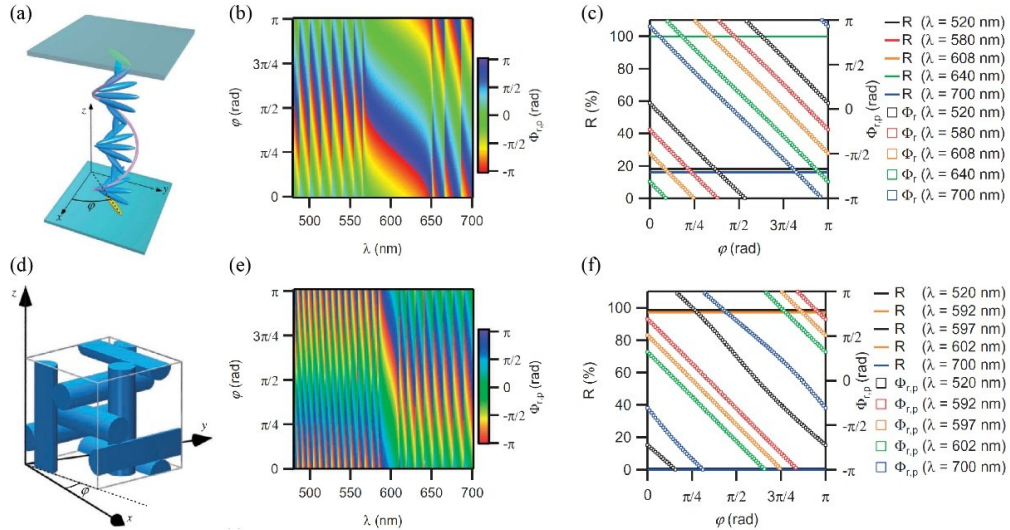


图3 (a)~(c)和(d)~(f)分别展示CLC螺旋和BPLC晶格的方位示意、手性匹配反射光相位,以及特定波长下反射率和相位随方位角的关系^[38]。

Fig.3 (a~c) and (d~f) show, respectively, the azimuth schematic, chirality-matched reflection phase, and azimuth-angle-dependent reflectance and phase at specific wavelengths for CLC (helix) and BPLC (lattice)^[38].

相较之下,BPLC的三维结构使反射相位的解析求解较为困难。为此,Yoshida等人基于Landau-de Gennes理论构建三维介电张量模型,沿光传播方向通过数值平均将介电常数降维后,进一步采用Berreman 4×4 矩阵法^[39]求得复反射系数,从而揭示其Bragg反射与CLC类似,也会产生几何相位,并且该相位与BPLC的晶格方位成正比^[38]

(图3d~f)。值得注意的是,BPLC在三维方向具有螺旋结构,这预示BPLC可能存在全向的自旋选择性和几何相位调制能力。随后,该课题组采用平面波展开法计算了蓝相的光子能带结构,结果表明宽角度范围内始终保持近乎完美的自旋选择性,并通过全息显示证明了全向几何相位调制^[40]。

液晶光子晶体几何相位的实现,依赖于对结

构单元方位角的编码设计,进而赋予其特定的衍射功能。当前,光控取向技术是调控液晶光子晶体方位的主要手段,其原理类似于外延生长:通过设计具有特定排列图案的取向层,借助分子间范德瓦耳斯作用,诱导邻近液晶分子沿取向层方向排列,并自组装形成光子晶体结构^[41-45]。对于CLC,其本质上为沿表面延展的一维光子晶体,因此经光取向层诱导生长的CLC结构通常具有良好的均匀性。相较之下,BPLC具有复杂的三维结构序,其任意截面上的指向矢倾角均不为零^[46]。因此,在光取向诱导下,BPLC通常呈现多畴织构,难以实现相位衍射功能。针对这一难题,Chen等人系统研究了BPLC在光取向层SD1

诱导下的相变行为,发现各向同性态能够引导单畴BPLC的形成^[47](图4a左)。然而,BPII至BPI之间的类马氏体相变会导致原本单畴的BPII转变为多畴BPI结构^[48,49]。为克服这一障碍,Chen等人进一步引入持续电场,使BPLC进入垂直态,并在升温至BPII-BPI相变点的过程中撤去电场,利用表面诱导效应与过冷状态的协同驱动,成功获得单畴BPI结构(图4a右)。在此基础上,结合有限差分域(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)仿真与实验研究,作者建立了BPLC在十纳米尺度下的DTC手性、百纳米尺度下的晶格常数及晶格方位,与Bragg反射光的自旋、波长及几何相位之间的构效映射关系(图4b)。

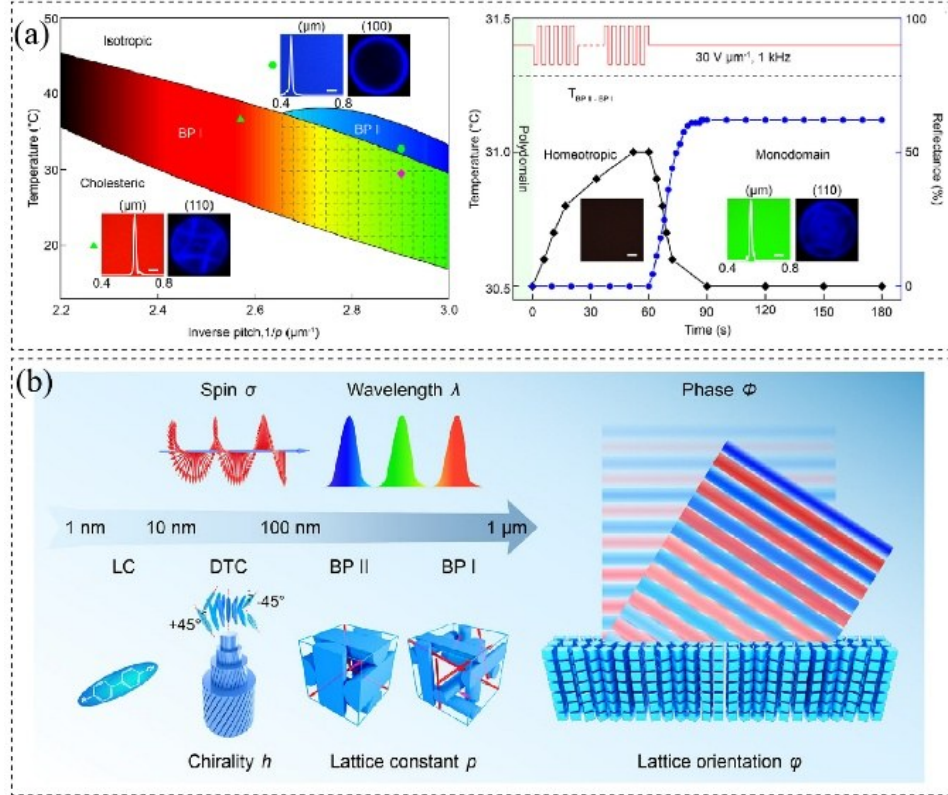


图4 (a)左:BPLC在光控取向表面下的相图,相图中的颜色对应Bragg波长,有/无网格标记区表示多/单畴结构,右:持续电场诱导多畴BPI转变成单畴BPI,(b)BPLC的构效关系示意图^[47]。

Fig. 4 (a) Left: Phase diagram of BPLC under photoalignment boundaries, colors correspond to Bragg wavelengths, and regions marked/unmarked by grids represent polydomain/monodomain. Right: Lasting-electric-field-driven transformation of polydomain BPI into monodomain BPI. (b) Schematic of relationship between the structure of BPLC and light parameters^[47].

这些理论和技术的发展从根本上拓展了液晶光子晶体的功能范畴:它不再仅是波长选择性的反射器,而是可通过分子取向图案化主动

调控反射波前的平面光学平台,并为后续液晶平面光子学器件的发展奠定了坚实基础(图5)。

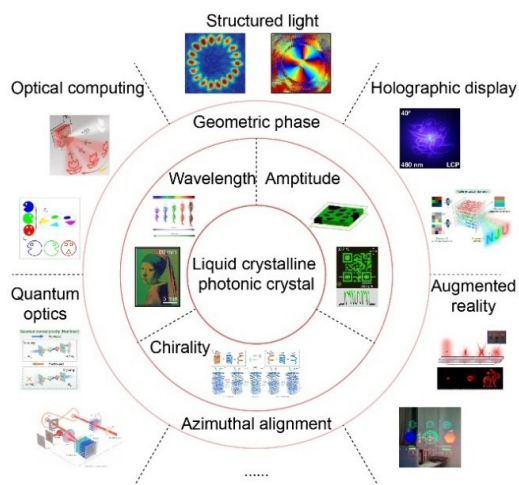


图5 综述内容总览

Fig. 5 General overview of the review

4 液晶光子晶体的平面光子学

4.1 结构光场的产生与调控

结构光场在光通信、光存储、量子信息处理和超分辨成像等领域具有重要价值^[50, 51]。例如,携带轨道角动量的涡旋光束因其拓扑荷可取任意整数而构成高维希尔伯特空间,为模分复用提供了新维度;具有非均匀偏振分布的矢量光束则在粒子操控、激光加工和显微成像中发挥独特功能。然而,空间光调制器、超表面等器件在结构光生成与调控中,其性能常受制于尺寸、带宽及功能固化。液晶光子晶体因具有自组装结构,兼具宽带几何相位调制与外场可调性,能够为突破上述局限提供方案^[52, 53]。在结构光场的产生途径上,液晶光子晶体提供了两条技术路线:其一是通过外部的几何相位编码对光场进行波前设计,其二是利用液晶内禀的自组装结构直接定义光场模式。

几何相位编码—依据目标光场的波前信息及几何相位调制原理,逆向求解光取向分布。Chen等人通过将达曼涡旋光栅编码到CLC中,实现了覆盖116 nm带宽、多达25个轨道角动量模式的等效率并行产生与解调^[54](图6a)。Tsukamoto等提出向列相液晶层与CLC构成的堆叠液晶结构。入射圆偏振光经向列相层获得几何相位后,被CLC反射并再次通过向列相层,最终反射光正交圆偏振光分别携带拓扑荷 ℓ 和 2ℓ ,实现了共轴涡旋光束的拓扑荷加倍^[55]。Nassiri等

人将Bragg-Berry光学元件从径向基阶的涡旋光束拓展至任意高阶拉盖尔-高斯光束的宽带生成。通过联合设计液晶螺旋的方位角与径向结构,分别编码轨道角动量和径向节数。进一步结合背向反射镜,实现了自旋依赖的拓扑荷反转,产生了具有非均匀偏振分布的高阶矢量光束^[56]。Zhu等人突破了单一手性限制,构建了相反手性共存的CLC超结构,在同一器件中实现了对正交圆偏振光的同时反射和共轭几何相位调制,从而高效产生了依赖于入射偏振态的涡旋光束与矢量光束^[57]。

自组装拓扑结构—液晶分子在特定边界条件和手性环境下可自发形成具有拓扑性质的介观结构,如Soliton、Skyrmion、Toron等^[59-62]。这些结构本身即为空间变化的光学各向异性介质,无需外加相位编码即可对光场模式进行选择与整形。Papič等人直接将含有拓扑缺陷的液晶超结构嵌入法布里-珀罗微腔,利用CLC中的toron和手性指纹等自组装拓扑结构作为腔内的模式选择元件,无需外加相位调制即可实现径向、混合及线性偏振等多种矢量光束的激光直接发射,并通过选择不同取向的荧光染料实现了对特定偏振模式的增益选择^[58](图6b)。Liu等人利用铁电球晶的圆各向异性和穹顶几何,通过自旋-轨道耦合与聚焦效应,在可见光波段(450-785 nm)实现了宽带彩色光学斯格明子的片上生成,其拓扑荷可通过入射偏振态在斯格明子、双斯格明子等状态之间灵活切换^[63]。Hess等研究了CLC中一维扭曲壁和二维斯格明子等拓扑孤子对光的操控。这类孤子作为光学轴的空间局域取向结构,可在化学均匀介质中引入局域有效折射率,实现了光束的偏转、聚焦、分裂及电场可调的全内反射^[64]。

除产生结构光外,液晶光子晶体还能够对结构光的偏振等参数进行多维度调控。

Chen等开发了一种电场辅助的大周期数(> 500)CLC制备技术^[67]。基于此,他们利用CLC在远离Bragg反射带时因左旋与右旋圆偏振分量折射率差异而产生的旋光效应,实现了矢量光场偏振方向的可控旋转,且旋转角度与入射偏振方向无关。对于径向或方位角偏振的矢量光束,其局域偏振方向同步旋转相同角度,而强度分布保持不变^[65, 68](图7a)。Zhang等人将胆甾相液晶的

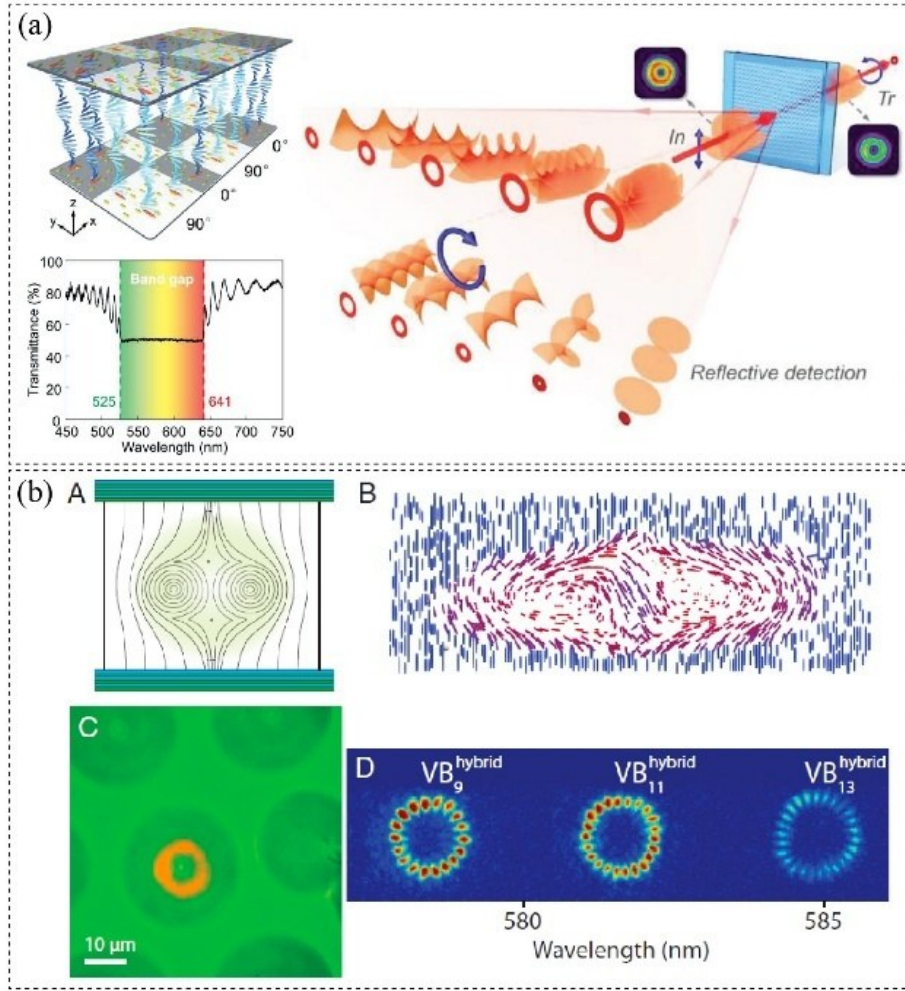


图6 (a)基于几何相位编码的CLC实现宽带涡旋光阵列生成^[54], (b)基于CLC的toron结构产生矢量激光^[58]。

Fig. 6 (a) Broadband vortex beam array generation via geometric phase encoding in CLC^[54], (b) vector laser generation via toron structures in CLC^[58].

偏振旋转拓展至量子信息处理的模拟研究^[66]。在光子带隙短波边附近,改变入射角调节两正交圆偏振本征模间的相位差,进而使矢量光束各局域偏振方向同步旋转,并通过自旋-轨道非分离耦合作用于整体光场,实现高阶庞加莱球上非分离态的逻辑旋转,对应模拟 T 门、S 门及 Pauli-Z 门等量子门(图 7b)。液晶光子晶体的外场响应特性及其对结构光场分布的可视化能力,可进一步用于外场传感。Li 等人将几何相位编码集成于湿度响应 CLC 聚合物薄膜。湿度上升时,薄膜膨胀致螺距红移,反射带扫过探测激光波长,反射涡旋光束依次经历产生、增强至衰减,为特种光场远程传感提供了参考^[69]。

4.2 全息显示

液晶光子晶体的外场响应性与多自由度光

场调控能力,使其全息显示兼具动态调谐与多通道复用功能,并已从静态单幅显示演进至电/光可调、多参量复用及宽视角显示,显著提升了灵活性与功能多样性。

Chen 等人基于光驱动手性反转的 CLC,利用光敏手性掺杂剂在紫外和绿光照射下的可逆顺反异构实现手性翻转,并结合上下基板非对称光取向边界域自组织,在同一器件中同时实现了波长可调、左/右旋圆偏振独立响应和双向传播方向依赖的动态混合复用全息^[70](图 8a)。Xu 等利用电致螺距梯度化机制,将工作带宽大幅拓展至 350 nm,并设计了轨道角动量(Orbital angular momentum, OAM)复用全息图,实现了兼容波分复用的原位非破坏性 OAM 状态检测,为大容量光通信中的模分-波分联合复用提供了可行

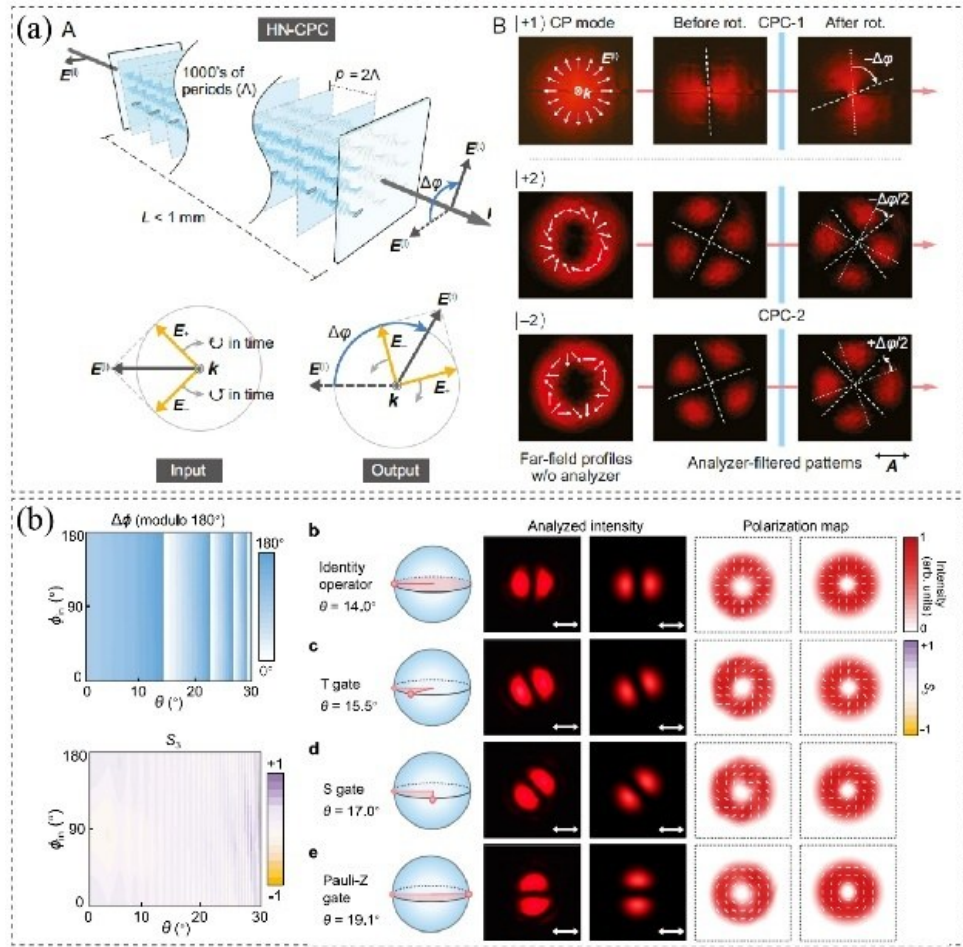


图7 (a)基于CLC的带边圆偏振色散效应实现矢量光场的偏振旋转^[65], (b)通过入射角控制矢量光场的矢量方向, 模拟量子比特旋转^[66]。

Fig. 7 (a) Polarization rotation of an optical vector field via the circular-polarization dispersion effect in the band-edge of CLCs^[65], (b) control of the vector direction of the vector optical field by varying the incident angle of the beam, mimicking qubit rotation^[66].

的平面光学方案^[71]。在此基础上, 该团队结合 k 空间设计的 RGB 三色离轴相位全息图, 实现了单色至全彩全息图像的动态电控切换^[72](图 8b)。Ouyang 等对 BP 全息结构施加饱和电场使螺旋结构完全解旋, 利用 LED 擦除原有取向信息; 在电场维持下重新进行光配向曝光, 即可写入新的相位或振幅图案, 撤场后新图案稳定呈现, 验证了 BPLC 在全息显示中可重构、多参数并行的调控潜力^[31](图 8c)。Cho 等人开发电致晶格重定向技术实现了单畴 BPI 的定向自组装。进一步地, 利用 BPI 三维立方晶格对入射角不敏感的特性, 结合 Bragg-Berry 效应, 实现了全向圆偏振选择性全息^[40](图 8d)。

液晶光子晶体不仅可通过几何相位实现全息

显示, 还能将荧光显示、结构色、旋光色散、偏振干涉等近场图像与远场全息融合, 形成复合显示平台, 为高容量的光信息存储与防伪提供可行路径。

Li 等开发了荧光染料掺杂的光取向 CLC 体系^[73](图 9a), 利用激光直写在基板表面写入结构色图案, 并以光取向技术制备几何相位编码的全息衍射结构; 通过控制螺距的热致蓝移, 调节光子带隙与荧光发射峰的光谱重叠, 当二者匹配时产生高不对称因子的圆偏振发光, 构建了荧光显示和全息协同的光学加密平台。Sun 等人将聚合的右旋 CLC 与温敏左旋 CLC 集成, 形成手性相反的层级超结构^[74]。结合多步光取向光刻技术, 实现了对反射光中正交圆偏振分量独立几何相位的精确编码, 从而同步调控光场的偏振、振幅

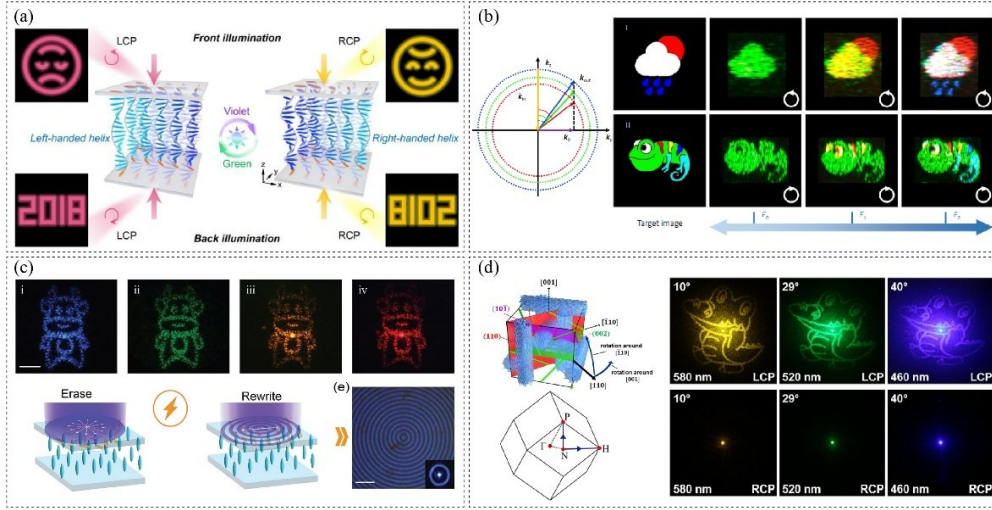


图8 (a)光刺激双面独立取向掺杂手性分子开关的CLC,实现双向波长可调全息显示^[70], (b)电刺激CLC的带宽调谐,实现单色到全彩全息的动态切换^[72], (c)基于BPLC表面取向重构技术实现全息显示的擦写^[31], (d)基于BPLC几何相位调制的全向自旋选择性全息显示^[40]。

Fig. 8 (a) Bidirectional wavelength-tunable holographic display via optical stimulation of CLC with dual-side independently aligned chiral molecular switches^[70], (b) dynamic switching from monochrome to full-color holography via electrical bandwidth tuning of CLC^[72], (c) rewritable holographic display via surface alignment reconfiguration of BPLC^[31], (d) omnidirectional spin-selective holographic display via geometric phase modulation of BPLC^[40].

和波长自由度。基于四步加密算法,将结构色、多色全息及其温度驱动变化作为四级嵌套密文,明文按特定顺序依次解密波长、振幅、偏振和触控(温度)四个维度,提供了可交互的多维显示器件。Ouyang等将BPI与温敏CLC集成,构筑了双相手性光子晶体平台,两层具有相反手性与独立光取向^[75]。聚合物稳定BP层温度不敏感,CLC层螺距随温升缩短,使近场成像颜色随温度变化,而远场全息需温度、波长与自旋同时匹配方可重建,实现了近-远场双通道、温度-波长-自旋的近场偏振干涉成像与远场自旋复用全息。Liu等提出多维光图案化策略,通过独立调控UV曝光时间与偏振方向,构筑了向列相与CLC集成的异质超结构,同步实现了近场全彩结构色、亮度可调的偏振干涉色与远场自旋选择性全彩全息的三通道集成^[76](图9b)。三种信息读出模式共存于同一薄膜中,信息密度达160万单元/平方毫米,为多维光信息存储与加密提供了新平台。

4.3 增强现实与波导光学

增强现实(Augmented Reality, AR)是继移动互联网之后的新一代空间计算与数字孪生平台。基于衍射光栅耦合器的光波导架构凭借其

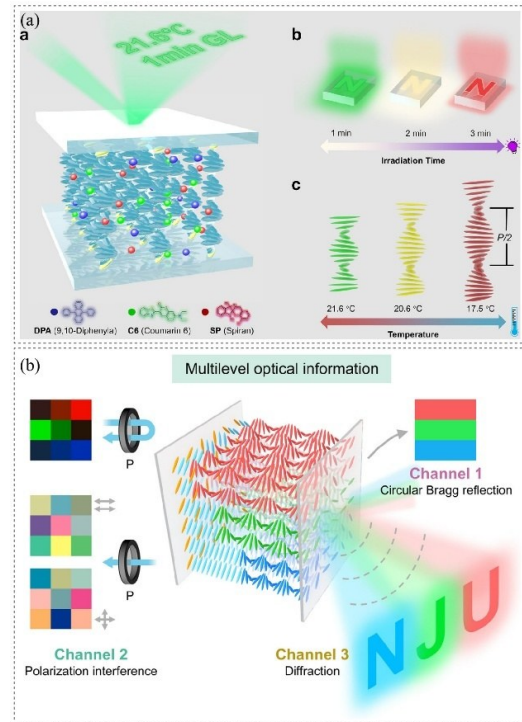


图9 多机制复合显示: (a)全息和荧光显示^[73], (b)全息、结构色和干涉色^[76]。

Fig. 9 Multi-mechanism composite displays: (a) holographic and fluorescent displays^[73], (b) holographic, structural color, and interference displays^[76].

超薄外形,已成为AR显示的主流技术路线。相比传统的表面浮雕光栅和体全息光栅,液晶偏振体光栅(Polarization volume grating, PVG)基于液晶材料的大双折射与自组装光子晶体结构,兼具极高单阶衍射效率与低成本优势,且制备工艺简单、适于量产,是实现高亮度、大视场角AR显示的理想光波导方案^[77-79]。PVG的配向光场是由左、右旋圆偏振光干涉形成空间周期偏振分布(图10a)。为降低体系弹性自由能,螺旋结构相对基底平面倾斜,使分子长轴所定义的Bragg面具有特定的倾斜角^[80, 81]。由于CLC的自旋选择性,PVG仅对与自身螺旋手性相同的圆偏振入射光产生高效的一级衍射。

Lee等系统研究了PVG膜厚对衍射效率的影响及角度相关的Bragg波长变化规律,实验表明单层厚度 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 时衍射效率可达90%,且Bragg波长随入射角的变化与理论吻合良好^[82]。进一步地,通过依次涂覆三种不同手性材料浓度的液晶层,实现了多螺距周期叠加,验证了反射带宽可拓展至覆盖红、绿、蓝波段的可行性。在此基础上,Weng等人开发双层光波导架构:青层(蓝绿)PVG通过堆叠同一水平周期、不同垂直周期实现双色共层衍射,红层PVG独立置于另一波导层,实现了三色光的分层传播与全彩近眼显

示,制备的PVG耦合器在RGB三波长处衍射效率均超过80%,对角线视场角约 35° ^[83](图10b)。Yan等人进一步针对双层/单层方案中因各色光衍射角不同而导致的色差问题,提出三层独立波导堆叠方案:分别为红、绿、蓝通道设计不同的水平周期,使三色光在各自波导层内具有完全一致的衍射角(约 43°),在输出端实现色度重组与消色差成像,完成了从“单层性能验证”到“双层分色集成”再到“三层消色差优化”的技术演进^[84]。Ye等将PVG的应用从波导耦合提升至波前工程层面,揭示并证明了衍射光相位偏移等于初始方位角两倍的规律,使输出耦合器兼具耦合与波前整形功能^[85]。进一步地,利用Digital Micromirror Device(DMD)全息模板与偏振全息光取向技术,实现了初始方位角的亚微米级空间分辨调控,并展示了片上全息、聚焦及涡旋光生成等功能;通过引入出瞳扩展与多次曝光,进一步在同一波导上集成多种功能区域,为紧凑型多功能光波导系统提供了新范式(图10c)。Zhang等人以太阳能聚光器为应用背景,通过堆叠五个不同螺距的液晶偏振光栅进一步展宽反射带至整个可见光谱,实现了特定圆偏振光的高效、单向、宽角衍射,并将光能约束于玻璃基底内进行波导传输^[86](图10d)。其无色差(CRI达91.3)、无雾度、

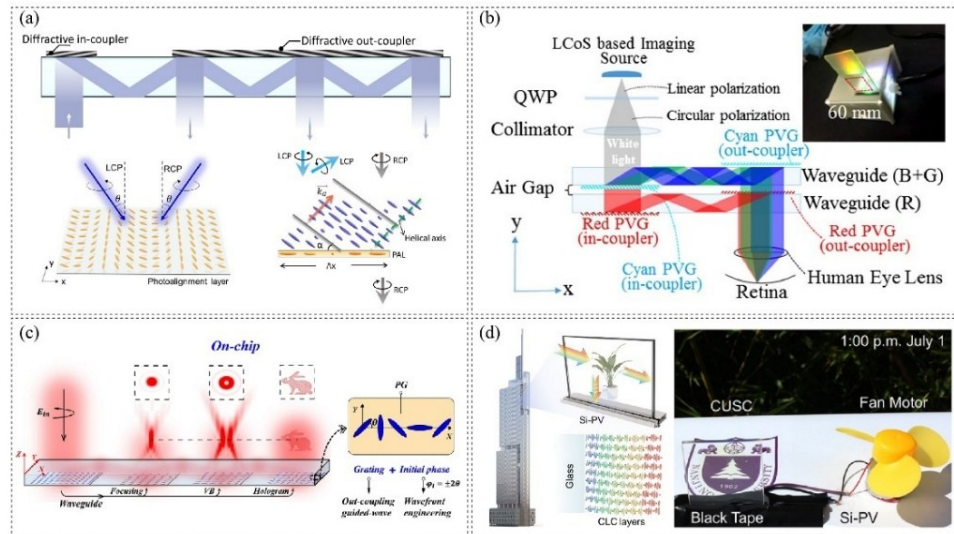


图10 (a)PVG基AR光波导架构、双光束干涉及分子结构示意图^[79],(b)叠层PVG基彩色AR光波导^[83],(c)PVG基片上波前工程^[85],(d)叠层PVG基太阳能聚光器^[86]。

Fig. 10 (a) PVG-based AR waveguide architecture along with two-beam interference and molecular structure schematics^[79], (b) stacked PVG-based color AR waveguide^[83], (c) on-chip wavefront engineering based on PVG^[85], (d) stacked PVG-based solar concentrator^[86].

宽角度($\pm 40^\circ$)的透明光学特性,验证了PVG在可见光波段实现宽带、无色散耦合的可行性,为AR波导中全彩PVG耦合器的材料与结构优化提供了重要参考。钟等人提出并验证了一种基于单层高折射率玻璃基板($n=1.9$)双面集成左手性和右手性液晶偏振体光栅PVG的二维扩瞳光波导AR显示架构^[87]。利用PVG的圆偏振选择性和光栅衍射实现光束分路、全内反射传播及合倒格矢为零时的逐步耦出,从而形成均匀的二维出射光瞳。实验制备的样机(出瞳光栅 $28\text{ mm} \times 22\text{ mm}$)在 532 nm 波长下实现了水平 32.8° 、垂直 18.7° 、对角线 37.8° 的视场角,较前期双波导胶合方案提升 26% ,为高性能AR近眼显示提供了一种潜在的技术路径。

4.4 光计算

当前,传统电子计算面临摩尔定律放缓、功耗激增与数据吞吐瓶颈等严峻挑战,而光计算以其超快并行处理、极低能量损耗和天然的多维信息承载能力(强度、相位、偏振、轨道角动量等)被视为后摩尔时代最具潜力的颠覆性技术之一^[88, 89]。尤其是图像处理等计算任务,若能在光域内直接完成,则可省去“光-电-光”的繁复转换,实现实时、低功耗的信息处理,这对自动驾驶、机器视觉、生物医学成像等场景意义深远。

液晶因其卓越的电光可调性和结构多样性,已成为构建可重构与多功能光学计算平台的关键材料。Chen等人利用铁电液晶的手性螺旋超结构,通过电场极性切换实现了一阶/二阶空间微分与明场成像间的超快($62\text{ }\mu\text{s}$)电控切换,为实时边缘提取提供了高可靠方案^[90];Zhou等人则将成像与计算光谱功能集成于单一液晶单透镜,利用液晶的方位角与极角独立调控空间相位与光谱响应,实现了高保真高光谱成像^[91]。Song等人构建了级联液晶微透镜阵列与聚合物分散液晶薄膜的片上光学计算系统,以三层“线性-非线性”级联架构配合光电协同优化,有效抑制了光学奇点并提升了成像保真度^[92];Wang等人进一步将电调液晶置于 $4f$ 系统频谱面,通过调控相位延迟实现对变系数一阶常微分方程的求解,单次前向传播即可并行求解多达158个方程^[93]。

液晶光子晶体的反射式光场调控特征可以有效地折叠光路,结合其外场响应赋予的光计算器件动态可调谐的“活性”,使工作波长、运算类型等关键参数可按需切换,为光计算开辟了新路径。Zeng等人首次提出了基于CLC的反射式光学边缘检测系统,将传统 $4f$ 成像系统简化为紧凑的 $2f$ 结构,光路长度减半^[94](图11a)。通过在

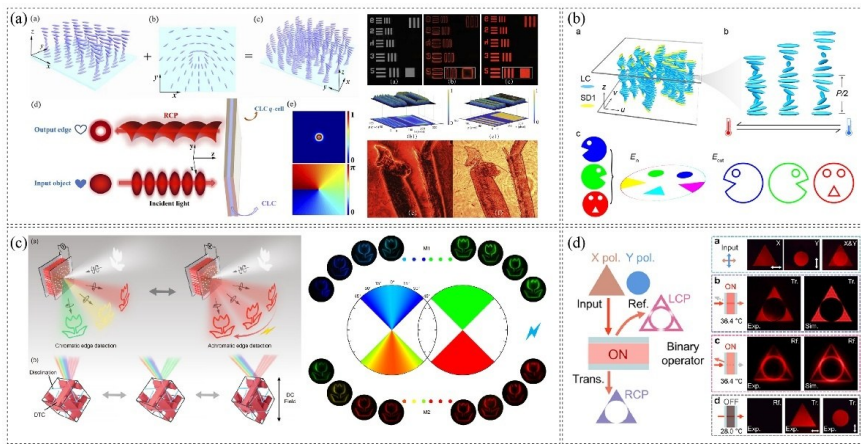


图11 (a)基于CLC实现反射式光学边缘检测的原理及其效果展示^[94], (b)基于温度调节CLC Bragg反射波长实现色彩可选择的光学边缘检测^[95], (c)基于电致BPLC晶格伸缩实现宽视角单色光学边缘检测^[96], (d)基于CLC的光学二进制运算^[97]。

Fig. 11 (a) Principle and performance of reflective optical edge detection based on CLC^[94], (b) color-selectable optical edge detection via temperature-tuning of the Bragg reflection wavelength of CLC^[95], (c) wide-viewing-angle monochromatic optical edge detection via electrically induced lattice expansion of BPLC^[96], (d) CLC-based optical binary operations^[97].

CLC 写入螺旋相位制备 q -plate, 从而作为高通空间频率滤波器, 实现各向同性的边缘增强成像。Chen 等人制备了热致波长调谐的 CLC q -plate, 在不同温度下选择性地提取彩色图像中特定颜色分量的边缘信息, 实现了“边缘+颜色”的同步检测从而实现了色彩可选择的光学边缘检测, 提升光学边缘检测的准确性^[95](图 11b)。Xie 等人针对斜入射下边缘检测器件存在像差与对比度下降的瓶颈, 提出了基于 BPLC q -plate 的宽角度单色边缘检测^[96](图 11c)。研究利用 BPLC 的电致伸缩效应精确补偿了入射角增大导致的反射带蓝移, 从而在 $\pm 45^\circ$ 范围内实现了高质量的单波长边缘成像。除了光学边缘检测外, Zhang 等人利用 CLC 的偏振投影与几何相位, 提出了一种光学二元运算器—将二元输入编码于正交线偏振通道中, 通过液晶光子带隙内的圆偏振投影实现二者的相干干涉, 并借助几何相位为运算提供额外自由度^[97](图 11d); 通过设计液晶指向矢的空间分布, 该器件可分别实现轨道角动量模式的比较以及几何图像的差集运算与边缘增强; 借助热致螺距调谐, 其工作波段可在 1 600 nm 范围内切换, 为可重构的光学二元运算提供了新平台。

4.5 量子光学

早期研究表明, 利用 CLC 的手性光子带隙可增强特定旋向的圆偏振荧光, 而向列相液晶的

定向排列则可诱导掺杂分子偶极取向, 二者分别实现了确定圆偏振与线偏振单光子的室温发射^[98]。此外, CLC 在光子带隙边缘的强色散可引入数倍于脉冲宽度的群延迟, 从而实现单光子波包的可编程时域整形^[99]。然而, 相较于前几节所述的研究领域, 液晶在量子光学中的研究则少得多。令人惊喜的是, 近年来, 新型液晶材料与结构操控技术的快速发展, 有力推动了液晶在量子光源及量子成像领域取得显著进展^[100]。在量子光源产生与调控领域, Sultanov 等人针对传统晶体量子光源模式固定的特点, 首次在铁电向列相液晶 (Ferroelectric nematic liquid crystals, FN-LC) 中实现了基于自发参量下转换的纠缠光子对产生, 并凭借其高达 20 pm/V 的二阶非线性系数, 在数微米厚的样品中获得了清晰的量子符合计数^[101](图 12a)。研究不仅通过施加低至 2 V 的电场即可使双光子偏振态在 $|HH\rangle$ 与 $|VV\rangle$ 之间实时、平滑地切换, 还能沿样品厚度方向设计分子扭转结构来等效替代传统周期极化, 从而在宏观厚度下补偿相位失配并将理论产率提升近三个数量级, 开创性地证明了液晶可作为可编程量子光源的可行平台。Pan 等人通过向 FNLC 中掺杂手性分子构筑自组装螺旋铁电结构, 实现了螺旋准相位匹配, 使纠缠光子对亮度大幅提升至 5 801.6 Hz/mW, 较非相位匹配系统增强逾百倍 (10071 %) ^[102](图 12b)。更关键的是, 通过设计

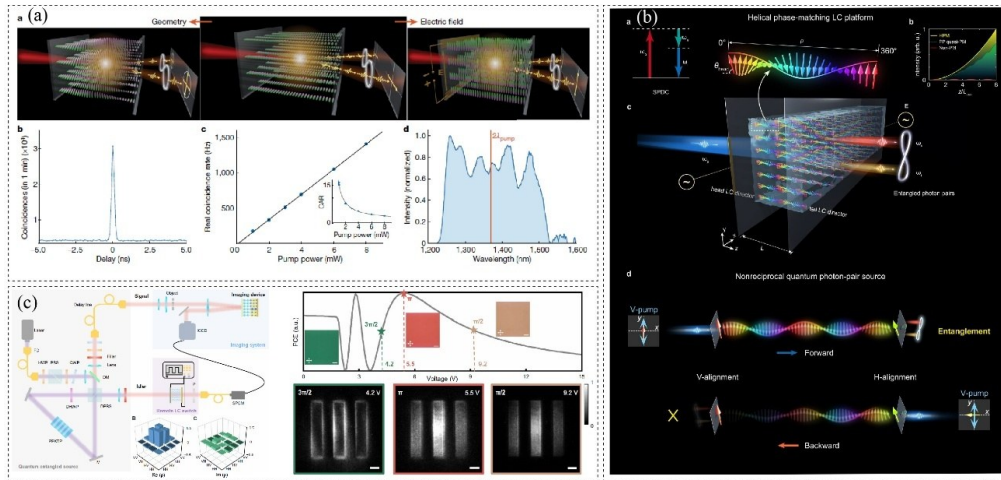


图 12 (a) 基于 FNLC 的可调纠缠光子对^[101], (b) 基于手性 FNLC 的非互易量子光子对源^[102], (c) 基于 CLC 和电调谐 LC 实现可调谐量子成像^[103]。

Fig. 12 (a) Tunable entangled photon-pair generation based on FNLC^[101], (b) Nonreciprocal quantum photon-pair source with chiral FNLC^[102], (c) tunable quantum imaging enabled by CLC and electrically tunable LC^[103].

正交的头尾分子取向, 该工作首次在量子领域实现了高达 22.6 dB 隔离度的非互易纠缠光子产生—即正向传播时满足相位匹配、高效产生光子对, 反向传播时因几何失配而被显著抑制, 而经典线性光学透射仍保持互易; 同时, 实验与理论均表明, 出射双光子的量子偏振态仅由液晶出射面的分子取向决定, 而与入射面取向和泵浦偏振无关, 展现了器件层面单向性量子态操控的全新能力。

针对传统量子成像方案功能单一, 无法动态切换成像模式等难题, Zhu 等人将液晶光子晶体的动态可调性与非经典光场的量子关联相结合, 首次实现了电控可切换的单光子成像^[103] (图 12c)。成像核心器件为双手性 CLC 波片, 其中左旋 CLC 具有均匀面内取向以实现明场成像, 右旋 CLC 被光配向为螺旋相位以基于径向希尔伯

特变换实现各向同性边缘增强成像。实验采用 405 nm 连续激光泵浦 PPKTP 晶体产生 810 nm 偏振纠缠光子对, 信号光子经 4f 成像系统照射目标并被 CLC 调制, 闲置光子则作为 ICCD 相机的符合触发信号—由于偏振纠缠, 对闲置光子偏振态的投影测量将非局域地决定信号光子的偏振态, 从而远程选择成像模式。在闲置臂中, 研究者依次引入向列相液晶波片和铁电液晶波片两种电控方案: 前者相位延迟量随电压连续可调, 结合线偏振片在闲置端分别选择 RCP、LCP 或垂直线偏振分量, 从而将信号光子分别坍塌为边缘检测、明场成像或二者叠加三种模式。该工作将液晶光子晶体的空间频率计算功能与纠缠态非局域操控单片集成, 利用符合测量获得超高信噪比, 为光敏样品无损显微、量子增强视觉及动态量子信息处理开辟新路径。

表 1 CLC 与 BPLC 的结构、性能及应用对比

Tab. 1 Comparison of structures, performance, and applications of CLCs and BPLCs

维度	CLC	BPLC	对比
结构	一维螺旋周期结构	三维周期晶格结构	一维有序 vs. 三维有序
Bragg 响应	沿螺旋轴方向	多晶向 Bragg 响应	定向选择性 vs. 多方向响应
外场响应	依赖驱动机制、材料黏弹性等	涉及晶格重构/相变演化影响	应针对具体驱动模式比较
结构调控	主要调节螺距、倾角及方位角	可调晶格常数、晶向及方位	BPLC 提供更多结构自由度
制备	自组装及光取向工艺相对成熟	对成核、热历史及边界条件更敏感	BPLC 对制备条件要求更高
稳定性	受螺旋结构对温度和外场扰动的响应影响	受缺陷制约, 常需聚合物稳定	BPLC 还需兼顾相态
应用侧重	波前调控、全息、PVG/AR 等	宽角/多方向调控及三维光场操控	成熟二维调控 vs. 三维功能拓展

5 结 论

液晶光子晶体的独特之处, 在于其将自组装螺旋结构与软物质可调性融为一体。与传统光子晶体依赖刚性介电周期不同, 液晶光子晶体的光子带隙源于分子指向矢的螺旋排列, 这一结构根源决定了其两个核心优势: 一是无需高精度微纳加工即可大面积制备; 二是分子间弱相互作用使得光子带隙的位置、宽度乃至手性均可对外界刺激作出响应。更重要的是, 在 Bragg 反射过程中引入自旋-轨道耦合, 使反射光携带 Pancharatnam-Berry 几何相位—这一发现从根本上拓展了液晶光子晶体的功能边界。结合光取向技术对分子取

向图案的空间编程, 液晶光子晶体已从早期的波长选择性反射器, 演进为能够对光波前、偏振态和频谱等参量进行协同定制的平面光学平台。正是这一“结构—相位—功能”的内在线索, 支撑了其在特种光场生成、动态全息显示、增强显示波导、光计算及量子调控等多样化场景中的广泛应用。

本综述未对 CLC 与 BPLC 作严格区分, 理由如下: (1) BPLC 和 CLC 本质上是手性强度不同的手性液晶, 因而将 BP 也被称为“cholesteric BP”^[104]; (2) 尽管二者分别属于一维和三维光子晶体结构, 但目前在结构色显示及几何相位衍射等研究上二者的性质无本质差异。需要指出的是, BPLC 虽为三维光子晶体, 但其研究常被简化

为一维处理,主要原因是结构操控难度较大。然而,BPLC仍蕴藏着诸多尚未充分挖掘的结构维度,例如晶向。晶向并非固定值,而由体自由能与表面锚定能的竞争共同决定。研究表明,在均一向取条件下,热力学历史、表面锚定能、液晶体系手性强度差异可诱导不同的BP相态与晶向^[46,105,106];进一步地,研究者通过自由能模拟获得不同晶向下指向矢分布,并借助刻蚀等技术构建混合取向边界条件(如垂直-平面周期取向、多方位角周期取向),实现了可控晶面的高品质单畴/单晶BPLC的生长^[107-110]。若未来能结合晶向与方位角的精确调控,BPLC作为三维光子晶体的潜力将得以充分释放。

尽管CLC与BPLC均源于手性液晶分子的自组装,并共享自旋选择性Bragg反射及几何相位调制等基本物理机制,二者不同的结构维度使其在器件实现中呈现出不同的性能边界(表1)。前者在结构可控性、大面积制备及二维波前编码方面更为成熟,而后的优势更多体现在三维结构所提供的多方向光场调控自由度。需要强调的是,响应速度、调谐范围及衍射效率并非完全由液晶相态决定,而与材料组成、器件厚度、外场类型及具体调控机制密切相关,因此应结合具体应用需求进行权衡。

此外,液晶光子晶体的性能与应用具有明显的频段依赖性。尽管可见光至太赫兹频段均基于周期性介电调制及Bragg选择性,但工作波长的变化要求材料光学参数、结构周期与器件尺度协同匹配。其中,CLC主要通过螺距及有效折射率调节工作波长,BPLC则依赖三维晶格尺度及材料参数的协同设计。随着工作波长增加,器件面临的主要问题逐渐由精细结构与高空间分辨率控制转向材料损耗和器件尺度的制约;可见光侧重高效率、宽色域及精细波前调控;近红外更关注低损耗及与通信、传感系统的集成;中红外受液晶及器件材料透明窗口和吸收损耗限制;太赫兹则更加依赖材料双折射、吸收及器件厚度。因此,液晶光子晶体的跨频段拓展并非简单的结构尺度缩放,而是材料色散、损耗、双折射与器件尺度之间的协同优化。

多维光场调控技术是当前光学与光子学的研究前沿,通过充分利用光的多个自由度可显著提升信道容量,在光通信、显示等领域具有重要

应用潜力。依据光与物质相互作用理论,对多个光子自由度的响应要求器件具备相应的结构,从而对器件的设计与制备提出高要求。液晶光子晶体凭借其自组装形成的多层级嵌套结构,为上述难题提供了软物质的解决方案。新的挑战在于如何在既定物理框架下进一步拓展和深化器件功能。一个有效策略是异质异构集成—将不同相态或不同结构特征的液晶光子结构整合于同一器件之中,利用各组分在响应速度、调谐机制和光场调控自由度上的互补性,实现单一材料体系难以达成的复合功能。这一思路已在近远场复合显示、多通道全息编码等工作中初见雏形。另一种潜在方案是在新的材料体系中挖掘可能。例如,研究发现,在FNLC中添加手性剂(如常见的手性剂S/R811、S/R5011或特制的极性兼容的手性剂),混合物也出现结构色^[111-113]。因此,如果能够厘清其能带结构和透反射光系数,或将为反射式非线性几何相位光学提供途径。

在应用层面,液晶光子晶体的软物质本性在赋予其卓越可调性的同时,也带来了一系列亟待攻克的技术挑战。其一,分子间弱相互作用虽为外场调控提供了物理基础,但由此形成的复杂序构对高品质、高稳定性晶体器件的制备提出了更高要求。其二,在诸多调控外场中,电场因其高可控性与便捷性而备受青睐。然而,电场直接作用下螺旋结构的解旋问题促使研究者发展出倾斜螺旋CLC、聚合物网络稳定化等结构加固策略。尽管如此,这些方案在调控的便捷性与结构稳定性上,尚难媲美电控向列相液晶所达到的成熟水准。因此,如何在保留液晶光子晶体螺旋结构固有光学功能的同时,进一步提升其电场响应的鲁棒性与可逆性,是推动其走向器件化应用的关键课题之一。突破上述局限,需要软凝聚态物理、材料科学与工程、以及液晶结构编辑与操控技术等多层面的协同推进。软凝聚态物理为理解液晶光子晶体的相行为与序构演化提供理论基石,液晶分子工程与手性掺杂剂筛选则从化学组分层面拓展材料性能边界,而光取向等结构编辑与操控技术,则为序构的精确构筑与外场响应特性的优化提供工艺保障。随着这些方向的研究持续推进,液晶光子晶体平面光子学器件有望在保持可调性优势的前提下,为新一代光子学提供兼具灵活性与可靠性的材料平台。

参 考 文 献:

- [1] YABLONOVITCH E, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters* 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] MEADE R D V, JOHNSON S G, WINN J N, *crystalsPhotonic: molding the flow of light*. Princeton University Press: 2008.
- [3] YARIV A, YEH P A In *Optical waves in crystals: Propagation and control of laser radiation*, John Wiley & Sons: 1983.
- [4] VUKUSIC P, SAMBLES J R, Photonic structures in biology [J]. *Nature* 2003, 424 (6950): 852-855.
- [5] HU L W, LIU X H, LIU C T, *et al.*, Self-assembly fabrication and applications of photonic crystal structure color materials [J]. *Acta Chimica Sinica* 2023, 81 (7): 809-819.
- [6] GENNES P G D, PROST J, *The physics of liquid crystals* [M]. Oxford University Press: 1993.
- [7] YANG D K, WU S T, *Fundamentals of liquid crystal devices* [M]. John Wiley & Sons: 2014.
- [8] 邹鑫, 徐子涵, 蒙翠玲, 等, 光场操控新范式: 液晶多维动态赋能[J]. *液晶与显示* 2025, 40 (10): 1391-1422.
- [9] 王钰, 张一鸣, 谢群, 等, 飞秒激光赋能液晶光子学[J]. *液晶与显示* 2024, 39 (12): 1612-1635.
- [10] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al.*, Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight* 2024, 4 (1): 5.
- [11] CHEN C P, XU M, Geometric-phase versus gradient-index: a showdown for ultimate liquid crystal lenses [J]. *Light: Advanced Manufacturing* 2025, 6 (4): 616-618.
- [12] OTÖN E, MORAWIAK P, GALADYK K, *et al.*, Fast self-assembly of macroscopic blue phase 3D photonic crystals [J]. *Optics Express* 2020, 28 (12): 18202-18211.
- [13] WANG L, LI Q, Stimuli-responsive self-organized liquid crystalline nanostructures: From 1toD 3D photonic crystals. In *Organic and hybrid photonic crystals*, Comoretto, D., Ed. Springer International Publishing: Cham, 2015; pp 393-430.
- [14] CHEN P, WEI B Y, HU W, *et al.*, Liquid-crystal-mediated geometric phase: from transmissive to broadband reflective planar optics [J]. *Advanced Materials* 2020, 32 (27): 1903665.
- [15] MA L L, LI C Y, PAN J T, *et al.*, Self-assembled liquid crystal architectures for soft matter photonics [J]. *Light: Science & Applications* 2022, 11 (1): 270.
- [16] BELYAKOV V A, DMITRIENKO V E, ORLOV V P, Optics of cholesteric liquid crystals [J]. *Soviet Physics Uspekhi* 1979, 22 (2): 64-88.
- [17] OZAKI R, NAKAHIRO K, Electric field analysis in chiral liquid crystals by berreman's 4×4 matrix method [J]. *Japanese Journal of Applied Physics* 2022, 61 (6): 061006.
- [18] SHTRIKMAN R M H S, Landau theory of blue phases [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Incorporating Nonlinear Optics* 1988, 165 (1): 183-211.
- [19] BOHLEY C, SCHARF T, Blue phases as photonic crystals. [M]. SPIE: 2003; Vol. 5184.
- [20] FUKUDA J-I, Simulation of a cholesteric blue phase cell with large but finite thickness [J]. *Frontiers in Soft Matter* 2022, 2: 1011618.
- [21] YANG W J, ZHENG C L, LI J H, *et al.*, Quantitative 3D diffractive optics for tunable lattice symmetry in blue-phase liquid crystals [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2025, 19 (17): 2402278.
- [22] ZHENG Z G, HU H L, ZHANG Z P, *et al.*, Digital photoprogramming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches [J]. *Nature Photonics* 2022, 16 (3): 226-234.
- [23] XIANG J, LI Y N, 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.
- [24] HUANG Y H, ZHOU Y, DOYLE C, *et al.*, Tuning the photonic band gap in cholesteric liquid crystals by temperature-dependent dopant solubility [J]. *Optics Express* 2006, 14 (3): 1236-1242.
- [25] NAM S, WOO S, PARK J Y, *et al.*, Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers [J]. *Light: Science & Applications* 2025, 14 (1): 136.
- [26] MIN J Y, WU Z X, XU X W, *et al.*, Polychromatic anti-counterfeiting enabled by modulus programming in blue phase liquid crystal elastomer films [J]. *Advanced Optical Materials* 2025, 13 (32): e02373.

-
- [27] YANG W J, ZHENG C L, SUN L, *et al.*, Spatiotemporal programmability of 3d chiral color units driven by ink spontaneous diffusion toward customized printing [J]. *Advanced Materials* 2025, 37 (4): 2411988.
 - [28] CHEN Q, OUYANG C, XIE Z, *et al.*, Asymmetric domain growth for bistable information hiding and revealing in blue phase liquid crystals [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2025, 19 (5): 2401635.
 - [29] YUAN C L, HUANG W B, ZHENG Z G, *et al.*, Stimulated transformation of soft helix among helicoidal, heliconical, and their inverse helices [J]. *Science Advances* 2019, 5 (10): eaax9501.
 - [30] CHEN C W, LI C C, JAU H C, *et al.*, Electric field-driven shifting and expansion of photonic band gaps in 3d liquid photonic crystals [J]. *ACS Photonics* 2015, 2 (11): 1524-1531.
 - [31] OUYANG C, CHEN Q M, XIE Z Y, *et al.*, Independent multiple-optical-parameter modulations enabled by manipulating the separate levels of a hierarchical structure [J]. *Advanced Optical Materials* 2025, 13 (11): 2402844.
 - [32] CHEN P, MA L L, HU W, *et al.*, Chirality invertible superstructure mediated active planar optics [J]. *Nature Communications* 2019, 10 (1): 2518.
 - [33] 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.
 - [34] YUAN C L, LIU H X, ZHAN Y X, *et al.*, Electro-thermo cooperative responsiveness of cholesteric heliconical photonics architectures featuring adaptative sensitivity [J]. *Advanced Materials* 2025, 37 (42): 2507000.
 - [35] KOBASHI J, YOSHIDA H, OZAKI M, Polychromatic optical vortex generation from patterned cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review Letters* 2016, 116 (25): 253903.
 - [36] BARBOZA R, BORTOLOZZO U, CLERC M G, *et al.*, Berry phase of light under bragg reflection by chiral liquid-crystal media [J]. *Physical Review Letters* 2016, 117 (5): 053903.
 - [37] RAFAYELYAN M, TKACHENKO G, BRASSELET E, Reflective spin-orbit geometric phase from chiral anisotropic optical media [J]. *Physical Review Letters* 2016, 116 (25): 253902.
 - [38] YOSHIDA H, KOBASHI J, Flat optics with cholesteric and blue phase liquid crystals [J]. *Liquid Crystals* 2016, 43 (13-15): 1909-1919.
 - [39] BERREMAN D W, Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation [J]. *Journal of the Optical Society of America* 1972, 62 (4): 502-510.
 - [40] CHO S Y, TAKAHASHI M, FUKUDA J-I, *et al.*, Directed self-assembly of soft 3D photonic crystals for holograms with omnidirectional circular-polarization selectivity [J]. *Communications Materials* 2021, 2 (1): 1-9.
 - [41] CHIGRINOV V G, KOZENKOV V M, KWOK H-S, Photoalignment of liquid crystalline materials: Physics and applications. [M]. John Wiley & Sons: 2008.
 - [42] JIANG M, GUO Y B, YU H, *et al.*, Low f-number diffraction-limited pancharatnam – berry microlenses enabled by plasmonic photopatterning of liquid crystal polymers [J]. *Advanced Materials* 2019, 31 (18): 1808028.
 - [43] KIM J, LI Y M, MISKIEWICZ M N, *et al.*, Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts [J]. *Optica* 2015, 2 (11): 958-964.
 - [44] LI Y, LIU Y D, LI S D, *et al.*, Single-exposure fabrication of tunable pancharatnam-berry devices using a dye-doped liquid crystal [J]. *Optics Express* 2019, 27: 9054-9060.
 - [45] 陈瑞鑫, 刘子龙, 陈佳浩, 等, 胆甾相液晶中微结构的调控与应用[J]. *液晶与显示* 2026, 41 (6): 769-782.
 - [46] FUKUDA J-I, ŽUMER S, Lattice orientation of cholesteric blue phases in contact with surfaces enforcing unidirectional planar anchoring [J]. *Physical Review Research* 2020, 2 (3): 033407.
 - [47] CHEN Q, WANG X, XU C, *et al.*, Soft mesocrystal enabled multi-degree light modulation [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2024, 18 (5): 2301283.
 - [48] LI X, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, HERNÁNDEZ-ORTIZ J P, *et al.*, Mesoscale martensitic transformation in single crystals of topological defects [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2017, 114 (38): 10011-10016.
 - [49] JIN H M, LI X, DOLAN J A, *et al.*, Soft crystal martensites: An in situ resonant soft X-ray scattering study of a liquid crystal martensitic transformation [J]. *Science Advances* 2020, 6 (13): eaay5986.
 - [50] HE C, SHEN Y J, FORBES A, Towards higher-dimensional structured light [J]. *Light: Science & Applications*

- 2022, 11 (1): 205.
- [51] SHEN Y J, WANG X J, XIE Z W, *et al.*, Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. *Light: Science & Applications* 2019, 8 (1): 90.
 - [52] ZHOU L, ZHONG T J, LIU Y F, *et al.*, When structured light encounters liquid crystals [J]. *Advanced Functional Materials* 2024, 34 (42): 2404614.
 - [53] ZHOU L, XU K, NOSRATKHAH P, *et al.*, Structured light meets liquid crystals—photopatterning or crystallization? [J]. *Matter & Light* 2026, 1 (1): 100001.
 - [54] CHEN P, MA L L, DUAN W, *et al.*, Digitalizing self-assembled chiral superstructures for optical vortex processing [J]. *Advanced Materials* 2018, 30 (10): 1705865.
 - [55] TSUKAMOTO Y, YOSHIDA H, OZAKI M, Generation of coaxial vortex beams with doubled topological charges using a stacked liquid crystal structure [J]. *Japanese Journal of Applied Physics* 2021.
 - [56] GHADIMI NASSIRI M, CHO S Y, YOSHIDA H, *et al.*, High-order Laguerre-Gauss polychromatic beams from Bragg-Berry flat optics [J]. *Physical Review A* 2018, 98 (6): 063834.
 - [57] ZHU L, XU C T, CHEN P, *et al.*, Pancharatnam - Berry phase reversal via opposite-chirality-coexisted superstructures [J]. *Light: Science & Applications* 2022, 11 (1): 135.
 - [58] PAPIČ M, MUR U, ZUHAIL K P, *et al.*, Topological liquid crystal superstructures as structured light lasers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2021, 118 (49): e2110839118.
 - [59] ABBASZADEH H, FRUCHART M, VAN SAARLOOS W, *et al.*, Liquid-crystal-based topological photonics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2021, 118 (4): e2020525118.
 - [60] ZHAO H Q, 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.
 - [61] WU J B, LUO D X, GUO Z H, *et al.*, Topological-defect-featured order evolution of liquid crystals [J]. *Responsive Materials* 2026, 4 (1): e70035.
 - [62] NYCH A, FUKUDA J-I, OGNYSTA U, *et al.*, Spontaneous formation and dynamics of half-skyrmions in a chiral liquid-crystal film [J]. *Nature Physics* 2017, 13 (12): 1215-1220.
 - [63] LIU Y, ZHU L H, XIE X, *et al.*, Broadband coloured skyrmions generated by on-chip ferroelectric spherulites [J]. *eLight* 2026, 6 (1): 18.
 - [64] HESS A J, POY G, TAI J-S B, *et al.*, Control of light by topological solitons in soft chiral birefringent media [J]. *Physical Review X* 2020, 10 (3): 031042.
 - [65] CHEN C W, KHOO I C, Optical vector field rotation and switching with near-unity transmission by fully developed chiral photonic crystals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2021, 118 (16): e2021304118.
 - [66] ZHANG Y H, LIU S J, CHEN P, *et al.*, Logical rotation of non-separable states via uniformly self-assembled chiral superstructures [J]. *Nature Communications* 2024, 15 (1): 1108.
 - [67] CHEN C W, GUO X X, NI X J, *et al.*, Slowing sub-picosecond laser pulses with 0.55 mm-thick cholesteric liquid crystal [J]. *Optical Materials Express* 2017, 7 (6): 2005-2011.
 - [68] CHEN C W, KHOO I C, Extraordinary polarization rotation of vector beams with high-period-number chiral photonic crystals [J]. *Optics Letters* 2019, 44 (21): 5306-5309.
 - [69] 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.
 - [70] CHEN P, SHEN Z X, XU C T, *et al.*, Simultaneous realization of dynamic and hybrid multiplexed holography via light-activated chiral superstructures [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2022, 16 (5): 2200011.
 - [71] XU C T, ZHANG D W, YUAN R, *et al.*, Optical orbital angular momentum processors with electrically tailored working bands [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2023, 17 (7): 2201013.
 - [72] XU C T, LI L, CHEN Q M, *et al.*, Soft chiral superstructure enabled dynamic polychromatic holography [J].

- Opto—Electronic Advances* 2026, 9 (2): 250177-1-250177-9.
- [73] LI L, FAN W W, XU X Y, *et al.*, Polychromatic circularly polarized luminescence enhanced multi-dimensional encryption [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2026, e71287.
- [74] SUN R, LIU S J, ZHANG Y H, *et al.*, Touch-driven bi-chiral superstructures for nested encryption of multiplexed optical information [J]. *Advanced Materials* 2026, 38 (13): e13318.
- [75] OUYANG C, CHEN Q M, ZHANG D W, *et al.*, Multi-parameter enhanced optical encryption with biphasic chiral photonic crystals [J]. *Light: Science & Applications* 2026, 15 (1): 266.
- [76] LIU S J, ZHANG Y H, SUN R, *et al.*, Multidimensional photopatterning of heterogeneous liquid-crystal superstructures toward higher-level information optics [J]. *Advanced Materials* 2025, 37 (37): 2506778.
- [77] XIONG J H, WU S T, Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight* 2021, 1 (1): 3.
- [78] YIN K, HSIANG E L, ZOU J Y, *et al.*, Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: Principles and applications [J]. *Light: Science & Applications* 2022, 11 (1): 161.
- [79] DING Y Q, YANG Q, LI Y, *et al.*, Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges [J]. *eLight* 2023, 3 (1): 24.
- [80] NYS I, STEBRYTE M, USSEMBAYEV Y Y, *et al.*, Tilted chiral liquid crystal gratings for efficient large-angle diffraction [J]. *Advanced Optical Materials* 2019, 7 (22): 1901364.
- [81] NYS I, Patterned surface alignment to create complex three-dimensional nematic and chiral nematic liquid crystal structures [J]. *Liquid Crystals Today* 2020, 29 (4): 65-83.
- [82] LEE Y H, YIN K, WU S T, Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays [J]. *Optics Express* 2017, 25 (22): 27008-27014.
- [83] WENG Y S, ZHANG Y N, CUI J Y, *et al.*, Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays [J]. *Optics Letters* 2018, 43 (23): 5773-5776.
- [84] YAN X D, LIU M X, ZHU J X, *et al.*, Chromatic-aberration-free full-color augmented reality display via triple-stacked liquid crystal polarization volume grating waveguides [J]. *Optics Express* 2025, 33 (11): 24185-24192.
- [85] YE X L, JIANG X Y, ZHOU Y J, *et al.*, Polarization volume hologram for on-chip wavefront engineering [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2025, 19 (4): 2401460.
- [86] ZHANG D W, GUO Z H, XU C T, *et al.*, Colorless and unidirectional diffractive-type solar concentrators compatible with existing windows [J]. *Photonix* 2025, 6 (1): 20.
- [87] 钟梁志煌, 陈全明, 罗丹, 基于单层基板双面液晶偏振体光栅的大视场角光波导AR显示 [J]. *液晶与显示* 2026, 41 (2): 1-9.
- [88] CAULFIELD H J, DOLEV S, Why future supercomputing requires optics [J]. *Nature Photonics* 2010, 4 (5): 261-263.
- [89] SOLLI D R, JALALI B, Analog optical computing [J]. *Nature Photonics* 2015, 9 (11): 704-706.
- [90] CHEN W, ZHU D, CHEN S N, *et al.*, Reconfigurable ferroelectric chiral nanostructures enable fast-switchable optical spatial differentiation [J]. *Light: Science & Applications* 2026, 15 (1): 285.
- [91] ZHOU Z, ZHANG Y H, XIE Y X, *et al.*, Electrically tunable planar liquid-crystal singlets for simultaneous spectrometry and imaging [J]. *Light: Science & Applications* 2024, 13 (1): 242.
- [92] SONG X Y, LI H, LI Z K, *et al.*, Real-time singularity modulation with a liquid crystal on-chip optical computing system for high-fidelity imaging [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2026, 20 (8): e01529.
- [93] WANG J H, CHEN W, ZHOU Z, *et al.*, Massively parallel and programmable photonic differential equation solver [J]. *Opto—Electronic Advances* 2026, 9 (5): 250244-1-250244-10.
- [94] ZENG T, XIE J, ZHOU Y, *et al.*, Selectively reflective edge detection system based on cholesteric liquid crystal [J]. *Optics Letters* 2023, 48 (3): 795-798.
- [95] CHEN Q M, WANG H C, WANG G Y, *et al.*, Color-selective optical edge detection enabled by thermally stimulated cholesteric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters* 2023, 123 (25): 251101.
- [96] XIE Z Y, CHEN Q M, OUYANG C, *et al.*, Monochromatic wide-angle optical edge detection enabled by a three-

- dimensional soft photonic crystal [J]. *Advanced Functional Materials* 2025, 35 (44): 2500920.
- [97] ZHANG Y H, DING S H, WANG Y M, *et al.*, Optical binary operator based on thermally controllable chiral superstructures [J]. *Nano Letters* 2025, 25 (19): 7952-7959.
- [98] LUKISHOVA S G, LIAPIS A C, BISSELL L J, *et al.*, Single-photon experiments with liquid crystals for quantum science and quantum engineering applications [J]. *Liquid Crystals Reviews* 2014, 2 (2): 111-129.
- [99] LIAPIS A C, GEHRING G M, LUKISHOVA S G, *et al.* In *Temporal reshaping of single photon wave packets using cholesteric liquid crystals*, *Frontiers in Optics* 2012, Rochester, New York, 2012/10/14; Optica Publishing Group: Rochester, New York, 2012; p LTu4J. 7.
- [100] OTIENO E, MATCZYSZYN K, MOKAYA N, crystalsLiquid: Unlocking the quantum revolution in computing [J]. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology* 2024, 15 (4): 1000517.
- [101] SULTANOV V, KAVČIČ A, KOKKINAKIS E, *et al.*, Tunable entangled photon-pair generation in a liquid crystal [J]. *Nature* 2024, 631 (8020): 294-299.
- [102] PAN J T, WU Y K, MA L L, *et al.*, Nonreciprocal quantum photon-pair source with chiral ferroelectric nematics [J]. *arXiv*:2503.11399.
- [103] ZHU D, DING S H, SUN R, *et al.*, Advancing quantum imaging: electrical tunability enabled by versatile liquid crystals [J]. *Science Advances* 2026, 12 (5): eadz8962.
- [104] FUKUDA J, ZUMER S, Cholesteric blue phases: effect of strong confinement [J]. *Liquid Crystals* 2010, 37 (6-7): 875-882.
- [105] TAKAHASHI M, OHKAWA T, YOSHIDA H, *et al.*, Orientation of liquid crystalline blue phases on unidirectionally orienting surfaces [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2018, 51 (10): 104003.
- [106] OTÖN E, YOSHIDA H, MORAWIAK P, *et al.*, Orientation control of ideal blue phase photonic crystals [J]. *Scientific Reports* 2020, 10 (1): 10148.
- [107] MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, LI X, SADATI M, *et al.*, Directed self-assembly of liquid crystalline blue-phases into ideal single-crystals [J]. *Nature Communications* 2017, 8 (1): 15854.
- [108] LI X, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, GUZMÁN O, *et al.*, Sculpted grain boundaries in soft crystals [J]. *Science Advances* 2019, 5 (11): eaax9112.
- [109] LIU S, NYS I, NEYTS K, Two-step photoalignment with high resolution for the alignment of blue phase liquid crystal [J]. *Advanced Optical Materials* 2022, 10 (17): 2200711.
- [110] LIU S Q, MARINČIČ M, NYS I, *et al.*, Photopatterned anchoring stabilizing monodomain blue phases [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2024, 16 (49): 68579 - 68589.
- [111] ZHAO X H, ZHOU J C, LI J X, *et al.*, Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: electric analog to helimagnets [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2021, 118 (42): e2111101118.
- [112] WANG H, BALA I, WISCONS R A, *et al.*, Color tuning in ferroelectric nematic liquid crystals using triptycene/hydrazone chiral photoswitches [J]. *Advanced Materials* 2025, 37 (44): e09125.
- [113] SZUKALSKA A B, KARCZ J, HERMAN J, *et al.*, Temperature-tunable heliconical and ferroelectric nematics for white lasing [J]. *Advanced Materials* 2026, 38 (1): e11648.

作者简介:



陈全明,男,博士,副教授,2023年于南京大学获得博士学位,主要从事液晶光场调控方面的研究。
E-mail:chenquanming@hfut.edu.cn