

文章编号:1007-2780(2026)04-0463-10

聚合物稳定蓝相液晶的取向控制与电场调谐

刘梦茹, 马宇航, 段霞, 李博远, 刘璇, 张宇贤*, 郑致刚
(华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘要: 蓝相液晶作为具有自组装三维晶格结构的光子晶体, 在可调谐光子器件及光谱调控等领域展现出广阔的应用前景。为拓展蓝相液晶的反射光谱范围, 本研究提出电调谐聚合物稳定蓝相液晶的方案, 并进行理论分析和数据表征。首先, 通过光取向技术获得均一排列的单畴蓝相液晶, 利用紫外光固化其中单体形成聚合物网络, 制备具有良好热稳定性的聚合物稳定蓝相液晶。对液晶盒施加直流电场诱导其晶格变形, 实现反射光谱的宽范围调谐。进一步地, 将光学相位信息编码至液晶分子的取向分布, 通过聚合物稳定蓝相液晶的图案化取向, 实现了全息显示应用。结果表明, 聚合物稳定蓝相液晶在直流电场作用下可以实现反射光谱中心波长在 439~662 nm 波段范围的可逆调谐, 基于反射式全息相位设计可以重现出可见光范围的彩色图像。该研究为构建稳定且电可调谐宽反射波段的功能材料提供了有效方案, 在信息显示、光学加密和光子器件等领域展现出应用潜力。

关键词: 液晶; 聚合物稳定蓝相; 电调谐; 光取向; 全息

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2026-0054 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2026-0054

Orientation control and electric field tuning of polymer-stabilized blue phase liquid crystal

LIU Mengru, MA Yuhang, DUAN Xia, LI Boyuan, LIU Xuan, ZHANG Yuxian*, ZHENG Zhigang

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Blue phase liquid crystals (BPLCs), as self-organized three-dimensional photonic crystals, have demonstrated broad application prospects in tunable photonic devices and spectral modulation. To broaden their range of reflection, we propose an electrically tunable polymer-stabilized blue phase liquid crystal (PSBPLC) system and validate it through theoretical analysis and experimental characterization. First, uniform monodomain BPLC is obtained via photoalignment, followed by photopolymerization to form polymer networks, thereby enhancing the structural stability. Subsequently, by applying a direct current (DC) voltage upon the liquid crystal cell, lattice deformation is induced, enabling wide-range tuning of the reflection spectrum. Furthermore, optical phase information is encoded into the orientation distribution of

收稿日期: 2026-03-06; **修订日期:** 2026-03-15.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFA1203700); 国家自然科学基金基础科学中心 (No. T2488302); 国家自然科学基金 (No. 62275081, No. 62575101, No. 62575014); 上海市教育委员会 (No. 2021-01-07-00-02-E00107)
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFA1203700); Basic Science Center of National Natural Science Foundation (No. T2488302); National Natural Science Foundation of China (No. 62275081, No. 62575101, No. 62575014); Shanghai Municipal Education Commission (No. 2021-01-07-00-02-E00107)

*通信联系人, E-mail: yuxianzhang@ecust.edu.cn

liquid crystal molecules, enabling holographic display applications via patterned alignment of PSBPs. Results indicate that, under the influence of DC electric field, the central wavelength of the reflection spectrum can be reversibly tuned from 439 nm to 662 nm. The corresponding reflective holographic phase design can reconstruct color images across the visible spectrum. This work provides a viable approach for developing stable, electrically tunable materials with a broad reflection range, showing promising potential in fields such as information display, optical encryption and photonic devices.

Key words: liquid crystals; polymer-stabilized blue phase; electrically tunable; photoalignment; holography

1 引言

蓝相液晶存在于高手性液晶体系中,其分子自组装成双螺旋圆柱体,进而在空间中形成具有立方对称性的三维晶格结构,内部分布有周期性的位错缺陷^[1-2]。蓝相相态介于各向同性相与胆甾相之间,通常呈现体心立方结构(蓝相 I)或者简单立方(蓝相 II)结构^[3-5],其晶格常数为数百纳米,因此能够在可见光波段产生选择性布拉格反射,并对特定手性的圆偏振光具有选择性^[6]。蓝相液晶由于其立方对称性,在零外场下可视为光学各向同性,并且具有无需取向层和亚毫秒级的快速电光响应特性^[7-8]。得益于其独特的结构与优异的电光响应特性,蓝相液晶在激光器、光通信和全息波前调控等多个领域展现出重要的应用前景^[9-14],因此蓝相液晶的研究对推动光学功能材料与器件的发展具有重要意义。

近些年,蓝相液晶的光电调控研究取得了显著进展。除电场外,光场和温度等外部刺激也能够用于蓝相的光子带隙调节^[15-19],然而,电场调谐具有响应快和易于器件集成等优势^[20-21]。在外加电场刺激下,蓝相液晶的立方对称性会被破坏,电场作用下双螺旋圆柱结构发生取向畸变,从而诱导宏观双折射,即表现为克尔效应^[22-23]。此外,在不同电场强度条件下,还能发生晶格畸变甚至相态转变^[24-25],实现反射光谱的动态调谐。由于蓝相通常仅在极窄的 0.5~2.0 °C 温度范围内稳定存在,使其在实际器件中的应用受到了限制^[26]。2002 年, Kikuchi 等人提出了聚合物稳定蓝相来拓宽温度范围,通过在蓝相体系中引入少量可聚单体并进行光聚合,形成贯穿整个蓝相晶格的三维聚合物网络,该体系的温域超过 60 K,快速响应时间约为 10^{-4} s^[27]。Lu 等人报道了聚合物稳定蓝相在电场作用下实现了两种颜色的布拉格反射

切换,比蓝相的调控范围更宽^[28]。Zhu 等人通过制备两种不同手性剂浓度的样品,施加交流电场而使光谱发生连续、可逆且快速的调谐,可整体覆盖整个可见光谱^[29]。研究表明,电场调控能够实现聚合物稳定蓝相的多波长反射及电致晶格重构等多功能调控^[30-31],为实现可调谐反射光谱提供了重要途径。然而,实现聚合物稳定蓝相液晶在宽反射波段内稳定且可逆的电调谐仍有待进一步研究。另一方面,蓝相液晶三维晶格结构的复杂性为聚合物稳定体系中的蓝相晶格取向控制带来难度,相关光学应用仍有待进一步探索。

本工作通过光取向技术制备了均一取向的单畴蓝相液晶,并结合紫外光照射聚合形成聚合物网络,获得了温域超过 70 K 的聚合物稳定蓝相液晶,具有良好的热稳定性。在此基础上,通过施加不同极性和大小的偏置电压,在定向静电力的作用下诱导聚合物网络位移,从而引起晶格的拉伸或者压缩变形,并利用原位 Kossel 图对其变形机理进行表征和分析。通过电场驱动实现了中心波长在 439~662 nm 范围内的反射光谱调谐,并在 20 次加电循环中表现出良好的可逆性。最后,通过将光学相位信息编码至液晶分子取向分布中,实现了基于聚合稳定蓝相液晶的反射式全息应用,可再现多波长全息图像并表现出圆偏振选择性。本工作为实现稳定且电可调谐的宽反射波段蓝相液晶材料提供了有效途径,在信息显示与光学加密等领域具有潜在的应用潜力。

2 聚合物稳定蓝相液晶的制备及其稳定性表征

2.1 聚合物稳定蓝相液晶的制备过程

图 1(a)为蓝相的体心立方晶格结构,内部包含了双螺旋圆柱和位错缺陷。通过向蓝相体系

中添加少量的可聚合单体,在蓝相形成时利用紫外光诱导聚合反应,可以构建如图1(b)所示的聚合物稳定蓝相液晶结构,其中聚合物网络贯穿在整个蓝相晶格中。本研究的设计原理为:通过对液晶盒两侧施加不同偏压和幅度的直流电场刺激,诱导晶格变形,致使反射光谱的迁移,从而呈现覆盖整个可见光范围的宽波段反射。

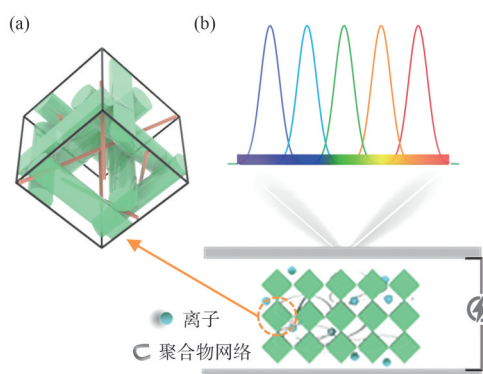


图1 (a)蓝相的晶格结构示意图;(b)聚合物稳定蓝相液晶的结构示意图。

Fig.1 (a) Schematic diagram of the blue phase lattice structure; (b) Schematic diagram of the structure of polymer-stabilized blue phase liquid crystal.

本实验用来制备聚合物稳定蓝相的材料包括:两种向列型液晶 HTG135200-100 和 E7(江苏和成显示科技有限公司)、手性剂 R5011(烟台显化)、液晶性单体 RM257(Merck)和 C6M(Macklin)、非液晶性单体 EHA(Adams)以及光引发剂 Irgacure184(I-184,BASF)。上述组分的质量比为 43.2:43.2:3.4:2.4:2.8:4.5:0.5。

本实验采用光控取向方式,利用光致异构化材料响应偏振光写入取向方向,具有非接触、取向精度高的优势,并且可以实现多区域、图案化取向。首先将 ITO 玻璃基板经擦拭、超声和臭氧后清洗干净,利用旋涂仪将质量分数为 0.5% 的 SD1 取向剂均匀覆盖在基板表面,接着置于 100 °C 的热台烘烤 10 min 挥发溶剂。使用厚度为 10 μm 的超薄光学双面胶带将两片玻璃粘合成液晶盒,并在盒体两侧涂胶进行密封固化。将液晶盒放置在线偏振紫外光下照射 3 min,以诱导 SD1 分子发生均一取向,实现光控取向。

将搅拌均匀的样品材料加热到清亮点温度,通过毛细作用将其注入到光取向液晶盒中。将

液晶盒置于精密控温热台(Instec LN2-P)上,从各向同性态开始以 0.3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率开始降温。利用偏光显微镜(POM, Nikon LV100POL)反射模式观察液晶的光学织构并用 CCD 记录下来,利用精密光谱仪(ULS2048, Avantes)测量其特征反射光谱。

在降温过程中,液晶盒中的蓝相液晶生长均匀,并经历了各向同性态-蓝相态-胆甾相态这 3 种相态的变化。蓝相温度范围的 POM 和光谱记录如图 2(a)和图 2(b)所示。降温至 46.2 $^{\circ}\text{C}$ 时织构开始呈现暗红色,随着温度继续降低,蓝相的颜色逐渐变得明亮,并且颜色由红色转变为黄色,最

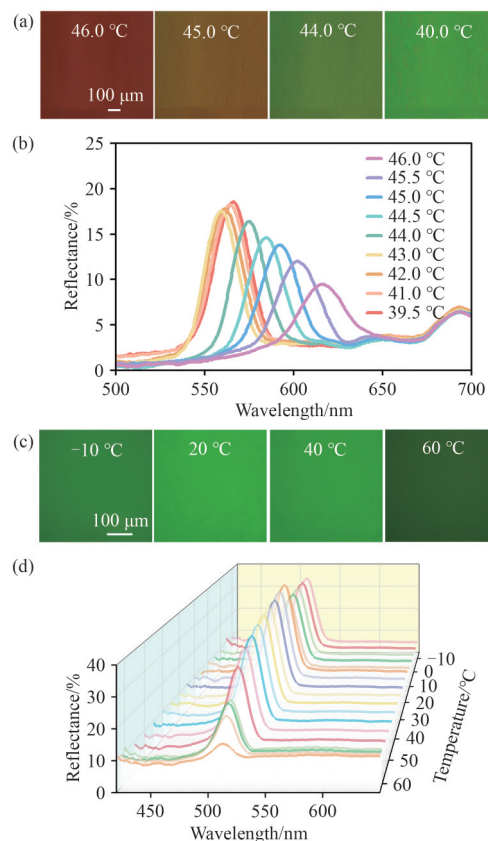


图2 聚合物稳定蓝相液晶材料体系在聚合前及聚合后的基本性质表征。聚合前的(a) POM 图片和(b)反射光谱;聚合后的(c) POM 图片和(d)反射光谱。比例尺:100 μm 。

Fig.2 Basic characterization of the polymer-stabilized blue phase liquid crystalline materials before and after polymerization. (a) POM images and (b) reflection spectra before polymerization; (c) POM images and (d) reflection spectra after polymerization. Scale bar: 100 μm .

后保持在明亮的绿色。温度低至 39.0 °C 时出现游丝织构,相变为胆甾相。反射光谱的曲线也同样反应了蓝相的生长过程:在 46.0 °C 时光谱的反射率较低,中心波长为 616 nm。随着温度的降低,反射光谱中心波长逐渐蓝移,并且光谱反射率不断提高,43.0 °C 时中心波长移动到最小为 559 nm。温度继续降低时中心波长发生轻微的红移,反射率轻微增大,39.5 °C 时中心波长红移至 566 nm,反射率接近 20%。另外,整个蓝相生长过程都呈现出均一取向,表现出优异的光学性质。这种高质量的单畴取向有利于进行后续的实验和应用。

将灌有液晶混合物的样品放在热台上,从各向同性态以 0.3 °C·min⁻¹ 的速率进行降温,降到 41 °C 温度呈现稳定的蓝相态时进行紫外光聚合,实验中采用的紫外光波长为 365 nm,光功率为 2 mW·cm⁻²,聚合时间为 30 min。

2.2 聚合物稳定蓝相液晶的热稳定性表征

聚合物稳定蓝相液晶材料体系中的可聚合单体含量(质量分数)约占 10%,在紫外光下聚合后,能将聚合物网络稳定在蓝相晶格的位错缺陷处^[27],大幅降低整个体系的自由能,并且仍然保持蓝相晶格原有的立方结构,从而有效提高蓝相结构的稳定性,拓宽蓝相液晶的温度范围。

图 2(c)和图 2(d)展示了表征聚合物稳定蓝相液晶的热稳定性的 POM 图和光谱曲线。相较于图 2(b)中聚合前的反射光谱,聚合后的反射中心波长发生轻微蓝移,并且反射率也更高,在室温下可达 30% 以上。将聚合后的聚合物稳定蓝相样品放置在热台上,以 5 °C·min⁻¹ 的速率由室温(25 °C)进行升温,随着温度的增高,样品的织构颜色基本没有改变。虽然亮度发生微小的衰减,在 55 °C 时样品反射率仍能保持在 24%。而温度继续增大到 60 °C 时样品亮度显著降低,反射率也明显减小,在 63 °C 时反射率仅有不到 5%,POM 转变为暗态。随后,采用同样的速率降温至室温,保持 10 min 使聚合物稳定蓝相的织构恢复。然后,以 5 °C·min⁻¹ 的速率由室温进行降温,样品颜色仍基本不变,随着温度的降低,亮度逐渐减弱,降温至 -10 °C 时样品反射率仍能保持为 28%。

图 2(a)中聚合前的蓝相温度范围约为 7.2 °C,聚合后,聚合物稳定蓝相的温度范围已经超过了

70 °C,并且包含室温在内,具有优异的热稳定性。因此聚合物温度蓝相液晶在聚合后可以于室温环境中稳定存在而无需依赖热台,这为蓝相材料在后续的电调谐及光学器件中的应用奠定了基础。

3 结果与讨论

3.1 聚合物稳定蓝相液晶的电调谐性能

通过对聚合物稳定蓝相液晶的液晶盒施加直流偏置电压,可以调谐其反射波段的覆盖范围。利用信号发生器((DG4062, Rigol Technologies Inc.)和信号放大器(TEGAM2340)对样品施加直流电,定义液晶盒在加电过程中靠近光源的玻璃基板为上基板,远离的基板则为下基板,上、下基板分别接在信号发生器的正极和负极,将电场方向由上基板指向下基板时的方向记为正向(+),反之则记为负向(-)。

图 3(a)为在不同电场方向和强度的偏置直流电压下的 POM 图,在不施加外电场的条件下,聚合物稳定蓝相样品呈现鲜艳的绿色;施加正向直流电时,随着电场强度的增大,其反射色由绿色转变为黄色,又变为红色;调换直流电方向为负向时,反射色则转变为蓝色。对应上述施加直流电场过程的反射光谱曲线如图 3(b)所示。在正向偏置电场下,光谱中心波长由初始的 534 nm 发生红移,在 +3.4 V·μm⁻¹ 的电场强度下可以红移至 662 nm;调转为负向偏置电场,中心波长则发生蓝移,并且在 -2.5 V·μm⁻¹ 的电场强度下中心波长最小可至 439 nm。在超出 +3.4 V·μm⁻¹ 时样品发生不可逆击穿,而低于 -2.5 V·μm⁻¹ 时反射率接近于零,撤电后反射光谱仍能出现,但无法恢复至初始位置。在整个直流电场的电调谐过程中,可以实现超过 220 nm 的反射波段调谐,调谐范围覆盖整个可见光波段。

通过分析蓝相立方晶格的变形,可以解释聚合物稳定蓝相在直流偏置电压下的反射光谱移动的内在机理。蓝相在正入射下的反射波长满足布拉格定律,可以表示为:

$$\lambda = \frac{2na}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (1)$$

其中:(*h k l*)是晶面密勒指数,此处为体心立方结构的(110)晶面;*n*是液晶的平均折射率;*a*是晶格常数。根据公式(1)能够计算出不同波长所对应

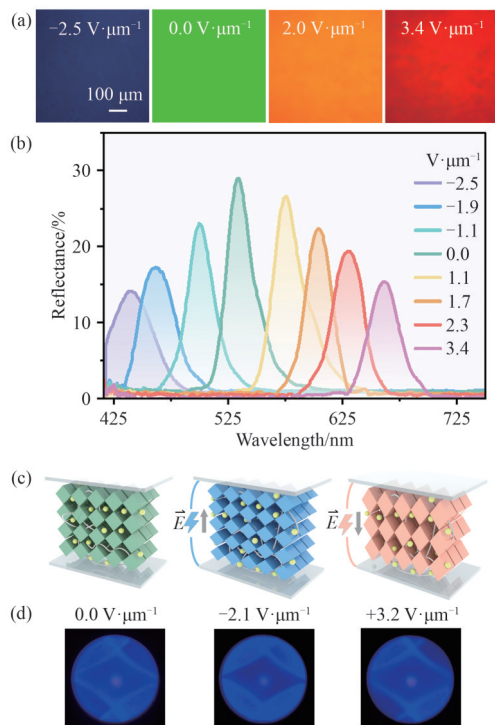


图3 聚合物稳定蓝相液晶的电调谐性能表征。直流电场下的(a) POM图片, (b) 反射光谱, (c) 晶格变形示意图及(d) 对应的Kossel图。比例尺: 100 μm 。

Fig. 3 Characterization of electrically tunable properties of polymer-stabilized blue phase. (a) POM images, (b) reflection spectral curves, (c) schematic of lattice deformation, (d) corresponding Kossel diagrams under a DC electric field. Scale bar: 100 μm .

的晶格常数。在 $0.0 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 、 $-2.5 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $+3.4 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 电场下, 分别对应的晶格常数为 244 nm、200 nm 和 302 nm, 即在沿着电场的方向, 蓝相晶格常数在负偏置电压下减小, 在正偏置电压下增大。

已有研究表明, 聚合物稳定液晶在直流偏置电场中的电光调谐来源于体系中的离子迁移^[32]: 聚合物网络捕获阳离子, 在定向静电力下发生密度分布不均的位移, 进而引起晶格形变。与 Kerr 效应的亚毫秒级响应不同^[33], 此过程的响应时间约为几秒。另外, 在我们的聚合物稳定蓝相液晶体系中, 直流偏置电场作用于聚合物网络, 虽然蓝相晶格发生了变形, 但由于聚合物网络的限制作用, 仅使蓝相晶格由立方相转变为斜方相, 继续增大电压将导致体系崩塌^[34], 这与小分子蓝相液晶的电致伸缩有所区别。因此, 我们将本工作中聚合物稳定蓝相液晶体系在正偏置电场和负偏

置电场下发生的光谱调谐归因于离子迁移效应。

图3(c)为聚合物稳定蓝相分别在不施加电压、施加负向直流偏压和正向直流偏压下的晶格变形示意图。由于商用液晶混合物中存在杂质离子, 在没有外加电压时, 蓝相晶格以常规的体心立方结构被聚合物网络均匀分布在液晶盒内。施加正向偏置电压时, 混合物中的正性离子沿着电场方向从上基板移动向下基板, 从而致使聚合物网络向下基板迁移, 因此在观察的上基板附近, 晶格结构沿电场方向被拉伸变形。反之, 在施加负向偏置电压时, 其中的正性离子会沿着电场方向从下基板移动向上基板, 引起聚合物网络向上基板迁移, 因此晶格的立方结构沿电场方向被压缩。

除了通过 POM 图片和光谱曲线对聚合物稳定蓝相的晶格结构进行表征外, 这里利用 Kossel 衍射技术来表征其在直流电调谐下的晶格结构变化过程。实验中采用高数值孔径物镜 ($100\times$, N. A. = 0.8, Nikon)、勃氏镜和滤光片 ($\lambda=430 \text{ nm}$) 来获得 Kossel 衍射图样。图3(d)分别为聚合物稳定蓝相在无外加电压、施加负向直流偏压和正向直流偏压条件下的 Kossel 图。在负偏置电压下, 具有双重对称性的衍射弧线向视野中心收缩; 而在正偏置电压下, 弧线则向外扩张。表明了晶格在垂直于电场方向上的晶面间距分别增大和减小, 即对应于晶格在电场方向上的压缩和拉伸变形。该结果进一步证明了直流电场调谐使聚合物稳定蓝相的晶格结构变形, 从而实现对反射光谱的宽波段调制。

图4(a)为直流电场作用下, 反射光谱半高宽的动态响应关系。在未施加电场时, 反射光谱半高宽为 26 nm; 在正向直流电场为 $+3.4 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 下, 反射峰半高宽为 31 nm; 而在负向直流电场下, 反射峰半高宽为 44 nm ($-2.5 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), 被扩展 18 nm。在电场调谐反射光谱移动的过程中, 由于晶格变形扰乱了聚合物稳定蓝相液晶体系的周期均匀性, 导致反射峰的半高宽发生展宽, 反射率也有所下降。另外, 为了评估聚合物稳定蓝相在电场调谐下的结构稳定性与可靠性, 对其施加正/负交替的直流偏置电压进行循环测试。图4(b)展示了在反复加电调谐过程中的反射光谱曲线, 其中将一次的负向和正向直流电压切换定义为一个

30%,而无取向区域的反射率不足10%。对应插图POM图也验证了这一差异,全息取向区域呈现明亮的绿色反射,而无取向区域则表现为低亮度暗态。结果表明,蓝相晶格在图案化取向中仍能保持晶面的高度一致性,为后续全息图像的高质量重现提供了基础。

为了确保聚合物稳定蓝相全息器件的电调谐重现能力,对其施加直流偏置电压进行调控。图5(d)为该器件反射波长随电场强度变化的关系。在正偏置电压下,中心波长随着电场强度增加发生红移;而在负偏置电压下,则随着电场强度增加发生蓝移。其中插图分别为电场强度在 $-2.1 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $+2.3 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时的全息POM图片,对应的反射波长分别为457 nm和633 nm。结果表明,该全息应用能够通过电调谐实现可见光范围的调制,为全息显示的重现提供了重要的材料基础。

3.3 全息图像的再现

基于上述直流偏置电场诱导蓝相晶格变形进而实现反射波段的调谐特性,我们进一步在直流电场下对聚合物稳定蓝相全息图进行重现。由于反射中心波段会随直流偏置电场发生变化,因此相对应地也能实现不同波长的再现图像。

图6展示了全息图像再现的实验光路。其中,入射激光(波长为532 nm、457 nm和633 nm)经过光阑调整至合适样品的尺寸,并使用偏振片和1/4波片控制光束的偏振状态,得到实验所需要的右旋圆偏振光。激光照射到样品的全息取向区域后,反射光束通过分束棱镜后沿着垂直入射光路方向重新定向,而后经过一组透镜将衍射全息图像重现出来,最终由相机捕获。

图7(a)为无外加电压时在532 nm激光下的全息图像重现,图7(b)和图7(c)分别为施加 $-2.1 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $+2.3 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的直流电场时,在

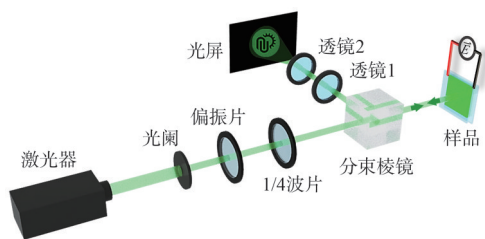


图6 实验光路示意图

Fig. 6 Schematic of the experimental optical setup

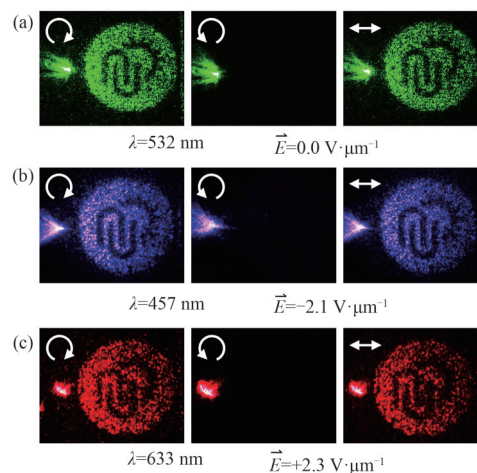


图7 电调谐宽反射波段的重现全息图。在激光波长为(a) 532 nm、(b) 457 nm和(c) 633 nm时,不同直流偏置电压下的反射全息图像,入射光束分别为右旋圆偏振光、左旋圆偏振光和线偏振光。

Fig. 7 Reconstructed holograms with an electrically tunable broad reflection band. Reflected holograms at different DC bias voltages for laser wavelengths of (a) 532 nm, (b) 457 nm, and (c) 633 nm, under incident beams of right-handed circularly polarized, left-handed circularly polarized, and linearly polarized, respectively.

457 nm和633 nm激光照射下重现出的校徽全息图像,分别呈现绿色、蓝色和红色的图案。该结果与图5的电场调谐反射光谱的规律保持高度一致,表明电场诱导的晶格变形能够有效调控全息衍射波长,实现可见光范围的重现。同时,该全息应用表现出圆偏振选择性,仅反射与手性掺杂剂手性方向相匹配的偏振态。如图7(a)、图7(b)、图7(c)所示,当入射光为右旋圆偏振光时,可清晰观察到全息图;而左旋圆偏振光入射时,则不产生全息图像,体现出优异的偏振选择能力。对于线偏振入射光,由于其左旋圆偏振光分量的存在,重建图像的强度低于右旋圆偏振光入射时的反射情况。我们实验演示了具有宽带可调特性和圆偏振选择性的反射式全息应用,为可调谐全息显示与光子器件的发展提供了重要的研究基础。

4 结 论

本文首先采用光取向技术制备了单畴的蓝相液晶,并结合紫外光聚合形成稳定的三维聚合

物网络,成功制备了具有优异热稳定性的聚合物稳定蓝相液晶体系(温域超过 70 K)。在此基础上,利用直流电场诱导晶格产生变形,实现了反射光谱的电场调谐,其中心波长可在 439~662 nm 范围内变化。该电调谐过程经过 20 次的正/负直流电压循环仍表现出良好的可逆性与稳定性。进一步地,基于几何相位调控原理,通过对液晶

分子取向分布进行空间编码,构建了图案化取向的聚合物稳定蓝相液晶,实现了多波长调控的全息显示,并展现出圆偏振选择特性。本研究为实现兼具宽光谱调控能力与高稳定性的功能材料提供可行性策略,同时为发展几何相位可调谐全息光子器件提供新思路,在信息显示及动态光场调控等领域具有广阔应用前景。

参 考 文 献:

- [1] YANG D K, CROOKER P P. Chiral-racemic phase diagrams of blue-phase liquid crystals [J]. *Physical Review A*, 1987, 35(10): 4419-4423.
- [2] ZHANG Y X, ZHENG Z G. Programmable orientation of blue phase soft photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(20): 200501.
- [3] COLES H J, PIVNENKO M N. Liquid crystal 'blue phases' with a wide temperature range [J]. *Nature*, 2005, 436(7053): 997-1000.
- [4] 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.
- [5] LIU J, LIU W Z, GUAN B, *et al.* Diffusionless transformation of soft cubic superstructure from amorphous to simple cubic and body-centered cubic phases [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3477.
- [6] YOSHIDA H, ANUCHA K, OGAWA Y, *et al.* Bragg reflection band width and optical rotatory dispersion of cubic blue-phase liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2016, 94(4): 042703.
- [7] HEPPKE G, KRUMREY M, OESTREICHER F. Observation of electro-optical effects in blue phase systems [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1983, 99(1): 99-105.
- [8] 李晓波,王靖阁,吴亮,等. 超快响应液晶技术研究进展与展望[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(1): 187-200.
LI X B, WANG J G, WU L, *et al.* Progress and prospect of ultrafast response liquid crystal technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(1): 187-200. (in Chinese)
- [9] CHEN Q M, OUYANG C, XIE Z Y, *et al.* Asymmetric domain growth for bistable information hiding and revealing in blue phase liquid crystals [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(5): 2401635.
- [10] 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.
- [11] CHEN Y Q, ZHENG C L, YANG W J, *et al.* Stretchable blue phase liquid crystal lasers with optical stability based on small-strain nonlinear 3D asymmetric deformation [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(10): 2416448.
- [12] TSAO Y C, CHEN H Y, CHEN Y F. An electrically tunable dual-mode laser based on self-assembled soft photonic liquid crystals [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(17): 2311510.
- [13] 邢陈陈,郑继红,陈芳芳,等. 光控取向液晶偏振全息柱透镜的制备及聚焦特性[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 593-601.
XING C C, ZHENG J H, CHEN F F, *et al.* Preparation and focusing characteristics of polarized holographic photo-alignment liquid crystal cylindrical lenses [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 593-601. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] BAGCHI K, EMERŠIČ T, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, *et al.* Functional soft materials from blue phase liquid crystals [J]. *Science Advances*, 2023, 9(30): eadh9393.
- [16] LIU H Y, WANG C T, HSU C Y, *et al.* Optically tuneable blue phase photonic band gaps [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(12): 121103.
- [17] ZHENG Z G, YUAN C L, HU W, *et al.* Light-patterned crystallographic direction of a self-organized 3D soft photonic crystal [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(42): 1703165.
- [18] 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.
- SHANG Y Y, WANG J X, JIANG L. Dynamic regulation and application of cholesteric liquid crystal patterns [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 349-368. (in Chinese)
- [19] ZHANG P, DE HAAN L T, DEBIJE M G, *et al.* Liquid crystal-based structural color actuators [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 248.
- [20] ZHANG Y X, ZHENG Z G, LI Q. Multiple degrees-of-freedom programmable soft-matter-photonics: configuration, manipulation, and advanced applications [J]. *Responsive Materials*, 2024, 2(1): e20230029.
- [21] 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.
- [22] CHOI H, HIGUCHI H, KIKUCHI H. Fast electro-optic switching in liquid crystal blue phase II [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(13): 131905.
- [23] LI W H, HU D C, LI Y, *et al.* Fringing field-induced monodomain of a polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 241105.
- [24] CHO S, 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): 39.
- [25] ZHANG Y X, YOSHIDA H, WANG Q H, *et al.* Electro-optics of blue phase liquid crystal in field-perpendicular direction [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(16): 161107.
- [26] 杨鑫雨,桑树,续晓婉. 聚合物稳定蓝相液晶中温度控制对晶格结构的影响[J]. *液晶与显示*, 2026, 41(2): 171-176.
- YANG X Y, SANG S, XU X W. Lattice structure based on temperature control in polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(2): 171-176. (in Chinese)
- [27] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [28] LU S Y, CHIEN L C. Electrically switched color with polymer-stabilized blue-phase liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4): 562-564.
- [29] DU X W, HOU D S, LI X, *et al.* Symmetric continuously tunable photonic band gaps in blue-phase liquid crystals switched by an alternating current field [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(24): 22015-22020.
- [30] GUO D Y, CHEN C W, LI C C, *et al.* Reconfiguration of three-dimensional liquid-crystalline photonic crystals by electrostriction [J]. *Nature Materials*, 2020, 19(1): 94-101.
- [31] CHEN H Y, CHIOU J Y, YANG K X. Reversible and fast shift in reflection band of a cubic blue phase in a vertical electric field [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(18): 181119.
- [32] WANG M, ZOU C, SUN J, *et al.* Asymmetric tunable photonic bandgaps in self-organized 3D nanostructure of polymer-stabilized blue phase I modulated by voltage polarity [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(46): 1702261.
- [33] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(1): 96-98.

- [34] HE F Y, ZHANG Y X, LIU X, *et al.* Three-dimensionally programmable soft crystals toward geometric phase photonics [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(20): 7456-7462.

作者简介:



刘梦茹,女,硕士研究生,2023年于华东理工大学获得学士学位,主要从事蓝相液晶及光学器件方面的研究。E-mail: y30231287@mail.ecust.edu.cn



郑致刚,男,博士,教授,2009于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶态功能材料与微纳光学器件方面的研究。E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn



张宇贤,女,博士,副教授,2020年于北京科技大学获得博士学位,主要从事蓝相液晶的晶体学结构、物理光学性质及光学应用的研究。E-mail: yuxianzhang@ecust.edu.cn