

文章编号:1007-2780(2020)07-0685-12

蓝相液晶晶体结构与结构色

续晓婉, 刘言军, 罗 丹*

(南方科技大学 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

摘要:蓝相液晶具有许多不同寻常的光学特性,如快速的响应速度(亚毫秒量级),可见光范围的布拉格反射,光学各向同性等。这些特性使得蓝相液晶在电光器件领域有着广泛的应用前景。近年来,除显示领域以外,蓝相液晶在聚合物蓝相液晶薄膜、晶格结构、结构色,以及可调谐方面取得了一系列新的进展。这些进展不仅深化了人们对蓝相液晶制备和基本结构认知,同时也极大扩展了其应用范围。本文侧重阐述近年来蓝相液晶在晶格结构以及结构色方面的研究进展。首先介绍蓝相液晶薄膜的制备方法和进展;其次介绍蓝相液晶晶格结构,包括单畴晶格、单晶晶格和结构色方面的研究进展;最后介绍可调谐的蓝相液晶晶格结构,主要包括电场、光场对蓝相晶格的调控作用。

关键词:蓝相液晶; 晶体结构; 结构色

中图分类号:O731; O753^{+.2} **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0685

Crystal structures and structural colors of blue phase liquid crystals

XU Xiao-wan, LIU Yan-jun, LUO Dan*

(*Electronic and Electricity of Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

Abstract: Blue phase liquid crystals possess several extraordinary optical properties, such as fast response time (sub-milliseconds), Bragg reflection in visible range, optical isotropic property. These properties make blue phase liquid crystals have a good application in electro-optical devices. Besides of displays, blue phase liquid crystals demonstrate series of new developments in polymer-stabilized blue phase film, crystal lattice structure, structural color and tunable application recently. These developments not only deepen cognitions in fabrication and basic structure of blue phase liquid crystals, and also broaden the applications of blue phase liquid crystals at the meantime. In this review, we discuss about the research developments of crystal lattice structure and structural color in blue phase liquid crystals in recent years. First, the fabrication and development of blue phase liquid crystals are introduced. Then, the recent developments of crystal lattice structure, including monodomain crystal, single crystal and structural color of blue phase liquid crystals are demonstrated. Last, the tunable crystal structure of blue phase liquid crystal, such as the effects of electric field and optical field on

收稿日期:2020-03-21;修订日期:2020-04-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61875081)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61875081)

* 通信联系人, E-mail: luod@sustech.edu.cn

blue phase liquid crystals are shown.

Key words: blue phase liquid crystal; crystal structure; structural color

1 引言

蓝相液晶的发现最早可以追溯到 1888 年, Reinitzer 在实验中观察到胆甾醇基苯酸盐液晶在清亮点之下会产生一种蓝紫色的反射光^[1]。随后, Lehmann 也观察到相同的现象, 并提出蓝相是一种区别于胆甾相的光学稳定的液晶相态^[2]。蓝相液晶可由向列相液晶与手性材料混合而成, 在高浓度的手性剂作用下, 蓝相液晶分子自组装形成具有双螺旋结构的圆柱, 该双螺旋圆柱进一步堆叠形成三维立方晶格结构。蓝相通常存在于各向同性相与胆甾相之间很小温度范围内(0.5~2 K), 随着温度的降低, 依次呈现蓝相 I^[3-6]、蓝相 II^[7-9]、以及蓝相 III^[10-14] 3 种不同类型的蓝相, 分别表现为体心立方晶格结构、简单立方晶格结构和无规则排列的雾状相。蓝相晶格结构主要通过晶格衍射形成的 Kossel 图判断^[15-18]。此外, 透射电子显微镜(TEM)^[19]和 X 光散射(XRS)^[20]等测试方法也可以用于确定一部分蓝相晶格结构信息。

蓝相液晶具有许多不同寻常的光学特性, 如快速的响应速度(亚毫秒量级)^[21-23], 可见光范围的布拉格反射, 光学各向同性等性质^[24-27], 这些特性使得蓝相液晶受到学术界和产业界越来越多的关注, 应用于诸多光电器件, 例如显示器件^[28-33]、相位调制器^[34-35]、衰减器^[36]、光栅^[37-41]、透镜及透镜阵列^[42-47]等。基于蓝相液晶的带隙激光^[48]和随机激光^[49-51]等。

此外, 蓝相液晶晶体结构和结构色等方面的研究与进展同样不容忽视。蓝相液晶自组装形成的三维光子晶体结构, 无需人工排列或刻蚀, 其晶体周期的反射光恰好可覆盖全部可见光范围, 使得蓝相液晶能够呈现出从红色到紫色的连续光谱, 这种因为自身周期性结构形成的反射色彩, 称之为结构色。然而, 自然形成的蓝相, 其晶格朝向是随机杂乱的, 形成的结构色是多种波长的混合(马赛克), 色彩杂乱且反射率低, 这时的蓝相液晶呈现出多畴晶格结构。通过一定的取向手段, 如电场、表面取向等, 可以使蓝相液晶的多个晶格取

向一致统一, 此时形成的结构色反射率高且色彩单一, 但平面内晶格之间通常会存在夹角, 导致缺陷存在, 这时的蓝相液晶呈现单畴晶格结构。若没有缺陷存在, 形成的蓝相液晶呈现单晶晶格结构, 是理论上的完美状态。

本综述将侧重阐述近年来蓝相液晶在晶格结构以及结构色方面的研究进展。

2 蓝相液晶薄膜

2.1 蓝相液晶温域的稳定

由于蓝相液晶存在的温域很窄, 通常仅有几 K, 这使得蓝相液晶的特性受到较大限制, 难以广泛应用。因此, 人们研究了多种扩大蓝相使用温域的办法, 如新型液晶分子设计、纳米材料掺杂、聚合物稳定液晶等。

一方面, 纳米粒子可用于蓝相液晶的稳定。蓝相液晶晶格的尺寸一般为 70~300 nm, 当选择的纳米粒子的尺寸与蓝相液晶晶格内的缺陷尺寸相当时, 纳米粒子与蓝相液晶混合时会填充在蓝相晶格内的缺陷中, 从而起到稳定蓝相结构的作用, 扩大几 K 的蓝相温域范围^[52]。

另一方面, 特定液晶分子结构, 例如弯折的香蕉型分子结构^[53-54]或混合的结构互补型液晶体系, 形成蓝相时可通过分子间的相互契合增加蓝相结构稳定性, 可以扩展蓝相液晶的温度范围。H. Coles 等^[55]人报道了一系列新型液晶分子形成的稳定蓝相液晶, 其所形成的非聚合蓝相液晶温度范围超过 40 K。

除此之外, 目前应用最广泛并且能大幅度扩展蓝相温度范围的方法是聚合物稳定法。在蓝相液晶体系中添加一定比例的聚合物单体, 聚合物单体会在蓝相晶格结构缺陷处通过聚合反应交联形成聚合物, 从而稳定蓝相液晶结构。2002 年, Kikuchi 等人^[56]报道了聚合物稳定的蓝相液晶的结构模型, 阐述了以晶格为单位的蓝相 I 的基本模型, 以及聚合物稳定后的可能结构。蓝相 I 是由双螺旋液晶分子圆柱构成的晶格结构, 它是体心立方的 O^8 对称结构。同时展示出液晶圆柱中空隙结构, 也就是缺陷, 它是液晶蓝相 I 的共轭结

构。这种共轭结构,即圆柱体之间的空隙就是其缺陷,这种缺陷结构导致了蓝相的不稳定性,使得在温度稍稍降低时,其晶格中双螺旋圆柱结构无法继续保持。聚合物单体在光化学反应下发生交联反应形成网状聚合物,从而牢牢束缚住液晶分子,起到了稳定蓝相结构的作用。聚合物稳定法可以有效且大幅度地扩大蓝相温域,例如低温 $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至高温 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[57-61],充分满足研究及应用所需。聚合物稳定蓝相液晶除了可以使蓝相晶格结构稳定,扩大蓝相存在的温度范围之外,还可以从多个方面改善蓝相液晶的光学特性。例如,经聚合物稳定的蓝相液晶,其磁滞效应大幅改善,光电响应时间缩短,这些都使得聚合物稳定蓝相液晶具有极广泛的前景和优势^[62]。

2.2 聚合物蓝相液晶薄膜

在聚合物稳定蓝相液晶的基础上,提高聚合物的含量,聚合物网络可以作为蓝相液晶的支撑结构,维持蓝相晶格结构,最终形成的聚合物蓝相液晶薄膜具有可贴合性、可穿戴性等机械性能^[63-64]。

Castles 等人介绍了一种新型聚合物蓝相液晶薄膜^[65-66],该聚合物蓝相液晶薄膜稳定后具有 $[-125\text{ }^{\circ}\text{C}, 125\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 的大范围温域;该薄膜的聚合物具有支撑结构,将聚合后的蓝相液晶薄膜浸泡在丙酮中洗出未聚合的液晶、手性剂、未反应的聚合物及光引发剂等材料后,剩余的聚合物结构在显微镜下显示出低透射的状态;将非手性的液晶填充入该聚合物中后,薄膜能恢复蓝相结构且呈现蓝相的结构色;另外,由此方法制备的薄膜具有很好的可拉伸性能,拉伸薄膜时,沿拉伸方向晶格周期变大,使得垂直反射面方向周期减小,反射光谱蓝移。

3 蓝相液晶晶格结构

3.1 单畴结构

未经过特殊处理的蓝相液晶,其晶格朝向是杂乱无章随机排列的,偏振光显微镜下呈现类似马赛克的颜色,形成所谓的多畴蓝相晶格结构。多畴蓝相晶格难以形成均匀的、具有高反射率蓝相液晶器件,这限制了其应用范围。为了获得具有均匀的、高反射率的蓝相液晶,可以通过电场、温度、表面取向等多种方法,获得具有一致晶格取向的区域,形成

蓝相液晶单畴晶格结构。具有单畴晶格结构的蓝相液晶色彩均一、反射率高、散射小,有利于其在显示和其他光子器件中的应用推广。

Chen 等人^[67]报道了通过施加垂直电场,使蓝相液晶分子重排,形成单畴蓝相结构的方法。在多次施加弱电场的条件下,液晶分子会发生重排,使得蓝相晶格朝向逐渐趋于一致,最终形成单畴蓝相液晶,报道的反射率达 35% 。

温度控制法^[68]是通过控制温度的变化,利用较慢的降温速率和多次反复升温降温的方法,使蓝相液晶晶核缓慢生长为较大的晶体结构。表面取向法^[69-70]主要包括传统的摩擦取向和较新颖的光配向。摩擦取向法是目前获得单畴晶格蓝相液晶的较常用方法。通过均匀方向的摩擦取向,可以形成由多个晶格取向相同的片状晶格区域构成的单畴区域。不同的片状晶格区域大小通常在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级,通常在垂直器件表面方向上获得较均匀的晶格朝向和反射颜色。

除了摩擦取向以外,光配向材料也被用于蓝相液晶单畴结构的形成。Zheng 等人^[70]报道使用光控取向材料偶氮苯磺酸(SD1)对蓝相液晶进行表面取向,进而获得单畴蓝相液晶的方法,如图1所示。SD1具有不亚于摩擦取向材料的取向作用,同时还具有可多次取向以及可擦除的效果。在偏振紫外光的作用下,SD1的分子共振方向会沿垂直偏振的方向排列,SD1分子方向排列将诱导液晶分子排列取向,最终获得均匀的单畴蓝相液晶。图1(a)中,偏振紫外光通过网格模板后照射在液晶盒上,得到均匀取向的蓝相。曝光区域内的蓝相液晶晶格朝向一致,颜色鲜明;而在非曝光区域的蓝相液晶晶格取向随机杂乱,颜色较暗。这里获得的蓝相稳定温域为 $55.0\sim 53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图1(b)展示的是对应蓝相液晶晶格的 Kossel 图像,(i)图对应为圆环,可以看出取向区域具有较好的均匀性,是很好的单畴液晶。(ii)图对应的图像不清晰,可以看出非取向区域晶格朝向杂乱,使得 Kossel 衍射曲线叠加而无法得到清晰的图像。图1(c)描述了表面取向的擦除与重写过程。取向的擦除与重写是分别利用非偏振紫外光与偏振紫外光对器件的曝光来完成的,垂直电场使得液晶分子从竖直状态按照表面取向作用重新排列。图1(c)展示的过程包括:(i)照射偏振的紫外光后,取向阵列被写入;(ii)照射非偏振的紫外光后,取向阵列被擦除,

但这个过程不会在光照下实时响应,需要加入 10 V 的电场,使液晶分子解螺旋,在电场关闭后,液晶分子会重新形成蓝相晶格,并按照取向的情况排列;(iii)再照射另一种条纹模板的偏振紫外光时(即重写过程),蓝相图像也暂时不会改变,如(iv)所示,这时同样需要再施加 10 V 的电场并关闭后,使液晶分子重新按照取向排列,最终变为(v)所示的图像,从而完成重写和擦除的过程。这种方法利用光敏取向材料,实现了单畴蓝相液晶与多畴蓝相液晶之间的转换。

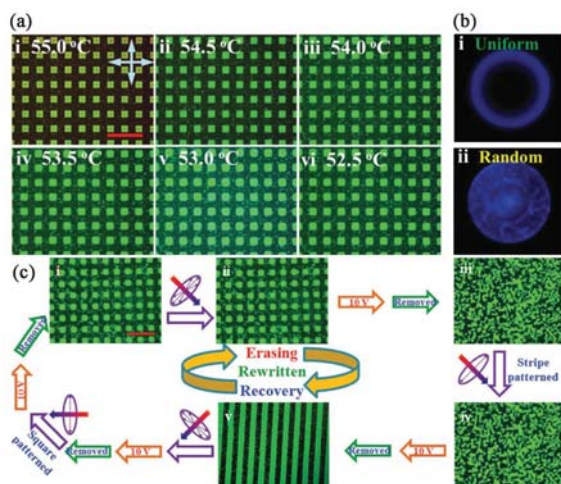


图 1 (a)温度变化下的蓝相网格的反射式偏振光学显微镜照片(正交的箭头是起偏器和检偏器),降温速率为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; (b)相同温度时取向区($53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)非取向区域的 Kossel 图像; (c)在紫外光和电场作用下,蓝相网格可以被擦除和重写。图中标尺为 $300\text{ }\mu\text{m}$ [70]。

Fig.1 (a) Typical POM textures of a thermally tunable BP lattice pattern observed under reflection mode with crossed polarizers (orthogonal double-arrows). All the POMs were recorded with a cooling rate at $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; (b) Kossel diagrams recorded in photoaligned and unaligned areas detected at the same temperature, $53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) The pattern can be erased and rewritten by sequential UV-irradiation and electric-field stimulation. The scale bar is $300\text{ }\mu\text{m}$. [70] Copyright 2017, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

3.2 单晶结构

当蓝相液晶晶格形成相同朝向的单一晶体结

构时,成为单晶晶格蓝相。单晶蓝相晶格间没有缺陷,反射率高且散射小,是理想的蓝相结构。目前形成单晶的有效方法有温度控制法、表面结构生成法等。

Chen 等人 [71] 报道了在控制降温速率的方法下,较长时间内(长达 36 h)形成的蓝相液晶单晶结构,其单晶尺寸最大为 $300\sim 400\text{ }\mu\text{m}$ 。但是,这种方法在生长更大面积的蓝相液晶单晶时,需要更多的能量来重新排列片状晶格区域的晶格朝向,导致时间耗费增加。例如,形成尺寸在 1 mm 左右的单晶,需要温度稳定控制时间长达 7 d,导致制备效率低下。另外,该方法对基底表面处理与传统蓝相液晶一样,亦无法控制蓝相液晶单晶的晶格朝向。

表面结构生成法可以用于控制蓝相液晶的晶格朝向。Li 等人先后发表多篇文章 [72-75],报道了如何利用图形化的表面取向微纳结构生成蓝相单晶结构,纳米结构的取向结构对应蓝相晶面中液晶分子的排列,其原理取决于蓝相晶格的自由能,不同的结构和尺寸将对应各自自由能最低的晶格取向。图 2 展示了两种图案分别对应的蓝相 I 和蓝相 II 的晶格取向。图 2(a)展示的是表面纳微条纹结构的制备方法:一面基底采用硅片,在基底表面旋涂垂直取向材料,利用电子束刻蚀方法刻蚀出模板,然后采用等离子刻蚀对取向层进行修饰,从而得到图形化的取向层。该取向层具体图案(如光栅)需要根据蓝相晶格内的分子排列进行特定设计。另一面可以采用垂直取向的玻璃基底。制成液晶盒后,当蓝相液晶在图形化的取向层上生长时,会被设计的图案排列取向,在该取向作用下形成自由能最低的晶格结构,这种均匀分布的图形能有效减少蓝相晶格缺陷的形成。图 2(b)展示了显示不同大小的模板,分别用于生成单晶蓝相 I(110)和单晶蓝相 II(100)。此外,液晶与手性剂混合物可以随温度升高依次形成胆甾相、蓝相 I、蓝相 II 和各向同性相,对应的温度如图中所示。蓝相 I 和蓝相 II 对应的 Kossel 图像可以用来证明晶格对称性。由此可以看出,采用这一方法,可以很好地形成蓝相单晶晶格结构。

3.3 结构色

光是自然界中信息传播的重要媒介,光子晶体可以呈现出多姿多彩的结构色,是自然界的重要组成。例如,蝴蝶的翅膀、昆虫的甲壳等的色彩

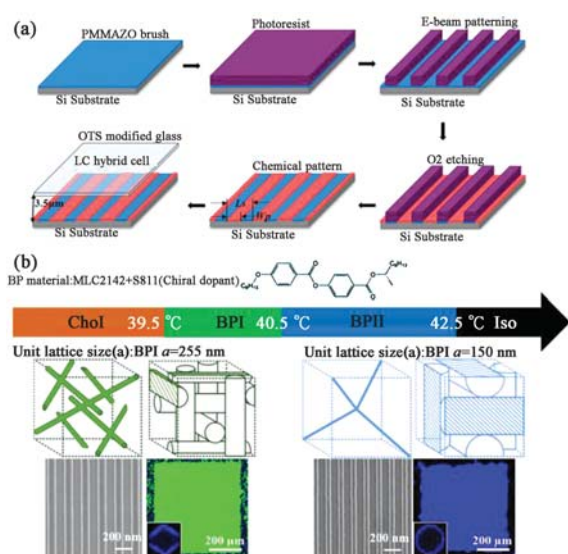


图 2 (a) PMMAZO 梳状分子层取向特性, 制备纳米或微米条纹结构的制作步骤示意图, 另一面采用垂直锚定的玻璃; (b) 升温形成胆甾相、蓝相 I、蓝相 II 和各向同性相, 不同周期的条纹模板用来形成单晶蓝相 I (110) 和蓝相 II (100), 分别对应 40.1 °C 和 41.7 °C, 左下角插图分别为相应的 Kossel 图像^[75]。

Fig.2 (a) Schematic representation of the fabrication process to create chemical patterns with regions of competing anchoring properties from PMMAZO brush substrates having nano- or microscale straight stripes. The homeotropic anchoring glass substrate was placed face-to-face with the patterned substrate to form a hybrid cell. (b) Temperature of cholesteric phase, BPI, BP11, and isotropic phase. The stripe like patterns with different pattern dimensions are used to form stable single-crystalline BPI₍₁₁₀₎ at 40.1 °C and BP11₍₁₀₀₎ at 41.7 °C. The corresponding Kossel diagrams are included^[75] Copyright 2019, American Chemical Society.

都是由光子晶体结构呈现出的。蓝相液晶具有自组装三维光子晶体结构, 根据布拉格衍射, 不同的晶面及晶向反射不同波长的光波, 这就使得蓝相液晶具有丰富多彩的结构色。

蓝相液晶的结构色可以用于制备各种光子器件。例如, Yang 等人^[76]报道了蓝相聚合物薄膜作为支架结构, 在定量打印的条件下, 获得颜色可变的蓝相结构色, 如图 3 所示。聚合物稳定蓝相

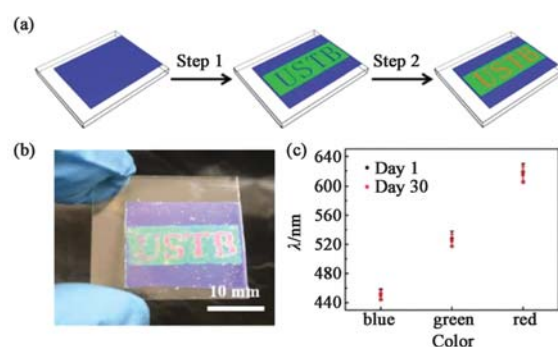


图 3 (a) 多色模板的制作方法。第一步: 在蓝相薄膜上打印长方形绿色背景色, 用 16 V 电压; 第二步: 在蓝相薄膜上打印红色“USTB”字样, 用 24 V 电压; (b) 注射-打印多色模板的照片 (标尺: 10 mm); (c) 第 1 天和 30 天后模板上不同颜色的区域对应的波长^[76]。

Fig.3 (a) Fabrication of the multicolour pattern. Step 1: printing green rectangular background on BP polymer coating with 16 V voltage; Step 2: printing red “USTB” letters on BP polymer coating with 24 V voltage. (b) Photograph of an inkjet-printed multi-colour pattern (scale bar, 10 mm). (c) Wavelength of light reflected by different colour regions of the pattern on day 1 of printing and after 30 days^[76]. Copyright 2019, the Royal Society of Chemistry.

液晶中的液晶等材料被有机溶剂洗出后, 聚合物薄膜会产生一定程度的塌陷, 但在重新填充液晶后, 结构会恢复。这一过程中发生的晶格周期的改变, 类似于拉伸情况, 可以使 Bragg 反射的颜色产生变化。精确控制注入聚合物薄膜的液晶量, 可以控制薄膜中蓝相晶体结构的恢复程度, 达到控制其晶格周期的目的, 同时也控制了薄膜的结构色。蓝相多色打印就是基于这一原理。如图 3 (a) 中所示, 聚合后的聚合物蓝相液晶光子晶体的反射波长为红色; 随后将液晶洗出, 剩余的聚合物网络支架结构仍然具有一定的周期, 其反射光为蓝色; 接下来, 在薄膜基底上定量地图形化注入液晶, 薄膜结构被撑起, 厚度增加, 晶格周期变大, 使反射光谱红移。图中长方形范围内打印的液晶量使得薄膜的晶格周期反射绿光, 再在此基础上加印字母, 使得晶格结构反射谱红移成为红光。图 3 (b) 即为打印后的液晶薄膜器件照片, 从图中可以看到鲜明的色彩变化, 这里打印精度在亚毫米

量级。图 3(c)是蓝相薄膜器件第一天和 30 天前色彩的变化对比,误差棒代表在不同区域 5 次测量结果的标准偏差,可见这种打印方法制备的蓝相光子器件具有良好的稳定性。

4 可调谐的蓝相液晶晶体结构

4.1 交流电场调控

交流电场不仅常用于向列项液晶和胆甾相液晶的调控,在蓝相液晶中,也是一种常用的调控手段。Guo 等人^[77]报道了在电场较小的情况下(电场较小时指蓝相液晶仍具有晶格结构,而不是双螺旋结构被打开,完全沿着电场方向排列),液晶晶格结构沿着电场方向拉伸,产生所谓电致伸缩效应。在外加 $4 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的交流电场下,蓝相反射光谱会迅速红移,45 s 后关闭电场,蓝相 I 会恢复到中间态,而蓝相 II 会恢复为初始态。无电场时,蓝相 I 是立方晶系晶格结构,而加入沿晶格 $[110]$ 方向的电场后,晶格沿电场方向拉伸,经过正交晶系晶格,最终变为四方晶系晶格稳定下来,外加交流电场能够对液晶晶格参数起调控作用,可以改变晶格大小和晶格结构,产生光谱移动和晶系变换。

无聚合物蓝相液晶与聚合物稳定蓝相液晶在交流电场下的表现是不同的。在没有聚合物时,蓝相液晶在电场下的动态响应可以解释为:在较小电场时产生晶格的形变,在较大电场时发生解螺旋。而在聚合物稳定蓝相液晶中,在交流电场下,蓝相晶格结构基本不会发生变化,而是液晶分子在原位置随电场的方向发生偏转,从而使发射率下降。

Xu 等人^[79]报道了多层聚合物稳定蓝相液晶薄膜在交流电场下反射率变化的情况。该研究利用聚合物稳定蓝相薄膜的可贴合性,将左旋蓝相液晶薄膜与右旋蓝相液晶薄膜贴合,获得高反射率。当交流电场通过液晶盒上下基底的 ITO 层施加在薄膜上时,蓝相液晶的反射率可以被调控,器件示意图如图 4(a)所示。图 4(b)展示了红绿蓝三色薄膜在偏振显微镜下的单畴蓝相照片。图 4(c)~4(e)分别展示了反射蓝色、绿色、红色的 3 种聚合物多层结构蓝相液晶薄膜的反射谱曲线随外加电压的变化曲线。其中,3 种颜色对应的初始状态反射率分别为 68%、82%、89%;当电压增

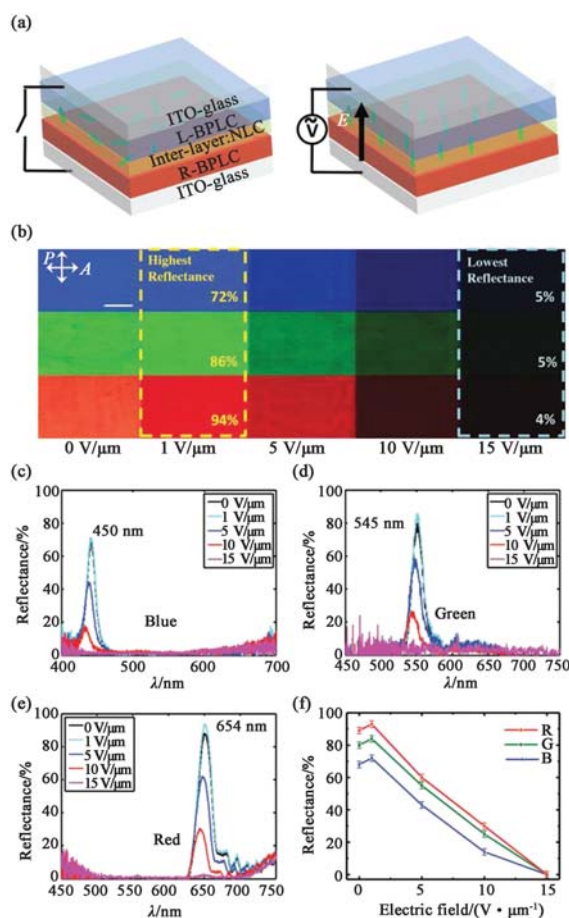


图 4 (a) 蓝相薄膜在电场下的示意图;(b) 蓝绿红蓝相薄膜在电场下的偏振显微镜图片(最高达 $15 \text{ V}/\mu\text{m}$);(c~e) 蓝色、绿色、红色多层蓝相薄膜在电场 $0 \sim 15 \text{ V}/\mu\text{m}$ 下的反射光谱;(f) 蓝、绿、红光谱中心波长在电场下的变化^[78]。

Fig.4 (a) Configurations of the BPLC film with and without an electric field; (b) Polarized optical microscopy images of the multi-layer BPLC film in blue, green, and red color regions under increasing electric field (up to $15 \text{ V}/\mu\text{m}$), the scale bar is $100 \mu\text{m}$; (c~e) Reflection spectra of the multi-layer BPLC film under an electric field of 0, 1, 5, 10 $\text{V}/\mu\text{m}$, and 15 $\text{V}/\mu\text{m}$ for the blue (c), green (d), and red (e) color regions, respectively; (f) Relationship of reflectance versus electric field for 450 nm (B), 545 nm (G), and 654 nm (R)^[78]. Copyright 2017, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

加时,反射率逐渐降低。中间液晶层的存在,使反射率变化并非线性,而是在 $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的电场下,先

小幅度增加,分别变为72%、86%以及94%,然后减小。这是由于控制液晶分子偏转的电场存在一个阈值,其大小随聚合物浓度增大而增大。但在蓝相薄膜贴合缝隙处,存在一些游离的向列相液晶分子,其阈值电压总是小于蓝相液晶的阈值电压。而游离的向列相液晶分子会增加薄膜间的散射,降低反射率。因此在这一较小的电场下,向列相液晶发生偏转,沿电场方向均匀排列,使其散射大大降低,导致更多的光能够被蓝相晶格反射,因此反射率呈现先增后降的现象。图4(f)展示了3种蓝相薄膜中心波长随电场的变化曲线。

4.2 直流电场调控

除了交流电场外,直流电场也可以对蓝相进行调控,Wang等人^[79-80]报道了聚合物蓝相光子结构在直流电场调控下,光谱会产生蓝移或红移(图5)。当持续的直流电场作用于聚合物稳定蓝相液晶时,其反射光谱会在负向偏压下发生蓝移,在正向偏压下发生红移,如图5(a)所示。图5(b)为对应的电压与反射光谱,显示出电压从+4.4 V到-4.4 V变化时,光谱从530 nm到615 nm连续可调,且可重复性良好。图5(c)为时序下反复施加正向和负向偏压时光谱的峰值位置,在十数个周期后,光谱变化的可重复性仍然良好,峰值波长与初始施加电压时的波长基本保持一致。而产生这一现象的原理如图5(d)所示,为无电场情况、负向偏压和正向偏压时,聚合物网络的结构示意图和SEM图像。在无电场时,SEM图中的聚合物在两片基底之间从上到下均匀排布,反射的光谱是初始波长(570 nm)。施加负向偏压后,SEM图像显示聚合物网络与下基板(正极)有稍许分离,而向上基板(负极)聚集,导致反射面的聚合物密度增大,使得晶格减小,反射光谱蓝移;而施加正向偏压的情况正好相反,聚合物网络稍许脱离上基底(正极),向下基底(负极)聚集,导致反射面的聚合物浓度减少,蓝相晶格变大,光谱红移。而光谱移动中产生的光谱展宽,是由于聚合物聚集的过程中,从上到下的移动并非均匀的,有一定渐变性,而聚合物分布的不均匀性导致了晶格大小连续性变化,从而产生了光谱展宽。直流电场的应用为聚合物蓝相液晶的调控开辟了新的方向。

4.3 光场调控

除常用的电场调控外,光场也可以用于蓝相

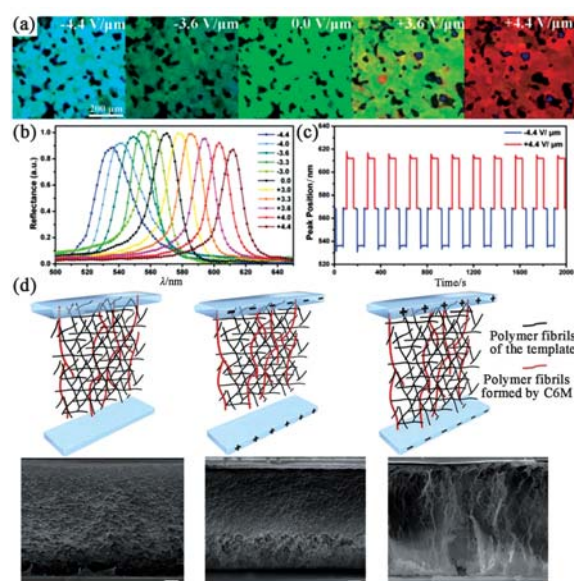


图5 不同直流电场下蓝相模板激光的偏振正交光学显微镜反射模式(a)和反射光谱(b);(c)在交替的直流电场-4.4 V/ μm 和+4.4 V/ μm 下蓝相模板样品反射波长峰值的动态响应;(d)无电场、负向电压、正向电压下的蓝相聚合物垂直切向的SEM图像,标尺:2 μm ^[79]。

Fig.5 Reflection-mode POM textures (a) and reflection spectra (b) of the templated BP laser under different DC field strength; (c) Dynamic response of the peak position wavelength of the PBG of templated BP sample during cycles of alternating DC field with electric field strength in -4.4 V/ μm and +4.4 V/ μm ; (d) Schematic illustration and SEM fracture surface microstructures of the templated BP samples after polymerization under different electric field: without DC field, under negative DC bias and under positive bias. The scale bars in the SEM images are 2 μm ^[79]. Copyright 2019, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

液晶光子晶体的调控,例如光敏性偶氮材料可以用于改变蓝相液晶的手性大小,进而改变蓝相液晶的晶格参数。Lin等人^[81]报道了掺杂光敏材料的蓝相液晶光子晶体结构,在光场调控下改变晶格结构与大小的论文,如图6所示。蓝相晶格参数由手性决定:手性越大,液晶的双螺旋性越强,晶格越小。当光敏型手性剂在光照条件下改变手

性时,蓝相晶格也随之变化,同时改变结构色颜色。这里即可实现单一蓝相(例如蓝相 I)晶格大小的连续变化,也可实现晶格大小和晶格结构的同时改变。图 6(a)展示了不同光照条件下蓝相液晶的偏光显微镜照片和对应的晶格朝向,这里晶格对称性由 Kossel 图像判断。液晶初始状态为蓝相 II,其晶格对应的反射波长为蓝紫光或紫外光,如第一幅图所示;光照 5 s 后,光敏材料手性减小,使得晶格增大,反射光谱红移,显微镜图片颜色由蓝变绿;光照 7 s 后,由于蓝相 II 晶格的不稳定性(蓝相 II 在低手性情况下很难存在,大多数以蓝相 I 为稳定状态),其晶格结构发生变化,转变为蓝相 I 的体心立方结构(该结论可以由图 6(c)的 Kossel 图推断获得),显微镜图片转变为黄色;光照 15 s 后,手性继续减小,蓝相 I 晶格继续变大,反射光谱继续红移,显微镜图片变为红色。图 6(c)给出了响应的 Kossel 图片,从中可以清晰地判断出,晶格结构图 6(b)中当用绿光 532 nm 调控,偶氮材料将发生可逆变换,从立态

到顺态;或采用相反手性的光敏材料,则可产生光谱蓝移。因此,在非聚合情况下添加光敏材料,在光场的调控下,蓝相光子晶体晶格结构和晶格大小都会发生改变,使蓝相液晶在蓝相 I 和蓝相 II 之间转变,还可以操控蓝相光谱红移或蓝移。

5 总结与展望

本文概述了多种扩展蓝相液晶温域的方法,如添加与蓝相液晶晶格缺陷尺寸相当的纳米粒子可以将蓝相温域扩展几 K;一些新型的液晶分子可以形成温域达 40 K 的蓝相液晶;除此之外,应用最广泛的是聚合物稳定蓝相液晶,可使温域扩展达几十 K。此外,基于聚合物稳定蓝相液晶制备的聚合物蓝相液晶薄膜,具有大温度,同时具有柔性、可拉伸性、可贴合性等优良机械性能,促进了蓝相液晶在光子器件中的应用。另一方面,为了得到均匀的蓝相液晶光子晶体结构色,摩擦取向、温度控制、电场控制、光控取向等方法常用于获得单畴蓝相,产生的结构色可以达到 30%~40% 的反射率。而在精确的温度控制或设计的表面取向模板的方法下,没有缺陷的单晶蓝相反射率可接近理想状态的 50%,促进了蓝相液晶光子晶体结构色在光子器件中的应用。最后,介绍了多种调控蓝相液晶光子器件的方法,如电场调控、光场调控等,这些方法可以用于改变蓝相液晶晶格结构和晶格大小,调节稳定型蓝相液晶的反射率。

在众多蓝相液晶的研究成果中,仍然还有一些难点困扰着我们。一方面,在紫外光引发的光化学反应中,聚合物分子的交联会在一定程度上影响蓝相液晶分子结构的排列,使其晶格结构产生扰动,这既不利于获得良好的反射,又不利于稳定的调控,因此,优化聚合反应过程将是蓝相液晶可能的改进方向。另外,单晶蓝相制备方法有待进一步改进。目前的表面结构生成法制备的单晶蓝相,制备效果虽然能达到令人满意的程度,但电子束刻蚀的方法不但制备方法复杂,耗材昂贵且耗时较长,因此研发出更方便可行的单晶蓝相制备方法是十分必要的。

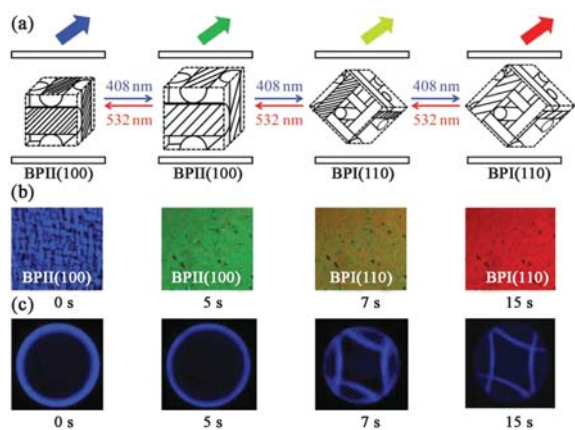


图 6 (a) 光场调控下蓝相液晶的晶格变化示意图; (b) 与(a)相对应的蓝相液晶在光照 408 nm 条件下随时间变化的偏振显微镜照片; (c) Kossel 衍射随时间变化的图片^[81]。

Fig.6 (a) Schematic illustration of the phototuning of the resulting BP; (b) Reflection color images of blue phase on 408 nm light irradiation at 40 °C, respectively; (c) The corresponding Kossel diagrams with time elapsing^[81]. Copyright 2013, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

参 考 文 献:

- [1] REINITZER F. Beiträge zur kenntniss des cholesterins [J]. *Monatsh. Chem.*, 1888, 9(1): 421-441.
- [2] LEHMANN O. Substances with three different liquid states, one isotrope-and two crystalline fluids [J]. *Z. Phys. Chem.*, 1906, 56(6): 750-766.
- [3] COATES D, HARRISON K J, GRAY G W. Studies of mesophase transformations for certain Schiff's base esters [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, 22(1/2): 99-122.
- [4] ELSER W, POHLMANN J L W, BOYD P R. Cholesteryl n-alkyl carbonates [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, 20(1): 77-86.
- [5] MARCUS M A, GOODBY J W. Cholesteric pitch and blue phases in a chiral-racemic mixture [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1982, 72(9/10): 297-305.
- [6] NICASTRO A J, KEYES P H. Cholesteric blue phases of the cholesteryl N-alkanoates [J]. *Phys. Rev. A*, 1983, 27(1): 431-437.
- [7] CHANISHVILI A, CHILAYA G, ELASHVILI Z M, *et al.* A wide-temperature blue phase in mixtures of a nematic liquid crystal with non-mesogenic tigogenin caprate [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Lett.*, 1986, 3(3/4): 91-96.
- [8] KEYES P H. Is blue phase II fcc? [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59(1): 83-85.
- [9] YANG D K, CROOKER P P. Chiral-racemic phase diagrams of blue-phase liquid crystals [J]. *Phys. Rev. A*, 1987, 35(10): 4419-4423.
- [10] DEMIKHOV E I, DOLGANOV V K. Pretransitional effects near blue phases of a cholesteric liquid crystal [J]. *JETP Lett.*, 1983, 38(8): 445-447.
- [11] DEMIKHOV E I, DOLGANOV V K, KRYLOVA S P. Selective optical reflection in the fog phase [J]. *JETP Lett.*, 1985, 42(1): 16-19.
- [12] KIZEL V A, PROKHOROV V V. Structure of blue phase of cholesteric liquid crystals [J]. *JETP Lett.*, 1984, 38(6): 337-341.
- [13] COLLINGS P J. Optical rotatory dispersion measurements in the third cholesteric blue phase [J]. *Phys. Rev. A*, 1984, 30(4): 1990-1993.
- [14] YANG D K, CROOKER P P. Blue phase III of chiral liquid crystals in an electric field [J]. *Phys. Rev. A*, 1988, 37(10): 4001-4005.
- [15] JOHNSON D L, FLACK J H, CROOKER P P. Structure and properties of the cholesteric blue phases [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, 45(8): 641-644.
- [16] COATES D, GRAY G W. Optical studies of the amorphous liquid-cholesteric liquid crystal transition: the "blue phase" [J]. *Phys. Lett. A*, 1973, 45(2): 115-116.
- [17] MEIBOOM S, SAMMON M. Structure of the blue phase of a cholesteric liquid crystal [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, 44(13): 882-885.
- [18] TANIMOTO K, CROOKER P P, KOCH G C. Chiral-racemic phase diagram of a blue-phase liquid crystal [J]. *Phys. Rev. A*, 1985, 32(3): 1893-1895.
- [19] TANAKA S, YOSHIDA H, KAWATA Y, *et al.* Double-twist cylinders in liquid crystalline cholesteric blue phases observed by transmission electron microscopy [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5(1): 16180.
- [20] SALAMONĆZYK M, VAUPOTIČ N, POCIECHA D, *et al.* Structure of nanoscale-pitch helical phases: blue phase and twist-bend nematic phase resolved by resonant soft X-ray scattering [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(38): 6694-6699.
- [21] XIANG J, LAVRENTOVICH O D. Blue-phase-polymer-templated nematic with sub-millisecond broad-temperature range electro-optic switching [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(5): 051112.
- [22] RAO L H, YAN J, WU S T, *et al.* A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(8): 081109.
- [23] KIZHAKIDATHAZHATH R, HIGUCHI H, OKUMURA Y, *et al.* Weak anchoring interface inducing acrylate copolymer designs for high-performance polymer-stabilized blue phase liquid crystal displays [J]. *Chem. Select*,

- 2017, 2(23): 6728-6731.
- [24] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(1): 96-98.
 - [25] YAN J, LUO Z Y, WU S T, *et al.* Low voltage and high contrast blue phase liquid crystal with red-shifted Bragg reflection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(1): 011113.
 - [26] XU D M, CHEN Y, LIU Y F, *et al.* Refraction effect in an in-plane-switching blue phase liquid crystal cell [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(21): 24721-24735.
 - [27] NORDENDORF G, SCHMIDTKE J, WILKES D, *et al.* Temperature-insensitive electro-optic response of polymer-stabilized blue phases [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(3): 518-521.
 - [28] YAN J, XU D M, CHENG H C, *et al.* Turning film for widening the viewing angle of a blue phase liquid crystal display [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(36): 8840-8844.
 - [29] LIN Y H, CHEN H S, CHIANG T H, *et al.* A reflective polarizer-free electro-optical switch using dye-doped polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(3): 2556-2561.
 - [30] LIU Y F, LAN Y F, HONG Q, *et al.* Compensation film designs for high contrast wide-view blue phase liquid crystal displays [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(1): 3-6.
 - [31] LI P, SUN Y B, ZHAO Y L, *et al.* High transmittance blue-phase liquid crystal displays with slit-shaped electrode [J]. *Liq. Cryst.*, 2013, 40(10): 1417-1421.
 - [32] SU Z F, CHEN Y Q, LU J G, *et al.* High-transmittance polymer-stabilised blue-phase liquid crystal display with double-sided protrusion electrodes [J]. *Liq. Cryst.*, 2013, 40(7): 976-979.
 - [33] CUI J P, LI Y, YAN J, *et al.* Time-multiplexed dual-view display using a blue phase liquid crystal [J]. *J. Disp. Technol.*, 2013, 9(2): 87-90.
 - [34] YAN J, XING Y F, GUO Z B, *et al.* Low voltage and high resolution phase modulator based on blue phase liquid crystals with external compact optical system [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(12): 15256-15264.
 - [35] YOSHIDA H, KOBASHI J. Flat optics with cholesteric and blue phase liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 2016, 43 (13/15): 1909-1919.
 - [36] ZHU G, WEI B Y, SHI L Y, *et al.* A fast response variable optical attenuator based on blue phase liquid crystal [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(5): 5332-5337.
 - [37] WAHLE M, BRASSAT K, EBEL J, *et al.* Two-dimensional switchable blue phase gratings manufactured by nanosphere lithography [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(19): 22608-22619.
 - [38] KHOO I C. DC-field-assisted grating formation and nonlinear diffractions in methyl-red dye-doped blue phase liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(1): 60-63.
 - [39] YAN J, LI Q, HU K. Polarization independent blue phase liquid crystal gratings based on periodic polymer slices structure [J]. *J. Appl. Phys.*, 2013, 114(15): 153104.
 - [40] LUO D, DAI H T, SUN X W. Polarization-independent electrically tunable/switchable Airy beam based on polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(25): 31318-31323.
 - [41] HUANG B Y, LIN S H, LIN K C, *et al.* Switchable two-dimensional liquid crystal grating in blue phase [J]. *Crystals*, 2017, 7(6): 182.
 - [42] HONG H. Analysis of focal length of blue-phase liquid crystal (BPLC) cylindrical lens for the light of the various incident angles and polarisations [J]. *Liq. Cryst.*, 2013, 40(4): 450-457.
 - [43] LIN Y H, CHEN H S, LIN H C, *et al.* Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(11): 113505.
 - [44] LI Y, WU S T. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(9): 8045-8050.
 - [45] LI Y, LIU Y F, LI Q, *et al.* Polarization independent blue-phase liquid crystal cylindrical lens with a resistive film [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(14): 2568-2572.
 - [46] LIU Y F, LI Y, WU S T. Polarization-independent adaptive lens with two different blue-phase liquid-crystal layers [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(14): 3216-3220.

- [47] LIN S H, HUANG L S, LIN C H, *et al.* Polarization-independent and fast tunable microlens array based on blue phase liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(1): 925-930.
- [48] KIM K, HUR S T, KIM S, *et al.* A well-aligned simple cubic blue phase for a liquid crystal laser [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(21): 5383-5388.
- [49] ZHUO G Y, HUANG S W, LIN S H. Wide-angle lasing from photonic crystal nanostructures of a liquid-crystal-line blue phase [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(21): 6433-6439.
- [50] LIN J D, WANG T Y, MO T S, *et al.* Wide-band spatially tunable photonic bandgap in visible spectral range and laser based on a polymer stabilized blue phase [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 30407.
- [51] WANG L, WANG M, YANG M C, *et al.* Bichromatic coherent random lasing from dye-doped polymer stabilized blue phase liquid crystals controlled by pump light polarization [J]. *Chin. Phys. B*, 2016, 25(9): 094217.
- [52] LAVRI M, CORDOYIANNIS G, TZITZIOS V, *et al.* Blue phase stabilization by CoPt-decorated reduced-graphene oxide nanosheets dispersed in a chiral liquid crystal [J]. *J. Appl. Phys.*, 2020, 127(9): 095101.
- [53] JEONG H C, LE K V, GIM M J, *et al.* Transition between widened BPs by light irradiation using photo-active bent-core liquid crystal with chiral dopant [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(11): 4627-4630.
- [54] LIU H P, SHEN D, WANG X Q, *et al.* Wide blue phase range induced by bent-shaped molecules with acrylate end groups [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(2): 436-443.
- [55] COLES H J, PIVNENKO M N. Liquid crystal 'blue phases' with a wide temperature range [J]. *Nature*, 2005, 436(7053): 997-1000.
- [56] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nat. Mater.*, 2002, 1(1): 64-68.
- [57] ENDO N, MATSUMOTO T, KIKUCHI H, *et al.* Study of polymer-stabilised blue phase liquid crystal on a single substrate [J]. *Liq. Cryst.*, 2016, 43(1): 66-76.
- [58] KIKUCHI H, IZENA S, HIGUCHI H, *et al.* A giant polymer lattice in a polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(23): 4572-4575.
- [59] MANDA R, KIM M S, SHIN E J, *et al.* Phase stabilisation of blue-phase liquid crystals using a polymerisable chiral additive [J]. *Liq. Cryst.*, 2017, 44(6): 1059-1068.
- [60] KIMURA M, NAGUMO N, OO T N, *et al.* Single-substrate polymer-stabilized blue phase liquid crystal display [J]. *Opt. Mater. Express*, 2013, 3(12): 2086-2095.
- [61] XU X W, LIU Y J, LUO D. Flexible blue phase liquid crystal film with high stability based on polymerized liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 2020, 47(3): 399-403.
- [62] CHEN K M, GAUZA S, XIANYU H Q, *et al.* Hysteresis effects in blue-phase liquid crystals [J]. *J. Disp. Technol.*, 2010, 6(8): 318-322.
- [63] HU D C, LI W H, CHEN X W, *et al.* Template effect on reconstruction of blue phase liquid crystal [J]. *J. Soc. Inform. Disp.*, 2016, 24(10): 593-599.
- [64] RAVNIK M, FUKUDA J I. Templated blue phases [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(43): 8417-8425.
- [65] CASTLES F, DAY F V, MORRIS S M, *et al.* Blue-phase templated fabrication of three-dimensional nanostructures for photonic applications [J]. *Nat. Mater.*, 2012, 11(7): 599-603.
- [66] CASTLES F, MORRIS S M, HUNG J M C, *et al.* Stretchable liquid-crystal blue-phase gels [J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(8): 817-821.
- [67] CHEN Y, WU S T. Electric field-induced monodomain blue phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(17): 171110.
- [68] ORZECOWSKI K, SALA-TEFELSKA M M, SIERAKOWSKI M W, *et al.* Optical properties of cubic blue phase liquid crystal in photonic microstructures [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(10): 14270-14282.
- [69] XU X W, LIU Y J, WANG F, *et al.* Narrow linewidth and temperature insensitive blue phase liquid crystal films [J]. *IEEE Photonics J.*, 2018, 10(6): 7001007.
- [70] ZHENG Z G, YUAN C L, HU W, *et al.* Light-patterned crystallographic direction of a self-organized 3D soft photonic crystal [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(42): 1703165.

- [71] CHEN C W, HOU C T, LI C C, *et al.* Large three-dimensional photonic crystals based on monocrystalline liquid crystal blue phases [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 727.
- [72] MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, LI X, SADATI M, *et al.* Directed self-assembly of liquid crystalline blue-phases into ideal single-crystals [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 15854.
- [73] LI X, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, HERNÁNDEZ-ORTIZ J P, *et al.* Mesoscale martensitic transformation in single crystals of topological defects [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2017, 114(38): 10011-10016.
- [74] LI X, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, GUZMÁN O, *et al.* Sculpted grain boundaries in soft crystals [J]. *Sci. Adv.*, 2019, 5(11): eaax9112.
- [75] LI X, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ J A, PARK K, *et al.* Perfection in nucleation and growth of blue-phase single crystals: small free-energy required to self-assemble at specific lattice orientation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(9): 9487-9495.
- [76] YANG J J, ZHAO W D, YANG Z, *et al.* Printable photonic polymer coating based on a monodomain blue phase liquid crystal network [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(44): 13764-13769.
- [77] GUO D Y, CHEN C W, LI C C, *et al.* Reconfiguration of three-dimensional liquid-crystalline photonic crystals by electrostriction [J]. *Nat. Mater.*, 2020, 19(1): 94-101.
- [78] XU X W, LIU Z, LIU Y J, *et al.* Electrically switchable, hyper-reflective blue phase liquid crystals films [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(3): 1700891.
- [79] WANG M, ZOU C, LI C Y, *et al.* Bias-polarity dependent bidirectional modulation of photonic bandgap in a nanoengineered 3D blue phase polymer scaffold for tunable laser application [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(16): 1800409.
- [80] 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]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(46): 1702261.
- [81] LIN T H, LI Y N, WANG C T, *et al.* Red, green and blue reflections enabled in an optically tunable self-organized 3D cubic nanostructured thin film [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(36): 5050-5054.

作者简介:



续晓婉(1989—),女,黑龙江大庆人,博士研究生,2014年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事液晶蓝相光子晶体方面的研究。E-mail: xuxw@mail.sustech.edu.cn



罗丹(1981—),男,湖南常德人,研究员,副教授,2012年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事液晶光电子器件方面的研究。E-mail: luod@sustech.edu.cn



刘言军(1977—),男,山东莱阳人,研究员,副教授,2007年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事液晶光电子学、等离子元光子学、超材料及超表面等领域的研究。E-mail: yjliu@sustech.edu.cn