

文章编号:1007-2780(2018)07-0539-09

光定域化蓝相软晶格结构的光学应用

袁丛龙, 周 康, 王骁乾, 沈 冬, 郑致刚*

(华东理工大学 理学院, 上海 200237)

摘要:实验利用表面光取向技术控制蓝相晶格的有序生长,将光定域化取向与分子自组装相结合。通过对基板表面进行交替的取向/非取向控制,平面内获得周期排列的微结构,使蓝相图形化结构的反射光强度在空间上形成周期性调制,同时设计制备了振幅型衍射器件;通过对基板表面做正交取向方向交替排列的微结构,使蓝相图形化结构的反射光相位在空间上形成周期性调制,设计制备了相位型衍射器件。这两类衍射器件均具有对入射光的波段选择性,即只有当入射光的波长局域在蓝相的反射带时才会呈现衍射效应。蓝相液晶软物质的特性又赋予它在电场下可调谐的波段选择性,即反射带位置随电场的增加发生红移从 532 nm 到 610 nm,电场撤除则回复到初始状态。同时,借助于光取向材料的光可擦写特性,蓝相晶格的取向微结构能够重复的擦写与重构,从而实现不同衍射器件乃至不同衍射调制方式的转换。

关 键 词:蓝相液晶;光取向;定域化;超结构;衍射;刺激-响应

中图分类号:TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183307.0539

Light-patterned blue phase soft cubic superstructure in optical applications

YUAN Cong-long, ZHOU Kang, WANG Xiao-qian, SHEN Dong, ZHENG Zhi-gang*

(Department of Physics, East China University of Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Combining light-patterning process with self-assembly trait, we applied photo-alignment technique to control the arrangement of liquid crystal blue phase (BP) cubic superstructure. By means of generating alternate aligned areas and non-aligned areas, the amplitude-modulation diffraction devices can be designed, which derives from the periodic reflection intensity of the patterned BP. By means of generating alternate orthogonal alignment directions, the phase-modulation diffraction devices can be designed, which are owing to the periodic reflected phase from the patterned BP. These two types of diffraction devices exhibit peculiarly wavelength-selectivity, which means that light diffraction occurs selectively to certain wavelength. Based on the soft attribute of BP, these devices can respond to applied electric field leading to a tunable wavelength-selectivity. When the external electric field was applied, the corresponding reflection waveband of BP exhibited a continuous red-shifting from 532 nm to 610 nm. Furthermore, a preferable feature of the devices is photo-induced dynamical

收稿日期:2018-03-07; **修订日期:**2018-04-23.

基金项目:国家自然科学基金(No.61435008, No.61575063);上海市青年科技启明星计划(No.17QA1401100)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61435008, No. 61575063); Shanghai Rising-Star Program (No.17QA1401100)

* 通信联系人, E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn

erasability and rewritability due to rewritable characteristic of the photoalignment film, which results in realizing the conversion of different diffractive devices and even diffractive modulation modes.

Key words: blue phase; photo-alignment; localization; superstructure; diffraction; stimuli-responsive

1 引言

三维光子晶体凭借独特的纳米周期结构能够在三维空间内对光波/光子进行操控或抑制,它的出现令原有的光电子材料与器件取得了进一步的发展,在下一代纳米光子技术中展示了巨大的潜力,因此得到了科学工作者的广泛关注^[1-2]。在三维光子材料与器件加工技术领域中,光刻、电子束刻蚀、纳米压印等微加工工艺作为有效的方式得到了很好的应用,但这些工艺往往过程复杂、成本高昂且技术壁垒高,因此它们的发展受到制约。软物质因其独特的自组装特性、刺激-响应特性以及可人工设计等附加属性吸引了大量的关注,利用软物质构筑三维光子材料的方式正在成为一个充满活力和蓬勃发展的研究领域^[3-5]。

蓝相液晶无疑是一类具有代表性的软光子晶体材料。在高手性的液晶体系中,蓝相通常存在于手性向列相态和各向同性态的温度区间之内。在分子间强手性力的驱动下,液晶分子自组装形成双扭曲螺旋圆柱,于三维空间内堆积形成周期为光波长量级的三维立方晶格结构^[6-7]。在过去的几十年中,科学工作者们致力于剖析蓝相结构的研究。无论是理论上分析计算还是实验上观察测量,皆证实了其特殊的自组装立方晶格结构^[8-10]。这种奇妙的结构赋予了蓝相液晶特征的选择性布拉格反射,即反射与蓝相液晶分子螺旋手性相同的特定波段的圆偏振光^[11]。对于正入射的情况,蓝相的特征反射波段中心波长 λ 可以表示为 $\lambda = \frac{2na}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ 其中, n 和 a 分别代表着液晶分子的平均折射率和晶格尺寸,而 $[h, k, l]$ 则是密勒指数,反映了晶格的方向。由于蓝相液晶的三维对称结构,宏观上其分子没有单一指向矢,因此蓝相液晶又具有光学各向同性的特质。同时,蓝相液晶能够对多种外界刺激如温度^[12]、电场^[13-14] 和光^[15-16] 等做出响应,从而导致其分子结构与光学性质的变化,尤其是在电场作用下的快速响应能力(响应时间在微秒量级)^[17],无论是

在显示领域还是可调谐光子器件领域都展现了巨大的潜力。

作为一种软光子晶体,蓝相液晶由熵变主导其晶格生长过程,晶格指向通常无序,因此在偏光显微镜下呈现彩色碎片状的特征织构。有序性通常直接影响晶体对光子的操控性能,有序性低导致该性能下降,宏观表现为光子局域化减弱。因此获得蓝相晶格的有序排列对蓝相的高效应用至关重要。以往研究中,主要采用温度或电场的作用,将随机排列的蓝相晶格指向修正为均匀排列的晶格指向^[18-21]。在最近的报道中,通过对蓝相基板表面提供均一取向,能够实现蓝相特征反射带更窄的半峰宽、更强的反射率以及更优异的电光特性,且大大降低了蓝相的液晶激光泵浦阈值^[22-24]。同时,基板的取向方向能够控制蓝相液晶的反射光相位,开拓了蓝相液晶在基于几何相位光子器件领域的应用潜力^[25]。林宗贤课题组在蓝相晶格的生长过程中利用温度梯度的方法,实现了大面积广域的晶格均匀化^[26],使蓝相软晶体的工程化应用成为可能。同时, Martinez-González 等人根据不同指向的蓝相软晶格在基板的缺陷结构,利用特殊设计的表面结构所提供的平面取向和垂直取向,实现了蓝相软晶格指向的精确控制($[100]$, $[110]$ 或 $[111]$)^[27]。郑致刚等人使用表面光取向技术控制蓝相晶格的有序生长,将“自上而下”的图形化取向与“自下而上”的分子自组装相结合,实现了蓝相软晶格指向的有序性、微域化、图案化^[28]。此外,蓝相软晶格指向有序性可以利用 Kössel 衍射^[29-31] 和晶格生长成核动力学^[32-33] 来表征和解释。

在本文中,我们探究了基板表面不同的取向方式对蓝相软晶格的作用,结合光取向技术与蓝相液晶外场可调谐的布拉格反射,设计了两类不同机制的反射型衍射类光学器件:(1)基于交替排列的取向/非取向区域在反射强度上的巨大差异所设计的振幅型衍射器件;(2)基于基板不同取向方向区域交替排列所设计的相位型衍射器件。同时,光取向材料的光擦写重构特性不仅能够实现不同光学衍射器件的转换(图形化的微结构),并

且能够满足不同机制的衍射器件(振幅型或相位型)的转换。外场调控的布拉格反射赋予了该类器件具有可调谐的波段选择性^[28,34]和圆偏振选择性^[35]。

2 实验

2.1 材料与制备

蓝相液晶材料由质量分数 96.4% 的向列相液晶母体(TEB300, 石家庄诚志永华显示材料有限公司)和 3.6% 的手性剂(R5011, 江苏和成显示科技股份有限公司)混配构成。为了获取优秀的取向稳定性、强表面锚定力、更高取向分辨率以及更高效的光擦写性质^[36-38], 我们选用 SD1 (Dai-Nippon Ink and Chemicals) 作为光取向材料。SD1 分子在偏振紫外光的激发下, 发生光致异构从而分子发生转动, 最终垂直于偏振光的方向, 随之分子间范德华力的作用下, 引导液晶分子垂直于偏振光方向排列。SD1 取向材料具有光可擦写性, 通过改变入射偏振紫外光的方向, 能够实时改变取向方向; 非偏振紫外光能够擦除所提供的取向效果。

2.2 液晶盒制备过程

在该实验中, 我们用两片氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)玻璃作为液晶盒的上下基板。首先, 玻璃基板通过超声波清洗, 再通过紫外光表面清洗技术处理, 以保证其表面的清洁度与粘着性。然后, 将溶于 *N,N*-二甲基甲酰胺的 SD1 溶液均匀地旋涂于玻璃表面。最后, 将 5.0 μm 的间隔子喷洒在基板表面, 用环氧树脂胶封装成液晶空盒。

2.3 光取向过程

光取向系统(上海研微电子科技有限公司)光源采用高压汞灯(SunSpot2, Uvitron International)产生的紫外光。首先利用一组透镜对入射光做扩束与准直, 再通过金属线栅将其转换为线偏振光(光功率: 5.0 mW/cm^2)。为了实现基板取向/非取向区域交替排列的微结构, 将线偏振紫外光经过预先设定的光刻掩模板垂直照射到制备好的液晶空盒上 16 min, 完成总计约 5 J/cm^2 的曝光剂量。从而使 SD1 在掩模板透光区提供均一取向, 而掩模板非透光区域不提供取向。为了实现基板不同取向方向交替排列的微结构, 采用

两步曝光法: 首先用线偏振紫外光照射到制备好的液晶空盒上曝光 16 min, 然后调整金属线栅的方向, 使入射光的偏振方向旋转 $\pi/2$ 后再经过光刻掩模板曝光 17 min。

2.4 性能表征

样品首先升温到 70 $^{\circ}\text{C}$ 以达到各向同性态, 再以 0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率缓慢降温至蓝相并保持在 53.5 $^{\circ}\text{C}$ 进行性能表征。蓝相的显微结构通过偏光显微镜(LVPOL100, Nikon)观察, 温度则利用精密控温台(HCS302, Instec)控制。蓝相样品的显微结构和光谱分别通过集成在显微镜上的 CCD 相机(DS-U3, Nikon)和光纤光谱仪(ULS2048, Avantes)在正交偏振的反射模式下采集。样品通过施加频率为 1 kHz 的方波电信号来测试其在电场下的响应特性。

3 结果与讨论

在基板未进行取向处理时, 蓝相样品从各向同性态降温至蓝相态的过程中, 不同指向的蓝相软晶格在空间内随机生长, 最终整体晶格指向无序, 因此蓝相液晶通常在偏光显微镜下呈现碎片状的显微结构, 如图 1(a)所示。若对基板表面提供均匀一致的取向, 蓝相液晶则会在表面强锚定能和分子内自组装共同作用下, 晶格生长方向趋于一致, 此时的蓝相结构呈现为反射色均匀一致的显微结构, 如图 1(b)所示。同时, 均匀排列的蓝相晶格能够大大增强其在特定波段的布拉格反射强度(图 1(e) 红色曲线与紫色曲线)。基于取向区域与非取向区域在反射强度上的巨大差异, 于是我们对基板做了图形化取向处理, 即取向与非取向区域按 1:1 周期性排列形成光栅结构。如图 1(c)所示, 图中亮绿色的条纹即为表面均匀取向后的蓝相结构, 而暗条纹则是表面未进行取向的蓝相结构。交替排列的蓝相取向区域与非取向区域, 其反射光强度形成振幅调制, 因此可以制备振幅型衍射光栅。同理, 不同的图形化微区取向结构可以制备不同的衍射器件, 如二维光栅、叉行光栅、菲涅尔透镜等。

不同的取向方向并不会影响蓝相晶格排列的有序性, 却能够达到控制蓝相反射光波前相位的目标。我们对基板做不同取向方向区域交替排列成菲涅尔圆环微结构, 其中两个区域的取向方向

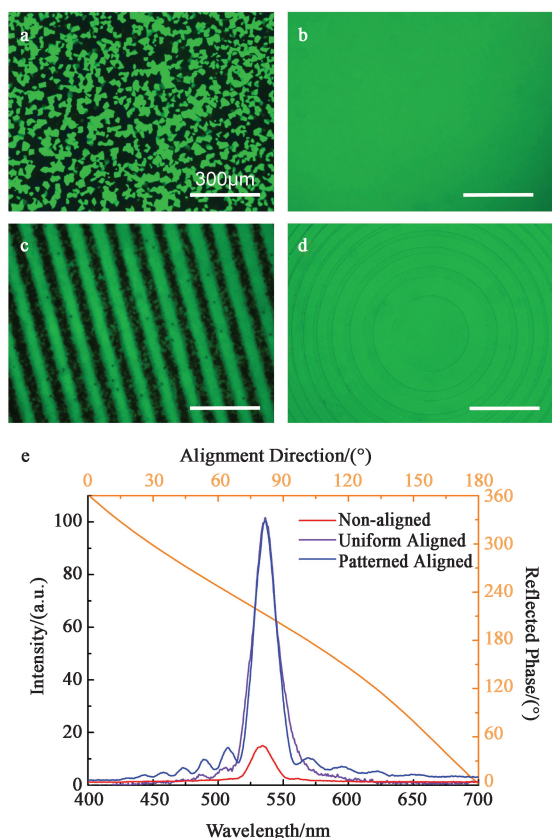


图 1 蓝相液晶在不同取向条件下所呈现的显微结构和反射光谱。(a)无取向;(b)均匀沿同一取向方向;(c)取向区域与非取向区域交替排列成光栅结构;(d)取向方向相互正交排列成菲涅尔圆环结构;(e)不同取向条件的蓝相反射光谱和表面取向方向与右旋圆偏振光(RCP)入射下蓝相反射光相位之间的关系。

Fig.1 Typical polarized optical microscope (POM) textures and corresponding spectra in reflection mode with crossed polarizers of BP under various alignment conditions. (a) Non-alignment; (b) Uniform alignment; (c) Patterned grating superstructure enabled by alternate aligned and Non-aligned BP; (d) Patterned Fresnel zone superstructure enabled by orthogonally aligned BP; (e) Reflection spectra of BP under various alignment conditions and alignment direction dependence of reflected phase of uniform aligned BP for right circular polarized light (RCP) incidence.

相差 90° 。在此取向条件下,蓝相晶格排列形成如图 1(d)所示的显微结构。图中颜色偏暗的圆环线则是表面不同取向的区域形成的分界线。相

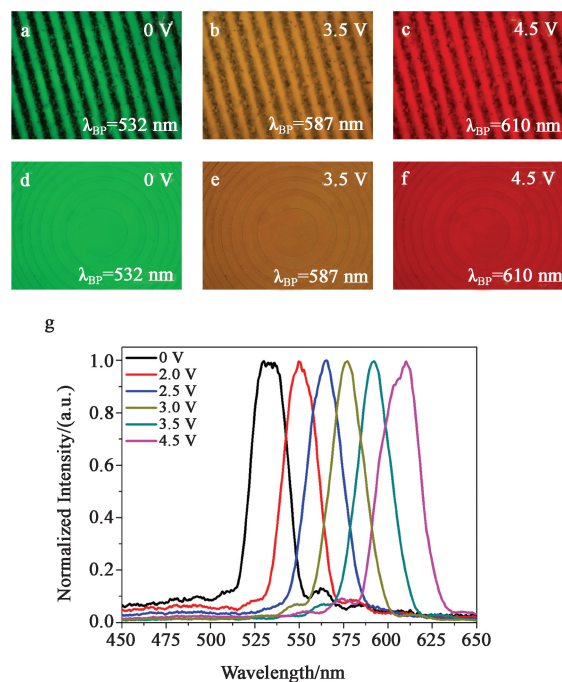


图 2 两种取向条件下蓝相显微结构(a-f)和反射光谱(g)随电压的变化。 λ_{BP} 代表此时蓝相的中心反射波长

Fig.2 POM textures change (a-f) and reflection spectra shift (g) of two types of patterned BP superstructure during the enhancement of the applied voltage. Abbreviation λ_{BP} represents the reflected center wavelength of BP.

对于沿同一方向的均匀取向(图 1(b)),蓝相结构的均匀性仍然保持,无明显变化。基板不同的取向方向不仅不会改变蓝相的晶格均匀性,而且对蓝相的布拉格反射波段和反射强度皆无影响(图 1(d),深蓝色曲线和紫色曲线)。图 1(d)中的橙色曲线是利用 Berreman 4×4 矩阵^[25,39]计算所得的表面取向方向与蓝相反射光相位之间的关系。可以发现,蓝相液晶的反射光相位约为基板取向相位的两倍关系。值得注意的是,当相邻区域取向方向相差 90° 时,其反射光满足半波条件,这就为设计制作相位型衍射光学器件提供了可能。同时,改变蓝相的反射波段,几乎对基板取向与其反射光相位的关系无影响。综上,交替取向/非取向交替排列的微区域能够设计成振幅型的衍射器件,而不同取向方向的微区域能够设计成相位型的衍射器件。

基于蓝相液晶制备的光学器件其突出特点

之一是能对各种外界刺激做出响应,以实现其结构与性质的可调性。以电场为例,如图2所示,我们设计的这两类基于蓝相液晶的衍射器件在电场的驱动下显示同样的性质:在无电场驱动下,蓝相样品的初始反射中心波长为 532 nm,此时对样品施加频率为 1 kHz 的方波交流信号后,蓝相晶格大小发生改变,其反射带从

532 nm 连续红移到 610 nm(图 2(g))。当电压继续增加超过 4.5 V,蓝相结构将会在电场作用下解旋,最终几乎全部的液晶分子平行于电场排列呈现垂直取向,在偏光显微镜下呈现暗态。当然,一旦将电压撤除,蓝相晶格将在分子间作用力和表面取向锚定力的操控下恢复到图 2(a)图 2(d)所示的初始状态。

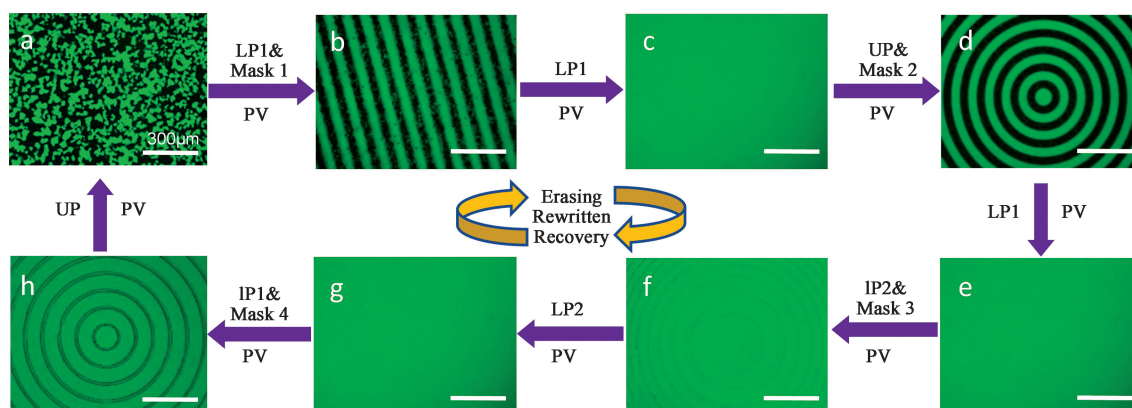


图3 图形化蓝相结构通过相继的紫外曝光和脉冲电压刺激能够完成其结构的光擦写。(a)无取向条件下的蓝相显微结构;(b,d)取向/非取向排列的蓝相光栅结构和同心圆环结构;(c,e,g)均一取向的蓝相结构;(f,h)取向方向相互正交排列成菲涅尔圆环结构和同心圆环结构.LP:线偏振的紫外光,其中 LP1 和 LP2 的偏振方向相互正交;UP:非偏振的紫外光.Mask:光刻掩模板,其中 Mask 1 为光栅结构,Mask 2 和 Mask 4 为不同占空比的同心圆环;Mask 3 为菲涅尔波带片结构;PV:脉冲电压。

Fig.3 Patterned BP superstructure can be erased and rewritten by sequential UV-irradiation and pulsed-voltage stimulation. (a) POM textures of BP without preferred alignment direction. (b, d) Patterned grating and concentric-annulus structure enabled by alternate aligned and non-aligned BP areas; (c, e, g) POM textures of BP under uniform alignment direction; (f, h) Patterned Fresnel zone and concentric-annulus structure by orthogonal alignment orientation. LP: Polarized UV light. LP1 and LP2 are orthogonal in polarization direction. UP: Unpolarized UV light. Mask 1 and mask 3 are grating-patterned and Fresnel-zone-patterned photo-mask respectively. While mask 2 and mask 4 are concentric-annulus patterned photo-mask with different duty ratio.

光取向材料 SD1 的光重复可擦写特性,能够实现基板图形化取向的擦写。与光取向的向列相液晶微结构^[40]不同的是,由于内部的强手性锚定力的存在,在蓝相状态下改变基板的取向对蓝相结构无明显影响,因此单独利用紫外光无法实现图形化的蓝相微结构的光擦写。而若对蓝相施加 10 V 的电压破坏其蓝相结构后,再将电场撤除后,蓝相晶格将会在新的取向锚定条件下重新进行晶格生长,最终实现蓝相微结构的转换与重构,继而在不同的衍射器件(即不同的取向微结构)乃至不同调制方式(振幅型与相位型)的衍射器件之间完成转换。以图3为例,当基板未进行取向

时,蓝相呈现碎片状的显微结构(图3(a))。于此状态,首先利用线偏振紫外光(LP)通过光栅结构的光刻掩模板(Mask 1)曝光,在基板上形成取向/非取向交替排列的光栅微结构;再对原先样品施加脉冲电场(PV)破坏蓝相结构,蓝相将于新的基板锚定条件下重新进行晶格生长,得到图3(b)所示的光栅形状的微结构。同理,撤掉掩模板后,先通过均匀的线偏振紫外光对样品重新曝光,使基板形成均匀一致的取向,再利用电场的作用使蓝相结构重新生长从而获得图3(c)所示的晶格均匀排列的结构。若除去光取向系统中的金属线栅,入射光源转换为非偏振紫外光(UP),再将其

通过同心圆环状的光刻掩模板(Mask 2),擦除掩模板中透光区的取向效果,可以得到如图 3(d)所示的蓝相微结构。再通过偏振紫外光的均匀曝光后,又可以回复到蓝相晶格均匀排列的结构(图 3(d))。值得注意的是,通过光擦写的方式还能够完成振幅型与相位型衍射器件之间的转换。调整光取向系统的金属线栅,使入射光的偏振方向正交于之前的偏振方向,再将其通过菲涅尔圆环的光刻掩模板(Mask 3)后,

掩模板的透光区的取向方向发生改变,从而得到如图 3f 所示蓝相微结构。依据同样的办法,我们也能得到如图 3h 所示的同心圆环的结构。当然,再通过非偏振紫外光对样品曝光,能够回复到初始状态,完成结构的转换与重构。这样,我们利用线偏振光和非偏振光能够分别更改和擦除 SD1 取向方向这一性质,既可完成不同衍射器件之间的转换,还实现了振幅型与相位型调制方式的转换。

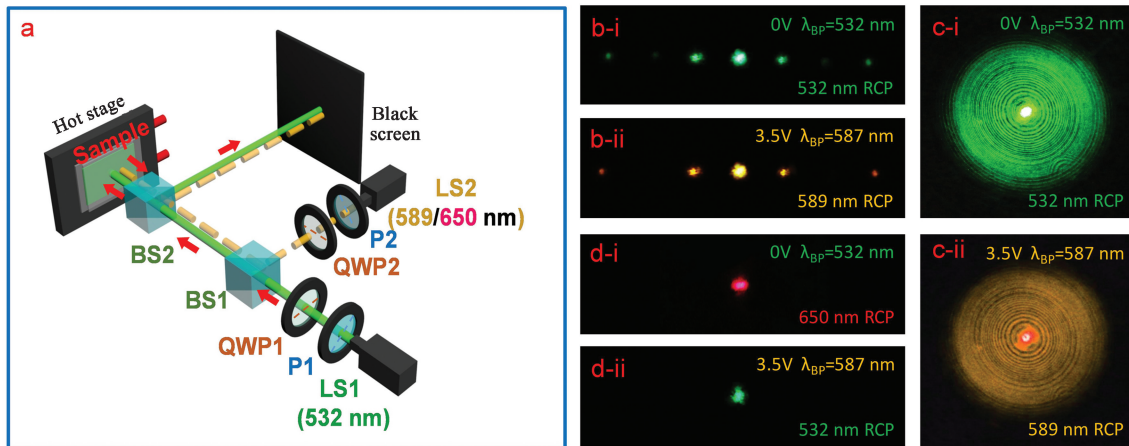


图 4 基于取向蓝相设计的两类器件的波长选择衍射特性。(a)衍射测试光路,LS:激光器;P:偏振片;QWP:1/4波片;BS:激光分光镜。(b,c)分别是图 2a 所示的光栅结构的振幅型衍射图像和图 2d 所示的菲涅尔圆环结构的相位型衍射图像,其中(i)和(ii)分别是蓝相结构在未施加电压时用 532 nm 圆偏振光入射的衍射图及施加 3.5 V 电压时用 589 nm 圆偏振光入射的衍射图。(d)入射光波长与蓝相反射带不匹配时的衍射图像,其中(i)是蓝相在未施加电压时用 650 nm 圆偏振光入射的衍射图;(ii)是蓝相在施加 3.5 V 电压时用 532 nm 圆偏振光入射的衍射图.RCP 代表右旋圆偏振光入射。

Fig.4 Wavelength-selective diffraction detection of the two types of devices based on patterned BP superstructure. (a) Optical setup: LS: laser source; P: polarizer; QWP: quarter-wave plate; BS: beam splitter. (b) The corresponding amplitude modulated diffraction from the grating BP superstructure shown in Fig. 2a. (c) The corresponding phase modulated diffraction from the Fresnel-zone BP superstructure shown in Fig. 2d. While (i) and (ii) are respectively denote the diffraction from BP superstructure without applying voltage impinged by a 532 nm RCP and with 3.5 V applied voltage impinged by a 589 nm RCP. (d) Diffraction diagrams which the wavelength of incident light mismatches the reflection waveband of BP. While (i) and (ii) are respectively denote the diffraction from BP superstructure without applying voltage impinged by a 650 nm RCP and with 3.5 V applied voltage impinged by a 532 nm RCP. RCP representatives the incident right-hand circularly polarized light.

基于取向蓝相晶格所设计这两类衍射器件具有特殊的圆偏振选择性和波段选择性:当入射光的偏振特性与蓝相的旋性相同时,衍射最强,而旋性相反时,无衍射;并且当且仅当入射光的波长局域在某一特定波段内,衍射才会产生。对于我们的右旋手性的蓝相样品,当入射光为右旋圆偏振光时,具有最强的衍射效果,而左旋圆偏振光入射

则无衍射效果。同时,当且仅当入射光的波长局域在蓝相的反射带内,衍射才会发生;而一旦入射光的波长“跳”出蓝相的反射带,则无衍射效果。相对于利用手性向列相液晶制备的波段选择性衍射器件,基于蓝相液晶所设计的衍射器件^[34]具有分辨率更高的波段选择性(~ 30 nm)。具体的光路设计如图 4(a)所示,首先将 532 nm 的绿光激

光器产生的激光依次通过偏振片和 $1/4$ 波片后转换为右旋圆偏振光,其中偏振片的透光方向与 $1/4$ 波片的快轴方向呈 45° 夹角。然后,该右旋圆偏振光先后经过两个分光光束镜(BS)后入射到蓝相样品上,其中 BS2 与样品紧靠以防衍射光斑的失真。样品的反射光则通过 BS2 在右侧黑屏上产生明显的衍射效果。当样品处于无电压驱动的初始态时,其中心反射波长位于 532 nm 附近(图 2(g)),图 2(a)中的振幅型光栅结构产生图 4b-i 所示的衍射光斑,而图 2(d)中的相位型菲涅尔圆环结构则产生图 4(c-i)所示的衍射光斑,在中心具有光聚焦效果。如果入射光的波长不在蓝相样品的反射带内,正如用 650 nm 的右旋圆偏振光入射,衍射端观测到图 4(d-i)所示光斑,无衍射现象。对样品施加 3.5 V 的电压,使其反射波段红移到 587 nm 附近,此时用 589 nm 的右旋偏振光入射,在反射端则产生如图 4(b-ii)和图 4(c-ii)所示的衍射光斑。当然,此时若依旧用 532 nm 的探测光入射则无衍射现象(图 4(d-ii))。

4 结 论

本文结合光取向微加工技术与蓝相分子的自组装特性,实现了蓝相晶格排列的定域化控制。利用不同取向方式设计了两类不同机制的反射型衍射类光学器件:1)振幅型衍射器件。设计取向区域和非取向区域交替排列的图形,形成均匀排列的蓝相晶格和随机排列的蓝相晶格,使之在反射端形成反射强度的调制。2)相位型衍射器件。设计图形化的不同取向方向微区,使均匀排列的蓝相晶格对反射光的相位形成调制。这两类衍射器件对入射光有特殊的波长选择性和圆偏振选择性,同时蓝相的刺激响应特性赋予了其工作波长的可调谐性能。这种器件能够在紫外光的作用下完成不同衍射图形和不同衍射机制的光擦写。该研究对基于蓝相液晶的光学器件的加工与应用提供了新思路,将在光学分辨、光信号传输及光电子学领域等具有特殊应用。

参 考 文 献:

- [1] NODA S, TOMODA K, YAMAMOTO N, *et al.* Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths [J]. *Science*, 2000, 289(5479): 604-606.
- [2] LIU N, GUO H C, FU L W, *et al.* Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(1): 31-37.
- [3] XIA Y, GATES B, LI Z Y. Self-assembly approaches to three-dimensional photonic crystals [J]. *Advanced Materials*, 2001, 13(6): 409-413.
- [4] CAMPBELL M, SHARP D N, HARRISON M T, *et al.* Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography [J]. *Nature*, 2000, 404(6773): 53-56.
- [5] HENNESSY K, BADOLATO A, TAMBOLI A, *et al.* Tuning photonic crystal nanocavity modes by wet chemical digital etching [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(2): 021108.
- [6] CAO W Y, MUÑOZ A, PALFFY-MUHORAY P, *et al.* Lasing in a three-dimensional photonic crystal of the liquid crystal blue phase II [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(2): 111-113.
- [7] MEIBOOM S, SAMMON M, BRINKMAN W F. Lattice of disclinations: the structure of the blue phases of cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review A*, 1983, 27(1): 438-454.
- [8] DELACROIX H, GILLI J M, ERK I, *et al.* Structure analysis of a quenched blue phase I using electron microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(20): 2935-2938.
- [9] HIGASHIGUCHI K, YASUI K, KIKUCHI H. Direct observation of polymer-stabilized blue phase I structure with confocal laser scanning microscope [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(20): 6326-6327.
- [10] TANAKA S, YOSHIDA H, KAWATA Y, *et al.* Double-twist cylinders in liquid crystalline cholesteric blue phases observed by transmission electron microscopy [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16180.
- [11] XU X W, LIU Z, LIU Y J, *et al.* Electrically switchable, hyper-reflective blue phase liquid crystals films [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(3): 1700891.
- [12] HUR S T, LEE B R, GIM M J, *et al.* Liquid-crystalline blue phase laser with widely tunable wavelength [J].

- Advanced Materials*, 2013, 25(21): 3002-3006.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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]. *Advanced Materials*, 2013, 25(36): 5050-5054.
- [16] WANG J, LIN C G, ZHANG J Y, *et al.* Polyoxometalate-based organic-inorganic hybrids for stabilization and optical switching of the liquid crystal blue phase [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(16): 4179-4187.
- [17] GE S J, JI W, CUI G X, *et al.* Fast switchable optical vortex generator based on blue phase liquid crystal fork grating [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(12): 2535-2541.
- [18] CLAUS H, WILLEKENS O, CHOJNOWSKA O, *et al.* Inducing monodomain blue phase liquid crystals by long-lasting voltage application during temperature variation [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(5): 668-693.
- [19] CHEN H S, LIN Y H, WU C H, *et al.* Hysteresis-free polymer-stabilized blue phase liquid crystals using thermal recycles [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(8): 1149-1155.
- [20] CHEN Y, WU S T. Electric field-induced monodomain blue phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(17): 171110.
- [21] CHEN M, LIN Y H, CHEN H S, *et al.* Electrically assisting crystal growth of blue phase liquid crystals [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(5): 953-959.
- [22] NAYEK P, JEONG H, PARK H R, *et al.* Tailoring monodomain in blue phase liquid crystal by surface pinning effect [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(5): 051701.
- [23] YAN J, WU S T, CHENG K L, *et al.* A full-color reflective display using polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 081102.
- [24] KIM K, HUR S T, KIM S, *et al.* A well-aligned simple cubic blue phase for a liquid crystal laser [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(21): 5383-5388.
- [25] YOSHIDA H, KOBASHI J. Flat optics with cholesteric and blue phase liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(13/15): 1909-1919.
- [26] CHEN C W, HOU C T, LI C C, *et al.* Large three-dimensional photonic crystals based on monocrystalline liquid crystal blue phases [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 727.
- [27] 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: 15854.
- [28] 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.
- [29] OTON E, NETTER E, NAKANO T, *et al.* Monodomain blue phase liquid crystal layers for phase modulation [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44575.
- [30] NAYEK P, PARK N H, NOH S C, *et al.* Analysis of surface anchored lattice plane orientation in blue phase liquid crystal and its in-plane electric field-dependent capacitance response [J]. *Liquid Crystals*, 2015, 42(8): 1111-1119.
- [31] MILLER R J, GLEESON H F. Lattice parameter measurements from the kossel diagrams of the cubic liquid crystal blue phases [J]. *Journal de Physique II*, 1996, 6(6): 909-922.
- [32] CHEN P J, CHEN M, NI S Y, *et al.* Influence of alignment layers on crystal growth of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 1003-1010.
- [33] HENRICH O, STRATFORD K, MARENDUZZO D, *et al.* Ordering dynamics of blue phases entails kinetic stabilization of amorphous networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(30): 13212-13215.
- [34] SUN P Z, LIU Z, WANG W, *et al.* Light-reconfigured waveband-selective diffraction device enabled by micro-

- patterning of a photoresponsive self-organized helical superstructure [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(39): 9325-9330.
- [35] XU X W, LUO D, DAI H T. Optically switchable circularly polarization-dependent optical vortex [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 7805207.
- [36] AKIYAMA H, KAWARA T, TAKADA H, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liquid Crystals*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [37] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.* High-resolution photoaligned liquid-crystal micropolarizer array for polarization imaging in visible spectrum [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3619-3621.
- [38] MURAVSKY A, MURAUSKI A, CHIGRINOV V, *et al.* New properties and applications of rewritable azo - dye photoalignment [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(9): 927-931.
- [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] SUN J, SRIVASTAVA A K, WANG L, *et al.* Optically tunable and rewritable diffraction grating with photoaligned liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2342-2344.

作者简介:袁丛龙(1992—),男,山东青岛人,硕士,从事手性液晶微结构与光学器件的研究。E-mail: conglongyuan@qq.com

郑致刚(1982—),男,浙江宁波人,博士,华东理工大学物理系教授,从事液晶光学材料与应用器件的研究。E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn