液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays
ESCI/Scopus收录
中文核心期刊
主管：中国科学院
主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
京东方科技集团股份有限公司
中国物理学会液晶分会
中国光学光电子行业协会液晶分会
主编：郭海成

光取向液晶微结构及其光子元件

曹慧敏，吴赛博，王靖阁，胡伟

引用本文:
曹慧敏, 吴赛博, 王靖阁, 等. 光取向液晶微结构及其光子元件[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 921-938.
CAO Hui-min, WU Sai-bo, WANG Jing-ge, et al. Photoalignment enabled liquid crystal microstructures for optics and photonics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 921-938.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展
Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field
液晶与显示. 2017, 32(6): 411-423 https://doi.org/10.3788/YJYXS20173206.0411

基于手性和光控取向操控的液晶自组装微结构
Self-assembled microstructures of liquid crystals based on chirality and photoalignment control
液晶与显示. 2020, 35(9): 885-891 https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0885

光响应蓝相液晶的研究进展
Research progress of light-responsive blue phase liquid crystal
液晶与显示. 2021, 36(4): 493-503 https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0279

半导体量子棒的光控取向技术进展
Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment
液晶与显示. 2020, 35(5): 409-421 https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0409

液晶光控取向技术进展
Review on liquid crystal photoalignment technologies
液晶与显示. 2015(5): 737-751 https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0737

文章编号:1007-2780(2021)07-0921-18

光取向液晶微结构及其光子元件

曹慧敏[1],吴赛博[1],王靖阁[2],胡 伟[1*]
(1. 南京大学 现代工程与应用科学学院,江苏 南京 210093;
2. 菏泽职业学院,山东 菏泽 274000)

摘要:液晶是一类具有自组装和刺激响应特性的软物质,其作为当今主流信息显示技术的依托材料而备受瞩目。伴随着液晶理论与技术的发展与革新,人们对这类材料的理解不断加深。近年来,基于光取向技术对液晶微结构的灵活操控,液晶研究逐渐从传统显示领域向更加前沿的液晶光子学领域过渡。在平面光学元件、结构光场、全光互连、模分复用光通信等领域展现出蓬勃的生机。本文综述了南京大学液晶与光子技术研究中心在光取向液晶微结构及其光子元件领域的最新进展,具体讨论了多层级液晶畴构筑、光寻址液晶调光技术、光通信与太赫兹液晶元件。

关 键 词:液晶;光取向;软物质;微结构;光子元件
中图分类号:O753^{+}.2 **文献标识码**:A **doi**:10.37188/CJLCD.2021-0004

Photoalignment enabled liquid crystal microstructures for optics and photonics

CAO Hui-min[1], WU Sai-bo[1], WANG Jing-ge[2], HU Wei[1*]

(1. *College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*;
2. *Heze Vocational College, Heze* 274000, *China*)

Abstract: Liquid crystal (LC) is a kind of functional soft matter featured by self-assembly and stimuli responsiveness. It is widely known as a fundamental material for current mainstream information display industry. With the development and innovation of LC theory and technology, understanding on such a material system has been significantly extended. Recently, the manipulation of LC microstructures has been flexibly enabled *via* a photoalignment technique, and the research focus has been gradually transitioned from traditional displays to advanced LC photonics. It is expected to provide great opportunities in the fields of planar optics, structured light fields, optical cross connection, and mode division multiplexing optical communications. This review presents the latest works of the Research Center for Liquid Crystal and Photonics of Nanjing University in the field of photoalignment-enabled LC microstructures and photonic applications. To be specific, LC hierarchical architectures, optically addressed spatial light modulators, and LC telecom/terahertz elements are separately discussed.

Key words: liquid crystals; photoalignment; soft matter; microstructures; photonics

收稿日期:2021-01-06;**修订日期**:2021-01-31.
基金项目:国家自然科学基金(No.62035008,No.61922038)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No.62035008,No.61922038)

* 通信联系人,E-mail:huwei@nju.edu.cn

1 引 言

液晶(liquid crystal, LC)是介于液体和晶体之间的一种物质状态,同时具有液体的流动性和晶体的各向异性。20 世纪中期以来,液晶广泛应用于平板显示领域,应用范围从小尺寸的手机、笔记本,到大尺寸的液晶电视、投屏电视。而 21 世纪初,随着液晶技术的发展与革新,液晶进一步在平面光学元件、结构光场、全光互连、模分复用光通信、增强现实、激光跟瞄系统等方面展现出巨大潜力[1-2]。目前,液晶研究正逐步从信息显示拓展到液晶光子学领域[3]。

液晶包含多种相态,如向列相、近晶相、胆甾相、蓝相等。不同液晶相具有特征的位置序与取向序。组成向列相液晶的棒状分子,局部长轴互相平行,质心位置混乱无序。分子可以沿长轴方向任意移动,因此向列相液晶(nematic LC, NLC)黏度小、流动性大。指向矢空间排布会导致物理性质,尤其是光学性质的各向异性分布。近晶相液晶(smectic LC, SLC)的分子呈层状排列,层内分子长轴互相平行,方向与层法线一致或呈特定倾角。在对抗性边界条件下,互相平行的分子层将发生空间弯曲并形成各种缺陷阵列。胆甾相液晶(cholesteric LC, CLC)分子指向平行于分子层平面,相邻层分子有一固定的夹角,形成周期性的螺旋结构。因此,胆甾相液晶表现出一维光子晶体特征,可以选择性反射与自身结构旋性相同的圆偏振光,并具有宽带布拉格反射特性[4]。蓝相(blue phase, BP)是位于胆甾相和各向同性相之间极窄温区内的一种液晶相态,是由双重扭曲螺旋柱堆叠而成的立方晶格结构[5]。不同液晶相会自组装产生独特的畴结构,得益于液晶物理性质的各向异性,这些畴结构通常具备特殊的形态学、光学和电磁学等特征[6]。

液晶分子组装是一个热力学过程,极易受到界面锚定、外场波动等环境因素的影响,难以精确控制液晶微结构并实现有序结构的大面积制造。液晶取向技术有利于液晶微结构的控制,但传统的摩擦取向技术是接触式的,易造成样品损伤并产生静电及微小的灰尘,破坏结构的有序性。为克服这些不足,非接触式取向技术如离子束取向、斜向蒸镀氧化硅和光取向等应运而生。其中,光取向技术因其适用于高分辨的结构表面与曲面取向而最受关注[7]。光取向的一般原理是用线偏振光诱发取向剂分子的物理化学反应,产生定向排列,进而将这种秩序通过分子间相互作用传导给液晶材料从而实现取向控制。光敏偶氮苯磺酸盐染料 SD1 是常用的一种取向剂,其分子长轴倾向于垂直于入射紫外或蓝光的线偏振方向排列,进而取向邻近的液晶。SD1 具有良好的可擦写性,只记录最后一次的偏振信息,因而特别适用于可重构的液晶图案化取向。光取向技术可分为两大类,一是利用双光束或多光束干涉曝光一步产生目标图案,优点是效率高、分辨率高,缺点是取向图形单一;二是利用分步曝光,如激光直写、动态掩膜曝光实现复杂甚至任意图案的写入。

我们基于数控微镜阵(digital micro-mirror device, DMD)自主开发了缩微投影曝光系统[8],利用其向 SD1 写入取向信息可实现高分辨任意液晶微结构的制备。该技术为本中心的诸多科研工作提供了核心技术支撑。下面将结合中心近几年的具体研究工作,从多层级液晶畴构筑、光寻址液晶调光技术、光通信与太赫兹液晶元件三方面进行系统介绍,综述了光取向液晶微结构及其光子元件的最新研究进展。

2 多层级液晶畴构筑

液晶自组装微结构能够带来多种新颖的性能,然而,该类微结构的构筑非常具有挑战性。我们基于 DMD 动态掩膜光取向,能将“自下而上”

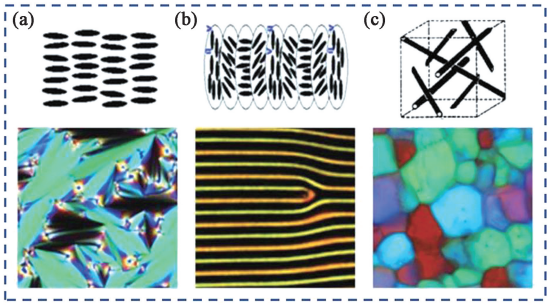


图 1 (a)近晶相,(b)胆甾相,(c)蓝相液晶的指向矢分布示意图与显微织构图[5,9]。

Fig.1 Typical director distributions and microscopic textures of (a) smectic, (b) cholesteric, and (c) blue phase LCs[5,9].

的液晶自组装与“自上而下”的光取向相结合，从而实现了对各相态多层级液晶畴结构的精确灵活操控(图 1)。通过预设二维面内取向，可以诱导近晶层的空间弯曲，进而控制畴的尺寸、形状、排列与晶格对称性。结合外场激励或锚定条件，可以控制胆甾相液晶螺旋轴的面内朝向，进而形成规则的指纹织构。对蓝相液晶进行微区取向，可以实现蓝相单晶畴的图案化与微域化。这些多层级液晶畴为光子元件的设计制备提供了全新思路并拓宽了其应用场景[10]。

2.1　近晶 A 相分子层弯曲控制

近晶 A 相是一种典型的近晶相态，其层内分子长轴垂直于层面，分子质心位置无序。对抗性边界锚定导致近晶 A 层曲率发生变化，形成的杜宾环面围绕正交平面内的共轭缺陷对(共焦椭圆和双曲线的一支)层叠，对应到偏光显微镜下的焦锥畴织构(focal conic domain，FCD)(图 2(a))[6,11]。对于底面随机面内取向、另一侧垂直取向的液晶层，其缺陷线退化成底面的一个圆与经过圆心并垂直于底面的一条直线，呈现环曲面焦锥畴织构(toric FCD，TFCD)(图 2(b))，该结构所导致的独特功能特性使得它们可用于粒子操控[12]、微透镜[13]、超疏水表面[14]。

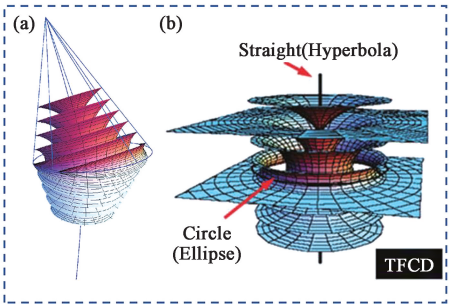


图 2　(a)FCD 与(b)TFCD 的层状结构示意图[15-16]

Fig.2　Schematic diagrams of lamellar structures of (a) FCDs and (b) TFCDs[15-16]

传统的焦锥畴产生与操控方法，如摩擦取向[17]、微通道限制[18]、热升华[19]等，往往过程复杂且缺乏灵活性。利用光取向预设二维取向，结合空气界面处的垂直锚定，精确操控液晶层的三维空间弯曲，进而实现畴结构的灵活控制。通过在光栅状结构中设置取向±45°交替分布，诱导液晶组装产生了半环面焦锥畴阵列(hemitoric FCD，HFCD)(图 3(a，b))。该结构在保持

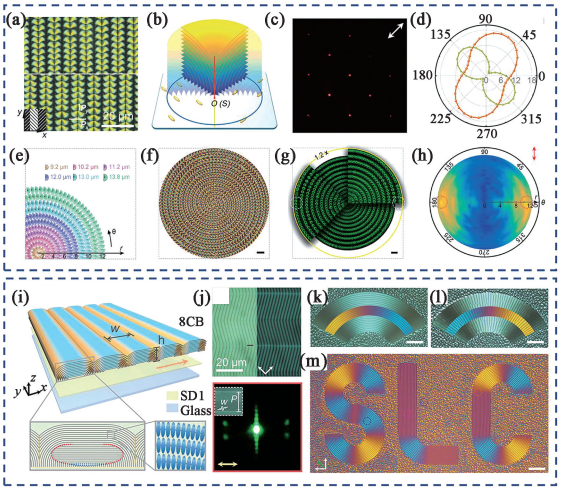


图 3　近晶相分层超结构。HFCD 的(a)织构图与(b)三维层状结构示意图；HFCD 正方晶格阵列的偏振选择性衍射的(c)衍射图案与(d)衍射效率[20]；d-TFCD 圆盘阵列的(e)尺寸、朝向设计示意图、(f)织构图、(g)对镂空“O”成像及其(h)图像清晰度分布[22]；(i)OS 层状结构及指向矢分布示意图；(j)弯折 OS 的织构图与偏振相关的衍射图案；(k)弯曲 OS，(l)展曲 OS，(m)图案化 OS 的织构图[23]。

Fig.3　Layered superstructures of smectic phase. (a) Textures and (b) 3D illustration of lamellar HFCDs; (c) Diffraction pattern and (d) diffraction efficiency of the polarization-dependent diffraction of an HFCD square lattice[20]; (e) Schematic and (f) textures of a d-TFCD array with designed size and orientation; (g) Images of a transmissive “O” mask and (h) corresponding image definition map[22]; (i) Schematic of lamellar OSs and relevant director distributions; (j) Textures and polarization-dependent diffraction pattern of deflecting OSs; Textures of (k) bending OSs, (l) splaying OSs and (m) patterned OSs[23].

TFCD 缺陷特征的同时，打破了其固有的旋转对称性，赋予了畴结构全新的操控维度——朝向。通过预设平面取向，实现了对 HFCD 位置、尺寸、朝向以及晶格对称性的灵活控制[20]。同时，结构旋转对称性的破缺导致了 HFCD 对入射光偏振的敏感性，呈现出偏振依赖的衍射效应(图 3(c，d))。此外，TFCD 因其由中心至边缘从水平到竖直梯度变化的指向矢分布，而呈现会聚型变折射

率透镜的效果[21]。通过引入非对称多畴取向单元,我们构筑了结构畸变可控的 TFCD(distorted TFCD, d-TFCD),其具有方向依赖的相位分布,可用作微透镜阵列。基于 d-TFCD 微透镜阵列的偏振敏感性及焦距的尺寸相关性,我们提出了一种四维信息可视化探测的方案[22]。我们设计制备了一个尺寸沿径向逐渐增大、朝向随方位角渐变的 d-TFCD 透镜阵列(图 3(e,f))。该微透镜阵列焦距由中心至外圈逐渐增大,而优选透镜相位分布始终沿圆环的切线方向。这样,通过单次拍摄成像,根据清晰像的位置坐标,即可提取出目标物体的空间深度信息与偏振信息(图 3(g,h))。结合微透镜自身的二维成像能力,即实现了对目标物体的四维信息探测(三维空间外加偏振维度)。该液晶微透镜阵列的偏振选择性与多焦能力,还赋予了其多路复用/解复用偏振信息与深度信息的功能,在光通信领域具有应用潜力。

油纹(oily streak,OS)是近晶 A 相液晶中另一种常见的织构类型,存在于液晶膜厚较薄的情况(~1 μm)。为了平衡界面锚定能、液晶弹性能和表面张力,使整个体系获得最小自由能,油纹结构内部通常会生成一系列特征缺陷,如旋转晶界、中心晶界以及相邻油纹之间的缺陷墙阵列(图 3(i))。在单向面内取向情况下,OS 的上述线型缺陷倾向于垂直取向方向生长排布。我们通过光取向技术预设衬底表面锚定条件,结合外加电场刺激,实现了油纹结构缺陷墙的可编程控制[23]。采用交替变化的面内取向、连续变化的径向取向和角向取向,分别实现了油纹结构的弯折、弯曲与展曲操控(图 3(j~m))。这些朝向可控的自组装油纹阵列表现出了强烈的偏振依赖衍射特性。图 3(j)展示了弯折 OS 与结构周期、取向周期相关的二维衍射分布。通过设定空间电场,可灵活地调谐缺陷墙间距,并能进一步实现缺陷阵列的面内旋转和动态开关等多维操控。OS 拓扑缺陷的可编程控制有望推动全新液晶光子元件的设计开发。

2.2 胆甾相螺旋轴操控

利用取向控制胆甾相液晶螺旋轴朝向可以实现指纹织构与平面态织构两种不同的状态。其中,指纹织构产生于垂直锚定或混合锚定条件下,具有躺倒的螺旋轴分布;而在两侧面内取向的情况下,螺旋轴垂直于两侧基板,产生平面态织构。利用光取向技术对衬底进行图案化配向,再施加适当的垂直电场对液晶指向进行控制,可大面积制备胆甾相光栅[24]。在图案化配向情况下,初始状态仍为平面态织构(图 4(a,b)),当施加足够大的电场时,中间层的液晶将率先挣脱锚定束缚,使螺旋轴发生 90°旋转,变为垂直于底面取向的躺倒螺旋(图 4(c))。由于液晶指向矢沿螺旋轴周期变化,从而在偏光显微镜下呈现出干涉色的周期变化而形成指纹织构(图 4(d)),并表现出光栅衍射行为。当在两侧基板取向层预设上下对准的角向取向时,电场诱导下液晶螺旋轴呈现放射状躺倒(图 4(e)),形成阿基米德螺线型的织构(图 4(f))。本工作还系统研究了预设取向对条纹方向的影响,证实光取向技术可以灵活、任意地操控胆甾相螺旋超结构。该工作开辟了软物质自组装多层级超结构构建的新途径,丰富了液晶微结构光子元件的种类。

光取向还能诱导半开放液晶膜生成大面积、高质量的指纹结构。掺杂光敏手性剂可实现指纹织构的光控调谐[25]。我们将掺有 ChAD-3c-S 光敏手性分子开关的胆甾相液晶旋涂至均匀面内取向的衬底上,所得到的半开放液晶膜在对抗性边界锚定作用下,表层液晶产生周期性波动(图 4(g)),进而形成指纹织构。蓝光刺激诱导分子开关结构变化,促使螺旋结构解旋,进而导致指纹织构发生面内旋转,其最大旋转角达到 987.8°(图 4(h))。我们进一步验证了此半开放液晶膜在光束偏折(图 4(i))与粒子同步操控(图 4(j))等方面的具体应用,展示了其在传感和微操纵等领域的应用潜力。

平面态胆甾相液晶具有圆偏光选择的宽带布拉格反射特性,反射圆偏振与螺旋结构手性一致,反射波长位于 $n_o p \sim n_e p$ 之间,其中 n_o、n_e 分别是液晶寻常光和非寻常光折射率,p 是胆甾相液晶的螺距。通过向胆甾相液晶中掺杂弯曲型液晶二聚物和光敏手性分子开关,结合电、光双重刺激,实现了倾斜螺旋胆甾相螺距的动态电控与螺旋超结构手性的光控可逆转换,获得了反射带宽在整个可见光波段的正反向连续可调[26]。当该液晶受到平行于螺旋轴方向的电场刺激时,在维持旋性的同时,层内分子由面内取向转变为与层面呈一定夹角,形成倾斜螺旋结构[27](图 4(k))。此夹角随外加电场增大而增大,胆甾相螺距相应减小,从而导致反射光谱的蓝移(图 4(l))。光敏

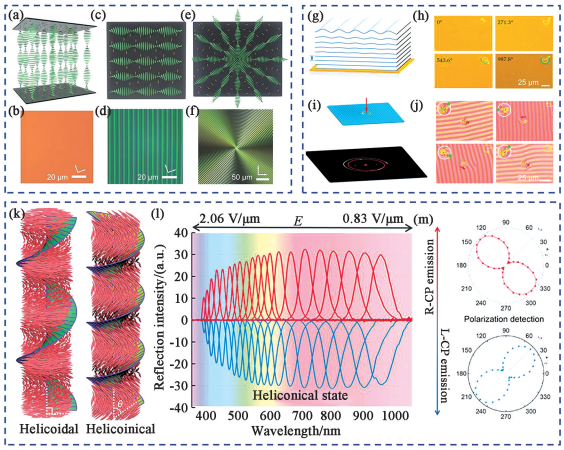


图 4　胆甾相螺旋超结构的操控。胆甾相平面态的(a)螺旋结构示意图与(b)织构图；电场诱导螺旋躺倒后的(c)结构示意图与(d)指纹织构图；电场诱导下放射状躺倒的螺旋结构(e)示意图与(f)阿基米德螺线指纹织构图[24]；(g)半自由膜中分子层的自适应变形；(h)指纹织构的光控旋转，及其在(i)光束偏折和(j)粒子操控方面的应用展示[25]；(k)普通胆甾相与倾斜螺旋胆甾相的结构对比；(l)电调倾斜螺旋胆甾相反射光谱及光控手性反转；(m)光控圆偏振反转的激射[26]。

Fig.4　Manipulation of cholesteric helical superstructures. (a) Schematic and (b) textures of planar cholesteric state; (c) Schematic and (d) fingerprint textures of electric-field-induced lying helix; (e) Schematic and (f) archimedes spiral fingerprint textures of electric field-induced radial lying helix[24]; (g) Helical layers with a self-adapted distortion in a semi-free film; (h) Light-driven rotation of fingerprint textures, and the demonstration of its applications in (i) beam steering and (j) particle manipulation[25]; (k) Comparison of the structures of common helicoidal CLC and heliconical CLC; (l) Electrical manipulation of reflection spectra of heliconical CLC and light-activated chirality inversion; (m) Light-driven laser emission of opposite circular polarizations[26].

手性分子开关在蓝光和绿光的照射下发生的分子结构变化会导致螺旋结构的手性反转。上述特性可用于液晶可调谐激光的激射调控。电调螺距实现了激射波长的宽谱调谐，光控手性反转能够实现圆偏振的手性切换(图 4(m))。该体系只有在手性态下才呈现布拉格反射，我们恰当控制曝光剂量使材料进入解旋状态，再施加特定电场，利用图案化光场曝光，赋予曝光区域手性，则造成手性螺旋态和向列相态(解旋态)的交替共存，呈现出新颖的衍射效应。本工作理清了光电联合调控对倾斜螺旋胆甾相组装行为的作用规律，使得多元外场动态调控的组装微结构液晶元件成为可能。

2.3　蓝相单晶畴图案化

蓝相是一种自组装的软光子立方晶体，具有极窄频率光子局域特性[28-29]。我们通过一步图案化取向，曝光区域为均匀面内取向，未曝光区域为无规取向，上述区域在降温过程中分别诱导蓝相液晶形成单晶畴和多晶畴，从而获得了微域图案化的晶畴排列(图 5(a,b))[30]。此图案化晶格对各种外部刺激，如：温度、电场和光辐射，可以做出灵敏的响应，反映为光学性质(如反射强度、反

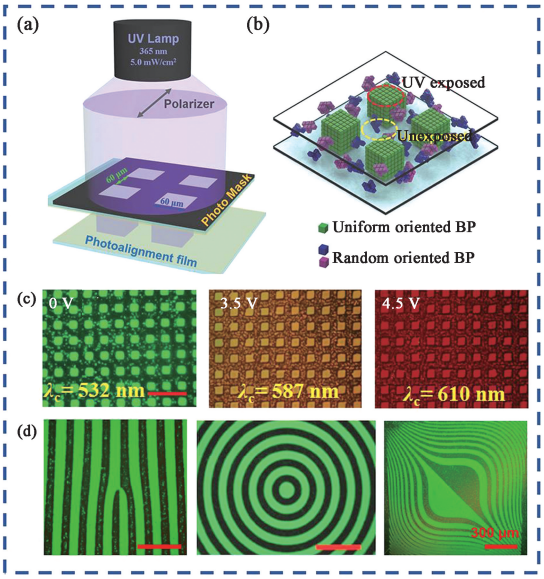


图 5　蓝相单晶畴图案化。(a)蓝相液晶盒图案化取向示意图；(b)蓝相单晶畴与多晶畴分布示意图；(c)电致蓝相反射波长红移；(d)图案化蓝相单晶畴[30]。

Fig.5　Patterning of BP crystallographic domain. (a) Schematic of a photoaligned BP cell; (b) Schematic of the distribution of BP crystallographic and polycrystalline domains; (c) Electric field-induced red-shifting of reflective wavelength of BP; (d) Patterned BP crystallographic domains[30].

射带和光散射)的显著变化。如图 5(c)所示,对方形晶畴阵列样品施加垂直电场,蓝相晶格的反射色从绿色向红色转变。这意味着调节加载电压,即可实现对不同入射波长的选择性衍射(反射)。本工作还制备了叉形光栅、圆形光栅、艾里模板(图 5(d))等结构,并验证了其反射光的衍射行为,展示了该体系在窄带反射光子元件中的应用潜力。

除了上述常见液晶相态,我们还利用 SD1 实现了对液晶共轭聚合物的光取向[31]。通过图案化取向芴-苯并噻二唑交替共聚物 F8BT 和 F8BT/Red-F 二元共混体系,诱导聚合物长链局部有序取向,实现了多种微米级光学结构的制备,并展示出优异的光致发光特性。这拓宽了光取向技术的应用,丰富了聚合物半导体光电子器件的制备手段。

3 光寻址液晶调光技术

对光波各自由度的调制是光学元件的物理基础,在光学应用中占据重要的地位。这些自由度包括幅度、偏振和相位等,其中相位的空间分布至关重要。利用液晶器件进行的相位调制主要分为两种:动态相位和几何相位。动态相位是因光程差改变的相位,与介质的折射率和厚度相关;而几何相位源自光子的自旋轨道耦合,它的大小可以利用琼斯矩阵进行精确计算,通常与元件的局域光轴角度成比例[32]。

3.1 动态相位

液晶具有光学各向异性,其有效折射率依赖于液晶指向矢与入射偏振的角度关系。因此,同一偏振经过不同取向的液晶畴会产生光程差,控制液晶盒内不同区域的指向矢分布即可实现对光的相位整形。基于动态相位的典型液晶调光元件有液晶光栅、叉形光栅、达曼光栅等,这些元件可以基于二值化的液晶取向来实现。

3.1.1 液晶光栅

光取向液晶光栅的基本结构特征是液晶面内取向的周期性交替排列,相应的折射率分布导致的相位延迟量差异引发光的衍射。我们利用光取向技术实现了偏振无依赖的液晶光栅。具体通过两步正交偏振曝光同时引导液晶盒两侧基板的取向,实现相邻区域液晶指向矢的正交平面取向[33](planar alignment, PA)(图 6(a))。制备而成的一维(one-dimensional, 1D)(图 6(b))或者二维(two-dimensional, 2D)(图 6(c))相位光栅,其衍射效率可通过外加电场调谐(图 6(d)),因为 o 光和 e 光经历完全相同的相位分布,所以该类正交平面取向光栅具有偏振无依赖的衍射特性(图 6(e)),并展现出高透射率(~92%)、高衍射效率(>31%)以及高光学开关比(>150)等特点。如果先用光取向分别曝光基板制成扭曲向列相(twisted nematic, TN)液晶盒,再覆上光刻模版进行曝光,将透光区域改写为斜 45°PA,灌入液晶后,则形成交替 TN-PA 的液晶光栅[34](图 6(f))。沿 TN 取向方向在前后基板外侧贴附偏光片,加电后这类光栅可同时对相位和振幅进行调制。我们分别制备了 1D 和 2D 的 TN-PA 液晶光栅,它们的 1 级衍射强度均可通过外加电场进行灵活调节。并且在加电的过程中,光栅会呈现 4 种独特的透光状态(图 6(g)),有望应用于光学逻辑元件。我们进一步基于琼斯矩阵模拟了交替 TN-PA 液晶光栅的出射相位与振幅随电场的变化,并基于傅里叶变换模拟了电压、盒厚相关的光栅

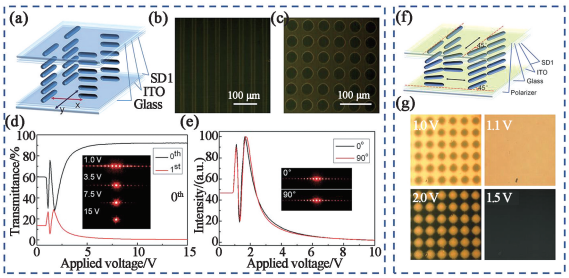


图 6 液晶光栅。(a)正交 PA 液晶盒示意图;(b)一维和(c)二维液晶相位光栅显微图;(d)0 级和 1 级 V-T 曲线;(e)0°和 90°偏振入射时,1 级衍射光强的电场相关性[33];(f)交替 TN-PA 液晶盒示意图;(g)二维 TN-PA 液晶光栅的 4 种状态(图片尺寸均为 300 μm× 300 μm)[34]。

Fig.6 LC gratings. (a) Schematic cell structure of an orthogonal-PA cell; micrographs of (b) 1D and (c) 2D LC phase gratings; (d) V-T curves of 0th and 1st orders; (e) Dependencies of 1st order diffraction intensity on electric field for 0° and 90° incident polarizations[33]; (f) Schematic of an LC cell with TN-PA; (g) Four states of a 2D TN-PA LC grating (all image sizes are 300 μm× 300 μm)[34].

衍射效率[35]。根据模拟结果优化了液晶光栅参数，提高了光栅性能。除了普通的向列相液晶，该类技术还可引入双频液晶与铁电液晶[36]，实现更加快速（亚毫秒量级）的动态响应与更高消光比，满足光开关等快速响应元件的需要[37-38]。

3.1.2　叉形光栅

叉形光栅是涡旋光和平面波干涉的全息图，通过高斯光照射叉形光栅会在衍射级上产生拓扑荷 m 与级次相对应的涡旋光束[39]。涡旋光束具有独特的螺旋形相位，光子携带 $m\hbar$ 的轨道角动量（orbital angular momentum，OAM）[40]。叉形光栅的中心区域存在位错，形状类似一个叉子，故称作叉形光栅。利用动态掩膜曝光系统将叉形光栅图案记录到取向层，另一层采用垂直配向，制备正交混合取向（hybrid alignment nematic，HAN）的液晶叉形光栅（图 7(a)）[41]。线偏振入射以后，在其衍射级产生涡旋光束，衍射效率可通过控制电压调谐，能够实现开关。加电调节最大衍射效率可达 37%（图 7(b)），而加电 10 V 以上，则只有 0 级光斑，高阶衍射被抑制，呈现关态（图 7(c)）。对于不同入射波长，衍射效率可以通过调节电压进行优化（图 7(d)）。与前面正交 PA 光栅类似，这类正交 HAN 的元件也呈现出优秀的偏振无依赖特性（图 7(e)）。该方案的取向图案与光束拓扑特性可以灵活设计，为提高开关响应速度，还可进一步引入铁电液晶[42]。

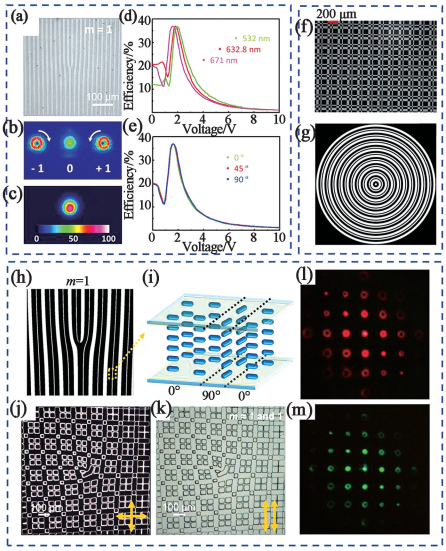


图 7　液晶叉形光栅、达曼光栅及达曼涡旋光栅。(a)正交混合配向叉形光栅显微图；光涡旋(b)开态和(c)关态；(d)不同波长(e)不同偏振的 V-η 曲线[41]；(f)二维达曼光栅显微图[45]；(g)圆形达曼光栅的相位图[46]；(h)$m=1$ 的 1×5达曼涡旋光栅的相位图案；(i)达曼涡旋光栅局部正交平面取向示意图；二维达曼涡旋光栅(j)、(k)显微图及对应(l)632.8 nm、(m)532 nm 入射波长的衍射图案[48]。

Fig.7　LC fork gratings, Dammann gratings and DVG. (a) Micrograph of orthogonal-HAN fork gratings; (b) on and (c) off state of the optical vortex; V-η curves at different (d) wavelengths and (e) polarizations[41]; (f) Micrograph of a 2D Dammann grating[45]; (g) Phase pattern of a circular Dammann grating[46]; (h) Phase pattern of 1×5 DVG with $m=1$; (i) Schematic of local orthogonal planar alignment of a DVG; (j), (k) Micrographs of a 2D DVG and its diffraction patterns at wavelength of (l) 632.8 nm and (m) 532.0 nm[48].

3.1.3　达曼叉形光栅

液晶光栅与液晶叉形光栅一个周期内只有一个相位转变点（取值 0.5），利用达曼光栅的相位分割原理，在一个周期内选取特定数量与位置的相位转变点，可以设计光栅各衍射级次的效率，比如产生特定级次等能量的阵列[43]。除了通常的达曼光栅[44-45]（图 7(f)），还可以将达曼光栅的相位分割原理拓展到圆形光栅和叉形光栅，分别实现圆形达曼光栅（图 7(g)）[46]和达曼叉形光栅[47]。我们利用光取向制备了正交 PA 的达曼叉形光栅（Dammann vortex gratings，DVG），实现了可电控开关且偏振无依赖的 1D（图 7(h，i)）和 2D（图 7(j，k)）涡旋光束阵列的产生[48]。调谐电场可以针对特定波长优化衍射效率，图 7(l，m)分别展示了 2D 达曼光栅在 632.8 nm 和 532.0 nm 时的衍射图案，光斑阵列的拓扑荷分布为 $n_x m_x + n_y m_y$，其中 n_x 和 n_y 分别代表 x 和 y 方向上的衍射级次，m_x 和 m_y 分别代表叉形光栅 x 和 y 方向上的拓扑荷。该达曼叉形光栅制备方案可以灵活操控涡旋光的拓扑荷 m 与径向指数 p，拓展了 OAM 产生、操控和检测等方面的应用。

3.2　透射式几何相位

几何相位是伴随圆偏振反转过程而产生的与光轴指向关联的相位类型，可以很方便地通过预设液晶方位角来实现精确操控。液晶光取向技术便于实现指向矢的面内连续变化，进而产生相位

梯度的连续渐变，理论上在半波条件下可以达到100%的相位转化效率。大多数几何相位元件液晶厚度在光波长量级，且为平整表面，因此微结构液晶光学元件是平面光学元件的一种，有利于光学元件的小型化与集成化。基于向列相液晶体系实现了多种新颖的几何相位元件，包括液晶偏振光栅、液晶 q 波片，q 波片还可进一步与多种相位叠加获得产生特殊光场的元件，这些均属于透射式几何相位元件的范畴。

3.2.1 液晶偏振光栅

液晶偏振光栅所对应的指向矢方位角在每个周期内从 0°连续变化到 180°(图 8(a))，而在垂直液晶盒的方向上指向矢平行排列；从而引入了倾斜的相位分布。我们基于多步重叠曝光技术在双频液晶体系中制备了液晶偏振光栅[49]，验证了快速响应的光开关。在半波条件下，±1 级间的能量分布取决于入射偏振。线偏振入射会导致能量均匀分配到±1 级(图 8(b))，左旋圆偏振入射时，只产生+1 级的右旋圆偏光(图 8(c))，而右旋圆偏振则恰恰相反(图 8(d))。衍射效率电压可调(图 8(e))，恰当选取电压值，可通过切换频率实现开关状态的快速控制。这类快速响应的液晶偏振光栅在宽视角显示、大角度光束偏折、偏振分束等领域有望获得广泛的应用[50]。

3.2.2 液晶 q 波片

液晶 q 波片可以高效率地直接将平面波转换为涡旋光和矢量光。它的本质是一个半波片，其液晶指向矢随空间位置发生变化，满足 $\alpha(\varphi)=q\varphi+\alpha_0$。$q$ 和 α_0 两个参数共同决定了 q 波片面内指向矢的空间分布，前者描述指向矢方位角随角度变化的快慢，后者是极轴上液晶指向矢的起始方向。根据琼斯矩阵可以计算出 q 波片对波前的调控效果：入射圆偏振反向，并附加上螺旋形相位，其拓扑荷 $m=2\sigma q$，其中 $\sigma=\pm1$，与入射光的圆偏振旋向有关；入射线偏振，出射光为两个正交圆偏振分量的叠加，形成空间上周期渐变分布的线偏振光，即矢量涡旋。q 波片由于其确定的 q 和 α_0，只能产生一束特定的涡旋光。我们进一步设计了 meta-q 波片，可实现角向或径向变化的 q 以及空间不同的 α_0[51]，能够点对点地操控光的空间自由度(偏振与相位)，从而产生更加复杂和新颖的光场。其中，q 角向变化可以产生椭圆形或对称性破缺的光场(图 8(f))；α_0 径向变化可以产生多环光场(图 8(g))；q 径向变化可以产生飓风形状的光场(图 8(h))。Meta-q 波片设计极大地

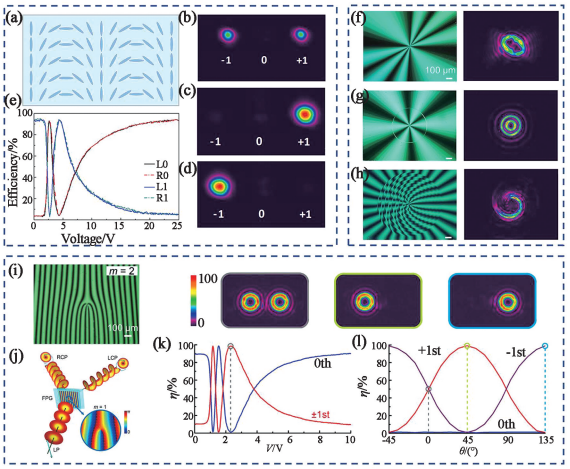


图 8 液晶偏振光栅、q 波片及叉形偏振光栅。(a)偏振光栅的液晶指向矢分布；(b)线偏光、(c)左旋圆偏光和(d)右旋圆偏光入射的衍射图案；(e)相反圆偏振入射的 V-η 曲线[49]；(f)q 值角向变化的 q 波片及其产生的对称性破缺的光场；(g)α_0 径向变化的 q 波片及其产生的多环光场；(h)q 值径向变化的 q 波片及其产生的飓风状光场[51]；(i)$m=2$ 的液晶叉形偏振光栅的织构图；(j)叉形偏振光栅的衍射特性示意图；(k)0 和±1 级的 V-η 曲线；(l)2.31 V 电压下偏振相关的衍射效率图，插图是曲线上相应颜色圆圈所对应的衍射图案[52]。

Fig.8 LC polarization grating, q-plate and FPG. (a) LC director distribution of a polarization grating; diffraction patterns for (b) linearly, (d) left circularly and (e) right circularly incident polarization; (e) V-η curves of opposite circular polarizations[49]; Micrographs of meta-q-plates with (f) azimuthally variant q, (g) radially variant α_0 and (h) radially variant q, and corresponding optical fields with (f) Symmetrical, (g) multi-ringed and (h) hurricane transverse profiles, respectively[51]; (i) Texture of a LC FPG with $m=2$; (j) Schematic diffraction property of an FPG; (k) V-η curves of 0th and 1st orders; (l) Polarization-dependent diffraction efficiency at 2.31 V_{rms}, and inserts show diffraction patterns of different θ marked in the curves[52].

扩展了对涡旋光的操控能力，为光学操纵、OAM信息技术、量子光学等领域的研究奠定了基础。

3.2.3　液晶 q 波片的拓展

将 q 波片与其他相位如达曼二值化相位进行简单叠加，可以获得更加新颖的液晶光学元件，如液晶叉形偏振光栅（fork polarization grating，FPG）、达曼 q 波片（Dammann q-plate，DQP）、圆形达曼 q 波片（circular Dammann q-plate，CDQP）及达曼涡旋 q 波片（Dammann vortex q-plate，DVQP）等，拓展了液晶 q 波片的类型和应用。我们将 q 波片与偏振光栅进行相位叠加，制备了叉形偏振光栅（图 8(i)）[52]，在±1 级获得纯的涡旋光束（图 8(j)）。线偏振入射时，外加电场可以实现 0 级与±1 级次间的切换以及能量分布的连续调节（图 8(k)），±1 级产生的涡旋光其拓扑荷和圆偏振都是相反的；圆偏振入射时，光束偏向其中的一级，实验测得的涡旋光转化效率高达 98.5%（图 8(l)）。

叉形偏振光栅只能对±1 级两束涡旋光进行操控，缺乏多光束并行处理的能力。为了解决这一问题，我们将 q 波片与达曼光栅相位集成（图 9(a,b)），制备了达曼 q 波片[53]。通过调控 q 波片的拓扑荷和达曼光栅的阶数与对称性，可灵活控制相应高阶庞加莱（higher-order Poincaré，HOP）球光束阵列的级数与晶格对称性。图 9(c)展示了 $m=1,7\times7$ 的达曼 q 波片及其产生的涡旋光束阵列，图 9(d)展示了 $m=6,2\times2$ 的达曼 q 波片及其产生的矢量光束阵列。达曼 q 波片可以实现光子自旋角动量（spin angular momentum，SAM）（与圆偏振相关）与 OAM（与相位螺旋相关）的并行操控，电控可对应实现 HOP 上任意状态。涡旋光束形似甜甜圈的强度分布通常会因 m 而不同，这给光学操纵、模式复用光通信等带来了不利影响。将圆形达曼光栅与 q 波片进行相位集成，所得的圆形达曼 q 波片可以完美地解决这一问题[54]。如图 9(e,f)所示，我们用不同拓扑荷的圆形达曼 q 波片产生了一系列的涡旋光和矢量光，它们具有相同的半径。进一步引入高阶圆形达曼光栅与不同 m 的 q 波片进行组合，可以产生半径与 m 无关的多环 HOP 光束（图 9(g)）。也可以将 q 波片与达曼涡旋光栅的相位进行集成，制备达曼涡旋 q 波片[55]，从而产生了多达 24 个独立通道的混合阶庞加莱球（hybrid-order Poincaré sphere，HyOPS）光束阵

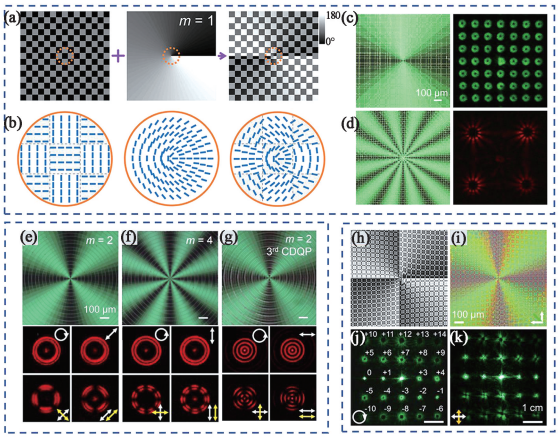


图 9　达曼 q 波片、圆形达曼 q 波片及达曼涡旋 q 波片。2×2 达曼光栅、$m=1$ 的 q 波片相位及其叠加而成的达曼 q 波片的(a)光轴分布与(b)中心区域光轴分布示意图；(c)$m=1$ 的 7×7 达曼涡旋 q 波片及其左旋偏振光入射的衍射图案；(d)$m=6$ 的 2×2 达曼涡旋 q 波片及其线偏光入射时的衍射图案（经过正交检偏器）[53]；(e)$m=2$、(f)$m=4$ 的 1 级与(g)$m=2$ 的 3 级圆形达曼 q 波片的显微图和衍射图案（入射偏振和检偏方向分别用白色箭头和黄色箭头指示）[54]；5×5 达曼涡旋 q 波片的(h)理论光轴分布图、(i)偏光显微图及(j)圆偏振光、(k)线偏振光入射时的光强分布（经过竖直检偏器）[55]。

Fig.9　LC DQP, CDQP and DVQP. (a),(b) Optical axis distributions of a 2 × 2 Dammann grating, a q-plate with $m=1$ and corresponding integrated DQP; (c) a 7×7 DQP with $m=1$ and its diffraction pattern with left circular incident polarization; (d) 2×2 DQP with $m=6$ and its diffraction pattern with linearly polarized incident light (detected with orthogonal polarizers)[53]; A micrograph and diffraction patterns of (e) 1st LC CDQP with $m=2$, (f) 1st LC CDQP with $m=4$, (g) 3rd LC CDQP with $m=2$ (The white and yellow arrows indicate the polarization states of incident light and the direction of the analyzer, respectively)[54]; (h) Theoretical distribution of optical axes, (i) POM image of a 5×5 DVQP and its diffraction pattern with (j) circular and (k) linear polarization (detected with a 90° analyzer)[55].

列(图 9(h～k)),为并行光操纵与超宽带数据传输提供了支持。q 波片与各种特殊相位的叠加赋予了涡旋光偏折、聚焦/发散、阵列生成等功能,极大丰富了涡旋光场的生成能力。

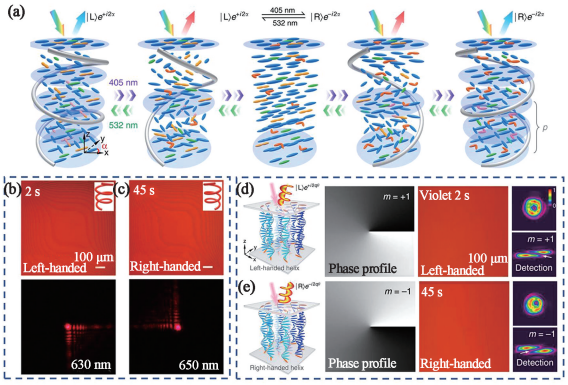


图 10 光控 CLC 光子带隙调谐及手性反转。(a)蓝光和绿光驱动的 CLC 超结构演变;艾里光束发生器在(b)2 s 和(c)45 s 蓝光照射下的显微图及衍射图案;$q=1/2$ 的 CLC q 波片在(d)2 s 和(e)45 s 蓝光照射下的功能示意图、相位分布图、显微图及 OAM 探测[60]。

Fig.10 Light-driven manipulation of CLC photonic band gap and inversion of chirality. (a) Structural evolution of CLC superstructures driven by blue and green light; Micrographs and diffraction patterns of an Airy beam generator irradiated by blue light for (b) 2 s and (c) 45 s; Schematic illustrations, phase profiles, micrographs and OAM detection of a CLC q-plate with $q=1/2$ irradiated by blue light for (d) 2 s and (e) 45 s[60].

3.3 反射式几何相位

上述基于向列相液晶的几何相位元件,需调谐电场匹配特定波长的半波条件,从而获得最大衍射效率。偏离该波长,则转化效率下降。胆甾相液晶具有圆偏振选择的宽带布拉格反射特性,操控起始配向,可以制备宽带的反射式几何相位元件[56-59],实现对波长位于 $n_o p \sim n_e p$ 之间的光波的宽带等效相位调制。灵活设定位相,可以实现不同的功能。将偏振光栅的取向写入胆甾相液晶,可实现宽带等效的圆偏振选择性的光束偏折[56];写入球面透镜的相位分布可以制备聚焦/发散的反射型透镜[56];此外,还可基于螺旋相位实现反射式涡旋光的产生[58]。上述反射式几何相位元件的工作带宽和功能都是固定的。我们向胆甾相液晶中引入光敏手性分子开关和具有相反手性的手性剂[60],通过蓝光和可见光照射动态调节胆甾相螺旋超结构的螺距并实现手性反转(图 10(a)),从而赋予了该类元件连续可调的反射光谱和共轭转换的相位分布。实现了一系列功能可开关、带宽可调的动态平面光子元件的制备,如偏振光栅、艾里模板和 q 波片,并验证了其光束偏折,艾里光束(图 10(b,c))、涡旋光产生(图 10(d,e))的功能。这些动态平面光子元件在宽带相位调制应用方面具有重要意义。

4 光通信与太赫兹液晶元件

液晶的介电和光学各向异性可以覆盖从紫外到微波的广阔波段。得益于液晶的刺激响应特性,通过外场(电、光、热等)可以灵活地调控液晶指向矢空间分布,进而实现对入射电磁波的相位、强度、偏振等自由度的调控。目前,对于液晶光子元件的研究和开发逐渐从可见光波段向长波区域,如通信波段、太赫兹波段乃至微波波段延伸,实现相应的液晶可调无源光器件如光开关、滤波器、偏振控制器等。随着工作波段向长波拓展,液晶光子元件的发展也面临一系列新的挑战,对结构的设计与材料的选择都提出了更高的要求。面向光通信与太赫兹波段的液晶光子元件成为目前热门的研究领域。

4.1 光通信元件

光通信是以光波为载波的通信技术,是目前网络通信的基本模式,而光通信元器件则是构建光通信系统的基础与核心。随着光通信元件在光网络设备中应用比例的增加,它们正朝着小型化、集成化方向发展。液晶材料因其优良的电光特性可用于开发各种可调谐无源光子元件。相比于传统电光晶体元件,液晶光子元件具有驱动电压低、功耗小、重量轻等优势。液晶光子元件的引入,为光通信技术提供了更为便捷的操控手段,促进了光通信技术的发展。我们实现了液晶光开关、退偏器与动态波导等光通信元件,并基于微结构液晶开发了面向 OAM 复用的元器件。

4.1.1 液晶光开关

光开关是进行光信号动态控制进而实现光信号互联的关键通信器件。前面介绍的基于光取向

技术实现了正交 PA 液晶光栅[33]与交替 TN-PA 取向的液晶光栅[34]，两者均可通过外加电场实现衍射级次开关态的切换。为了提高开关的响应速度，我们将双频液晶引入到光栅型光开关的制备中[37]，如图 11(a,b)所示，液晶盒的一侧为正交的图案化面内取向，另一侧为均一的垂直取向，组成正交的 HAN 结构。双频液晶对低频和高频电场分别呈现正和负介电各向异性，因此在较高电压(30 V)下，光开关可以根据频率的高低敏感地切换开关态。测得开和关的时间分别为 350 μs 和 600 μs(图 11(c))，均达到了亚毫秒级别。进一步将偏振光栅取向结构引入双频液晶，制备的光栅可以大幅提高光能利用率[49]。

4.1.2　液晶退偏器

光学系统在某些特定情形下，会产生偏振相关的增益、损耗，并带来负面的影响。退偏器可将偏振光转化为非偏振光，广泛应用于对偏振敏感的系统和仪器中。我们基于光轴方向随机排列的半波片阵列设计了一种液晶退偏器[61]，它展现出良好的宽带与偏振不敏感特性。图 11(d)是液晶退偏器的示意图，每个方格代表一个均匀取向的单元，不同的灰度表示不同的光轴指向(液晶指向矢方向)。它相当于一组光轴随机分布的半波片，偏振光经过该退偏器后，不同位置半波片对偏振改变不同的角度，出射光则成为偏振方向随二维空间随机变化的混合光场，从而达到降低偏振度(degree of polarization，DOP)的效果。该液晶退偏器对任意入射偏振的 1 550 nm 激光实现退偏，出射后的 DOP 小于 5%。此外，对 1 520 ～ 1 610 nm (C+L 波段)宽波段复色光源也展现出很好的退偏效果(图 11(e))。

4.1.3　液晶动态波导

片上集成光子芯片在光信息处理、光通讯与传感等领域占据重要的地位。传统的集成光子芯片的架构和功能都是固定的，一旦局部损坏，整个芯片功能即被破坏。我们设计了多种全液晶波导[62]，凭借其外场可调特性，有望为动态可编程光子芯片提供支持。我们通过预设图案化取向控制材料的折射率空间分布，制造了直波导、弯曲波导(图 11(f,g))以及环形谐振器(图 11(h))。我们还证实了这类液晶波导的热调谐特性与偏振依赖性。如图 11(i)所示，在 23 ℃时，波导呈现良好的导光特性，当温度升至 58 ℃，波导关闭。该波

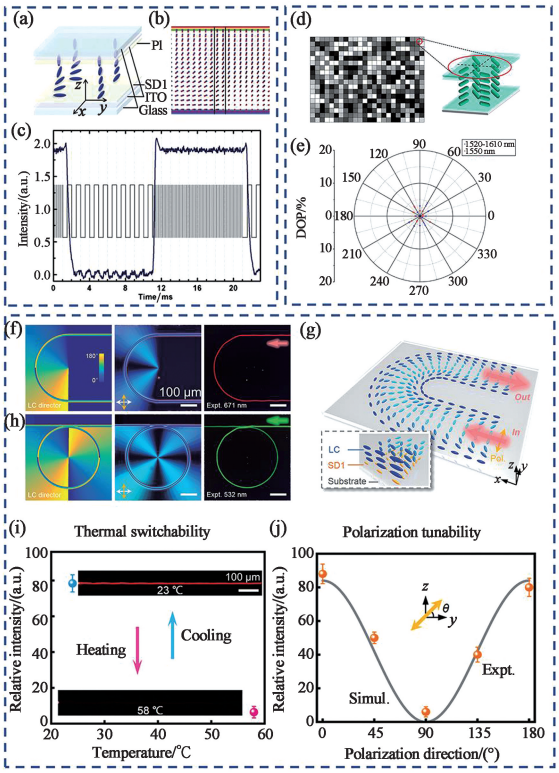


图 11　液晶光开关、退偏器及动态光波导。(a)正交 HAN 液晶盒示意图；(b) y-z 平面的液晶指向矢分布示意图；(c)信号频率变换引发的开关[37]；(d)液晶退偏器的示意图(灰度指示光轴方向)；(e)不同偏振入射液晶退偏器的偏振度结果[61]；(f)弯曲波导和(h)环形谐振器的液晶指向矢分布设计图、显微图和实验探测图；(g)弯曲波导液晶膜三维结构示意图；液晶直波导的(i)热调谐性与(j)偏振相关性[62]。

Fig.11　LC optical switch, depolarizer and dynamic waveguide. (a) Schematic of an orthogonal-HAN cell; (b) LC director distribution in y-z plane; (c) Switch performance with respect to the signal frequency[37]. (d) Schematic of an LC depolarizer (gray scales indicate the directions of optical axes); (e) DOP results at different incident polarization[61]; Designed LC director distributions, micrographs and experimental images of (f) a bending waveguide and (h) a ring resonator; (g) 3D schematic illustration of a bending waveguide; (i) Thermal switchability and (j) polarization dependency[62].

导展示出强烈的偏振依赖性，当入射 y 方向的线偏振，传输损耗最小；偏离此值，损耗增加；当入射偏振垂直于 y 轴时，波导完全关闭（图 11(j)）。该工作提出的液晶动态波导可将分立的功能元件进行动态连接，有望实现可编程的光子芯片。

4.1.4 OAM 产生与检测

除了光的相位、振幅、波长等参数，涡旋光携带的 OAM 赋予了光调控一种新的维度。然而，现有的涡旋光产生与检测技术都对波长敏感，限制了 OAM 模式复用技术与现行的波分复用技术的兼容性。我们将达曼涡旋光栅的设计引入胆甾相液晶制备了 OAM 模式处理器[63]，得益于胆甾相液晶布拉格反射带来的宽带等效率几何相位调制，验证了宽带涡旋光的产生与检测。图 12(a)展示了一个 2×5 的达曼涡旋光栅，它具有双重拓扑荷，$m_x=1$，$m_y=3$。该达曼涡旋光栅的等效率工作带宽达到 116 nm（图 12(b)），覆盖从绿光（525 nm）直至红光（641 nm）的可见波段。它的衍射图案是 2×5 的涡旋光阵列（图 12(c)），每一级次携带的拓扑荷 $m=n_x+3n_y$，这里 m 的范围为 −5～5。涡旋光的模式检测也是 OAM 模式处理的核心内容之一。当入射 $m=+1$ 的涡旋光时，与高斯光入射产生的衍射图案相比，所有衍射级次的 m 都增加了 1，而原本具有拓扑荷 $m=-1$ 的级次（+2，−1）恢复成了高斯光束（图 12(d)），从而实现了对入射涡旋光拓扑荷（$m=+1$）的检测。该方法同样适用于混合 OAM 模式的产生与并行无损检测（图 12(e,f)）。本方案宽带、高效，在元器件层面实现了模式复用技术与波分复用技术的兼容，在光通信领域具有巨大的应用前景。

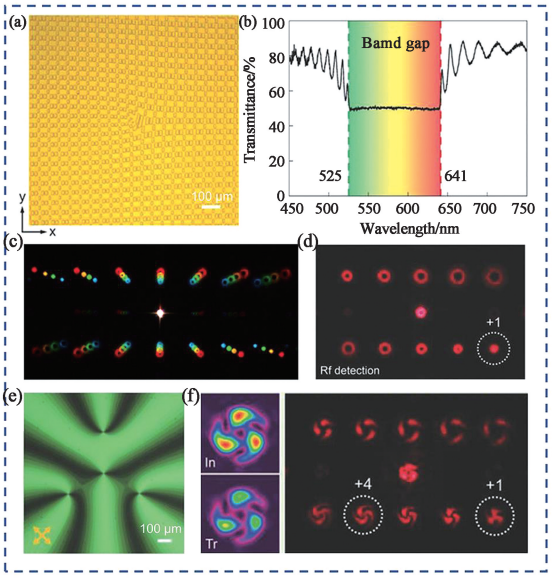


图 12 OAM 产生与检测。(a)胆甾相达曼涡旋光栅显微图片；(b)胆甾相材料的线偏光透射光谱；(c)对 4 种不同波长同时衍射的图案；(d) $m=+1$ 涡旋光的衍射图案（单拓扑荷检测）；(e)用于产生 $m=+1$ 和 $m=+4$ 混合态的 q 波片（$q=0.5+2$）的显微图及对应的(f)入射光、透射光和反射光强度分布（多拓扑荷并行探测）[63]。

Fig.12 Generation and detection of OAM. (a) Micrograph of a CLC DVG; (b) Transmission spectra of the CLCs for linearly polarized light; (c) Diffraction patterns at four different wavelengths; (d) Diffraction patterns of incident vortex beam with $m=+1$ (single m detection); (e) Image of a multi-q-plate with $q=0.5+2$ used to generate incident vortex beam with $m=+1$ and $m=+4$, and (f) corresponding intensity images of the incident, transmitted light and reflective demultiplexing patterns (multiplexed m detection)[63].

4.2 太赫兹元件

太赫兹波指的是频率在 0.1 ～ 10 THz（对应波长约为 3 ～ 0.03 mm）的电磁波，介于微波和红外之间。液晶可调太赫兹元件一直是人们追求的目标，但其面临两个难题：一是 ITO 等在可见和通讯波段常用的透明导电材料到了 THz 频段不再透明，缺乏替代材料；二是液晶双折射率到了 THz 频段显著降低，半波相位调制需要毫米级的液晶厚度，给配向带来难度。由于太赫兹具有光子能量低、脉冲宽度窄、时空相干性强、辐射带宽大等优点，在无损成像、等离子体探测与太赫兹通信等方面具有巨大潜力[64]。这对液晶元件也是前所未有的机遇。我们面对上述挑战，创新性地设计制备了一系列液晶太赫兹元件，包括波片、完美吸收器、滤波器、色散可调液晶超透镜及多种太赫兹平面光子元件，并展现出优良的稳定性与可靠性。

4.2.1 太赫兹波片

波片是由具有双折射特性的材料制备而成的光学元件，可以用来改变入射光的偏振状态。太赫兹波沿波片光轴和垂直于光轴方向的偏振分量分别感受 n_e 和 n_o，从而产生相位延迟，导致出射

偏振的改变。对于给定厚度的波片，其相位延迟量是固定的，出射偏振通过改变入射线偏振与波片光轴之间的夹角进行调谐。而用液晶制作的波片由于其电光性质，导致其相位延迟量可以通过外加电场调谐。我们采用亚波长金属线栅作为偏振选择的电极，选用太赫兹大双折射率液晶 NJU-LDn-4 作为波片介质材料，其取向方向与金属线栅呈 45°，盒厚 250 μm，多孔石墨烯作为另一面偏振无依赖的透明电极，由此制备了宽带调谐的液晶太赫兹波片（图 13(a)）[65]。对该波片施加电场，可以在 2.1 THz 以上实现半波片功能，在 1.1 THz 以上实现 1/4 波片功能（图 13(b)）。我们验证了其在 2.1 THz 处的电控偏振演化过程（图 13(c)），在 0 V 和 8.8 V 时分别对应 1/4 波片和半波片。此外，通过层叠液晶盒可以显著增加相位调制量、减小工作电压并拓宽调谐范围。

4.2.2　太赫兹可调完美吸收器

超材料完美吸收器在热发射、能量吸收、传感、空间光调控等方面具有广泛的应用。其结构一般由上下两层金属和中间一层介质组成，金属在电磁场激发下产生等离子体振荡从而引起谐振，它和中间介质层共同实现对能量的吸收。超材料的共振往往发生在极窄的频段，因此，改进吸收器设计实现宽带吸收、多带吸收及吸收带可调谐是器件发展的重要方向。我们依然选用 NJU-LDn-4 作为介质层，结合外加电场实现了快速调谐的太赫兹吸收器[66]。吸收器结构如图 13(d)所示，上层是金属背板，下层是金属圆片阵列，中间为均一取向的液晶层。外加电场改变液晶指向矢，从未加电时的均一面内取向（图 13(e)）转变为饱和电场时的垂直取向（图 13(f)），从而改变介质层的折射率，实现吸收频率的调制。模拟结果表明，该吸收器的吸收频率可以在 0.828 ～ 0.842 THz 之间通过电场连续调谐（图 13(g)），在实验中得到了进一步证明。

4.2.3　可调太赫兹滤波器

太赫兹滤波器可以选择性地让某些频率的太赫兹波透过，而阻隔其他频率。液晶可赋予该类器件波长调谐特性。除了电场导致的指向矢偏转和重排，液晶的温敏或光敏特性同样适用于器件功能的灵活操控。我们提出了一种类法布里帕罗（Fabry - Pérot，FP）滤波器，它工作在 0.1 ～ 0.5 THz 频段，基于折射率对温度的敏感性，实现了可调的太赫兹滤波器[67]。如图 13(h)所示，该器件由交替的液晶层和金属板结构组成，中间的液晶层预设垂直取向。当横磁波垂直入射到器件表面时，太赫兹在金属片上激发出表面等离激

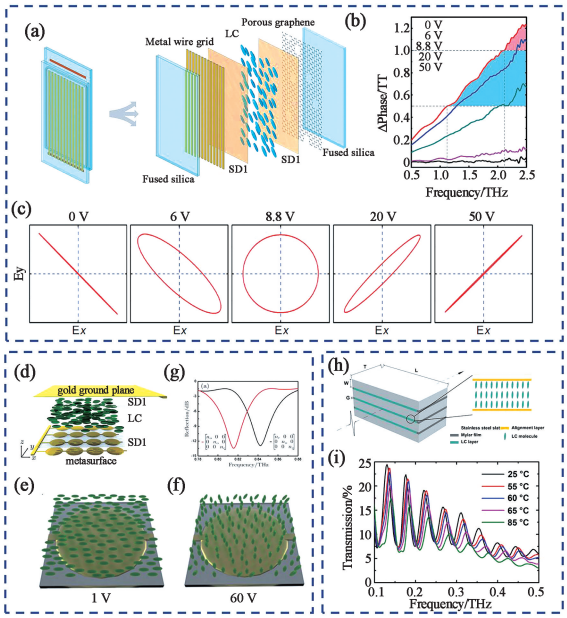


图 13　液晶可调太赫兹波片、完美吸收器与滤波器。(a)可调太赫兹波片的结构示意图；(b)不同加载电压下对应的相位延迟与频率的关系；(c)2.1 THz 处电压控制的偏振演化[65]；(d)可调太赫兹完美吸收器的结构示意图；施加(e)1 V 和(f)60 V 电压时的液晶指向矢分布示意图；(g)指向矢平行（黑）和垂直（红）于衬底时分别对应的反射光谱仿真结果[66]；(h)FP 太赫兹滤波器的结构示意图；(i)不同温度下滤波器透射率与频率的关系[67]。

Fig.13　Tunable LC THz waveplate, perfect absorber and filter. (a) Schematic of a tunable LC THz waveplate; (b) Frequency-dependent phase retardation for different operating voltages; (c) Polarization evolution at 2.1 THz controlled by different voltages[65]; (d) Schematic of a THz perfect absorber; LC director distribution under operating voltages of (e) 1 V and (f) 60 V; (g) Simulations of reflection spectra for LC director parallel (black) and perpendicular (red) to the substrate[66]; (h) Schematic of a FP THz filter; (i) Frequency-dependent transmission of the filter at different temperatures[67].

元。沿着两个相邻界面传播的电场在液晶层内部发生耦合，形成一个类 FP 腔的滤波器。我们对该滤波器的透射光谱进行了仿真，光谱呈现出一系列分立的尖锐的共振峰(图 13(i))。通过加热使液晶折射率降低，器件透射谱的共振峰向高频移动。本工作提供了一种新颖的可调谐太赫兹滤波器的设计方案，在太赫兹成像、传感、高速通信等方面具有应用潜力。

4.2.4 色散可调超透镜

伴随着光学元件向小型化与集成化方向发展，基于人工电磁微结构的超表面日益成为平面光子学研究的前沿领域。超构透镜是一类典型的超构器件，它具有较强的色差效应，可用于光谱分析与断层成像[68]。然而，色差效应也带来了局限性：成像分辨率的降低限制了其全色成像与高光谱成像的潜能，不利于高分辨成像与光谱分析功能的集成。我们将图案化取向液晶与介质超表面集成到一起，首次实现了色散可调的液晶超透镜[69]。如图 14(a)所示，元件上层是由硅柱阵列形成的介质超表面，下层是具有预设图案化取向的液晶层。我们对硅柱阵列的几何参数进行优化设计，然后进行特定空间排布获得透镜的相位分布。硅柱谐振单元产生线性共振相位色散，根据消色差透镜的一般相位分布进行理论计算后设定液晶指向矢面内取向获得与频率无关的几何相位调制，两种相位结合以实现消色差聚焦(图 14(a)左)。当施加饱和偏压时，液晶指向垂直于介质超表面，几何相位调制消失，只剩共振相位，超透镜重新回到色散聚焦状态(图 14(a)右)。实验进一步验证了这种液晶超透镜的宽带消色差聚焦(图 14(b))和大色散聚焦(图 14(c))的双功能电控调谐特性。

4.2.5 太赫兹平面光子元件

基于超表面的平面光子元件可以自由调控太赫兹波前，但设计制造复杂，这限制了其实际应用。我们基于光取向液晶聚合物(liquid crystal polymer，LCP)薄膜，设计并制备了一系列新颖的平面太赫兹光子元件[70]，其具有结构简单、损耗低和功能丰富等优点。通过合理预设 LCP 指向矢的面内分布，可以实现对太赫兹波前的任意几何相位调制，从而实现各种功能。根据 LCP 波片相位延迟量与频率、厚度的关系(图 14(d))，可以针对不同频率设计太赫兹波片，如 1/4 波片和半波片。随后，我们实验证实了 4 种不同厚度的液晶波片的偏振转换功能(图 14(e))，在 1.4 THz 处，厚度为 350 μm 和 700 μm 的液晶波片分别具

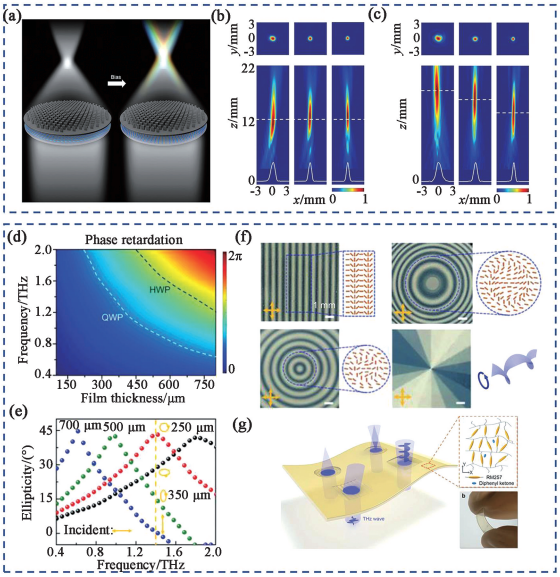


图 14 液晶太赫兹色散可调透镜、平面光子元件。(a)无偏压时的消色差聚焦态和加饱和电压时的色散聚焦态示意图；(b)无偏压和(c)加饱和偏压时 0.9、1.1，1.4 THz 处的太赫兹场[69]；(d)相位延迟对频率和盒厚的相关性；(e)不同盒厚时频率依赖的椭圆率及 1.4 THz 处偏振的演变(黄线标出)；(f)光束偏折器、透镜、贝塞尔光束和涡旋光束发生器显微图及相应的液晶指向矢分布或功能示意[70]；(g)太赫兹平面光子元件功能示意图。

Fig. 14 LC THz metalens with tunable chromatic aberration and THz planar photonics. (a) The broadband achromatic focusing state without bias and the dispersive focusing state with a saturated bias; Measured THz fields at 0.9, 1.1, 1.4 THz (b) without applied bias and (c) with a saturated bias[69]; (d) Theoretical dependency of phase retardation on frequency and film thickness; (e) Frequency-dependent ellipticity at different film thicknesses and the polarization evolution at 1.4 THz (depicted by yellow line); (f) Micrographs and corresponding LC director distribution or function illustration of THz deflectors, lens, Bessel beam and vortex beam generators; (g) Schematic of THz planar photonics[70].

有 1/4 波片和半波片的效果。通过预设 LCP 取向,我们分别实现了太赫兹偏折器、透镜、贝塞尔光束和涡旋光束发生器等功能(图 14(f,g))。我们验证了贝塞尔光束超过 10 mm 的无衍射聚焦特性。将贝塞尔光束与涡旋光束相结合,实现了携带 OAM 同时具有无衍射和自愈特性的太赫兹波束,有望为太赫兹通信提供全新的模式通道,扩大无线通信的容量与效率。

5　总结与展望

现代光子技术正朝着小型化、集成化、自适应和多功能等方向发展,液晶光子学正是顺应了这一趋势。液晶独特的分子结构和分子间特异相互作用赋予了其灵活的自组装行为,结合光取向,能够形成多种形式的液晶畴结构,展现出独特的光学性质。液晶像晶体一样呈现光学、介电等各向异性,通过外场调节液晶指向矢可使透过光的相位延迟量发生变化。液晶几何相位调控技术的发展,为平面光子元件的实现提供了新的实用途径。基于光取向技术实现液晶面内指向的精确控制,可以对波前进行相位、偏振的点对点精确控制。液晶的光学各向异性覆盖了从紫外到微波的广阔波段,为液晶光通信与太赫兹元件的实现提供了有力的支持。利用光取向液晶微结构实现软物质光子学的潜力巨大,但仍需揭示液晶光学材料背后的一系列核心问题。目前关于液晶有序微结构的自组装动力学、与光相互作用的新效应、对多元外场的响应特性,以及主动调控的智能光子元件等方面,尚有不明晰或研究空白。需要广大同行专家聚焦上述领域进行深入研究,以期促进相关液晶光子科学与技术的创新,在新材料、新结构、新机理、新设计方面做好充足储备,最终带动液晶产业向广大非显示领域加速拓展。

参　考　文　献:

[1] 邹永超,司磊,陶汝茂,等.基于液晶材料的光束偏转技术研究进展[J].激光技术,2011,35(3):293-298,304.
ZOU Y C, SI L, TAO R M, *et al*. Research progress of liquid crystal based light beam steering technique [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 293-298, 304. (in Chinese)

[2] 胡婕,杜升平,郭弘扬.基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J].激光与光电子学进展,2019,56(11):110002.
HU J, DU S P, GUO H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002. (in Chinese)

[3] 邹朋飞,魏冰妍,杨淑蕾,等.光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J].液晶与显示,2017,32(6):411-423.
ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al*. Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal non-display field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)

[4] 王萌,孙健,李克轩,等.宽波反射胆甾相液晶材料研究进展[J].中国材料进展,2018,37(8):605-612.
WANG M, SUN J, LI K X, *et al*. Research progress of cholesteric liquid crystals with broad reflection band [J]. *Materials China*, 2018, 37(8): 605-612. (in Chinese)

[5] WANG L, GUTIERREZ-CUEVAS K G, BISOYI H K, *et al*. NIR light-directing self-organized 3D photonic superstructures loaded with anisotropic plasmonic hybrid nanorods [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(81): 15039-15042.

[6] MA L L, HU W, ZHENG Z G, *et al*. Light-activated liquid crystalline hierarchical architecture toward photonics [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(16): 1900393.

[7] 张万隆,ABHISHEK S,ANDREY R,等.半导体量子棒的光控取向技术进展[J].液晶与显示,2020,35(5):409-421.
ZHANG W L, ABHISHEK S, ANDREY R, *et al*. Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(5): 409-421. (in Chinese)

[8] WU H, HU W, HU H C, *et al*. Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.

[9] KIM Y H, YOON D K, JEONG H S, *et al*. Smectic liquid crystal defects for self-assembling of building blocks and their lithographic applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(4): 610-627.

[10] 郭清仪,吴赛博,钱妍,等.液晶自组装多层级结构及其应用[J].高分子学报,2020,51(5):484-500.

GUO Q Y, WU S B, QIAN Y, *et al*. Hierarchical structures of self-assembled liquid crystals and their applications [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2020, 51(5): 484-500. (in Chinese)

[11] OK J M, KIM Y H, LEE T Y, *et al*. Controlling smectic liquid crystal defect patterns by physical stamping-assisted domain separation and their use as templates for quantum dot cluster arrays [J]. *Langmuir*, 2016, 32(50): 13418-13426.

[12] ROŽIČ B, FRESNAIS J, MOLINARO C, *et al*. Oriented gold nanorods and gold nanorod chains within smectic liquid crystal topological defects [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 6728-6738.

[13] SERRA F, GHARBI M A, LUO Y M, *et al*. Curvature-driven, one-step assembly of reconfigurable smectic liquid crystal "compound eye" lenses [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1287-1292.

[14] KIM D S, CHA Y J, KIM H, *et al*. Creation of a superhydrophobic surface from a sublimed smectic liquid crystal [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(51): 26946-26950.

[15] MEYER C, JONCKHEERE B, PENAUD C. The construction of the dupin cyclides in a smectic a polygonal texture [J]. *Journal of Materials*, 2014, 2014: 145375.

[16] KLEMAN M, LAVRENTOVICH O D. Curvature energy of a focal conic domain with arbitrary eccentricity [J]. *Physical Review* E, 2000, 61(2): 1574-1578.

[17] RYU S H, GIM M J, CHA Y J, *et al*. Creation of liquid-crystal periodic zigzags by surface treatment and thermal annealing [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(44): 8584-8589.

[18] SHIN M J, GIM M J, YOON D K, *et al*. Directed self-assembly of topological defects of liquid crystals [J]. *Langmuir*, 2018, 34(7): 2551-2556.

[19] KIM D S, CHA Y J, KIM M H, *et al*. Controlling Gaussian and mean curvatures at microscale by sublimation and condensation of smectic liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10236.

[20] MA L L, TANG M J, HU W, *et al*. Smectic layer origami *via* preprogrammed photoalignment [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(15): 1606671.

[21] KIM Y H, LEE J O, JEONG H S, *et al*. Optically selective microlens photomasks using self-assembled smectic liquid crystal defect arrays [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(22): 2416-2420.

[22] MA L L, WU S B, HU W, *et al*. Self-assembled asymmetric microlenses for four-dimensional visual imaging [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(12): 13709-13715.

[23] WU S B, MA L L, CHEN P, *et al*. Smectic defect engineering enabled by programmable photoalignment [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17): 2000593.

[24] MA L L, LI S S, LI W S, *et al*. Rationally designed dynamic superstructures enabled by photoaligning cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1691-1696.

[25] MA L L, DUAN W, TANG M J, *et al*. Light-driven rotation and pitch tuning of self-organized cholesteric gratings formed in a semi-free film [J]. *Polymers*, 2017, 9(7): 295.

[26] 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.

[27] 余丽红,刘炳辉,沈冬,等.特殊液晶光学材料——扭曲-弯曲向列相液晶及应用[J].液晶与显示,2020,35(7):645-661.
YU L H, LIU B H, SHEN D, *et al*. Special liquid crystal optical materials-twist-bend nematic phase liquid crystals and the applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 645-661. (in Chinese)

[28] 续晓婉,刘言军,罗丹.蓝相液晶晶体结构与结构色[J].液晶与显示,2020,35(7):685-696.
XU X W, LIU Y J, LUO D. Crystal structures and structural colors of blue phase liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 685-696. (in Chinese)

[29] 刘桢,沈冬,王骁乾,等.蓝相液晶材料与光子学器件研究进展[J].液晶与显示,2017,32(5):325-338.
LIU Z, SHEN D, WANG X Q, *et al*. Progresses on the researches of blue phase liquid crystal materials and photonic devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(5): 325-338. (in Chinese)

[30] 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.

[31] ZHANG H R, MA L L, ZHANG Q, *et al*. Azobenzene sulphonic dye photoalignment as a means to fabricate liquid crystalline conjugated polymer chain-orientation-based optical structures [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(8): 1901958.

[32] 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.

[33] HU W, KUMAR SRIVASTAVA A, LIN X W, *et al*. Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.

[34] HU W, SRIVASTAVA A, XU F, *et al*. Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.

[35] LI J N, HU X K, WEI B Y, *et al*. Simulation and optimization of liquid crystal gratings with alternate twisted nematic and planar aligned regions [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): E14-E18.

[36] 郭琦,杜芸梦,赵慧洁,等.铁电液晶光电模式及其应用[J].液晶与显示,2020,35(7):675-684.
GUO Q, DU Y M, ZHAO H J, *et al*. Electro-optic modes of ferroelectric liquid crystals and their applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 675-684. (in Chinese)

[37] LIN X W, HU W, HU X K, *et al*. Fast response dual-frequency liquid crystal switch with photo-patterned alignments [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3627-3629.

[38] SRIVASTAVA A K, HU W, CHIGRINOV V G, *et al*. Fast switchable grating based on orthogonal photo alignments of ferroelectric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031112.

[39] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al*. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.

[40] FRANKE-ARNOLD S, ALLEN L, PADGETT M. Advances in optical angular momentum [J]. *Laser & Photonics Review*, 2008, 2(4): 299-313.

[41] WEI B Y, HU W, MING Y, *et al*. Generating switchable and reconfigurable optical vortices *via* photopatterning of liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1590-1595.

[42] MA Y, WEI B Y, SHI L Y, *et al*. Fork gratings based on ferroelectric liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5822-5828.

[43] ZHOU C H, LIU L R. Numerical study of Dammann array illuminators [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5961-5969.

[44] WANG X Q, SRIVASTAVA A K, FAN F, *et al*. Electrically/optically tunable photo-aligned hybrid nematic liquid crystal Dammann grating [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5668-5671.

[45] FAN F, YAO L S, WANG X Q, *et al*. Ferroelectric liquid crystal dammann grating by patterned photoalignment [J]. *Crystals*, 2017, 7(3): 79.

[46] LUO D, SUN X W, DAI H T, *et al*. Polarization-dependent circular Dammann grating made of azo-dye-doped liquid crystals [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(15): 2316-2321.

[47] LEI T, ZHANG M, LI Y R, *et al*. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.

[48] CHEN P, GE S J, MA L L, *et al*. Generation of equal-energy orbital angular momentum beams *via* photopatterned liquid crystals [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(4): 044009.

[49] DUAN W, CHEN P, WEI B Y, *et al*. Fast-response and high-efficiency optical switch based on dual-frequency liquid crystal polarization grating [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 597-602.

[50] DU T, FAN F, TAM A M W, *et al*. Complex nanoscale-ordered liquid crystal polymer film for high transmittance holographic polarizer [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7191-7195.

[51] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al*. Meta-*q*-plate for complex beam shaping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25528.

[52] CHEN P, WEI B Y, JI W, *et al*. Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 133-139.

[53] CHEN P, GE S J, DUAN W, *et al*. Digitalized geometric phases for parallel optical spin and orbital angular momentum encoding [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1333-1338.

[54] XU R, CHEN P, TANG J, *et al*. Perfect higher-order poincaré sphere beams from digitalized geometric phases [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034061.

[55] ZHANG Y H, CHEN P, GE S J, *et al*. Spin-controlled massive channels of hybrid-order Poincaré sphere beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(8): 081101.

[56] KOBASHI J, YOSHIDA H, OZAKI M. Planar optics with patterned chiral liquid crystals [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 389-392.

[57] 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.

[58] KOBASHI J, YOSHIDA H, OZAKI M. Polychromatic optical vortex generation from patterned cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 253903.

[59] RAFAYELYAN M, TKACHENKO G, BRASSELET E. Reflective spin-orbit geometric phase from chiral anisotropic optical media [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 253902.

[60] CHEN P, MA L L, HU W, *et al*. Chirality invertible superstructure mediated active planar optics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2518.

[61] WEI B Y, CHEN P, GE S J, *et al*. Liquid crystal depolarizer based on photoalignment technology [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(2): 70-73.

[62] WEI T, CHEN P, TANG M J, *et al*. Liquid-crystal-mediated active waveguides toward programmable integrated optics [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(10): 1902033.

[63] 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.

[64] 王磊,肖芮文,葛士军,等.太赫兹液晶材料与器件研究进展[J].物理学报,2019,68(8):084205.
WANG L, XIAO R W, GE S J, *et al*. Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(8): 084205. (in Chinese)

[65] WANG L, LIN X W, HU W, *et al*. Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(2): e253.

[66] WANG L, GE S J, CHEN Z X, *et al*. Bridging the terahertz near-field and far-field observations of liquid crystal based metamaterial absorbers [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(9): 094222.

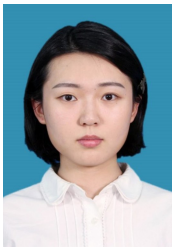
[67] GE S J, LIU J C, CHEN P, *et al*. Tunable terahertz filter based on alternative liquid crystal layers and metallic slats [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 120401.

[68] 傅晓建,石磊,崔铁军.太赫兹超材料及其成像应用研究进展[J].材料工程,2020,48(6):12-22.
FU X J, SHI L, CUI T J. Research progress in terahertz metamaterials and their applications in imaging [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(6): 12-22. (in Chinese)

[69] SHEN Z X, ZHOU S H, LI X A, *et al*. Liquid crystal integrated metalens with tunable chromatic aberration [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036002.

[70] SHEN Z X, TANG M J, CHEN P, *et al*. Planar terahertz photonics mediated by liquid crystal polymers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1902124.

作者简介:



曹慧敏(1996—),女,江苏泰州人,硕士研究生,2019 年于南京大学获得学士学位,主要从事液晶微结构操控方面的研究。E-mail: ccaohuimin@163.com



胡　伟(1981—),男,山东日照人,博士,教授,2009 年于吉林大学获得博士学位,主要从事液晶软光子学研究。E-mail: huwei@nju.edu.cn