

文章编号:1007-2780(2017)06-0411-13

光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展

邹朋飞¹, 魏冰妍¹, 杨淑蕾², 梁 晓³, 陈国飞⁴, 陈 宽⁴, 陆延青¹, 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. 73667 部队, 江苏 南京 210038;

3. 清华大学 化学系, 北京 100084; 4. 南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038)

摘要:近年来,光取向已成为主流的液晶取向技术。除了在平板显示领域的广泛应用之外,光取向技术在液晶非显示领域也得到了广泛的应用。本文简要综述了南京大学液晶与微纳光学研究组利用一种偶氮苯类光取向剂进行图形化取向,进而实现了液晶光开关、特殊光场产生与调控、退偏器、太赫兹波片等元器件的制备、胆甾相液晶螺旋轴空间排列的控制等非显示应用。

关 键 词:液晶;光取向技术;非显示

中图分类号:O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173206.0411

Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field

ZOU Peng-fei¹, WEI Bing-yan¹, YANG Shu-lei², LIANG Xiao³, CHEN Guo-fei⁴,
CHEN Kuan⁴, LU Yan-qing¹, HU Wei^{1*}

(1. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China; 2. Army 73667, Nanjing 210038, China;

3. Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 100084, China)

Abstract: In recent years, photoalignment technology has become a dominant alignment technique in liquid crystal fields. In addition to the flat panel displays, photoalignment has also been widely used in nondisplay fields. The review briefly introduces a photoalignment patterning technique based on a polarization-sensitive azo-dye agent and presents its application progresses in nondisplay fields including liquid crystal optical switches, special optical field modulation, depolarizer, terahertz waveplates, the manipulation of the cholesteric liquid crystal helical axes and so on.

Key words: liquid crystals; photoalignment technology; nondisplay

收稿日期:2017-01-16;修订日期:2017-02-21.

基金项目:国家自然科学基金(No.61490714, No.61435008, No.61575093, No.61535007);江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目(No.KYLX16_0047)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61490714, No.61435008, No.61575093, No.61535007); Research and Innovation Program of Academic Degree Postgraduates in Jiangsu(No.KY-LX16_0047)

* 通信联系人, E-mail: huwei@nju.edu.cn

1 引言

液晶是兼有液体和晶体两方面性质的独特的功能材料,广泛用于各类液晶显示器。液晶分子在电场作用下,会从初始排列结构转变到其它排列方式,伴随而来的是其光学特性的变化,这也是液晶显示的基础^[1-2]。液晶在显示屏里的有序排列,是通过液晶与基板界面上的预取向来实现的,液晶取向就是为了达到这一目的而发展起来的技术。

传统的摩擦取向技术是 1911 年由莫根(Maugin)发明的^[3]。这种方法非常简单、方便且经济有效,所以产业界接受度很高^[4]。但是它也存在一些问题,例如这种接触式的方法摩擦之后会产生静电,造成薄膜晶体管的击穿;摩擦过程中还会有少数绒毛残留,影响液晶的取向效果,进而影响显示;只对平坦表面适用,对于形状不规则的或有结构的基板,利用摩擦方式进行配向则很困难;另外,随着加工基板尺寸增大,像素单元越来越小,在整个基板内获得完全均一取向的难度也越来越大。为了解决上述问题,近年来已有不少非接触式的取向方式被提出。其中,光取向技术因其独特的优势引起了广泛的关注^[5]。

本文将综述一种基于偶氮材料 SD1 和动态缩微曝光系统的液晶光控取向技术,成功实现了液晶开关、退偏器、太赫兹波片等器件的制备、特殊光场的产生与调控、胆甾相液晶螺旋超结构的排列控制等,该系列研究大大拓宽了液晶在非显示领域的应用。

2 液晶光控取向技术简介

相对于传统的摩擦取向技术,如图 1(a)所示,光控取向技术是近些年发展起来的一种非接触式的液晶取向方法,并逐步应用于工业生产之中,如 iPhone 6 便是利用光控取向技术制备的液晶显示屏。所谓光控取向技术,其基本原理是利用光敏材料在紫外线偏光照射下发生定向光交联、异构化或光裂解反应进而诱导液晶分子定向排列^[5-10]。这种光取向方法如图 1(b)所示,首先在衬底上涂敷光敏分子材料,然后用紫外偏振光照射,取向膜上产生各向异性,进而通过分子间相

互作用诱导液晶分子取向。本研究组使用的光控取向材料为一种磺酸盐类的偶氮染料 SD1,其分子结构式如图 2 所示^[8, 11]。在吸收线偏振紫外光后发生光致异构化反应,由反式构象转变为顺式构象,顺式构象不稳定,会重新回到反式构象并伴随分子的转动;由于材料吸收的二向色性,SD1 分子的长轴最终会倾向于与入射光的偏振方向垂直排列。这种有序性能够通过分子间相互作用传递给液晶分子,进而发挥取向作用。

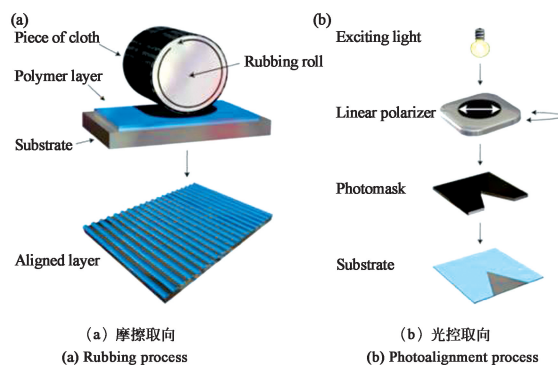


图 1 两种取向方法示意图

Fig.1 Diagrams of two alignment methods

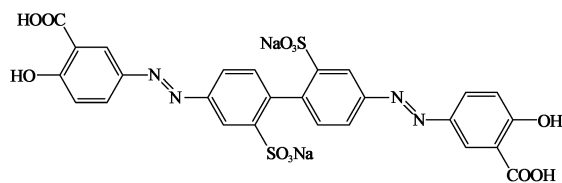


图 2 SD1 分子结构式

Fig.2 Molecular structure of SD1

对于均一取向,可以直接用均匀的线偏振紫外光对取向膜进行取向曝光。由于该取向剂具有光学可擦写性,所以同样适用于实现对液晶的图案化光取向。对于简单的二元取向情况,可采用掩模板进行二次取向曝光,但光刻掩模图样固定且制造成本也比较高。为了实现动态曝光取向,我们开发了一套基于数控微镜阵芯片(Digital micro-mirror device, DMD)的微缩投影式曝光系统^[12-13],如图 3 所示。经过滤波在 320~500 nm 的准直光束光经过反射后照在 DMD 表面。计算机输出图形通过 MEMS 控制 DMD 各像素(单个微镜)呈现不同反转状态实现动态掩模。反射到光路里的携带有图形信息的光束经过电控偏振片被赋予特定的偏振态,再通过一个平场复消

色差的缩微物镜($10\times$, $NA=0.3$, $WD=34\text{ mm}$) 缩束后,投射至基板或者空液晶盒内侧表面的SD1涂层(预先赋予均匀配向或TN配向),对曝光区域进行图形化配向改写。图中CCD用于接收基板反射的图案,用来实时监控确定曝光平面。最后,对双基片组成的液晶盒灌入液晶,实现对液晶的选区取向。

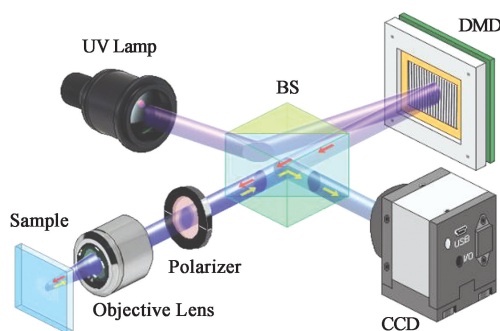


图3 DMD曝光系统示意图^[13]

Fig.3 Schematic of DMD lithography system^[13]

3 液晶光取向的非显示应用

光控取向技术不仅可以避免摩擦取向带来的机械损伤、静电、杂质缺陷,还可以可实现微区多畴取向^[7],并可用于对曲面或柔性基底的取向。这些使得光控取向技术在新兴的显示技术中获得青睐,同时非显示领域也备受关注。下面就本研究组近期基于SD1光控取向技术以及DMD动态掩模曝光系统在液晶非显示领域的研究进展做一个简要汇报。

3.1 液晶光开关

光开关是光网络中用以对光信号实现动态控制的关键元件。随着光交换和光互连技术的发展,光开关的应用领域越来越广,发挥的作用也越来越大^[14-17]。其中,液晶因其外场调制特性可以方便地对光进行开关。

我们基于DMD曝光系统进行光取向制备出二元向列相液晶光栅,其衍射级可以通过加电调控实现开关^[18-19]。为了提高开关的响应速度,我们引入双频液晶制备了一种快速响应的液晶光开关^[20]。双频液晶具有在外加低频电场时材料的介电各向异性为正,高频电场时介电各向异性为负的特性。这样,在施加足够强度的电场下,通过

改变电场频率,即可实现液晶分子指向矢排列的改变。通过施加 25 V_{rms} 电压并在 1 kHz 和 65 kHz 之间切换频率,可实现亚毫秒量级的开关响应。为了提高开关效率(衍射效率),我们利用多步重叠曝光制备了偏振光栅^[21]。其结构特征是, x - y 平面内在一个周期范围内液晶指向矢方向从 0° 到 180° 连续渐变。如图4(a)所示为液晶偏振光栅的显微图。对于线偏振光入射光,理论上可实现全部能量转换至一级衍射光斑,如图4(b)所示;改变入射光至圆偏振态,可实现只有其中一级衍射光斑的输出,其衍射效率可以达到95%以上,如图4(c)和(d)所示。由于采用双频液晶,我们实现了一种制备简单、功耗低、高光能转换效率且快速响应的光开关。

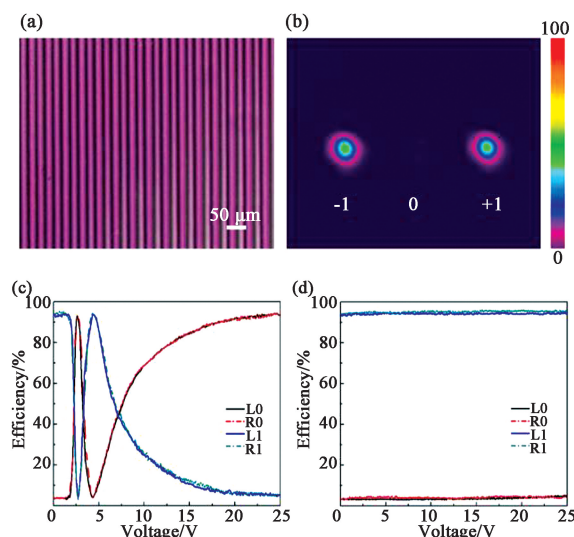


图4 双频液晶偏振光栅。(a)显微图,(b)线偏光在没有外加场下的衍射图;圆偏振入射光在(c)1 kHz和(d)65 kHz下的电压效率曲线。

Fig.4 DFLC polarization grating. (a) Micrograph, (b) Diffraction pattern without applied field for linearly polarized incident light. Voltage dependent efficiency curves of circularly polarized incident light at frequencies of (c) 1 kHz and (d) 65 kHz, respectively.

3.2 涡旋光束产生器

涡旋光束有着螺旋形的等相位面,每个光子携带 $m\hbar$ 的轨道角动量(OAM)。由于光束中心的位相奇点的情况只有在振幅为零时才能满足,故其呈现中心为暗场的环形光斑^[22]。由于其特有的螺旋型相位分布带来的轨道角动量和环形光

场分布等特性,使得涡旋光在诸如光镊、光子计算、微纳操控、天文观测、信息科学等领域具有十分重要的应用^[23-26]。

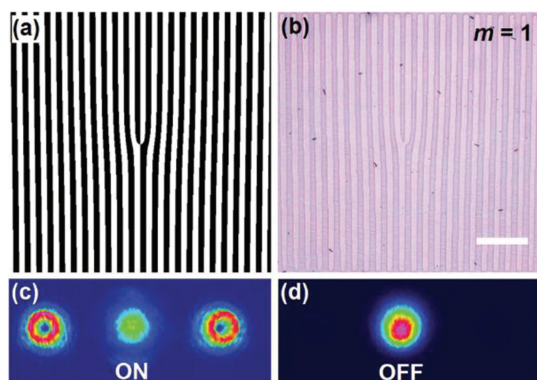


图 5 (a)电脑产生的 $m=1$ 叉形光栅全息图,(b)正交 HAN 型的液晶叉形光栅显微图,标尺为 $100\ \mu\text{m}$,对应的在(c)开态和(d)关态的衍射光斑。

Fig.5 (a) Computer-generated hologram of a fork grating with $m=1$. (b) Micrograph of an orthogonal HAN LC fork grating. The cell is infiltrated with LC E7 and the scale bar is 100. Corresponding diffraction patterns at (c) ON and (d) OFF state.

迄今为止,科研人员已经开发出模式转换^[27]、螺旋位相板^[28]、Q-plate^[29-30]、叉形光栅^[31]及特种集成器件^[32-34]等一系列技术以产生涡旋光。上述方法中叉形光栅技术因其简便易行成为一种最常用的产生方法。所谓叉型光栅,实际上就是涡旋光和高斯光干涉的全息图,因此可通过高斯光照射叉形光栅来产生目标涡旋光束的衍射斑^[31]。我们利用自主开发的 DMD 光控取向系统,采用两步曝光法将计算出的叉形光栅图案曝光到旋涂有 SD1 的液晶盒上,并灌入向列相液晶 E7^[13]。图 5 (a)和(b)分别是 $m=1$ 的叉形光栅的计算全息图和制备得到的液晶叉形光栅,(c)为用 $671\ \text{nm}$ 激光器照射,液晶叉形光栅经加电调节后衍射效率达最大(37%)开态时的衍射光斑,(d)为电压加到 $10\ \text{V}$ 以上后的衍射光,此时涡旋光束为关态。通过加电调节,此液晶叉形光栅不仅可以实现涡旋光束的开关态,亦可以对不同波长的入射光满足最佳衍射效率。此外,它还具有偏振无依赖和可重构等优势。该工作为制备低电压、低功耗、高效率、可电调、可光重构、偏振和波

长不敏感的涡旋光束产生器提供了一种全新的途径。

我们还通过类似制备方法,实现了达曼叉形光栅的制备,产生了等光强的涡旋光束阵列^[35]。如图 6 所示,(a)和(b)分别为 $m=1$ & 1 液晶达曼叉形光栅在偏振片为互相垂直和平行状态下的显微图,(c)和(d)为入射不同波长下的涡旋阵列光斑图。此种涡旋阵列有着近乎等能量的光强分布,可作为基于 OAM 复用的光通信技术中 OAM 的并行处理和探测^[36-37]。这类液晶达曼叉形光栅在 OAM 的产生、操控和检测等方面,都有着广阔的应用前景。

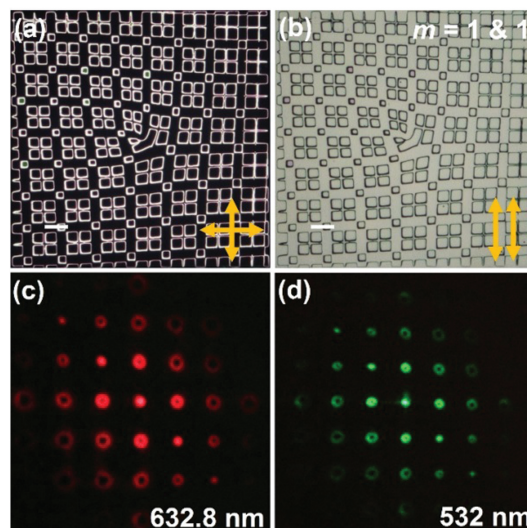


图 6 液晶达曼叉形光栅产生涡旋光束阵列。(a)(b)显微图;不同入射波长下的衍射光斑(c) $632.8\ \text{nm}$ 和(d) $532\ \text{nm}$;标尺长度代表 $100\ \mu\text{m}$;黄色箭头表示显微镜偏振态。

Fig. 6 Micrographs of the LC Damann vortex grating with (a), (b) $m=1$ & 1 . The relative directions of the polarizer and analyzer are labelled in yellow arrows. All scale bars are $100\ \mu\text{m}$. Corresponding diffraction patterns at (c) $632.8\ \text{nm}$ and (d) $532\ \text{nm}$.

为进一步提高光能利用率,我们利用多步重叠曝光技术,实现了一级衍射效率接近 100% 的偏振叉形光栅的制备^[38]。图 7(a)和(b)所示的分别是理论计算和实验测得的液晶指向矢分布。图 7(c)和(d)分别是制备的 $m=2$ 和 $m=10$ 的偏振液晶叉形光栅的显微图。如图 7(e)所示,当线偏振光入射满足半波条件的液晶偏振叉形光栅时,

只有正负一级涡旋光;入射圆偏振时,只存在正或负(取决于入射光圆偏振态的旋性)一级涡旋光,此时实验测得的衍射效率高达 98.5%。

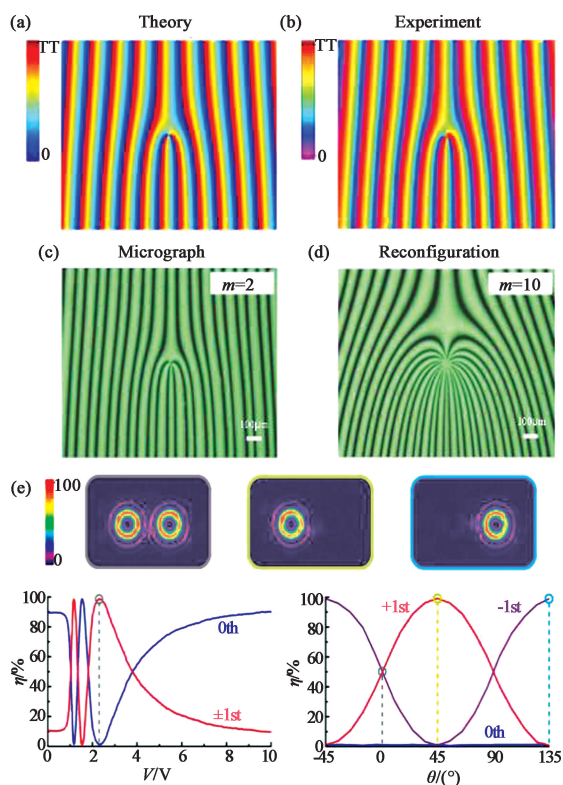


图 7 $m=2$ 液晶偏振叉形光栅样品。(a)理论,(b)实验液晶指向矢分布,(c)显微图,(d)重构的 $m=10$ 偏振叉形光栅显微图,(e)在半波条件下电压(左)和入射偏振角度(右)相关的衍射效率曲线^[38]。

Fig.7 $m=2$ LC polarization fork grating sample. (a) Theoretical, (b) measured LC director distribution, (c) micrograph, (d) Micrograph of a reconfigured FPG with $m=10$, (e) Dependencies of diffraction efficiency on (left) applied voltage and (right) incident polarization at half-wave condition^[38].

本研究组还利用多步重叠曝光技术制备了可将高斯光 100% 转化为涡旋光的液晶 q 波片^[39]。 q 波片可以将入射的圆偏振高斯光转变成相反旋性圆偏振且拓扑荷为 $m=2q$ 的涡旋光束,其传播方向保持不变。如图 8 所示,(a)为制备的 q 值分别为 0.5,1,1.5,2 的液晶波片显微图,对应(b)中产生拓扑荷 m 分别为 1,2,3,4 的涡旋光。因为光取向曝光系统的灵活性,我们可以根据需求,设计几乎任意液晶指向矢分布^[39],进而对光束波

前进行点对点的操控,产生任意模式的涡旋光束。这在复杂的光力操控、光通讯模式复用等领域存在着独特的应用。

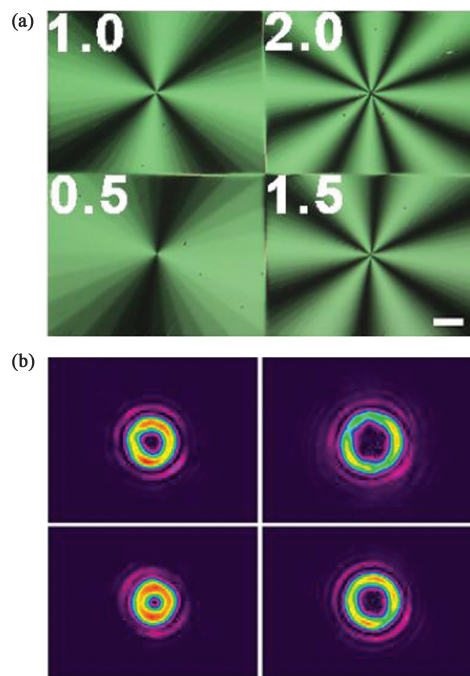


图 8 (a)不同液晶 q 波片的显微图.(b)对应产生的涡旋光光斑图。

Fig.8 (a) Micrographs of different LC q -plate. (b) Corresponding generated optical vortices.

3.3 矢量光束产生器

矢量光束是一种具有偏振奇点的光束,它具有空间变化的偏振态分布,可用于高分辨成像和光操控等领域^[40-43]。我们基于多步重叠曝光制备出一系列液晶偏振转换器,用于实现任意矢量光束的产生^[44]。这种偏振转换器可看作一种特殊的扭曲向列项液晶盒,其一面液晶指向矢均一分布,而另一面具有空间变化的取向,其中空间变化取向基于多步重叠曝光实现。如图 9 所示,入射光的偏振态平行于前基板的 LC 取向,在这种情况下出射光的偏振态取决于后基板的局域 LC 的取向,因此可以生成图示的矢量光束,它们分别具有径向、螺旋和角向偏振分布。该技术也可以实现更复杂的矢量光束的生成。

此外,这些液晶偏振转换器可以被用作进行矢量光取向曝光的偏振模板,一步曝光即可实现元件的复制。该技术不仅可以很便利地实现偏振转换器的批量生产,还可制备前述系列液晶光学

元件,使得低成本、高效率、大批量的制备成为可能^[44]。

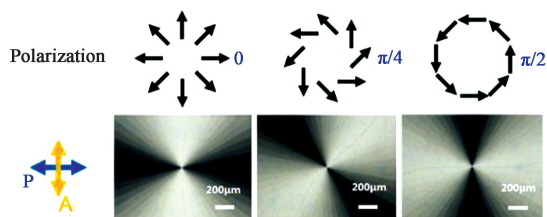


图9 偏振分布示意图(上)以及相应的矢量光束的强度分布(下)

Fig.9 Schematic polarization distributions (top) and the corresponding experimental (bottom) intensity distributions

3.4 艾里光束产生器

艾里光束是另外一类引起关注的特殊光场,其无衍射、自加速和自愈的特性使其可用于空间高能武器、光学微操纵、微加工、生物观测等领域^[45]。

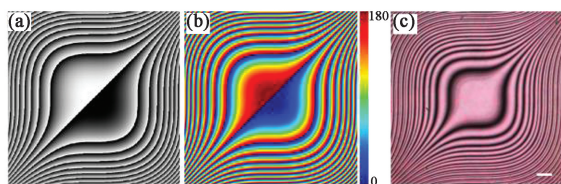


图10 (a)立方位相模板,(b)偏振艾里模板光轴分布示意图,(c)液晶偏振艾里模板显微图

Fig.10 (a) Cubic phase pattern, (b) Optical axes orientation of a polarization Airy mask, (c) Micrograph of the LC polarization Airy mask.

图10(a)为产生二维艾里光所需的立方位相模板,其相位范围为 -15π 到 $+15\pi$,并被折合至 $0\sim 2\pi$:黑色对应为0,白色对应为 2π 。本研究组据此设计出偏振艾里模板,如图10(b)所示,在一个 $0\sim 2\pi$ 周期内光轴由 $0\sim 180^\circ$ 渐变,(c)图为通过多步重叠曝光取向制备的LC偏振艾里模板的显微图,其标尺为 $100\ \mu\text{m}$ ^[46]。用 $671\ \text{nm}$ 激光依次经过偏振片、四分之一波片、LC偏振艾里模板和透镜来实验观察艾里光的产生。图11(a)~(d)为CCD探测到的艾里光斑示意图,图中光斑下方的角度标示偏振片和四分之一波片快轴之间的夹角。如图11(e)所示,通过改变角度,即改变入射光的偏振态,可实现能量在单双支艾里光间

相互转换。如,当入射光为左旋或右旋圆偏振态时,只有单支的艾里光输出,对应的艾里光圆偏振态为右旋或左旋;当入射光为线偏振态时,可产生双支等能量的艾里光;当入射光为椭圆偏振态时,产生能量不同的双支艾里光。故可根据所需,调节入射光的偏振态,来获取不同能量分布的单双支艾里光。此外,此液晶偏振艾里模板的盒厚为 $4.5\ \mu\text{m}$,结合向列相液晶的参数,很好地满足了半波条件,这样避免了吸收性电极的使用,从而使样品的光学损伤阈值大幅增加。在我们的测试中,长时间用 $10\ \text{J}/\text{cm}^2$ 级的脉冲激光照射后,($1064\ \text{nm}$, $10\ \text{ns}$, $1\ \text{Hz}$)器件未观测到损伤。这就意味着我们所制备的液晶偏振艾里模板在光子弹和工业激光加工等强光应用方面有很好的前景。

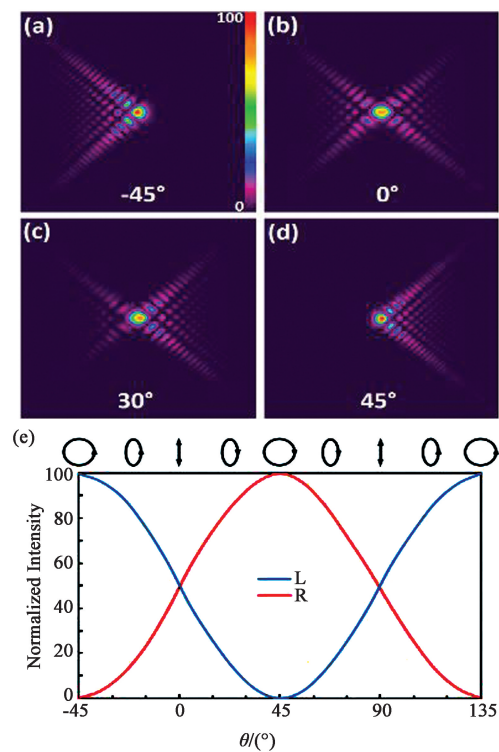


图11 艾里光分布随入射光偏振态的变化.(a)右旋圆,(b)线,(c)椭圆,(d)左旋圆偏光照射下的光强分布,(e)艾里光的归一化强度随入射偏振态的变化曲线^[46]。

Fig.11 Dependency of distribution of Airy beams on incident polarization. Intensity distributions of Airy beams illuminated by (a) right circularly, (b) linearly, (c) elliptically, (d) left circularly polarized light, respectively. (e) The dependency of normalized intensity on incident polarization^[46].

3.5 复合光场产生器

将涡旋光和艾里光或矢量光相结合,即涡旋艾里光或涡旋矢量光^[47-48]。它们可带来多维度的应用,如多方位的微粒操控、更精确的生物显微观测、量子通讯的无损传输等等。目前国内外研究组大多通过空间光调制器(SLM)的引入来实现复合光场的产生,但受 SLM 限制的影响,需额外增加光学元件来匹配光源光斑尺寸,且产生的光斑质量较差,影响光斑传播行为的测量。本研究组利用已有的工作基础,很好地克服了上述缺点。如图 12 所示,让 671 nm 激光经过偏振片、四分之一波片和 q 波片产生出涡旋光,再经偏振艾里模板和透镜产生涡旋艾里光^[49]。从光斑图上可以很清楚地看到,艾里光的主瓣被涡旋光所替代,形成了特殊的涡旋艾里光束。

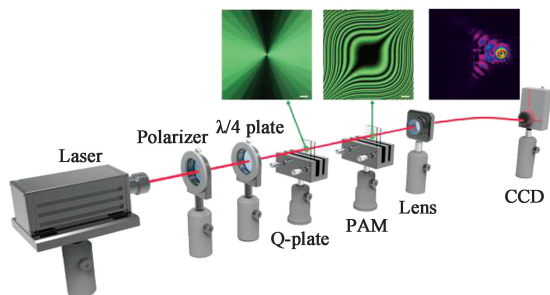


图 12 产生和测量涡旋艾里光的光路示意图。标尺为 $100\ \mu\text{m}$ ^[49]。

Fig.12 Schematic optical setup for generating and measuring the VABs. The scale bar is $100\ \mu\text{m}$ ^[49]。

我们对产生的涡旋艾里光的传播行为进行研究,发现此特殊光场中的光涡旋也具有艾里光的(类)无衍射、自愈和自加速的特性。图 13(a)和(b)分别为涡旋艾里光场和自由空间的涡旋光的光束轮廓随传播距离的变化示意图,(c)和(d)分别为两种情况下光强随传播距离的变化。对比可看出,前者光斑随传播距离的扩散情况得到了很好的抑制。在传播距离 $d = 0\ \text{cm}$ 处放置一个探针破坏涡旋艾里光中的涡旋光斑,如图 13(e)所示。随着光场的传播,涡旋光斑形貌逐渐恢复,如图 13(f)~(g)所示。图 13(h)为(g)的像散转变图,验证了拓扑荷 $m=1$ 的涡旋光的恢复。此外,通过对不同传播距离处的涡旋艾里光进行探测其横向位移量,发现其仍然满足艾里光的横向自加速行为。

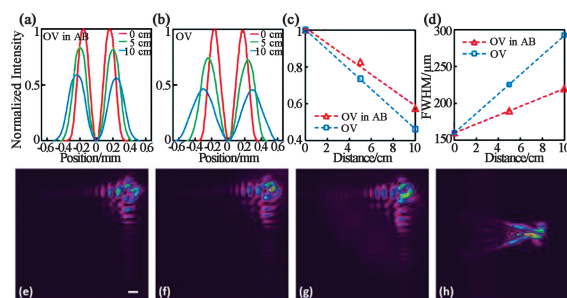


图 13 (a)嵌入艾里光中的和(b)自由空间的涡旋光在传播距离为 $0\ \text{cm}$, $5\ \text{cm}$, 和 $10\ \text{cm}$ 处的光强轮廓,上述情况下的(c)归一化光强和(d)半峰宽随传播距离的变化。涡旋艾里光在破坏点(e) $d = 0\ \text{cm}$, 以及传播距离(f) $d = 6\ \text{cm}$ 和(g) $d = 12\ \text{cm}$ 处的光场分布图;(h)(g)的像散转变图。图中标尺为 $500\ \mu\text{m}$ 。^[49]

Fig.13 Intensity profiles of OV (a) nested in AB and (b) in free space recorded at the propagation distance $0\ \text{cm}$, $5\ \text{cm}$, and $10\ \text{cm}$, respectively. The dependencies of (c) normalized intensity and (d) FWHM on propagation distance. Intensity distributions at destroying point (e) $d = 0\ \text{cm}$, and propagation distances: (f) $d = 6\ \text{cm}$ and (g) $d = 12\ \text{cm}$; (h) astigmatic transformation pattern of (g). The scale bar for all images is $500\ \mu\text{m}$ 。^[49]

另一方面,将涡旋光入射到偏振转换器上,便可产生涡旋矢量光束。本研究组引入液晶聚合物(LCP),分别制备了不同 q 值的 LCP q 波片和四分之一波片,并根据设计进行叠加^[50],如图 14 所示。图 14(a)为制备的 $q_1=1$ 的 LCP q 波片的分子指向矢示意图、显微图 and 对应产生的涡旋光斑以及其像散转变图。此时,633 nm 的左旋圆偏高斯光被转换成拓扑荷 $m = 2q_1 = 2$ 的右旋圆偏涡旋光。在此基础上叠加 LCP 四分之一波片,如图 14(b)所示,便可把涡旋光的偏振态由右旋圆偏振态转换成为线偏振态。再次叠加一个 LCP q 波片,便可实现矢量涡旋光的产生,如图 14(c)所示,最右侧的 q 波片的参数为 $q_2=4$,故最终得到的矢量涡旋光的偏振级数 $P = 2q_2 = 8$,拓扑荷 $m = 2q_1 = 2$ 。因为曝光系统可根据需要灵活设计不同结构,故可制备任意参数的 q 波片,继而产生任意偏振级数和拓扑荷的矢量涡旋光。此外,值得一提的是,LCP 薄膜具有体积小、重量轻、制备

工艺简单、可重复粘贴性等优势,故基于 LCP 的集成光路系统更为简单高效,其成本得到显著降低。LCP 良好的柔性和延展性使得其能与任意曲面光学元件贴合,可用于各种光学成像和光束控制系统。

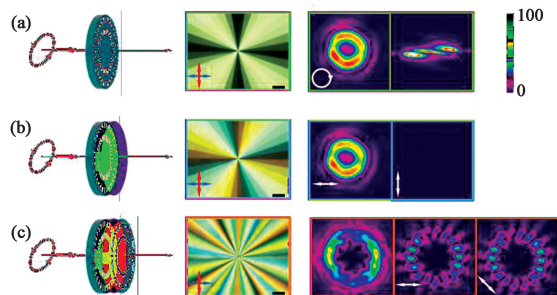


图 14 (a)第一个 q 波片,(b)叠加 LCP 四分之一波片后,(c)叠加所有涉及的薄片后的示意图、显微图和输出光斑图。^[50]

Fig.14 Schemes, micrographs and output beam patterns of: (a) first q-plate, (b) after stacking a LCP QWP, (c) overlaying all desired films. The scale bars and color bar indicate $200\ \mu\text{m}$ ^[50].

3.6 液晶退偏器

光的偏振会对光学器件和系统产生重要的影响,因此控制入射光的偏振非常关键的。例如光通信中光的偏振可能会引起偏振模式色散、偏振依赖的损耗或者增益以及偏振烧孔等损害^[51-52]。很多光探测器也都具有偏振敏感性,需要消除入射偏振对探测器灵敏度的影响,提高测量准确性^[53]。退偏器可以用来解决上述问题。

目前的退偏器要么体系复杂,要么需限定特定的入射光偏振角度,有些还需要加电调节,限制了其使用。本研究组利用光控取向技术制备出液晶退偏器,很好地克服了上述不足^[54]。图 15 为液晶退偏器的示意图,图中不同灰度表示相应区域液晶分子指向矢的不同方向。其原理为,将 DMD 的 $1\ 024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$ 的曝光区域分成 24×18 个正方形微区,每次随机曝光其中的 24 个微区,曝光 18 次,并控制曝光偏振方向按 10° 间隔从 0° 增加到 170° 。同时结合向列相液晶的参数,优化液晶盒盒厚使得液晶退偏器满足半波条件。每个微区可视为快轴方向随机分布的半波片,因此对固定偏振方向入射的光源,不同微区随机改变偏振方向,以达到综合退偏的效果。

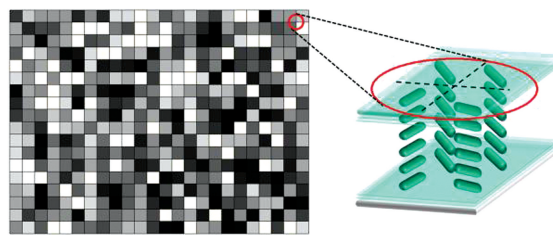


图 15 液晶退偏器的示意图,不同灰度表明了不同的光轴取向。插图里描绘的是红色圆形区域的液晶分子的排列^[54]。

Fig.15 Illustration of the LC depolarizer. Different directions of optic axes are indicated by different gray scales. The inset depicts the LC orientations in the red circle^[54].

图 16 所示为液晶退偏器的测试结果图。由图可知,我们制备的液晶退偏器不仅适用于单波长 $1\ 550\ \text{nm}$ 的光源,而且对 $1\ 520 \sim 1\ 610\ \text{nm}$ 的宽波段光源亦适用。对 $0 \sim 360^\circ$ 任意入射线偏振光,都可以很好地控制出射光的偏振度在 5% 以内。该类液晶退偏器制备简单、成本低廉、结构紧凑,退偏效果优于传统商业产品,有希望用于天文学仪器、激光加工、激光医学、光纤通讯等领域。

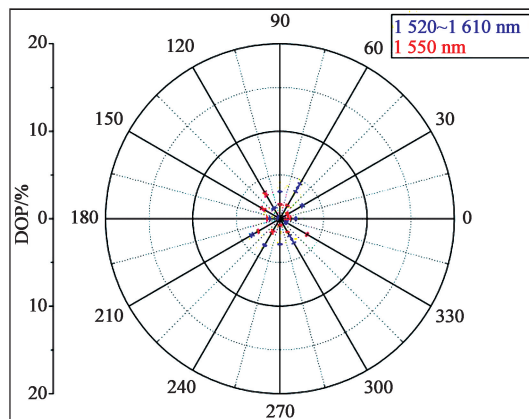


图 16 在不同偏振态入射下测得的 DOP 结果.蓝点表示 ASE 光源的测试结果,红点表示的是 $1\ 550\ \text{nm}$ 激光源^[54]

Fig.16 DOP results at different incident polarization. Blue dots stand for the DOP for ASE source; red dots stand for those of the $1\ 550\ \text{nm}$ laser^[54].

3.7 特殊波段和特种液晶方面的拓展

3.7.1 液晶太赫兹波片的实现

近年来,太赫兹波引起广泛的关注,太赫兹波

是指频率在 $0.1 \sim 10$ THz 范围的电磁波,波长大概在 $0.03 \sim 3$ mm 范围,介于微波和红外之间的电磁波^[55]。太赫兹的独特性能给通信、电子对抗、电磁武器、安全检查等领域带来了深远的影响^[56]。

本研究组将可见光和通讯波段成熟的光学器件设计制备技术拓展到了太赫兹波段,设计并实现了一种宽波段可调的太赫兹液晶波片^[57]。如图 17 所示,我们选取亚波长金属线栅同时作为高透率电极和内置起偏器,多孔石墨烯作为无偏振依赖特性的透明电极,其透过率超过 98%。因为金属线栅电极和石墨烯电极都比较脆弱,我们选用非接触式的光控取向作为液晶配向技术很好地避免了对电极层的机械损伤。最后填充自行开发的在 THz 频段具有低吸收损耗、大双折射率的液晶材料 NJU-LDn-4^[58]。在 $250 \mu\text{m}$ 盒厚的情况下,通过控制施加电压,在 $2.1 \sim 2.5$ THz 可实现半波片功能,在 $1.1 \sim 2.5$ THz 之间可实现四分之一波片功能,并验证了其偏振调控特性,实现了液晶材料与 THz 的完美结合,如图 18 所示。

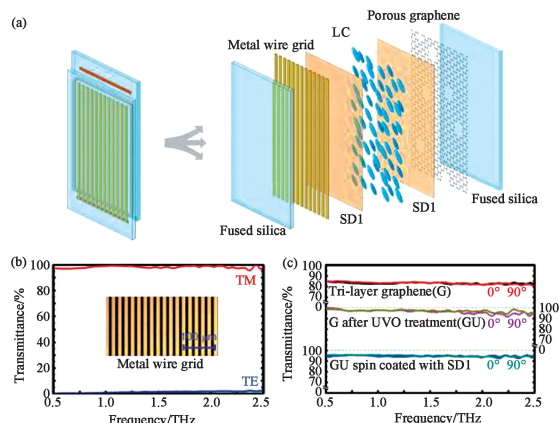


图 17 THz 波片结构示意图及其透过率曲线。(a) THz 液晶波片示意图及其透过率随(b)频率和(c)偏振的变化^[57]。

Fig.17 Structure of THz waveplate and its transmittance curves. (a) LC THz waveplate and its (b) frequency- and (c) polarization-dependent transmittances^[57]。

3.7.2 胆甾相液晶超结构的操控

胆甾相液晶 (Cholesteric liquid crystals, CLC) 因自身具有手性或有手性分子的掺入,而具有螺旋结构自组装能力^[59]。因液晶具有光学各向异性,沿着螺旋轴方向折射率呈周期性变化。当螺旋轴在面内平躺时,在偏光显微镜下将呈现

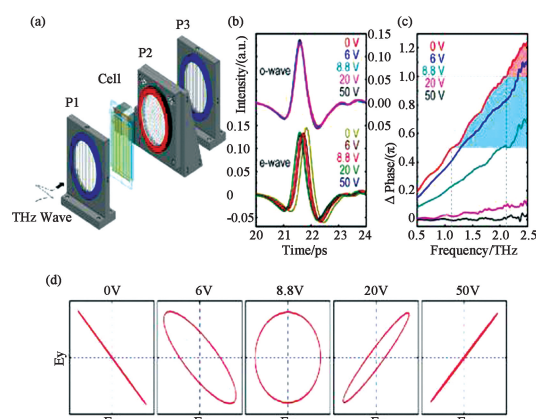


图 18 THz 液晶 THz 波片的性质。(a)透过率偏振分析装置。(b)通过液晶盒的寻常和非寻常太赫兹波的电压依赖时谱图。(c)由(b)中不同操作电压曲线计算的频率依赖的位相延迟量。(d)在 2.1 THz 下的偏振演化: 0 V, 线性偏振; 6 V, 椭圆偏振; 8.8 V, 圆偏振; 20 V, 椭圆偏振; 50 V, 线偏振^[57]。

Fig.18 Properties of LC THz waveplate. (a) Schematic set-up for transmittance polarization analysis. (b) Voltage-dependent temporal spectra of ordinary and extraordinary THz waves transmitted through the cell. (c) Frequency-dependent phase retardation calculated from the curves presented in (b) for different operating voltages. (d) Polarization evolution at 2.1 THz: linearly polarized at 0 V, elliptically polarized at 6 V, circularly polarized at 8.8 V, elliptically polarized at 20 V and linearly polarized at 50 V^[57]。

出经典的指纹织构 (Fingerprint texture)^[60]。基于 CLC 螺旋轴的面内取向控制可以制备衍射光栅^[61],在光束控制和光谱分析等领域具有广阔的应用前景^[62-63]。然而,这些面内螺旋超结构通常是通过绒布摩擦^[63]等机械方法进行取向控制,均匀性差、缺陷较多,也无法实现螺旋轴指向的任意操控,这大大限制了实际应用。而光取向作为一种非接触式的配向技术则完全可以避免上述缺点和限制,这为 CLC 面内螺旋超结构的精确甚至任意操控打开了一扇大门。

本研究组利用光控图形化取向技术,具体为,选取制备 q 波片的曝光图案,利用上述 DMD 分步重叠曝光技术,实现了 SD1 连续渐变的复杂取

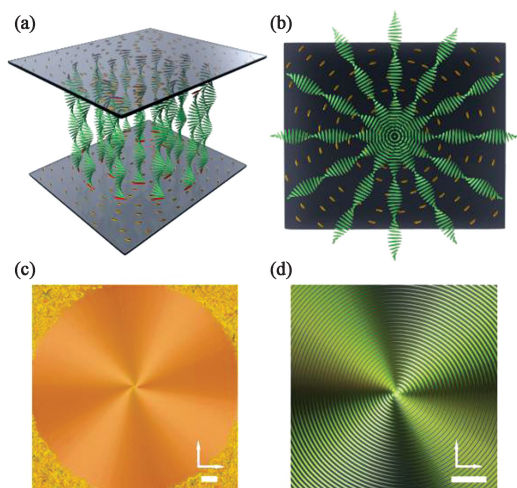


图 19 角取向条件下,平面态胆甾相液晶分子在(a)未加电和(b)加电(2.4 V, 1 kHz)情况下螺旋轴面内排列示意图和(c),(d)相应显微结构图.绿色和黄色棒状结构分别代表液晶和 SD1 分子;其中,靠近基板的液晶分子被标记为红色;白色正交的箭头表示两正交偏振片的偏振方向;图中比例尺为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[64].

Fig.19 (a, b) Schematic diagrams and (c, d) corresponding images of circularly aligned CLCs in planar cholesteric state and electric field-induced (2.4 V, 1 kHz) spiral stripe state. The SD1 and CLC molecules are represented by yellow and green bars separately. The CLC directors adjacent to the substrates are marked in red. White arrows denote the polarizer and analyzer transmission axes, respectively. The two scale bars are $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[64].

向,进而可用来取向任意 CLC 螺旋超结构^[64]。图 19 以角取向的圆形结构为例,展示了在该取向条件下的平面态胆甾相液晶结构和特定电场条件下形成的阿基米德螺旋形条纹结构,并观察了其生长和消退的动态过程,证明了光取向制备胆甾相超结构的可行性和灵活性。为实现对胆甾相液晶螺旋轴的面内操控,我们研究了取向方向和螺旋轴指向的关系,并系统考察了二畴情况下取向角和螺旋轴转变情况的一般规律。利用边界限制还可以得到不同形状的阿基米德螺旋线;并以波浪光栅条纹结构为例,证明了螺旋轴在一定范围内的任意连续性。总之,光控取向技术在胆甾相液晶中的应用,为简便灵活地制备出大面积、高品质、低成本、可重构的 CLC 指纹结构提供了一种行之有效的方法,为螺旋形超结构的进一步研究打下了坚实的基础,并有希望应用于新型光子器件和光刻等领域,同时,也为软物质超结构材料的可控生长提供了全新思路。

4 结 论

本文介绍了一种基于偶氮染料 SD1 和动态缩微曝光系统的液晶光控取向技术,综述了基于该技术实现的液晶光开关、特殊光场的产生与调控、退偏器、太赫兹波片等器件的制备,胆甾相液晶螺旋超结构的排列控制等非显示应用。该系列研究工作打开了液晶光控取向技术应用的新天地,有望催生各种新型的液晶光子学器件并拓宽光控取向技术的应用领域。

参 考 文 献:

- [1] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] KHOO I C, WU S T. *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals* [M]. Singapore: World Scientific, 1993.
- [3] Schneider T, Magyar G, Barua S, et al. P-171: a flexible touch-sensitive writing tablet [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2008, 39(1): 1840-1842.
- [4] BERREMAN D W. Solid surface shape and the alignment of an adjacent nematic liquid crystal [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1972, 28(26): 1683-1686.
- [5] YAROSHCHUK O, REZNIKOV Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(2): 286-300.
- [6] SCHADT M, SCHMITT K, KOZINKOV V, et al. Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, 31(7): 2155-2164.
- [7] SCHADT M, SEIBERLE H, SCHUSTER A. Optical patterning of multi-domain liquid-crystal displays with wide viewing angles [J]. *Nature*, 1996, 381(6579): 212-215.

- [8] AKIYAMA H, KAWARA T, TAKADA H, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liq. Cryst.*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [9] 章思汗,刘可庆,张智勇,等.含氟三苯二炔类液晶化合物合成及其性质研究[J].液晶与显示,2015,30(5):769-776.
ZHANG S H, LIU K Q, ZHANG Z Y, *et al.* Synthesis and properties of fluorinated Phenylethynyltolane compounds [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2015, 30(5): 769-776. (in Chinese)
- [10] 陈云昌,宣丽,姚丽双,等.取向层参数对响应时间的影响[J].液晶与显示,2016,31(1):62-66.
CHEN Y C, XUAN L, YAO L S, *et al.* Effect of aligning layer parameters on response time [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016, 31(1): 62-66. (in Chinese)
- [11] CHIGRINOV V, PIKIN S, VEREVOCHNIKOV A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, 69(6): 061713.
- [12] WU H, HU W, HU H C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.
- [13] WEI B Y, HU W, MING Y, *et al.* Generating switchable and reconfigurable optical vortices via photopatterning of liquid crystals [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(10): 1590-1595.
- [14] WU C Y, ZOU Y H, TIMOFEEV I, *et al.* Tunable bi-functional photonic device based on one-dimensional photonic crystal infiltrated with a bistable liquid-crystal layer [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(8): 7349-7355.
- [15] LU J G, SUN X F, SONG Y, *et al.* 2-D/3-D switchable display by Fresnel-type LC lens [J]. *J. Disp. Technol.*, 2011, 7(4): 215-219.
- [16] LI L, LIU C, WANG Q H. Optical switch based on tunable aperture [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(16): 3306-3308.
- [17] HEO J, HUH J W, YOON T H. Fast-switching initially-transparent liquid crystal light shutter with crossed patterned electrodes [J]. *AIP Adv.*, 2015, 5(4): 047118.
- [18] HU W, SRIVASTAVA A, XU F, *et al.* Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.
- [19] HU W, SRIVASTAVA A K, LIN X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(11): 111116.
- [20] LIN X W, HU W, HU X K, *et al.* Fast response dual-frequency liquid crystal switch with photo-patterned alignments [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(17): 3627-3629.
- [21] 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]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(2): 597-602.
- [22] FRANKE-ARNOLD S, ALLEN L, PADGETT M. Advances in optical angular momentum [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2008, 2(4): 299-313.
- [23] TORRES J P, TORNER L. *Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum* [M]. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [24] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2011, 3(2): 161-204.
- [25] WANG J. Advances in communications using optical vortices [J]. *Photon. Res.*, 2016, 4(5): B14-B28.
- [26] ZHU Z H, GAO W, MU C Y, *et al.* Reversible orbital angular momentum photon - phonon conversion [J]. *Optica*, 2016, 3(2): 212-217.
- [27] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [28] YUAN X C, LIN J, BU J, *et al.* Achromatic design for the generation of optical vortices based on radial spiral phase plates [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(18): 13599-13605.
- [29] MARRUCCI L, MANZO C, PAPARO D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96(16): 163905.
- [30] SLUSSARENKO S, MURAUSKI A, DU T, *et al.* Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(5): 4085-4090.
- [31] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-

- generated holograms [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(3): 221-223.
- [32] CAI X L, WANG J W, STRAIN M J, *et al.* Integrated compact optical vortex beam emitters [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [33] MEHMOOD M, MEI S T, HUSSAIN S, *et al.* Visible-frequency metasurface for structuring and spatially multiplexing optical vortices [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(13): 2533-2539.
- [34] ZHANG W D, HUANG L G, WEI K Y, *et al.* High-order optical vortex generation in a few-mode fiber via cascaded acoustically driven vector mode conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(21): 5082-5085.
- [35] CHEN P, GE S J, MA L L, *et al.* Generation of equal-energy orbital angular momentum beams via photopatterned liquid crystals [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2016, 5(4): 044009.
- [36] WANG Z X, ZHANG N, YUAN X C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(2): 482-492.
- [37] LEI T, ZHANG M, LI Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Damman gratings [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, 4(3): e257.
- [38] 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 Res.*, 2015, 3(4): 133-139.
- [39] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 25528.
- [40] WANG X L, DING J P, NI W J, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(24): 3549-3551.
- [41] ZHAN Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [42] FU S Y, GAO C Q, WANG T L, *et al.* Simultaneous generation of multiple perfect polarization vortices with selective spatial states in various diffraction orders [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(23): 5454-5457.
- [43] ZHU S J, WANG J, LIU X L, *et al.* Generation of arbitrary radially polarized array beams by manipulating correlation structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(16): 161904.
- [44] CHEN P, JI W, WEI B Y, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with liquid crystal polarization converters and vector-photoaligned q-plates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107(24): 241102.
- [45] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99(21): 213901.
- [46] WEI B Y, CHEN P, HU W, *et al.* Polarization-controllable Airy beams generated via a photoaligned director-variant liquid crystal mask [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 17484.
- [47] YI X N, LING X H, ZHANG Z Y, *et al.* Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(14): 17207-17215.
- [48] LIU Z X, LIU Y Y, KE Y G, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere [J]. *Photonics Res.*, 2017, 5(1): 15-21.
- [49] WEI B Y, CHEN P, GE S J, *et al.* Generation of self-healing and transverse accelerating optical vortices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(12): 121105.
- [50] TANG M J, CHEN P, ZHANG W L, *et al.* Integrated and reconfigurable optical paths based on stacking optical functional films [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(22): 25510-25514.
- [51] MAZURCZYK V J, ZYSKIND J L. Polarization dependent gain in erbium doped-fiber amplifiers [J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 1994, 6(5): 616-618.
- [52] PERLICKI K. Investigation of the state of polarization distribution generated by polarization scramblers on the Poincaré sphere [J]. *Opt. Commun.*, 2005, 252(1/2/3): 58-63.
- [53] HONMA M, NOSE T. Liquid-crystal depolarizer consisting of randomly aligned hybrid orientation domains [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(24): 4667-4671.
- [54] WEI B Y, CHEN P, GE S J, *et al.* Liquid crystal depolarizer based on photoalignment technology [J]. *Photon. Res.*, 2016, 4(2): 70-73.
- [55] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nat. Mater.*, 2002, 1(1):

- 26-33.
- [56] ZHANG X C, XU J Z. *Introduction to THz Wave Photonics* [M]. US: Springer, 2010.
- [57] WANG L, LIN X W, HU W, *et al.* Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, 4(2): e253.
- [58] WANG L, LIN X W, LIANG X, *et al.* Large birefringence liquid crystal material in terahertz range [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(10): 1314-1319.
- [59] BISOYI H K, LI Q. Light-directing chiral liquid crystal nanostructures: from 1D to 3D [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2014, 47(10): 3184-3195.
- [60] BAUDRY J, PIRKL S, OSWALD P. Topological properties of singular fingers in frustrated cholesteric liquid crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 1998, 57(3): 3038-3049.
- [61] SUBACIUS D, BOS P J, LAVRENTOVICH O. Switchable diffractive cholesteric gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(10): 1350-1352.
- [62] FUH A Y G, LIN C H, HUANG C Y. Dynamic pattern formation and beam-steering characteristics of cholesteric gratings [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, 41(1): 211-218.
- [63] JAU H C, LI Y N, LI C C, *et al.* Light-driven wide-range nonmechanical beam steering and spectrum scanning based on a self-organized liquid crystal grating enabled by a chiral molecular switch [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(2): 166-170.
- [64] MA L L, LI S S, LI W S, *et al.* Rationally designed dynamic superstructures enabled by photoaligning cholesteric liquid crystals [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(12): 1691-1696.

作者简介:邹朋飞(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事液晶器件方面的研究。E-mail:huwei@nju.edu.cn