

基于光取向液晶的光场调控技术

陈 鹏 徐 然 胡 伟 陆 延 青

南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 现代工程与应用科学学院, 人工微结构科学与
技术协同创新中心, 江苏 南京 210093

摘要 由于特种光束的独特性质和丰富应用, 光场调控技术近年来得到了越来越广泛的关注。设计特定结构调控普通高斯光束的振幅、相位或偏振方向, 可以得到一系列特殊光场。利用一种偏振敏感的光取向材料, 基于动态缩微投影曝光系统的液晶光控取向技术, 可实现精确、任意和可重构的液晶方位角的取向控制。基于该项技术制备了二值或渐变的液晶微结构元件, 对入射光场的各个参量维度进行调控, 产生了高品质、高效率的涡旋光束、矢量光束和艾里光束。利用该项技术制备的器件具有成本低廉、轻便集成、电光可调、偏振可控和宽波段适用等特点。综述了本课题组近期在该领域的系列研究工作, 或将为光场调控技术带来全新的可能, 为液晶光学器件带来更广泛的应用。

关键词 物理光学; 液晶器件; 涡旋光束; 光敏材料; 激光整形; 奇点光学

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1026005

Beam Shaping Based on Photopatterned Liquid Crystals

Chen Peng Xu Ran Hu Wei Lu Yanqing

*National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences,
Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University,
Nanjing, Jiangsu 210093, China*

Abstract Recently, optical beam shaping has attracted intensive attention due to the fantastic properties and various applications of specific beams. These beams can be converted from Gaussian beams through particular spatial amplitude, phase or polarization control. In this work, a liquid crystal photopatterning technique based on dynamic microlithography with a polarization-sensitive photoalignment agent is presented. This technique enables the accurate, arbitrary and reconfigurable azimuthal angle control of liquid crystals, thus supplies a powerful approach for the tailoring of arbitrary fine microstructures with binary or continuously space-variant liquid crystal azimuthal orientations. Based on this technique, high quality vortex beams, vector beams and Airy beams are generated. Besides high efficiency, good electrical switchability and broad wavelength tolerance, the proposed devices also exhibit merits of compact size, low cost, dynamic mode conversion, and polarization controllable energy distribution. In this paper, our recent work on some specially designed patterns and corresponding specific optical fields is briefly reviewed. It may pave a bright way towards beam shaping and bring new possibilities for advanced liquid crystal photonic devices.

Key words physical optics; liquid-crystal devices; optical vortices; photosensitive materials; laser beam shaping; singular optics

OCIS codes 260.6042; 230.3720; 050.4865; 160.5335; 140.3300

1 引 言

光场调控技术对光学和光子学应用至关重要。近些年来, 一些特殊光束得到了研究者的广泛关注, 最

收稿日期: 2016-07-06; **收到修改稿日期:** 2016-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(11304151, 61490714, 61435008, 61575093)

作者简介: 陈 鹏(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事液晶光学器件方面的研究。E-mail: njuchenpeng@163.com

导师简介: 陆延青(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事介电体超晶格、光纤光学、液晶光学等方面的研究。

E-mail: yqlu@nju.edu.cn (通信联系人)

典型的包括涡旋光束^[1-2]、矢量光束^[3]和艾里光束^[4]。这些光束在光学操控、激光加工和高分辨显微成像等领域有着广泛的应用。通常可以采用特殊设计的透镜、波片、模板和超颖表面等光学器件^[5-14],通过对普通高斯光束的振幅、相位和偏振方向等参数的调控,来产生上述光场。但这类光学器件静态、固定的结构使其功能不可调,极大地限制了其应用范围。

液晶(LC)是一种兼具晶体各向异性和液体流动性的特殊相态,其外场(磁场、电场、温度场和光场)可调性质可以赋予上述光场调控器件以动态调谐特性。液晶显示器可看作是液晶对可见光强度的调节。如果能在液晶体系中引入特殊设计的微结构,可实现对光的偏振方向、相位和空间维度等的调制,拓宽液晶在非显示领域的应用。最初,聚合物分散液晶^[15]、结构化电极^[16-18]用于控制液晶的倾角,形成各类二值的结构;但制备过程复杂、结构固定。空间光调制器^[19]由大量微米级别的液晶像素点组成,每个像素点可以通过电极网络单独驱动,几乎能够实现任意形状的光束。然而,高成本、低光能利用率和受限的光束质量是现有商用空间光调制器的弊端。除了控制液晶倾角,也可利用液晶的方位角来调控光场。相较于传统的机械摩擦法^[20-24],光控取向技术更适合高精度、多畴结构的液晶微取向^[25-26]。起初,掩模板多步曝光^[26-27]、全息曝光^[28-30]等方法被广泛采用;近年来,研究人员开发了一种灵活性极高但制备复杂的曝光方法^[31-33],能够实现任意图案化的液晶微结构,这对液晶的显示和非显示应用都具有深远的意义。

本文综述了本课题组近期在基于光取向液晶的光场调控方面所做的系列研究工作^[34]。结合几何相位、达曼光栅等概念设计了特殊的液晶微结构,并通过课题组自主开发的动态缩微投影曝光系统,制备了二值和渐变取向的多种液晶光学元件,产生了携带角向/径向指数的涡旋光束、复杂的矢量光束和偏振可控的艾里光束。

2 光控取向技术和制备系统

采用的光控取向材料是一种偏振敏感且可光擦写的偶氮苯类材料 SD1^[35]。在线偏振紫外光的照射下,由于顺反异构化和二向色性吸收,SD1 分子倾向于与入射光线偏振方向垂直排列^[36]。SD1 的取向会通过分子间相互作用传递给相邻的液晶分子,从而诱导液晶的取向。因为 SD1 的可擦写性,只有最后一次足够剂量的曝光偏振信息会被记录。

设计搭建的基于数控微镜阵列(DMD)的动态缩微投影曝光系统,可实现任意偏振信息的记录,进而实现液晶的任意图形化光取向^[32]。DMD 由 1024×768 个微镜组成,每个微镜的尺寸是 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,这些微镜的开关态可以通过微机械控制。曝光系统示意图如图 1 所示,一束均匀准直的紫外光被反射到 DMD 芯片上;DMD 作为一个动态模板,通过电脑控制端输入不同的图形,处于开态的微镜将相应位置的紫外光反射进光路,紫外光携带图案信息。经消色差物镜聚焦和电控旋转偏振片后,携带图案信息的结构光照射到位于焦平面处涂有光控取向薄膜的液晶盒或玻璃基板上。利用 CCD 收集样品反射的光斑,并保证样品

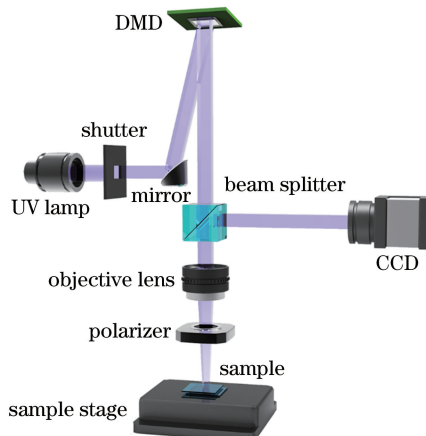


图 1 基于 DMD 的缩微投影曝光系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the DMD based microlithographic system

到 DMD 的光路与样品到 CCD 的光路共轭, 以此实现调焦和实时监控曝光。由于 DMD 输出图形的任意性, 同步旋转偏振片角度可便捷地实现任意取向分布的液晶微结构, 用于产生和调控结构光场。

3 涡旋光束的产生

涡旋光束具有螺旋形波前, 中心相位奇点, 其截面光强呈空心环状分布, 形状酷似甜甜圈。特殊的波前导致每个光子携带的轨道角动量(OAM)为 $m\hbar$ ^[5], m 为拓扑荷。拉盖尔-高斯(LG)光束是一类最常见的携带 OAM 的光束, 具有两个特征参数, 角向指数 m (即拓扑荷) 和径向指数 p 。光的轨道角动量在光镊、量子信息和基于 OAM 模式复用的光通信等领域有着广阔的应用前景^[1-2,37]。

3.1 液晶叉形光栅

涡旋光和高斯光的电脑计算全息图是一个叉形光栅, 因此可通过叉形光栅产生涡旋光束。 $m = 1$ 的叉形光栅如图 2(a)所示, 它是一个衍射光栅, 中心区域出现位错, 看上去像个叉子。一束高斯光照射到叉形光栅上, 会被衍射成一系列的涡旋光束。图 2(b)所示为制得的正交混合排列液晶叉形光栅在正交偏光显微镜下的照片。液晶盒的一侧玻璃基板旋涂 SD1, 并采用两步曝光法^[27]记录正交取向的叉形图案; 另一片旋涂垂直取向剂。图 2(a)中设计的叉形图案被完美地转移到液晶结构中, 从显微照片颜色和亮度的均匀性, 可以看出相邻区域的正交排列。此外, 该设计同样适用于其他取向模式和不同拓扑荷的液晶叉形光栅^[38]。

当一束 671 nm 激光照射样品时, 用 CCD 拍摄获得相应的衍射光斑图像, 如图 2(c)和 2(d)所示。通过调节施加的电压, 可以改变 ± 1 级衍射效率, 对应的效率 η 随电压 V 的变化如图 2(e)所示。实验得到的最大 ± 1 级衍射效率均为 37%, 衍射光斑如图 2(c)所示, ± 1 级为拓扑荷相反的涡旋光束。理论上在半波条件下, ± 1 级衍射效率应为 40.5%, 实验值接近理论极限, 与空间光调制器相比有了显著提高。当电压调节到满足全波条件时, 衍射被抑制, 只留下中心 0 级高斯光, 如图 2(d)所示。调节电压可以实现涡旋光的动态调谐以适用于不同波长, 如图 2(e)所示, 对于不同波长都可以达到较高衍射效率。对于正交排列的液晶取向结构设计, 任何入射偏振态都可以分解成两个沿正交取向方向的相互垂直的分量, 这两个分量感知到的空间相位延迟完全相同, 使元件具有极好的偏振无关性^[27,39], 即衍射效率等性质与入射光的偏振状态无关。如图 2(f)所示, 不同入射偏振态下, $\eta-V$ 曲线保持一致。另外, 因为 SD1 具有可擦写性, 可用一束均一线偏振的紫外光擦写已有曝光图案并赋予新的结构, 从而使涡旋光场发生实时重构^[38]。

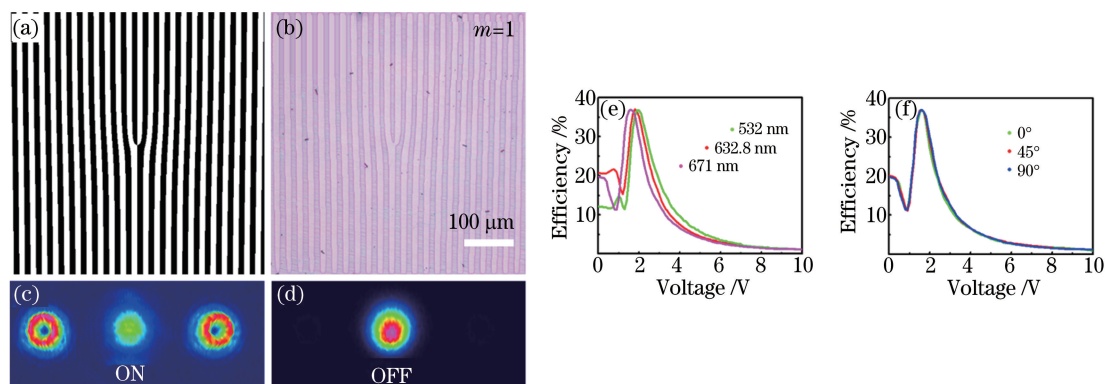


图 2 (a)叉形光栅($m = 1$)的电脑计算全息图;(b)E7 液晶材料叉形光栅的显微照片;(c)涡旋光束开态;(d)涡旋光束关态;(e)不同入射波长下+1 级涡旋光束的衍射效率随电压的变化曲线;(f)不同入射偏振态下+1 级涡旋光束的衍射效率随电压的变化曲线

Fig. 2 (a) Computer-generated hologram of a fork grating with $m = 1$; (b) micrograph of a fork grating made from E7 liquid crystal; (c) corresponding diffraction patterns at the ON state; (d) corresponding diffraction patterns at the OFF state; (e) $\eta-V$ curves of the 1st order optical vortex beams at different incident wavelengths; (f) $\eta-V$ curves of the 1st order optical vortex beams at different incident polarization angles

3.2 液晶叉形偏振光栅

虽然液晶叉形光栅的效率已经有所提高, 但是仍然受限于二值相位光栅的理论极值(40.5%)。为了进

一步提高衍射效率,引入几何相位的概念。不同于一般的因光程差导致的相位差,几何相位是由于偏振在空间两点间变化路径不同而引入的,只与几何特征有关^[40]。最简单的几何相位光学元件是偏振光栅^[41-44],理论上可以将所有入射能量完全转到一个衍射级次上,实现 100% 的转化效率。将偏振光栅中液晶指向矢的渐变分布引入传统的叉形光栅,得到叉形偏振光栅^[30,45],其指向矢分布满足公式^[45]

$$\alpha(x, y) = \frac{1}{2}m\phi(x, y) - \pi x/\Lambda + \alpha_0 + \frac{\pi}{2}\theta[-L_p^{|m|}(2r^2/\omega_0^2)], \quad (1)$$

式中 $\phi(x, y) = \arctan(y/x)$ 表示 x - y 平面内的方位角, Λ 为光栅周期, $\theta(x)$ 为单位阶跃函数, $L_p^{|m|}(x)$ 为广义拉盖尔多项式, $r^2 = x^2 + y^2$, ω_0 为束腰半径。通过琼斯矩阵的计算,考虑入射光 $\mathbf{E}_{in}(x, y) = \mathbf{X}^{(\pm)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$, 即左右旋圆偏振的本征态,可以得到第 n 级远场衍射的表达式为

$$\mathbf{D}_n = \cos(\zeta\delta_n)\mathbf{X}^{(\pm)} - i\sin(\zeta\delta_{n\pm 1})\exp\{\pm im\phi(x, y) \pm i\pi\theta[-L_p^{|m|}(2r^2/\omega_0^2)]\}\mathbf{X}^{(\mp)}, \quad (2)$$

式中 $\zeta = \pi\Delta nd/\lambda$ 为相位差的一半。由(2)式可以看出,叉形偏振光栅只有 0 级、 ± 1 级这三个衍射级次, ± 1 级衍射光束为 LG 模式且拓扑荷相反,为正交的圆偏振态。衍射效率与相位差和入射光偏振态有关,当满足半波条件、入射光为圆偏振态时,只存在一个 1 级衍射级次,且偏振态与入射圆偏振态正交。

基于 DMD 系统,采用多步重叠曝光技术^[45]可以实现上述复杂的液晶取向,制备液晶叉形偏振光栅。当 $m=2$ 或 $m=1, p=1$ 时,正交偏光显微图像分别如图 3(a)、(b)所示。亮度的周期性连续变化是由液晶指向矢的连续渐变分布所导致的,旋转样品时亮暗区域交替变化。图 3(b)中圆形的黑线条是两侧液晶取向相互垂直造成的旋转位错线。高斯光束照射到样品上时衍射图案如图 3(c)、(d)所示,图像在半波条件下拍摄。与理论预计一致,只观察到三个衍射级次;入射光为线偏振态时, ± 1 级都存在;入射光为圆偏振态时,只存在 1 级,实验测得的衍射效率最高达到约 98.5%。除了普通的涡旋光束,也可以得到带径向指数的高阶 LG 光束,如图 3(d)所示, $p=1$ 的 LG 光束呈现双环的光斑形貌。通过这种液晶叉形偏振光栅,可以调控入射光偏振态和相位差,来调节入射光能量在三个级次的动态切换,而且衍射涡旋的偏振相关性对涉及光子自旋和轨道角动量的量子过程很有意义。

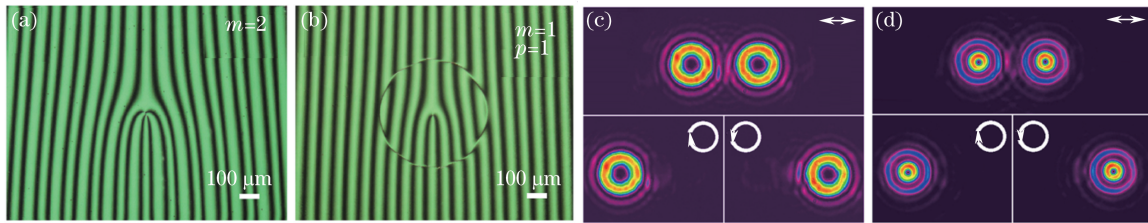


图 3 (a) $m=2$ 时液晶叉形偏振光栅显微图; (b) $m=1, p=1$ 时液晶叉形偏振光栅显微图; (c) $m=2$ 时不同入射偏振态下的衍射光斑; (d) $m=1, p=1$ 时不同入射偏振态下的衍射光斑。

顺时针箭头:左圆偏振;逆时针箭头:右圆偏振

Fig. 3 (a) Micrograph of LC fork polarization gratings when $m=2$; (b) micrograph of LC fork polarization gratings when $m=1$ and $p=1$; (c) corresponding diffraction patterns when $m=2$; (d) corresponding diffraction patterns when $m=1$ and $p=1$. Clockwise arrow: left circular polarization; counter-clockwise arrow: right circular polarization

3.3 液晶达曼叉形光栅

除了单一涡旋光束的产生,涡旋光束阵列也有其独特的用途。达曼叉形光栅可以用来产生等能量的涡旋光束阵列,不同级次的 OAM 不同,可用于基于 OAM 复用的光通信技术中 OAM 的并行处理和探测^[46-49]。文献[50]提出一种基于正交平行取向液晶的达曼叉形光栅, LG 光束相位与倾斜光栅相位叠加后

$$\varphi = 2\pi x/\Lambda + m\phi + \pi\theta[-L_p^{|m|}(2r^2/\omega_0^2)], \quad (3)$$

对其进行二值化,则透过函数可以写为

$$T(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp\{in \times [2\pi x/\Lambda + m\phi + \pi\theta[-L_p^{|m|}(2r^2/\omega_0^2)]]\}, \quad (4)$$

$|C_n|^2$ 表示第 n 级衍射效率。选择适当的相位转变点数量和位置^[51],可以产生等能量的目标数量级次的 LG 光束。将二值化后 0 和 π 的相位分布区域分别对应为液晶取向的 0° 和 90° ,采用两步曝光法,可获得液

晶达曼叉形光栅。

选取 3 个相位转变点以得到 5 个等能量的衍射级次,制得的一维液晶达曼叉形光栅能量均匀性较好,总衍射效率接近理论值。图 4 所示为二维液晶达曼叉形光栅, $m = 1 \times 1$, 表示 x 和 y 方向的光栅拓扑荷均为 1。从显微图中可以看出,相邻区域的液晶正交排列,在正交和平行偏振态下呈现亮态和暗态,同样具有偏振无依赖特性。其衍射产生的涡旋光束阵列的拓扑荷数分布满足 $n_x m_x + n_y m_y$, 其中 n_x, n_y 为 x 和 y 方向的衍射级次数, m_x, m_y 为 x 和 y 方向叉形光栅的拓扑荷。不同级次衍射光斑的形状不同,光斑黑洞的大小也不同。该液晶达曼叉形光栅理论上可产生 5×5 的等能量衍射级次,由于液晶微结构制备的误差,与理论设计参数有所偏离,故能量分布的均匀性不够理想;可通过更精确的液晶取向方式^[33]改善其能量分布的均匀性。由于液晶的电调特性,施加不同电压达到不同波长下的半波条件,即可适用于不同波长,图 4(c)、(d)分别是入射波长为 632.8 nm 和 532 nm 时的衍射光斑图。这类液晶达曼叉形光栅在 OAM 的产生、操控和检测等方面具有广阔的应用前景。

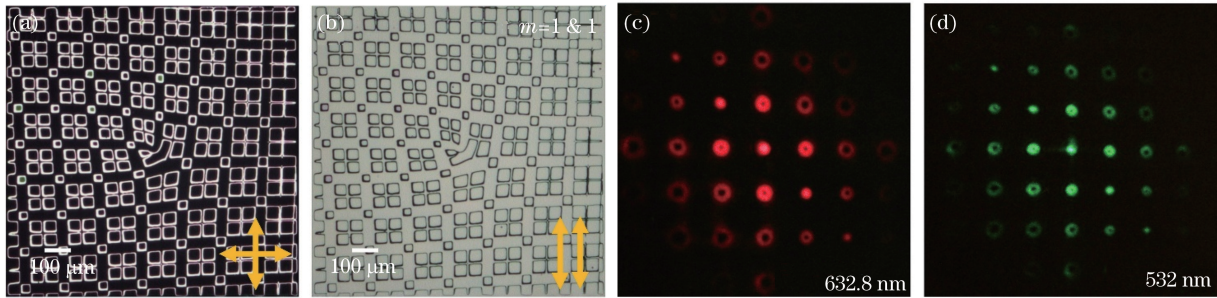


图 4 液晶达曼叉形光栅产生涡旋光束阵列的显微图及衍射光斑。(a) 正交偏振光下的显微图;(b) 平行偏振光下的显微图;(c) 632.8 nm 入射光的衍射光斑;(d) 532 nm 入射光的衍射光斑;

Fig. 4 Micrographs and corresponding diffraction patterns of the LC Dammann grating generated vortex beam array. (a) Micrograph under perpendicular polarized light; (b) micrograph under parallel polarized light; (c) corresponding diffraction patterns at incident wavelength of 632.8 nm; (d) corresponding diffraction patterns at incident wavelength of 532 nm

3.4 液晶超 q 波片

以上三种方式都是通过衍射产生的,涡旋光在相应的衍射级次上,实际应用中可能不利于光路的对准。另一种常用的产生涡旋光束的方法是利用 q 波片^[52-53]。 q 波片是一种特殊的半波片,光轴分布满足

$$\alpha(r, \phi) = q\phi + \alpha_0, \quad (5)$$

式中 q 表示光轴在空间角变化的快慢, α_0 表示初始位置光轴角度。基于几何相位的原理, q 波片可以将入射的圆偏振高斯光转变成反向的圆偏振涡旋光束,拓扑荷为 $m = 2q$;将入射的线偏振高斯光转变成矢量光束,偏振级数为 $P = 2q$ 。传统的 q 波片中光轴的变化受限,如果能实现 q 和 α_0 随着方位角 ϕ 和半径 r 的任意变化,将大大拓宽 q 波片对光场的调控能力,称之为超 q 波片^[54]。

利用 DMD 系统的制备弹性优势,可以实现这类特殊的液晶超 q 波片。图 5 所示为 α_0 和 q 空间变化分布的两个样品。图 5(a)中 90° 取向的突变造成了圆形的旋转位错线,其指向矢分布测量结果如图 5(b)所示,这种 90° 取向突变的超 q 波片会导致大小为 π 的相位差,产生高阶 LG 光束,一个取向位错环对应 $p = 1$,呈现双环光斑,如图 5(c)所示。图 5(d)为更为复杂的变化情况, q 在空间内渐变分布,最终产生类似龙卷风状的光场分布。这种光强特异分布和多 OAM 叠加的模式,在复杂的光力操控、光通信模式复用等领域存在特殊的应用。

4 矢量光束的产生

涡旋光束是一种具有相位奇点的奇点光束,矢量光束是另一种奇点光束,矢量光束对应的奇点是偏振奇点。矢量光束具有空间变化的偏振态分布,高度的偏振对称性使其具有独特的聚焦特性,可以应用于高分辨成像和光操纵^[3,55-56]。文献[57]提出并展示了一系列适合产生任意矢量光束的液晶偏振转换器,这是一些特殊的扭曲向列相(TN)液晶盒,一侧基板上是均匀取向,另一侧基板上是空间变化的取向^[21,58]。图 6(a)、

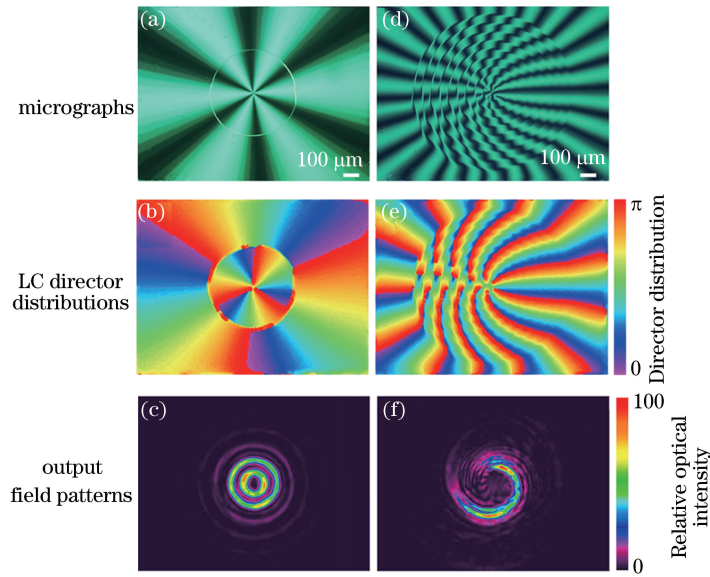


图 5 (a)(b)(c) $r \leq 0.5r_0$ 时 $\alpha_0 = 0, r > 0.5r_0$ 时 $\alpha_0 = \pi/2, q = 1.5$;

(d)(e)(f) $r \leq 0.1r_0$ 时 $q = 2, r > 0.9r_0$ 时 $q = 6.5$, 从中心到边界 q 以每 $0.1r_0$ 增加 $0.5, \alpha_0 = 0$

Fig. 5 (a)(b)(c) $\alpha_0 = 0$ at $r \leq 0.5r_0, \alpha_0 = \pi/2$ at $r > 0.5r_0, q = 1.5$; (d)(e)(f) $q = 2$ at $r \leq 0.1r_0,$

$q = 6.5$ at $r > 0.9r_0$, and from the center to the edge, q increases with an interval of 0.5 every $0.1r_0, \alpha_0 = 0$

(b)分别为对应产生径向矢量光和角向矢量光的偏振转换器,相应空间变化的偏振态分布分别如插图所示。入射光束从液晶盒均匀取向的一侧入射,并且使其偏振方向与这一侧的液晶取向方向平行。由于扭曲向列相液晶的偏振旋转效应,光的偏振方向随局部的液晶指向矢分布变化而变化,入射光穿过整个液晶盒后产生了需要的矢量光束。这可以从正交偏振光显微镜下的强度分布图中得到验证。亮区对应的局域出射偏振方向与检偏器方向平行而暗区对应的局域出射偏振方向与检偏器方向垂直。

还可以实现更复杂的偏振转换器。图 6(c)所示为双环的矢量光束,具有径向和角向偏振分布构成的双环偏振分布。制得的这些液晶偏振转换器可以用作进行矢量光取向曝光的偏振模板^[57]。该技术不仅可以很容易地实现偏振转换器的批量复制,还可制备能将线偏振激光转换为矢量光束的 q 波片^[59]和超 q 波片。本文中提到的任何器件都可以通过特殊设计的液晶偏振转换器进行一步矢量光束曝光取向后获得,使得低成本、高效率、大批量的复制生产成为可能。

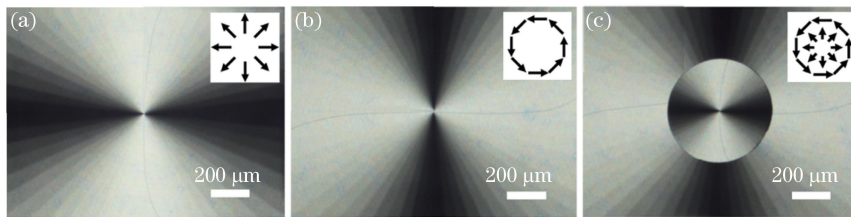


图 6 矢量光束的偏振分布示意图和实验测得的强度分布。(a)径向偏振;(b)角向偏振;(c)双环偏振

Fig. 6 Schematic of polarization distributions and observed intensity distributions of vector beams. (a) Radial polarization; (b) azimuthal polarization; (c) bi-ringed polarization

5 艾里光束的产生

艾里光束是另一种结构光场,具有无衍射、横向自加速和自愈特性^[4],引起了光学微操纵、微加工和生物医学等领域的广泛关注。通过引入几何相位,实现了一种液晶偏振艾里模板^[60],其中液晶沿 x 轴和 y 轴都具有呈立方空间变化的方位取向,满足

$$\alpha(x, y) = (x^3 + y^3) / 2. \quad (6)$$

基于几何相位的原理,出射光携带 2α 的相位因子,即具有立方相位分布特征的艾里光束。实验制得的

艾里模板样品如图 7(a)所示,偏光显微镜下光束的亮度呈现连续的变化。在半波条件下,光路中出射的艾里光束经一球透镜后,其 3D 光强分布被 CCD 采集。线偏振光入射时会出现双支艾里光束,如图 7(b)所示。圆偏振光入射时,只有单支艾里光束存在且其偏振方向与入射光束的偏振方向正交,如图 7(d)所示,与图 7(c)所示模拟结果完全一致。通过控制入射光束的偏振状态可以实现单支和双支艾里光束的切换。实验中产生的艾里光束的无衍射和横向自加速特性也得到了很好的验证^[60]。液晶偏振艾里模板的制备中主要需控制液晶的方位角,避免使用吸收型电极,从而大幅增加其光学损伤阈值。实验中样品接收 600 个脉冲(能量密度 0.5 J/cm^2 , 中心波长 1064 nm , 脉宽 10 ns , 重复频率 1 Hz)之后没有观察到任何损伤。因为测试光源的输出功率有限,所以尚未获得准确的损伤阈值,但至少会比商业化液晶空间光调制器的损伤阈值大一个数量级。这意味着提出和制备的液晶偏振艾里模板及上述所有器件在光子弹和工业激光加工等强光应用方面会有很好的前景。

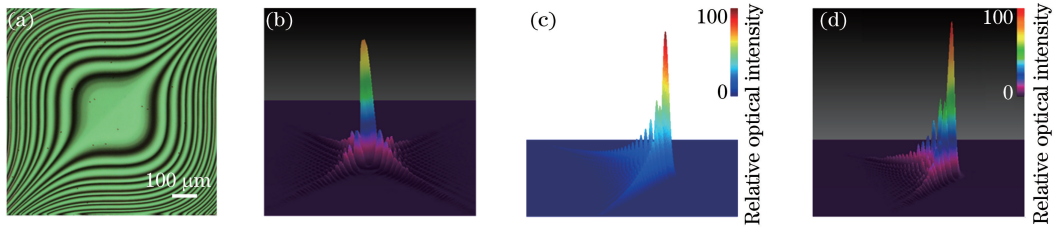


图 7 (a)液晶偏振艾里模板显微图;(b)线偏振光入射时衍射光斑 3D 图像;(c)圆偏振光入射时衍射光斑的模拟结果;(d)圆偏振光入射时下衍射光斑的实验结果

Fig. 7 (a) Micrograph of an LC polarization Airy mask; (b) 3D image of the generated Airy beam intensity converted from linearly polarized light; (c) simulated Airy beams converted from circularly polarized light; (d) experimentally generated Airy beams converted from circularly polarized light

6 结束语

将偏振敏感、可擦写的光取向材料与基于 DMD 的动态缩微投影曝光系统相结合,提出了一种可实现任意液晶取向微结构的制备技术。利用该液晶光控取向技术制备获得了各种二值或渐变取向的液晶光学器件,譬如液晶叉形光栅、叉形偏振光栅、达曼叉形光栅、超 q 波片、矢量光束转换器和偏振艾里模板等。实现了对光场的多重调控,产生了高质高效的涡旋光束、矢量光束和艾里光束。该类液晶器件制造成本低、易集成、电光可调、损伤阈值高且适用波段宽(可见,红外,甚至太赫兹^[61-64])。除了传统向列相液晶,一些特种液晶材料^[43,65-66]也可用来实现光场调控的功能。此外,通过相位集成技术、将液晶微结构与传统的光学元件结合等手段,可以更加丰富光相位、偏振、强度操控的实现手段^[12,67]。该系列研究作为光场调控技术带来了全新选择,有望催生各类新型的液晶光学器件并拓宽特种光场的应用领域。

参 考 文 献

- 1 Franke-Arnold S, Allen L, Padgett M. Advances in optical angular momentum[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(4): 299-313.
- 2 Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- 3 Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- 4 Siviloglou G, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- 5 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]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- 6 Yalizay B, Soylu B, Akturk S. Optical element for generation of accelerating Airy beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(10): 2344-2346.
- 7 Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, *et al.* Helical-wavefront laser beams produced with a spiral

- phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5-6): 321-327.
- 8 Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, *et al.* Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1468-1470.
 - 9 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams [J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229-232.
 - 10 Cao R, Yang Y, Wang J, *et al.* Microfabricated continuous cubic phase plate induced Airy beams for optical manipulation with high power efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(26): 261106.
 - 11 Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13: 139-150.
 - 12 Zhou J X, Liu Y C, Ke Y G, *et al.* Generation of Airy vortex and Airy vector beams based on the modulation of dynamic and geometric phases [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3193-3196.
 - 13 Beresna M, Gecevicius M, Kazansky P G, *et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 201101.
 - 14 Maguid E, Yulevich I, Veksler D, *et al.* Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1202-1206.
 - 15 Kitzerow H S. Polymer-dispersed liquid crystals from the nematic curvilinear aligned phase to ferroelectric films [J]. *Liquid Crystals*, 1994, 16(1): 1-31.
 - 16 Ren H W, Lin Y H, Wu S T. Linear to axial or radial polarization conversion using a liquid crystal gel [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(5): 051114.
 - 17 Luo D, Dai H T, Sun X W. Polarization-independent electrically tunable/switchable Airy beam based on polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31318-31323.
 - 18 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.
 - 19 Ngcobo S, Litvin I, Burger L, *et al.* A digital laser for on-demand laser modes [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2289.
 - 20 Chen J, Bos P J, Vithana H, *et al.* Electro-optically controlled liquid crystal diffraction grating [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(18): 2588-2590.
 - 21 Stalder M, Schadt M. Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(23): 1948-1950.
 - 22 Kim J H, Yoneya M, Yokoyama H. Tristable nematic liquid-crystal device using micropatterned surface alignment [J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 159-162.
 - 23 Wen B, Petschek R G, Rosenblatt C. Nematic liquid-crystal polarization gratings by modification of surface alignment [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1246-1250.
 - 24 Honma M, Nose T. Polarization-independent liquid crystal grating fabricated by microrubbing process [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(11): 6992-6997.
 - 25 Schadt M, Schmitt K, Kozinkov V, *et al.* Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(7R): 2155-2164.
 - 26 Schadt M, Seiberle H, Schuster A. Optical patterning of multi-domain liquid-crystal [J]. *Nature*, 1996, 381: 212-215.
 - 27 Hu W, Srivastava A K, Lin X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.
 - 28 Blinov L M, Barberi R, Cipparrone G, *et al.* Liquid crystal orientation by holographic phase gratings recorded on photosensitive Langmuir-Blodgett films [J]. *Liquid Crystals*, 1999, 26(3): 427-436.
 - 29 Provenzano C, Pagliusi P, Cipparrone G. Highly efficient liquid crystal based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12): 121105.
 - 30 Li Y M, Kim J, Escuti M J. Orbital angular momentum generation and mode transformation with high efficiency using forked polarization gratings [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(34): 8236-8245.
 - 31 Culbreath C, Glazar N, Yokoyama H. Note: automated maskless micro-multidomain photoalignment [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(12): 126107.
 - 32 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.
 - 33 Miskiewicz M N, Escuti M J. Direct-writing of complex liquid crystal patterns [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12691-12706.

- 34 Chen P, Lu Y Q, Hu W. Beam shaping via photopatterned liquid crystals[J]. *Liquid Crystals*, 2016, DOI:10.1080/02678292.2016.1191685.
- 35 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.
- 36 Chigrinov V, Pikin S, Verevochnikov A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 061713.
- 37 Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- 38 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.
- 39 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.
- 40 Berry M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's phase for polarized light[J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- 41 Nersisyan S, Tabiryan N, Steeves D, *et al.* Optical axis gratings in liquid crystals and their use for polarization insensitive optical switching[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2009, 18(1): 1-47.
- 42 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.
- 43 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.
- 44 Chen H, Weng Y, Xu D, *et al.* Beam steering for virtual/augmented reality displays with a cycloidal diffractive waveplate [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7287-7298.
- 45 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.
- 46 Lei T, Zhang M, Li Y, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4: e257.
- 47 Liu J, Min C, Lei T, *et al.* Generation and detection of broadband multi-channel orbital angular momentum by micrometer-scale meta-reflectarray[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 212-218.
- 48 Ge S J, Chen P, Ma L L, *et al.* Optical array generator based on blue phase liquid crystal Dammann grating[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 1087-1092.
- 49 Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, *et al.* Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6240-6248.
- 50 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.
- 51 Zhou C H, Liu L R. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5961-5969.
- 52 Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.
- 53 Slussarenko S, Murauski A, Du T, *et al.* Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4085-4090.
- 54 Ji W, Lee C H, Chen P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25528.
- 55 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]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3549-3551.
- 56 Liu S, Li P, Peng T, *et al.* Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21715-21721.
- 57 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]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 241102.
- 58 Ko S W, Ting C L, Fuh A Y G, *et al.* Polarization converters based on axially symmetric twisted nematic liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3601-3607.
- 59 Naidoo D, Roux F S, Dudley A, *et al.* Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 327-332.
- 60 Wei B Y, Chen P, Hu W, *et al.* Polarization-controllable Airy beams generated via a photoaligned director-variant liquid

- crystal mask[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17484.
- 61 Wu S T. Birefringence dispersions of liquid crystals[J]. *Physical Review A*, 1986, 33(2): 1270.
- 62 Wang L, Lin X W, Liang X, *et al.* Large birefringence liquid crystal material in terahertz range[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(10): 1314-1319.
- 63 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.
- 64 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: e253.
- 65 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.
- 66 Ma Y, Wei B, Shi L, *et al.* Fork gratings based on ferroelectric liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5822-5828.
- 67 Ke Y, Liu Y, Zhou J, *et al.* Optical integration of Pancharatnam-Berry phase lens and dynamical phase lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 101102.