

文章编号:1007-2780(2023)01-0001-09

基于光取向技术的液晶螺旋达曼波带片

刘思嘉, 张逸恒, 朱琳, 陈鹏*, 陆延青
(南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏南京 210023)

摘要: 涡旋光阵列在光通信、多微粒操控、并行激光加工等领域有着广阔的应用前景, 近年来受到越来越多的关注。然而动态可调的纵向涡旋光阵列的实现仍具有一定挑战性。本文基于达曼编码方法与液晶光取向技术, 设计并制备出一种液晶螺旋达曼波带片。实验结果表明, 该器件可以高效地产生拓扑荷数逐级变化的 1×5 纵向涡旋光阵列, 并可以通过改变外加电压来动态切换器件的开关态。此外, 该器件通过水平/竖直翻转一次或是改变入射光模式, 还可以对产生的纵向涡旋光阵列的拓扑荷数进行反转变换或加减运算。液晶螺旋达曼波带片兼具低成本、高效率、电光可调等优势, 有望促进液晶光电元件在多维光场调控等领域的应用。

关键词: 液晶; 光取向技术; 涡旋光阵列; 达曼光栅

中图分类号: O753⁺.2; O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0178

Liquid crystal spiral Dammann zone plates based on photoalignment technology

LIU Si-jia, ZHANG Yi-heng, ZHU Lin, CHEN Peng*, LU Yan-qing

(College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In recent years, optical vortex arrays have attracted increasing attention for their potential applications in numerous areas, such as optical communications, multiple-particle manipulation and parallel laser fabrication. However, the generation of switchable longitudinal vortex arrays remains a great challenge. In this paper, a liquid crystal (LC) spiral Dammann zone plate is designed via the Dammann encoding method and fabricated via the LC photoalignment technology. The experimental results show that this device can create a 1×5 longitudinal vortex array with high efficiency, and with space-variant topological charges. Through tuning the applied voltage, the device can be switched between ON and OFF state dynamically. Besides, the topological charges of the generated longitudinal vortex array can undergo a reversal or additive transformation by horizontally/vertically flipping the device or altering the mode of incident light. The LC spiral Dammann zone plate is distinguished by low cost, high efficiency and electro-optical tunability, thus facilitating the applications of LC elements in the field of multi-dimensional beam shaping.

收稿日期: 2022-05-27; **修订日期:** 2022-06-12.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2021YFA1202000); 国家自然科学基金(No. 62222507, No.12004175, No.62175101); 江苏省自然科学基金(No.BK20212004, No.BK20200311)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFA1202000); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 62222507, No.12004175, No.62175101); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20212004, No.BK20200311)

*通信联系人, E-mail: chenpeng@nju.edu.cn

Key words: liquid crystal; photoalignment technology; optical vortex array; Dammann grating

1 引言

光束的阵列化技术可以追溯至 20 世纪 70 年代提出的达曼光栅(Dammann Grating, DG)^[1-2]。Dammann 等指出,若在光栅的每个周期内引入一系列特殊设计的相位转变点,制成二值相位的达曼光栅,可将入射光能量均匀地转化到若干个衍射级次上,产生横向等能量阵列。涡旋光是一种广受关注的结构光,含有特殊相位因子 $e^{il\varphi}$,其中 l 为涡旋光的拓扑荷数, φ 为光束横截面上的方位角^[3-4]。为实现涡旋光的阵列化,基于光刻胶^[5]、玻璃刻蚀^[6]、空间光调制器^[7]、光取向液晶^[8](Liquid Crystal, LC)等体系的达曼涡旋光栅被相继提出,广泛应用于一维/二维横向涡旋光阵列的产生。近年来,如何产生纵向(沿光传播方向)甚至三维的涡旋光阵列成为新的研究热点。2010 年 Moreno 等^[7]提出,若对菲涅耳透镜相位进行达曼编码,得到的达曼波带片可以在纵向产生若干等能量焦点。2012 年, Yu 等^[9]利用达曼涡旋光栅、达曼光栅、达曼波带片 3 个分立元件,实现了拓扑荷数可调的涡旋光三维阵列。同年,他们设计出螺旋达曼波带片(Spiral Dammann Zone Plate, SDZP),产生了拓扑荷数逐级变化的纵向、三维涡旋光阵列^[10]。不过,这些刻蚀玻璃制成的器件往往只对单一波长适用,结构固定不可调。2017 年, Huang 等^[11]基于超构表面几何相位实现了 $5 \times 5 \times 5$ 三维涡旋光阵列,具有宽波段、易集成等优势,然而制备工艺复杂,无法切换开关态。空间光调制器产生的三维涡旋光阵列虽然灵活可调,但通常对入射光的偏振方向极为敏感,转换效率受限且成本高昂^[12]。

光取向液晶器件在光场调控领域具有显著优势^[13-15]。利用图案化的光取向液晶产生、调控涡旋光阵列,具有低成本、高效率、电光可调、宽波段适用等特点,因此有望应用于多微粒操控^[16]、多光子显微^[17]、轨道角动量检测^[5]、并行激光加工^[18]等前沿领域。此前, Chen 等基于向列相液晶设计出液晶达曼涡旋光栅^[8]与液晶达曼 q 波片^[19],实现了二维横向涡旋光阵列的高效产生与动态调控。Xu 等^[20]设计并制备出液晶圆形达曼

光栅,实现了完美庞加莱球光束的阵列化操控。2018 年, Chen 等^[21]基于具有螺旋超结构的胆甾相液晶,成功实现了宽波段、反射式的并行涡旋光处理器。2020 年, Zhang 等^[22]设计出达曼涡旋 q 波片,用于实现混合阶庞加莱球光束的阵列化产生与调控。2021 年, Xu 等^[23]利用 wash-out-refill 工艺,又赋予反射式涡旋光处理器波段可调、动态开关的特性。2022 年, Liu 等^[24]将达曼光栅、达曼波带片、 q 波片、PB 透镜集成于一个液晶几何相位器件,实现了偏振敏感的轨道角动量光束三维操控。然而,上述工作大多关注横向涡旋光阵列的实现,或受限于几何相位的偏振敏感性。因此,基于光取向液晶实现偏振无依赖的涡旋光纵向阵列具有重要意义。

本文采用图案化光取向的向列相液晶,设计并制备出液晶螺旋达曼波带片,用于高效产生拓扑荷数逐级变化的纵向涡旋光阵列。通过调节液晶盒上的外加电压,可实现对器件开关态的灵活调控。通过翻转器件或改变入射光模式,还可以对产生的纵向涡旋光阵列进行多功能变换。此外,制得的液晶螺旋达曼波带片还具有偏振无依赖、适用波长可调、易于大规模生产等优势,有望进一步拓宽液晶在多维光场调控等前沿领域的应用。

2 原理与方法

2.1 螺旋达曼波带片

达曼光栅通过在光栅的每个周期内引入特定数量、特定位置的相位转变点(相位转变点两边的相位相差 π),可将入射光均匀地转化到 M 个衍射级次上,产生 $1 \times M$ 横向等能量阵列。对于特定的 M ,通常可以用梯度下降、模拟退火等算法,优化每个周期内相位转变点的数量和位置^[25],优化结果可用一个二值的相位映射函数 Ψ_M 来表示。 x 方向达曼光栅可以视作对线性相位分布 $2\pi x/\Lambda_x$ (Λ_x 为设定的光栅周期)进行达曼编码,即根据相位映射函数 Ψ_M ,将该线性相位映射成为达曼光栅的二值相位分布。例如, $1 \times M$ 达曼光栅的二值相位分布可以表示为 $\Psi_M(2\pi x/\Lambda_x)$ 。

对 $1 \times M$ 达曼光栅的周期性透射函数做傅里叶级数分解,得到

$$t_{\text{DG}} = e^{i\Psi_M\left(\frac{2\pi x}{\Lambda_x}\right)} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_m e^{im\frac{2\pi x}{\Lambda_x}}, \quad (1)$$

式中,达曼光栅相位 $\Psi_M(2\pi x/\Lambda_x)$ 被写作复振幅形式,每个整数 m 都对应于一个衍射级次, $|C_m|^2$ 表示该衍射级次上的归一化能量,也即该级次的衍射效率。对于优化的相位映射函数 Ψ_M , M 个衍射级次对应的 $|C_m|^2$ 近似相等,说明达曼光栅能够将入射光等能量地转化到 M 个衍射级次上。

若将式(1)中的线性相位 $2\pi x/\Lambda_x$ 替换为非涅耳透镜相位与螺旋相位之和 $\pi r^2/\lambda f + l_z \varphi$ (r 为极坐标系下的极径, λ 为入射光波长, f 为设定的焦距, l_z 可取任意非零整数, φ 为极坐标系下的极角),也即对透镜相位与螺旋相位之和进行达曼编码,就能得到螺旋达曼波带片的透射函数:

$$\begin{aligned} t_{\text{SDZP}} &= e^{i\Psi_M\left(\frac{\pi r^2}{\lambda f} + l_z \varphi\right)} = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} C_p e^{ip\left(\frac{\pi r^2}{\lambda f} + l_z \varphi\right)} \\ &= \sum_{p=-\infty}^{+\infty} C_p e^{ip\frac{\pi r^2}{\lambda f}} e^{ip l_z \varphi}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\Psi_M(\pi r^2/\lambda f + l_z \varphi)$ 为螺旋达曼波带片的二值相位分布。由相位因子 $e^{ip\pi r^2/\lambda f}$ 和 $e^{ip l_z \varphi}$ 可知,第 p 个级次对应于焦距为 $-f/p$ 的焦点,以及拓扑荷数为 $p l_z$ 的涡旋光,其归一化能量等于 $|C_p|^2$ 。与式(1)中的 $|C_m|^2$ 一致, M 个等能量级次对应的 $|C_p|^2$ 近似相等,说明螺旋达曼波带片能够在纵向产生 M 个等能量焦点,且焦距为 $-f/p$ 的焦点状态对应拓扑荷数为 $p l_z$ 的涡旋光。

值得注意的是,螺旋达曼波带片产生的 M 个等能量焦点并非都是实焦点。 p 取正整数时,焦距 $-f/p$ 为负,对应虚焦点;而 $p=0$ 时,焦距为无穷大,可以认为焦点位于无穷远处。为产生真正意义上的 $1 \times M$ 纵向涡旋光阵列,可在螺旋达曼波带片后加一个焦距为 F ($F \ll f$) 的聚焦透镜,将螺旋达曼波带片的各类焦点都转换为聚焦透镜焦点附近的实焦点,由此得到 M 个焦距相近的聚焦涡旋光。当满足 $l_z \neq 0$ 时,聚焦涡旋光的拓扑荷数 $p l_z$ 逐级变化。

2.2 正交取向液晶

如上节所述,螺旋达曼波带片的相位分布为非 0 即 π 的二值相位,而正交取向液晶是实现二值相位分布的有效途径。正交取向液晶中,通常

使某些位置的液晶指向矢沿 x 方向,其余位置的液晶指向矢沿 y 方向排列。对于垂直入射的 x 方向线偏振光, x 方向液晶分子加电调节后的折射率为有效非寻常光折射率 n_{eff} , y 方向液晶分子的折射率为寻常光折射率 n_o , 因此两种位置的出射光将存在相位差:

$$\Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}} - n_o) d, \quad (3)$$

式中, d 为液晶盒的厚度。而对于垂直入射的 y 方向线偏振光, x 方向液晶分子的折射率为 n_o , y 方向液晶分子的折射率为 n_{eff} , 两种位置的出射光存在相位差

$$\Gamma_y = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_{\text{eff}}) d. \quad (4)$$

当调节液晶盒上的外加电压至半波条件时, Γ_x 、 Γ_y 均等于 π 的奇数倍,也就是说,经过正交取向液晶后, x 方向、 y 方向线偏振光将获得相同的二值相位分布。

实际上,任意偏振态的入射光都可以分解成 x 方向、 y 方向线偏振光的线性叠加,因此,正交取向液晶对任意偏振态的入射光都有同样的二值相位调制效果,具有偏振无依赖、转换效率高等独特优势。

2.3 基于SD1的液晶光取向技术

早期,液晶分子的取向主要采用接触式的摩擦取向技术。该技术用摩擦产生的沟槽来诱导液晶分子的指向矢方向,比较适合大范围的均一取向。而当需要进行精细的图案化取向时,摩擦取向的技术难度将大幅增加,一种高精度的非接触式取向技术——光取向技术应运而生。光取向技术通常以光敏材料为媒介,利用光敏材料在光照射下的物理/化学反应,对接触光敏材料的液晶分子产生不同方向的锚定作用,理论上能让液晶按照任意的取向角分布排列^[26-27]。相比摩擦取向,光取向技术能够有效避免杂质污染、机械损伤、静电积累等问题,精度更高,质量更好。

SD1 是一种偏振敏感的偶氮染料,普遍用于液晶光取向^[28]。光敏材料 SD1 溶液被旋涂在 ITO 玻璃衬底上,接受紫外曝光。经过足够剂量的线偏振紫外光照射后, SD1 分子将垂直于紫外光偏振方向排列。灌入液晶后,液晶分子指向矢倾向于与液晶层接触的 SD1 分子平行,由此,液晶的取向也垂直于紫外光的线偏振方向。

为了对液晶进行图案化取向,曝光SD1时还需同步控制紫外光偏振方向与样品上的曝光图案。基于这一目标,Wu等^[29]研发出基于数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)的动态掩模光刻系统,能够便捷地实现分步图案化曝光。DMD相当于一个图案可编程的动态掩模,用来控制紫外光携带的图案信息,偏振片同步旋转,用来控制紫外光的线偏振方向。分步曝光过程中,每步采用一个偏振方向进行曝光,诱导曝光图案内的SD1分子垂直于该方向排列。每步曝光结束后,旋转偏振片并切换DMD图案,进行下一个偏振方向的图案曝光,最终SD1将获得随空间变化的取向分布。通过分子间作用力,该取向分布可以传递给液晶分子,从而实现图案化的液晶光取向。

3 结果与分析

3.1 液晶螺旋达曼波带片的设计与制备

基于液晶光取向技术,我们设计并制备出一种 1×5 液晶螺旋达曼波带片,其二值相位分布如图1(a)所示,尺寸为 $5.3 \text{ mm} \times 5.3 \text{ mm}$ 。该相位分布的表达式为

$$\Phi_{\text{LC-SDZP}} = \Psi_5 \left(\frac{\pi r^2}{\lambda f} + l_z \varphi \right). \quad (5)$$

其中, λ 取He-Ne激光器波长 632.8 nm , f 设定为 1.12 m , l_z 设定为1。 Ψ_5 为达曼编码的相位映射函数,对应5个等能量级次,其归一化相位转变点位于 $0, 0.03863, 0.39084, 0.65552, 1$,由Zhou等^[25]用算法优化得到。

为实现该相位分布,利用分辨率为 1024×768 的DMD动态掩模光刻系统对厚度为 $8 \mu\text{m}$ 的液晶盒进行正交取向曝光。曝光过程分为两步:第一步为 0° 线偏振紫外光的大面积曝光,使SD1获得均一取向;第二步为 90° 线偏振紫外光的图案化曝光,曝光图案与图1(a)一致。由于SD1具有可擦写性,第二步曝光的区域内,SD1将重新取向,并最终与相邻区域的取向垂直。曝光结束后,向盒中灌入向列相液晶E7,就得到了正交取向的液晶螺旋达曼波带片。

在正交偏振片和正交偏光显微镜下观察制得的液晶螺旋达曼波带片,并将偏振片方向调至与液晶取向平行或垂直,得到图1(b~d)。在入

射光偏振方向平行或垂直于液晶取向的情况下,光束经过液晶盒后偏振方向不变,无法透过正交检偏片,因此两种不同取向的区域均呈现为黑色。区域边界位置的液晶取向发生突变,不与入射光偏振方向平行或垂直,光经过后偏振态发生改变,一部分光将透过正交检偏片,呈现为浅色线条。图中均匀的黑色区域、清晰的浅色线条,证明制得的液晶器件高质量地实现了图案化正交取向。

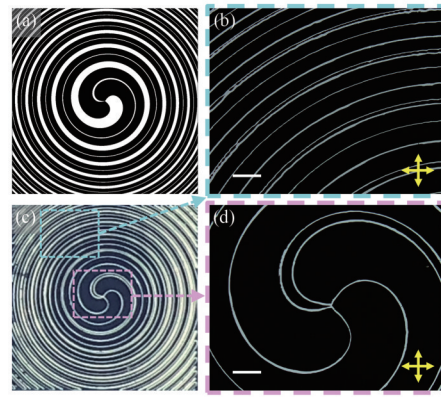


图1 (a) 1×5 液晶螺旋达曼波带片的相位分布;液晶螺旋达曼波带片在(c)正交偏振片、(b,d)正交偏光显微镜下的照片,标尺表示 $200 \mu\text{m}$ 。

Fig. 1 (a) Phase distribution of the 1×5 LC SDZP; Photographs of the LC SDZP under (c) crossed polarizers and (b, d) polarized optical microscope. The scale bar is $200 \mu\text{m}$.

3.2 纵向涡旋光阵列的产生与调控

我们采用制得的液晶螺旋达曼波带片,来实现 1×5 纵向涡旋光阵列的产生与调控,实验光路装置如图2所示。实验采用波长为 632.8 nm 的He-Ne激光器,经透镜组 L_1 、 L_2 扩束后,得到光斑直径 5 mm 的准直高斯光。再经过偏振片(Polarizer, P)与 $1/4$ 波片(Quarter-wave Plate, QWP)的组合,得到左旋/右旋圆偏振光,入射到液晶螺旋达曼波带片上。为了将螺旋达曼波带片产生

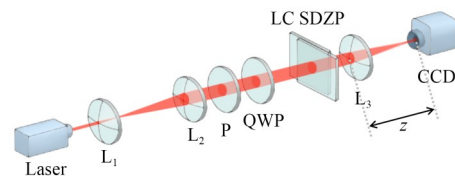


图2 光路示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the optical setup

的虚焦点都提取为实焦点,液晶盒后3 cm处放置了一个焦距 $F=10$ cm的聚焦透镜 L_3 。CCD被固定在一个纵向位移台上,可以通过前后移动来记录不同位置(CCD与 L_3 的间距 z 不同)的光斑形貌。

当对液晶盒施加1 kHz、3.00 V的方波交流电时,液晶盒达到半波条件,聚焦透镜 L_3 的焦点附近成功产生了 1×5 纵向涡旋光阵列,如图3(a)所示。实验测得,5个等能量焦点分别位于 $z=8.4$ cm、 $z=9.2$ cm、 $z=10.0$ cm、 $z=11.0$ cm、 $z=12.0$ cm,对应纵向级次 $p=-2$ 、 $p=-1$ 、 $p=0$ 、 $p=+1$ 、 $p=+2$ 。依据式(2),这5个位置涡旋光的拓扑荷数 l 应分别为 -2 、 -1 、 0 、 $+1$ 、 $+2$ 。图3(a)中,不同位置的涡旋光有着不同大小的中心暗核,对应了拓扑荷数逐级变化的特性。

图3(b,c)分别展示了理论仿真和实验测得的竖直子午面(y - z 平面)光强分布。其中,图3(b)是用菲涅耳衍射积分计算得到的螺旋达曼波带片

衍射光场,从中可以清楚地看到5个聚焦的纵向级次。图3(c)是由CCD在不同位置采集的照片拼接而成。CCD沿着 z 方向每隔0.5 mm采集1张 x - y 平面光斑照片,共采集121次。取每张照片中竖直穿过光斑中心的1列光强值,拼成121列,就得到实测的 y - z 平面光强分布,与理论预测结果一致。5个纵向级次的实际位置在图中用蓝线标出,与图3(a)所示的5个聚焦涡旋光一一对应。

动态开关是液晶螺旋达曼波带片的独有优势。当对液晶盒施加1 kHz、1.82 V的方波交流电时,液晶盒满足全波条件,呈现关态。此时纵向不同位置的光强分布如图3(d)所示,可见出射光只有一个位于 $z=10.0$ cm处的焦点,并且无中心暗核,即只有聚焦透镜 L_3 的作用。由此可知,只要让液晶盒上的外加电压在3.00 V和1.82 V之间切换,就能切换液晶螺旋达曼波带片的开关态,从而实现对纵向涡旋光阵列的动态调控。

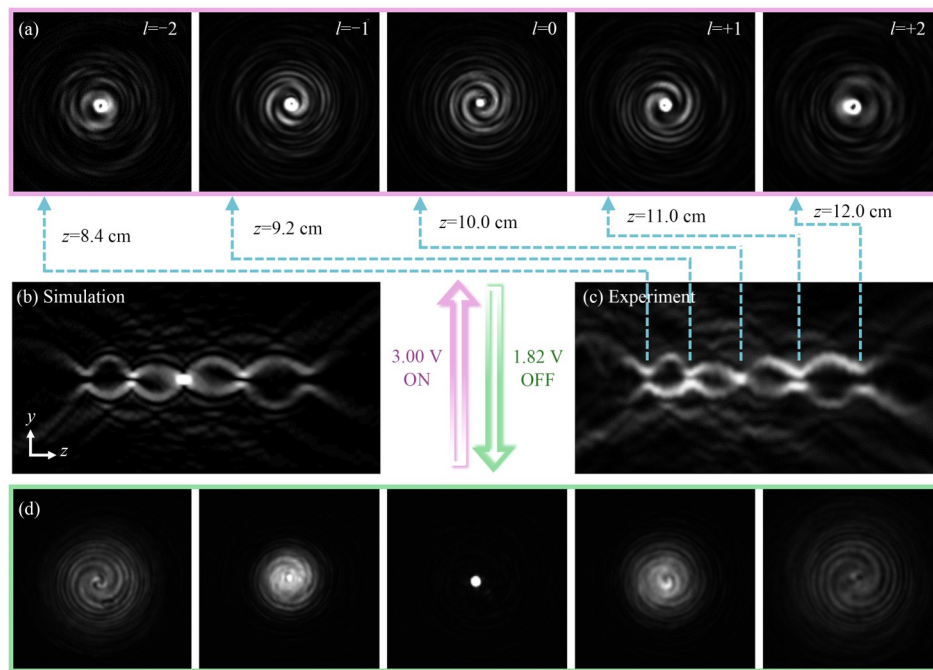


图3 (a)液晶螺旋达曼波带片产生的 1×5 纵向涡旋光阵列;竖直子午面上的(b)模拟、(c)实验光强分布;(d)关态衍射光斑。

Fig. 3 (a) 1×5 longitudinal vortex array generated by the LC SDZP; (b) Simulation and (c) experimental results of the intensity distribution on the meridian plane; (d) Diffraction patterns of OFF state.

3.3 纵向涡旋光阵列的多功能变换

通过改变入射光的拓扑荷数,可以对液晶螺旋达曼波带片产生的光场进行拓扑荷数的加减

运算,进而实现纵向涡旋光阵列的多功能变换。例如,用拓扑荷数 $+1$ 的涡旋光入射液晶螺旋达曼波带片,那么5个级次涡旋光的拓扑荷数将同

时加1,拓扑荷数原本为-1的涡旋光将转变为拓扑荷数为0、无中心暗核的高斯光。实验中,利用 $q=+0.5$ 的液晶 q 波片^[30]来产生入射涡旋光,其液晶分子取向角的理论分布如图4(a)所示,制得的液晶 q 波片的正交偏光显微照片见图4(b)。此时的实验光路局部如图4(c)所示。如果入射 q 波片的是左旋圆偏振高斯光,那么将产生拓扑荷数 $+2q$ 的右旋圆偏振涡旋光,作为螺旋达曼波带片的入射光,反之,如果是右旋圆偏振光入射 q 波

片,将产生拓扑荷数 $-2q$ 的左旋圆偏振涡旋光作为后端入射光。图4(d)展示了拓扑荷数+1的右旋圆偏振光(见图中插入的小图)入射时,液晶螺旋达曼波带片产生的 1×5 纵向涡旋光阵列。经拓扑荷数运算, $z=8.4\text{ cm}$ 、 $z=9.2\text{ cm}$ 、 $z=10.0\text{ cm}$ 、 $z=11.0\text{ cm}$ 、 $z=12.0\text{ cm}$ 五个位置对应的拓扑荷数同时加1,即从原本的-2、-1、0、+1、+2变为-1、0、+1、+2、+3。其中, $z=9.2\text{ cm}$ 处的涡旋光被还原成高斯光,与理论预测结果一致。

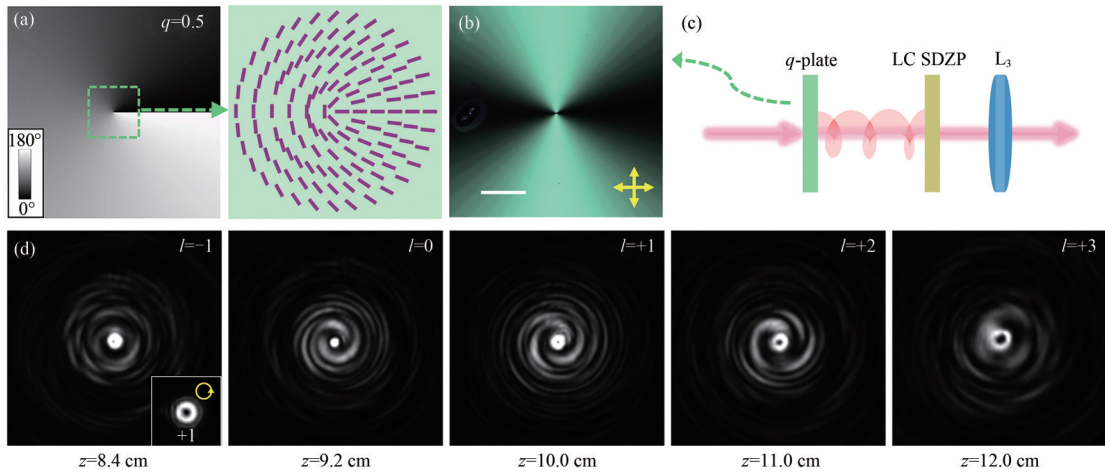


图4 $q=+0.5$ 液晶 q 波片的(a)取向角理论分布、(b)正交偏光显微照,标尺表示 $200\text{ }\mu\text{m}$; (c)涡旋光入射光路示意图; (d)拓扑荷数+1的涡旋光入射时,液晶螺旋达曼波带片产生的 1×5 纵向涡旋光阵列,小图表示入射涡旋光。

Fig. 4 (a) Theoretical orientation angle and (b) micrograph of the LC q -plate ($q=+0.5$), the scale bar is $200\text{ }\mu\text{m}$; (c) Optical setup with vortex beam incidence; (d) 1×5 longitudinal vortex array generated by the LC SDZP with the incidence of a vortex beam (topological charge: +1). The inset represents the incident vortex beam.

十分有趣的是,若将光路中的液晶螺旋达曼波带片水平/竖直翻转一次,依然能产生拓扑荷数逐级变化的 1×5 纵向涡旋光阵列,但相应位置涡旋光的拓扑荷数将发生反转, $z=8.4\text{ cm}$ 、 $z=9.2\text{ cm}$ 、 $z=10.0\text{ cm}$ 、 $z=11.0\text{ cm}$ 、 $z=12.0\text{ cm}$ 5个位置对应的拓扑荷数分别变为+2、+1、0、-1、-2。这就意味着,通过翻转液晶盒,同一个液晶螺旋达曼波带片可以变换出两种不同拓扑荷数分布的纵向涡旋光阵列。

实验中,将液晶螺旋达曼波带片竖直翻转,产生的纵向涡旋光阵列如图5(a)所示。拓扑荷数+1的右旋圆偏振涡旋光入射时,5个等能量级次的拓扑荷数均加1,如图5(b)所示, $z=11.0\text{ cm}$ 处的涡旋光被还原成高斯光,验证了拓扑荷数的反转效应。在上述拓扑荷数+1的右旋圆偏振光后加一个半波片,得到拓扑荷数+1的左旋圆偏

振作为入射光,此时产生的涡旋光阵列如图5(c)所示。图5(b)和(c)相比,拓扑荷数相同、偏振态互相正交的两种入射光产生了具有相同拓扑荷数分布(+3、+2、+1、0、-1)的纵向涡旋光阵列,证明了液晶螺旋达曼波带片具有入射偏振无依赖的特性。而若用左旋圆偏振光入射 $q=+1$ 的液晶 q 波片,将得到拓扑荷数+2的右旋圆偏振作为入射光,此时螺旋达曼波带片产生的纵向涡旋光阵列如图5(d)所示,拓扑荷数分布变为+4、+3、+2、+1、0, $z=12.0\text{ cm}$ 处的涡旋光被还原成了高斯光。以上结果展示出翻转器件、改变入射光模式为纵向涡旋光阵列带来的多功能变换效果,其中翻转液晶螺旋达曼波带片可以实现拓扑荷数分布的反转变换,而涡旋光入射可以实现拓扑荷数的整体加减运算。

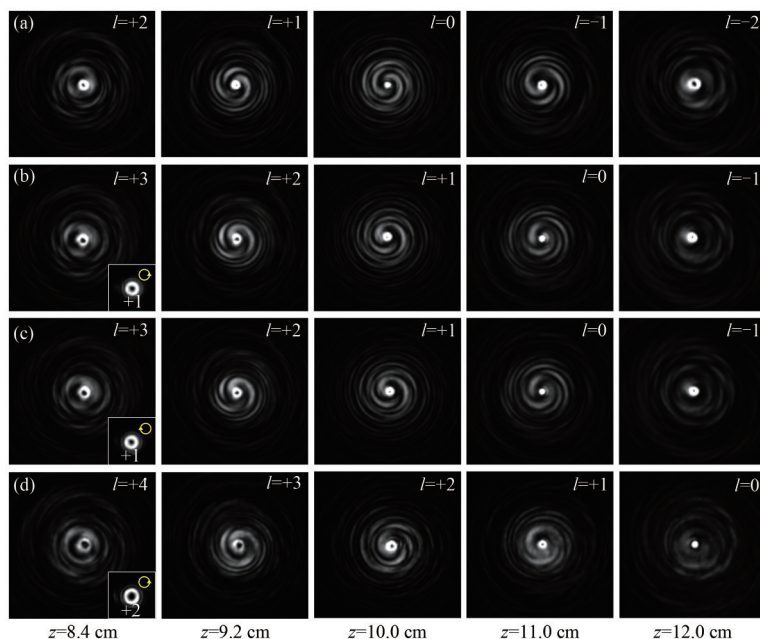


图 5 竖直翻转的液晶螺旋达曼波带片产生的 1×5 纵向涡旋光阵列。(a) 高斯光入射; (b) 拓扑荷数 +1 的右旋圆偏振涡旋光入射; (c) 拓扑荷数 +1 的左旋圆偏振涡旋光入射; (d) 拓扑荷数 +2 的右旋圆偏振涡旋光入射, 小图表示入射涡旋光。

Fig. 5 1×5 longitudinal vortex array generated by the vertically flipped LC SDZP with different incident light. (a) Gaussian beam; (b) Right circularly polarized vortex beam with the topological charge of +1; (c) Left circularly polarized vortex beam with the topological charge of +1; (d) Right circularly polarized vortex beam with the topological charge of +2. The insets represent the incident vortex beams, respectively.

4 结 论

本文基于光取向向列相液晶体系, 实现了纵向涡旋光阵列的产生与调控。设计出一种 1×5 螺旋达曼波带片的二值相位分布, 通过光取向技术制备得到正交取向的液晶螺旋达曼波带片, 并利用该器件高效地产生了拓扑荷数逐级变化的 1×5 纵向涡旋光阵列, 实验结果与理论相符。这种新型液晶器件具备开关态可调的独特优势, 并

可通过翻转器件、改变入射光模式实现纵向涡旋光阵列拓扑荷数的反转变换或加减运算。当然, 除了向列相液晶, 基于光取向技术的手性液晶材料也可以用来产生涡旋光纵向阵列。以胆甾相液晶为代表的手性液晶具有多元刺激响应性^[31-33], 有望进一步增加器件的功能维度。本工作进一步探索了液晶在多维光场调控领域的潜力, 提升了涡旋光的操控维度, 有望应用于光通信、微粒操控、激光加工等前沿领域。

参 考 文 献:

- [1] DAMMANN H, GÖRTLER K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms [J]. *Optics Communications*, 1971, 3(5): 312-315.
- [2] DAMMANN H, KLOTZ E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1977, 24(4): 505-515.
- [3] SHEN Y J, WANG X J, XIE Z W, *et al.* Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [4] CHEN J, WAN C H, ZHAN Q W. Engineering photonic angular momentum with structured light: a review [J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(6): 064001.
- [5] ZHANG N, YUAN X C, BURGE R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex

- gratings [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3495-3497.
- [6] YU J J, ZHOU C H, JIA W, *et al.* Generation of controllable rotating petal-like modes using composited Dammann vortex gratings [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1667-1672.
- [7] MORENO I, DAVIS J A, COTTRELL D M, *et al.* Encoding generalized phase functions on Dammann gratings [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1536-1538.
- [8] 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.
- [9] YU J J, ZHOU C H, JIA W, *et al.* Three-dimensional Dammann vortex array with tunable topological charge [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13): 2485-2490.
- [10] YU J J, ZHOU C H, JIA W, *et al.* Generation of dipole vortex array using spiral Dammann zone plates [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6799-6804.
- [11] HUANG L L, SONG X, REINEKE B, *et al.* Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 338-346.
- [12] DAVIS J A, COTTRELL D M, MCCORMICK K R, *et al.* Arithmetic of focused vortex beams in three-dimensional optical lattice arrays [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2040-2050.
- [13] ZHU L, XU C T, CHEN P, *et al.* Pancharatnam-Berry phase reversal via opposite-chirality-coexisted superstructures [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 135.
- [14] 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.
- [15] 余丽红, 沈冬, 郑致刚. 基于 SLM 投影拼接技术的液晶光学元件制备[J]. 液晶与显示, 2022, 37(9): 1132-1139.
- YU L H, SHEN D, ZHENG Z G. Fabrication of liquid crystal optical elements based on SLM projection splicing technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(9): 1132-1139. (in Chinese)
- [16] BHEBHE N, WILLIAMS P A C, ROSALES-GUZMÁN C, *et al.* A vector holographic optical trap [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17387.
- [17] GU M, LIN H, LI X P. Parallel multiphoton microscopy with cylindrically polarized multifocal arrays [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3627-3630.
- [18] HASEGAWA S, HAYASAKI Y. Holographic vector wave femtosecond laser processing [J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2014, 8(2): 73-88.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] XU C T, CHEN P, ZHANG Y H, *et al.* Tunable band-pass optical vortex processor enabled by wash-out-refill chiral superstructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(15): 151102.
- [24] LIU S J, CHEN P, GE S J, *et al.* 3D engineering of orbital angular momentum beams via liquid-crystal geometric phase [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2200118.
- [25] ZHOU C H, LIU L R. Numerical study of Dammann array illuminators [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5961-5969.
- [26] CHEN K X, XU C T, ZHOU Z, *et al.* Multifunctional liquid crystal device for grayscale pattern display and holography with tunable spectral-response [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(3): 2100591.
- [27] 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 H M, WU S B, WANG J G, *et al.* Photoalignment enabled liquid crystal microstructures for optics and photonics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 921-938. (in Chinese)

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] CHEN P, MA L L, HU W, *et al.* Chirality invertible superstructure mediated active planar optics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2518.
- [32] ZHANG Y H, CHEN P, XU C T, *et al.* Dynamically selective and simultaneous detection of spin and orbital angular momenta of light with thermoresponsive self-assembled chiral superstructures [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(3): 1050-1057.
- [33] CHEN P, SHEN Z X, XU C T, *et al.* Simultaneous realization of dynamic and hybrid multiplexed holography via light-activated chiral superstructures [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(5): 2200011.

作者简介:



刘思嘉(1999—),女,江苏南京人,博士研究生,2021年于南京大学获得学士学位,主要从事液晶微结构操控及光场调控方面的研究。E-mail:dz21340007@smail.nju.edu.cn



陈鹏(1992—),男,江苏扬州人,博士,副教授,2019年于南京大学获得博士学位,主要从事液晶微纳光学及其应用方面的研究。E-mail:chenpeng@nju.edu.cn