

文章编号:1007-2780(2022)11-1411-09

基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转

袁 方¹, 谭庆贵^{1,2}, 王光耀³, 袁 瑞³, 胡 伟^{3*}

(1. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100;

2. 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100;

3. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要:基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转技术在航空航天、激光通信、车载雷达、光信息处理、生物医药和军事对抗等领域具有重要应用前景,并得到了极大的关注。液晶聚合物偏振光栅可以实现高效率、大角度的光束偏转,并且制备工艺简单、成本低,逐渐被应用到非机械式光束偏转系统中。本文采用两种偏振全息光路分别实现大周期和小周期的液晶聚合物偏振光栅的制备,获得的液晶聚合物偏振光栅最高衍射效率达到 99.3%。级联两个液晶聚合物偏振光栅,再层叠液晶聚合物\铁电液晶\液晶聚合物波片组,实现了更大角度范围的偏转,验证了 70 μ s 的 4 通道光束快速扫描。

关 键 词:偏振光栅;光束扫描;液晶聚合物;铁电液晶

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0240

Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating

YUAN Fang¹, TAN Qing-gui^{1,2}, WANG Guang-yao³, YUAN Rui³, HU Wei^{3*}

(1. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an 710100, China;

3. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Beam steering is widely used in aerospace, laser communication, vehicle-mounted radar, optical information processing, biomedicine and military confrontation. Non-mechanical beam steering has received intensive attention. Liquid-crystal-polymer-based polarization grating can realize high-efficient, large-angle beam steering with merits of simple and low-cost fabrication, and thus has been gradually adopted in non-mechanical beam steering. In this paper, two circularly polarized holographic optical paths are used to fabricate the liquid-crystal-polymer-based polarization grating of different pitches, respectively. The measured diffraction efficiency reaches over 99.3%. Multiple liquid-crystal-polymer-based gratings are cascaded and then stacked with liquid crystal polymer/ferroelectric liquid crystal/liquid crystal polymer waveplates to achieve fast response (70 μ s) and large angle 4-channel beam deflections.

收稿日期:2022-07-11;**修订日期:**2022-07-23.

基金项目:空间微波技术重点实验室装发重点实验室基金重点项目(No. 6142411195411)

Supported by Key Project of National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave
(No. 6142411195411)

*通信联系人, E-mail: huwei@nju.edu.cn

Key words: polarization grating; beam steering; liquid crystal polymer; ferroelectric liquid crystal

1 引言

光束偏转是指对发射的激光光束的方向进行精确动态控制的一种技术。该技术在诸如航空航天、激光通信、车载雷达、光信息处理与存储、生物医学和军事对抗等众多领域有着广泛的应用。传统的光束偏转系统依靠机械装置(如万向节等)改变光轴方向来实现光束偏转,其结构复杂、精度低、体积大、能耗高,在运动过程中还需要克服惯性的影响,性能会受到很大的制约^[1]。相比之下,新型的光束偏转技术不再依赖于光轴方向的机械改变,而是通过波前相位的控制来实现光束方向的电调控制,具有轻便、灵活、低功耗等优点。但是,由于受到材料特性、物理极限以及工艺水平等因素的限制,某一项独立的技术很难兼顾偏转角度、效率、精度以及响应时间等指标来完全满足现代光电系统应用的需求。目前,新型的光束偏转技术主要有液晶光学相控阵、基于微机电系统的微镜阵列等。其中,液晶光学相控阵^[2-3]由于其随机可编程、高精度波束偏转以及支持多链路多目标同时处理的特点得到了极大的关注。但是,由于其像素电极之间存在间距以及液晶层厚度较大,导致其光束偏转的角度范围较小,并且存在明显的插入损耗,价格也较为昂贵;因此,实现低成本、大角度、高效率的光束偏转仍是一个艰巨的挑战^[4]。微机电系统的微镜阵列是指利用磁力或者静电的作用使微透镜阵列发生平动或转动,从而实现光束偏折的效果,但驱动电压高、制备复杂、偏转角度小的问题限制了其应用场景^[5]。而液晶偏振光栅具有制备成本低、衍射效率高的特点,使得基于液晶偏振光栅的光束偏折技术在非机械光束偏转领域也逐渐受到科研团队的关注。近年来,以液晶偏振光栅为代表的平面光学元件在增强现实、虚拟现实和3D全息等领域得到了广泛应用^[6-9]。

对于偏振光栅的研究可以追溯到20世纪80年代,不同于振幅和相位型光栅,偏振光栅可以通过调整入射光的偏振态从而实现分光的作用^[10-11]。1984年保加利亚科学家Nikolova和Todorov等发现控制入射光的偏振态可以调整士

1级之间的能量分布,并且可以将绝大部分能量聚集到其中一个衍射级上^[12]。直到2004年,美国布朗大学的Crawford小组才真正利用偏振全息的方式制备出液晶偏振光栅,但衍射效率最高只达到了10%^[13]。2007年,Provenzano改善了液晶偏振光栅的制备工艺,使得衍射效率可以达到98%^[14-15]。2017年,中国兵器装备研究院的徐林等设计了一种新型的可制备大口径的液晶偏振光栅的曝光装置^[16]。2018年,北京航空航天大学郭琦等将液晶偏振光栅与基于铁电液晶的相位开关相结合实现了快速响应的光束偏振器件^[17]。2019年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(中科院光所)的李松振成功制备了光栅周期为3~500 μm 的液晶偏振光栅,最高衍射效率高达98%^[18]。2020年,同为中科院光所的赵志伟实现了多层液晶旋涂后能够保持15 mm以上直径的无缺陷光栅面积,制备出2 μm 周期、口径14 mm $\times$ 14 mm的液晶偏振光栅,可以使532 nm激光的偏转角达到 $\pm 15^\circ$ 、衍射效率可达98%^[19]。2021年,南京大学袁瑞等利用级联铁电液晶半波片和液晶聚合物偏振光栅的方式实现了32个自旋角动量的快速编码,编码时间低于70 μs ,整体效率高于85%^[20]。

目前,国内在液晶光控取向薄膜制备、高分辨液晶(聚合物薄膜)取向结构制备、大尺寸高精度光控取向曝光系统等诸多方面已取得一定成绩,但尚需朝向大口径、快响应、大角度光束偏转系统进行更加深入研究。本文结合两种不同的圆偏振全息光路制备周期互补的大孔径偏振光栅,优化液晶聚合物薄膜涂覆工艺实现半波条件的精确匹配,获得了1 064 nm处液晶聚合物偏振光栅高达99.3%的衍射效率,设计铁电液晶/液晶聚合物波片组并级联不同偏振光栅组件,实现了70 μs 级快速响应的大角度光束偏折,最大偏折角可达22.9°,有望在激光通信、激光雷达等领域获得应用。

2 液晶偏振光栅

液晶偏振光栅是通过两束正交且振幅相等

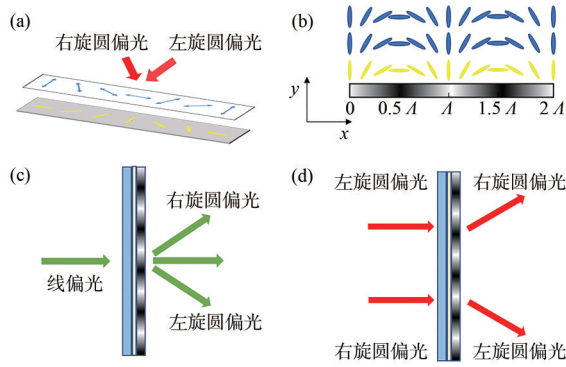


图 1 (a)圆偏振全息示意图;(b)液晶偏振光栅;(c)不满足半波条件的线偏光入射示意图;(d)满足半波条件的左右旋圆偏光入射示意图。

Fig.1 (a) Schematic diagram of circular polarization holography; (b) Liquid crystal polarization grating; (c) Incidence of linearly polarized light onto the liquid crystal polarization grating that does not meet the half-wave condition; (d) Incidence of circularly polarized lights onto the liquid crystal polarization grating that perfectly meets the half-wave condition.

的圆偏振光相互干涉的圆偏振全息手段制备的衍射元件^[10-11],如图 1(a)所示,左旋圆偏光和右旋圆偏光在取向层干涉,形成偏振方向周期性变化的线偏振光场。光控取向材料偶氮苯磺酸钠(SD1)分子长轴会垂直于线偏光的偏振方向分布,再通过分子间相互作用力诱导液晶分子定向,就可以实现液晶分子指向矢的周期性排列,如图 1(b)^[21-23]所示。在一个周期内液晶分子的指向矢会发生 180° 的变化^[24],这种在 x 轴方向的液晶分子的周期性分布可以描述为:

$$\alpha = -\frac{\pi x}{\Lambda} + \alpha_0, \quad (1)$$

其中: Λ 是液晶聚合物偏振光栅的周期, α_0 为初始方位角,这里 $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ 。一般使用琼斯矩阵描述液晶偏振光栅的光学性质^[25-27],其透过率函数为:

$$T = R(-\alpha) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\Gamma) \end{bmatrix} R(\alpha), \quad (2)$$

其中,旋转矩阵 $R(\alpha)$ 为:

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Γ 为光经过液晶后引入的动力学相位,将旋转矩阵代入式(2)可以得到液晶偏振光栅的透过率函

数为:

$$T = \cos \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + i \sin \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \\ -\sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}, \quad (4)$$

利用欧拉公式对式(4)进行改写:

$$T = \cos \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - i e^{i2\alpha} \sin \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix} - i e^{-i2\alpha} \sin \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从式(5)可知存在 3 个衍射级次,分别为 0 级和 ± 1 级,其中 $e^{i2\alpha}$ 和 $e^{-i2\alpha}$ 项是引入的两个共轭的几何相位。对于线偏光入射时,入射光电场的琼斯矢量为 $E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$,经过液晶偏振光栅后出射光的电场矢量如下:

$$E_{out} = T \times E_{in} = \cos \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - i e^{i2\alpha} \sin \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} - i e^{-i2\alpha} \sin \frac{\Gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

出射光束包括 0 级的线偏光、+1 级的左旋圆偏光和 -1 级的右旋圆偏光。

根据矢量衍射理论,光栅的 m 级衍射效率是由于透射光场的矢量傅里叶系数决定的^[28-29]:

$$D_m = \frac{1}{\Lambda} \int_0^\Lambda T(x) E_{in} \exp\left(-\frac{i2\pi mx}{\Lambda}\right) dx, \quad (7)$$

对应的衍射效率计算方式如式(8):

$$\eta_m = \frac{|D_m|^2}{|E_{in}|^2}. \quad (8)$$

将透过率函数式(5)代入式(7),得:

$$D_0 = \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} E_{in}, \quad (9)$$

$$D_1 = \frac{i}{2} \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} -1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} E_{in}, \quad (10)$$

$$D_{-1} = \frac{i}{2} \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} -1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} E_{in}, \quad (11)$$

而对于 $m > 1$ 的衍射级次,理论上其矢量傅里叶变换系数为 0。将矢量傅里叶展开系数代入式(8),求得各级衍射效率为:

$$\eta_0 = \cos^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (12)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1 \mp S_3}{2} \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (13)$$

$$\eta_m = 0, (m \neq 0, \pm 1), \quad (14)$$

其中: S_3 为描述入射光圆偏振程度的斯托克斯参量, $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$ 。当左旋圆偏振光入射时, $S_3 = 1$ 。当液晶层对光波产生的相位延迟为 π 时, +1 级衍射效率为 100%。根据理论推导可知: 对于不满足半波条件的线偏光入射, 出射光束包括保持原来偏振状态的 0 级线偏光, 以及 +1 级的左旋圆偏光和 -1 级的右旋圆偏光, 如图 1(c)。而满足半波条件的左(右)旋圆偏光将会完全转换为右(左)圆偏光, 如图 1(d)。液晶分子的周期性结构导致衍射光束偏折的现象, 可以利用光栅方程^[19]式(15)计算衍射角度:

$$\theta = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right), \quad (15)$$

其中, λ 为入射光的波长, $\pm$ 代表衍射方向。

3 液晶聚合物偏振光栅的制备

液晶聚合物偏振光栅可以采用偏振全息的方式制备, 利用两束振幅相等的正交圆偏光干涉对光控取向 SD1 材料, 而这种取向可以通过分子间作用力传递给液晶分子, 通过修改液晶聚合物的浓度和旋涂参数就可以制备出满足不同半波条件的液晶聚合物偏振光栅。这里采用两种分别对应大小周期液晶聚合物偏振光栅的偏振全息光路: 基于马赫-曾德尔干涉的大口径偏振全息光路、基于传统双光束干涉的大口径偏振全息光路。

基于马赫-曾德尔干涉的大口径偏振全息光路如图 2 所示。选择功率为 1 W 的 405 nm 波长的单纵模长相干激光器(DLC HOLO-LITHO 405, Toptica), 前端使用可耐受高功率激光的偏振分光棱镜进行分束, 可充分利用激光光强。光束通过偏振分光棱镜后可以变为相互正交的线偏光, 再经过 1/4 波片生成旋性相反的圆偏光。光束偏振处理后经过透镜系统扩束, 再经过定制的大尺寸分光棱镜对两束光合束, 形成大口径偏振全息。该光路的分束、反射、偏振处理等在扩束透镜组之前, 可降低器件尺寸要求从而降低成本。此外, 该光路只需旋转分光棱镜即可改变两束光之间的夹角, 实现不同周期的偏振光栅制备。

基于马赫-曾德尔干涉的大口径偏振全息光路干涉方案后端光束的合束采用分光棱镜, 在制

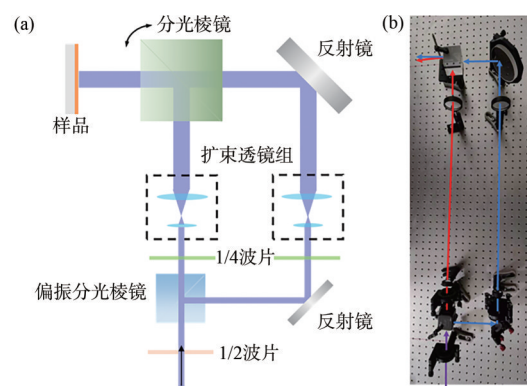


图 2 (a) 基于马赫-曾德尔干涉的大口径偏振全息光路示意图; (b) 实物光路图。

Fig. 2 (a) Schematic illustration of a large-aperture polarization hologram setup based on Mach-Zendel interference; (b) Practical optical path.

备小周期偏振光栅时, 需要增大两束光的夹角, 使得两束正交圆偏振光交叠区域变小, 会限制光束直径, 因此, 该系统只胜任大周期偏振光栅的制备。我们采用传统双光束干涉大口径圆偏振全息光路来解决这一问题(图 3)。光束经过扩束透镜组再经过反射镜反射到样品表面形成干涉图案, 该光路同样在保证降低元器件成本的同时, 兼顾到了制备大尺寸偏振光栅的需求。基于传统双光束干涉的大口径偏振全息光路在制备小周期偏振光栅方面具有优势; 制备大周期偏振光栅时, 光束夹角小, 要经过较长距离才能有效交叠, 对光学平台空间带来挑战。因此, 利用上述两种全息光路的优势互补, 即可同时满足不同

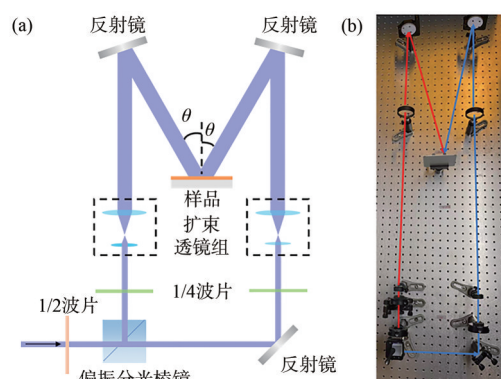


图 3 (a) 基于传统双光束干涉的大口径偏振全息光路示意图; (b) 实物光路图。

Fig. 3 (a) Schematic illustration of a large-aperture polarization hologram setup based on conventional double-beam interference; (b) Practical optical path.

周期偏振光栅的大口径、高质量的制备。

液晶聚合物偏振光栅所需要的材料准备包括光取向剂 SD1 溶液和液晶聚合物溶液的配制。将 SD1 以 0.5% 的质量分数溶解于二甲基甲酰胺(DMF)溶剂中形成 SD1 光取向剂。液晶聚合物材料选用 UCL-P100(DIC)并以 5% 的质量分数溶解于丙二醇甲醚醋酸酯(PGMEA)形成液晶聚合物溶液。液晶聚合物偏振光栅制备流程主要包括光取向薄膜涂覆、圆偏振全息曝光和液晶聚合物薄膜涂覆聚合。光取向薄膜涂覆:将 SD1 光取向剂旋涂在玻璃基板表面,然后将基板置于 100 °C 的热台上退火处理以形成均匀薄膜;圆偏振全息曝光:样品置于图 2 或图 3 样品放置处曝光 7 min,完成取向信息写入;最后将液晶聚合物旋涂于 SD1 层之上,并置于 80 °C 热台上烘干 2 min 以蒸发溶剂。取下基板使其在室温下冷却 2 min,将所得基板置于 365 nm 波长的 LED 灯(20 mW/cm²)下照射 2 min,完成聚合。多次重复该旋涂和聚合步骤,实现对目标波长半波条件的精确匹配,得到液晶聚合物偏振光栅。

我们使用卤素灯、正交偏振片和光谱仪等组成测试系统对均一取向的液晶聚合物波片的相位延迟量进行测试。将波片置于正交的偏光片之间,旋转样品使透射光谱强度最低,将此状态设置为光谱仪的 Dark state,再旋转样品 45°,将此状态下透射光谱设置为 Bright state,旋转检偏器使得正交偏振片变为平行状态,使用光谱仪的 Reference 模式寻找波谷位置,此处即为满足半波条件的波长^[30]。优化的浓度和旋涂参数直接应用于液晶聚合物光栅旋涂,即可实现波谷位置与目标波长的精准匹配,获得高衍射效率的液晶聚合物偏振光栅。可进一步使用光学透明胶(Optically Clear Adhesive, OCA)将液晶聚合物薄膜从玻璃基板转移到透明柔性基底上,形成柔性聚合物偏振光栅。

基于前述两类全息曝光系统实现了 2 μm~2 mm 范围内周期可任意设定的液晶偏振光栅制备。图 4(a)展示了满足 633 nm 半波条件的液晶聚合物偏振光栅样品在偏光显微镜下的显微图,图 4(b)展示了满足 1 064 nm 半波条件的液晶聚合物偏振光栅样品在偏光显微镜下的显微图。图 4(c)为我们制备 1 064 nm 波段的 16.6 μm 大

孔径样品的实物照片,光栅区域直径为 46 mm。图 4(d)中,图 4(b)的 4 个光栅对 1 064 nm 入射光的衍射角度依次为 7.0°、5.4°、4.7°和 3.7°,与光栅方程仿真的曲线相吻合。我们还进行了衍射效率测试,衍射效率定义为目标衍射级光强与整体透射光强之比。对 4 个样品分别以五点法进行衍射效率测试,平均衍射效率均超过了 99%,8.7 μm 的液晶聚合物偏振光栅最高效率达到 99.3%。图 4(e)展示了制备的柔性液晶聚合物偏振光栅。图 4(f)直观展示了液晶聚合物偏振光栅对日光灯的高效色散而形成的彩虹。

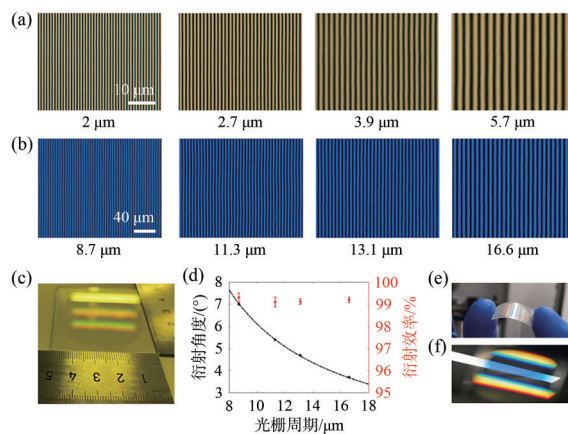


图 4 (a)偏光显微镜下的液晶聚合物偏振光栅(633 nm); (b)偏光显微镜下的液晶聚合物偏振光栅(1 064 nm); (c)液晶聚合物偏振光栅实物图; (d)偏振光栅(1 064 nm)的衍射效率和衍射角度测试数据和光栅方程曲线; (e)柔性偏振光栅; (f)样品对日光灯的衍射效果图。

Fig. 4 (a) Polarizing microscope image of liquid-crystal-based polarization gratings (633 nm); (b) Polarizing microscope image of liquid-crystal-polymer-based polarization gratings (1 064 nm); (c) Photographs of the fabricated liquid-crystal-polymer-based polarization grating (1 064 nm); (d) Diffraction efficiency and diffraction angle test data and grating equation curves for polarization grating (1 064 nm); (e) Flexible polarization grating; (f) White light diffraction of the sample.

4 液晶聚合物偏振光栅的级联

当液晶聚合偏振光栅的周期变小时,液晶聚合物偏振光栅的制备难度剧烈增加,导致衍射效

率大幅下降,因此不能通过直接减小光栅周期来实现大角度的偏转。如图 5(a)所示,采用级联偏振光栅的方式来获得大偏转角,经过第二个光栅之后的衍射角^[19] θ_{out} 为:

$$\theta_{out} = \arcsin\left(\sin\theta_{in} \pm \frac{\lambda}{\Lambda}\right), \quad (16)$$

其中: θ_{in} 为入射角, $\pm$ 代表衍射方向。利用铁电液晶来实现半波片的快速开关^[20]。基于铁电液晶(Ferroelectric Liquid Crystal, FLC)半波片实现左右旋圆偏光的快速切换可以使用琼斯矩阵^[20,31]来描述:

$$E_{out} = J_{QWP} J_{FLCHWP} E_{in} = \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

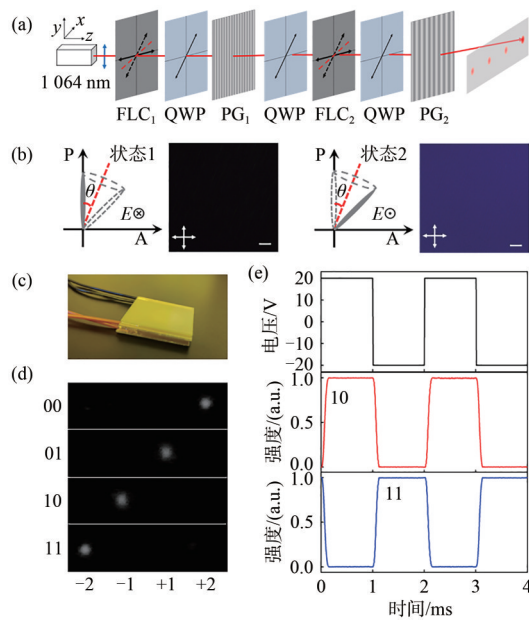


图 5 (a) 光束快速调制的光路图;(b) 铁电液晶半波片在相反极性电压下液晶指向矢以及对应的正交偏光显微图,比例尺大小为 $100\ \mu\text{m}$;(c) 级联器件实物图;(d) 衍射图案;(e) 驱动铁电液晶 500 Hz 的方波信号(上)及-1级(中)和-2级(下)的开关响应。

Fig. 5 (a) Optical setup for fast optical beam steering; (b) Orientations of liquid crystal director with opposite polarity voltage and its corresponding micrographs of FLC half wave plate; (c) Practical sample; (d) Diffraction patterns; (e) Waveform of 500 Hz square wave (top) with a driving voltage of 20 V. Switching responses of -1st order (middle) and -2nd order (bottom). The scale bar is $100\ \mu\text{m}$.

其中: J_{QWP} 、 J_{FLCHWP} 是 1/4 波片和 FLC 半波片的琼斯矩阵,1/4 波片的快轴与 x 轴夹角为 45° , α 是 FLC 半波片的快轴和 x 轴的夹角, E_{in} 为偏振方向在 yo 平面内的线偏光。当 $\alpha=0^\circ$ 时, $E_{out} = i \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$;

当 $\alpha=45^\circ$ 时, $E_{out} = \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$ 。通过控制 FLC 的分子指向矢(FLC 半波片和 x 轴夹角),即可实现左右旋圆偏光的快速切换。由于偏振光栅对圆偏振光加载相位,故需在 FLC 半波片前后各添加一个 1/4 波片进行偏振转换。

将两个不同周期液晶聚合物偏振光栅($4\ \mu\text{m}$ 和 $8.7\ \mu\text{m}$)级联来制备一个 1×4 的适配 $1064\ \text{nm}$ 波长的光束偏折器。图 5(a)为光路图示意图,其中两个 FLC 半波片为主动式的器件,通过施加相反电压可以实现 FLC 主轴由 x 轴向黑色虚线方向偏转。选择性施加电场驱动不同 FLC 波片组,即可将光束转向 4 个不同衍射级上(± 1 级和 ± 2 级),对应的衍射角度分别为 $\pm 8.3^\circ$ 和 $\pm 22.9^\circ$ 。FLC 半波片作为唯一的主动式开关决定了光束偏转的响应速度。我们选用的铁电液晶为 FD4004N(DIC)。在清洗好的 ITO 玻璃基板上旋涂 SD1,利用 $3.5\ \mu\text{m}$ 的间隔子分隔制备成盒,均一向后在 90°C 的热台上完成灌晶缓慢降至室温,即得到满足 $1064\ \text{nm}$ 的 FLC 半波片。该半波片工作在电致解螺旋模式。外置电压使其螺旋结构完全消旋,液晶指向矢有两个取向方向并与施加电压的正负有关,呈现高对比度二值响应^[32]。如图 5(b)所示,P、A 分别代表起偏和检偏方向,状态 1 和状态 2 对应了在两种相反电场驱动下的铁电液晶指向矢方向,两者间的夹角为 $2\theta=44.1^\circ$ ^[20,33]。状态 1 的 FLC 指向矢平行于起偏方向,无相位延迟,不改变入射偏振状态,故在正交偏光显微镜下呈现暗态;状态 2 FLC 指向矢与起偏方向夹角约为 45° ,具有半波相位延迟,使入射偏振旋转 90° ,故呈现亮态。如前述推导,结合 1/4 波片和 FLC 半波片即可实现左右旋圆偏光的快速切换。对 FLC 半波片加负电时,其光轴平行于 x 轴,定义为 1;对 FLC 半波片加正电时,其光轴与 x 轴呈 44.1° 角,定义为 0。通过对加载到 FLC 半波片上的电信号进行编码控制,即可实现衍射级次的寻址。图 5(c)展示了我们制备的光束偏折器件,器件尺寸为 $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$,1/4

波片和偏振光栅均以柔性膜的形式粘贴在 FLC 液晶盒上,使得级联器件更加轻薄。图 5(d)展示了级联器件对直径为 2 mm 的高斯光束的光束转向效果,由于入射光波长为 1 064 nm,我们借助于近红外显色卡进行拍摄。这里借用液晶显示中的定义方式,将透过率由 10% 上升到 90% 的时间定义为切换的响应时间。当施加 20 V、500 Hz 的交流电时,10~11 编码切换的响应时间分别为 67 μs 和 69 μs ,相较于传统向列相液晶提高了 2~3 个数量级。实测器件整体效率达到 86.3%,验证了光束的高效、快速、大角度偏转。

在上述级联方式的基础上,可以级联更多的液晶偏振光栅和偏振控制组件实现更大角度的光束偏转,也可以正交叠加偏振光栅组件实现二维光束偏转。进一步与高精度、小角度的液晶光学相控阵技术相结合,实现光束粗扫与细扫的互补,能够实现大角度、高精度、高效率的电控光束

扫描^[2-3]。该级联器件可用于信号的原路接收^[34],大的天线孔径有效减小了光束发散角,允许接收器从特定方向收集更多的光,可以更好地抑制背景辐射噪声^[35],在雷达探测、视野拓展和偏振成像等技术领域具有潜在应用^[36-37]。

5 结 论

研究了液晶偏振光栅大角度偏转控制方法,成功建立了两套圆偏振全息光路用于周期互补的液晶偏振光栅制备,优化旋涂工艺并采用半波条件标定测量,实现了衍射效率高达 99.3%、光栅周期跨越 2 μm ~2 mm、通光孔径达到 46 mm 的液晶偏振光栅制备与性能验证。进一步通过级联偏振光栅和铁电液晶半波片,实现了高斯光束四衍射级间的高效快速切换,响应时间小于 70 μs ,效率达到 86.3%。

参 考 文 献:

- [1] ZOU Y C, ZHOU P, SI L, *et al.* Theoretical study on beam steering efficiency of liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061402.
- [2] XIAO F, KONG L J, CHEN J. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4585-4590.
- [3] CHEN J, CUI G L, KONG L J, *et al.* Grating lobes analysis based on blazed grating theory for liquid crystal optical-phased array [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 097102.
- [4] 陈黎,杜鹏,颜宏,等.光学相控阵在光束偏转中的应用分析及进展[J].*激光与红外*, 2013, 43(4): 351-355.
CHEN L, DU P, YAN H, *et al.* Progress and applied analysis of the optical phased array in beam steering [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 351-355. (in Chinese)
- [5] 叶坤涛,董太源,贺文熙,等.基于 MEMS 微镜的长波近红外光谱仪的设计与实现[J].*光谱学与光谱分析*, 2014, 34(10): 2858-2862.
YE K T, DONG T Y, HE W X, *et al.* Design and implementation of a long wavelength near infraRed spectrometer based on MEMS scanning mirror [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(10): 2858-2862. (in Chinese)
- [6] LU Y Q, LI Y. Planar liquid crystal polarization optics for near-eye displays [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 122.
- [7] LI Y L, LI N N, WANG D, *et al.* Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [8] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [9] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 446-459.
- [10] ATTIA M, JONATHAN J M C. Anisotropic gratings recorded from two circularly polarized coherent waves [J]. *Optics Communications*, 1983, 47(2): 85-90.
- [11] TODOROV T, TOMOVA N, NIKOLOVA L. High-sensitivity material with reversible photo-induced anisotropy [J]. *Optics Communications*, 1983, 47(2): 123-126.

- [12] NIKOLOVA L, TODOROV T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1984, 31(5): 579-588.
- [13] EAKIN J N, XIE Y H, PELCOVITS R A, *et al.* Zero voltage Freedericksz transition in periodically aligned liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(10): 1671-1673.
- [14] 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.
- [15] PROVENZANO C, CIPPARRONE G, MAZZULLA A. Photopolarimeter based on two gratings recorded in thin organic films [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 3929-3934.
- [16] 徐林, 史俊锋, 陈园园, 等. 一种可制造大口径液晶偏振光栅器件的曝光装置及方法: 中国, 107966885A[P]. 2018-04-27.
- XU L, SHI J F, CHEN Y Y, *et al.* Exposure device and method capable of manufacturing large-aperture liquid crystal polarization grating device: China, 107966885A[P]. 2018-04-27.
- [17] GUO Q, XU L, SUN J T, *et al.* Fast switching beam steering based on ferroelectric liquid crystal phase shutter and polarisation grating [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(9): 1383-1388.
- [18] 李松振. 液晶偏振光栅的设计及其光偏转特性研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- LI S Z. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [19] 赵志伟. 大偏转角液晶偏振光栅的研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- ZHAO Z W. Study on liquid crystal polarization grating with large deflection angle [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [20] YUAN R, LIU Y, TAN Q G, *et al.* An all-liquid-crystal strategy for fast orbital angular momentum encoding and optical vortex steering [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 6000106.
- [21] CHIGRINOV V, PIKIN S, VEREVOCHNIKOV A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 061713.
- [22] 王华才, 曹瀚, 于宏冠, 等. 基于光取向液晶又型光栅的涡旋光产生器[J]. 量子电子学报, 2022, 39(1): 120-126.
- WANG H C, CAO H, YU H G, *et al.* Optical vortex generator based on photopatterned liquid crystal fork gratings [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(1): 120-126. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] KIM J. Liquid crystal geometric phase holograms for efficient beam steering and imaging spectropolarimetry [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2011.
- [25] ONES R C. A new calculus for the treatment of optical systems. IV. [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1942, 32(8): 486-493.
- [26] LI S Z, ZHAO Z W, WANG C M, *et al.* Electrically tunable photo-aligned two-dimensional liquid crystal polarisation grating [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 46(8): 1175-1182.
- [27] BOMZON Z, BIENER G, KLEINER V, *et al.* Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1141-1143.
- [28] TERVO J, TURUNEN J. Paraxial-domain diffractive elements with 100% efficiency based on polarization gratings [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 785-786.
- [29] TAN L, HO J Y, KWOK H S. Extended Jones matrix method for oblique incidence study of polarization gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 051107.
- [30] 唐明劫. 基于液晶聚合物薄膜实现集成与可重构的光路系统[D]. 南京: 南京大学, 2018.

- TANG M J. Integrated and reconfigurable optical paths based on stacking optical functional films [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. (in Chinese)
- [31] YEH P, GU C. *Optics of Liquid Crystal Displays* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [32] POZHIDAEV E, MINCHENKO M, MOLKIN V, *et al.* High frequency low voltage shock-free ferroelectric liquid crystal: a new electro-optical mode with electrically suppressed helix [C]//*Proceedings of the 31st International Display Research Conference* 2011. Arcachon: SID, 2011.
- [33] 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.
- [34] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al.* Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [35] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
- JIANG H L, AN Y, ZHANG Y L, *et al.* Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication [J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 34(3): 207-217. (in Chinese)
- [36] VAUGHAN J M. Coherent laser spectroscopy and doppler lidar sensing in the atmosphere [J]. *Physica Scripta*, 1998, 1998(T78): 73-76.
- [37] 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
- LI S J, JIANG H L, ZHU J P, *et al.* Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)

作者简介:



袁 方(1971—),男,陕西宝鸡人,硕士,高级工程师,1997年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事卫星高速数传技术方面的研究。E-mail: 13359241002@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,主要从事液晶光子学方面的研究。E-mail: huwei@nju.edu.cn