

文章编号:1007-2780(2022)09-1132-08

基于 SLM 投影拼接技术的液晶光学元件制备

余丽红¹, 沈冬¹, 郑致刚^{1,2*}

(1. 华东理工大学 物理学院, 上海 200237;

2. 华东理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200237)

摘要:提出了一种以硅基液晶空间光调制器(LCOS SLM,以下简称 SLM)为基础的投影拼接式光取向技术。通过结合 SLM 和二维移动平台可以实现任意尺寸、任意几何相位图案化分布的液晶光学元件的制备。基于此技术,通过连续扫描曝光的方法制备了多种液晶光学元件:一维偏振光栅、二维光栅、微透镜阵列和全息图。实验结果表明:通过该技术可以实现连续相位分布的光学元件的制备和扩大光学元件的口径;尺寸为 25.4 mm×25.4 mm 的一维偏振光栅的衍射效率达到 98.32%,且各区域误差不超过 1%;可以仅改变加载到 SLM 上的曝光图样,实现二维周期性或其他复杂图案的液晶光学元件的制备。基于 SLM 的投影拼接式光取向技术具有高分辨率、高效率、工艺简单、可实现任意尺寸光学元件制备等特点,可以进一步推动液晶光学元件的发展和实际应用。

关键词:液晶光学元件;空间光调制器;光取向;几何相位;拼接

中图分类号:0753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0153

Fabrication of liquid crystal optical elements based on SLM projection splicing technology

YU Li-hong¹, SHEN Dong¹, ZHENG Zhi-gang^{1,2*}

(1. College of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. College of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: This paper proposed a projection splicing photo-alignment technology based on a liquid crystal on silicon spatial light modulator (LCOS SLM). By combining SLM and two-dimensional translation stage, the fabrication of liquid crystal optical elements with arbitrary size and arbitrary Pancharatnam-Berry phase pattern can be realized. Based on this technology, a variety of liquid crystal optical elements were fabricated by continuous scanning exposure method, such as one-dimensional polarization grating, two-dimensional grating, microlens array and hologram. The experimental results show that: this technology can realize the fabrication

收稿日期:2022-04-28;**修订日期:**2022-05-10.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61822504, No. 51873060, No. 62035008);上海市教委创新项目(No. 2021-01-07-00-02-E00107);上海市教育发展基金会和上海市教委“曙光计划”(No. 21SG29)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61822504, No. 51873060, No. 62035008); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(No. 2021-01-07-00-02-E00107);“Shuguang Program” of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (No. 21SG29)

*通信联系人, E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn

of optical elements with continuous phase distribution and enlarge the aperture of optical elements; the diffraction efficiency of a one-dimensional polarization grating with a size of $25.4\text{ mm} \times 25.4\text{ mm}$ reaches 98.32%, and the error in each area does not exceed 1%; the liquid crystal optical elements with two-dimensional periodicity or other complex pattern can be fabricated only by changing the exposure pattern loaded to the SLM. The SLM-based projection splicing photo-alignment technology has the characteristic of high resolution, high efficiency, simple process, and can realize the fabrication of optical elements of any scale, which can further promote the development and practical application of liquid crystal optical elements.

Key words: liquid crystal optical elements; spatial light modulator; photo-alignment; geometric phase; splicing

1 引言

Pancharatnam-Berry(PB)相光学元件,也称为几何相位光学元件,通过控制光学各向异性材料光轴的空间变化实现对相位的调制^[1]。PB相光学元件具有高衍射效率和偏振选择性,在光学开关、AR/VR显示、生物成像等领域具有广阔的应用前景^[2-8]。目前存在两种实现PB相光学元件的方式:一是在均匀介质上刻蚀超表面结构;二是控制液晶分子的方位角^[9-11]。基于超表面结构的PB相光学元件虽然结构紧凑,但存在成本高、难以动态调控等局限。而液晶作为一种性能优异的各向异性材料,具有电光可调性、高稳定性、双折射率高等特性,是制备可切换的PB相光学元件的最佳材料。基于液晶的PB相光学元件被广泛应用于光束调制、光场调控、显示等领域^[12-14]。

PB相液晶光学元件是基于光控取向原理实现的,其制作方法可以大致分为3类:偏振干涉法、掩膜法和数字控制法^[15]。偏振干涉法是利用两束或多束偏振光干涉,形成相应的几何相位图,并被记录在液晶的光取向层,从而实现液晶几何相位光学元件的制备^[16-19]。偏振干涉法的步骤比较简单,制备出的光学元件精度也比较高。但是这种方法对环境要求高,容易受到振动、气流等影响,而且能制备的光学元件单一。掩膜法是通过将偏振光照射到设计的主掩膜版上,透过掩膜版的偏振光会作用于液晶的光取向层,从而实现图案化液晶光学元件的制备^[20-22]。掩膜法是最简单的光取向方法,可实现的光学元件比偏振干涉法更加丰富。但是该方法制备不同结构的光学元件需要不同的掩膜版,掩膜版制成之后就不能再改变,则不可避免地会增加成本。而复杂

结构的光学元件需要的掩膜版则更多,并且需要进行多次曝光,这必然会增加生产周期。数字方法主要包括激光直写技术^[10,23]、基于数字微镜器件(Micro-mirror Device, DMD)的动态掩膜曝光系统^[24-28]和基于空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)的单步曝光方法^[29-30]。激光直写技术通过强度可变的激光束对基板表面的光刻胶等抗腐蚀材料实施变剂量逐点扫描曝光,经显影后样品的抗腐蚀层表面形成不同的浮雕轮廓。这种方法可以实现任意PB相位图案化分布的液晶光学元件的制备,制作过程较为稳定。但是通过这种方法制备光学元件所需要的曝光次数和像素的个数相同,而且制备过程需要高精度的机械旋转。基于DMD的动态掩膜曝光系统通过改变DMD加载的图片和偏振片旋转角度,可以实现任意PB相图案化分布的光学元件的制备。基于此方法制备光学元件不需要更换掩膜版,因此不会发生机械运动,消除了多次曝光的掩膜对准问题。但是每次曝光都只能产生某一个方向的线偏振光,因此只能实现一个方向的分子取向,复杂图形的光学元件需要多次的曝光和控制偏振片的精确转动^[25]。2019年上海交通大学提出了基于SLM的单步曝光方法,通过控制SLM面上任意像素的相位调制,实现了任意图案化分布的光学元件的制备。但是该方法的分辨率仅为 $8\text{ }\mu\text{m}$,同时也限制了液晶光学元件的尺寸^[1,30]。

为了推动PB相液晶光学元件的实际应用,本文介绍和分析了以SLM为基础的投影拼接式光取向技术,该技术可以实现任意尺寸、任意PB相位图案化分布的液晶光学元件的制备。利用此技术实现了基于SD1光取向材料的多种PB相

光学元件制备,如一维光栅、二维光栅、微透镜阵列及全息图等,并对这些光学元件进行了表征和分析。最后对利用该技术制备 PB 相光学元件的研究进行了总结和展望。

2 基于 SLM 的投影拼接式技术

2.1 结构与原理

图 1 为以 SLM 为基础的投影拼接式光取向技术的光路。它主要由激光器、透镜、偏振片、分束镜、1/4 波片、SLM、CCD、二维移动平台、20 倍物镜组成。在该技术中由计算机控制激光器的开关、物镜的上下移动(用于聚焦)以及二维移动平台的移动,所使用的是反射式相位型 LCOS SLM,生产于西安中科微星光电科技有限公司,型号是 FSLM-2K55-P。CCD 的作用是监控聚焦过程。在该光路中,激光光束的波长为 405 nm,1/4 波片的快轴方向与垂直入射到 1/4 波片的偏振光的偏振方向之间的夹角为 45°。根据琼斯矩阵,照射到二维移动平台的输出光束的归一化琼斯矢量可以表示为:

$$E_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & i \sin \frac{\delta}{2} \\ i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}, (1)$$

式中, δ 为 SLM 的某个像素的相位延迟量。当线偏振光照射到 SLM 面上被反射时,光束的线偏振分量(o 光和 e 光)之间会产生相位延迟。在通过 1/4 波片之后,o 光和 e 光分别转变为两个旋向相反的圆偏振光并被叠加,形成偏振方向为 δ 的线偏振光。由于偶氮染料 SD1 在吸收线偏振紫外光后发生光致异构反应,由反式结构转变成顺式结构,但顺式结构不稳定,会重新回复至反式结构并伴随分子转动;由于其具有二向色性的吸收,SD1 分子的长轴方向最终会垂直于入射光的偏振方向[28]。而液晶分子与 SD1 分子之间存在范德华力,因此液晶分子的排列方向也与入射到样品的线偏振光的偏振方向垂直。

在 SLM 中,每个像素点都可以通过改变灰度值来改变施加的电压,从而改变该像素点的相位延迟量。因此,我们通过改变加载到 SLM 上的不同灰度图,实现不同 PB 相图案化光学元件的制备。该技术能够通过不同的扫描曝光方式

实现任意尺寸的 PB 相液晶光学元件的制备,兼顾了光学元件的大口径和高光学效率。该方法还具备更高的制备效率、更强的环境适应性和普适性。

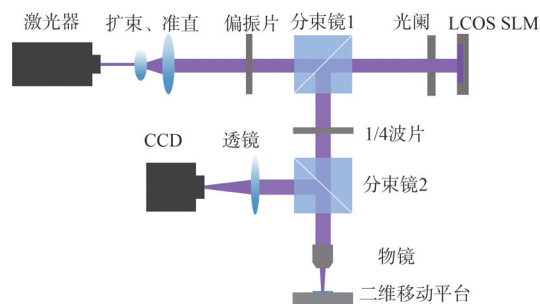


图 1 基于 SLM 的投影拼接式的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of projection mosaic system based on SLM

2.2 两种连续扫描方式

该技术进行曝光的扫描方式可以根据制作图案的不同大致分为两种:线扫描和阵列扫描。我们可以利用 CAD 画出它们的路径图,如图 2 所示。

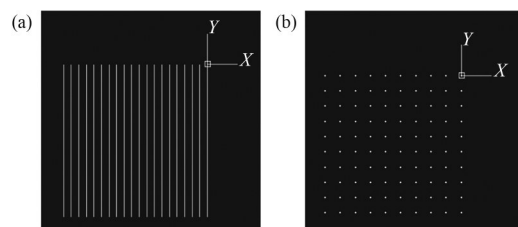


图 2 (a) 线扫描曝光路径; (b) 阵列扫描曝光路径。

Fig. 2 (a) Line scanning exposure path; (b) Array scanning exposure path.

图 2(a) 是根据线扫描方式进行曝光的路径图。通过这种扫描方式可以制作一维周期性结构的光学元件,例如一维偏振光栅。为了获得均匀的任意尺寸光栅,该技术通过设置光阑的大小调整了 SLM 的有效工作面积从 1 920 pixel × 1 080 pixel 缩小到 400 pixel × 400 pixel。该技术的分辨率主要由成像系统和 SLM 决定,我们测量了设置光阑后的在样品上曝光图案的大小,其长和宽均约为 132.8 μm ,可以计算出该技术的单个像素的实际大小为 0.332 μm 。利用该技术制备一维光栅时需要考虑光栅每个周期包含的像

素数(周期像素数),计算出周期像素数在400内的最大倍数,记为 x 。因此线扫描方式的路径间距在CAD中表现为线与线之间的距离,为 $0.332x\ \mu\text{m}$ 。图2(b)是根据阵列扫描方式进行曝光的路径示意图,表现为多次单点曝光。通过这种扫描方式可以制作二维周期性结构或者其他非周期性的复杂结构的光学元件,如二维光栅、微透镜阵列、全息图等。利用该技术制作二维周期性结构时,与一维光栅类似,阵列扫描方式的路径间距在CAD中表现为点与点之间的距离。当需要制作非周期性结构时,可以默认其阵列扫描方式的路径间距均为 $132.8\ \mu\text{m}$,这是SLM的有效工作区域投影到样品上的区域边长。

2.3 灰度值与液晶分子偏转角度的关系

在使用该技术制备液晶光学元件之前,需要对SLM加载的灰度值与进行曝光后液晶分子的偏振方向之间的关系进行测量。在SLM上加载256张不同的单一灰度图(灰度值0~255)并使它们曝光在同一液晶盒上。通过测量该液晶盒上每张灰度图对应曝光区域的液晶分子的偏振角度得到灰度值与液晶分子偏转角度之间的关系,如图3所示。

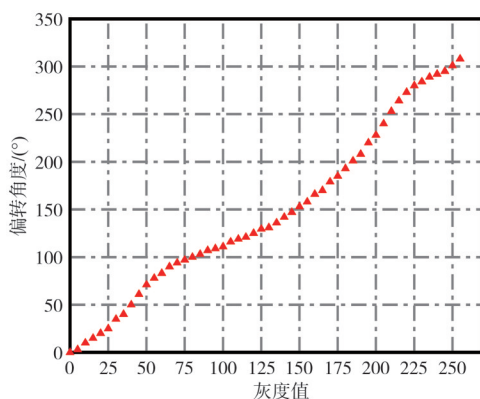


图3 该技术中不同灰度值对应的液晶分子偏转角度

Fig. 3 Deflection angles of liquid crystal molecules corresponding to different grayscale values in the system

从图3中可以看出,液晶分子的偏转角度受灰度调制的最大值达到了 300° 。并且经过整合数据发现在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 范围内,每 1° 都存在一个对应的灰度值,这意味着可以实现液晶分子在任意方向定向排列和准连续变化。根据该对应关系曲线,可以设计不同的灰度图从而实现不同光学

元件的制备。

3 PB相液晶光学元件的制备

根据图3的关系曲线,设计加载到SLM上的不同图案的灰度图并通过CAD设计连续扫描曝光路径。我们将具有SD1光取向层的空液晶盒放置在二维移动平台上,通过操控平台的移动可以对SD1光取向层进行图案化的取向。然后在 60°C 的恒温台上填充向列相液晶E7完成液晶光学元件的制备。通过该技术制备了以下多种PB相液晶光学元件。

3.1 一维周期性光学元件——一维光栅

通过该技术,可以制备一维周期性光学元件,如一维液晶偏振光栅(也可称为液晶几何相位光栅)。实验制备了尺寸为 $25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 、周期约为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的一维连续偏振光栅,其液晶分子指向矢在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 以 22.5° 为增量连续变化。图4(a)是加载到SLM上的一维偏振光栅的灰度图即曝光图样;图4(b)是一维偏振光栅在偏光显微镜下的图像,无明显的拼接痕迹。实验使用He-Ne激光器对偏振光栅的衍射效率进行了测试,测量了左旋圆偏振光、线偏振光和右旋圆偏振光入射到一维偏振光栅的衍射图(图4(c))。

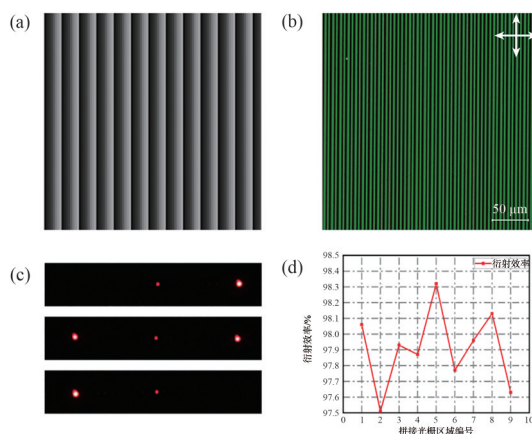


图4 液晶偏振光栅。(a)曝光图像;(b)在偏光显微镜下的微观图;(c)在不同偏振光照射下的衍射图;(d)不同区域的峰值衍射效率。

Fig. 4 Liquid crystal polarization grating. (a) Exposure pattern; (b) Micrograph under a polarization microscope; (c) Diffraction pattern for different polarizations of the probe beam; (d) Peak diffraction efficiency of different regions.

此外还将一维偏振光栅分成 3×3 个区域,并测量了该一维偏振光栅中不同区域的峰值衍射效率,如图4(d)所示。在图4(d)中可以看到,偏振光栅不同区域的峰值衍射效率均在97.5%以上,峰值衍射效率的误差不超过1%,其最大值为98.32%,接近液晶偏振光栅衍射效率的理论值。这表明使用该技术可以制备较大尺寸均匀无缝的液晶偏振光栅,而且制备过程稳定可靠。

3.2 二维周期性光学元件

通过该技术,还制备了二维周期性液晶光学元件,包括二维光栅和微透镜阵列。二维液晶光栅是可以将一束光分为多束衍射光的光学元件,且其衍射效率可调,在量子计算、光通信和光学安全等领域存在巨大的应用潜力^[31-34]。而微透镜阵列是由直径从几百纳米到几毫米的微透镜按一定排列顺序组成的,是现代光学系统中不可缺少的组件之一,在成像、传感、光学互联等领域应用广泛^[35-37]。

3.2.1 二维液晶光栅

实验通过阵列扫描方式对多个曝光后获得的二维光栅进行拼接,从而实现了尺寸为 $5\text{ mm}\times5\text{ mm}$ 、周期为 $6.64\text{ }\mu\text{m}$ 二维液晶光栅的制备。图5(a)和5(b)分别为二维光栅的曝光图样(两个灰度对应的液晶取向角度分别为 45° 和 90°)和在偏光显微镜下的织构图。实验中同样使用He-Ne

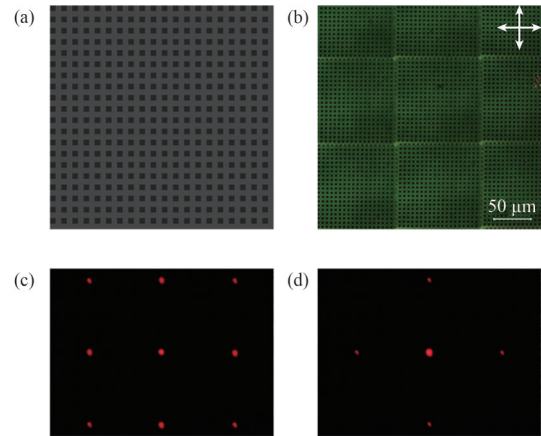


图5 液晶二维光栅。(a)曝光图样;(b)在偏光显微镜下的微观图;在电压为(c)0 V、(d)5 V时的衍射图样。
Fig. 5 Two-dimensional liquid crystal grating. (a) Exposure pattern; (b) Micrograph under a polarization microscope; Diffraction patterns at voltages of (c) 0 V and (d) 5 V.

激光器作为探测光束测试二维光栅在不同电压下的衍射效率,图5(c)和5(d)分别为未施加电压和施加电压为5 V时的衍射图样。当施加在样品上的电压逐渐增加时,除0级衍射光强逐渐增加以外,其他衍射级光强均逐渐减弱。未施加电压时,二维光栅的衍射效率可以达到27%左右。

3.2.2 微透镜阵列

同样地,使用该技术还制备了尺寸为 $5\text{ mm}\times5\text{ mm}$ 的液晶微透镜阵列。通过阵列扫描方式对多个曝光后获得的微透镜进行了拼接,从而实现微透镜阵列的制备。该制备过程中使用的阵列扫描曝光路径与制备二维光栅过程中使用的阵列扫描曝光路径相同。图6(a)是微透镜的曝光图样,图6(b)是经过拼接后获得的微透镜阵列在偏光显微镜下的微观图。根据菲涅尔透镜的计算公式,可以计算出在探测光束的波长为 632.8 nm 时,微透镜阵列中各个微透镜的焦距约为 7 mm 。图6(c)是微透镜阵列在聚焦位置的衍射图样。经过多次测量,发现微透镜阵列中每个微透镜的焦距误差不超过10%。

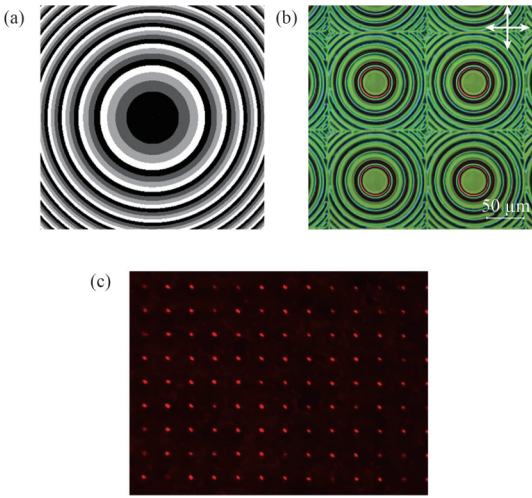


图6 (a)微透镜的曝光图样;(b)微透镜阵列在偏光显微镜下的微观图;(c)微透镜阵列在聚焦位置的衍射图样。
Fig. 6 (a) Exposure pattern of microlens; (b) Micrograph under a polarization microscope and (c) diffraction pattern at focus position of microlens array.

3.3 非周期性光学元件——全息图

除了制备周期性的液晶光学元件以外,通过该技术还可以实现非周期性光学元件的制备,如

全息图。首先利用计算机对图7(a)进行编程从而制作出全息灰度图如图7(b)所示,其尺寸为 $4\,000\text{ pixel}\times 4\,000\text{ pixel}$ 即 $13.28\text{ }\mu\text{m}\times 13.28\text{ }\mu\text{m}$ 。然后将全息灰度图分割成尺寸为 $400\text{ pixel}\times 400\text{ pixel}$ 的曝光图样,对每个图样按顺序进行曝光并拼接,最终得到如图7(c)所示的微观图。用激光照射全息图得到重建后的“3”图样(图7(d))。

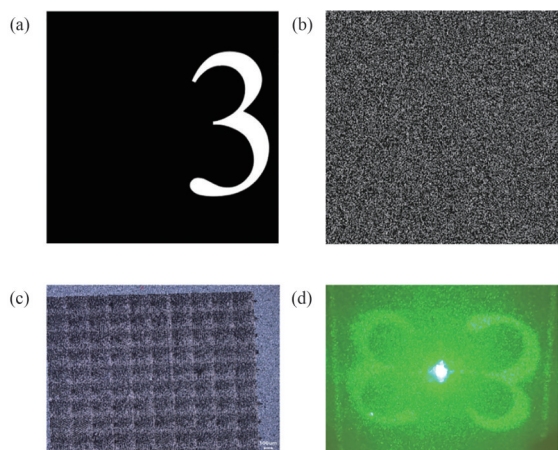


图7 全息图。(a)原始图案;(b)全息曝光图样;(c)在偏光显微镜下的微观图;(d)重建的全息图。

Fig. 7 Hologram images. (a) Original pattern; (b) Holographic exposure pattern; (c) Microscopic image under a polarization microscope; (d) Reconstructed image.

4 结 论

本文介绍了以SLM为基础的投影拼接式光取向技术的结构和原理,并基于该技术实现了多种PB相液晶光学元件的制备。实验成功制备了尺寸为 $25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 的连续偏振光栅,并测得其衍射效率最大值为98.32%,各个区域的峰值衍射效率不超过1%;制备了尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的二维周期性结构的光学元件(二维光栅和微透镜阵列),其中二维光栅的衍射效率约为27%,而微透镜阵列的焦距误差不超过10%;通过拼接制备了尺寸为 $13.28\text{ }\mu\text{m}\times 13.28\text{ }\mu\text{m}$ 的全息图。目前在该技术中,SLM的使用面积仅为 $400\text{ pixel}\times 400\text{ pixel}$,因此通过选用性能更优异的SLM可以增加该技术制备的有效工作面积,从而进一步提升制备效率。在本技术中还可以通过选用更高分辨率的SLM或选用更高倍数的物镜,提升该技术的分辨率。本文所述的光取向技术兼顾了PB相液晶光学元件的大口径和高光学效率。相对传统全息技术的制备方式,该技术具备更高的制备效率、更强的环境适应性和普适性,为PB相液晶光学元件在工程应用方面的进一步发展提出了可行的方案。

参 考 文 献:

- [1] 刘澍鑫,庄仲森,李燕,等. 基于单步曝光的光配向液晶器件研究及应用[J]. 液晶与显示,2021,36(6):761-771.
LIU S X, ZHUANG Z S, LI Y, *et al.* Research and application: liquid crystal devices fabricated by single-exposure photoalignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 761-771. (in Chinese)
- [2] MEAD C A. “Block diagonalization” as generalization of Pancharatnam-Berry phase relation for multidimensional spaces [J]. *Physical Review A*, 1991, 44(3): 1473-1476.
- [3] YU H, ZHOU Z Y, QI Y L, *et al.* Pancharatnam-Berry optical lenses [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D107-D111.
- [4] ZHAN T, LEE Y H, TAN G J, *et al.* Pancharatnam-Berry optical elements for head-up and near-eye displays [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D52-D65.
- [5] FÖLLING J, BOSSI M, BOCK H, *et al.* Fluorescence nanoscopy by ground-state depletion and single-molecule return [J]. *Nature Methods*, 2008, 5(11): 943-945.
- [6] YIN K, ZHAN T, XIONG J H, *et al.* Polarization volume gratings for near-eye displays and novel photonic devices [J]. *Crystals*, 2020, 10(7): 561.
- [7] 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.
- [8] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al.* Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [9] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements [J]. *Science*, 2014, 345

- (6194): 298-302.
- [10] KIM J, LI Y M, MISKIEWICZ M N, *et al.* Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts [J]. *Optica*, 2015, 2(11): 958-964.
 - [11] LEE G Y, HONG J Y, HWANG S H, *et al.* Metasurface eyepiece for augmented reality [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4562.
 - [12] ZHAN T, LEE Y H, WU S T. High-resolution additive light field near-eye display by switchable Pancharatnam-Berry phase lenses [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4863-4872.
 - [13] LEE Y H, YIN K, WU S T. Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27008-27014.
 - [14] 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.
 - [15] LIN T G, XIE J, ZHOU Y J, *et al.* Recent advances in photoalignment liquid crystal polarization gratings and their applications [J]. *Crystals*, 2021, 11(8): 900.
 - [16] GAO K, MCGINTY C, PAYSON H, *et al.* High-efficiency large-angle Pancharatnam phase deflector based on dual-twist design [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6283-6293.
 - [17] HUANG Y H, LI M S, KO S W, *et al.* Helical wavefront and beam shape modulated by advanced liquid crystal q-plate fabricated via photoalignment and analyzed by Michelson's interference [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(26): 6557-6561.
 - [18] SHI Y, LAI Y M, LIU Y J, *et al.* Two-dimensional liquid crystal polarization grating via linearly polarized light modified multi-beam polarization interferometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13061-13071.
 - [19] SHI Y, LIU Y J, SONG F, *et al.* Photoalignment-induced two-dimensional liquid crystal polarization structure via multi-beam polarization interferometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7683-7692.
 - [20] NERSISYAN S R, TABIRYAN N V, STEEVES D M, *et al.* Characterization of optically imprinted polarization gratings [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4062-4067.
 - [21] FU W X, ZHOU Y Q, YUAN Y D, *et al.* Generalization of Pancharatnam-Berry phase interference theory for fabricating phase-integrated liquid crystal optical elements [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(3): 369-376.
 - [22] 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.
 - [23] MISKIEWICZ M N, ESCUTIM J. Direct-writing of complex liquid crystal patterns [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12691-12706.
 - [24] FU W X, ZHOU Y Q, YUAN Y D, *et al.* Symmetric Airy vortex and symmetric Airy vector beams [J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(4): 484-490.
 - [25] 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.
 - [26] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25528.
 - [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(6): 921-938. (in Chinese)
 - [28] 邹朋飞, 魏冰妍, 杨淑蕾, 等. 光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J]. 液晶与显示, 2017, 32(6): 411-423.
ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al.* Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal non-display field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)
 - [29] DE SIO L, ROBERTS D E, LIAO Z, *et al.* Digital polarization holography advancing geometrical phase optics [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18297-18306.
 - [30] LI Y, LIU Y D, LI S D, *et al.* Single-exposure fabrication of tunable Pancharatnam-Berry devices using a dye-doped liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 9054-9060.
 - [31] ECKHARDT S K, BRUZZONE C L, AASTUEN D J W, *et al.* 3M PBS for high-performance LCOS optical

- engine [C]//*Proceedings of SPIE 5002, Projection Displays IX*. Santa Clara, CA, USA: SPIE, 2003.
- [32] YERALAN S, GUNTHER J, RITUMS D L, *et al.* Switchable Bragg grating devices for telecommunications applications [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(8): 1774-1779.
- [33] STENHOLM S. Polarization coding of quantum information [J]. *Optics Communications*, 1996, 123 (1/3) : 287-296.
- [34] LIM Y L, BEIGE A, KWEK L C. Repeat-until-success linear optics distributed quantum computing [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(3): 030505.
- [35] ARAI J, KAWAI H, OKANO F. Microlens arrays for integral imaging system [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(36): 9066-9078.
- [36] VEKSHIN M M, LEVCHENKO A S, NIKITIN A V, *et al.* Glass microlens arrays for Shack-Hartmann wave-front sensors [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 054010.
- [37] WIPPERMANN F, RADTKE D, AMBERG M, *et al.* Integrated free-space optical interconnect fabricated in planar optics using chirped microlens arrays [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10765-10778.

作者简介:



余丽红(1997—),女,安徽安庆人,硕士研究生,2019年于华东理工大学获得学士学位,主要从事液晶光学器件方面的研究。E-mail: yulihong526@163.com



郑致刚(1982—),男,浙江宁波人,博士,教授,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶态功能材料与微纳光学器件方面的研究。E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn