

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-11

基于单步曝光的光配向液晶器件研究及应用

刘澍鑫, 庄仲森, 李 燕*, 阎泽昆, 苏翼凯
(上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘要:本文提出了一种基于空间光调制器(SLM)的可实现任意图案设计的单步曝光光配向方法。通过像素级精确控制输出光的偏振方向,可完成对局部区域液晶指向矢的自由取向,从而实现具有任意图案设计的Pancharatnam-Berry(PB)相液晶(LC)器件的制作。这种非干涉曝光投影光配向法不仅简单、高效,并且能大大降低环境扰动的影响。基于该方法,采用两种光取向材料制备了多种PB相液晶器件:光栅、透镜、全息图和q-plate等。实验表明,本文制作的PB相液晶器件可实现连续的相位分布和较高的衍射效率。基于这些PB相器件,本文进一步提出了应用于增强现实显示领域的抬头显示和头戴式显示系统。

关键词:液晶器件;光配向;空间光调制器;几何相位;PB相

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.6-1 刘澍鑫

Research and application: liquid crystal devices fabricated by single-exposure photoalignment

LIU Shu-xin, ZHUANG Zhong-sen, LI Yan*, YAN Ze-kun, SU Yi-kai

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract: We propose a single-exposure photoalignment method based on a spatial light modulator (SLM), which could realize arbitrary pattern design. The polarization direction of the output light can be controlled on the pixel level, and then different local liquid crystal (LC) orientations are generated. Hence, Pancharatnam-Berry (PB) phase LC devices with arbitrary LC distribution patterns, can be fabricated using our method. Such a non-interference single-exposure method is simple and efficient, and is less sensitive to the influence of environmental interference. Based on this approach, we fabricated a variety of PB phase LC devices: gratings, lenses, holograms and q-plates using two photoalignment materials. Our PB phase LC devices can achieve high diffraction efficiency with continuous phase distribution. Base on the PB devices we also designed a head-up display and a head-mounted display system for augmented reality applications.

Key words: liquid crystal devices; photoalignment; spatial light modulator; geometric phase; Pancharatnam-Berry phase

收稿日期:2021-01-31;修订日期:2021-02-21.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61727808, No. 62075127)

Supported by Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61727808, No. 62075127)

*通讯联系人, E-mail: yan.li@sjtu.edu.cn

1 引言

Pancharatnam-Berry (PB) 相元件,也叫几何相位元件,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,在显示、成像、通讯等众多领域都有着广阔的应用前景,近年来引起学术界的广泛关注和研究^[1-3]。目前,实现 PB 相调制材料主要包括超表面和液晶(LC)。相比于人工精密制作的微纳超表面材料,液晶是一种天然的双折射材料,具备独特的优势:电控可调、大双折射率、易于加工等。近几年随着光配向技术的发展,使得液晶分子指向矢的任意排布成为可能^[4-6]。通过液晶制作的 PB 相光学元件可应用于光线偏转、成像、光场调控等领域^[7-14]。

具有光学各向异性吸收特性的光取向材料经过偏振光照射之后发生物理或化学反应,产生影响液晶分子排布的表面作用力,从而实现局部区域液晶指向矢的有序排布,制备具有不同功能的 PB 相液晶器件^[15]。目前的光取向材料包括顺反异构、光交联、光降解、偶氮染料重排列等多种光敏材料^[6, 16]。本文主要针对甲基红(Methyl Red, MR)和 SD1 两种光敏材料进行相应的 PB 相器件研究和制备工作。

液晶 PB 相光学元件的光配向制作方法可以大致分为两类:干涉法和非干涉法。干涉法通过两束圆偏振光干涉,形成不同偏振方向的线偏振光场。利用干涉法虽然可实现高精度元器件制作,但光束干涉的过程中极易受到震动、空气扰动等环境因素的影响,且需要相干光源,对实验环境的要求较高^[17, 18]。非干涉法则采用接触或非接触曝光的方法制作,如掩膜版曝光^[19, 20]、激光直写^[21, 22]、数字微镜阵列(Micro-mirror Device, DMD)动态掩膜^[23, 24]、空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)单步曝光等多种曝光方式^[25, 26]。其中,采用掩膜版曝光的光配向方法是最简单的方式。这种方式通过对掩膜版样式的设计,可实现一些简单结构的光学元器件制作,但对于复杂结构的元件,往往需要制作不同的掩膜版并进行多次曝光,增加了生产成本和时间周期。激光直写的方法则是聚焦单束激光束,通过逐点扫描的方式完成图案的结构化处理,这种方法的优势在于可实现任意复杂相位分布。

但为实现高分辨率的结构化图案,需要精度极高的机械扫描装置。南京大学提出的基于 DMD 的动态掩膜投影曝光系统,通过切换 DMD 加载的图案并配合外部偏振光源,可以实现任意图形的设计、任意偏振态的投影输出。其优势在于无需更换掩膜版、无机械扫描、制作成本低,可实现复杂图案 PB 相元器件的便捷制作,但其缺点在于每次曝光只能输出某一方向的线偏振光,对于包含多方位角取向的设计图案,所需的曝光次数随之增多^[24]。为解决上述制作方法的弊端,上海交通大学提出一种基于 SLM 的单步光学投影曝光方法,通过控制任意像素的相位延迟,使不同像素点产生不同方向的线偏振光,因此对于任意复杂图案都可以通过单次曝光的方式轻松实现^[25, 26]。

1233

本文将对基于 SLM 单步曝光的光配向方式实现 PB 相元器件制备的方法进行介绍和分析。然后利用该方法实现了基于 MR 和 SD1 两种光取向材料的光栅、透镜、全息图、q-plate 等多种 PB 相元器件制作,并进一步提出了应用于抬头显示、增强现实(AR)显示的系统设计。最后对基于 SLM 单步曝光光配向法制备 PB 相器件的研究进行总结。

2 基于 SLM 的单步曝光光配向法

如图 1(a) 所示,我们提出的单步曝光光路包括的主要元件有激光、扩束器、偏振片、SLM、1/4 波片和透镜。其中偏振片、SLM 和 1/4 波片的光轴夹角均为 45 度,其具体摆放方式如图 1(b) 所示。由于 SLM 中液晶为反平行配向,当加载不同灰度图片时,液晶分子会在垂直于 $x-y$ 的面内转动,对 o 光和 e 光产生不同的相位调制,这里,我们将 o 光和 e 光的相位差记作相位延迟。根据琼斯矩阵,可以将出射光的电场分量 E_{out} 表示为:

$$E_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{xin} \\ E_{yin} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$= j e^{\frac{\delta}{2}} E_{yin} \begin{bmatrix} \sin \frac{\delta}{2} \\ \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}$$

式中, E_{xin} 和 E_{yin} 是分别代表输入光 E_{in} 的 x 和 y 分量, δ 是 SLM 某一像素产生的相位延迟。根据公式得到, 输入的线偏振光, 被转换为偏振方向旋转 $\delta/2$ 的线偏振光输出。由于 SLM 中任意像素产生的相位延迟 δ 可通过施加电压的方式进行精确控制, 可实现任意偏转角度的像素化偏振光场, 即通过加载不同的灰度图案, 可实现不同方位角的线偏振光场的投影输出。因此, 该方法通过一步到位的单步曝光方式, 能够实现任意复杂几何图案制作, 既不需要动态地更换掩膜版, 也无需机械扫描, 方法简单、高效, 有效降低了 PB 相元器件制作成本, 缩短了生产的时间周期。

图 2 所示是利用该光路系统使用 457 nm 激光测试得到的结果: 当 SLM 加载的灰度不断变化时, 输出的线偏振的偏振方向也产生相应的变化。对应于 0~255 灰阶的均匀图像, 可以看出其输出光的偏振角度呈线性变化的趋势, 与式(1)理论分析基本一致, 并能够实现超过 260 度的偏振角度变化, 足够覆盖输出线偏振光的任意偏振角度。在具体制作过程中, 只需选取 0 到 180 度连续范围的输出线偏振光所对应的灰度值, 就能实现液晶指向矢在二维平面内各方向的任意取向。

3 基于 SLM 单步曝光的光配向 PB 相器件

3.1 光取向材料 MR 和 SD1

在众多光取向材料中, 偶氮染料分子因其稳定的化学性能和光敏感特性得到了广泛应用。图 3 为我们选取的两种光取向材料 MR 和 SD1 的分子结构, 两者的结构中都包含连接苯环的氮氮双键结构^[27]。

其中, MR 主要通过光致顺反结构的变换影响液晶分子的再取向。由于二向吸收特性, 分子

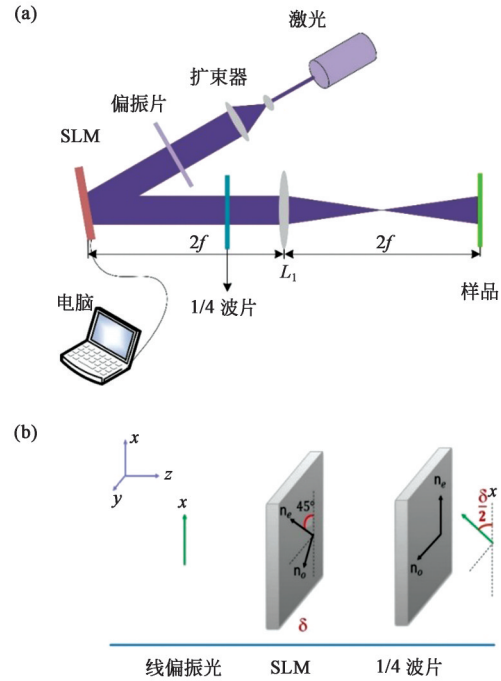


图 1 (a) 单步曝光光学投影装置示意图; (b) 关键器件的光轴方向

Fig. 1 (a) Optical setup for the single-exposure photoalignment method; (b) Orientations of the key components

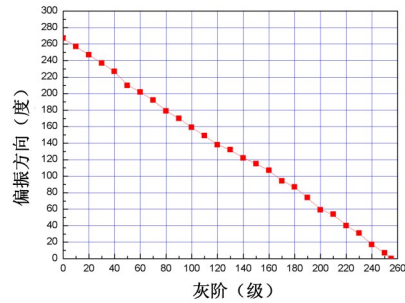


图 2 不同灰阶下的输出光偏振方向

Fig. 2 Polarization angles of the output light at different gray levels

对光能的轴向和纵向吸收率不尽相同, 当 MR 分子受线偏振光照射时, 分子吸收光能使其构型在顺式结构和反式结构之间多次转化, 并最终 MR 分子的长轴垂直于入射偏振光的形式吸附在靠近入射光源的基底表面达到稳定状态^[28]。MR 分子的吸收谱主要集中在可见光波段 400~600

nm,其吸收峰在 450 nm 左右^[29]。

SD1 分子是包含两个连接苯环的氮氮双键的棒状结构。研究表明,SD1 具有明显的二向吸收特性,当分子受到平行长轴偏振的线偏振光照射时,分子经历多次转动后由初始位置转动到垂直于光偏振方向,此时系统达到一种热稳定状态^[30]。SD1 材料的吸收谱在 300~500 nm 之间,吸收峰值在 370 nm 左右^[6]。

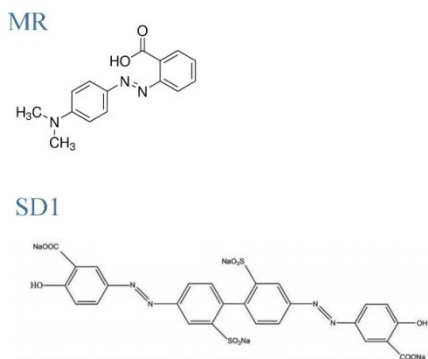


图3 两种取向材料MR和SD1的分子结构

Fig. 3 Molecular structures of two photoalignment materials MR and SD1

两种材料的工作机理和吸收波长的不同,导致在处理方式上也有所不同。MR 染料分子通过掺杂在液晶中,用绿色激光进行照射使 MR 分子得到有序分布实现配向。SD1 材料则是以旋涂的方式,在基板表面形成一层极薄的配向层,再通过紫外光或蓝光照射实现配向层分子的有序取向分布。针对以上两种取向材料,我们成功实现了多种液晶 PB 相器件的制备和研究。

3.2 任意图案设计的实现

基于图 1(a)的光路,我们可以通过在 SLM (分辨率 1920×1080 , 0.7 英寸,像素大小 $8 \mu\text{m}$) 加载不同灰阶图,实现任意图案偏振光场和 PB 相液晶器件设计。

首先,将重量比分别为 99% 和 1% 的 LC/MR 混合物,通过毛细管灌入 $3 \mu\text{m}$ 的无配向液晶盒中。通过 SLM 加载如图 4(b)所示的曝光灰度图,在 532 nm 的激光照射下调制相位信息,得到如图 4(a)所示的偏振光场。为避免样品中的液晶分子引入不必要的相位差,影响再取向过程,在实验中需要将 LC/MR 混合物加热至清亮点在各向同性状态下,用光强为 $40 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的激光对

样品曝光 10 min,使 MR 分子能够充分吸收光能,达到稳定的状态。曝光完成后,通过偏振片观察可以看出不同区域的图形呈现明显不同的光学特性。如图 4(c)所示,由于样品中不同区域的液晶指向矢方向不同,在透过正交偏振时,器件不同区域表现出不同的亮度。可见,通过单步曝光方法制作的液晶光配向器件,不同区域的取向均匀,可实现液晶任意方位角的指向矢取向设计。



图4 (a) SLM 产生的偏振光场(透过水平线偏振片观察),其中红色箭头表示偏振片的透光轴方向,白色箭头分别表示三个区域的偏振方向;(b) SLM 上加载的曝光图案;(c) 正交偏振片下的液晶器件图像^[25]

Fig. 4 (a) Polarization field generated by the SLM (observed behind a linear polarizer whose transmission axis is in the horizontal direction) where the red arrow is the direction of the transmission axis of the polarizer, and the white arrows indicate the linear polarization directions of the three regions; (b) Gray-level picture of the exposure pattern loaded on the SLM; (c) Image of the LC device captured under crossed polarizers

基于 SLM 的单步曝光法仅需要设计每个像素的显示灰度,便可以实现连续的偏振方向变化。在制作连续几何相位变化器件时,相比于掩膜版或者基于 DMD 投影的曝光方法,以一步到位的方式实现液晶指向矢的连续变化,制作时间得到大幅度降低。我们利用 MR 取向材料实现的椭圆图案样品,从中心到边缘 MR 和 LC 取向从 0° 到 90° 呈线性变化。图 5 是通过旋转样品在线偏振白光照射下得到的一组图像,可以看出不同局部区域的液晶分子具有完美的连续取向变化特征。

利用 SD1 作为取向材料同样可以实现任意图案的自由化设计。相比于 MR,在器件的制作过程略有不同。在实验中,将 SD1 含量为 0.5% 的 SD1/DMF(二甲基甲酰胺)溶剂,首先在 800 r/s 低速下预旋 5 s,再在 3 000 r/s 的转速下旋涂

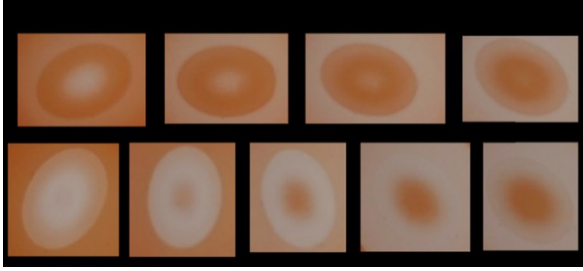


图5 在线偏振白光照明下旋转液晶盒观察到的不同图像^[25]

Fig. 5 Photos of the LC cell rotated at different orientations through linearly-polarized white light

30 s。接着在 100 °C 的高温下烘干,然后进行封盒,再在 457 nm 的偏振激光光场下对样品进行曝光处理,最后灌入液晶 E7 完成器件制作。我们在 SLM 加载图 6(a)所示的图片,曝光后得到的一个简单图案的液晶器件,通过在线偏振白光下可以观察到“ST”、“JU”和背景三个区域有显而易见的不同透过率,如图 6(b)(c)所示。样品中的彩色环状条纹是由盒厚控制不均匀造成的,可以通过工艺的优化得到改进。



图6 (a)曝光图案;(b)(c)在正交偏振片下旋转液晶盒的照片

Fig. 6 (a) Exposure pattern; (b, c) Photos of the LC cell rotated at different orientations under crossed polarizer

3.3 PB相液晶器件制作

基于 SLM 的单步曝光方法,我们制作了多种 PB 相液晶光学元件,包含光栅、透镜、q-plate 和全息图等。图 7 所示是我们利用液晶 E7/MR 混合物实现的一维二值光栅、一维连续光栅结果图。两种光栅结构周期都设定为 48 μm(6 个像素),二值光栅相邻区域的液晶指向矢相互垂直,而连续光栅的相邻区域液晶指向矢从 0 到 180°以 30°的梯度连续变化。

图 7(a)和(b)为二值光栅零电压和施加电压情况下用 633 nm 激光测试得到的衍射图样。其衍射效率较低,且有多级衍射级次。如图 7(e)所

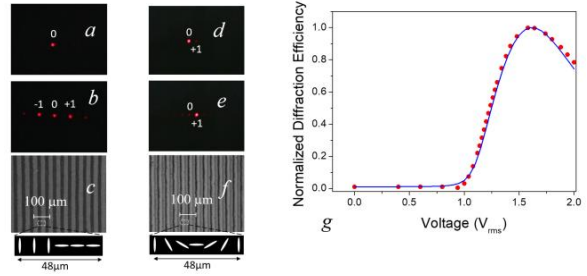


图7 (a)(b)二值 PB 光栅在零电压和施加电压情况下的衍射图样;(c)二值 PB 光栅的显微镜图;(d)(e)连续 PB 光栅在零电压和施加电压情况下的衍射图样;(f)(g)连续 PB 光栅显微镜图和衍射效率曲线^[25]

Fig. 7 (a, b) Diffraction patterns of the binary PB grating with applied voltage off and on; (c) Micrograph of the binary PB grating; (d, e) Diffraction patterns of the continuous PB grating with applied voltage off and on; (f, g) Micrograph and diffraction efficiency curve of the continuous PB grating

示,连续 PB 光栅的衍射能量几乎全部集中在正一级且具有较高的衍射效率。图 7(g)为测得的连续 PB 光栅归一化衍射效率随电压变化的曲线。PB 相元件在零电压下衍射效率为:

$$\eta = \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda), \quad (2)$$

带入相关数据后可得出:盒厚 d 约为 3 μm,液晶 E7 的 Δn 约为 0.225,波长 λ 为 633 nm,得到 $\pi \Delta n d / \lambda \sim \pi^{[3]}$ 。所以,在零电压的初始状态下衍射效率接近于 0。当施加电压时,液晶指向矢向平行于电场的方向转动,随着施加电压的增大,造成的相位差逐渐减小。当相位延迟满足“半波条件”时,达到峰值衍射效率~95.3%,此时外加电压~1.6 V_{rms}。

类似地,我们用该方法进行 PB 液晶透镜的制备。首先,我们根据菲涅尔透镜的计算公式,得到 PB 透镜的相位分布:

$$\varphi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) \quad (3)$$

其中 φ, λ, r, f 分别为相位、波长、半径、焦距,然后得到液晶指向矢的方位角分布 $\varphi/2$,进而根据图 2 得到对应灰度值的曝光图案^[31, 32]。对 E7/MR 混合物曝光处理后得到的透镜在显微镜下的图像如图 8(a)所示。用 633 nm 的圆偏振光对 PB 透镜进行测试可发现:当施加电压为 0 V 时,透镜衍射效率为 0,透镜的焦距为 ∞,如图 8(b)所示;

当施加的电压为 $1.6 V_{rms}$ 时,衍射效率最高,透镜对光进行会聚,焦距 1000 mm,其焦点光斑如图 8 (c)所示。

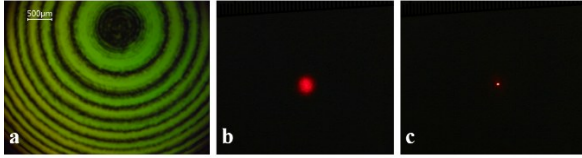


图 8 (a) PB 透镜的显微镜图;(b)(c)零电压和施加电压情况下 PB 透镜在 1 m 处的衍射图案

Fig. 8 (a) Microscopic morphology of a PB lens; (b, c) Diffraction patterns of the PB lens with applied voltage off and on at 1 m

q-plate 是一种可以产生涡旋光束等特殊光束的光学元件^[33]。通过横向空间光场分布实现的复用技术为光通信技术的扩容问题提供了一种新的解决方案^[34]。液晶 q-plate 是利用光配向技术实现的,其本质上是液晶指向矢在极坐标系中随方位角改变的半波片。液晶指向矢在径向上在一个周期从 $0-2\pi$ 连续变化 q 次,对应地可产生拓扑荷数 $m=\pm 2q$ 的涡旋光束。如图 9 (a)~(d)所示,是我们利用 MR 取向材料制作的四个 q-plate (q 值分别为 0.5、1、1.5、2)在偏光显微镜下的图像。在 633 nm 圆偏振光照射下产生的涡旋光束如图 9 (e)~(h)所示。由于光学奇点的存在,光场中心光强为零,且随着拓扑荷数的增大,中心暗斑也相应变大,与理论结果一致。

利用液晶光配向技术,同样可以实现 PB 全息图的制作。我们首先利用 Gerchberg-Saxton 迭代算法得到相位图,使液晶指向矢根据所需的相位有序排布^[35]。最后用激光照射 PB 全息图得到的重建“小松鼠”图像如图 9(i)所示。

同样地,通过单步曝光的方法,我们利用 SD1 取向材料制作了相应的 PB 相液晶器件:PB 连续光栅、PB 透镜和 PB q-plate。如图 10 所示,(a)、(b)分别为 PB 连续光栅的曝光图和偏光显微镜下的图样,其测得的衍射效率达到 90% 以上;(c)、(d)分别是 PB 液晶透镜的曝光图和微光织构图;(e)~(g)分别为拓扑荷数为 16 的 PB q-plate 的曝光图案、偏光显微镜下的图样及其产生的涡旋光斑图。从图中可以看出,利用 SLM 单步曝光法,可以“一步到位”地实现连续相位 PB

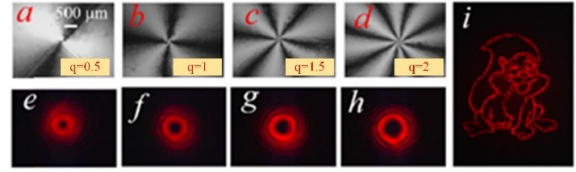


图 9(a)~(d) $q=0.5, 1, 1.5, 2$ 的 q-plate 在偏光显微镜下的图像,及(e)~(h)对应生成的涡旋光束;(i)重建的 PB 全息图^[25]

Fig. 9 (a) ~ (d) Textures of the PB q-plates under a polarized optical microscope, with $q=0.5, 1, 1.5, 2$, respectively; (e) ~ (h) Corresponding vortex beam patterns; (i) Reconstructed image from a PB hologram

相器件的制作,实验表明,制作的 PB 相器件具有连续的相位变化特征,并表现出优异的光电特性。

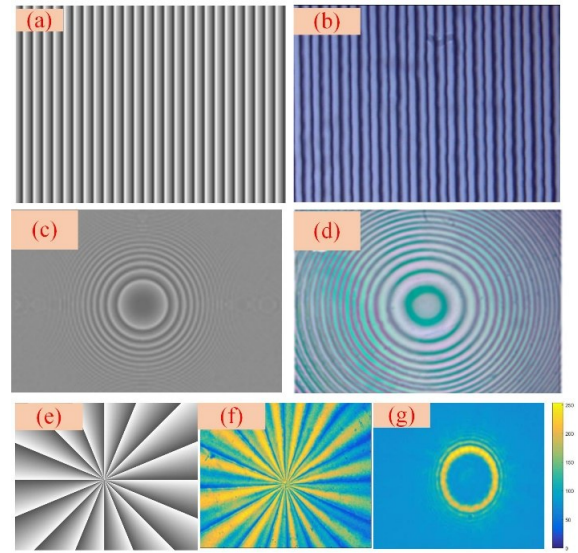


图 10(a)(b)PB 连续光栅的曝光图和微观结构;(c)(d)PB 液晶透镜的曝光图和显微图;(e)(f)PB q-plate 的曝光图和偏光显微镜下的微观结构;(g)其产生的涡旋光束光斑

Fig. 10 (a, b) Exposure pattern and micrograph of a PB continuous grating; (c, d) Exposure pattern and micrograph of a PB LC lens; (e, f) Exposure pattern and micrograph of a PB q-plate under a polarization microscope; and (g) vortex beam generated by the PB q-plate

4 基于 PB 相元件的显示系统应用

PB 相液晶元件的高衍射效率、电控可调、大

折射率调制、偏振选择性等优势,使其成为显示系统中的关键器件。液晶PB相器件一般有两种驱动方式:主动驱动方式和被动驱动方式。以PB液晶透镜为例,主动驱动即以直接在PB相器件两端施加电压的方式,来驱动液晶器件,改变液晶的指向矢方向及其光学特性。当无外加电压时,PB透镜对输入某一圆偏振光实现会聚/发散功能;施加足够高的电压后使液晶指向矢全部垂直于基板排列,PB相器件表现为透明状态,如图11(a)所示。被动驱动即通过添加一个外部偏振切换器的方式使输入光在左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之间进行切换,从而使输出光在聚焦状态和散焦状态之间转换,如图11(b)所示。

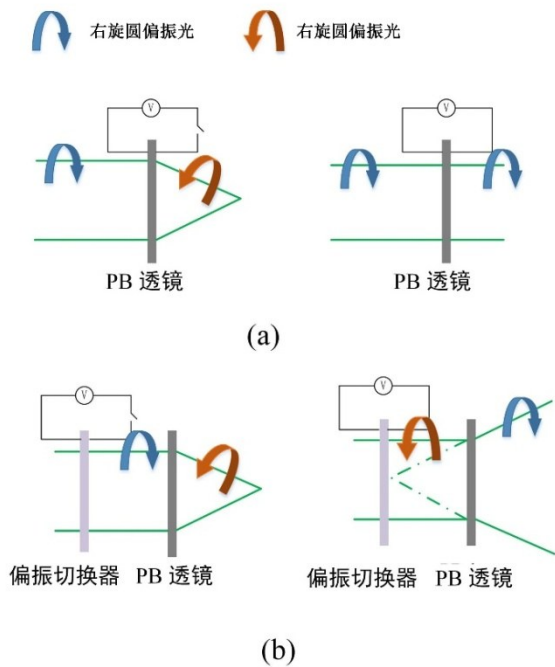


图11 PB透镜的两种驱动方式:(a)主动驱动方式,(b)被动驱动方式
Fig. 11 Two driving methods for a PB lens: (a) active driving method and (b) passive driving method

我们利用PB透镜,分别提出了抬头显示系统和头戴式AR显示系统,下文将对它们作进一步介绍。

4.1 抬头显示系统设计

抬头显示可为驾驶员提供各项行驶数据,如车速、导航、路况信息、系统警告等,在安全驾驶中起着重要作用。在行驶过程中,外部环境亮度

的动态变化会直接影响到抬头显示的视觉效果。如汽车在阳光照射较强的路面行驶时,抬头显示的虚拟信息会因亮度不够而无法辨别;而汽车在夜晚照明状况较差的路面行驶时,虚拟图像较高的亮度又会干扰视线。因此,显示系统需要应对不同的照明环境,平衡环境光和虚拟光的亮度,为驾驶员提供最佳的视觉效果。为此,我们提出了一种基于PB透镜的抬头显示系统。

我们设计的抬头显示系统结构如图12所示,由图像源、左旋圆偏振片、PB液晶透镜和右旋胆甾相(RHCLC)反射膜组成。由于RHCLC的特殊螺旋结构,使其具备偏振选择特性,能够反射几乎全部右旋圆偏振光而使左旋圆偏振光全部透过^[36]。虚拟图像光由图像源发出经过左旋圆偏振片后转换为左旋圆偏振光,再经过PB液晶透镜会聚后变为右旋光,因此能被RHCLC反射回来,再次经过PB透镜转变为左旋光,最后透过左旋圆偏振片以放大虚像的形式进入人眼。对来自外部真实世界的环境光,首先,经过RHCLC反射膜透射后,仅有左旋圆偏振光经过PB透镜,形成无聚焦的左旋零级光和有聚焦效果的右旋一级衍射光,透过左旋圆偏振片后一级光被滤除,仅无聚焦作用的真实光进入人眼,从而实现车载抬头显示的效果^[37, 38]。

在此系统中,最终进入人眼的只有虚拟光源的一级衍射光和环境光源的零级光。因此,通过对PB透镜施加电压,可调节一级和零级光的衍射效率,从而调节虚拟光和真实光的亮度,使抬头显示在不同照明环境中都能提供较好的对比度和视觉效果。

4.2 头戴式AR显示系统设计

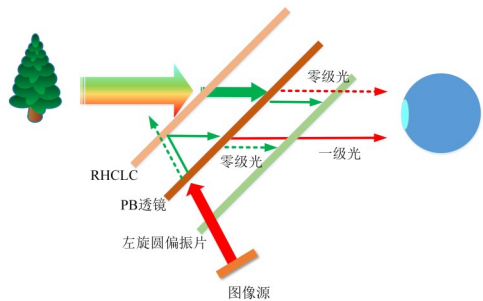


图12基于PB透镜的抬头显示系统设计
Fig. 12 System design of the head up display based on a PB lens

为实现舒适、无视觉疲劳的AR三维显示系统,需要解决传统双目视差式AR智能眼镜中调焦-辐辏冲突的问题^[39]。在众多真三维显示技术中,如超多视角、全息显示、集成成像、体三维显示,多平面体三维显示可通过构建多个平面的方式实现连续的三维画面显示,是目前研究较多的增强现实三维显示方法之一^[40-42]。

PB透镜的电控可调节特性、偏振选择特性,使其可以应用于AR显示中,实现基于时分复用的多平面显示。然而为了实现变焦的多平面显示,需要PB透镜具备更快的响应速度在不同深度的平面进行切换。为此,我们在PB相器件中进一步引入了聚合物网络,使PB液晶器件更快地进行焦距切换。实验中,配制的预聚物中单体RM257含量在6~8%之间,紫外引发剂IRG 651比重为1%,MR比重为1%,其余为液晶E7^[43]。由于MR和引发剂IGR651对光都有敏感的吸收,为避免光配向、单体聚合两过程相互干扰,我们采用了用两种波长激光分别进行操作。首先采用532 nm的激光进行光配向处理,此时MR对绿光吸收较强,而IRG 651对绿光几乎没有吸收,因此不会引发聚合物聚合;而后,采用360 nm的紫外光,在常温下对已配向好的器件进行光致聚合反应,形成聚合物网络结构,此时由于MR对紫外光几乎没有吸收,所以不会影响到配向层的取向分布。制作完成后,PB相器件的响应速度由未加聚合物时的80 ms,加快到802 μ s、701 μ s、619 μ s(分别对应RM 257含量为6%、7%、8%的情况)。

基于上述快速响应的聚合物稳定PB液晶透镜,我们设计了多平面AR显示系统结构。PB透镜设计工作波长为633 nm,焦距为100 cm。如图13所示,多焦距PB透镜由两个相同的PB透镜组成,通过分别控制两个PB透镜的开关状态,可实现四种不同状态(on/on, on/off, off/off, off/on),对应于图13(a)、(b)、(c)、(d)的焦距分别为50、100、 ∞ 、-100 cm,此时在接收屏(RS)上得到的图像分别如图(e)、(f)、(g)、(h)所示。利用时分复用的方法快速切换两个透镜的状态便可以实现四个平面的AR显示效果。为此我们搭建了基于图14(e)的系统装置,实现虚拟图像“SJTU”分别显示在28、40、67、200 cm处的增强现实显示

效果^[43]。

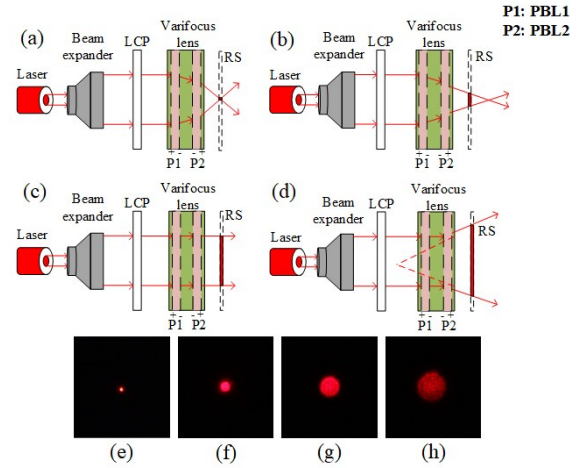


图13 (a)、(b)、(c)、(d)变焦透镜分别实现50、100、 ∞ 、-100 cm焦距;(e)~(h)在接收屏上的图像^[43]

Fig. 13 (a), (b), (c), (d) Realization of four focal lengths of 50, 100, ∞ and -100 cm, respectively; (e)~(h) Captured images on the receiving screen

5 结论

本文介绍和分析了基于SLM的单步曝光光配向法,在此基础上展开了任意相位分布的PB相元器件的制备和研究。该光配向法用非干涉投影方式,用SLM像素精确控制输出光的线偏振方向,只需一次曝光,即可实现任意复杂图案设计,极大地减小了环境扰动的影响,以简单、高效的方式降低了复杂PB相液晶器件研制的成本和时间。在实验中,我们利用该方法,以MR和SD1两种光配向材料分别实现了光栅、透镜、全息图、q-plate等多种PB相元器件的制作。实验表明,基于SLM的单步曝光方法在制作连续相位变化PB相器件中具有很大的优势,能够一步到位地实现高衍射效率的PB相元器件制作。最后,我们展示了基于PB相液晶器件的抬头显示系统和头戴式AR显示系统。通过选用更高分辨率的SLM,用高质量镜头或加入成像检测系统等方法,可以对成像质量进行进一步优化,实现结构更加精细的PB相元器件制备。我们提出的单步曝光光配向法制备的几何相位光学器件能够性能更好、结构更加精细,在未来显示、通讯、

成像等众多领域具有广泛的应用前景。

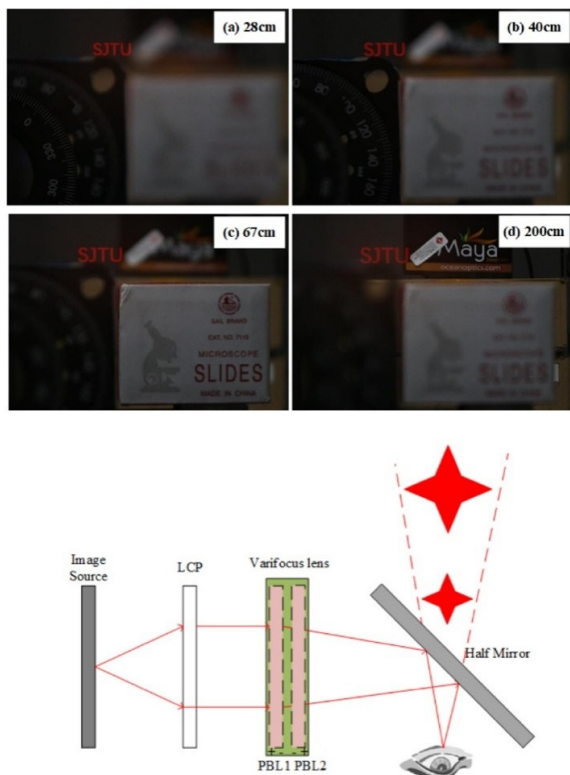


图14 “SJTU”分别成像在(a) 28 cm、(b) 40 cm、(c) 67 cm、(d) 200 cm的位置;(e) AR显示系统图^[43]

Fig. 14 "SJTU" is rendered at (a) 28 cm, (b) 40 cm, (c) 67 cm, and (d) 200 cm depth planes, respectively; (e) AR display system

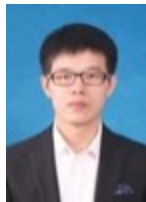
参考文献:

- [1] ANANDAN J. The geometric phase [J]. *Nature*, 1992, 360(6402): 307-313.
- [2] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [3] LEE Y H, TAN G J, ZHAN T, *et al.* Recent progress in Pancharatnam - Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities [J]. *Optical Data Processing and Storage*, 2017, 3(1): 79-88.
- [4] YANG D K, WU S T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.
- [5] ICHIMURA K. Photoalignment of liquid-crystal systems [J]. *Chemical Reviews*, 2000, 100(5): 1847-1874.
- [6] 王骁乾, 沈冬, 郑致刚, 等. 液晶光控取向技术进展[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 737-751.
WANG X Q, SHEN D, ZHENG Z G, *et al.* Review on liquid crystal photoalignment technologies [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] ZHAN T, XIONG J H, LEE Y H, *et al.* Polarization-independent Pancharatnam-Berry phase lens system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 35026-35033.

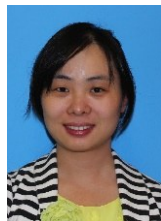
-
- [9] ZHOU Y Q, YIN Y, YUAN Y D, *et al.* Liquid crystal Pancharatnam-Berry phase lens with spatially separated focuses [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(7): 995-1000.
 - [10] KOMANDURI R K, ESCUTI M J. High efficiency reflective liquid crystal polarization gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(9): 091106.
 - [11] 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.
 - [12] DUAN W, CHEN P, GE S J, *et al.* Helicity-dependent forked vortex lens based on photo-patterned liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14059-14064.
 - [13] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25528.
 - [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] CHIGRINOV V, MURAVSKI A, KWOK H S, *et al.* Anchoring properties of photoaligned azo-dye materials [J]. *Physical Review E*, 2003, 68(6): 061702.
 - [16] CHIGRINOV V G, KOZENKOV V M, KWOK H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
 - [17] PRESNYAKOV V, ASATRYAN K, GALSTIAN T, *et al.* Optical polarization grating induced liquid crystal micro-structure using azo-dye command layer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10558-10564.
 - [18] 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.
 - [19] HU W, KUMAR SRIVASTAVA A, LIN X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.
 - [20] GUO Y B, JIANG M, PENG C H, *et al.* High-resolution and high-throughput plasmonic photopatterning of complex molecular orientations in liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(12): 2353-2358.
 - [21] MCCONNEY M E, MARTINEZ A, Tondiglia V P, *et al.* Topography from topology: photoinduced surface features generated in liquid crystal polymer networks [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(41): 5880-5885.
 - [22] MISKIEWICZ M N, ESCUTI M J. Direct-writing of complex liquid crystal patterns [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12691-12706.
 - [23] SUN C, FANG N, WU D M, *et al.* Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 121(1): 113-120.
 - [24] 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.
 - [25] 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.
 - [26] LIU Y D, WANG M, LI Y, *et al.* P-208: late-news poster: single-exposure fabrication of geometry phase optical elements with arbitrary wavefronts [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 1866-1869.
 - [27] 周鹏程, 李燕, 陈超平, 等. 偶氮掺杂液晶中热致光学非线性的测量[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 131-137.
ZHOU P C, LI Y, CHEN C P, *et al.* Measurement of optical nonlinearity originating from photo-induced thermal effect for azo-dye-doped liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 131-137. (in Chinese)
 - [28] MERINO E, RIBAGORDA M. Control over molecular motion using the *cis* - *trans* photoisomerization of the azo group [J]. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 2012, 8: 1071-1090.
 - [29] VATANDOOSTARANI S, LOTFABAD T B, HEIDARINASAB A, *et al.* Degradation of azo dye methyl red by *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 9763 [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 125: 62-72.
 - [30] SRIVASTAVA A K, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.* Photoaligned nanorod enhancement films with polarized emission for liquid-crystal-display applications [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(33): 1701091.

- [31] SRIVASTAVA A K, WANG X Q, GONG S Q, *et al.* Micro-patterned photo-aligned ferroelectric liquid crystal Fresnel zone lens [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1643-1646.
- [32] WANG X Q, YANG W Q, LIU Z, *et al.* Switchable Fresnel lens based on hybrid photo-aligned dual frequency nematic liquid crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 8-15.
- [33] MARRUCCIL. The q-plate and its future [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2013, 7(1): 078598.
- [34] RUBANO A, CARDANO F, PICCIRILLO B, *et al.* Q-plate technology: a progress review [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D70-D87.
- [35] GERCHBERG R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [36] CHEN Q M, PENG Z H, LI Y, *et al.* Multi-plane augmented reality display based on cholesteric liquid crystal reflective films [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12039-12047.
- [37] LIU Y D, LI Y, CHEN Q M, *et al.* Liquid crystal based head-up display with electrically controlled contrast ratio [J]. *Crystals*, 2019, 9(6): 311.
- [38] LIU Y D, LI Y, CHEN Q M, *et al.* 7-4: late—news paper: holographic head-up display with adaptive brightness of ambient light [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 78-80.
- [39] GENG J. Three-dimensional display technologies [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [40] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* Reverse-mode PSLC multi-plane optical see-through display for AR applications [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3394-3403.
- [41] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* A multi-plane optical see-through head mounted display design for augmented reality applications [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(4): 246-251.
- [42] 刘澍鑫,李燕,苏翼凯. 基于液晶散射膜的多平面增强现实显示[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(7): 725-732.
LIU S, LI Y, SU Y K. Review on multi-plane augmented reality display based on liquid crystal scattering films [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 725-732. (in Chinese)
LI S D, LIU Y D, LI Y, *et al.* Fast-response Pancharatnam-Berry phase optical elements based on polymer-stabilized liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22522-22531.

作者简介:



刘澍鑫(1990-),男,山东莱芜人,博士后,2020年于上海交通大学获得博士学位,主要从事增强现实显示和液晶器件方面的研究。E-mail: liushuxin@sjtu.edu.cn



李燕(1982-),女,浙江绍兴人,副教授,硕士生导师,2012年于美国中佛罗里达大学获得博士学位,主要从事增强现实显示和液晶器

件方面的研究。E-mail: yan.li@sjtu.edu.cn



苏翼凯(1970-),男,河北满城人,教授,博士生导师,2000年于美国西北大学获得博士学位,主要从事硅基光电子器件及集成、光信号处理、传输与交换光子学、三维显示等方面的研究。E-mail: yikaisu@sjtu.edu.cn

苏翼凯(1970-),男,河北满城人,教授,博士生导师,2000年于美国西北大学获得博士学位,主要从事硅基光电子器件及集成、光信号处理、传输与交换光子学、三维显示等方面的研究。E-mail: