

文章编号:1007-2780(2022)10-1293-09

具有取向转换膜的偏振无关模式控制液晶透镜

黎四明¹, 李 青^{1*}, 董旭辉²

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 信息显示与可视化国际合作实验室, 江苏 南京 210018;

2. 佳美光学(深圳)有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:本文针对液晶透镜在变焦眼镜方面的应用, 研制完成了具有取向转换膜的偏振无关的模式控制液晶透镜。首先通过仿真, 论证了采用取向转换膜实现偏振无关的模式控制液晶透镜的可行性, 接着在实验中研究并优化了取向转换膜的制备参数, 最后完成了偏振无关的液晶透镜的制备。测试结果表明, 8 mm 孔径大小的液晶透镜具有偏振无关的特性, 同时具有变焦调节特性, 实现了 0~1.590 D 的屈光度调节。

关键词: 双层模式控制液晶透镜; 偏振无关; 取向转换膜; 可变焦眼镜

中图分类号: TN27 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2022-0149

Polarizer-free modal liquid crystal lenses with an alignment conversion layer

LI Si-ming¹, LI Qing^{1*}, DONG Xu-hui²

(1. *Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization,
School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China;*

2. *Camry Optical (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)*

Abstract: Aiming at the prospect of applying liquid crystal (LC) lens to zoom glasses, an electrically tunable-focusing and polarizer-free LC lens with an alignment conversion layer is developed. Through simulation, the feasibility analysis of double-layer modal LC lens was conducted. After optimizing the synthesis parameters of alignment conversion film, a polarizer-free LC lens sample was prepared. The imaging and optical interference of LC lens was studied to discuss the polarization independence and image quality. The test results show that the 8 mm aperture LC lens realizes polarization independence and

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-06-23.

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2018YFE0125500, No.2021YFE0105900); 国家自然科学基金青年基金 (No.12005038); 国际青年科学家研究基金 (No.62050410350); 国家自然科学基金 (No.6217502, No.51879042, No.61674029); 国家 111_2.0 计划 (No.BP0719013); 江苏省基础研究领先技术计划 (No.BK20192003)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFE0125500, No.2021YFE0105900); National Natural Science Foundation Project for Young Researcher (No.12005038); Research Fund for International Young Scientists (No.62050410350); National Natural Science Foundation Project of China (No.62175028, No.51879042, No.61674029); Program 111_2.0 in China (No.BP0719013); Leading Technology of Jiangsu Basic Research Plan (No.BK20192003)

*通信联系人, E-mail: liqing@seu.edu.cn

possesses diopter adjustment from 0 D to 1.590 D.

Key words: double-layer modal liquid crystal lens; polarization independence; alignment conversion film; zoom glasses

1 引言

本文面向液晶透镜应用于变焦眼镜的前景而展开。变焦眼镜根据需求实现镜片焦距的调整,让佩戴者在无须更换眼镜的情况下能够获得不同焦距的图像。实现可变焦眼镜的方式主要有 3 种:传统的双镜片设计、液体透镜^[1-2]和液晶透镜^[3]。

梯度折射率液晶透镜可以在不改变曲率的情况下,利用液晶分子的光学以及介电各向异性实现透镜的电控调焦^[4]。对于微透镜阵列,圆孔边缘电压的自然衰减就足以形成一个分布式的电压。Chen 等人将微透镜应用在圆偏振光学显微镜上,完成了甲虫翅膀的圆偏振反射率检测^[5]。Tian 等人结合液晶微透镜阵列和扭曲向列相单元,展示了一种快速响应的 2D/3D 可切换显示器^[6]。Chu 等人基于两个正交组合的液晶透镜阵列,实现了 4 种模式的 2D/3D 切换显示^[7]。在圆孔液晶透镜的基础上再覆盖一层高阻层,利用高阻层与液晶层等效的电阻-电容回路减缓电压的衰减速度,优化电压分布,可以做到更大的孔径成像,这就是模式控制液晶透镜,它的优点是工作电压低,控制容易。

在液晶透镜大孔径成像的基础上实现偏振无关是可变焦液晶眼镜的一大挑战。很多研究团队对偏振无关进行了深入的研究。Lin 等人提出使用聚合物膜作为隔离层分离上下液晶层的偏振无关液晶透镜^[8-10]。Ren 等人提出了一种使用聚合物分散液晶作为电光介质的偏振无关液晶透镜^[11]。Oton 等人基于克尔效应提出偏振无关的蓝相液晶透镜^[12]。Kumar 等人使用两层光轴对齐的光学各向异性的双折射材料,提出了 3 层双折射结构的偏振无关液晶透镜^[13]。Cui 等人提出了液晶透镜的偏振无关成像算法,将包含非寻常光和寻常光的混合成像去除寻常光的成像,只留下调制过的非寻常光清晰成像^[14]。

面向变焦眼镜的应用前景,在此基础上进一步考虑液晶透镜对不同曲率镜片的适应性,相较

于刚性器件,柔性器件可以更好地与多种曲率镜片整齐贴合。对于液晶透镜而言,实现器件柔性化并非易事。第一个原因是作为柔性支撑结构的间隔子在透镜形变方向上具有一定的相对自由度,过度的形变会导致间隔子在基板之间发生相对位移^[15],这会直接使透镜液晶层局部厚度出现偏差,降低整个透镜的成像质量。第二个原因是需要保证具有多层结构的液晶透镜的每一层面板不会受到形变带来的影响。柔性器件的相关研究已经取得了一些进展。一是很好地避免了间隔子带来的固有缺陷的柔性微透镜阵列已经被研究者提出并且实现^[16];二是最近几年柔性屏的兴起促进了柔性面板的研究,这为实现柔性液晶透镜提供了思路^[17-18]。本文关于取向转换膜的研究为今后结合柔性液晶器件的进展,进一步研究柔性液晶透镜奠定了技术基础。

本文采用具有取向转换膜的双层液晶透镜结构以实现偏振无关^[9]。双层结构在多年以前就被提出用于液晶显示器^[19-22]。传统的方法是用铟锡氧化物(ITO)玻璃或聚酯薄膜来分离两个正交的液晶层。使用 ITO 玻璃作为中间基板,玻璃基板厚度很难进一步降低,对驱动电压的要求较高。使用更薄的聚酯薄膜作为中间基板可以改善驱动条件,但是由于聚酰亚胺(PI)取向剂的烘烤温度高于聚酯薄膜的形变温度,因此聚酯薄膜表面取向困难。本文研制的双层液晶透镜结构使用的是一层上下表面相互垂直取向的聚合物薄膜——取向转换膜,它的优点是厚度小、透明度高、表面取向能力强,可精准控制上下层液晶分子垂直取向,实现偏振无关,并且工作电压低。

2 结构与原理

具有取向转换膜的双层模式控制液晶透镜结构如图 1 所示。上层玻璃基板的内表面制备一层圆孔(孔径为 8 mm)ITO 电极,作为控制电极。接着依次磁控溅射 ZnO 薄膜作为高阻层,旋

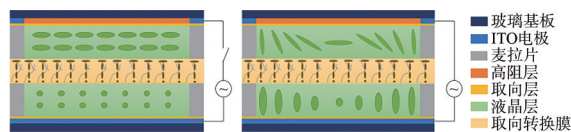
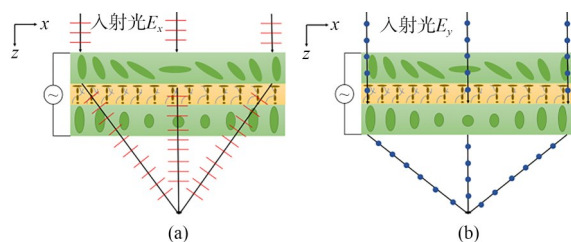


图1 具有取向转换膜的双层液晶透镜

Fig. 1 Structure of double-layer LC lens with alignment conversion layer

涂聚酰亚胺作为取向层。两层 75 μm 厚的麦拉片将厚度为 25 μm 的取向转换膜固定在透镜中间。取向转换膜的作用不只是上下液晶的分隔层,还作为两层液晶的取向层,控制上下液晶的取向垂直。

具有取向转换膜的双层液晶透镜在光学上是偏振无关的,其原理如图 2 所示。液晶分子取向如图 1 所示,当对液晶透镜施加电压后,液晶分子沿电场方向重新排列,形成梯度折射率分布。

图2 (a) E_x 偏振分量聚焦示意图; (b) E_y 偏振分量聚焦示意图。Fig. 2 Modulation of E_x polarized light (a) and E_y polarized light (b) by LC lens

假设入射光是一束非偏振光,它总能被分解成偏振方向正交的 E_x 分量和 E_y 分量。图 2(a) 显示的是入射光中 E_x 偏振分量在双层液晶透镜的工作过程。 E_x 偏振光的波前经过上层液晶时,发生弯曲形成汇聚的球面波前。进入取向转换膜后,由于取向转换膜的液晶分子垂直于膜表面, E_x 光的波前不会受到调制。进入下层液晶后,因为 E_x 光的偏振方向与下层液晶分子的取向垂直,所以也不会被调制。图 2(b) 显示的是入射光中 E_y 偏振分量在双层液晶透镜的工作过程。 E_y 偏振光的偏振方向与上层液晶分子的取向垂直,不会被调制。由于取向转换膜的液晶分子垂直于膜表面, E_y 光的波前也不会受到转换膜的调制。进入下层液晶后,它的波前发生弯曲形成汇聚的

球面波前。因此,非偏振光的 E_x 分量与 E_y 分量分别被上层液晶与下层液晶聚焦到焦平面上。

对于任意的入射光都可以分解成正交分量 E_x 和 E_y , 分别被上、下液晶层调制聚焦到焦平面, 因此, 双层液晶透镜具有偏振无关的特性。

3 双层液晶透镜仿真

具有取向转换膜的双层模式控制液晶透镜可以等效为电阻-电容回路,如图 3 所示。圆孔表面的高阻层等效成多个面电阻 R 的串联。液晶材料的电导率一般约为 $10^{-15} \sim 10^{-13} \text{ S/m}$, 可以被视为绝缘体, 基板中间的液晶材料可以等效为液晶电容的并联。液晶层类似于平行板电容, 平行板电容的计算如式(1)所示:

$$C_{//} = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (1)$$

其中, $C_{//}$ 表示平行板电容, ϵ 表示介电常数, S 为平板面积, d 表示板间距离。中间层电容 C 由 C_{LC} 与 C_{AC} 串联构成, C_{LC} 是液晶层电容, C_{AC} 是取向转换膜电容。根据图 3 所示的等效电路模型, 在仿真中, 把透镜圆孔从圆心到边缘进行 N 等分, 则电路模型中对应电容的计算如式(2)、(3)所示:

$$C_{LC} = \frac{\epsilon_r \pi r^2}{d(2N-1)}, \quad (2)$$

$$C_{AC} = \frac{\epsilon_{AC} \pi r^2}{d(2N-1)}, \quad (3)$$

其中 ϵ_r 是液晶 E7 的相对介电常数, ϵ_{AC} 是取向转换薄膜的相对介电常数。

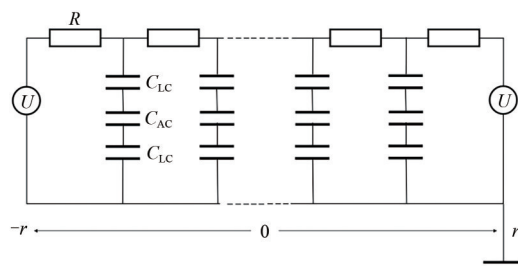


图3 模式控制液晶透镜的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit of modal LC lens

液晶层实际电压 U_{LC} 与 RC 电路节点电压的关系如式(4)所示:

$$U_{LC}=\frac{U}{2+\frac{C_{LC}}{C_{AC}}}.$$

(4)

本次实验使用的液晶材料是江苏合成显示科技有限公司的向列相液晶 E7,主要参数是: $n_e=1.741$, $n_o=1.521$, $\Delta n=0.225$, $\epsilon_{//}=19.5$, $\epsilon_{\perp}=5.1$, $\Delta\epsilon=14.4$ 。取向转换膜的介电常数是 2.311。

液晶透镜的工作原理可以分解为两个物理过程:(1)在交流方波的驱动下,高阻层等效面电阻与液晶电容形成回路,电压会从圆孔边缘到中心形成压降,从而驱动液晶分子发生偏转,控制液晶的空间折射率类似于抛物线分布,产生透镜聚焦效果。(2)液晶分子偏转会改变液晶层的介电常数,改变电容 C_{LC} 大小,进而影响交流电的电势分布。两种作用相互影响,最终达到动态平衡。

本文仿真采用 Matlab 软件。Matlab 软件可以同时计算等效电路节点电压和液晶分子指向矢分布,并通过多次迭代,得到液晶层稳定的电势分布和相位分布结果。

仿真一个高阻层方阻为 $10\text{ M}\Omega/\square$ 、盒厚为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 、孔径为 8 mm 的双层液晶透镜,使用 635 nm 的激光。依次改变驱动电压的大小和频率,找到 6 种聚光能力下的最佳驱动条件,结果如图 4 所示。

屈光度是评价透镜屈光能力的指标,透镜相位变化越大,透镜的屈光能力就越强,屈光度就越大,焦距就越小。从液晶层电势分布曲线以及相位分布曲线可以得出,双层模式控制液晶透镜实现了电控调焦的特性,通过改变电压大小和频率,可以调节液晶透镜的屈光度。

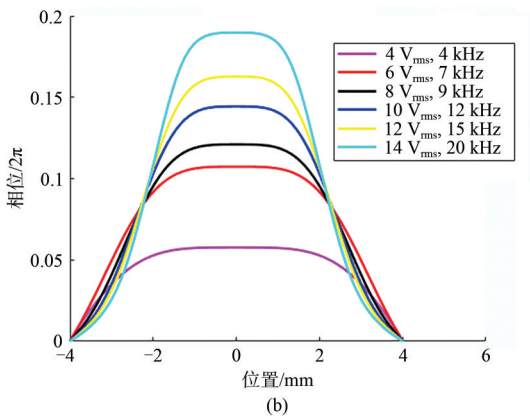
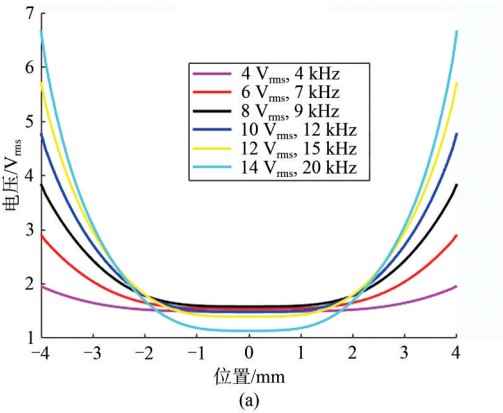


图 4 液晶层电势分布曲线(a)以及相位分布曲线(b)
Fig.4 Distribution curves of the voltage (a) and the phase (b) of LC layer

4 样品制备

双层液晶透镜的制备工艺流程如图 5 所示,主要分为两个环节:(1)取向转换膜的制备;(2)样品的制备。

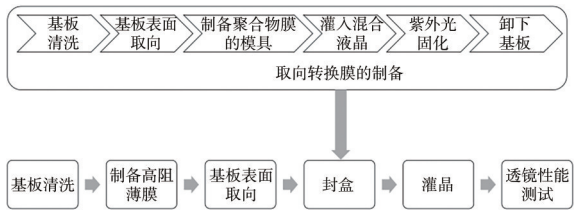


图 5 双层液晶透镜的制备流程图
Fig. 5 Fabrication flow of double-layer LC lens

制备取向转换膜的原材料是 RM257(4-(3-丙烯酰氧基丙氧基)苯甲酸 2-甲基-1,4-苯酯)、液晶 E7、光引发剂 184(1-羟基环己基苯基甲酮)以 80:20:1 的比例混合而来的 E7/RM257 混合物。将 E7/RM257 混合物灌入一个上下基板垂直取向、厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、上下基板可以拆卸的空盒中,在频率为 1 kHz 、振幅为 25 V_{rms} 的方波电压下,用强度为 $10\text{ mW}/\text{cm}^2$ 的紫外光曝光 1 h 。最后揭开液晶盒的上下基板,得到厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的取向转换膜。

双层液晶透镜的封盒采用麦拉片控制盒厚,使用 AB 胶封装透镜结构。为了将柔性的取向转换膜嵌入液晶透镜的中间,首先将取向转换膜紧贴在一块硬质基板上,再利用硬质基板将取向转换膜与上基板封盒。待 AB 胶完全固化之后,再

取下硬质基板,将已经封好的上层液晶与下基板封盒。封盒完成后,利用毛细吸管将 E7 灌入空盒的上下液晶层。最后用 AB 胶封住开口,待 AB 胶固化完全后,具有取向转换膜的双层液晶透镜就制备完成。

5 实验结果与分析

5.1 双层液晶透镜的偏振无关性验证

为了验证双层液晶透镜是否有偏振无关的特性,在图 6 所示的成像测试光路中改变偏振片的偏转角度,观察在不同偏振光下成像是否发生变化。

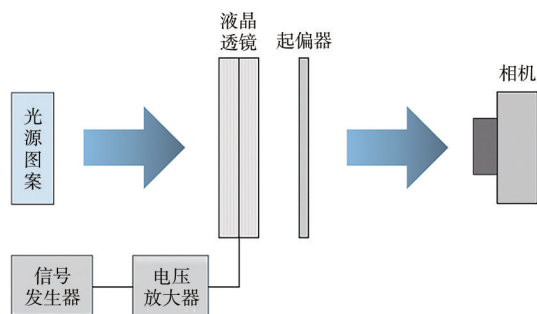


图 6 成像测试光路

Fig. 6 Optical path of imaging

图 7 显示的是在合适驱动电压下,双层液晶透镜在偏振片为 0° 、 90° ,或在没有偏振片的情况下都能清晰成像,且成像效果基本没有变化,因此双层液晶透镜具有偏振无关的特性。

为了进一步分析双层液晶透镜在任意方向的偏振无关性,在上一实验的驱动条件下,测量不同偏振方向的入射光经过液晶透镜的聚焦光强,同时使用检偏器测量出两层液晶分别的聚焦光强。实验中使用的是 635 nm 的激光,偏振角度的变化步长是 10° 。测量结果如图 8 所示。

对于上、下液晶层,其光强分布随着偏振角度的变化而改变,说明液晶单层是偏振相关的,其中上下两层液晶层的偏振方向互相垂直。从整体的归一化聚焦光强分布曲线可知,对于任意入射偏振光,双层液晶透镜的归一化聚焦光强分布几乎相同,其中光强的最大相对差值是 5.04%,说明双层液晶透镜在任意方向都具有良好的偏振无关特性。

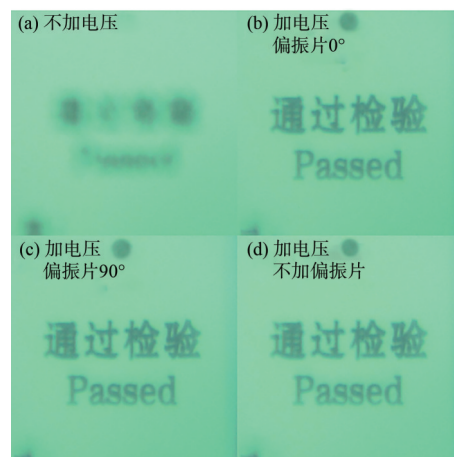


图 7 (a)液晶透镜在未加电压时成像模糊;(b)液晶透镜在合适的驱动电压下,在 0° 偏振光下成像清晰;(c)液晶透镜在合适的驱动电压下,在 90° 偏振光下成像清晰;(d)液晶透镜在合适的驱动电压下,在自然光下成像清晰。

Fig. 7 (a) Fuzzy image of LC lens without driving voltage; (b) Clear image under 0° polarized light by suitable driving voltage; (c) Clear image under 90° polarized light by suitable driving voltage; (d) Clear image under natural light by suitable driving voltage.

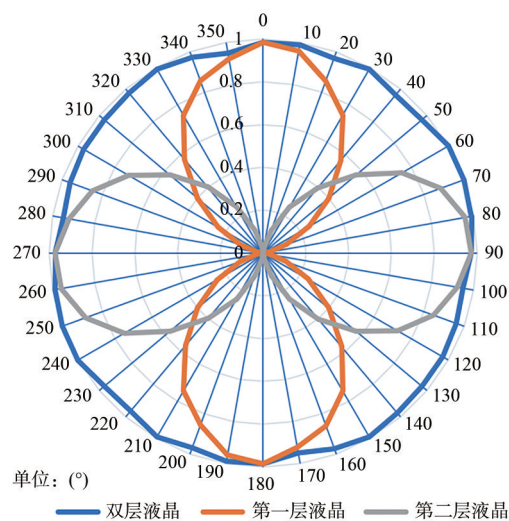


图 8 液晶透镜的归一化聚焦光强

Fig. 8 Normalized focused light intensity of LC lens

5.2 双层液晶透镜的性能测试

5.2.1 评估方法

双层液晶透镜性能的评估方法有相位分布、有效视场、焦距、屈光度、数值孔径以及液晶透镜的波前误差。

根据液晶透镜的干涉原理,相邻两条干涉条纹之间的光程差为一个波长 λ ,位相差为 2π 。因此,通过干涉环的分布情况可以计算液晶透镜的相位分布曲线。

液晶透镜的有效视场是指液晶透镜在实际成像测试光路中能够正常成像的区域。液晶透镜的焦距以及屈光度是评价液晶透镜屈光能力的指标。液晶透镜焦距的计算如式(5)所示:

$$f=\frac{r_0^2}{2(n_e-n_i)d}, \tag{5}$$

其中, n_e 是透镜中心的折射率, n_i 是透镜边缘的折射率。根据干涉原理,光程差可以通过干涉环的数量 N 计算得到,即:

$$(n_e-n_i)d=N\lambda. \tag{6}$$

结合式(5)、(6)可以得到液晶透镜的焦距计算公式:

$$f=\frac{r_0^2}{2N\lambda}. \tag{7}$$

透镜的屈光度与焦距成反比,即:

$$D=\frac{1}{f}. \tag{8}$$

透镜的数值孔径可以衡量一个光学系统能够收集的光的角度范围,是判断透镜性能高低的重要参数。根据定义可知,液晶透镜的数值孔径计算如式(9)所示:

$$N_A=nsin\alpha, \tag{9}$$

其中, n 是介质折射率, α 是物镜孔径角的1/2。

波前误差是评价透镜成像质量的重要指标。从物体发出的波面经过理想的凸透镜系统后,对应的出射波面是一个球面。由于实际光学系

统存在像差,实际波面和理想波面之间还存在偏差。波前误差可用来衡量实际波面与理想波面的偏差大小。本文是在有效视场的区域内,用理想的相位抛物线与实际测量的相位分布曲线差值的均方根来计算波前误差。波前误差的单位是 λ 。波前误差越小,透镜的成像质量越高。

5. 2. 2 测试结果

为了测试双层液晶透镜的成像性能,继续在成像测试光路中测试。调整不同的驱动条件,在不同的物距中找到最好的成像效果。

搭建图 9 所示的马赫-曾德尔干涉光路,记录液晶透镜在以上驱动条件的干涉环并计算相应的相位分布曲线。液晶透镜成像测试、透镜的干涉以及计算的相位分布的部分结果如图 10 所示。

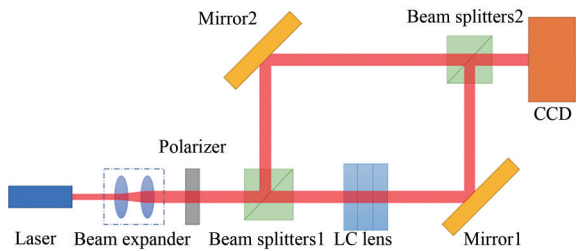
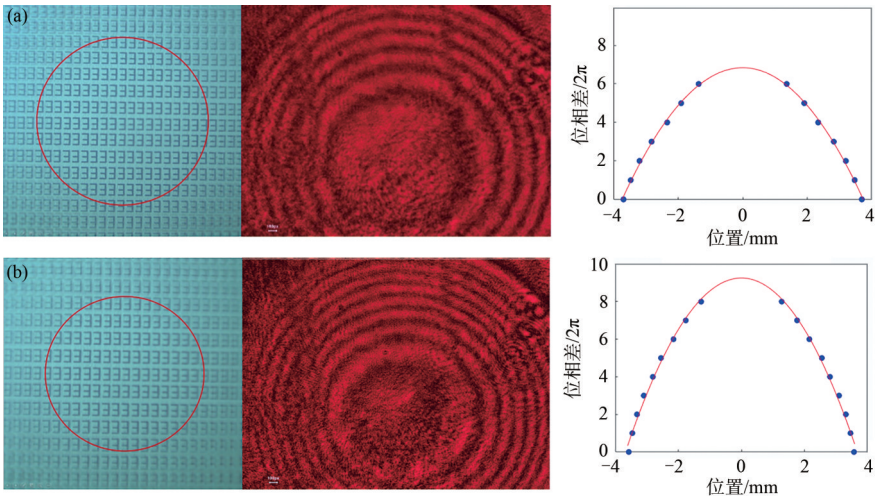


图 9 马赫-曾德尔干涉光路

Fig. 9 Mach-Zehnder interference optical path

根据图 10 所示的实验测试结果计算液晶透镜的性能参数,结果如表 1 所示。根据多个计算结果绘制液晶透镜的屈光度随驱动电压的变化曲线,如图 11 所示。



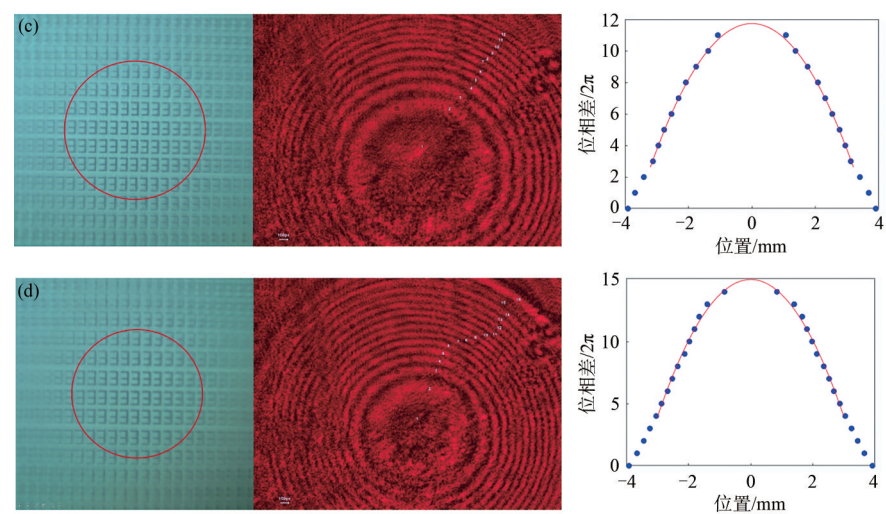


图 10 不同物距、不同驱动条件下的成像、干涉以及相位分布图。(a)物距 13 cm,电压 10.12 V_{rms} ,频率 150 kHz;(b)物距 12 cm,电压 15.1 V_{rms} ,频率 220 kHz;(c)物距 11 cm,电压 22.5 V_{rms} ,频率 300 kHz;(d)物距 10.5 cm,电压 28.8 V_{rms} ,频率 350 kHz。

Fig. 10 Imaging, interference and phase distribution diagrams at different voltage, frequency, and object distance. (a) 10.12 V_{rms} , 150 kHz, 13 cm; (b) 15.1 V_{rms} , 220 kHz, 12 cm; (c) 22.5 V_{rms} , 300 kHz, 11 cm; (d) 28.8 V_{rms} , 350 kHz, 10.5 cm.

表 1 液晶透镜性能参数

Tab. 1 Performance parameters of LC lens

物距/cm	驱动条件	有效视场直径/mm	焦距/m	屈光度/D	数值孔径/ 10^{-2}	波前误差/ λ
13	10.1 V_{rms} , 150 kHz	7.57	1.410	0.714	2.684	0.168
12	15.1 V_{rms} , 220 kHz	7.28	1.159	0.863	3.141	0.246
11	22.5 V_{rms} , 300 kHz	6.79	0.908	1.101	3.739	0.209
10.5	28.8 V_{rms} , 350 kHz	5.93	0.629	1.590	4.714	0.275

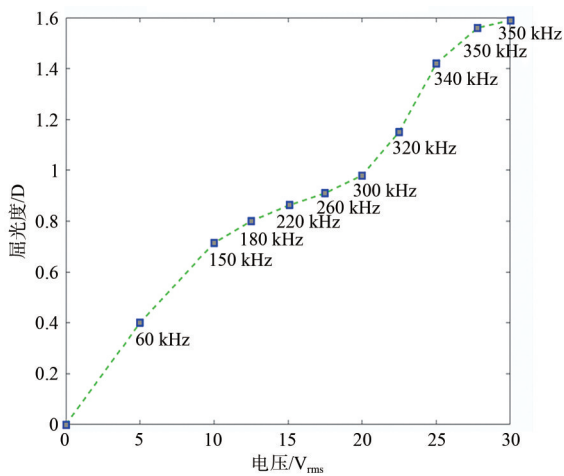


图 11 液晶透镜的屈光度-电压曲线

Fig. 11 Lens power of the LC lens as a function of an applied voltage

由表 1 可知,随着物距减小,需要更小的焦距,相机才能采集到成像图案。焦距更小说明透

镜的屈光度更大。在成像测试中,能够采集到的最小物距是 10.5 cm,此时液晶透镜的聚光能力最强,屈光度最大为 1.590 D。

要实现更大的屈光度,需要更大的电压振幅以及电压频率。这是因为液晶透镜的屈光能力来自液晶分子沿电场方向重新排列形成的梯度折射率分布,电压振幅直接决定电压变化的上限,电压频率会影响压降的幅度。频率越大,电势下降的幅度也会更大。

更大的屈光度会导致透镜的有效视场减小。这是因为更大的屈光度需要更大的电压振幅以及电压频率来匹配。更大的频率会使圆孔边缘的压降速度缓慢,圆孔边缘区域的电压就会过高,靠近圆孔边缘的液晶分子基本达到了偏转的最大值。因此,靠近圆孔边缘的区域相位变化相对较小,屈光能力不及圆孔中心区域,导致实际成像的视场变小。

液晶透镜的波前误差均方根值可以衡量透镜折射率抛物面与理想抛物面的偏差,是评价透镜成像质量的重要参数,波前误差均方根值越小,透镜性能越好。制备的 8 mm 孔径的双层液晶透镜的波前误差为 0.168~0.275 λ 。

6 结 论

本文研制了一种大孔径偏振无关的模式控制液晶透镜。通过仿真,论证了具有取向转换膜

的双层液晶透镜的可行性。制备的 8 mm 孔径的液晶透镜具有偏振无关的特性,同时具有调焦特性,实现了 0~1.590 D 的屈光度调节。其中的技术难点是控制双层液晶透镜结构每一层的均匀性。取向转换膜的均匀性由制备膜的模具控制。通过改进传统的封盒工艺,将柔性的取向转换膜嵌入到液晶透镜中间的同时,还能控制上下液晶层的厚度均匀性。由于采用了取向转换膜的柔性结构,也为应用于变焦眼镜奠定了良好的技术基础。

参 考 文 献:

- [1] KUWANO R, TOKUNAGA T, OTANI Y, *et al.* Liquid pressure varifocus lens [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 405-408.
- [2] SONG W Z, VASDEKIS A E, PSALTIS D. Elastomer based tunable optofluidic devices [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(19): 3590-3597.
- [3] LIN Y H, WANG Y J, RESHETNYAK V. Liquid crystal lenses with tunable focal length [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2018, 5(2): 111-143.
- [4] 苏树钊,姜海明,夏宏燕,等.电控梯度折射率液晶透镜研究进展[J].液晶与显示,2022,37(3):310-341.
SU S Z, JIANG H M, XIA H Y, *et al.* Research progress of electronically controlled gradient refractive index liquid crystal lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(3): 310-341. (in Chinese)
- [5] CHEN W W, PAN J W, JENG S C. Circularly polarized optical microscope using a low aberration liquid crystal lens [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4434-4437.
- [6] TIAN L L, CHU F, ZHAO W X, *et al.* Fast responsive 2D/3D switchable display using a liquid crystal microlens array [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5870-5873.
- [7] CHU F, GUO Y Q, ZHANG Y X, *et al.* Four-mode 2D/3D switchable display with a 1D/2D convertible liquid crystal lens array [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37464-37475.
- [8] LIN Y H, REN H W, WU Y H, *et al.* Polarization-independent liquid crystal phase modulator using a thin polymer-separated double-layered structure [J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 8746-8752.
- [9] LIN Y H, CHEN H S. Electrically tunable-focusing and polarizer-free liquid crystal lenses for ophthalmic applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9428-9436.
- [10] CHEN H S, WANG Y J, CHANG C M, *et al.* A polarizer-free liquid crystal lens exploiting an embedded-multilayered structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 899-902.
- [11] REN H W, LIN Y H, FAN Y H, *et al.* Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(14): 141110.
- [12] OTON E, NETTER E, NAKANO T, *et al.* Monodomain blue phase liquid crystal layers for phase modulation [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 44575.
- [13] KUMAR M B, KANG D, JUNG J, *et al.* Compact vari-focal augmented reality display based on ultrathin, polarization-insensitive, and adaptive liquid crystal lens [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106006.
- [14] CUI C H, BAO R, YU S D, *et al.* Polarizer-free imaging using reference image for liquid crystal lens [J]. *Optics Communications*, 2015, 342: 214-217.
- [15] 赵勇志,曹玉岩,韩西达,等.大口径透镜柔性支撑结构设计与分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(5):1-7.
ZHAO Y Z, CAO Y Y, HAN X D, *et al.* Design and mechanical analysis of the flexible mounting structure for the large aperture lens [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*,

- 2018, 41(5): 1-7. (in Chinese)
- [16] 刘鹏辉,李诗尧,王文雯,等. 柔性液晶微透镜阵列的制备与性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0323001.
LIU P H, LI S Y, WANG W W, *et al.* Preparation and properties of flexible liquid crystal micro-lens arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(3): 0323001. (in Chinese)
- [17] HUANG J L, TANG W. Color film substrate, flexible liquid crystal display panel and preparation method: US, 10845638 [P]. 2020-11-24.
- [18] LIN Y H, CHEN M S, WANG Y J. Flexible liquid crystal cells and lenses: US, 2021072590 [P]. 2021-03-11.
- [19] TANG S T, KWOK H S. Measurement of reflective liquid crystal displays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(11): 8950-8954.
- [20] UCHIDA T, SEKI H, SHISHIDO C, *et al.* Bright dichroic guest-host LCDs without a polarizer [J]. *Proceedings of the SID*, 1981, 22(1): 41-46.
- [21] HASEGAWA M, TAKEDA K, SAKAGUCHI Y, *et al.* 320-dpi 4-inch reflective stacked crossed guest-host display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 1999, 30(1): 962-965.
- [22] HASEGAWA M, HELLERMARK C, NISHIKAI A, *et al.* Reflective stacked crossed guest-host display with a planarized inner diffuser [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2000, 31(1): 128-131.

作者简介:



黎四明(1997—)男,四川南充人,硕士研究生,2019年于东南大学获得学士学位,主要从事液晶透镜方面的研究。
E-mail: 220191370@seu.edu.cn



李青(1964—)女,山东威海人,博士,教授,2002年于东南大学获得博士学位,主要从事物理电子学及显示电子学方面的研究。E-mail: liqing@seu.edu.cn