

文章编号:1007-2780(2026)05-0637-12

基于独立电压驱动控制环带带宽的 同心圆环菲涅耳液晶透镜

赵卓然, 刘志强, 叶 茂*

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:针对传统菲涅耳液晶透镜外层环带带宽随环带数增加急剧减小,造成光学性能降低、有效孔径受限的问题,本研究提出一种基于叉指电极的同心圆环菲涅耳液晶透镜结构,通过独立控制各环带驱动电压拓宽外层环带带宽。将驱动电压控制在液晶线性响应区并经理论计算使各环带电压满足导数连续条件,实现抛物面电压分布。实验制备了孔径为 2 mm、液晶层厚 30 μm 、环带带宽分别为 0.4 mm、0.3 mm、0.3 mm 的液晶透镜,其外层环带较具有同等最大光焦度的双总线电压驱动结构分别增大 5 μm 和 73 μm 。偏振干涉测试表明,相位分布抛物线拟合优度高于 99%,正负透镜最大相位变化分别为 20.9π 和 22π ,与理论值 21.8π 基本一致;光焦度在 $-9.7\sim 10.1$ D 内连续可调,且与电压差近似呈线性关系。成像测试显示,该结构的 MTF₅₀ 值达 0.151 cycles/pixel,优于传统双总线驱动结构的 0.132 cycles/pixel,变焦成像清晰。结果表明,该设计可有效扩展外层环带带宽,实现高质量抛物相位分布与优良成像性能。

关键词:光学器件;菲涅耳液晶透镜;电极结构;相位分布

中图分类号:O435.1;O753.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0047 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0047

Concentric Fresnel liquid crystal lens with ring bandwidth controlled by independent voltage driving

ZHAO Zhuoran, LIU Zhiqiang, YE Mao*

(School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to solve the problem that the bandwidth of the outer zone of traditional Fresnel liquid crystal lens decreases sharply with the increase of the number of zones, which leads to the decrease of optical quality and the limitation of effective aperture, this study proposes a concentric ring Fresnel liquid crystal lens structure which uses interdigital electrode structure to independently control the driving voltage of Fresnel zone and then control the bandwidth of Fresnel zone, in order to broaden the bandwidth of the outer zone. Firstly, the driving voltage is limited in the linear response region of liquid crystal, and the driving voltage of each ring zone satisfies the derivative continuity condition through theoretical calculation to form a parabolic voltage distribution. Subsequently, a liquid crystal lens with an aperture of 2 mm, a liquid crystal layer thickness of 30 μm and three Fresnel zones (bandwidths of 0.4 mm, 0.3 mm and 0.3 mm) was fabricated. Compared with the traditional concentric ring design with maximum power, the outer zone

收稿日期:2026-03-19;修订日期:2026-04-12.

*通信联系人, E-mail:mao_ye@uestc.edu.cn

increased by $5\text{ }\mu\text{m}$ and $73\text{ }\mu\text{m}$ respectively. Then, the polarization interference optical path is used to collect interference fringes and extract phase information. Experiments show that the goodness of fit of lens phase distribution and parabola is more than 99%, the maximum phase variation of positive and negative lenses is 20.9π and 22π , which is highly consistent with the theoretical reference value of 21.8π , and the power can be continuously adjusted in the range of $-9.7\sim 10.1\text{ D}$, and it is approximately linear with the driving voltage difference. In addition, the imaging performance of the designed Fresnel liquid crystal lens is tested and evaluated. Based on ISO12233 resolution plate, the MTF50 value is 0.151 cycles/pixel, which is higher than that of Fresnel liquid crystal lens (0.132 cycles/pixel) designed by traditional formula and driven by double bus voltage. This result proves that increasing the bandwidth of Fresnel zone on the outer layer of the lens can effectively improve its optical imaging quality. The experimental results of zoom imaging also show that the liquid crystal lens has outstanding zoom ability. This design effectively realizes the expansion of the outer ring bandwidth and the parabolic phase distribution with high quality.

Key words: optical devices; liquid crystal Fresnel lens; electrode structure; phase distribution

1 引言

近年来,随着现代光学技术的不断发展,液晶(LC)透镜的发展前景逐渐受到广泛关注。液晶因其所具有的光学和电学各向异性,故而在液晶透镜的电极上通过施加电压来改变液晶分子的排列方式,使其在各个方向上分布有不同的折射率,进而改变液晶透镜的焦距。液晶透镜由 Sato^[1]于 1979 年提出。相较于传统的机械变焦方式,液晶透镜具有电控调节的特点,因此可以使成像装置实现轻量化。凭借其广阔的应用前景,目前液晶透镜已经在消费电子^[2]、医学超高分辨率成像^[3-4]、自动对焦^[5]、景深扩展^[6]、AR/VR^[7]与 3D 成像^[8-10]等各个领域实现了不同程度的应用。但是在视力矫正^[11]等领域,液晶透镜的毫米乃至微米级别的孔径大小尚难以适应大孔径设备的要求。

Ye 等^[12]通过在氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)圆孔电极和液晶层中间之间增设较厚介电层,成功扩大了液晶透镜的孔径,但也带来驱动电压较高(通常需数十伏)的问题。高驱动电压会限制液晶透镜的应用范围。为降低驱动电压并扩大透镜孔径,高阻膜被引入液晶透镜的设计中^[13-16],实现了低电压下的大口径透镜调控。随着研究的深入,高阻膜阻值的不稳定性与均匀性难以控制的问题逐渐凸显,成为制约液晶透镜走向实用化的关键因素。最近报道了一些通过使用微结构 ITO 电极来代替高阻膜的液晶透镜设计方案^[17-19],这些设计解决了高阻膜所带来的问题。其中 Algorri

等^[17]研发了一种基于同心圆电极与非均匀宽度电极组合的大孔径液晶透镜,不仅摆脱了对高阻膜的依赖,还实现了焦距的正负调节功能。

Feng^[20-22]等报道了一种电极结构简化的液晶透镜及折射型菲涅耳液晶透镜。该电极采用相互连接的圆形电极图案,在双电压信号驱动下能够生成抛物型的电场分布;当液晶工作于线性响应区间时,即可获得所需的抛物线状相位剖面。然而,对于菲涅耳液晶透镜而言,透镜外层的菲涅耳环带带宽会变得非常狭窄,导致光学质量下降,进而使光学孔径受限。

本文提出了一种通过采用叉指电极^[20,23-24]独立驱动不同菲涅耳环带的电压使分布的相位呈抛物线状的方法来增加菲涅耳外层环带带宽的宽度,进而解决因传统菲涅耳液晶透镜因受到带宽限制引起光学质量下降导致光学孔径受限的问题。相较于现有方法所设计的菲涅耳液晶透镜,本方法所设计的电极结构制作方式简单,无需高阻膜,外层带宽大小可突破传统设计几何关系的限制,同时可与传统结构设计方法结合,只在较为狭窄的外层菲涅耳环带进行独立电压控制。此设计方法虽然因为只有最外层环带的驱动电压能够完整利用液晶的线性响应区导致光焦度上限有所下降,但可在后续研究中通过优化电极结构设计从而利用液晶的非线性响应区来弥补。本工作基于该方法设计制作了同心圆环电极液晶透镜,获取液晶透镜在不同驱动电压下的干涉条纹从而得到相位数据,并利用此液晶透

镜进行成像实验。实验结果表明,透镜的相位呈抛物线分布,光学成像质量有明显提升,与理论分析结果相一致。

2 电极结构及其原理

根据理想菲涅耳透镜的设计原理,在每个菲涅耳带需要进行光学相位的重置。定义中心的菲涅耳带为第1带,将第1菲涅耳带的外边界半径记为 $r_{\text{inner},1}$,外边界半径记为 $r_{\text{outer},1}$,则后续各菲涅耳带内边界 $r_{\text{inner},i}$ 和外边界 $r_{\text{outer},i}$ 的半径需满足特定的数学关系:

$$\begin{cases} r_{\text{inner},i} = r_{\text{outer},1} \sqrt{i-1} \\ r_{\text{outer},i} = r_{\text{outer},1} \sqrt{i} \end{cases} \quad (1)$$

基于公式(1),可以进一步推导出每个菲涅

耳带的宽度 W_i :

$$W_i = (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}) r_{\text{outer},1} \quad (2)$$

从式(2)不难发现,透镜外层环带带宽会变得极为狭窄,进而影响透镜的光学质量和孔径。为拓宽透镜外层的菲涅耳环带的宽度,可通过独立控制菲涅耳环带的驱动电压的方法设计电极结构。

本文所设计的同心圆环菲涅耳液晶透镜电极结构如图1所示。以具有3个菲涅耳环带的电极结构为例,该结构由两片玻璃基板与夹于其间的液晶层构成。其中一片基板内侧刻有ITO电极图案,另一片则为无图案的平面基板,菲涅耳环带的带宽可以自行决定。该电极内半径用一根总线 V_1 进行驱动,外半径则通过分布式的叉指电极对各个菲涅耳环带进行独立驱动。各菲涅耳区内的圆形电极彼此互连,构成一个连续的整体电极。

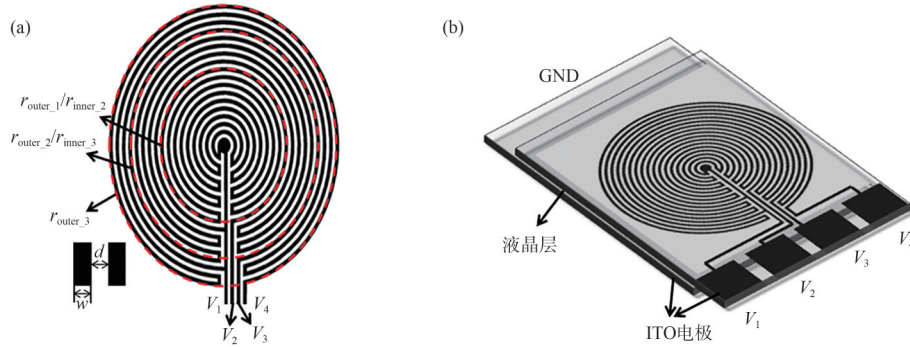


图1 同心圆环菲涅耳液晶透镜。(a)电极结构;(b)透镜结构。

Fig. 1 Concentric re Fresnel liquid crystal lens. (a) Electrode structure; (b) Lens structure.

将图案按照每一个菲涅耳环带进行拆分,空间任意点的电压值由该点所在菲涅耳区内,从其位置到内边界电极线的总长度 $L(r)$ 所决定。在设定电极厚度均匀、线宽为 w 、间距为 d 、 $r_{\text{inner},i} \leq r \leq r_{\text{outer},i}$ 的条件下,可确定电极线长度的具体分布:

$$L(r) = \int_{r_{\text{inner},i}}^r 2\pi r \rho dr = \rho \pi (r^2 - r_{\text{inner},i}^2), \quad (3)$$

式中, $\rho = 1/(w+d)$ 表示曲线沿径向的密度。根据欧姆定律,可以得出电压在每一个菲涅耳带的电压分布:

$$V(r) = V_1 + \frac{\int_{r_{\text{inner},i}}^r 2\pi r \rho dr}{\int_{r_{\text{inner},i}}^{r_{\text{outer},i}} 2\pi r \rho dr} (V_i - V_1) = V_1 + \frac{r^2 - r_{\text{inner},i}^2}{r_{\text{outer},i}^2 - r_{\text{inner},i}^2} (V_i - V_1). \quad (4)$$

菲涅耳液晶透镜每一环带由两个电压(V_1 与 V_i)共同驱动。当 V_1 固定为1.6 V,为最小驱动电压时时,液晶透镜工作在正透镜状态;反之,液晶透镜工作在负透镜状态。若将驱动电压控制在相位-电压响应曲线的线性区间内,透镜的光焦度将与驱动电压差绝对值呈现正比关系^[25]。

为实现抛物线型的电压分布,核心在于对每个菲涅耳环带外边界处的驱动电压进行独立调节,其目的是确保所有环带产生的电压(或相位)剖面能够协调一致,从而在完成相位解包裹后,整体上构成一个理想且连续的抛物线分布。这一设计最终使得所有菲涅耳环带都具备一个共同的焦点。

为使各带电压解包裹后形成连续抛物线,需满足电压导数连续,因此每一带需满足:

$$\frac{V_i - V_1}{r_{\text{outer}_i}^2 - r_{\text{inner}_i}^2} = k, \quad (5)$$

式中, k 为一常数。因此, 可以得出每一菲涅耳环带外半径驱动电压:

$$V_i = V_1 + k(r_{\text{outer}_i}^2 - r_{\text{inner}_i}^2). \quad (6)$$

由式(6)可得, 各电极的驱动电压随菲涅耳环带带数的增加逐渐增大, 只要将各电极的驱动电压均限定在液晶材料的线性响应范围内, 液晶层内所形成的相位分布即会呈现理想的抛物线形态。

为验证所设计方法在大口径液晶透镜领域内的应用, 本文设计了一种与传统结构设计方法结合, 只在较为狭窄的外层菲涅耳环带进行独立电压控制的多环带大口径菲涅耳液晶透镜, 并对其进行了理论仿真。所设计的菲涅耳液晶透镜环带数

为 10 带, 中心环带带宽为 $1\,581\,\mu\text{m}$ 。根据传统公式(2)可知, 从第 8 带开始, 菲涅耳环带带宽开始小于 $300\,\mu\text{m}$ 。运用本文所提出的方法通过 3 个独立驱动电压控制第 8~10 带的带宽固定在 $300\,\mu\text{m}$, 其余 1~7 带依旧用两根总线电压驱动, 最终得到一个孔径大小为 $1.016\,\text{cm}$ 的菲涅耳液晶透镜。

以所设计结构用 Comsol 进行电势分布仿真, 根据公式(6)可知, 当驱动电极以中心电极依次向外施加 $V_1=1.6\,\text{V}$ 、 $V_2=2.359\,\text{V}$ 、 $V_3=2.390\,\text{V}$ 、 $V_4=2.445\,\text{V}$ 、 $V_5=2.5\,\text{V}$ 时可以产生正光焦度, 形成正透镜。同理, 当驱动电极以中心电极依次向外施加 $V_1=2.5\,\text{V}$ 、 $V_2=1.741\,\text{V}$ 、 $V_3=1.710\,\text{V}$ 、 $V_4=1.655\,\text{V}$ 、 $V_5=1.6\,\text{V}$ 时可以产生负光焦度, 形成负透镜。提取透镜的电极层表面和一条直径方向的电压数据进行分析, 得到结果如图 2 所示。

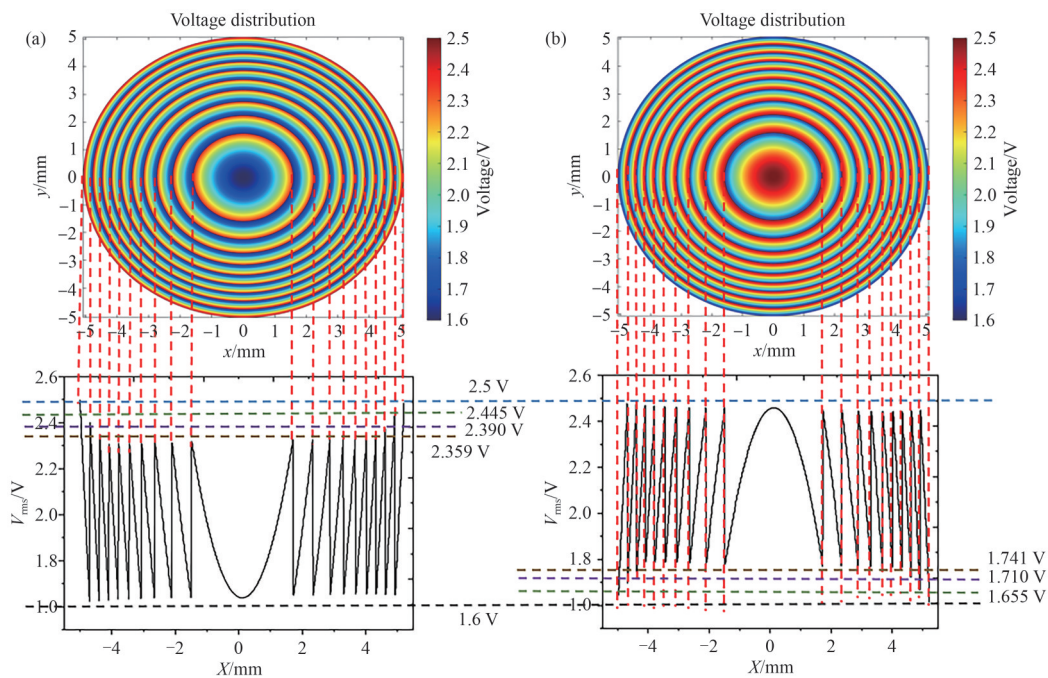


图 2 菲涅耳液晶透镜电压分布仿真结果。(a)正透镜;(b)负透镜。

Fig. 2 Simulation results of voltage distribution for Fresnel liquid crystal lens. (a) Positive lens; (b) Negative lens.

对图 2 中沿透镜直径方向测得的电压分布结果, 先进行解包裹处理, 随后采用回归多项式对其进行曲线拟合。图 3 给出了实际测量电压与拟合曲线的对比结果, 其中红色曲线为多项式拟合曲线, 黑色离散点为实际采集的电压观测数据。通过计算拟合优度可知, 各条拟合曲线校正后的决定系数 R^2 均高于 0.999 8, 表明实测数据与拟合曲线高度吻合。由此可以判定, 该电极结构在液晶层内

激励出的电场空间分布近似为理想抛物线分布。

当液晶透镜工作在液晶的相位-电压响应特性呈线性的区间内时, 其相位分布可近似等效于电场分布, 因此该结构能够实现近似抛物线的相位调制, 满足菲涅耳液晶透镜对理想波前的要求。上述分析与实验结果共同验证了本文所提设计方法在大口径液晶透镜设计中的合理性, 为其实际应用提供了充分的理论支撑。

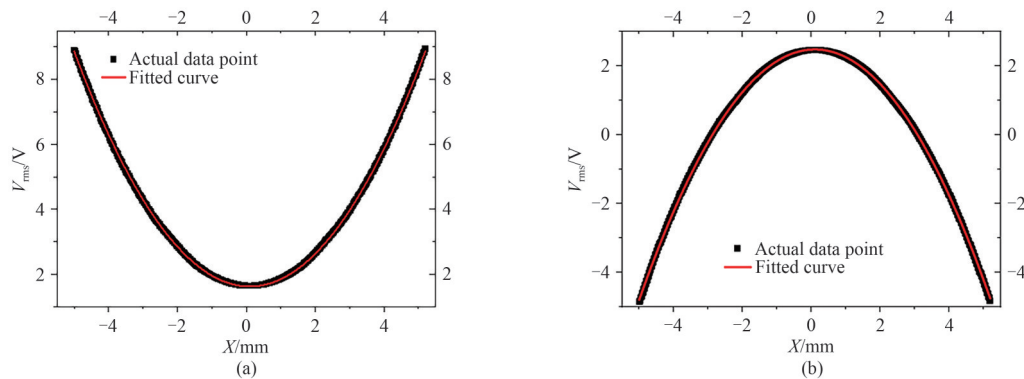


图3 解包裹后的菲涅耳透镜电压分布。(a)正透镜;(b)负透镜。

Fig. 3 Voltage distribution of Fresnel lens after graph unwrapping. (a) Positive lens; (b) Negative lens.

3 实验与结果

3.1 液晶透镜制备流程

本实验采用光刻酸蚀技术精密制备带有所设计电极图案的ITO玻璃基板,将其与一片无电极结构的ITO玻璃基板相搭配,按照标准化流程制备液晶盒。液晶盒的构建流程如下:(1)将加工完成的有电极图案的玻璃基板和一片无电极结构的玻璃基板一起放入超声清洗机,依次采用纯水、乙醇作为清洗液进行超声清洗,为后续工艺提供洁净的基底;(2)在两片玻璃基板上利用旋涂工艺涂上聚酰亚胺(PI)取向层,旋涂转速设定为3 000 r/min,涂覆完成后先将基板置于加热台上恒温处理30 min,再放入高温烤箱中250 °C下烘烤90 min;(3)采用摩擦机对已涂覆并固化PI取向层的玻璃基板表面进行定向摩擦处理,摩擦取向完成后在玻璃基板的背面标明取向方向;(4)根据所设计电极的精度选择合适厚度的间隔子,与紫外光固化胶混合后点涂于基板边缘或四角,覆盖另一片基板形成对盒结构(根据玻璃基板背面标明的方向使两基板ITO面相对,摩擦方向呈反平行排列),并以紫外光照射使胶体固化;利用毛细管灌注液晶材料(如HTG148700-100型液晶),灌注完成后用紫外胶对盒体边缘进行

封边处理,防止液晶泄漏;(5)借助导电银胶将ITO电极引出,便于后续对液晶透镜施加精确的驱动电压。液晶盒的结构如图4所示。

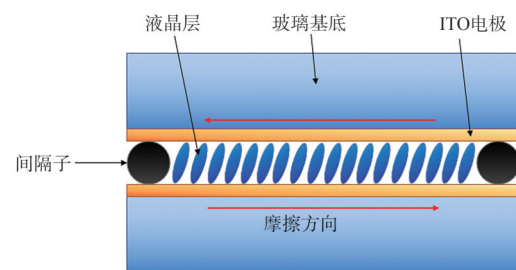


图4 液晶盒结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of LC cell

3.2 液晶响应曲线测量

本实验制作的液晶透镜所用液晶为HTG148700-100型材料,为获取该液晶的响应特性,制作了不含电极图案的盒厚30 μm的液晶盒。相位响应测量采用基于偏振干涉原理的光路系统,其示意图见图5。该系统使用波长为532 nm的激光光源,光线通过扩束系统进行扩束,垂直入射至液晶样品。光路中包含一对偏振方向相互垂直的起偏器与检偏器,液晶盒被置于二者之间。在此配置下,入射的线偏振光可分解为两个正交分量:

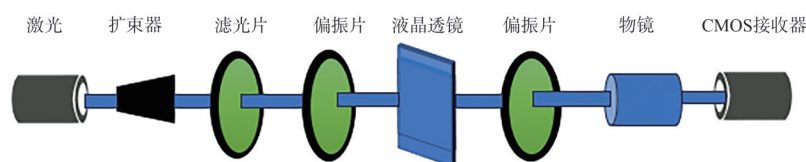


图5 单轴偏振光路实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of uniaxial polarized light path experimental device

一束平行于摩擦方向(e光),会受到液晶层的相位调制;另一束则垂直于摩擦方向(o光),其相位不受影响。由于液晶的双折射特性,两个分量在穿过液晶盒后会产生光程差。随后,检偏器将它们投影到同一偏振方向上,从而发生干涉形成干涉条纹,并由CMOS接收。实验时,通过计算机控制的信号发生器向液晶盒施加交流电压,并改变其幅值,CMOS探测到的干涉光强将随之变化,据此可解析出液晶的相位响应特性。通过此干涉光学系统采集不同驱动电压(从0 V开始按设定步长递增)下的干涉图像,依据归一化光强数据绘制出液晶的响应曲线。

根据干涉测量原理,CMOS探测器采集到的相邻光强峰值对应相位变化,相位-电压响应曲线如图6所示。分析该曲线可知,当电压低于1.1 V时,相位基本保持不变;在1.62~2.52 V的电压区间内,液晶相位与驱动电压之间呈现良好的线性关系,对应的相位变化约为 11π ;当电压过高时,因液晶分子趋于饱和使响应逐渐平缓。因此,后续液晶透镜的实验驱动电压将设定在上述线性区间内。尽管不同液晶材料的响应特性存在差异,但其相位-电压曲线均存在类似的线性工作区域,均可通过本方法测定后用于透镜的电压控制。

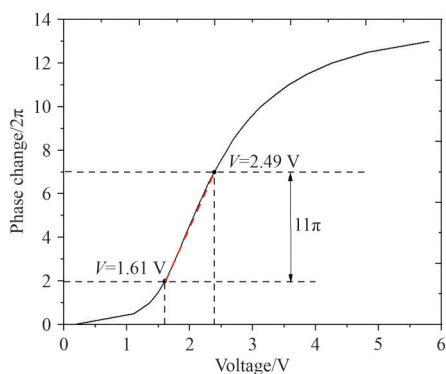


图6 液晶的相位-电压响应曲线

Fig. 6 Phase-voltage response curve of liquid crystal

3.3 实验数据测量分析

本实验为验证理论,制作的液晶透镜孔径为2 mm,菲涅耳环带数为3带,从内到外带宽分布为0.4 mm、0.3 mm、0.3 mm,线宽和间隔均为 $5\mu\text{m}$,实物如图7所示。每一个菲涅耳环带内半径的驱动电压由一根总线 V_1 进行驱动,3个菲涅耳环带

的外半径的驱动电压采用叉指电极的结构,由3根电极线引出,分别为 V_2 、 V_3 、 V_4 ,该设计可有效减少驱动电压的路数,简化器件结构。

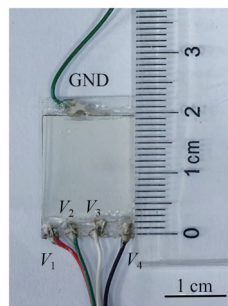


图7 液晶透镜实物示意图

Fig. 7 Schematic diagram of liquid crystal lens

在正透镜状态下,为了使新型菲涅耳电极结构的每一环带解包裹后具有相同的焦点,固定最内层菲涅耳环带外半径的驱动电压 V_1 为液晶的线性响应区的最小值1.6 V,最外层菲涅耳环带外半径的驱动电压 V_4 为液晶的线性响应区的最大值2.5 V。根据公式(5)计算出理想抛物线的曲率,再根据曲率结合公式(6)得出每一菲涅耳环带的外半径的驱动电压,其中 V_2 、 V_3 分别为1.882 V、2.182 V。根据相同方法可以得出负透镜的驱动电压, V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为2.5 V、2.218 V、1.918 V、1.6 V。根据每一菲涅耳环带的驱动电压,利用图6所得到的液晶响应曲线,可得到实验理论上的相位最大变化基准值 21.8π 。

以最中心菲涅耳环带为基准,根据液晶透镜的光焦度公式(7)可以得到液晶透镜的光焦度 P 与孔径的平方成反比:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{(n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}})h}{2D^2}, \quad (7)$$

其中: f 是液晶透镜的焦距, n_{eff1} 和 n_{eff2} 分别是e光经过液晶透镜中心和边缘的等效折射率, h 是液晶层的厚度, D 是透镜的孔径直径。

因为在线性区内驱动电压差与液晶的 Δn_{eff} 成近似线性关系,因此光焦度正比于驱动电压差。根据计算得出的最内层外半径的驱动电压值 V_1 和已知的中心菲涅耳环带带宽,结合光焦度与驱动电压差和孔径大小的关系,可计算出基于传统带宽公式(2)所设计的,由两根总线电压(内半径和外半径驱动电压分别为1.6 V和2.5 V)驱

动、且最大光焦度相同的同心圆环菲涅耳液晶透镜^[20],其中心环带带宽为 $714\ \mu\text{m}$;再根据传统带宽公式(2)可以得出第2层和第3层环带带宽分别为 $295\ \mu\text{m}$ 、 $227\ \mu\text{m}$ 。本实验所制作的液晶透镜外层环带分别增加了 $5\ \mu\text{m}$ 、 $73\ \mu\text{m}$,成功突破了传统设计外层带宽狭窄的限制。

为探究透镜光焦度及相位分布与驱动电压差之间的关系,实验中对所制备的正、负透镜分别施加不同电压,并利用图5所示装置采集对应的干涉条纹。在正透镜状态下, V_1 固定为 $1.60\ \text{V}$,最外层菲涅耳环带的外半径驱动电压 V_4 由 $2.50\ \text{V}$

逐步降至 $2.20\ \text{V}$,根据公式(6)计算出相应的 V_2 、 V_3 的值。图8(a)~(d)为 V_4 分别等于 $2.50\ \text{V}$ 、 $2.40\ \text{V}$ 、 $2.30\ \text{V}$ 和 $2.20\ \text{V}$ 时正透镜所对应的干涉条纹。对于负透镜状态, V_1 固定为 $2.50\ \text{V}$,而 V_4 从 $1.60\ \text{V}$ 逐步升高至 $1.90\ \text{V}$,根据公式(6)计算出相应的 V_2 、 V_3 的值。利用开发板构建信号源,其输出的幅值、相位与频率等参数均可由上位机软件灵活设定,图8(e)~(h)分别展示了 V_4 为 $1.60\ \text{V}$ 、 $1.70\ \text{V}$ 、 $1.80\ \text{V}$ 和 $1.90\ \text{V}$ 时负透镜的干涉条纹。从图8观察到,随着 $|V_4 - V_1|$ 的增大,干涉条纹数量逐渐增多。

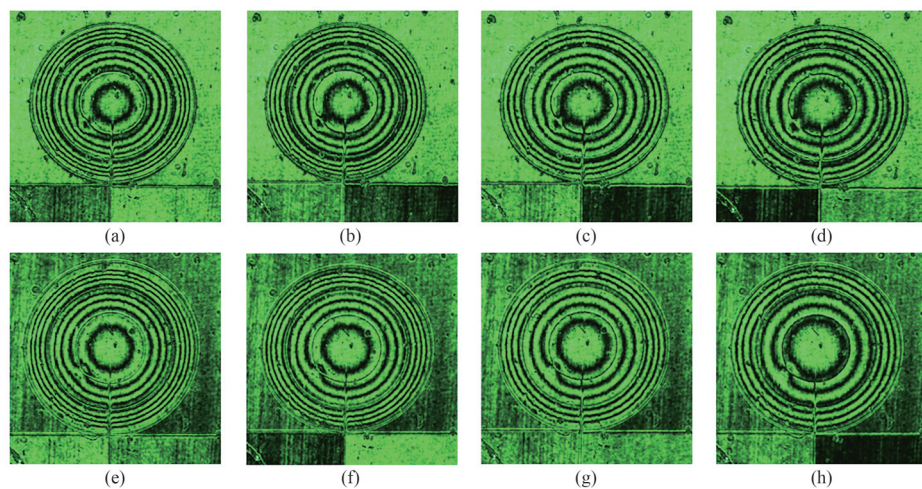


图8 不同电压下的单轴光路干涉条纹图。(a)~(d)正透镜;(e)~(h)负透镜。

Fig. 8 Interference fringe pattern of uniaxial optical path under different voltages. (a)~(d) Positive lens; (e)~(h) Negative lens.

同时,在菲涅耳带边界处,由于相邻电极间电压发生变化,相位分布会产生剧烈的波动。受此影响,该区域内会形成多根条纹。该区域的相位变化速率极快,使得入射至该区域的光线发生散射。当外层菲涅耳带带宽过于狭窄时,该部分会对成像效果产生较大的影响。

为精确测量光焦度与相位响应,实验采用图9

所示的马赫-曾德尔干涉装置采集液晶透镜的干涉斜条纹。激光经偏振片后形成与液晶透镜取向方向一致的线偏振光,再由分光镜分为两束。其中一束光路中置入液晶透镜,从而与另一束光产生光程差,最终两束光由CMOS接收器接收并形成干涉图样。

为获得更高测量精度,通过微调反射镜获得

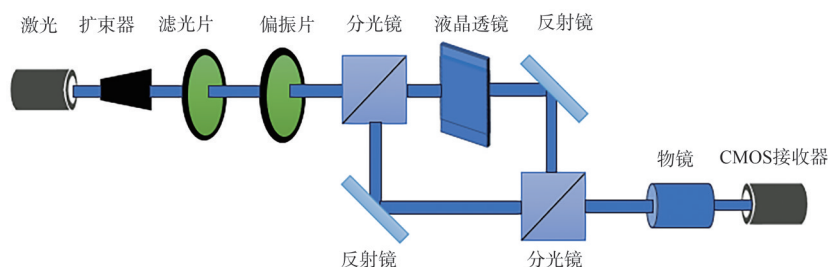


图9 马赫-曾德尔干涉装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer

数目较多的斜条纹。采用与单轴偏振光路实验相同的驱动电压进行实验,取菲涅耳液晶透镜最外层环带驱动电压差为自变量,得到在不同电压差(ΔV)下采集的干涉图(图 10),可以看到条纹弯曲度随 $|\Delta V|$ 增大而增加。

经提取沿中轴线上的一维相位分布信息并拟合,获得的相位曲线呈抛物线分布(图 11),其中图形表示实际的相位数据点,曲线表示由数据点拟合的相位曲线。正、负透镜的相位曲线拟合结果见表 1。所有曲线拟合优度(R^2)均大于 99%,证实了相位分布高度符合抛物线模型。实测从边缘到中心的相位变化量,正透镜为 20.9π ,负透镜为 22π ,与实验理论上的基准值(21.8π)基本

吻合,验证了透镜的成像与变焦功能。这为基于相位-电压响应曲线,精确设计透镜光焦度或焦距的方法提供了直接依据,对液晶透镜的工程应用具有重要指导意义。

用所提取的相位波前信息对光焦度进行计算分析,取最外层菲涅耳环带的电压差为横坐标,结果如图 12 所示。透镜中心的光焦度可在 $-9.7\sim 10.1\text{ D}$ 的宽范围内进行调节,且其与驱动电压差之间呈现出近似的线性依赖关系。

为评估所设计菲涅耳液晶透镜的成像质量,搭建了对应成像光路,将偏振片旋转至偏振角度与液晶摩擦方向相互平行,成像光路如图 13 所示。实验中选用 ISO12233 分辨率板作为成像物体。

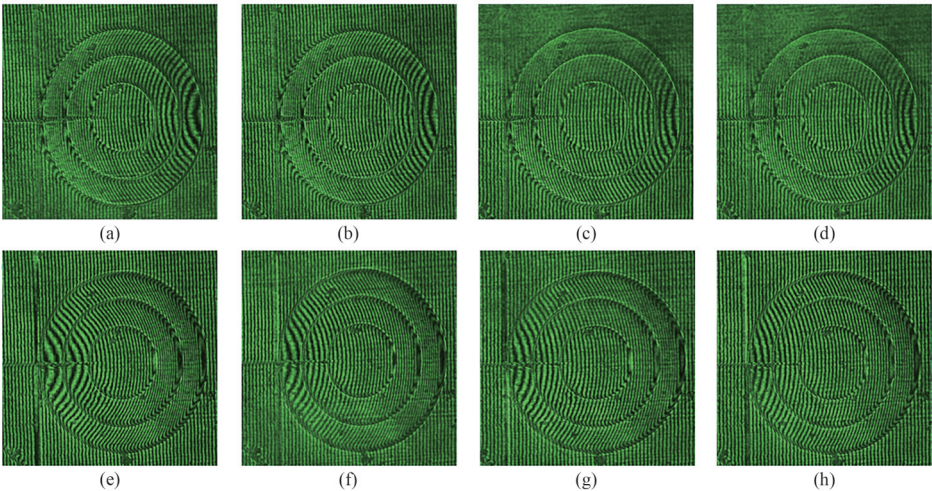


图 10 不同电压下的马赫-曾德尔光路干涉条纹图。最外层菲涅耳环带电压差为(a) 0.9 V、(b) 0.8 V、(c) 0.7 V、(d) 0.6 V 时的正透镜;电压差为(e) 0.9 V、(f) 0.8 V、(g) 0.7 V、(h) 0.6 V 时的负透镜。

Fig. 10 Interference fringe patterns of the Mach-Zehnder optical path under different voltages. Positive lens with an outermost Fresnel zone voltage difference of (a) 0.9 V, (b) 0.8 V, (c) 0.7 V, (d) 0.6 V; Negative lens with a voltage difference of (e) 0.9 V, (f) 0.8 V, (g) 0.7 V, (h) 0.6 V.

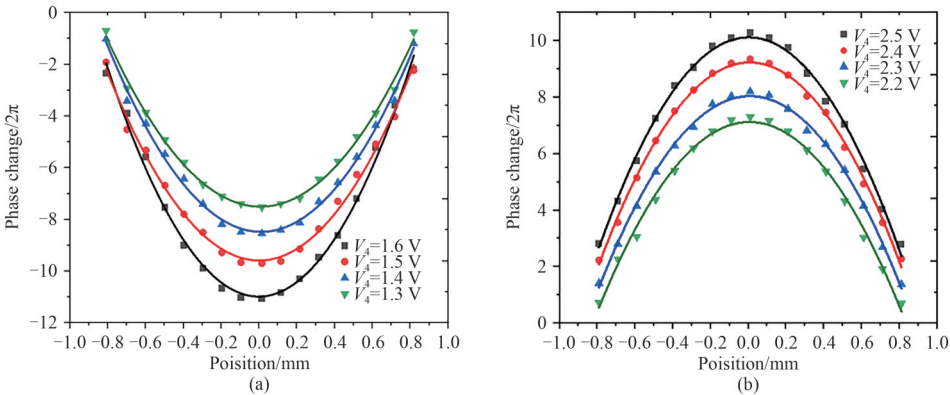


图 11 不同电压下液晶透镜的相位分布图。(a)正透镜;(b)负透镜。

Fig. 11 Phase distribution of liquid crystal lens under different voltages. (a) Positive lens; (b) Negative lens.

表 1 不同电压下正负透镜的相位曲线拟合结果
Tab. 1 Phase curve fitting results of positive and negative lenses under different voltages

Voltage/V	Positive lens	Negative lens
0.9	0.997 3	0.994 3
0.8	0.995 1	0.995 2
0.7	0.994 7	0.997 6
0.6	0.998 1	0.997 0

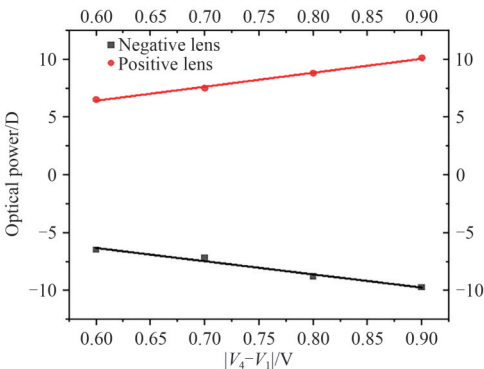


图 12 光焦度与驱动电压差的关系
Fig. 12 Relationship between optical power and driving voltage difference

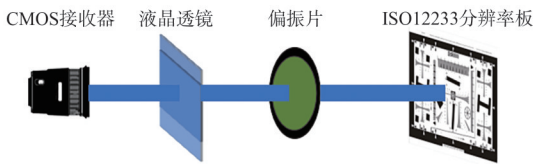


图 13 透镜成像光路示意图
Fig. 13 Schematic diagram of lens imaging optical path

控制透镜为正透镜状态,设置驱动电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为 1.6 V、1.882 V、2.182 V、2.5 V,使其在最大光焦度状态下进行成像。同时制作基于传统带宽公式(2)所设计的,由两根总线电压驱动且最大光焦度相同的同心圆环菲涅耳液晶透镜,使其在同一光焦度条件下进行成像,所采集的图像如图 14 所示。

选取图 14 中红色矩形区域分析图像的调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)曲线,测试结果如图 15 所示。可以看到,基于独立电压驱动进而增大外层环带带宽的菲涅耳液晶透镜的 MTF50 值为 0.151 cycles/pixel,大于利用传统公式(2)设计出的两根总线电压驱动的菲涅耳液晶透镜的 MTF50 值 0.132 cycles/pixel,

证明当外层菲涅耳环带带宽增大后,透镜的光学成像质量得到了有效提升。

接着采用本实验设计的菲涅耳液晶透镜开展变焦成像实验。拍摄时依次将鸡、恐龙、套娃分别放置在距离相机模组 7.5 cm、23 cm、74 cm 处。首先在液晶透镜未加电状态下,调整光学系统使焦点对准恐龙目标;随后开启液晶透镜调节驱动电压使系统依次清晰对焦于鸡和套娃并记录相应的光焦度,结果如图 16 所示。由实验结果可见,该液晶透镜变焦效果明显,成像质量清晰。

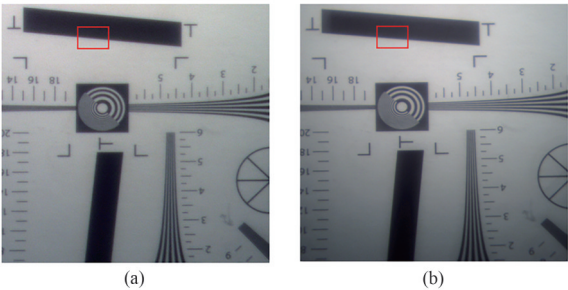


图 14 液晶菲涅耳透镜成像图。(a)基于独立电压驱动的非涅耳液晶透镜;(b)两根总线电压驱动的非涅耳液晶透镜。

Fig. 14 Image of liquid crystal Fresnel lens. (a) Fresnel liquid crystal lens driven by independent voltage; (b) Fresnel liquid crystal lens driven by two bus voltages.

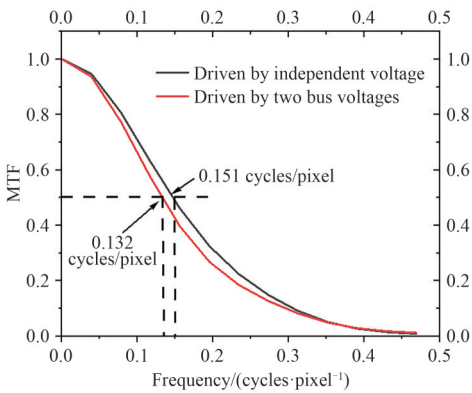


图 15 液晶透镜成像 MTF 图。(a)基于独立电压驱动的非涅耳液晶透镜;(b)两根总线电压驱动的非涅耳液晶透镜。

Fig. 15 MTF diagram of liquid crystal lens imaging. (a) Fresnel liquid crystal lens driven by independent voltage; (b) Fresnel liquid crystal lens driven by two bus voltages.



图 16 液晶透镜变焦成像图像。(a)对焦至鸡;(b)对焦至恐龙;(c)对焦至娃娃。

Fig. 16 Zoom imaging results of liquid crystal lens. (a) Focusing on chicken; (b) Focusing on dinosaur; (c) Focusing on doll.

根据高斯公式,推导出物距与菲涅耳液晶透镜光焦度之间的关系^[24]:

$$I_{\text{LC}} = \frac{I}{1 + \varphi I}, \quad (8)$$

其中: I_{LC} 为加上菲涅耳液晶透镜后的物距, φ 为菲涅耳液晶透镜的光焦度, I 为关闭菲涅耳液晶透镜时的物距。表2为理论光焦度与实际光焦度的对比,二者大致吻合。

表 2 光焦度与物距的关系

Tab.2 Relationship between optical power and object distance

Optical power/cm	Theoretical optical power/D	Actual optical power/D
23	0	0
7.5	8.99	9
74	-2.99	-3

4 结 论

本文针对传统菲涅耳液晶透镜外层环带带宽随环带数增加而急剧减小的问题,提出了一种基于独立环带电压控制的同心圆环菲涅耳液晶透镜设计方法。通过叉指电极结构实现了对每一菲涅耳环带外边界电压的独立调控,从而拓展透镜外层菲涅耳环带带宽,更加适应大孔径装置的需求。该液晶透镜可在液晶材料的线

性响应区内通过调节驱动电压实现相位的抛物线分布,且可正负调节光焦度。通过实验制作了孔径2 mm,菲涅耳环带带宽分布为0.4 mm、0.3 mm、0.3 mm,液晶层厚度为30 μm 的液晶透镜,相比最大光焦度相同的双总线电压驱动的同轴圆环设计,外层环带分别增加了5 μm 、73 μm 。通过偏振干涉原理获得干涉条纹,提取相位信息,对波前进行拟合,拟合程度均大于99%,正、负透镜最大相位变化 20.9π 、 22π ,与理论基准值 21.8π 高度吻合。同时光焦度可在-9.7~10.1 D范围连续调节,且与驱动电压差呈近似线性关系,与理论结果相一致,验证了所提理论的有效性。此外,通过搭建成像光路对所设计菲涅耳液晶透镜的成像性能进行评价,基于ISO1233分辨率板测得其MTF50值为0.151 cycles/pixel,高于采用传统公式设计、双总线电压驱动的非涅耳液晶透镜(0.132 cycles/pixel),说明增大外层菲涅耳环带带宽可有效改善透镜的光学成像质量。变焦成像实验也表明,该液晶透镜变焦效果显著,成像画面清晰。结果表明,利用独立电压驱动控制环带带宽的菲涅耳液晶透镜设计方法,在制作更大孔径设备领域具有广阔的应用前景。在未来研究中可进一步对电极结构和驱动方式进行优化,利用液晶电压-相位相应曲线的非线性响应区间增大光焦度,提升液晶透镜的性能。

参 考 文 献:

[1] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.

[2] ZHOU Z, ZHANG Y H, XIE Y X, *et al.* Electrically tunable planar liquid-crystal singlets for simultaneous spectrometry and imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 242.

- [3] BAGRAMYAN A, GALSTIAN T, SAGHATELYAN A. Motion-free endoscopic system for brain imaging at variable focal depth using liquid crystal lenses [J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(6/7): 762-774.
- [4] ZHAO Z B, ZHANG Q, LI X Y, *et al.* High-resolution non-line-of-sight imaging based on liquid crystal planar optical elements [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(12): 2161-2172.
- [5] GALSTIAN T, SOVA O, ASATRYAN K, *et al.* Optical camera with liquid crystal autofocus lens [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29945-29964.
- [6] BAI Y C, CHEN X X, MA J C, *et al.* Transient property of liquid crystal lens and its application in extended depth of field imaging [J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125974.
- [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] 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.
- [9] LI S X, YANG C L, PENG Z H, *et al.* Continuously focus tunable 2D/3D switchable cylindrical liquid crystal microlens arrays for autostereoscopic displays [J]. *Optics Express*, 2025, 33(1): 1594-1608.
- [10] WANG D, LI Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [11] KAUR S, KIM Y J, MILTON H, *et al.* Graphene electrodes for adaptive liquid crystal contact lenses [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8782-8787.
- [12] YE M, SATO S. Optical properties of liquid crystal lens of any size [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(5B): L571-L573.
- [13] NAUMOV A F, LOKTEV M Y, GURALNIK I R, *et al.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 992-994.
- [14] NAUMOV A F, LOVE G D, LOKTEV M Y, *et al.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses [J]. *Optics Express*, 1999, 4(9): 344-352.
- [15] YE M, WANG B, SATO S. Realization of liquid crystal lens of large aperture and low driving voltages using thin layer of weakly conductive material [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4302-4308.
- [16] KOTOVA S P, PATLAN' V V, SAMAGIN S A. Tunable liquid-crystal focusing device. 1. Theory [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(1): 58-64.
- [17] ALGORRI J F, MORAWIAK P, BENNIS N, *et al.* Positive-negative tunable liquid crystal lenses based on a microstructured transmission line [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10153.
- [18] ALGORRI J F, MORAWIAK P, ZOGRAFOPOULOS D C, *et al.* Multifunctional light beam control device by stimuli-responsive liquid crystal micro-grating structures [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13806.
- [19] STEVENS J, GALSTIAN T. Electrically tunable liquid crystal lens with a serpentine electrode design [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 910-912.
- [20] 冯文斌,刘志强,徐律涵,等. 一种高性能液晶透镜的设计方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(2): 0223001.
FENG W B, LIU Z Q, XU L H, *et al.* Design method for high-performance liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(2): 0223001. (in Chinese)
- [21] FENG W B, LIU Z Q, LIU H, *et al.* Design of tunable liquid crystal lenses with a parabolic phase profile [J]. *Crystals*, 2023, 13(1): 8.
- [22] FENG W B, YE M. Refractive Fresnel liquid crystal lenses driven by two voltages [J]. *Optics Express*, 2024, 32(1): 662-676.
- [23] SHIBUYA G, YAMANO S, YOSHIDA H, *et al.* Active liquid-crystal deflector and lens with Fresnel structure [C]//*Proceedings of SPIE 10125, Emerging Liquid Crystal Technologies XII*. San Francisco: SPIE, 2017: 101250V.
- [24] 黄振豪,刘志强,林弘峻,等. 大口径光焦度可电调菲涅耳液晶透镜[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 1923002.

HUANG Z H, LIU Z Q, LIN H J, *et al.* Tunable Fresnel liquid crystal lens with large aperture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 1923002. (in Chinese)

[25] KHOO I C, WU S T. *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals* [M]. Singapore: World Scientific, 1993.

作者简介:



赵卓然,男,硕士研究生,2024 年于电子科技大学获得学士学位,主要从事液晶透镜方面的研究。E-mail: 15982980856@163.com



叶 茂,男,博士,教授,1994 年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事液晶透镜方面的研究。E-mail: mao_ye@uestc.edu.cn