

## 激光与光电子学进展

## 大口径光焦度可电调菲涅耳液晶透镜

黄振豪<sup>1</sup>, 刘志强<sup>1</sup>, 林弘峻<sup>2</sup>, 叶茂<sup>1\*</sup><sup>1</sup>电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731;<sup>2</sup>华为技术有限公司, 广东 深圳 518129

**摘要** 液晶透镜是一种无需机械移动,可电控调焦的光学透镜。报道了一种大口径液晶透镜,将液晶透镜分成多个菲涅耳旁瓣,在保证光焦度和响应速度的情况下,可以极大地提高了液晶透镜的口径。利用叉指电极方式连接并控制各个旁瓣,每个旁瓣的驱动电压相同,简化了驱动方式。本工作设计的菲涅耳液晶透镜直径达到了 1 cm,光焦度由所加电压进行控制,变化范围为 $-1.62\text{D}\sim+1.57\text{D}$ ,入射平面波经过该菲涅耳液晶透镜调制,波前接近抛物线分布,呈现出良好的光学特性,本工作将此透镜作为对焦元件在成像系统中进行演示。

**关键词** 自适应成像; 菲涅耳液晶透镜; 电控调焦; 大口径

中图分类号 TB811+.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221247

## Tunable Fresnel Liquid Crystal Lens with Large Aperture

Huang Zhenhao<sup>1</sup>, Liu Zhiqiang<sup>1</sup>, Lin Hongjun<sup>2</sup>, Ye Mao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;

<sup>2</sup>Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, Guangdong, China

**Abstract** A liquid crystal lens is a type of optical lens that can be electronically focused without mechanical movement. This paper proposes a large-aperture liquid crystal lens that is divided into multiple Fresnel zones. To guarantee the optical power and response speed, the aperture of the liquid crystal lens is significantly improved to 1 cm. The Fresnel zones are connected and controlled by means of interdigital electrodes, and the driving voltage of each Fresnel zone is the same, which simplifies the driving method. The optical power of the newly proposed Fresnel liquid crystal lens can be controlled between  $-1.62\text{D}$  and  $+1.57\text{D}$  via the applied voltage. After the incident plane wave is modulated by the Fresnel liquid crystal lens, the wavefront is close to a parabolic distribution. This lens shows favorable optical characteristics. In this work, the lens is used as a focusing element in an imaging system for demonstration purposes.

**Key words** adaptive imaging; Fresnel liquid crystal lens; electronically controlled focusing; large aperture

## 1 引言

可变焦透镜<sup>[1-2]</sup>体积小,结构简单,无需机械移动,可用于取代传统的机械变焦。其中,作为代表的液晶透镜可电控调焦,其功耗低、体积小、应用前景广泛。但传统的液晶(LC)透镜<sup>[3-5]</sup>要想增大透镜口径,并保持光焦度可调范围不变,需增加液晶层的厚度,液晶透镜的响应时间就会剧增<sup>[6]</sup>。此外,对传统的液晶透镜而言,当其口径很大时,液晶层中的电场难以实现所需的梯度分布,使得液晶透镜的相位分布很难接近理想透

镜的相位抛物线分布,透镜的成像效果下降。2006年, Li等<sup>[7]</sup>利用衍射液晶透镜矫正眼疾,透镜光焦度与波长有关;2018年, Jamali等<sup>[8-11]</sup>在 Li的结构基础上设计了一种大孔径菲涅耳液晶透镜,用于近视眼矫正<sup>[12]</sup>; 2020年, Piskunov等<sup>[13]</sup>提出了利用菲涅耳液晶透镜制作头戴式AR眼镜,解决了用户眼睛疲劳、头疼和恶心等问题;2017年, Shibuya等<sup>[14]</sup>研制了一种叉指电极结构的可调谐菲涅耳液晶透镜,减少了引出电极的数量,将电极直接从电极层引出,极大地简化了菲涅耳液晶透镜的结构,降低了成本。本工作设计了一种大口径

收稿日期: 2022-04-09; 修回日期: 2022-04-13; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: \*mao\_ye@uestc.edu.cn

折射型菲涅耳液晶透镜,并应用于近视、老花眼镜。利用叉指电极,并去除各电极之间的 SiO<sub>2</sub> 绝缘层,相比于前人提出的结构,本文提出的结构更加简单,加工成本较低;此外,在相异电压的电极之间设置高阻抗膜,优化高阻抗膜的阻值,得到了更接近抛物线的相位分布<sup>[15-16]</sup>。因此,所提出的大口径菲涅耳液晶透镜在简化结构的同时也获得了良好的光学特性,将来结合本课题组前期提出的图像算法,也可以实现无偏成像与自动对焦功能<sup>[17-19]</sup>。

## 2 透镜结构

拟设计一个口径为 10 mm 菲涅耳液晶透镜,最中心部分半径为 1.25 mm,在中心添加了一个半径为 0.1 mm 的圆盘电极,以实现可正负调焦的菲涅耳液晶透镜,结构如图 1 所示。中心部分增加的辅助环形电

极和圆盘电极,可以增强中心部分的相位调节能力,形成更好的相位分布;菲涅耳旁瓣部分采用叉指电极结构,只需 3 根引出电极,分别为电极 1、电极 2、电极 3,大大减少了引出电极数量,简化了结构,减少了驱动电源;将引出电极和环形电极放在同一层,并将整个高阻抗膜(HR)覆盖在图案化电极上。电极的宽度为 5 μm,如果选用传统的氧化铟锡(ITO)电极,其电阻会接近 HR 的电阻,所以选择使用电阻率较低的金电极;此外,金电极的宽度极小,并不会影响透镜工作时的透射率。选用的 HR 材料为铝掺杂的氧化锌 AZO (ZnO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 靶材,通过磁控溅射在 Au 层上镀一层 HR,方阻为 10<sup>5</sup> Ω/sq,施加电压可在菲涅耳旁瓣处得到线性的电位分布,而在一段电压范围内,电压与相位成正比,可以在菲涅耳旁瓣处得到线性的相位分布。取向层为聚酰亚胺薄膜(PI),地电极为 ITO。

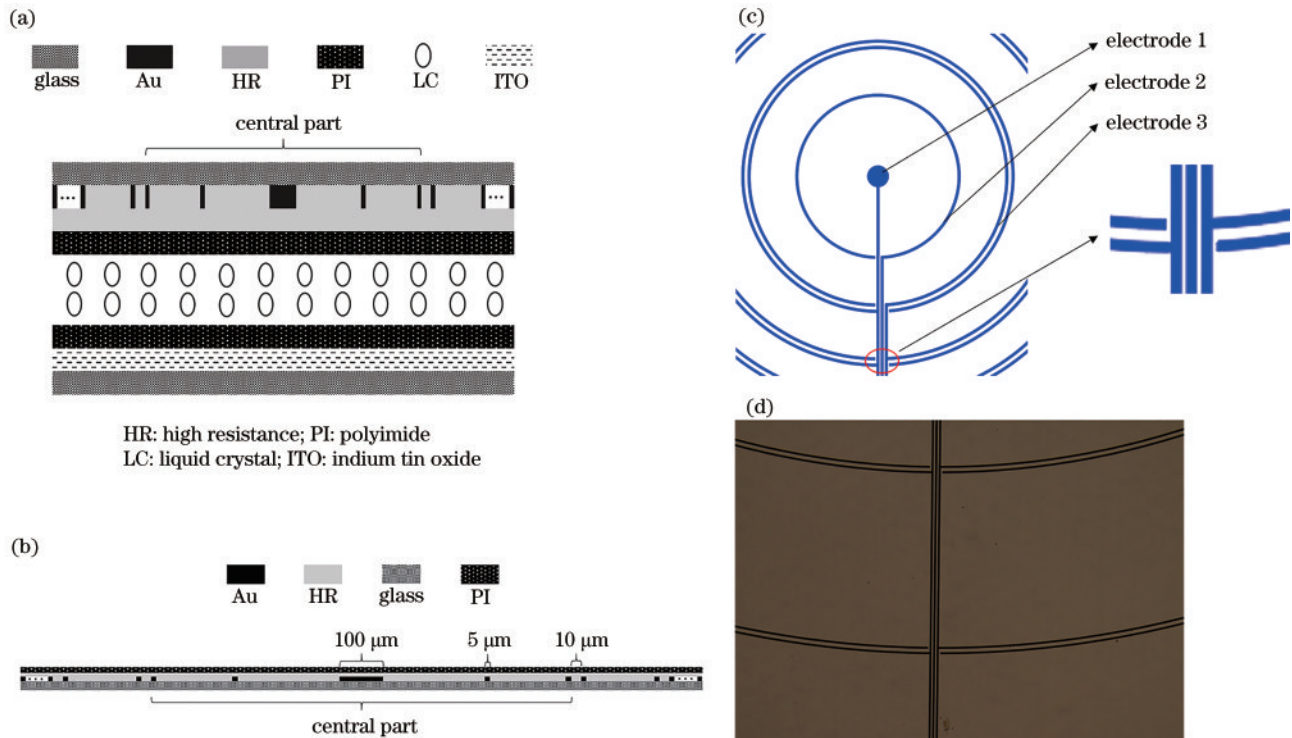


图 1 菲涅耳液晶透镜结构。(a)剖面图;(b)图案电极层;(c)叉指电极;(d)叉指电极显微镜照片  
Fig. 1 Structures of Fresnel liquid crystal lens. (a) Cutaway view; (b) layer of pattern electrode; (c) interdigitate electrode; (d) microscope photograph of interdigitate electrode

菲涅耳瓣的半径公式<sup>[20]</sup>为

$$R_n^2 = nR_1^2, \quad (1)$$

式中: $R_n$ 为第  $n$  个菲涅耳瓣的半径; $R_1$ 为中心部分的半径。根据式(1)可得,本菲涅耳液晶透镜包括 1 个中心圆孔部分和 15 个菲涅耳旁瓣圆环。

## 3 实验结果

拟将菲涅耳液晶透镜应用于一个  $-200^\circ \sim +200^\circ$  变化范围的眼镜,所以选择液晶盒厚为 20 μm,液晶型号为 HTW137700-100(江苏合成),寻常光 o 光折射率

$n_o = 1.513$ ,非寻常光 e 光折射率  $n_e = 1.774$ ,依据图 1 的结构制作菲涅耳液晶透镜。将待测菲涅耳液晶透镜放入干涉光路,如图 2 所示,两偏振片方向分别为  $45^\circ$  和  $135^\circ$ ,菲涅耳液晶透镜的摩擦方向为  $90^\circ$ ,然后使用方波电压对透镜进行驱动,利用 o 光、e 光干涉,干涉条纹经过镜头成像在 CMOS 上,采集得到的菲涅耳液晶透镜的干涉环如图 3 所示,对应的电压和光焦度如表 1 所示。可以看出,设计的菲涅耳液晶透镜的驱动电压很小,最大电压的峰值仅为 4 V,光焦度变化范围为  $-1.62D \sim 1.57D$ ,干涉圆环趋近于传统透镜。

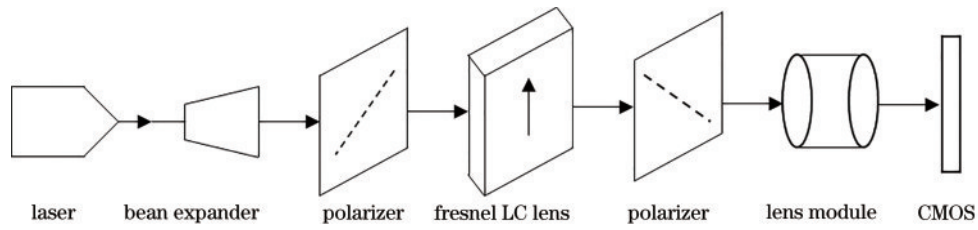


图 2 干涉光路

Fig. 2 Interference optical path

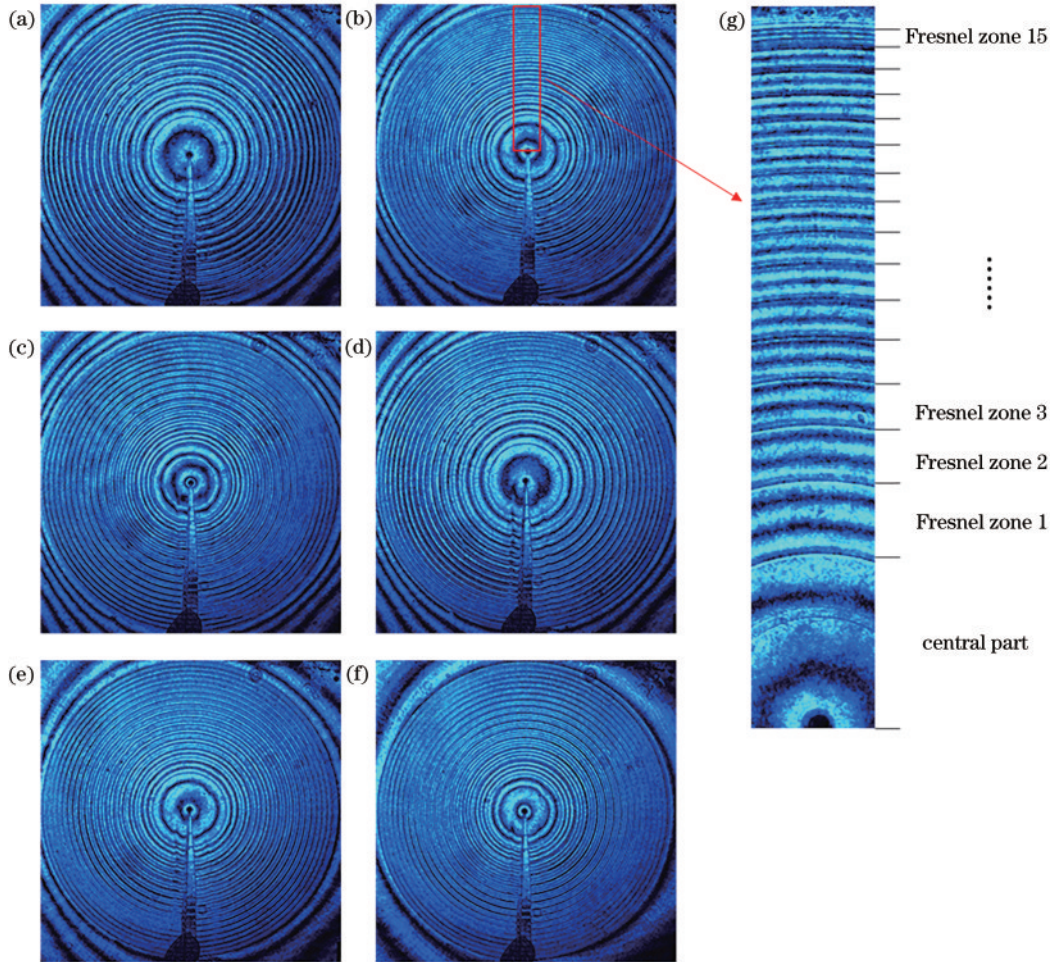


图 3 菲涅耳液晶透镜的干涉环。(a)~(f)干涉条纹图;(g)局部放大图

Fig. 3 Interference ring of the Fresnel liquid crystal lens. (a)–(f) Interference fringe pattern; (g) partial enlargement drawing

表 1 干涉环对应电压及光焦度

Table 1 Voltage and power corresponding to interference ring

State of the lens	Image	Voltage(peak-to-peak) /V			Frequency /Hz	Power /D
		Electrode 1	Electrode 2	Electrode 3		
Convex lens	Fig. 3(a)	1.00	1.80	2.60	1000	0.59
	Fig. 3(b)	0.00	1.55	3.10	1000	1.11
	Fig. 3(c)	0.00	1.85	3.70	1000	1.57
Concave lens	Fig. 3(d)	4.00	2.60	1.20	1000	-0.79
	Fig. 3(e)	4.00	2.25	0.50	1000	-1.26
	Fig. 3(f)	4.00	2.00	0.00	1000	-1.62

对 1.57D 的正透镜和 -1.62D 的负透镜的干涉图用 DFT 软件获取其波前数据,然后利用 SigmaPlot 拟

合出波前曲线,再量化成菲涅耳结构形式,如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可知,所设计的菲涅耳液晶透镜得

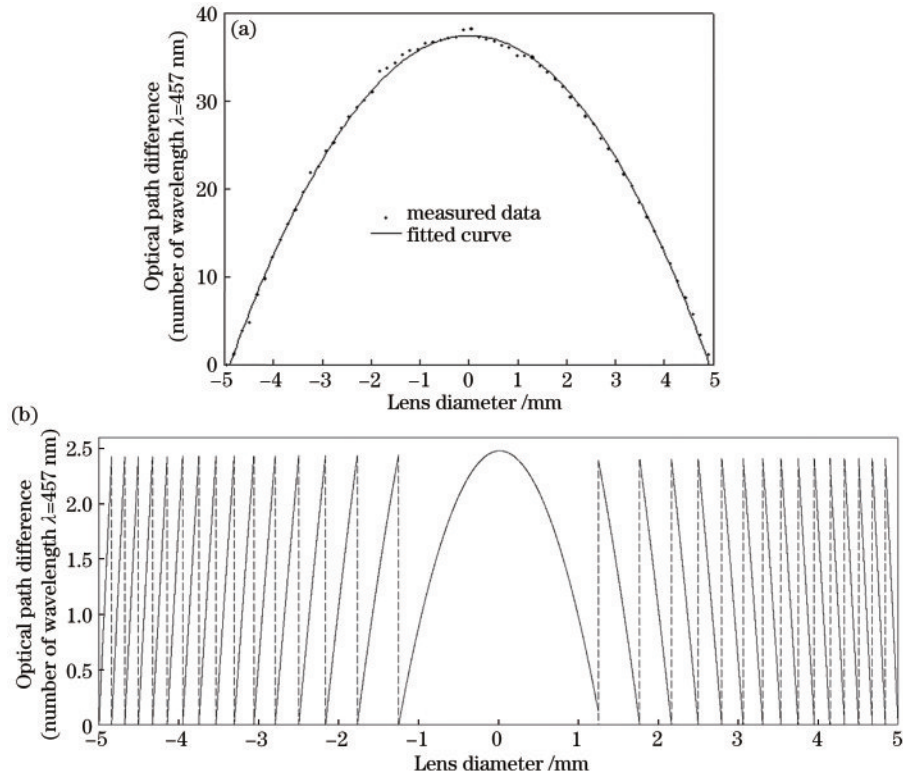


图 4 菲涅耳液晶透镜的位相分布(光焦度为 1.57D)。(a)测试数据拟合所得的曲线;(b)量化位相分布  
Fig. 4 Phase profile of the Fresnel liquid crystal lens (Power is 1.57D). (a) Fitted curve with measured data;  
(b) phase profile after quantization

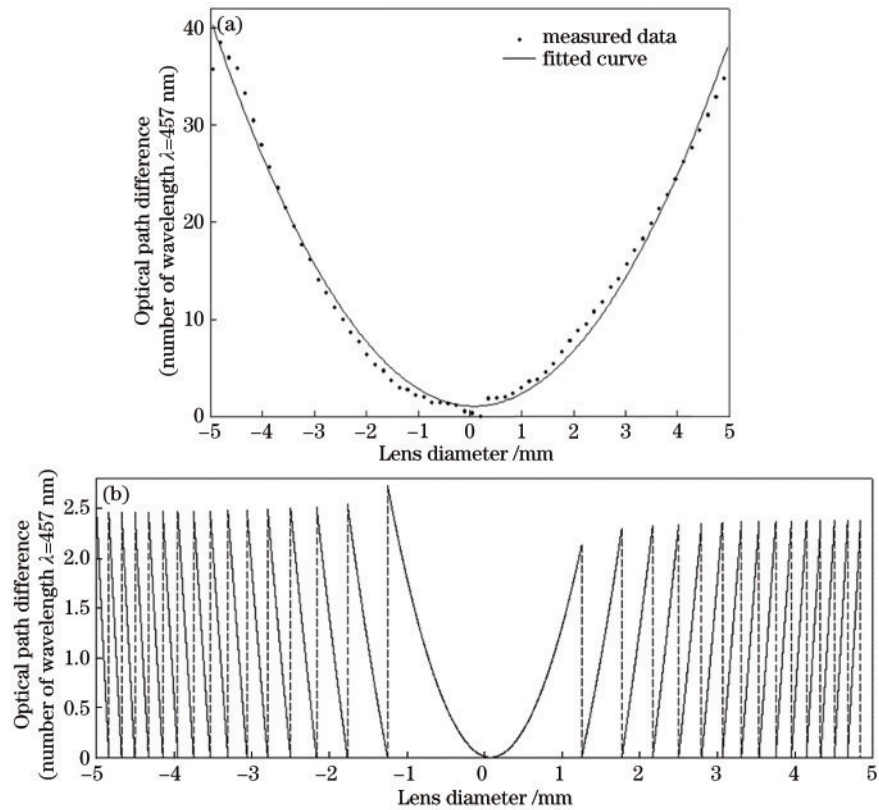


图 5 菲涅耳液晶透镜的位相分布(光焦度为 -1.62D)。(a)测试数据拟合所得的曲线;(b)量化位相分布  
Fig. 5 Phase profile of the Fresnel liquid crystal lens (Power is -1.62D). (a) Fitted curve with measured data;  
(b) phase profile after quantization

到的波前接近于抛物线,但波前存在一定的不对称性,可能由于电场的弯曲,液晶透镜沿着其取向层的摩擦方向有一定的不对称性。

利用菲涅耳液晶透镜进行矫正眼疾实验,系统光路图如图 6 所示,选择焦距为 50 mm,F 数为 2.8 的标准透镜作为人眼。首先,关闭菲涅耳液晶透镜,系统对焦至鸡,然后打开菲涅耳液晶透镜,调节光焦度

为  $-0.79\text{D}$ ,此时菲涅耳液晶透镜用于矫正近视眼,对焦至老鹰;然后分别调节光焦度为  $0.59\text{D}$  和  $1.57\text{D}$ ,菲涅耳液晶透镜用于矫正老花眼,分别对焦至鸚鵡和鹿。以上光焦度对应的驱动电压如表 1 所示,矫正结果如图 7 所示,利用菲涅耳液晶透镜矫正眼疾,得到解析度较高的成像效果。由此可见,利用菲涅耳液晶透镜可以同时矫正近视眼和老花眼。

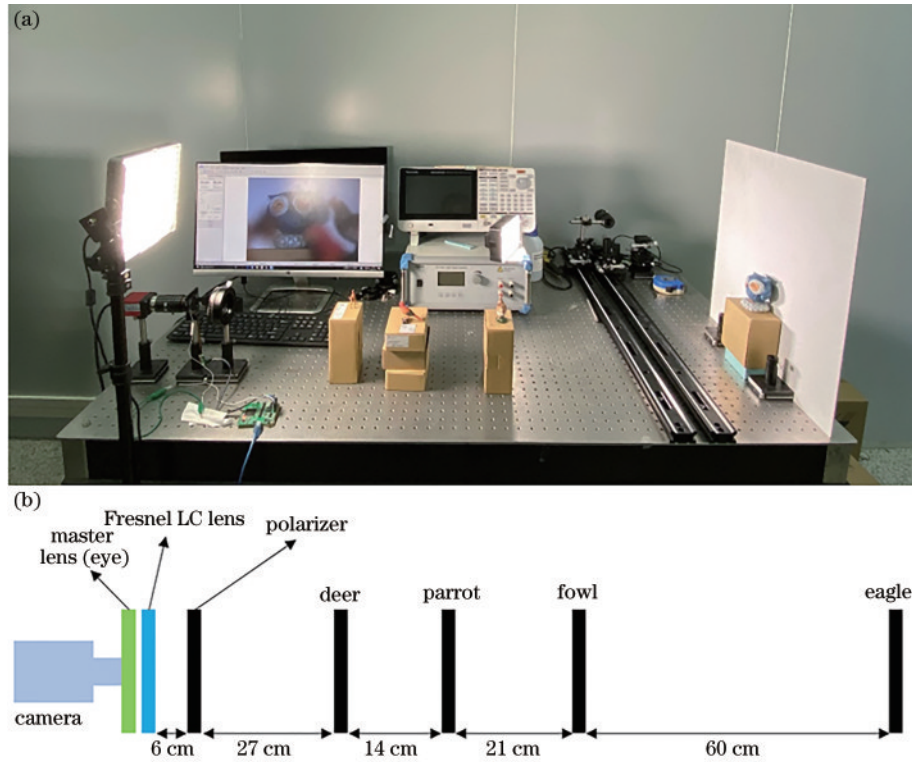


图 6 变焦成像系统光路图。(a)实验场景;(b)实验示意图

Fig. 6 Optical path diagrams of zoom imaging system. (a) Experimental scene; (b) schematic diagram of experiment

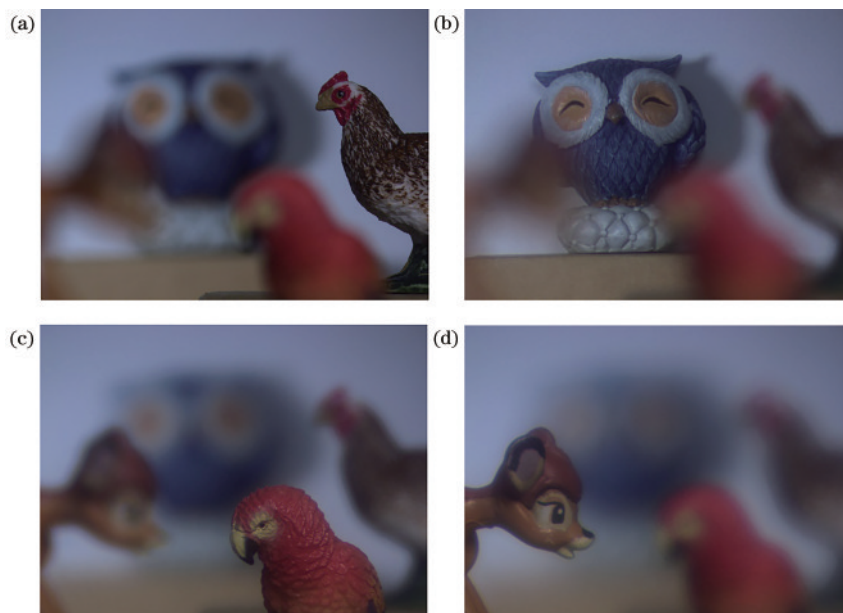


图 7 不同位置对焦成像。(a)鸡;(b)老鹰;(c)鸚鵡;(d)鹿

Fig. 7 Focus on different positions. (a) Fowl; (b) eagle; (c) parrot; (d) deer

根据高斯公式,可以检验对焦实验物像关系是否准确,由于菲涅耳液晶透镜与主透镜距离非常近,可以忽略之前的距离。根据高斯公式推导出的物距与菲涅耳液晶透镜光焦度之间的关系:

$$1/l - 1/l' = 1/f, \quad (2)$$

$$l_{LC} = l_1 / (1 + \varphi l_1). \quad (3)$$

式中: $l$ 为物距; $l'$ 为像距; $f$ 为系统焦距; $l_{LC}$ 为加上菲涅耳液晶透镜后的物距; $\varphi$ 为菲涅耳液晶透镜的光焦度; $l_1$ 为关闭菲涅耳液晶透镜时的物距。理论物距与实际物距的对比,如表 2 所示,理论物距与实际物距大致吻合。在负光焦度时,由于景深增大,误差略增加。

表 2 物距与菲涅耳液晶透镜光焦度的关系

Table 2 Relationship between object distance and power of Fresnel liquid crystal lens

Power /D	Theory of object distance /cm	Actual object distance /cm
0		68
-0.79	146.93	128
0.59	48.53	47
1.57	32.89	33

## 4 结 论

通过菲涅耳结构增大了液晶透镜的口径,并在透镜中心部分增加环形辅助电极,优化了 HR 的阻值,最后得到接近抛物线的相位剖面,实现了成像和电控变焦。菲涅耳液晶透镜极大地拓宽了液晶透镜的应用范围,使得液晶透镜在近、远视眼镜以及增强现实(AR)、虚拟现实(VR)系统中都有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 李姮, 陈熙熙, 张垚, 等. 可变焦叶绿体光学微透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411003.  
Li H, Chen X X, Zhang Y, et al. Chloroplast optical microlens with variable focus[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411003.
- [2] 杨叶城, 张昕, 韩小帅, 等. 带像差校正功能的柔性变焦透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0422003.  
Yang Y C, Zhang X, Han X S, et al. Flexible varifocal lens with aberration correction function[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422003.
- [3] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [4] Sato S. Applications of liquid crystals to variable-focusing lenses[J]. Optical Review, 1999, 6(6): 471-485.
- [5] Ye M, Wang B, Uchida M, et al. Low-voltage-driving liquid crystal lens[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(10): 100204.
- [6] Ye M, Sato S. Optical properties of liquid crystal lens of any size[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002,

41(5B): L571.

- [7] Li G Q, Mathine D L, Valley P, et al. Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(16): 6100-6104.
- [8] Li L W, Bryant D, van Heugten T, et al. Near-diffraction-limited tunable liquid crystal lens with simplified design[J]. Optical Engineering, 2013, 52(3): 035007.
- [9] Li L W, Bryant D, van Heugten T, et al. Physical limitations and fundamental factors affecting performance of liquid crystal tunable lenses with concentric electrode rings[J]. Applied Optics, 2013, 52(9): 1978-1986.
- [10] Li L W, Bryant D, Bos P J. Liquid crystal lens with concentric electrodes and inter-electrode resistors[J]. Liquid Crystals Reviews, 2014, 2(2): 130-154.
- [11] Li L W, Bryant D, van Heugten T, et al. Near-diffraction-limited and low-haze electro-optical tunable liquid crystal lens with floating electrodes[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8371-8381.
- [12] Jamali A, Bryant D, Zhang Y L, et al. Design of a large aperture tunable refractive Fresnel liquid crystal lens[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B10-B19.
- [13] Piskunov D E, Danilova S V, Tigaev V O, et al. Tunable lens for AR headset[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11350: 113500F.
- [14] Shibuya G, Yamano S, Yoshida H, et al. Active liquid-crystal deflector and lens with Fresnel structure[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10125: 101250V.
- [15] Zhang Y L, Li G Y, Chen X X, et al. Driving methods for liquid crystal lens with rectangular aperture and four voltages[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60(10): 102002.
- [16] Ooba Y, Sugihara S, Shiwa S. Basic study of a bright area-modulative liquid crystal cell[J]. Proceedings of SPIE, 1986, 0639: 47-55.
- [17] 李鹏伟, 陈信慈, 陈晓西, 等. 用 90° 扭曲向列相液晶盒代替偏振片的液晶透镜成像方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0711004.  
Li P W, Chen X C, Chen X X, et al. Liquid crystal lens imaging method using 90° twisted nematic liquid crystal cell instead of polarizer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0711004.
- [18] 兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411003.  
Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411003.
- [19] 白一晨, 陈晓西, 曾俊, 等. 液晶透镜无偏振片成像的优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815015.  
Bai Y C, Chen X X, Zeng J, et al. An optimization algorithm for polarizer-free imaging of liquid crystal lens [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815015.
- [20] Fan Y H, Ren H W, Wu S T. Switchable Fresnel lens using polymer-stabilized liquid crystals[J]. Optics Express, 2003, 11(23): 3080-3086.