

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-09

## 方形孔径液晶透镜梳状电极结构的优化设计

卫宁, 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:**针对传统梳状电极液晶透镜存在的电压梯度不均匀问题及相位分布不均匀问题,本研究设计了一种电极结构,旨在优化液晶透镜的光学性能。通过改进电极布局,在保持驱动电压数量不变的条件下,解决了相邻电极间电压分布不均的问题。实验采用光刻工艺分别制备新型电极与传统电极液晶透镜,使用干涉原理分析了两种结构的波前图与波前均方根误差(RMS),且对液晶透镜的位相分布及成像性能进行了分析。结果表明,新型电极结构成功消除了电压梯度不均匀现象,新型结构液晶透镜的波前图呈现规则的圆形分布,其波前RMS较传统结构降低约19.4%,且位相分布与成像性能均优于传统结构。该研究验证了电极结构优化对液晶透镜性能提升的有效性,为高精度可调焦光学器件的开发提供了技术方案。

**关键词:**液晶透镜;电极结构;相位分布;抛物线

中图分类号:O435.1 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0016 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0016

## Optimized design of comb electrode structure for square aperture liquid crystal lens

WEI Ning, LIU Zhiqiang, YE Mao\*

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

**Abstract:** To address the voltage gradient and phase distribution non-uniformity in traditional comb-electrode liquid crystal(LC) lens, this study designs a electrode structure to improve optical performance. By optimizing the electrode layout without increasing the number of driving voltages, uneven voltage distribution between adjacent electrodes is resolved. The new and conventional electrode LC lens samples were fabricated via photolithography. Their wavefront patterns and root-mean-square (RMS) errors were then analyzed through interferometry. Finally, the phase distribution and imaging performance of the LC lenses were analyzed. The results show that the new electrode structure eliminates voltage gradient unevenness. The wavefront pattern exhibits a regular circular distribution, with wavefront RMS reduced by approximately 19.4% compared to the conventional structure. Both phase distribution and imaging performance are improved. This study confirms the effectiveness of electrode structure optimization in enhancing LC lens performance, offering a technical approach for developing high-precision tunable-focus optical devices.

**Key words:** liquid crystal lens; electrode structure; phase distribution; parabola

收稿日期:2026-02-01;修订日期:2026-02-28.

\*通信联系人, E-mail:mao\_ye@uestc.edu.cn

## 1 引言

液晶透镜凭借其无机械移动部件、体积小、易于集成等优势,在众多成像领域都有着广泛应用前景<sup>[1-2]</sup>。随着相关领域对液晶透镜性能要求的不断提高,电极结构作为影响液晶透镜性能的关键因素之一,成为了研究的重点。

液晶透镜最早是由 Sato<sup>[3]</sup>在 1979 年提出。1989 年, Nose 等人<sup>[4]</sup>引入圆孔形状电极结构,解决了液晶层取向不均和厚度过厚问题。但因依赖电场边缘效应,透镜孔径受液晶层厚度限制。1998 年, Naumov 等人<sup>[5]</sup>在孔状电极上镀上高阻膜,使电压在液晶层呈近似抛物线分布。2004 年, Ye 等人<sup>[6]</sup>对通过 2 个电极对圆孔内的电场进行控制,实现了较宽的变焦范围(0.8~10.7 D)。但较高的驱动电压限制了它的应用范围。同年, Ren 等人<sup>[7]</sup>展示了一种可调焦距球面透镜,使用一个内部有嵌入式球形氧化铟锡(ITO)电极的基板和—个平面电极基板,在液晶层内产生了中心对称梯度折射率曲线,从而产生了聚焦效果,实现了较短的焦距。Galstian 等人<sup>[8]</sup>通过添加浮动电极,在简单的操作模式下实现了较好的光学质量。Algorri 等人<sup>[9]</sup>基于同心圆电极和非均匀宽度电极设计了大孔径、焦距正负可调的液晶透镜,但是所实现的相位分布与抛物线的吻合度仍存在差距。Beeckman 等人<sup>[10]</sup>通过在每根同心圆电极上施加一个电压信号,单独控制每个电压信号得到接近理想的相位分布。但该方案驱动电压过多,且会占据一部分透镜区域。Feng 等人<sup>[11-12]</sup>提出同心圆形状的电极结构,首次实现了精确的旋转抛物面的相位分布。同年, Feng 等人<sup>[13]</sup>提出梳状电极结构,通过将两个梳状电极相互垂直放置实现了矩形孔径的液晶透镜。该方案的引出电极不会占据透镜的孔径区域且驱动电压数量较少。但由于间隔两根扩散电极之间的产生电极过短,会存在电压梯度问题,导致相位分布偏离抛物线。2024 年, Feng<sup>[14]</sup>提出了一种用于大孔径液晶透镜的分段同心电极,解决了由交流驱动电压导致的相位偏离问题。Wei 等人<sup>[15]</sup>对梳状电极的产生电极结构进行离散分析使得液晶透镜实现了更好的相位分布。

本文设计了一种电极结构,与 Feng 等人<sup>[11]</sup>

的传统电极结构相比,在保持驱动电压数量不变的前提下,成功解决了电压梯度不均匀的问题,实现了更均匀的相位分布,有效提升了液晶透镜的光学性能。实验上,通过液晶盒实测了液晶材料相位变化对电压的响应曲线。通过光刻工艺加工了所设计的电极结构以及传统的电极结构,并制成两个液晶透镜进行对比。通过干涉原理搭建光路采集了液晶透镜的波前图与斜条纹,通过斜条纹计算了液晶透镜的 RMS、光焦距和位相变化,采集了液晶透镜的成像图。结果表明,新型电极结构的 RMS 较传统结构降低约 19.4%,且位相分布与成像性能均优于传统结构,为液晶透镜在光学领域的应用提供了技术支持。

## 2 理论分析

### 2.1 传统电极结构

传统的梳状电极<sup>[11]</sup>如图 1 所示,产生单元的电极结构沿着 x 轴方向等间距排列且长度线性增加,结合扩散单元成为完整的梳状电极结构。若电极线的宽度为  $a$ ,电极线间隔为  $b$ ,电极线增长的斜率为  $k$ ,则从  $(0,0)$  到  $(0,x)$  处电极线的长度为:

$$L(x) = \int_0^x \frac{kx}{(a+b)} dx = \frac{kx^2}{2(a+b)}. \quad (1)$$

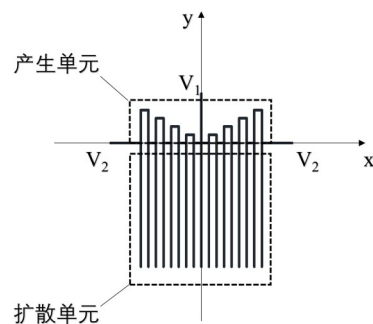


图1 传统电极结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional electrode structure

设电极线总宽度为  $2R$ ,则根据欧姆定律可得在  $(0,x)$  处的电压为:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_1 + \frac{L(x)}{L(R)}(V_2 - V_1) \\ &= V_1 + \frac{x^2}{R^2}(V_2 - V_1). \end{aligned} \quad (2)$$

如图2所示,将两个具有梳状电极的玻璃基板相互垂直放置,中间用液晶材料填充后密封便可以制作出矩形孔径的液晶透镜。设两梳状电极的总宽度均为 $2R$ ,且上基板施加电压 $V_1$ 和 $V_2$ ,下基板施加电压 $V_3$ 和 $V_4$ 。

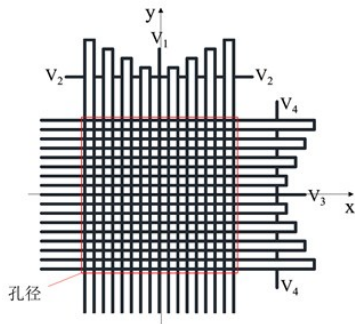


图2 矩形孔径示意图

Fig. 2 Rectangular aperture schematic

由公式(2)可得上基板电压分布为:

$$V_{\text{upper}}(x, y) = V_1 + \frac{x^2}{R^2}(V_2 - V_1). \quad (3)$$

下基板与上基板垂直,因此易得下基板电压分布为:

$$V_{\text{lower}}(x, y) = V_3 + \frac{y^2}{R^2}(V_4 - V_3). \quad (4)$$

上下基板电压差分布即为液晶层两侧的电

压差分布:

$$\begin{aligned} \Delta V(x, y) &= V_{\text{upper}} - V_{\text{lower}} \\ &= V_1 - V_3 + \frac{x^2}{R^2}(V_2 - V_1) + \\ &\quad \frac{y^2}{R^2}(V_3 - V_4). \end{aligned} \quad (5)$$

公式(5)表示一个椭圆抛物面,若 $V_2 - V_1 = V_3 - V_4$ 则为旋转抛物面。同时若孔径内的电场强度均处于液晶材料的线性区域,便可得到液晶透镜所需要的旋转抛物面的相位分布。

以上推导过程为将离散化为连续的状况,实际结构的扩散单元中会存在相邻两条扩散电极间电阻线较短的情况,如图3所示,扩散电极的电压是由两根扩散电极之间产生电极的长度决定的。其中 $L_2, L_4 \dots$ 的长度线性增加,与理论分析一致,然而 $L_1, L_3 \dots$ 的长度却保持定值,该问题会导致电压分布存在梯度不均问题。图4(a)显示

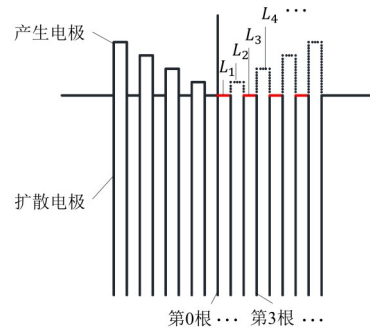


图3 产生电极长度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electrode length

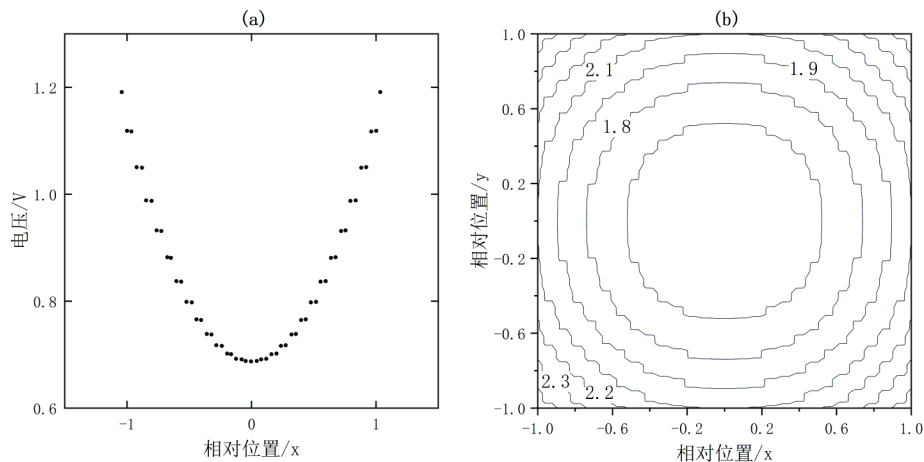


图4 传统电极结构电压分布仿真图 (a)单个电极,(b)两电极组合。

Fig. 4 Simulation of voltage distribution of conventional electrode structure (a) Single electrode, (b) Two-electrode assembly.

了单个梳状电极的电场仿真,图4(b)则显示了制作作为液晶透镜后的电场仿真。可以看出:图4(a)中的电场分布仿真与抛物线不符,存在梯度不均匀;图4(b)中的电场分布显示出边缘的凹凸不平 and 整体的方形偏差。

## 2.2 新型电极结构

针对传统电极结构存在的电压梯度分布问题,本文提出一种新型电极结构。该结构通过两组独立的产生单元分别生成两组扩散单元,并采用交替排列的阵列布局构成完整的扩散单元,具体结构如图5所示。基于有限元仿真方法对新型电极的电场分布进行分析,结果如图6所示,图中黑色部分为新型电极结构电压分布,红色部分为传统电极结构电压分布,通过对比可以看出新型

结构通过产生单元与扩散单元的交替排列有效调控了相邻单元间的电势梯度。

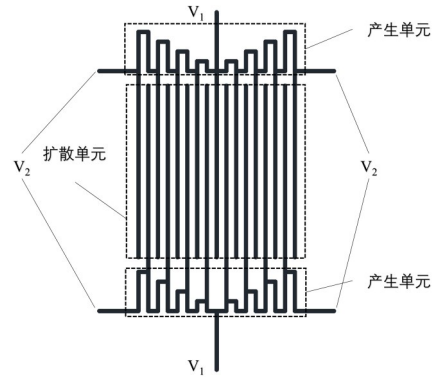


图5 新型电极结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the new electrode structure

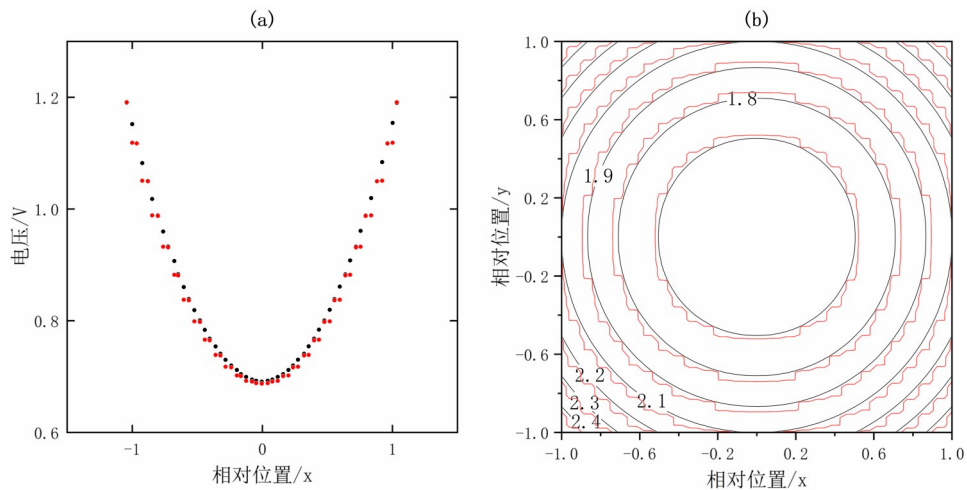


图6 新型电极结构电压分布仿真图 (a)单个电极,(b)两电极组合。

Fig. 6 Simulation of voltage distribution of the new electrode structure (a) Single electrode, (b) Two-electrode assembly.

## 3 实验与结果

### 3.1 液晶盒制备与响应曲线测量

本文所用液晶材料的光学折射率为:  $n_e = 1.764$ ,  $n_o = 1.505$ , 介电常数为  $\epsilon_{\perp} = 7.7$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 3.3$ , 为了得到液晶材料的相位对电压变化的响应曲线,我们首先制作了一个没有电极结构的液晶盒,然后对其施加电压并测量所引起的相位变化,液晶盒示意图如图7所示。通过绘制施加电压值与相位变化的关系便可得到液晶材料的电压响应曲线。液晶盒的制备过程如下:1)基板清

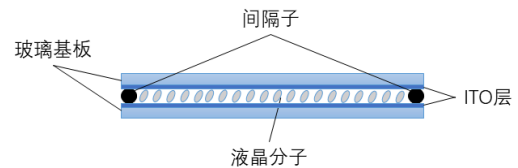


图7 液晶盒示意图

Fig. 7 Schematic diagram of LC cell

洗:依次使用丙酮和乙醇对带有ITO的玻璃基板进行超声清洗,去除表面的灰尘等;2)取向层制备:在ITO一侧通过旋涂法涂上一层聚酰亚胺(PI)作为取向层,随后将基板分别在  $90^{\circ}\text{C}$  下进

行30分钟的前烘和230 °C下90分钟的高温固化,用摩擦机对PI层进行单向摩擦,使表面形成约2度的预倾角;3)液晶封装:先用紫外胶和间隔子(50  $\mu\text{m}$ )将两基板相对位置固定住,再用毛细作用将液晶灌入其中,最后用紫外胶进行封装;4)电极引出:在ITO上点涂导电银胶,并连接导线,以便后续施加电压。

本文获取相位变化所用的光路是基于干涉

原理搭建的,如图8所示。采用波长为532 nm的激光器作为光源,线偏光经过液晶盒后,由于液晶材料的双折射特性,o光与e光产生不同的相位变化,通过检偏器后便会发生干涉,其光强由CMOS探测器接收。通过记录施加在液晶盒上的电压以及相应的干涉光强变化。根据干涉理论,相邻光强极值点对应的相位差为 $2\pi$ ,便可得出相位变化量随电压的变化曲线。

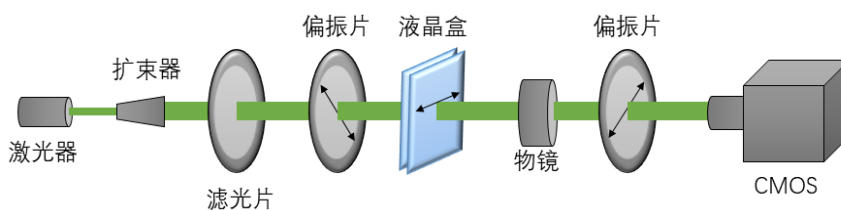


图8 相位响应实验装置图

Fig. 8 Phase response experimental setup diagram

最终获得的相位响应曲线如图9所示,横轴为所施加电压,纵轴为相位变化量,在1.6 V至2.5 V的电压区间内,相位变化与电压呈良好的线性关系。因此,在后续液晶透镜的驱动中,将工作电压设置于此区间内。

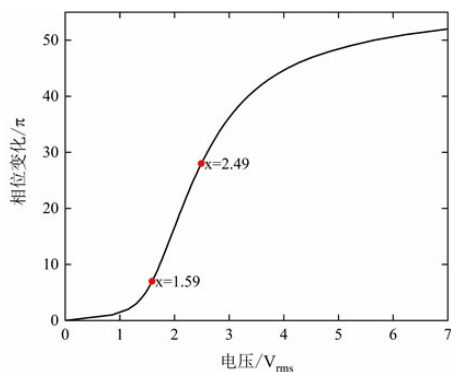


图9 相位响应曲线

Fig. 9 Phase response curve

### 3.2 液晶透镜制备

本研究制备并对比了两种电极结构的透镜:一种为传统结构,另一种为本文设计的结构。液晶透镜的制备流程与液晶盒的基本一致,主要区别在于电极基板的不同和两基板相对位置的不同。将平面ITO基板替换为预先光刻制备了特定图案电极的ITO基板;在两基板组装固定时,将其中一片带有图案电极的基板旋转90°,与另

一片基板对齐(如图2所示)。基板整体尺寸的2 cm\*3 cm,所制作的液晶透镜电极线宽为20  $\mu\text{m}$ ,有效透镜孔径为2 mm。ITO玻璃的ITO层厚度约为35 nm,方阻为40~60  $\Omega$ 。电极图案位于中心区域。最终制备的液晶透镜实物如图10所示。

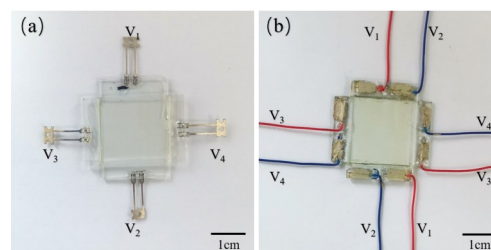


图10 液晶透镜实物图 (a)传统结构,(b)新型结构。

Fig. 10 LC lens real photo (a) Traditional structure, (b) New structure.

### 3.3 数据采集分析

采集波前图和斜条纹的光路同样通过干涉原理进行搭建,如图11所示。线偏光经分光镜分为两路光。其中一路光经过待测液晶透镜,使其产生与另一路光不同的光程变化。两束光随后重新合束并发生干涉,干涉条纹由CMOS相机接收并记录。对于负透镜固定四角处电压差为1.6 V,采集中心处电压差为1.7~2.5 V的斜条纹以及中心处电压差为2.1 V、2.3 V、2.5 V的

波前图。对于正透镜固定中心处电压差为 1.6 V,采集四角处电压差为 1.7~2.5 V 的斜条

纹以及四角处电压差为 2.1 V、2.3 V、2.5 V 的波前图。

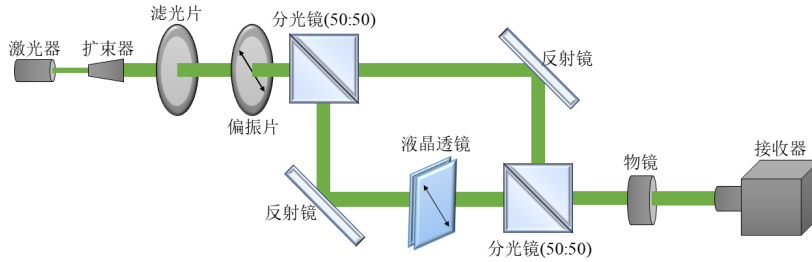


图 11 波前图及斜条纹采集装置图

Fig. 11 Wavefront and oblique streak acquisition device diagrams

传统结构与新型结构的正负透镜波前图分别如图 12 和图 13 所示。通过对比分析可以看出,传统结构的波前图呈现出与仿真结果相符的边缘凹凸不

平和整体方形偏差。新型结构的波前图等相位面分布均匀且规则,波前曲率一致性提升较大,表明新型结构有效抑制了传统结构中存在的波前缺陷。

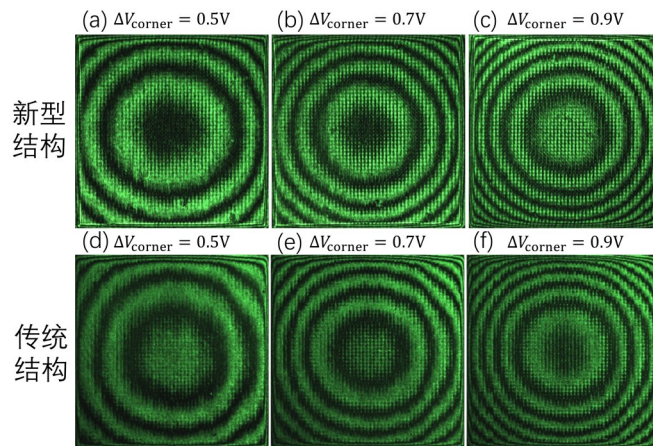


图 12 正透镜波前图

Fig. 12 Positive lens wavefront

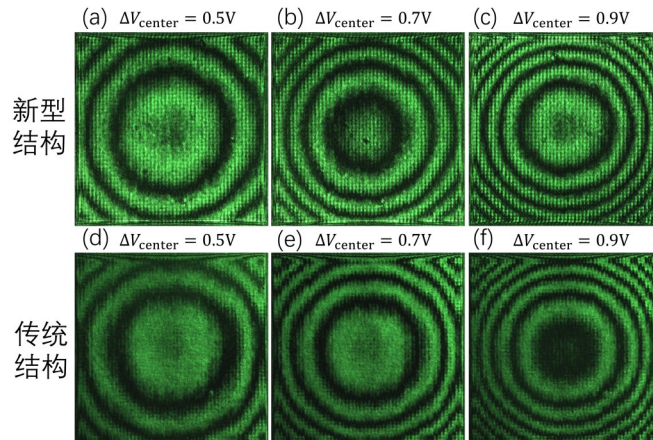


图 13 负透镜波前图

Fig. 13 Negative lens wavefront

基于斜条纹对透镜波前误差进行定量分析,计算得到的RMS结果如图14所示。计算可得新型结构的RMS值较传统结构平均降低约19.4%,具体表现为传统结构的RMS均值为

0.053 2 $\lambda$ ,而新型结构优化至0.042 5 $\lambda$ 。这一结果反映出新型结构在波前平整度调控上的优势,与前文波前图中观测到的波前图分布现象形成定量验证。

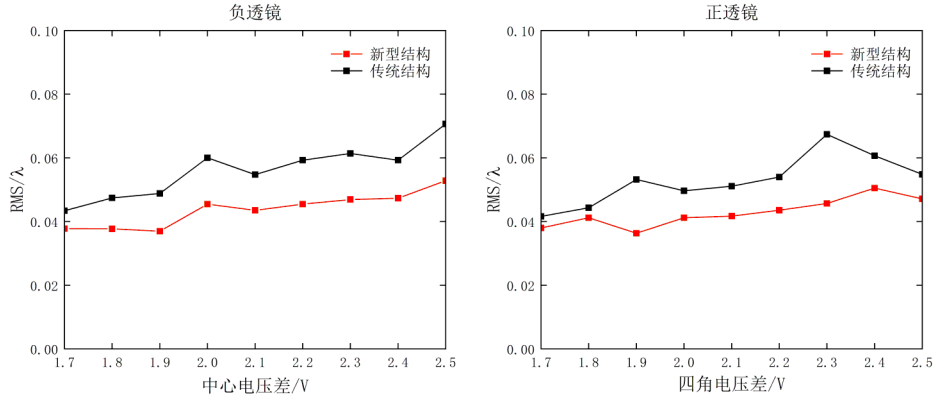


图14 RMS对比图

Fig. 14 RMS Comparison Chart

基于斜条纹计算出两液晶透镜调焦为正透镜时的位相图,如图15所示,图中 $\Delta V = V_{\text{corner}} - V_{\text{center}}$ ,为四角处电压与中心处电压的电压差。由

图中可观察到新型结构对于抛物线的拟合程度较传统结构更优。因此新型结构有效地优化了液晶透镜的位相分布。

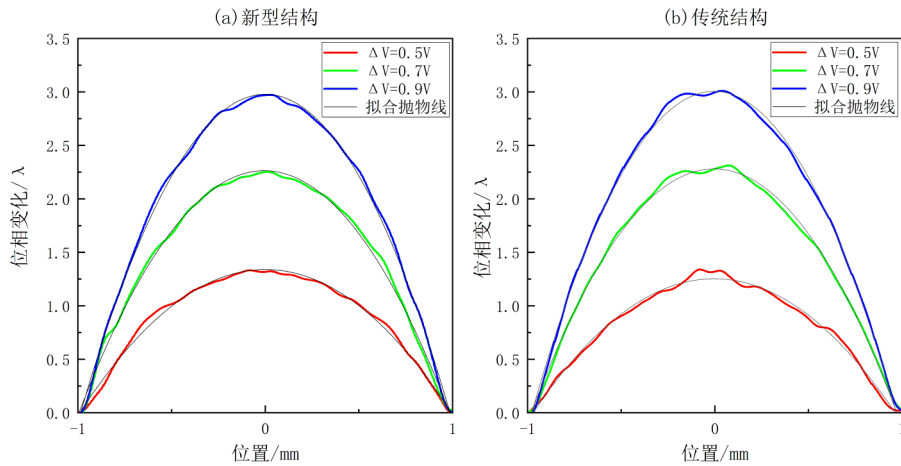


图15 位相图

Fig. 15 RMS Comparison Chart

基于斜条纹计算出施加不同电压时液晶透镜焦距的变化,如图16所示,可以看出随着施加电压的变化,液晶透镜的光焦度呈线性变化,线性拟合度较高,调焦范围为-3.48 D到3.66 D,展现出了液晶透镜较好的电控调焦特性。

用如图17(a)所示的装置图对液晶透镜进行

成像实验,分别采集两液晶透镜的成像图,采集的图像如图17(b)、(c)所示,对分辨率板不同位置的线条进行对比度分析,结果如图18所示,可以看到新型结构的对比度普遍大于传统结构。说明了本文的优化设计对液晶透镜成像性能的提升。

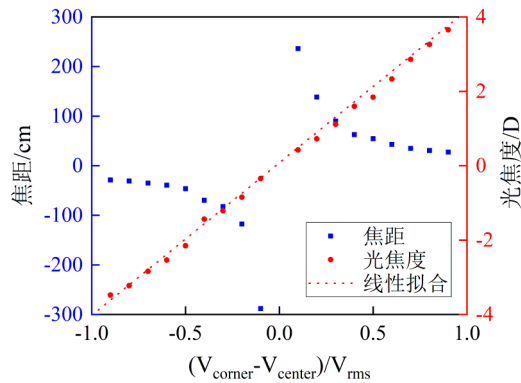


图16 焦距与光焦度随电压变化图

Fig. 16 Graph of focal length and focal power as a function of voltage

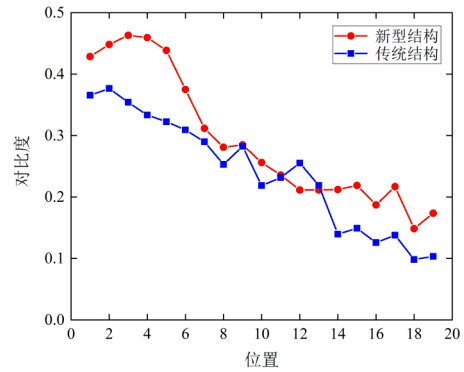


图18 对比度图

Fig. 18 Contrast chart

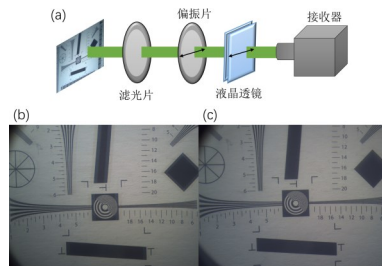


图17 成像装置及成像图 (a)成像装置,(b)新型结构成像图,(c)传统结构成像图。

Fig. 17 Imaging device and image (a) Imaging device; (b) Image of the new structure; (c) Image of the traditional structure.

## 4 结 论

对液晶透镜梳状电极结构进行优化设计,用于解决传统结构所存在的电压梯度不均匀问题,通过仿真和实验验证了方法的可行性。通过在多组电压下比较二者的波前图、位相图与成像图,可得出该方法有效解决了传统结构的电压梯度分布不均问题;新型电极结构的RMS较传统结构降低约19.4%,且相位变化与成像效果均优于传统结构,提高了液晶透镜性能。为液晶透镜的进一步优化和应用提供了参考依据。

## 参 考 文 献:

- [1] Lin Y H, Wang Y J, Reshetnyak V. Liquid crystal lenses with tunable focal length[J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2017, 5(2): 111-143.
- [2] 肖炎庭, 姜海明, 黄建溶, 等. 液晶菲涅耳透镜的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(12): 1757-1781.  
Xiao Y T, Jiang H M, Huang J R, *et al.* Research progress on liquid crystal Fresnel lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(12): 1757-1781.
- [3] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [4] Nose T, Sato S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field[J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(5): 1425-1433.
- [5] Naumov A F, Loktev M Y, Guralnik I R, *et al.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 992-4.
- [6] Ye M, Wang B, Sato S. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6407-12.
- [7] Ren H W, Fan Y H, Gauza, *et al.* Tunable-focus flat liquid crystal spherical lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84: 4789-4791.
- [8] Galstian T, Asatryan K, Presniakov V, *et al.* High optical quality electrically variable liquid crystal lens using an additional floating electrode[J], *Optics Letters*, 2016, 41: 3265-3268.

- [9] 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: 13806.
- [10] Beeckman J, Yang T H, Nys I, *et al.* Multi-electrode tunable liquid crystal lenses with one lithography step[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 271-274.
- [11] 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.
- [12] Feng W B, Liu G, Achieving parabolic phase profiles in liquid crystal lenses using an analytical spiral electrode[J]. *Optics Letters*, 2025, 50: 3397-3400.
- [13] Feng W B, Liu Z Q, Ye M. Design of Tunable Liquid Crystal Lenses with a Parabolic Phase Profile[J]. *Crystals*, 2023, 13(1): 8.
- [14] Feng W. Frequency-stable liquid crystal lenses using a circumferentially segmented concentric electrode[J]. *Optics Express*, 2024, 32(27).
- [15] 卫宁, 刘志强, 叶茂. 一种方形孔径液晶透镜的电极结构[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(7): 966-975.  
Wei N, Liu Z Q, Ye M. Electrode structure for square aperture liquid crystal lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(7): 966-975.

#### 作者简介:



卫 宁,男,硕士研究生,2023年于太原理工大学获得学士学位,主要从事液晶透镜器件的研究。E-mail: wn15296743262@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