

一种高性能液晶透镜的设计方法

冯文斌¹, 刘志强¹, 徐律涵¹, 李慧海², 叶茂^{1*}¹电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731;²四川天微电子股份有限公司, 四川 成都 610200

摘要 提出了一种高性能液晶透镜的设计方法。该方法结合了电极结构的设计并利用了液晶材料线性响应区。所设计的电极结构用于产生抛物线的电压分布, 将驱动电压控制在液晶材料的线性响应区内可以实现抛物线的相位分布。通过该方法设计的液晶透镜, 其孔径可以是任意大小, 且不依赖高阻膜。所设计的电极结构简单, 加工只需要一次光刻。透镜由两个低电压驱动, 驱动方法简单, 其焦距可通过两个驱动电压进行调节。理论上这种液晶透镜的相位分布在变焦过程中保持理想的抛物线分布, 且光焦度正比于两个驱动电压的差值。实验上, 通过光刻法加工了所设计的电极结构, 测量了液晶材料的线性响应区, 制作了液晶层厚度为 50 μm 的液晶透镜。通过偏振干涉原理采集了干涉条纹, 并从中提取了相位信息。实验结果表明, 透镜的相位服从抛物线分布, 且光焦度与驱动电压的差值成正比。实验结果与理论分析一致。

关键词 光学器件; 液晶器件; 透镜; 相位**中图分类号** O435.1 **文献标志码** A**DOI:** 10.3788/AOS221137

1 引言

液晶(LC)透镜最早在 1979 年由 Sato^[1]提出, 通过两块镀有氧化锡(ITO)电极的玻璃基板形成透镜状的空腔, 并通过在空腔中填充液晶实现了焦距的电控调节。相较于传统的透镜, 液晶透镜具有体积小、重量轻、设计紧凑、焦距可调等优点。目前, 液晶透镜虽然在多个领域得到应用, 如自动对焦^[2-3]、扩展景深^[4-5]、成像系统^[6]和三维(3D)成像^[7-10]等, 但是仍然存在一些亟待解决的问题, 如液晶材料的散射、响应时间长、光焦度小、电容效应明显和像差大等。随着透镜结构的进一步优化以及液晶材料性能的提升, 未来液晶透镜有望应用于更多的场合。

最早的液晶透镜的玻璃基板表面不是水平面, 且液晶层厚度较大, 因此存在液晶取向不均匀和响应速度慢的问题。随着圆孔液晶透镜的提出, 不均匀取向的问题得到了解决, 但是存在孔径小的问题。为了扩大液晶透镜的孔径, Ye 等^[11]通过在 ITO 电极和液晶层中间加入一层较厚的介电层, 扩大了液晶透镜的孔径, 但是驱动电压较高(几十伏)。高驱动电压会限制液晶透镜的应用范围, 因此高阻膜被引入液晶透镜的设计中^[12-16], 且很好地实现了低驱动电压的大口径液晶透镜。随着对高阻膜研究的深入, 研究人员发现高

阻膜的阻值很不稳定, 且均匀性也很难得到保证, 这些问题严重阻碍了液晶透镜的实用化。

近年来, 一些使用微结构 ITO 电极的液晶透镜被提出, 这些液晶透镜使用微结构 ITO 电极来代替高阻膜。Algorri 等^[17-18]结合同心圆电极和非均匀宽度电极设计了不依赖高阻膜的大口径液晶透镜, 而且焦距正负可调。该方法克服了传统液晶透镜的许多缺点, 但是所实现的相位分布与理想的抛物线无法很好地匹配。后来 Algorri^[19]和 Stevens^[20]等先后提出了使用微结构 ITO 电极的方孔液晶透镜。这种结构的液晶透镜由 4 个电压驱动, 驱动方法较灵活, 但是相位分布仍然很难保持理想的抛物线分布, 而且无法对焦距进行正负调节。目前能够实现接近理想抛物线电压分布的透镜设计是多电极结构, 该设计通过大量单独控制的电极来调整相位, 让其尽可能接近抛物线分布^[21]。这种设计的缺点在于需要大量的驱动电压, 控制复杂, 成本高。综上所述, 目前在同一个器件中实现接近抛物线的相位分布且要求控制简单、焦距正负可调仍然存在较大挑战。

本文提出一种高性能液晶透镜的设计方法。使用该方法设计的液晶透镜由两个电压驱动, 无需高阻膜, 相位服从抛物线分布, 且焦距正负可调。文中通过抛物线电压分布的要求建立电极结构需要满足的微分方

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-07-03; 录用日期: 2022-07-11; 网络首发日期: 2022-07-21

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: *mao_ye@uestc.edu.cn

程,通过求解微分方程得到理想电极结构的解析解。将两个驱动电压控制在液晶材料的线性响应区内,得到理想的相位分布,从而实现高性能的液晶透镜。文中详细地描述了理想电极结构的推导过程。在实验上,通过制作液晶盒测量了液晶材料的线性响应区。通过光刻法加工了所设计的电极,并使用该电极制作了液晶层厚度为 50 μm 的液晶透镜。通过偏振干涉原理采集了液晶透镜的干涉条纹,从干涉条纹中提取相位分布。然后将提取的相位数据进行抛物线拟合,通过拟合度评估透镜的性能。最后,通过正透镜的聚焦和离焦测量了透镜的响应速度。

2 电极结构设计

本文通过设计电极的形状来实现抛物线的电压分布。假设 ITO 电极形状对应的曲线表达式为

$$\begin{cases} x = r \cos[g(r)] \\ y = r \sin[g(r)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: r 是曲线上一点到坐标原点的直线距离; $g(r)$ 是对应的极角。曲线上任意一点到原点的电极长度可以通过曲线积分得到,可表示为

$$L(r) = \int_0^r \sqrt{\left(\frac{dx}{dr}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dr}\right)^2} dr = \int_0^r \sqrt{1 + r^2 g'^2(r)} dr, \quad (2)$$

式中: $g'(r)$ 为极角对半径 r 的导数。假设 ITO 电极的宽度和厚度是均匀的,根据欧姆定律,曲线上任意一点与原点的电压差正比于 $L(r)$ 。如果要得到沿径向呈抛物线的电压分布,那么 $L(r)$ 需要满足 $L(r) = ar^2$,

其中 a 是一个系数,其大小正比于电极线在径向上的密度。将式(2)代入该条件,整理可得

$$r^2 g'^2(r) - 4a^2 r^2 + 1 = 0. \quad (3)$$

求解该微分方程可得

$$g(r) = \pm \left[\sqrt{4a^2 r^2 - 1} - \arctan\left(\sqrt{4a^2 r^2 - 1}\right) \right] + C, \quad (4)$$

式中: C 是任意常数; $+$ 和 $-$ 分别表示曲线的绕行方向为逆时针和顺时针; $r \geq 1/(2a)$ 。通过螺旋电极形成沿径向呈抛物线的电压分布,式(4)是唯一解,任何其他的螺旋线都无法产生严格的抛物线电压分布。例如:文献[22]中所提到的螺旋电极结构,因为缺乏理论上的论证,电极结构并不是产生抛物线电压分布的理想电极结构,因此无法产生严格的抛物线电压分布。对于式(4)所描述的曲线,其在径向上的密度可表示为

$$\rho = \left| \frac{g'(r)}{2\pi} \right| = \sqrt{4a^2 - \frac{1}{r^2}} / (2\pi). \quad (5)$$

当 a 足够大时,式(5)简化为 $\rho = a/\pi$,即 $a = \rho\pi$ 。曲线的起点可以是半径为 $1/(2a)$ 圆上的任意一点,假设起始的极角为 90° ,那么 $C = \pi/2$ 。以 $a = 5$ 为例,绘制式(4)表示的曲线,如图 1(a)所示。图 1(a)对应的电极结构存在一个问题,即给中心施加电压较困难。虽然多层电极设计可以实现,但是成本过高。为了方便给中心点施加电压,考虑到曲线有两种绕行方向,因此交替使用顺时针和逆时针绕行的曲线可以达到这一目的。如图 1(b)所示,逆时针和顺时针曲线分别对应于式(4)中的正、负号。这样的设计既满足了抛物线的电压分布,也可以留出一条通道方便外部通过 ITO 导线给中心施加电压,如图 1(b)中竖直虚线所示。

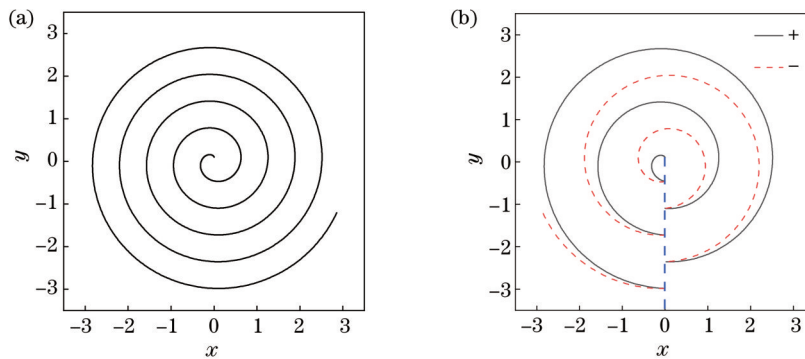


图 1 电极结构示意图($a = 5$)。(a)逆时针;(b)逆时针和顺时针交替

Fig. 1 Structural diagrams of electrode ($a = 5$). (a) Counterclockwise; (b) alternate of counterclockwise and clockwise

图 1(b)所示的设计方案解决了给中心施加电压的问题,但是电极的间隔不均匀。一方面,当电极的密度较大时,电极间隔不均匀会导致间隔较窄的一侧电极重叠,从而影响电压分布;另一方面,不均匀间隔会使得间隔内的相位变化不均匀,降低透镜的性能^[17]。因此希望设计一种均匀间隔的电极结构,方便给中心施加电压。对于图 1(b)中的电极结构,当密

度很大时,每段 ITO 螺旋电极近似等价于同心圆结构。当每段电极都为同心圆,则很容易实现相等的电极间距。因此将图 1(b)所示的结构变形为同心圆结构,如图 2 所示。同心圆的间隔相等,且相邻的同心圆首尾相连,形成一根整体的电极。假设电极的宽度为 w ,间隔为 d ,那么曲线上任一点到中心点的电极长度为

$$L(r) = \int_0^r 2\pi r \rho dr = ar^2, \quad (6)$$

式中: $\rho = 1/(w + d)$ 表示曲线沿径向的密度, $a = \rho\pi$, 与前面结构一致。可以看到变形后的电极结构也满足 $L(r) = ar^2$, 因此能够形成抛物线的电压分布。假设靠近中间的一端施加电压 V_1 , 另一端施加电压 V_2 , 则径向上任一点的电压 $V(r)$ 与中心点的电压差为

$$\Delta V(r) = V(r) - V_1 = \frac{r^2}{R^2}(V_2 - V_1), \quad (7)$$

式中: R 表示透镜孔径的半径。从式(7)可以看出, 只要保证电极线的宽度和间隔为常数, 那么电压在径向上就是呈抛物线分布, 且不依赖于两端施加的电压。得到抛物线的电压分布之后, 只要保证所施加的电压 V_1 和 V_2 都在液晶材料的线性响应区间内, 则液晶层的相位分布就是抛物线分布。

3 实验与结果

液晶盒的结构如图 3 所示, 由玻璃基板和液晶层组成, 具体的制作过程可以分为以下步骤: 1) 使用乙醇和丙酮对玻璃基板进行清洗; 2) 通过旋涂机在有 ITO 电极的一侧涂上取向层, 旋涂机转速为 3500 r/min; 3) 将加热台温度调至 90 °C, 并将涂有取向层的玻璃基板置于其上烘烤 30 min, 然后将温度调至 230 °C 再烘

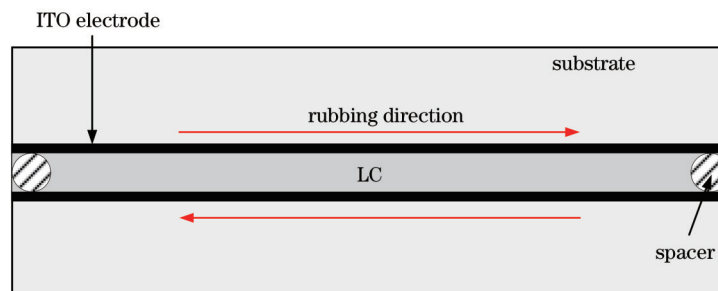


图 3 液晶结构盒示意图

Fig. 3 Schematic diagram of LC cell

实验中首先制作一个平面电极(没有图 2 所示的电极图案)的液晶盒用来测量液晶材料的线性响应区, 液晶层厚度为 50 μm , 液晶材料是由江苏和成显示科技有限公司生产的 HTG116900-100, 其光学双折射(e 光折射率 n_e 与 o 光折射率 n_o 的差值) $\Delta n = n_e - n_o = 0.206$ 。实验装置如图 4 所示, 激光波长为 457 nm, 强度调制器用于调节出射的激光强度。第一个偏振片产生偏振光, 该偏振光能分解为两个正交的分量, 其中: 第一个分量垂直于液晶盒的摩擦方向, 该分量不受液晶层调制; 第二个分量平行液晶盒的摩擦方向, 该分量会受到液晶层调制, 从而与第一个分量之间产生光程差。最后两个分量通过第二个偏振片后发生干涉, 形成干涉条纹, 并被 CMOS 接收。实验装置中的物镜是用于放大干涉条纹图, 便于在计算机上显示以及相位信息提取。信号发生器用于产生交流电压信号, 且电

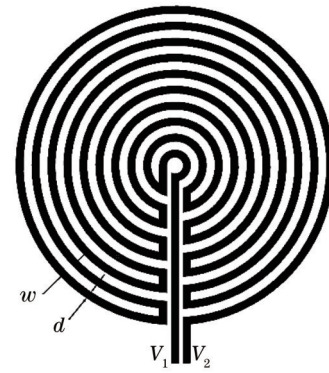


图 2 实验中使用的电极结构

Fig. 2 Structure of electrode used in experiment

烤 90 min; 4) 使用摩擦机给固化后的取向层进行摩擦取向; 5) 将 50 μm 的间隔子和紫外胶混合在一起, 并将其涂在其中一块玻璃基板的 4 个角上, 然后将另一块基板盖上, 形成液晶盒(电极面正对, 上下基板的摩擦方向反向平行), 最后用紫外灯固化混有间隔子的紫外胶; 6) 将盒子的两边使用紫外胶密封, 并用紫外灯固化紫外胶; 7) 使用毛细管给液晶盒注入液晶材料, 同样使用紫外胶密封液晶盒剩下的两边; 8) 使用导电胶带或者导电银胶将 ITO 电极引出, 方便实验中为其施加电压。

压的幅值、相位、频率可通过计算机控制。

给平面电极液晶盒的一块基板上施加电压, 而另一块接地。调整施加电压幅值, CMOS 所接收的光强随之发生变化。根据干涉原理, 相邻光强峰值之间的相位差为 2π , 因此可以得到相位随电压的变化曲线, 如图 5 所示。从图 5 中可以看到: 在电压未达到液晶材料的阈值电压之前, 液晶层相位基本不随电压发生变化; 当电压较高时, 液晶层相位对电压的响应趋于平缓, 这是因为液晶层接近饱和状态。在 $1.56V_{\text{rms}}$ (V_{rms} 表示交流电压的有效值) 到 $2.50V_{\text{rms}}$ 的电压范围内, 液晶层相位对电压的响应基本是呈线性的, 因此在后面的实验中所使用的驱动电压都会取这个范围内的电压。

测量得到线性响应区之后, 使用光刻好的玻璃基板制作了 50 μm 液晶层厚度的液晶透镜, 透镜的孔径

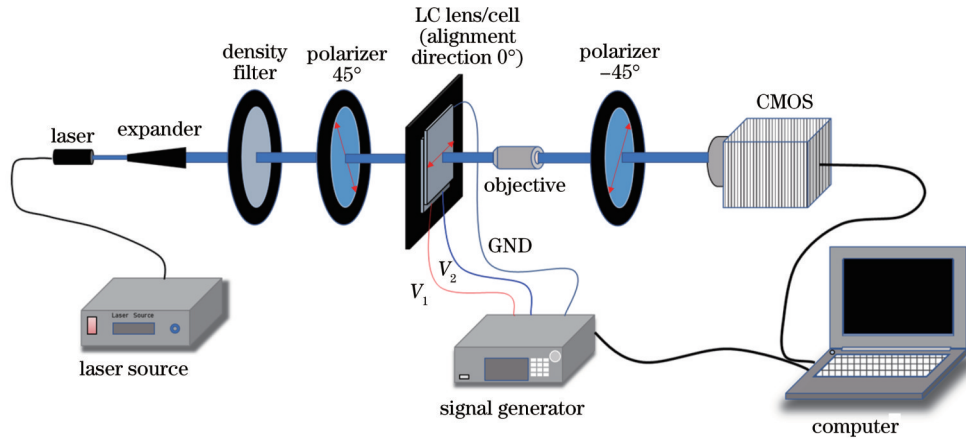


图 4 实验装置图
Fig. 4 Experimental setup

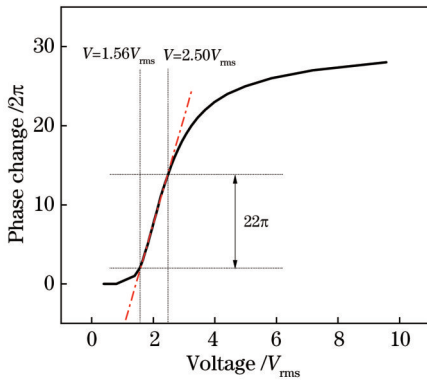


图 5 液晶层相位对施加电压的响应曲线
Fig. 5 Response curve of liquid crystal layer phase to applied voltage

为 4 mm。液晶透镜的制作方法和结构都与图 3 所示的液晶盒一致,唯一的区别在于其中一个平面 ITO 电极替换成图 2 所示的图案电极。图案电极通过光刻的方法加工,电极的宽度和间隔都为 5 μm,电极的厚度为 20 nm,在显微镜下观察的局部图案电极如图 6(a)

所示,其中首尾相连的同心圆表示 ITO 电极。图 6(b) 是实际制作完成的液晶透镜,使用的方形玻璃基板厚度为 0.5 mm,宽度为 2 cm。其中 V_1 和 V_2 施加在图案电极的两端,相对的另一块玻璃基板上的电极接地。

当 $V_1 < V_2$ 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。为了观察透镜光焦度随施加电压的变化,以及不同电压下的相位分布情况,分别给正负透镜施加不同的电压,并使用如图 4 所示的实验装置采集干涉条纹。对于正透镜状态, V_1 固定在 $1.56V_{rms}$, V_2 从 $1.56V_{rms}$ 增加到 $2.50V_{rms}$ 。图 7(a)~(d) 分别表示 V_2 在 $1.90V_{rms}$ 、 $2.10V_{rms}$ 、 $2.30V_{rms}$ 和 $2.50V_{rms}$ 时的正透镜状态的干涉条纹。对于负透镜状态, V_2 固定在 $1.56V_{rms}$, V_1 从 $1.56V_{rms}$ 增加到 $2.5V_{rms}$ 。图 7(e)~(h) 分别表示 V_1 在 $1.90V_{rms}$ 、 $2.10V_{rms}$ 、 $2.30V_{rms}$ 和 $2.50V_{rms}$ 时的负透镜状态的干涉条纹。从图中可以看出,随着 $|V_1 - V_2|$ 的增加,干涉条纹数目逐渐增加,说明透镜的光焦度随着电压的变化而变化,且光焦度可正负切换。

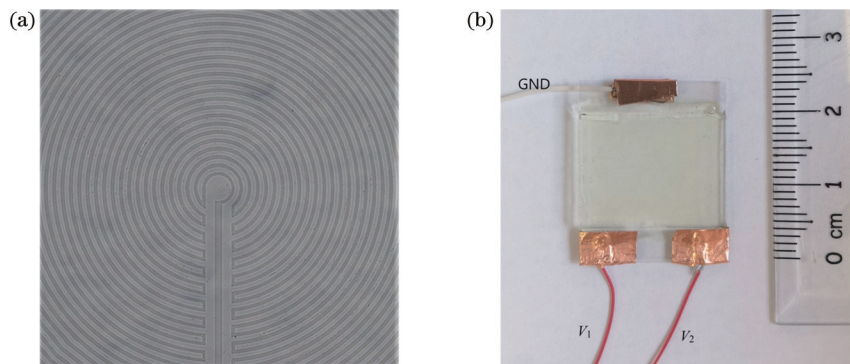


图 6 局部电极结构及液晶透镜实物图。(a) 电极;(b) 液晶透镜
Fig. 6 Physical diagram of partial electrode structure and liquid crystal lens. (a) Electrode; (b) liquid crystal lens

在图 7 中,相邻明暗条纹之间的相位差为 π ,根据这一规律提取干涉图水平中轴线上的相位分布,结果如图 8(a) 所示。图 8 中的散点是实际提取的相位数

据,曲线是根据散点拟合的抛物线。从图 8 中可以看出,相位在变焦过程中一直保持抛物线的相位分布。此外,正透镜和负透镜从边缘到中心的相位变化分别

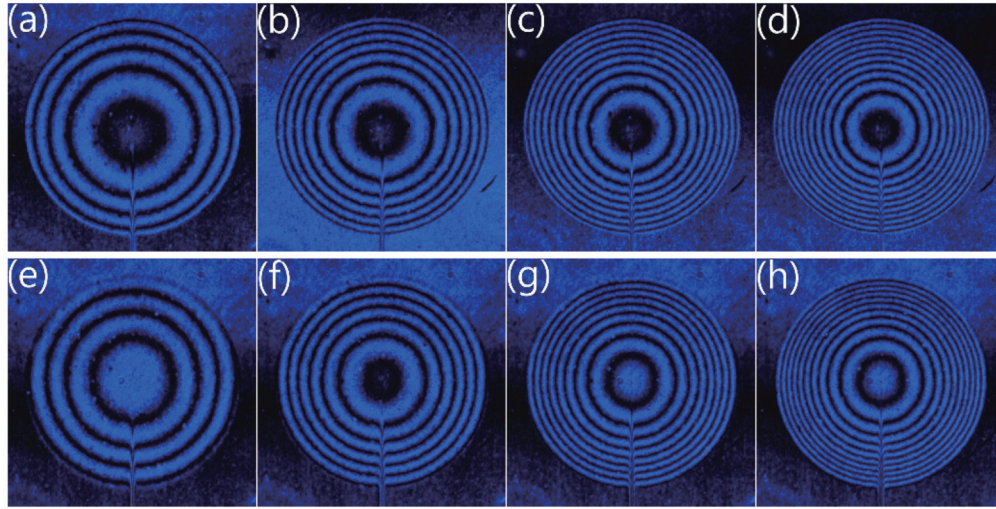


图 7 干涉条纹。(a)~(d)正透镜;(e)~(h)负透镜

Fig. 7 Interference fringes. (a)-(d) Positive-lens; (e)-(h) negative-lens

为 22.4π 和 21.4π , 这与图 5 中测量的 22π 基本吻合。该结果意味着只要得到相位对电压的响应曲线就可以根据需求准确设计透镜的光焦度或者焦距, 这种特性能够为液晶透镜的设计提供有效指导。

为了考察光焦度与 $|V_1 - V_2|$ 的关系, 分别用两种方法驱动正透镜和负透镜。对于正透镜, V_1 固定在 $1.56V_{rms}$, V_2 从 $1.56V_{rms}$ 增加到 $2.50V_{rms}$, 或者 V_2 固定在 $2.50V_{rms}$, 而 V_1 从 $2.50V_{rms}$ 减小到 $1.56V_{rms}$ 。类似

地, 对于负透镜, V_2 固定在 $1.56V_{rms}$, V_1 从 $1.56V_{rms}$ 增加到 $2.50V_{rms}$, 或者 V_1 固定在 $2.50V_{rms}$, V_2 从 $2.50V_{rms}$ 减小到 $1.56V_{rms}$ 。分别提取相位并计算光焦度, 结果如图 8(b) 所示。可以看到, 对于正负透镜, 两种驱动方法得到的光焦度与 $|V_1 - V_2|$ 的关系是一致的, 且都是正比关系。这说明这种方法设计的液晶透镜的光焦度取决于 $|V_1 - V_2|$ 的值。该结果与式(7)所分析的结果吻合。

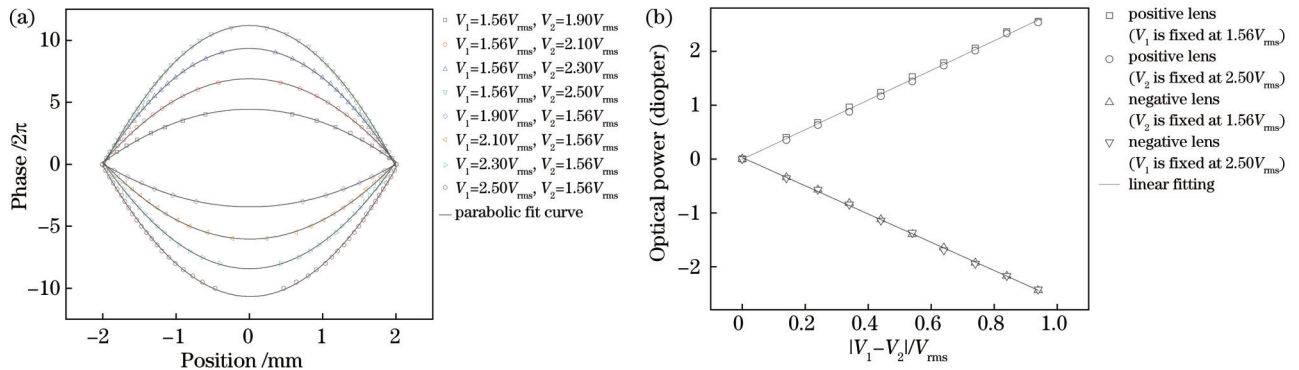


图 8 相位和光焦度。(a)不同条件下正负透镜的相位分布;(b)不同驱动方式下的光焦度与 $|V_1 - V_2|$ 的关系

Fig. 8 Phase profiles and optical power. (a) Phase profiles of positive and negative lenses under different conditions; (b) relationship between optical power and $|V_1 - V_2|$ under different driving modes

最后, 通过如图 9(a) 所示的实验装置测量液晶透镜的响应时间。该光路中只需要一个偏振片, 且偏振方向与液晶透镜的摩擦方向平行。接收器是光电二极管, 放置于正透镜的焦平面上, 用来探测光强。光电二极管的输出信号用示波器接收, 并记录数据, 结果如图 9(b) 所示。初始状态液晶透镜处于不加电状态 ($V_1 = V_2 = 0$), 光束不被聚焦, 光电二极管接收的光强信号较弱, 输出电流小。施加正透镜对应的驱动电压 ($V_1 = 1.56V_{rms}$, $V_2 = 2.50V_{rms}$) 后, 光强逐渐增强, 约 13.6 s 后稳定, 即该透镜从关闭状态切换到开启状态

的响应时间为 13.6 s。随后撤掉电压, 0.5 s 后光强恢复初始状态, 即该透镜从开启状态切换到关闭状态的响应时间为 0.5 s。液晶透镜的响应时间主要取决于液晶层的厚度, 因此可以通过减小液晶层厚度来提高响应速度。

4 结 论

基于液晶材料的线性响应区提出了一种高性能液晶透镜的设计方法, 且通过实验验证了透镜的性能。这种液晶透镜驱动方法简单, 结构简单, 驱动电压低,

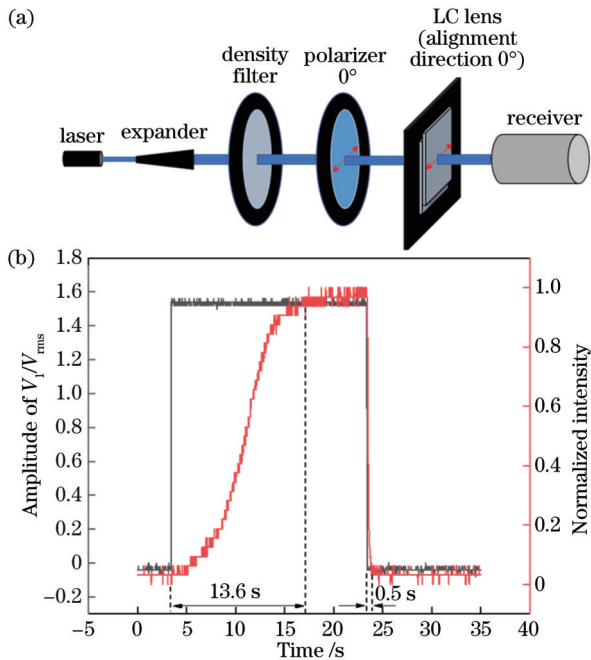


图9 液晶透镜响应时间测量装置及测量结果。(a)实验装置；(b)电压 V_1 的幅值和光电二极管接收的归一化光强

Fig. 9 Liquid crystal lens response time measurement device and measurement results. (a) Experimental setup; (b) amplitude of voltage V_1 and normalized intensity received by photodiode

且相位服从理想的抛物线分布。理论上,根据理想抛物线的电压分布的要求建立了方程,并通过方程求解得到了电极结构对应的解析表达式。通过分析可知,这种液晶透镜的光焦度是正负可调的,且光焦度的大小正比于两个驱动电压的差值。实验上,通过光刻法加工了电极结构。制作了孔径为 4 mm、液晶层厚度为 50 μm 的液晶透镜,并通过偏振干涉原理获取干涉条纹。实验结果表明,液晶透镜的相位在变焦过程中保持理想的抛物线分布,验证了液晶透镜的高性能以及设计方法的准确性。此外,液晶透镜的光焦度正比于驱动电压的差值,该结果与理论分析一致。

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] 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.
- [3] Onaka J, Iwase T, Emoto A, et al. Ultrasound liquid crystal lens with a variable focus in the radial direction for image stabilization[J]. Applied Optics, 2021, 60(33): 10365-10371.
- [4] 刘志强, 胡铁瑶, 叶茂. 液晶轴棱锥[J]. 光学学报, 2022, 42

(8): 0823001.

- [5] Liu Z Q, Hu Y Y, Ye M. Liquid crystal axicon[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0823001.
- [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.
- [6] 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.
- [7] Peng Y Y, Zhou X T, Zhang Y A, et al. Fabrication of a micro-lens array for improving depth-of-field of integral imaging 3D display[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9104-9107.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Huang Y P, Chen C W, Shen T C. High resolution autostereoscopic 3D display with scanning multi-electrode driving liquid crystal (MeD-LC) lens[J]. SID International Symposium Digest of Technical Papers, 2009, 40(1): 336-339.
- [11] Ye M, Sato S. Optical properties of liquid crystal lens of any size [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(5B): L571-L573.
- [12] 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.
- [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] Kotova S P, Patlan V V, Samagin S A. Tunable liquid-crystal focusing device. 1. Theory[J]. Quantum Electronics, 2011, 41 (1): 58-64.
- [16] Kotova S P, Patlan V V, Samagin S A. Tunable liquid-crystal focusing device. 2. Experiment[J]. Quantum Electronics, 2011, 41(1): 65-70.
- [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: 10153.
- [18] Algorri J F, Zografopoulos D, Rodríguez-Cobo L, et al. Engineering aspheric liquid crystal lenses by using the transmission electrode technique[J]. Crystals, 2020, 10(9): 835.
- [19] 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.
- [20] Stevens J, Galstian T. Electrically tunable liquid crystal lens with a serpentine electrode design[J]. Optics Letters, 2022, 47 (4): 910-912.
- [21] 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.
- [22] Galstian T. Electrode structure for creating electrical potential gradient: WO 2021/113963 A1[P]. 2021-06-17.

Design Method for High-Performance Liquid Crystal Lens

Feng Wenbin¹, Liu Zhiqiang¹, Xu Lühan¹, Li Huihai², Ye Mao^{1*}

¹*School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;*

²*Sichuan Tianwei Electronic Co., Ltd., Chengdu 610200, Sichuan, China*

Abstract

Objective The electrode patterns of liquid crystal lenses are used to generate an inhomogeneous electric field by controlling the rotation of the liquid crystal molecules, thus producing a lens-like phase distribution. In the last few decades of development of liquid crystal lens, many different structures have been proposed, such as hole-patterned electrodes, concentric electrodes, modal lenses, and some other variations of these structures. With the development of liquid crystal lenses, the performance has been significantly improved, and many associated problems, such as small aperture, high driving voltage, slow response, and disclination line, have been solved. Despite of this, the traditional liquid crystal lenses still face some problems that hinder the practical application of liquid crystal lenses. For traditional liquid crystal lenses, the voltage distribution formed by electrode is affected by many parameters, such as the voltage frequency, voltage phase, size of aperture, and thickness of liquid crystal layer. Therefore, it is difficult to obtain a parabolic voltage profile of an ideal liquid crystal lens for the traditional liquid crystal lenses, which increases the aberrations. To improve the performance of a liquid crystal lens, an electrode design that generates a parabolic voltage profile is desired. On the other hand, traditional liquid crystal lenses need high-resistance layers to enlarge aperture size. However, the properties of high-resistance layers usually change over time, resulting in changes in the properties of the liquid crystal lenses. The faced problems by traditional liquid crystal lenses have become an obstacle to the mass production of liquid crystal lenses. The primary objective of this study is to design a high-performance liquid crystal lens with ideal phase profile, which also overcomes the associated drawbacks of traditional liquid crystal lenses mentioned above.

Methods The proposed liquid crystal lens combines the electrode structure design and the linear response range of liquid crystal materials to improve the performance. The designed electrode structure is used to generate a parabolic voltage profile, and the parabolic phase profile can be achieved when the driving voltage is controlled within the linear response range. To measure the linear response range of the LC material, a liquid crystal cell with plane electrodes (not patterned) on the inner faces of two substrates is fabricated. One plane electrode is grounded, and the other is applied on a voltage. Increase voltage and record normalized intensity captured by complementary metal oxide semiconductor camera. Then the phase can be extracted from record normalized intensity, and the linear response range can be obtained. The designed electrode is processed by photolithography, and the polyimide layer is spun and rubbed on electrodes to align nematic director parallel to the substrate surfaces. Then two substrates are separated by 50 μm spacers and optically aligned facing each other's interior surface with an opposite rubbing direction. Finally, the liquid crystal material is injected into the gap between the two substrates and the liquid crystal cell is sealed using the UV curing adhesive. The phase profiles are extracted from interference fringes obtained by use of polarization interferometry.

Results and Discussions The relationship between the phase change and the applied voltage is shown in Fig. 5. It shows the phase of liquid crystal layer is proportional to the applied voltage in the range from $1.56V_{\text{rms}}$ to $2.50V_{\text{rms}}$. When $V_1 < V_2$, the liquid crystal lens operates in the positive lens state; conversely, it operates in the negative-lens state. Thus, the proposed liquid crystal lens is positive-negative tunable by adjusting the driving voltages V_1 and V_2 . From Fig. 7, the number of interference fringes increases with the increase of $|V_1 - V_2|$, which indicates that the optical power of the lens is electrically adjustable, and it is positive-negative tunable. The concentric interference fringes (Fig. 7) also indicate the high performance of the liquid crystal lens. The phase profiles extracted from Fig. 7 are shown in Fig. 8(a). The scatter points are measurements, and the curves are fittings. It can be seen that the phase keeps a parabolic phase distribution in all states. In addition, the phase shift from the edge to the center of the lens is 22.4π for the positive lens and 21.4π for the negative lens, which basically agrees with the 22π measured in Fig. 5. The results imply that the optical power or focal length of the lens can be accurately designed as long as the phase response curve is obtained, which can provide effective guidance for the design of liquid crystal lenses. The measured optical power [Fig. 8(b)] of positive and negative lens states is proportional to the voltage difference $|V_1 - V_2|$, which is in good agreement with Eq. (7).

Conclusions A design method of a high-performance liquid crystal lens based on the linear response range of liquid crystal

materials is proposed, and the performance of the lens is verified by experiments. The driving method of the liquid crystal lens is simple, the structure is simple, the driving voltage is low, and the phase follows the parabolic distribution. In theory, an equation is established according to the requirement of parabolic voltage distribution, and the corresponding analytical expression of the electrode structure is obtained by solving the equation. Through the analysis, it can be seen that the optical power of the liquid crystal lens is positive-negative tunable, and the optical power is proportional to the difference between the two driving voltages. Experimentally, the electrode is developed by lithography. A liquid crystal lens with an aperture of 4 mm and a liquid crystal layer of 50 μm is fabricated, and the interference fringes are obtained by polarization interference principle. The experimental results show that the phase of the liquid crystal lens keeps the ideal parabolic distribution during the zoom process, which verifies the high performance of the liquid crystal lens and the accuracy of the design method. In addition, the experimental results show the optical power of the liquid crystal lens is proportional to the difference of two driving voltages, which is consistent with the theoretical analysis.

Key words optical devices; liquid crystal device; lenses; phase