

文章编号:1007-2780(2019)08-0739-09

快速响应模式电极 pi-cell 液晶透镜的研究

肖 奇,于 涛*,章 波,王伟郅,巩伟兴,张嘉伦
(大连海事大学 理学院 物理系,辽宁 大连 116026)

摘要:为提高传统模式电极液晶透镜的响应速度,本文设计了模式电极 pi-cell 液晶透镜。结合液晶连续体理论和模式电极液晶透镜电阻-电容等效电路,提出一种快速的计算方法对液晶透镜进行模拟仿真,仿真结果与实际器件的测试参数具有良好的一致性,显示了此仿真方法具有较高的精度,并依据仿真结果设计了模式电极 pi-cell 液晶透镜的驱动条件。实验制备了模式电极 pi-cell 液晶透镜并研究了其光学特性,结果显示此液晶透镜具有较大的焦距调节范围和良好的成像效果,对比于参数相近的模式电极平行排列液晶透镜,模式电极 pi-cell 液晶透镜的响应时间为 136 ms,比平行排列液晶透镜减少 368 ms,响应速度显著提高。

关键词:液晶透镜;pi-cell;响应时间;模式电极;光程差

中图分类号:O43; O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193408.0739

Fast response modal electrode pi-cell liquid crystal lens

XIAO Qi, YU Tao*, ZHANG Bo, WANG Wei-zhi,
GONG Wei-xing, ZHANG Jia-lun

(*Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

Abstract: In order to improve the response speed of the traditional modal electrode liquid crystal lens, a modal electrode pi-cell liquid crystal lens is designed. Combining the theory of liquid crystal continuum and the model of resistance-capacitance equivalent circuit of modal electrode liquid crystal lens, a fast calculation method is proposed to simulate the liquid crystal lens. The simulation results are in good agreement with the test parameters of actual device. It shows that the simulation method has high precision. The driving conditions of the modal electrode pi-cell liquid crystal lens is designed according to the simulation results. The modal electrode pi-cell liquid crystal lens is fabricated and its optical properties are studied. The results show that the liquid crystal lens has a large focal length adjustment range and good imaging effect. The response time of modal electrode pi-cell liquid crystal lens is 136 ms, which is 368 ms shorter than the parallel oriented liquid crystal lens with similar parameters. The response speed of modal electrode pi-cell liquid crystal lens is significantly improved.

Key words: liquid crystal lens; pi-cell; response time; modal electrode; optical path difference

收稿日期:2019-03-13;修订日期:2019-05-18.

基金项目:国家自然科学基金(No.11404048);中央高校基本科研业务(No.132016349)

Support by National Natural Science Foundation of China (No.11404048); Research Program of Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.3132016349)

* 通信联系人, E-mail: yutao@dlmu.edu.cn

1 引言

液晶透镜(LCL)^[1-2]具有可调谐聚焦、电压驱动、低功耗、制作简单、结构紧凑、稳定性好等特点,在三维显示和成像系统中具有广泛应用性。1979年,Sato^[2]首次提出圆孔电极结构液晶透镜的概念。1998年,Naumov等提出模式电极液晶透镜^[3],其结构是在圆孔上镀制了一层高阻薄膜,有效地解决了普通圆孔型液晶透镜在大孔径情况下所存在的边缘场效应明显、成像效果变差和调节电压大等缺陷。

实现快速响应液晶透镜的应用具有重要意义。近年来,人们已经提出了多种方法来提高液晶透镜的响应速度。2006年,Pishnyak等^[4]将盒厚为110 μm 的双频液晶(DFLC)透镜响应时间缩短到400 ms。双频液晶透镜可以通过控制施加电压的频率来改善响应速度,然而其驱动电路相对复杂,高频运行时性能不稳定^[5]。2005年,Ren等^[6]制作了纳米聚合物分散(PDLC)液滴的快速响应液晶透镜,具有较快的响应速度,响应时间仅为0.4 ms,但是其焦距范围为3.3~3.5 cm,动态变化较小,无法实现焦距无穷远,同时需要较高的驱动电压,材料制作难度大。2014年,Chen等制作了响应时间为5.65 ms的蓝相液晶(BPLC)透镜^[7]。基于克尔效应的蓝相液晶具有不加电场时各向同性等特点,但其在应用过程中还存在着驱动电压高,稳定温度范围窄等缺点^[8]。尽管上述方法都有效地改善了液晶透镜的响应速度,但仍然存在明显的缺点和应用的难度。Pi-cell液晶显示^[9-10]具有快速响应的特性,且与传统工艺兼容,因此pi-cell液晶透镜将会有效地提高响应速度。

本文在模式电极液晶透镜的基础上,提出了模式电极pi-cell液晶透镜。应用液晶连续体理论与透镜电阻-电容等效电路相结合,给出了更为简化的计算方法对液晶透镜的电压和光程差分布进行模拟仿真,提高了仿真速度,并依据仿真结果设计了此模式电极pi-cell液晶透镜的驱动条件,并且与实际器件的光程差分布进行了对比,对比结果表明此仿真方法具有较高的仿真精度。实验制备了模式电极pi-cell液晶透镜并测量了光学特性和响应速度特性,其具有良好的成像效果和

焦距变化范围,pi-cell液晶透镜与平行排列液晶透镜参数相近,却可以达到更快的响应速度。

2 透镜设计

2.1 透镜结构

模式电极pi-cell液晶透镜的结构如图1(a)所示,涂覆有氧化铟锡(ITO)膜的上下玻璃基板厚度为1.1 mm。上基板为圆孔电极,直径2 mm,其上面分别为氧化锌(ZnO)高阻层以及聚酰亚胺取向层。下基板是普通的图案电极,其上方旋涂聚酰亚胺取向层。两基板之间夹有厚度为24 μm 的液晶层。Pi-cell液晶透镜上下基板取向层的摩擦方向为相同方向平行摩擦。

2.2 展曲状态到pi-cell状态的转变

液晶透镜从展曲转变为pi-cell状态如图1(b),(c)所示。当施加展曲排列液晶透镜的电压大于临界电压^[10]一段时间后,展曲状态就会转变为pi-cell状态,临界电压与液晶参数和预倾角有关。实验所用液晶材料为E7型液晶,其参数为 $k_{11}=12$ pN, $k_{22}=9$ pN, $k_{33}=19.5$ pN, $\epsilon_{//}=19.6$, $\epsilon_{\perp}=5.1$, $\Delta n=0.22$ 。通过晶体旋转法^[11]测量获得预倾角为 8.6° ,计算得到临界电压为1.96 V^[12]。

在一定的驱动电压下,频率的增大会导致圆孔中心处的电压降低,为保持液晶透镜全盒处于pi-cell状态,液晶透镜圆孔中心处的电压须始终高于临界电压,本文对模式电极pi-cell液晶透镜的电压分布以及光程差分布进行模拟仿真并确定驱动条件。

2.3 模拟仿真

如图1(d)所示,高电阻层(方阻 $10^8 \Omega/\square$)和液晶在小孔表面上形成电阻-电容等效电路。当在液晶透镜上施加正弦电压时,电压通过电阻-电容等效电路产生电压降^[13],从小孔边缘到中心逐渐减小,使小孔表面不同位置处的液晶分子指向矢排列不同,形成光程差分布。严格来说,模式电极液晶透镜的模拟仿真需要求解高阻膜和液晶材料中的电势方程与液晶指向矢的Ericksen-Leslie方程^[14],求解过程较为复杂,为此本文提出一种简化的模拟仿真方法进行仿真,只需计算一次Ericksen-Leslie方程。

基于模式电极pi-cell液晶透镜的液晶排列方式,设定中间层液晶分子为垂直于基板,根据模

式电极液晶透镜的电阻-电容等效电路和液晶连续体理论^[16]。

(1)结合液晶材料参数计算 pi-cell 液晶透镜不同电压下满足 Ericksen-Leslie 方程的液晶指向矢排列、有效介电常数 $\epsilon(v)$ 和 o 光与 e 光间的光程差。

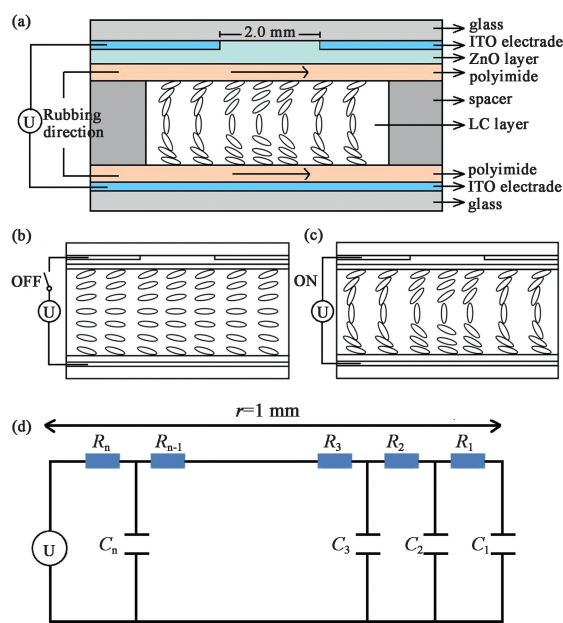


图1 (a)模式电极 pi-cell 液晶透镜结构示意图;(b)无驱动电压下的展曲排列;(c)液晶透镜从展曲状态变为 pi-cell 状态;(d)模式电极液晶透镜电阻-电容等效电路示意图。

Fig.1 (a) Structure of modal electrode pi-cell liquid crystal lens; (b) Splay oriented without voltage-driven applied; (c) All areas of the LCL change from splay oriented to pi-cell oriented; (d) Resistance-capacitance equivalent circuit simulation schematic of the LCL.

(2)将半径为 1 mm 的圆孔高阻薄膜等距离分为 1 000 份,可以近似认为每个环上的电压是一致的,运用高阻膜的方块电阻计算每一圆环的电阻,对应于等效电路中的 $R_1 \sim R_n$ 。

(3)当电压施加到液晶透镜时,首先设置液晶材料的初始介电常数均一值 $x(\epsilon_a < x < \epsilon_{//})$ 。

(4)运用平板电容公式计算出每一环状电极的电容,对应等效电路中的 $C_1 \sim C_n$ 。运用节点电压法计算每个圆环上的电压值。

(5)依据步骤(1)中计算出的有效介电常数随电压变化的数据,用步骤(4)中计算得到的每个圆环上的电压值利用插值法计算出该圆环处的液晶等效介电常数,代入(4)中再进行计算。重复以上的计算过程,当前计算电压与前一次计算的电压误差在 10 mV 之内时,作为计算终止的判据,得到每个圆环上的电压,根据圆环上电压利用步骤(1)中的数据插值得到圆环处的光程差。

图2(a)是计算得到的 pi-cell 液晶透镜的电压与光程差的曲线,由图可见,当施加电压达到 21 V 时,光程差基本达到饱和,继续增高电压,光程差变化较小。因此本文的驱动电压幅值选为 21 V,可以使液晶达到饱和响应,获得较大的光程差。

仿真计算得到的模式电极 pi-cell 液晶透镜在电压为 21 V,不同频率下的电压分布如图2(b)所示,光程差分布如图2(c)所示。

由图2(b)、(c)可知,频率越高,中心处电压越低,当频率足够高时,液晶透镜圆孔中心电压会小于临界电压,低电压处的液晶层将会转变为图1(b)的展曲排列状态,液晶透镜将不能保持均匀

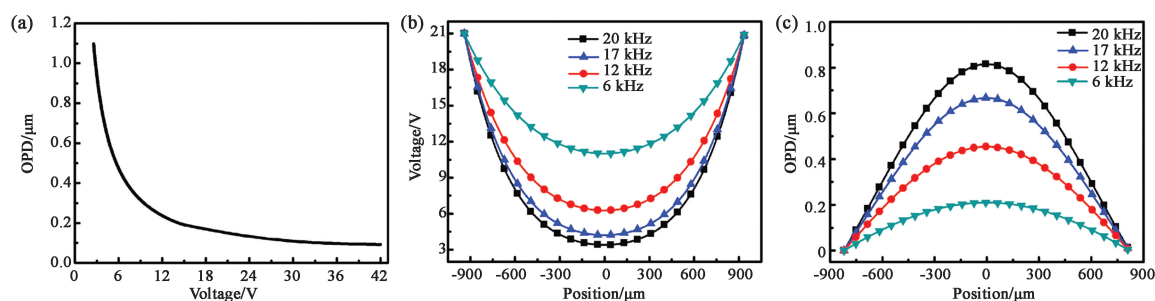


图2 (a)光程差随电压变化曲线;(b)圆孔区域电压分布随频率变化图;(c)圆孔区域光程差随频率变化图。

Fig.2 (a) Optical path difference with voltage change diagram; (b) The simulation calculated voltage distribution in the circular hole area at different frequency; (c) Optical path difference in the circular hole area at different frequency.

的 pi-cell 状态;当频率过小时,液晶透镜的光程差较小,透镜效应不明显。综上所述,保持电压为 21 V,驱动频率为 12 kHz 到 20 kHz 之间,圆孔中心处的仿真电压高于临界电压,既可保持均匀的 pi-cell 状态,又具有较大的光程差,具有明显的透镜效应。

同时可以通过光程差来计算液晶透镜的焦距^[16]:

$$f = \frac{r^2}{2(n_{\text{eff}} - n_o)d}, \quad (1)$$

其中: n_{eff} 是最大有效折射率, n_o 是寻常光折射率, d 是液晶层的厚度, r 是圆孔半径。

3 实验与结果讨论

3.1 工艺制备

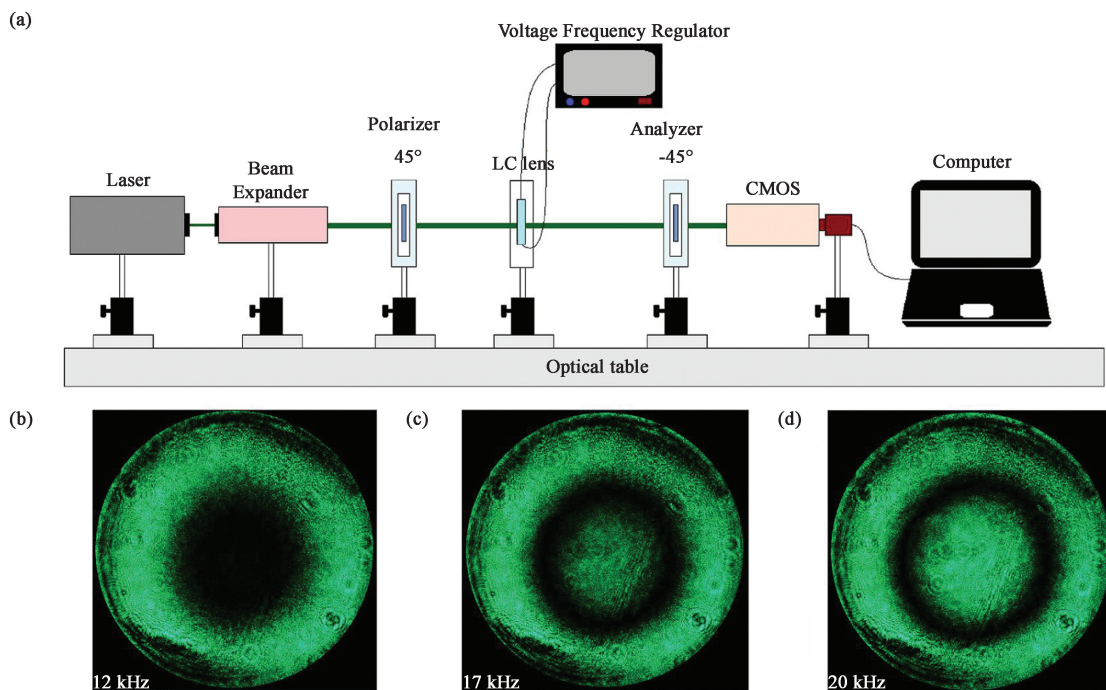
模式电极液晶透镜的工艺流程:首先通过光刻技术在厚度为 1.1 mm 的 ITO 导电玻璃上得到 ITO 圆孔电极,然后用溶胶-凝胶法以旋转涂覆工艺在圆孔电极上制备 ZnO 高阻薄膜,高阻薄膜的方块电阻大约为 100 MΩ。对电极基板的 ITO 在圆孔下保持 3 倍圆孔直径以上的连续电极,以避免电极的边缘效应的影响。圆孔电极基板与对电极

基板按照通常的液晶器件制备工艺,旋涂聚酰亚胺取向层,同向平行摩擦取向处理,运用聚合物薄膜作为隔垫物控制液晶层厚度进行对盒组装,利用毛细效应注入 E7 液晶,完成 pi-cell 透镜样品的制备。作为对比制作的平行排列液晶透镜,其上下基板取向层的摩擦方向为反向平行摩擦。

3.2 光学特性

为了使液晶透镜圆孔边缘到中心都维持在 pi-cell 状态,透镜施加电压 21 V,频率 300 Hz 的驱动信号并保持一段时间,在低频时圆孔内的电压差较小,达到接近 21 V 的电压值,圆孔处液晶分子在高电压作用下由展曲状态进入 pi-cell 状态。其后的测试要保持圆孔中心的驱动电压高于临界电压。

液晶透镜干涉的实验装置如图 3(a)所示,使用波长为 515 nm 的半导体激光器作为光源,液晶透镜被放置在两个正交偏振器之间,液晶透镜的摩擦方向与起偏器偏振方向成 45°。激光束通过扩束镜变成准直光束,透过起偏器照射在液晶透镜的圆孔区域,穿过液晶透镜的光分解为 o 光和 e 光,o 光和 e 光通过检偏器发生干涉,干涉图通过 CMOS 图像传感器由计算机获取。



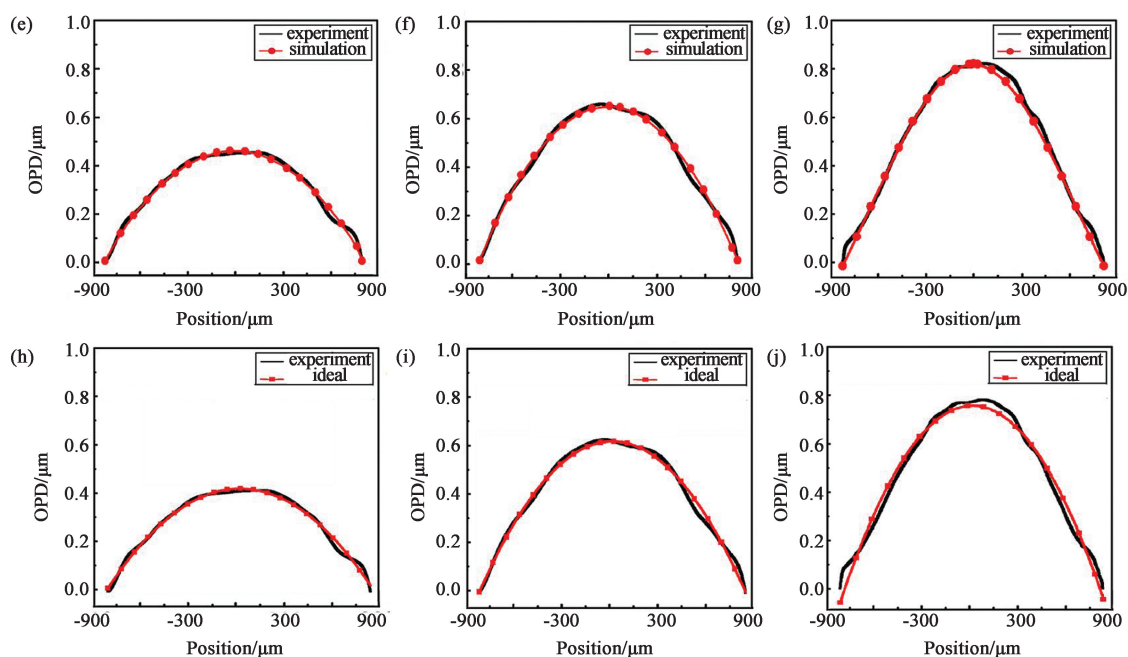


图 3 液晶透镜干涉测试装置图(a),电压为 21 V、频率为 12,17,20 kHz 的模式电极 pi-cell 液晶透镜干涉图(b, c, d),实验光程差分布与仿真光程差分布曲线(e, f, g),实验光程差分布与理想光程差分布曲线(h, i, j)。

Fig.3 Interference experimental apparatus of LCL(a), voltage of 21 V, interference fringes (b, c, d), curve of experimental optical path difference distribution and simulated optical path difference distribution(e, f, g), curve of experimental optical path difference distribution and ideal optical path difference distribution(h, i, j) with the frequency of 12,17, and 20 kHz, respectively.

施加在液晶透镜的电压为 21 V,频率从 12~20 kHz 变化,此范围内模式电极 pi-cell 液晶透镜的光程差较大,有良好的透镜效应。干涉条纹如图 3(b)、(c)、(d)所示,随着施加电压的频率不断增加,干涉条纹的数量逐渐增加。根据干涉条纹图像的相对光强分布,计算出不同频率下的光程差分布,并与仿真出的光程差分布作对比,如图 3(e)、(f)、(g)所示,通过实验测量的光程差与仿真的光程差由 origin 软件得到的相关系数分别为 0.991、0.992 和 0.989,表明该简化的仿真方法具有良好的计算精度。液晶透镜的光程差与理想的抛物线光程差分布曲线做出了对比,如图 3(h)、(i)、(j)所示,与抛物线光程差分布曲线的相关系数为 0.989、0.987 和 0.981,实验测量的光程差分布与理想光程差分布相关性较好,此液晶透镜具有良好的成像质量。光程差分布存在的差异主要是由于光强的不均匀和 CMOS 的噪声导致的。

在焦距测试实验中,只放置一个偏振片,偏振方向平行于透镜摩擦方向,驱动信号的电压为 21

V,在 12~20 kHz 间连续改变驱动信号频率测量的焦距随频率的变化曲线如图 4 所示,理论焦距由模拟仿真得到的光程差数据计算得到,实验测量焦距与理论焦距的一致性良好。此模式电极 pi-cell 液晶透镜的焦距范围为 30.3 cm 到无穷远。

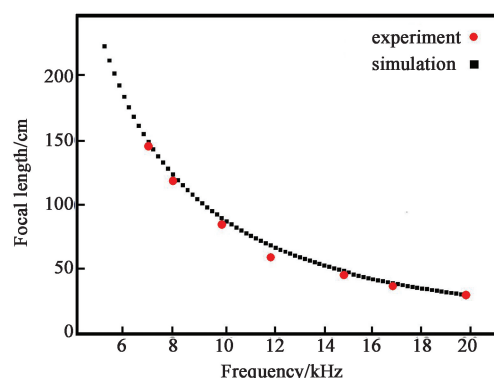


图 4 模式电极 pi-cell 液晶透镜焦距随频率变化图
Fig.4 Focal length of modal electrode pi-cell LCL with change of frequency

在成像测试实验中,液晶透镜与偏振方向平行于透镜摩擦方向的偏振片紧贴视频显微镜物镜放置,视频显微镜对前后距离间隔为 4.8 cm 的两个文字图案进行拍摄,并把图像在计算机上进行存储和显示。

模式电极 pi-cell 液晶透镜保持电压为 21 V、频率为 300 Hz 时,如图 5(a)所示,此时液晶透镜光程差很小,几乎没有透镜效应,显微镜物镜对远处的图案清晰成像,近处的图案由于物距较小而处于离焦模糊状态。当电压为 21 V、频率为 20 kHz 时,液晶透镜的焦距减小,与显微物镜组合后的等效焦距减小,小物距的近处图案成像清晰,大物距的远处图案变得离焦模糊,如图 5(b)所示。由图可见,该液晶透镜的成像效果良好,反映了其像差特性较好。

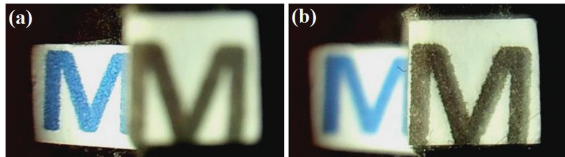
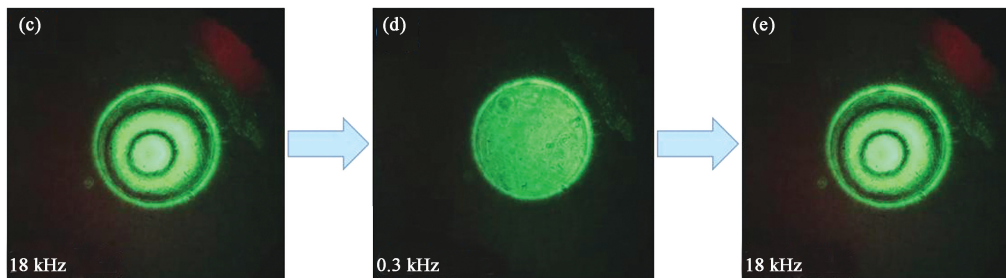
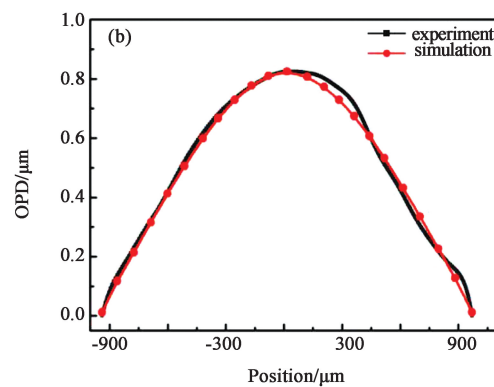
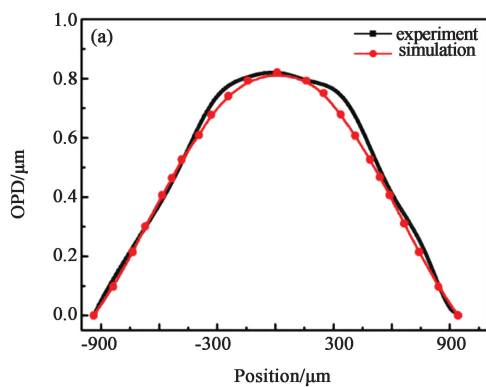


图 5 模式电极 pi-cell 液晶透镜施加电压 21 V、频率为 300 Hz(a) 和 20 kHz(b) 的成像图。

Fig.5 Images of modal electrode pi-cell LCL at applied voltage of 21 V with corresponding frequency of 300 Hz(a) and 20 kHz(b)



3.3 响应时间

保持施加在液晶透镜驱动信号的电压不变,频率变化会使圆孔区域的液晶分子指向矢的角度发生变化,出现干涉条纹的变化。当驱动频率跃变时,干涉条纹会弛豫变化到稳定状态,干涉条纹达到稳定状态的时间就是液晶透镜的响应时间。本实验用高帧频的相机透过显微镜拍摄干涉条纹的视频图像(240 帧/s),分析弛豫变化中视频截图的光程差,当光程差达到对应驱动频率条件下的稳态光程差时,作为达到稳态的判据。为了同步驱动信号的频率变化时间,在圆孔周围安装了红色 LED,LED 的亮灭与驱动频率的跃变同步。

作为对比,同时测量了液晶盒厚接近并且液晶材料一致的平行排列液晶透镜和 pi-cell 液晶透镜的响应时间,用光学干涉法测量液晶透镜的盒厚,筛选出盒厚误差小于 1.7% 的样品进行对比,研究 pi-cell 液晶透镜的响应速度提高的效果。测试模式电极 pi-cell 液晶透镜需要控制电压在 21 V,频率从 300 Hz 到 20 kHz 变化;而模式电极平行排列液晶透镜需要控制电压在 21 V,频率从 300 Hz 到 18 kHz 变化。低频驱动时,两种透镜光程差都较小,液晶透镜焦距较大。高频驱动的驱动条件使得两种液晶透镜的光程差保持一致,如图 6(a)和(b)所示,这样两种透镜的焦距

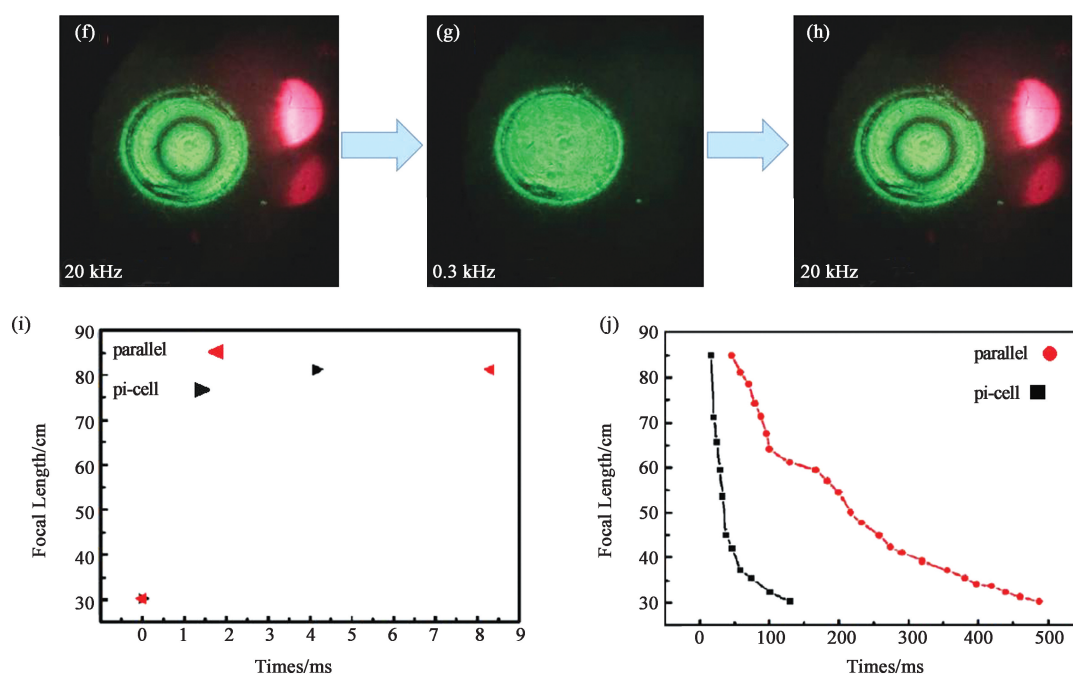


图 6 (a) 模式电极平行排列液晶透镜在电压为 21 V、频率为 18 kHz 的光程差曲线;(b) 模式电极 pi-cell 液晶透镜在电压为 21 V、频率为 20 kHz 的光程差曲线;(c, d, e) 模式电极平行排列液晶透镜响应时间为 504 ms,红色部分为 LED 光斑;(f, g, h) 模式电极 pi-cell 液晶透镜响应时间为 136 ms,红色部分为 LED 光斑;(i) 模式电极 pi-cell 液晶透镜和模式电极平行排列液晶透镜达到不同焦距的上升时间;(j) 模式电极 pi-cell 液晶透镜和模式电极平行排列液晶透镜达到不同焦距的下降时间。

Fig.6 (a) Optical path difference curves of the modal electrode parallel oriented LCL at 21 V and 18 kHz; (b) Optical path difference curves of the modal electrode pi-cell LCL at 21 V and 20 kHz; (c, d, e) Response time of the modal electrode parallel oriented LCL is 504 ms, the red part is LED; (f, g, h) Response time of the modal electrode pi-cell LCL is 136 ms, the red part is LED; (i) Rise time when the pi-cell and the parallel oriented liquid crystal lens reach the different focal length; (j) Fall time when the pi-cell and the parallel oriented liquid crystal lens reach the different focal length.

变化范围一致,平行排列液晶透镜与 pi-cell 液晶透镜在高驱动频率上的差异是由于不同器件间高阻膜方块电阻存在误差导致。驱动频率由低频变化到高频时,pi-cell 液晶透镜的频率从 300 Hz 到 20 kHz 变化,平行排列液晶透镜频率从 300 Hz 到 18 kHz 变化,干涉条纹从无到有,焦距由大变小,这段时间定义为下降时间,红色 LED 由暗到亮变化。驱动频率由高频到低频变化时,pi-cell 液晶透镜的频率从 20 kHz 到 300 Hz 变化,平行排列液晶透镜的频率从 18 kHz 到 300 Hz 变化,干涉条纹从有到无,焦距由小变大,这段时间定义为上升时间,红色 LED 由亮到暗变化。液晶透镜的响应时间用上升时间与下降时间的和来表示。平行排列液晶透镜的视频截图如图 6(c)、(d)、(e)所示,pi-cell 液晶透镜的视频截图如图 6(f)、

(g)、(h)所示。测试结果显示,平行排列液晶透镜的响应时间达到 504 ms,而 pi-cell 液晶透镜的响应时间可以缩短至 136 ms。

平行排列液晶透镜和 pi-cell 液晶透镜的焦距随时间的变化如图 6(i)、(j)所示。平行排列液晶透镜与 pi-cell 液晶透镜均具有较小的上升时间,如图 6(i)所示,这是由于在液晶透镜的上升时间内施加了较高的驱动电压,提高了液晶分子转向的速度,pi-cell 液晶透镜由于液晶分子平均转角更小,具有更快的响应速度。而平行排列液晶透镜在下降时间过程中,透镜上下部分液晶分子流动趋势相反,造成中间层液晶分子正逆偏转,出现“回流效应”,如图 6(j)中圆点曲线中间凸起部分所示,导致响应时间变慢。pi-cell 液晶透镜上下部分液晶分子流动趋势相同,有效地避免了“回

流效应”,大幅度提高了液晶透镜的响应速度,如图 6(j)中方块曲线中未见凸起变化。

4 结 论

本文在传统平行排列模式电极液晶透镜的基础上,设计了模式电极 pi-cell 液晶透镜。采用简化的数值模拟方法研究了模式电极 pi-cell 液晶透镜的电压分布和光程差分布,提高了仿真计算速度,模拟仿真与实际器件的光程差分布相关性

较好。该仿真方法具有较高的精度,能够满足液晶透镜设计的需要,并依据仿真结果设计了模式电极 pi-cell 液晶透镜在保持全盒处于 pi-cell 状态下的驱动条件(电压 21 V,频率 12~20 kHz)。模式电极 pi-cell 液晶透镜光程差分布与理想光程差分布一致性较好,具有良好的成像效果,焦距变化范围为 30.3 cm 到无穷远。同时模式电极 pi-cell 液晶透镜的响应时间是 136 ms,较参数相近的平行排列液晶透镜减少了 368 ms,响应速度显著提高。

参 考 文 献:

- [1] REN H W, WU J R, FAN Y H, *et al.* Hermaphroditic liquid-crystal micro lens [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30: 376-378.
- [2] SATO S. Liquid crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, 18:1679-1684.
- [3] NAUMOV A F, LOVE G D, LOKTEV M Y, *et al.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses [J]. *Opt. Express*, 1999, 4:344-352.
- [4] PISHNYAK O, SATO S, OLEG D. Electrically tunable lens based on a dual-frequency nematic liquid crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45:4576-4582.
- [5] SCHADT M. Dielectric heating and relaxations in nematic liquid crystals [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1981, 66: 319-336.
- [6] REN H, FAN Y H, LIN Y H, WU S T. Tunable-focus microlens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets [J]. *Opt. Commun.*, 2005, 247:101-106.
- [7] CHEN M, LIN Y H, CHEN H S, *et al.* Electrically assisting crystal growth of blue phase liquid crystals [J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 4:953-959.
- [8] WITTEK M, TANAKA N, WILKES D, *et al.* New materials for polymer-stabilized blue phase[J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2012, 43:25-28.
- [9] BOS P J, KOEHLER/BERAN K R. The Pi-cell: A fast liquid-crystal optical-switching device [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1984, 113:329-333.
- [10] ACOSTA E J, TOWLER M J, WALTON H G, The role of surface tilt in the operation of pi-cell liquid crystal devices [J]. *Liq. Cryst.*, 2000, 27:977-984.
- [11] SCHEFFER T J, NEHRING J. Accurate determination of liquid-crystal tilt bias angles [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48, 1783-1792.
- [12] YEUNG F S, LI Y W, KWOK H S. Pi-cell liquid crystal displays at arbitrary pretilt angles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:041108.
- [13] PHILIP J W H, ANDREW K K, GORDON D L. Adaptive modally addressed liquid crystal lenses [J]. *Edin. Res. Exp.*, 2004, 5518:136-143.
- [14] NAUMOV A F, LOKTEV M Y. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23: 992-994.
- [15] 张志东,邵喜斌,梁兆颜,等.电控双折射盒中指向矢分布的计算[J].液晶与显示,1997, 12(2): 91-99.
ZHANG Z D, SHAO X B, LIANG Z Y, *et al.* Calculation of director distribution in electronically controlled birefringence box [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 1997, 12(2): 91-99.(in Chinese)
- [16] YE M, SATO S. Liquid crystal lens with focus movable along and off axis [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 225: 227-280.

作者简介:



肖 奇(1993—),男,吉林延边人,硕士,2019年于大连海事大学获得硕士学位,主要从事光学与显示技术方面的研究。E-mail: xq4130@126.com



于 涛(1971—),男,黑龙江七台河人,博士,教授,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学与显示技术方面的研究。E-mail: yutao@dlmu.edu.cn