

文章编号: 1001 - 9014(2009)06 - 0428 - 04

# 一种新型液晶透镜的光学成像特性研究

李 晖, 张新宇, 张天序, 沈绪榜

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 多谱信息处理技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**在前人的单圆孔电极液晶透镜的基础上进行了改进,使用聚酰亚胺取代玻璃作为绝缘层,得到了通光孔径为 2mm、工作电压最低为 1.1V<sub>ms</sub> 的新型液晶透镜. 结合几何光学和液晶理论提出了不同于前人解释液晶透镜原理的模型,推导出该液晶透镜的焦距公式以及相位延迟公式. 在 1.1~20V<sub>ms</sub> 电压范围内测试,得到与公式计算值基本一致的该液晶透镜的焦距范围 20~480mm. 重点研究了该液晶透镜的调制传递函数 (MTF),发现该液晶透镜的光学成像能力与控制电压成正比关系,随着电压的增大该液晶透镜的成像性能逐渐增强.

**关键词:**液晶透镜;自适应光学;调制传递函数 (MTF)

**中图分类号:** TP211+.6 **文献标识码:** A

## OPTICAL IMAGING CHARACTERISTICS OF A NEW LIQUID CRYSTAL LENS

LI Hui, ZHANG Xin-Yu, ZHANG Tian-Xu, SHEN Xu-Bang

(Multi-spectral information processing technologies National Defense Science and Technology Laboratory, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new circular hole pattern electrode liquid crystal (LC) lens was proposed, which used the polyimide film to replace the glass as an isolation layer. This LC lens has a 2mm clear aperture, and it can operate at as low as 1.1V<sub>ms</sub> controlled voltage. A model, for which the explanation of LC lens was different from the traditional one, was proposed by combining geometrical optics with the theory of LC. Then the theoretical formulas of focal length and phase retardation were obtained. The focal length is from 20mm to 480mm tested in the range from 1.1V<sub>ms</sub> to 20V<sub>ms</sub>, the value of which is close to the theoretical value. The modulation transfer function of LC lens was also studied. It is found that the imaging characteristics are proportional to the controlled voltage. As the voltage increases, the imaging characteristics also enhance.

**Key words:** liquid crystal lens; adaptive optics; modulation transfer function (MTF)

### 引言

液晶具有较大的光电各向异性,是极佳的光电材料.目前,已经广泛地应用于制作各类光学器件,如液晶显示器、液晶透镜、液晶相位延迟器以及液晶滤波器.使用液晶制作光学器件的特点在于制作的器件体积小、结构紧凑和可以电控调谐,因此液晶是制作小型自适应光学器件的极佳材料.液晶透镜是继液晶显示器后又一研究热点,最早于 1979 年由日本科学家 Satō<sup>[1]</sup>提出并实现.液晶透镜在经过近 30 年的发展后,形成了多种类型,如单圆孔电极液晶透镜<sup>[2,3]</sup>、模式电极液晶透镜<sup>[4]</sup>以及浮雕外形液晶透镜<sup>[5]</sup>等.其中,单圆孔电极液晶透镜特点突出,

原因在于电极结构简单容易形成梯度电场分布.但是,在已有的单圆孔电极液晶透镜中,缺乏既具有较大通光孔径又具有较低工作电压的单圆孔电极液晶透镜,而且对单圆孔电极液晶透镜的光学成像特性也暂无深入的研究.

本文的工作是在前人单圆孔电极液晶透镜<sup>[2,3]</sup>的基础上改进而成的,使用聚酰亚胺取代玻璃作为绝缘层.与玻璃作为绝缘层相比,使用聚酰亚胺作为绝缘层后,外加电场由于减少了穿透绝缘层的消耗,可以以更强的电场加载于液晶层上面.对应电场消耗减少,通光孔径在增大同时仍可保持圆孔中心处有电场作用,使得通光孔径由微米量级提升到毫米量级.而且由于更强的电场作用于液晶层,使得液晶分子响应

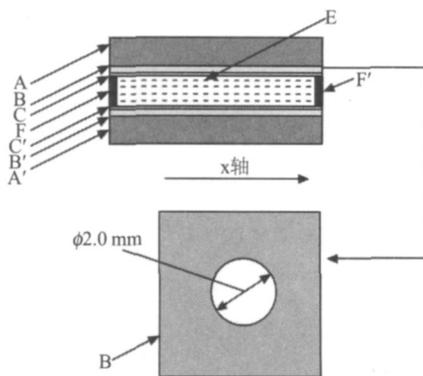


图1 液晶样品结构图  
Fig.1 The structure of LC cell

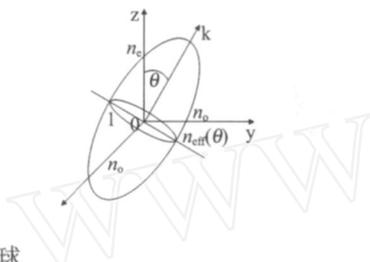


图2 折射率球  
Fig.2 Index ellipsoid

外加电场速度增快并且工作电压数值降低。

## 1 液晶透镜的结构

该液晶透镜的结构如图1所示,层A和层A'是玻璃,层B和层B'是ITO膜,层C和层C'是聚酰亚胺水平配向膜兼绝缘层,层E是液晶,F和F'是玻璃微球。其中层A和层A'的厚度为0.5mm,层B作为上电极,其上面有直径为2mm的圆孔电极图案,层B'是下电极,层C和层C'的厚度约为200nm,摩擦方向如图所示沿着水平x轴方向,层E是厚度为100μm的液晶(采用的是Merck公司的E44)。

## 2 液晶透镜理论模型

液晶是正单光轴的光电材料,具有分子的势能向最低状态变化,和外加电场强迫取向排列的特性。液晶分子势能最低的时候是当液晶分子的指向与外加电场场强方向一致的时候。图2是Fresnel提出的折射率球<sup>[6]</sup>,其中 $n_x = n_y = n_o$ ,  $n_z = n_e$  ( $n_e > n_o$ ), z轴是光轴(对称轴),k为光线方向,以k为法线的平面经过折射率椭圆球中心截出曲线l。下面将按照入射光k方向分别讨论液晶折射率特性。

若光线k平行于z轴入射时,则此时的曲线l为圆形,位于x-y平面,半径为 $n_o$ ,此时液晶折射率为 $n_o$ ;若光线k沿着x轴方向入射时,则此时曲线l为位

于y-z平面上的椭圆,其短轴为 $n_o$ ,而长轴为 $n_e$ ;若入射光k和z轴有夹角 $\theta$ 时,则此时曲线l为位于倾斜面上的椭圆,其短轴为 $n_o$ ,而长轴为 $n_{eff}$ ,公式为<sup>[6]</sup>

$$n_{eff}^2(\theta) = \frac{n_o^2 n_e^2}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

其中, $n_o$ 、 $n_{eff}(\theta)$ 、 $n_e$ 。

图3(a)为未加电场的情形,由于对液晶样品中聚酰亚胺层进行过水平摩擦,使得样品中的液晶分子都沿着x轴以角度 $2/3$ 排列,此时称为Homogeneous状态。下面根据液晶样品中不同区域来分析相应的折射率。

在液晶样品中心圆孔区域,电场在圆孔区域内,较弱电场场线分布较稀疏,如图3(b)所示。此时的液晶分子仍然保持原来Homogeneous状态,如图3(c)所示,表现出折射率为 $n_e$ 。在液晶样品圆孔边缘区域,此区域的电场分布为非均匀分布,此时液晶分子在电场和分子之间弹性力作用下发生转动,表现出折射率为 $n_{eff}(\theta)$ 。在液晶样品外围区域,此区域电场基本上是均匀分布,电场场线分布较密集如图3(b)中所示,液晶分子逐渐向势能最小的状态转换,直至当液晶分子垂直于ITO玻璃,势能最小时为止,如图3(c)所示,表现出折射率为 $n_o$ 。

根据上面的推理可以得到如图3(d)所示的液

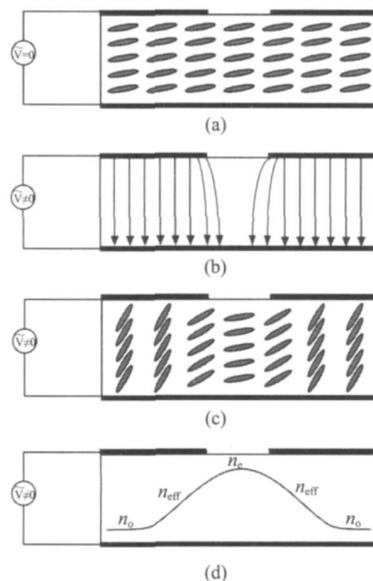


图3 (a)没有电压时液晶样品中的液晶分子排列示意图 (b)有电压时液晶样品中电场线分布图 (c)有电压时液晶样品中的液晶分子排列示意图 (d)液晶样品折射率分布图  
Fig.3 (a) LC director alignment of LC cell without controlled voltage (b) The electric field line of LC cell with controlled voltage (c) LC director alignment of LC cell with controlled voltage (d) Refractive index of LC cell

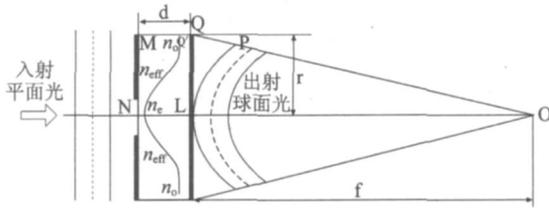


图 4 液晶透镜的 Grin Lens 原理图  
Fig 4 Grin lens of LC lens

晶样品折射率分布,该分布与 Grin 透镜的梯度折射率分布趋势一致,可以得知该液晶样品具有 Grin 透镜的特性。

为了进一步得到液晶透镜的焦距公式,假设平面波入射到液晶透镜,输出形成了球面波,产生了聚焦现象,如图 4 所示。

由等光程知:

$$MQ + QP = NL \quad (2)$$

其中,  $NL = n_{max} \cdot d, MQ = d \cdot n(r), QP = OQ - OP,$

$$OQ = \sqrt{QL^2 + LO^2} = \sqrt{r^2 + f^2}, QP = \sqrt{r^2 + f^2} - f$$

将上述式子代入式 (2) 得

$$n(r) \cdot d + \sqrt{r^2 + f^2} - f = n_{max} \cdot d \quad (3)$$

推导式 (3) 得到

$$f = \frac{r^2}{2(n_{max} - n(r)) \cdot d} \quad (4)$$

而相位变换函数  $\phi(x, y) = \frac{2}{\lambda} [MQ]$ , 其中,

$[MQ] = n(r) \cdot d$ , 从式 (4) 中得到  $n(r) = \left[ n_{max} - \frac{r^2}{2df} \right]$  并代入, 则

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \frac{2}{\lambda} \left[ n_{max} - \frac{r^2}{2df} \right] d \\ &= \frac{2}{\lambda} \left( 2d \cdot f \cdot n_{max} - \frac{r^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

在近光轴,理想光学薄透镜的相位变换函数<sup>[7]</sup>为  $\phi(x, y) = -\frac{2}{\lambda} \left( \frac{x^2 + y^2}{2f} \right)$ , 而液晶透镜的相位变换函数结构与其一致,从而验证了液晶透镜的光学聚焦能力。

### 3 实验与结果讨论

为了验证上述理论模型和测试该液晶透镜的特性,设计了如下三组实验并对得到的实验结果分别进行了讨论。

首先,建立了如图 5 所示的实验装置,其中 A 处的光源使用的是波长为 633nm 的 He-Ne 激光器,

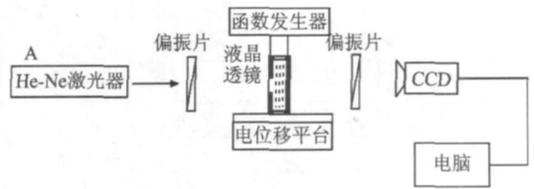


图 5 测试实验装置图  
Fig.5 Set up of experiments

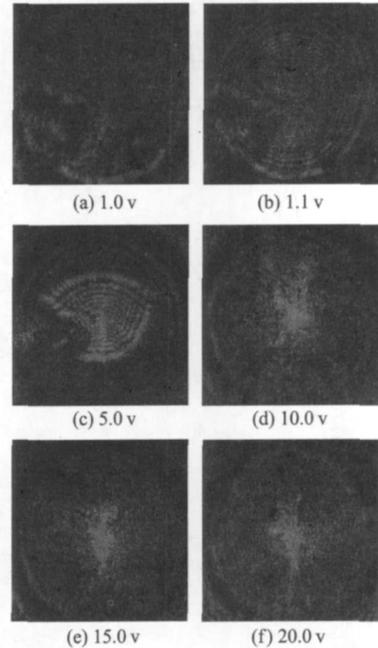


图 6 不同电压下的干涉图  
Fig.6 Interference patterns at different voltages

在实验当中使用了两个偏振片,两个偏振片的夹角为 45°。液晶透镜放在中间,使用频率为 1kHz 的电压进行控制,使用 CCD 来获取图像,得到的干涉图案见图 6 所示。结合液晶透镜相位延迟公式 (5) 分析可知,在大电压的情况下折射率  $n$  更大,相应相位延迟  $\phi(x, y)$  也更大。从图 6 (b) 中还可以发现,在 1.1V<sub>ms</sub> 低电压下,液晶透镜便有了干涉条纹现象。这是由于使用了聚酰亚胺层代替玻璃层作为绝缘层,这与前人已经提出的液晶透镜相比,工作电压可以由几十伏降至 1.1V<sub>ms</sub>。

其次,在不同电压下测量得到了液晶透镜的焦距与电压的关系图如图 7 所示。根据焦距公式 (4) 知,在电压高于 20V<sub>ms</sub> 后,液晶透镜折射率  $n$  较大,产生的焦距  $f$  较小,不便于准确测量,那么测试电压最高值取为 20V<sub>ms</sub>。根据焦距公式 (4),将  $r = 1\text{mm}, d = 100\mu\text{m}, n = 0.255 (n_e = 1.778, n_o = 1.523)$  代入,得到理论计算的焦距值  $f$  为 19.6mm,这个数值与实验测量得到的数值 20mm 十分吻合。从图 7 中可以发现,

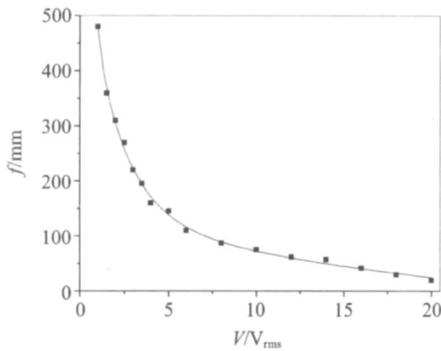


图7 液晶透镜的焦距与电压关系图  
Fig. 7 LC lens of focal length vs. voltages

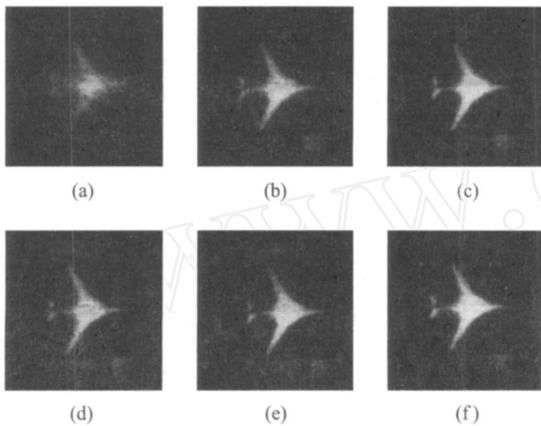


图8 不同电压下的透镜成像图(a)0V<sub>rms</sub>图像(b)2V<sub>rms</sub>图像(c)5V<sub>rms</sub>图像(d)10V<sub>rms</sub>图像(e)15V<sub>rms</sub>图像(f)20V<sub>rms</sub>图像  
Fig. 8 The lens imaging at different voltages (a)0V<sub>rms</sub> image (b)2V<sub>rms</sub> image (c)5V<sub>rms</sub> image (d)10V<sub>rms</sub> image (e)15V<sub>rms</sub> image (f)20V<sub>rms</sub> image

焦距与电压的关系成反比例,电压越大而相应焦距越小,这与液晶透镜电压控制折射率变化是一致的。

最后,对干涉实验装置进行改动变为成像实验装置。将A处的He-Ne激光器换为打印带有图片的纸张,将两个偏振片去除,其余保持不变。进行了一

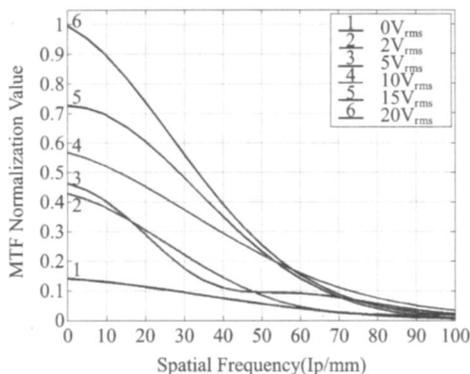


图8 (g)液晶透镜 MTF图  
Fig 8 (g)MTF of LC lens

组对比实验,得到了不同电压下的液晶透镜成像图8(a)~(f)。为了准确地衡量并分析这个现象,使用调制传递函数(MTF)来定量评价所得到的图像质量。国内外通用的得到MTF的方法<sup>[8]</sup>除了专门设备测试外,一般使用的是刀刃法和脉冲法。本文通过刀刃法得到在0、2、5、10、15及20V<sub>rms</sub>下的MTF曲线。在图8(g)中,可以看出在同一个频率下,不同电压对应的MTF值是不同的,电压大的时候的数值比电压小的时候要更加大一些;电压大的时候液晶透镜的光学成像能力比电压低时候的光学成像能力有所提升。随着电压的增加,从图8(g)上可以看出MTF值在逐渐增加,即液晶透镜的成像能力在逐渐增强,还可以发现在10V<sub>rms</sub>以上MTF曲线有效空间频率中所对应的数值基本都大于0.5。

#### 4 结论

本文在前人设计单圆孔电极液晶透镜的基础上进行改进,将聚酰亚胺层取代玻璃层作为绝缘层,设计出通光孔径达2mm最低控制电压达1.1V<sub>rms</sub>的液晶透镜。并使用几何光学推导出不同于以往解释液晶透镜的理论模型,也借助MTF函数重点研究和讨论了该液晶透镜的光学成像能力。该液晶透镜的最大特点在于电控变焦和电控调谐光学成像能力,其中测量的焦距范围为20~480mm而MTF值可以达到0.5以上,足够满足取代许多传统光学透镜工作的需求。

#### REFERENCES

- [1] Sato S. Liquid crystal lens cells with variable focal length [J]. *Jpn J. Appl Phys*, 1979, **18**(9): 1679—1684.
- [2] Ye M, Wang B, Sato S. Liquid crystal lens with focus movable in focal plane [J]. *Opt Commun*, 2006, **259**(2): 710—722.
- [3] Ye M, Sato S. Optical properties of liquid crystal lens of any size [J]. *Jpn J. Appl Phys*, 2002, **41**(6A): L 571—L 573.
- [4] Naumov A F, Loktev M Y, Guralnik I R, et al. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(13): 992—994.
- [5] Wang B, Ye M, Homma M, et al. Liquid crystal lens with spherical electrode [J]. *Jpn J. Appl Phys*, 2002, **41**(11A): L1232—L1233.
- [6] de Gennes P G. *The physics of Liquid crystals* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1974.
- [7] GUO Yong-Kang. *Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press (郭永康. 光学. 北京: 高等教育出版社), 2005.
- [8] Rauchmiller R F, Schowengerdt R A. Measurement of Landsat thematic mapper modulation transfer function using an array of point sources [J]. *Opt Eng*, 1988, **27**(4): 334—343.