

大变焦范围电调谐液晶变焦透镜的研究

尹向宝 刘永军 张伶莉 吕月兰 霍泊帆 孙伟民

Liquid crystal lens with large-range electrically controllable variable focal length

Yin Xiang-Bao Liu Yong-Jun Zhang Ling-Li Lü Yue-Lan Huo Bo-Fan Sun Wei-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于液晶和DSP的强光局部选通智能网络摄像系统研究

Study on the partial gating smart network camera for controlling strong light intensity based on DSP and liquid crystal

物理学报.2013, 62(21): 214210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214210>

楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究

Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell

物理学报.2013, 62(4): 044219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044219>

四光束干涉单次曝光构造含平面缺陷三维周期性微纳结构

Fabricating three-dimensional periodic micro-structure with planar defects via a single exposure

物理学报.2012, 61(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174211>

复合周期的介质-液晶光子晶体研究

Compound photonic crystals with cholesteric liquid crystals sandwiched isotropic defect layers

物理学报.2011, 60(3): 034213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.034213>

相变前的热力学平衡态对铁电液晶排列的影响

The influence of thermodynamic equilibrium state prior to the phase transition on the alignment of ferro-electric liquid crystal

物理学报.2010, 59(9): 6261-6265 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.6261>

## 大变焦范围电调谐液晶变焦透镜的研究\*

尹向宝<sup>1)2)</sup> 刘永军<sup>1)†</sup> 张伶俐<sup>3)</sup> 吕月兰<sup>1)</sup> 霍泊帆<sup>2)</sup> 孙伟民<sup>1)</sup>

1) (哈尔滨工程大学, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (黑龙江科技大学理学院, 哈尔滨 150022)

3) (哈尔滨工业大学理学院, 哈尔滨 150001)

(2014年12月24日收到; 2015年4月24日收到修改稿)

基于向列相液晶指向矢随施加电场作用发生变化的特性, 结合几何光学和液晶理论提出了一种液晶透镜结构模型, 研究了电极大小、隔垫物厚度等液晶透镜参数对液晶透镜焦距的影响. 通过优化参数, 得到结构简单、变焦范围较大的新型液晶透镜样品, 在驱动电压  $0\text{ V}_{\text{RMS}}\text{--}250\text{ V}_{\text{RMS}}$  下可调的焦距范围为  $75\text{--}230\text{ mm}$ , 达到  $155\text{ mm}$ .

关键词: 向列相液晶, 可变焦距, 透镜

PACS: 42.70.Df, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.64.184212

## 1 引言

液晶分子经取向后可以引起较大的光学各向异性, 是极佳的电光材料, 已经应用在各种液晶显示器上. 由于向列相液晶电控双折射以及液晶分子空间分布随外加电场变化而改变的电学特性, 其还在液晶透镜<sup>[1]</sup>、液晶激光器<sup>[2,3]</sup>以及液晶滤波器<sup>[4]</sup>、液晶空间光调制器等<sup>[5]</sup>多种可调谐光学器件方面有潜在的应用.

电调谐液晶变焦透镜的研究起始于20世纪70年代, 1979年日本科学家Sato<sup>[6]</sup>提出并完成首个电控液晶透镜. 文献<sup>[7—9]</sup>研究了用聚合物液晶制作菲涅尔透镜, 从而降低控制电压, 并提高响应速度. 文献<sup>[10, 11]</sup>在前人研究的基础上对液晶透镜结构进行了改进, 将透镜的直径做到  $4.5\text{ mm}$ , 在电极之间加了玻璃层. 2010年, Mao等<sup>[12]</sup>利用孔状电极结构, 采用薄绝缘膜取代液晶层与上电极之间的其他基质, 从而降低了透镜的控制电压, 但该方法对薄绝缘膜的制作工艺要求比较高. 2012年, Li

和Jiang<sup>[13]</sup>采用圆筒结构的设计方法, 制作了一种电润湿可调透镜. 2014年, Lin等<sup>[14]</sup>通过三层复合液晶结构实现了正负透镜效果, 但是结构复杂并且电压不易控制. 2015年, Hassanfiroozi等<sup>[15]</sup>采用凸面六角电极液晶微透镜阵列, 降低了驱动电压, 并且使焦距减低至  $250\text{ mm}$ . 但对于单圆孔电极结构, 在电压  $20\text{ V}_{\text{RMS}}\text{--}180\text{ V}_{\text{RMS}}$  调谐时变焦范围为  $80\text{ mm}$ <sup>[16]</sup>, 变焦范围较小, 仍然不能令人满意. 单圆孔电极的另一个基板通常为方形电极, 本文提出同轴圆盘-圆环电极结构, 改进了此方形电极不能形成理想的圆对称锥形场的问题, 通过同轴圆盘-圆环电极的设计可以较为灵活地控制圆对称场的尺寸及场的分布. 如图2所示, 本文设计的电场在相同的电压下, 在电极边缘处可以产生更大场强, 这样通过上下基板的控制实现更短的焦点汇聚, 从而可以实现更大的调焦范围. 通过优化盒厚、电极尺寸等结构参数, 得到制作工艺简单、变焦范围较大的液晶透镜结构, 变焦范围达到  $155\text{ mm}$ , 很好地实现了电场调谐特性.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61107059, 61077047, 61308052, U1531102)、高等学校学科创新引智计划(批准号: B13015)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(批准号: 12511493)和黑龙江省自然科学基金(批准号: QC2015069)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

## 2 样品结构参数设计与电场建模仿真

### 2.1 样品制备

液晶透镜样品的制备选用厚度为 1.1 mm 的镀有氧化铟锡 (ITO) 导电薄膜的玻璃, 利用盐酸腐蚀

法及掩膜技术对上下极板 ITO 电极做圆盘-圆环图案处理, 并在电极侧旋涂上聚酰亚胺 (PI) 取向膜, 进行摩擦取向处理后, 将两基板的摩擦方向呈反平行排列制作出样品空盒, 利用隔垫物对液晶层厚度进行控制, 如图 1 所示, 图 1 (a) 为样品结构图, 图 1 (b) 为样品俯视图。

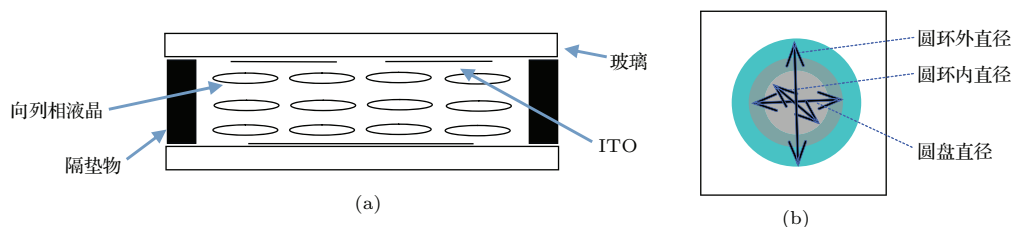


图 1 液晶透镜样品结构图 (a) 样品结构图; (b) 样品俯视图

Fig. 1. The device structure of the liquid crystal lens: (a) Side view of cell; (b) top view of cell.

实验所用的液晶为北京八亿时空液晶科技股份有限公司生产的向列相液晶 (BHR33200), 常温下  $n_o = 1.522$ ,  $n_e = 1.692$ ; 弹性常数为  $K_{11} = 6.0 \times 10^{-12}$ ,  $K_{33} = 8.4 \times 10^{-12}$ ; 介电常数为  $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}$ ,  $\varepsilon_{\perp} = 7.0\varepsilon_o$ ,  $\varepsilon_{//} = 18.5\varepsilon_o$ ,  $\Delta\varepsilon = 11.5\varepsilon_o$ . 圆盘半径分别为 3, 4, 5 mm; 圆环内外半径分别为 2—4 mm, 3—5 mm, 2—6 mm.

### 2.2 电场建模仿真

根据电磁场原理, 电场  $E$  可以表示为

$$E = -\nabla V, \quad (1)$$

其中,  $V$  为两电极之间的电势.

根据 Maxwell 电磁场方程:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \cdot E) = 0, \quad (2)$$

同时考虑液晶在被定向之前在两个电极之间电场的分布, 得到表示静态场域中电位  $\varphi$  分布的拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

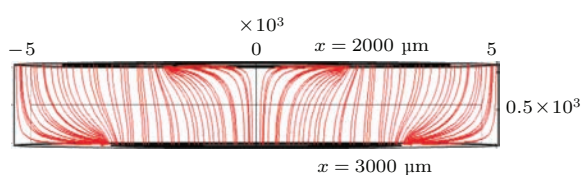


图 2 100 V<sub>RMS</sub> 电压下液晶样品电场强度分布图

Fig. 2. The electric field intensity of the liquid crystal lens cell under 100 V<sub>RMS</sub>.

将坐标原点定在液晶层圆盘处正中间的位置,  $z$  轴为盒厚方向, 由 (3) 式可得到液晶层电势随着液晶层不同位置的分布图, 用 comsol 软件模拟做出液晶样品在加电压时的电场线分布, 如图 2 所示. 可以看出, 加电压时液晶样品中心区域内电场较弱, 电场线较稀疏; 在样品圆盘-圆环交界处电场较强, 电场线较密集.

在给定的边界条件下, 采用有限元差分法推导, 得到任意盒厚下的液晶指向矢分布<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned} & (K_{11} \cos^2 \theta(z) + K_{33} \sin^2 \theta(z)) \frac{d^2 \theta(z)}{dz^2} \\ & + (K_{33} - K_{11}) \sin \theta(z) \cos \theta(z) \left( \frac{d\theta(z)}{dz} \right)^2 \\ & + \varepsilon_o \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta(z) \cos \theta(z) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\theta(z)$  为液晶与基板平面的倾角,  $z \in (0, d)$ ,  $d$  为液晶层厚度.

由 (4) 式求取积分得通解

$$\theta(z) = \pm \frac{z * E(z) \sqrt{11.5 \varepsilon_o (k_{11} - k_{33})}}{k_{11} - k_{33}}. \quad (5)$$

液晶透镜的焦距可以由下式计算<sup>[18]</sup>:

$$f = \frac{r^2}{2d\delta n}, \quad (6)$$

其中,  $r$  为液晶透镜半径,  $\delta n$  为透镜边界和中心之间的有效折射率差, 有

$$\delta n = \frac{1}{d} \int_0^d n_{\text{eff}} dz - n(0),$$

其中  $n(0) = n_o$ , 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  为

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta(z) + n_o^2 \sin^2 \theta(z)}}, \quad (7)$$

其中  $n_o \leq n_{\text{eff}} \leq n_e$ . 将(5)式得到的  $\theta(z)$  代入(7)式, 得到  $n_{\text{eff}}$ .

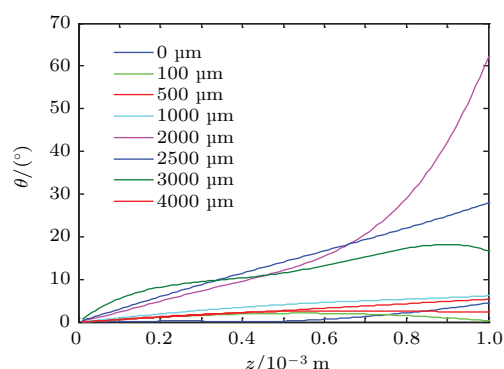


图3 (网刊彩色) 不同位置处液晶指向矢角度分布  
Fig. 3. (color online) Distribution of liquid crystal director at different positions.

根据(4)式可以得到外加电压  $100 \text{ V}_{\text{RMS}}$ , 盒厚  $1000 \mu\text{m}$  时不同位置处的  $\theta(z)$  随  $z$  的变化, 如图3所示. 可以看出, 在电极边界  $2000\text{--}3000 \mu\text{m}$  处由于电场强度较大, 由(5)式可知液晶指向矢角度  $\theta(z)$  在此处为最大.

### 3 实验

#### 3.1 测试光路

图4是实验装置示意图, 其中光源使用波长为  $633 \text{ nm}$  的 He-Ne 激光器, 在实验中使用两个偏振

片, 其夹角为  $90^\circ$ , 分别与液晶透镜呈  $45^\circ$ , 液晶透镜放在中间, 使用频率为  $50 \text{ Hz}$  的电压进行控制, 用电荷耦合器件 (CCD) 获取图像.

#### 3.2 液晶透镜的聚焦特性

采用图4的光路测试平台对样品聚焦进行研究, 通过调节可调液晶透镜、显微物镜、CCD 探测器三者之间的距离, 将液晶透镜与 CCD 之间的距离固定为  $30 \text{ cm}$ . 记录改变工作电压后 CCD 得到的相应干涉图像如图5所示, 由于是手工用盐酸将样品的 ITO 电极腐蚀剥离, 部分边缘有渗漏, 但不影响聚焦效果的测量. 可以看出, 在  $10 \text{ V}_{\text{RMS}}$  电压下液晶透镜出现干涉条纹现象, 可调透镜随着调控电压的增加, 聚焦效果明显增强,  $250 \text{ V}_{\text{RMS}}$  时聚焦明显. 结果表明, 通过改变电压能够对透镜的焦距进行有效调控.

在可调透镜前放一实物, 实物距离可调液晶透镜  $30 \text{ cm}$ , 通过可调透镜观察实物上面的字在不同驱动电压下的情况, 并用数码相机进行拍摄, 如图6所示. 可以看出不施加电压时红色圆圈(在电极边界处)内的文本图像模糊, 随着电压的增加, 红色圆圈内文本图像变得清晰, 红色圆圈外面的图像没有明显的改变.

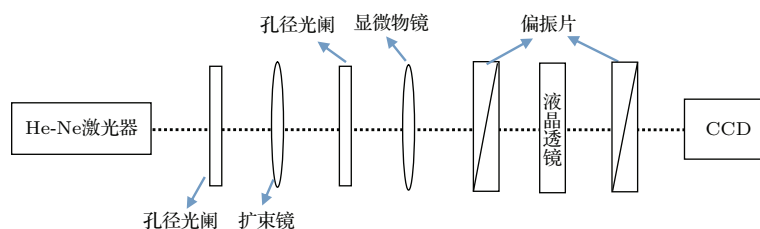


图4 液晶透镜聚焦特性测试装置图

Fig. 4. Experimental setup for studying the focusing properties of the liquid crystal lens.

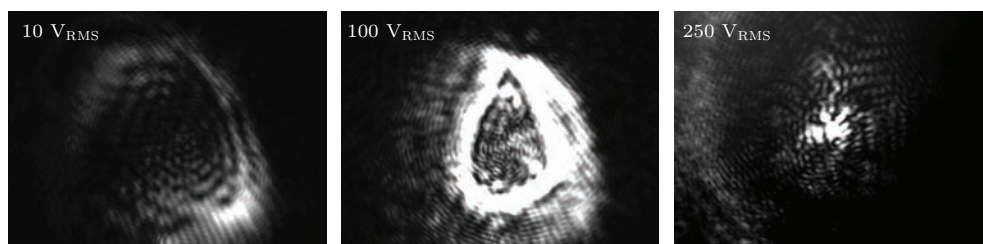


图5  $10 \text{ V}_{\text{RMS}}$ — $250 \text{ V}_{\text{RMS}}$  驱动电压下液晶透镜的干涉图

Fig. 5. Interference pattern of liquid crystal lenses form  $10 \text{ V}_{\text{RMS}}$  to  $250 \text{ V}_{\text{RMS}}$ .



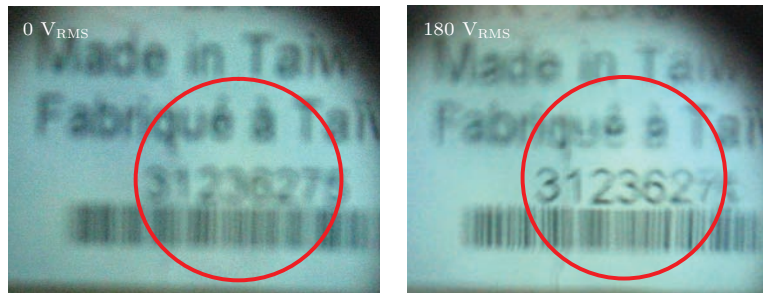


图6 (网刊彩色) 不同电压下液晶透镜成像效果图

Fig. 6. (color online) Images of the liquid crystal lens under different various voltages.

4 实验结果与讨论

对可调液晶透镜的调焦性能进行测试, 测量该透镜的焦距在不同电压下的变化情况, 对透镜参数进行优化.

4.1 电极尺寸大小对液晶透镜焦距的影响

由于电极的尺寸大小决定加载电场的分布, 不同的电场分布会导致液晶分子指向矢角度  $\theta(z)$  随  $z$  的变化, 由 (5) 式可知, 通过改变液晶分子指向矢角度  $\theta(z)$ , 可以改变有效折射率差, 从而改变液晶透镜的焦距. 由于同轴圆盘-圆环电极结构透镜的电场为锥形场, 电压在低于  $25\text{ V}_{\text{RMS}}$  时, 场强较弱, 未达到液晶的阈值电场, 光强能量分布较分散, 焦距无穷大, 透镜没有聚焦效果; 当增加电压至  $25\text{ V}_{\text{RMS}}$  时, 液晶开始对光有会聚作用, 光场能量分布较集中, 此时, 90% 的光场能量集中在光场中心的 1% 的面积上, 本文以此为标准, 确定长焦距焦点位置. 图 7 给出了液晶透镜在阈值电场前后的会聚效果图.

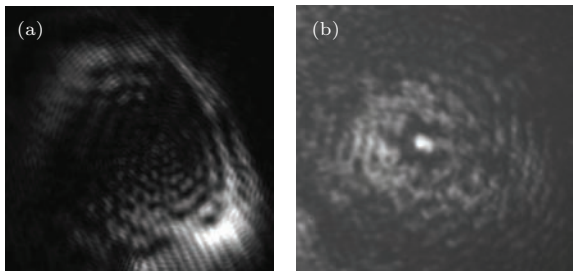


图7 液晶透镜的聚焦效果图 (a)  $10\text{ V}_{\text{RMS}}$ ; (b)  $25\text{ V}_{\text{RMS}}$   
Fig. 7. Focus of the liquid crystal lens: (a)  $10\text{ V}_{\text{RMS}}$ ; (b)  $25\text{ V}_{\text{RMS}}$ .

表 1 为制作的隔垫物厚度均为  $100\text{ }\mu\text{m}$  的圆盘-圆环不同半径液晶透镜盒, 测得了不同驱动电压下的焦距, 如图 8 所示.

得到最优化电极结构为圆环内半径  $3\text{ mm}$ 、外半径  $5\text{ mm}$ 、圆盘半径  $4\text{ mm}$ , 在驱动电压  $25\text{ V}_{\text{RMS}}$ — $250\text{ V}_{\text{RMS}}$  下可调的焦距范围为  $75$ — $230\text{ mm}$ , 达到  $155\text{ mm}$ .

表1 不同半径圆盘-圆环的液晶透镜盒  
Table 1. Liquid crystal lens with different disc-ring radius.

|           | 盒 1 | 盒 2 | 盒 3 | 盒 4 | 盒 5 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 圆盘半径/mm   | 2   | 3   | 4   | 4   | 4   |
| 圆环内圆半径/mm | 1   | 2   | 3   | 2   | 3.5 |
| 圆环外圆半径/mm | 3   | 4   | 5   | 6   | 4.5 |
| 焦距/mm     | 99  | 101 | 155 | 140 | 114 |

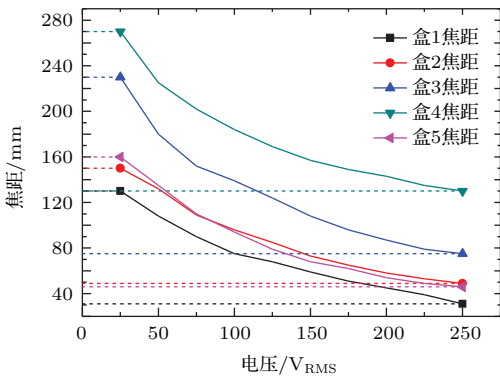


图8 (网刊彩色) 不同电压下不同半径的圆盘-圆环液晶透镜焦距  
Fig. 8. (color online) Focal lengths of liquid crystal lens with different disc-ring radius under various voltage.

4.2 隔垫物厚度对液晶透镜焦距的影响

圆环内半径  $3\text{ mm}$ 、外半径  $5\text{ mm}$ 、圆盘半径  $4\text{ mm}$  电极结构下, 隔垫物厚度分别为  $100\text{ }\mu\text{m}$  (盒 3),  $200\text{ }\mu\text{m}$  (盒 6),  $300\text{ }\mu\text{m}$  (盒 7) 的液晶透镜盒 (如表 2), 实验测得不同驱动电压下液晶透镜的焦距, 如图 9 所示. 通过以上数据分析可以看出, 液晶透镜隔垫物厚度  $100\text{ }\mu\text{m}$  时, 液晶透镜的电压调焦范围较大.

表2 不同隔垫物厚度的液晶透镜盒

Table 2. Liquid crystal lens with different thickness of spacers.

|                      | 盒3  | 盒6  | 盒7  |
|----------------------|-----|-----|-----|
| 隔垫物厚度/ $\mu\text{m}$ | 100 | 200 | 300 |
| 焦距/mm                | 155 | 138 | 136 |

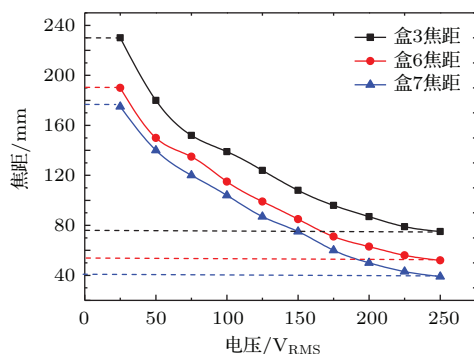


图9 (网刊彩色) 不同厚度液晶透镜的焦距

Fig. 9. (color online) Focal lengths of liquid crystal lens with different thickness.

## 5 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, 设计出同轴圆盘-圆环电极结构的液晶透镜, 并采用有限元差分法进行数值模拟, 得到任意盒厚下的液晶指向矢角度分布, 通过对电场模拟仿真, 得到液晶层电场强度随着液晶层不同位置的分布图, 并得到液晶指向矢角度 $\theta(z)$ 随 $z$ 的变化. 对可调透镜的调焦性能进行了测试, 对透镜参数进行优化, 获得的最优化样品参数为: 电极结构圆环为内半径3 mm、外半径5 mm、圆盘半径4 mm, 盒厚100  $\mu\text{m}$ , 在驱动电压为0  $V_{\text{RMS}}$ —250  $V_{\text{RMS}}$ 测量的焦距范围为75—230 mm, 达到155 mm.

## 参考文献

- [1] Ren H W, Fan Y H, Gauza S, Wu S T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4789
- [2] Liu Y J, Sun W M, Liu X Q, Yao L S, Lu X H, Xuan L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114211 (in Chinese) [刘永军, 孙伟民, 刘晓顺, 姚丽双, 鲁兴海, 宣丽 2012 物理学报 **61** 114211]
- [3] Dai Q, Li Y, Wu R N, Geng Y, Quan W, Li Y Q, Peng Z H, Yao L S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044219 (in Chinese) [岱钦, 李勇, 乌日娜, 耿岳, 全薇, 李业秋, 彭增辉, 姚丽双 2013 物理学报 **62** 044219]
- [4] Beeckman J, Neyts K, Vanbrabant J M 2011 *Opt. Eng.* **50** 081202
- [5] Liu X, Zhang J, Wu L Y, Gan Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 024211
- [6] Sato S 1979 *Appl. Phys.* **18** 167
- [7] Ren H W, Wu S T 2006 *Opt. Express*. **14** 11292
- [8] Schulein R, Daneshpanah M, Javidi B 2009 *Opt. Lett.* **34** 2012
- [9] Shin D, Cho M, Javidi B 2010 *Opt. Lett.* **35** 3646
- [10] Mao Y, Wang B, Kawamura M, Sato S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **46** 6776
- [11] Tang X Z, Zhong D Z, Jian Y X, Lu J G, Xie H P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164212 (in Chinese) [唐先柱, 钟德镇, 简廷宪, 陆建钢, 谢汉萍 2013 物理学报 **62** 164212]
- [12] Mao Y, Bin W, Masaru U, Satoshi Y, Shingo T, Maki Ya, Susumu S 2010 *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** 100204
- [13] Li C H, Jiang H R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 231105
- [14] Chen M S, Chen P J, Chen M, Lin Y H 2014 *Opt. Express* **22** 011427
- [15] Hassanfiroozi A, Huang Y P, Javidi B, Shieh H P 2015 *Opt. Express* **23** 000971
- [16] Che J H, Shen C R 2012 *Opt. Express* **20** 4738
- [17] Wang Q, He S L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 926 (in Chinese) [王谦, 何赛灵 2001 物理学报 **50** 926]
- [18] Guo Y K 2005 *Optics* (Beijing: Higher Education Press) p236 (in Chinese) [郭永康 2005 光学 (北京: 高等教育出版社) 第236页]

# Liquid crystal lens with large-range electrically controllable variable focal length<sup>\*</sup>

Yin Xiang-Bao<sup>1)2)</sup> Liu Yong-Jun<sup>1)†</sup> Zhang Ling-Li<sup>3)</sup> Lü Yue-Lan<sup>1)</sup>  
Huo Bo-Fan<sup>2)</sup> Sun Wei-Min<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (College of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

3) (College of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

( Received 24 December 2014; revised manuscript received 24 April 2015 )

## Abstract

A novel structure model with different disc-ring radii of liquid crystal lens is proposed, in which liquid crystal director could be controlled by changing the electric field intensity dependence. Then the theory of liquid crystal and the geometric optics are analyzed. By using the finite element method, under the same constant voltage, we obtain the distributions of the electric field intensity at different positions of the liquid crystal layer. Then, the simulation results provide a theoretical guideline for the experimental fabrication. Due to the fact that the electric field intensity at the electrode edges is stronger than that at the circular hole, a shorter focal convergence could be realized by controlling the voltage between the upper and the lower substrates. In this paper, the influences of the electrode size and spacer thickness on the focal length of liquid crystal lens are also discussed experimentally and theoretically. Through optimizing various parameters, a prototype liquid crystal lens with a large zoom range and simple structure is obtained. Its focal length can be controlled to be 75–230 mm in a range of 25  $V_{\text{RMS}}$ –250  $V_{\text{RMS}}$ .

**Keywords:** liquid crystal, variable focus, lens

**PACS:** 42.70.Df, 42.65.Jx

**DOI:** 10.7498/aps.64.184212

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107059, 61077047, 61308052, U1531102), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. B13015) and the Science and Technology Research Project of Education Bureau of Heilongjiang Province, China (Grant No. 12511493), and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. QC2015069).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn