

doi: 10.3788/gzxb20144304.0423005

连续变焦的聚合物分散液晶电控透镜

桂坤, 郑继红, 王雅楠, 张梦华, 王康妮, 唐子辰, 卜婷

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 教育部光学仪器与系统工程研究中心;
上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘 要:介绍了一种基于聚合物分散液晶材料的连续调焦电控透镜. 在聚合物分散液晶盒的上表面电极上刻蚀圆孔, 形成一个非对称电极, 在液晶盒上下极板之间, 诱发一个非均匀电场, 从而引起聚合物分散液晶材料的折射率非均匀分布, 形成电控变焦透镜. 阐述了聚合物分散液晶可调焦透镜的基本原理, 分析了透镜孔径对聚合物分散液晶透镜焦距的影响, 在直径 3 mm 和 6 mm 的圆孔条件下, 分别测量了透镜焦距随电压的变化关系. 结果表明: 电压从 50 V 加到 170 V 的过程中, 透镜焦距逐渐减短, 刻蚀 3 mm 圆孔的聚合物分散液晶盒焦距从 1.361 63 m 到 0.429 21 m, 刻蚀 6 mm 圆孔的聚合物分散液晶盒焦距从 1.769 92 m 到 0.548 43 m.

关键词:光学材料; 透镜; 液晶聚合物; 聚合物分散液晶; 连续变焦; 电控透镜 非对称电极

中图分类号: O469

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0423005-5

Electrically Controlled Continuously Focusing Lens Based on Polymer Dispersed Liquid Crystal

GUI Kun, ZHENG Ji-hong, WANG Ya-nan, ZHANG Meng-hua,
WANG Kang-ni, TANG Zi-chen, BU Ting

(*Engineering Research Center of Optical Instrument and System of Ministry of Education; Shanghai Key Lab of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: An electrically controlled continuously focusing lens was introduced based on Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC). Etching a hole on the upper surface of the electrode attaching to the PDLC cell to form an asymmetric electrode, a non-uniform electric field was induced. Then the non-uniform distribution of the refractive index in the PDLC cell was generated and a controlled zoom lens was formed. The basic principle of the focusing lens was also introduced, the effects of the lens aperture on the focal length of the PDLC lens were analyzed, and the relation between the focal length and voltage was measured with the diameter of 3 mm and 6 mm respectively. The results show that, with voltage ranging from 50 V to 170 V, the focal length of the PDLC lens was reduced from 1.361 63 m to 0.429 21 m in the diameter 3 mm or from 1.769 92 m to 0.548 43 m in the diameter 6 mm of the hole.

Key words: Optical materials; Lenses; Liquid crystal polymers; Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC); Continuous zoom; Electrically controlled lens; Non-uniform electrode

OCIS Codes: 230.2090; 050.1965; 080.3630; 160.2100

基金项目:上海市重点学科项目第三期项目(No. S30502)、上海市研究生创新基金项目(No. JWCXSL1202)、上海市人才发展基金(No. 2012026)、上海市教委重点科研创新项目(No. 14ZZ138)和大学生创新创业训练计划(No. XJ2013070)资助

第一作者:桂坤(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为聚合物分散液晶电光器件的理论建模及实验. Email: guikun2007@163.com

导师(通讯作者):郑继红(1975-),女,教授,博士,主要研究方向为聚合物分散液晶材料及电光器件、信息光学等. Email: jihongzheng@sina.com

收稿日期:2013-07-22; **录用日期:**2013-10-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,液晶材料一直处于热门的研究领域,从液晶显示领域及其取向性研究^[1-2]到利用液晶材料制作新型光子晶体^[3]等.光学透镜作为一种液晶显示材料被广泛应用于自然科学、工业技术和日常生活中.可调焦透镜技术的应用比较广,如用可调焦眼镜片来矫正视觉,在摄像机中构成快速非机械透镜组^[4-5],并用于裸眼立体显示^[6-7].可调焦液晶微透镜由日本科学家 Sato^[8]在 1979 年首次提出, Nose 等^[9]在 1989 年提出了单圆孔电极的液晶微透镜,1999 年 Naumovaf 等提出球型灌注式液晶微透镜^[10].这种透镜有两种制作方式,一是通过改变材料的厚度,二是改变光束的折射率分布.向列相液晶透镜始于 20 世纪 70 年代,设计是基于用两基底的导电电极控制不同厚度液晶单元的指向矢.后又设计了用固定厚度的液晶单元,通过加在不同形式电极上的电场定址来实现折射率指数的非均匀分布.2012 年 Milton 等^[11]提出折射型液晶透镜,这种透镜调控电压低,能够实现折射率的优化. Che Ju Hsu 和 Chia Rong Sheu 用光聚合的方式制作可调焦的同轴透镜^[12],能够随着电压的改变实现连续调焦.

本文利用聚合物分散液晶 (Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC) 作为可调焦液晶透镜的材料,聚合物分散液晶是由聚合物单体和液晶组成的混合物,这种混合物在光照下会发生聚合反应,形成聚合物分散液晶微滴,微滴的尺寸大小达到纳米级^[13],PDLC 微滴的光轴取向在饱和电场作用下沿电场方向排列,在挖孔的非对称电极中,圆孔区域形成的非均匀电场使得在不同位置材料的折射率不同,因此在有光通过 PDLC 材料时,圆孔中心和边缘会产生一定的光程差,最终会产生透镜聚焦的特性.而且 PDLC 微滴在施加电压的情况下会有很快的调控速度.

1 连续变焦 PDLC 电控透镜的制作和基本原理

连续变焦 PDLC 电控透镜原理如图 1、2. 制备步骤为:1)准备好两片 ITO(氧化铟锡)导电玻璃($14 \times 14 \text{ mm}^2$),其中一片 ITO 导电玻璃的表面刻蚀有直径为 $\varphi=3 \text{ mm}$ 或 6 mm 的圆;2)把聚合物和液晶均匀混合后(混合物由预聚物 EB8301 ($n_p=1.49$) (UCB)、TEB300 液晶(北京清华亚王), ($\Delta n=0.168$, $n_e=1.679$, $n_o=1.511$)、光引发剂 Rose Bengal (Aldrich 公司提供)、协引发剂 N-phenyl glycine (Aldrich)、交联剂 N-vonyl pyrrolidone (Aldrich)、表面活性剂 S-271 (Chemistry)六种物质按照质量比为 100:100:0.2:0.5:20:30 混合而成),在避光条件下用超声乳化仪混合加热均匀,在暗室中静置 24~48 h 后,制得聚合

物分散液晶材料.将其填充到镀有 ITO 导电膜的两片玻璃基板之间,控制间隔厚度为 $30 \mu\text{m}$.将制作好的液晶盒放在波长 532 nm 的激光器光场中曝光 50s,曝光功率为 24 mW/cm^2 .

在电场作用下,液晶盒中液晶微滴的光轴会逐渐向电场方向转动,使液晶的折射率发生变化.在外电场作用下,蚀孔的 ITO 导电膜形成的非对称电极会形成非均匀电场,而液晶材料的折射率在非均匀电场下呈非均匀分布,构成了折射率非均匀分布的透镜.图 1 为 PDLC 变焦透镜在未加电压情况下液晶微滴的随机分布,图 2 为在施加电压情况下液晶微滴按照电力线方向分布的 PDLC 透镜实现基本原理.

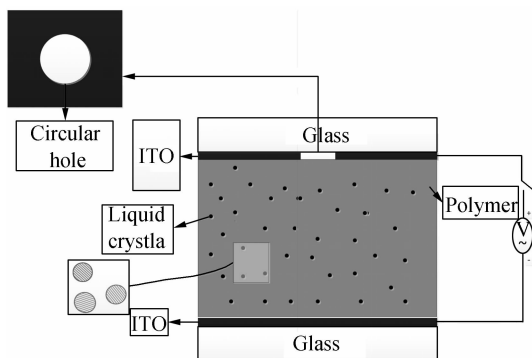


图 1 未加电压时聚合物分散液晶透镜的原理
Fig. 1 Diagram of PDLC lens without applied voltage

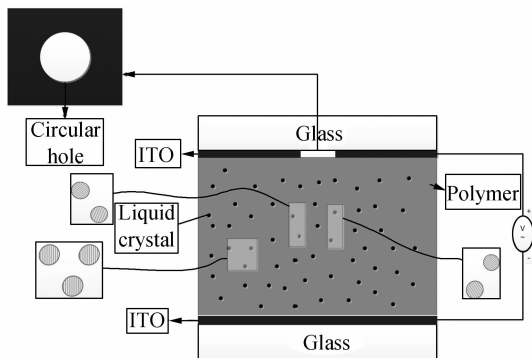


图 2 加电压时聚合物分散液晶透镜的原理
Fig. 2 Diagram of PDLC lens with applied voltage

利用 COMSOL 软件模拟出单圆孔非对称电极下的电势和电场分布,如图 3.由图可知,在圆孔区域内,电势很低;随着偏离圆孔,电势逐渐升高,电场呈类似分布.因此,在圆孔中心区域和非圆孔区域,由于电场强度的非均匀性,聚合物分散液晶的折射率也呈现非均匀分布.

当在非对称电极上施加一个交流电场时,圆孔中心材料受到弱电场,形成高折射率区,圆孔以外的区域受到强电场,形成低折射率区.假设光沿 Z 轴垂直穿过聚合物分散液晶盒时,光线产生汇聚现象,形成凸透镜效果.透镜的焦距公式^[14]为

$$f = \frac{r^2}{2\Delta n} \quad (1)$$

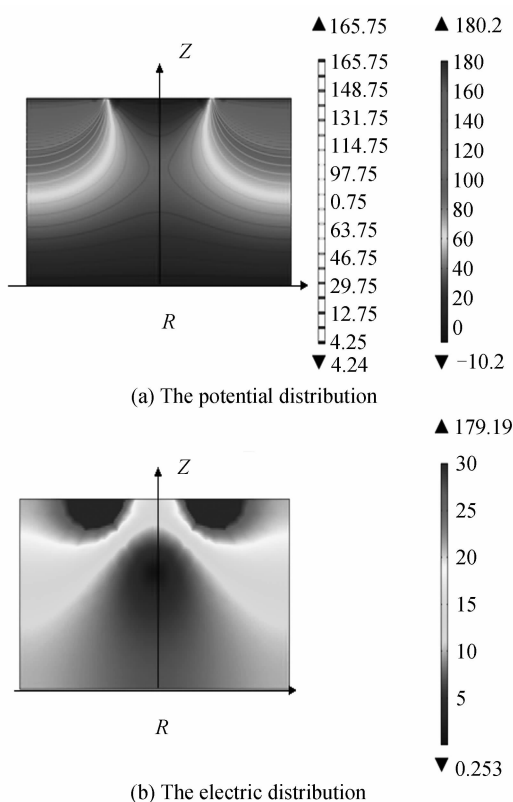


图3 加电压的情况下电场分布

Fig. 3 The potential and electric distribution of PDLC lens with external voltage

式(1)中 $\Delta n = n_0 - n_r$, n_0 为圆孔中心材料折射率, n_r 为圆孔边缘材料折射率, r 为圆孔半径, d 为聚合物分散液晶的厚度, f 为聚合物分散液晶透镜的焦距. 从式(1)中可以看出, 减小圆孔的孔径, 增加聚合物液晶盒的厚度以及增加液晶折射率差, 能够减短焦距, 形成短焦距微透镜.

2 透镜焦距和电压关系

将液晶盒放在如图4所示的光路中, He-Ne 激光器发出的激光, 首先通过小孔空间滤波系统得到均匀

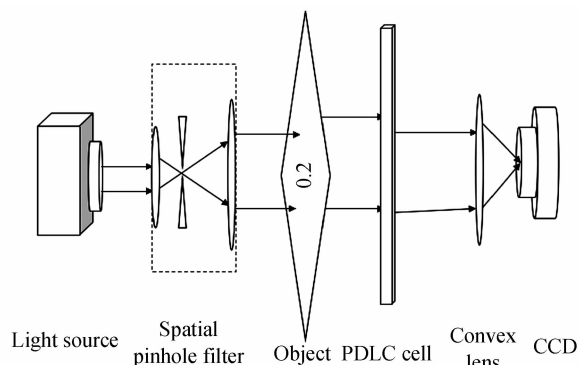


图4 测量聚合物分散液晶透镜焦距的光路

Fig. 4 The optical path diagram for measuring focal length of PDLC lens

的平行光束, 然后经过带有数字“0.2”的物镜, 再经过聚合物分散液晶盒中的圆孔位置, 最后经过一个焦距为 $f_1 = 7$ cm 的透镜后, 投射到 CCD 上.

利用图5, 分别测试了带有刻蚀直径为 3 mm 和 6 mm 圆孔的聚合物分散液晶盒变焦特性. 对于带有 3 mm 圆孔的液晶盒, 物到液晶盒的距离为 15.3 cm, 液晶盒到凸透镜的距离为 14.2 cm, 凸透镜到 CCD 的距离为 11.5 cm; 对于带有 6 mm 圆孔的液晶盒, 物到液晶盒的距离为 15.3 cm, 液晶盒到凸透镜的距离为 14.5 cm, 凸透镜到 CCD 的距离为 11.5 cm.

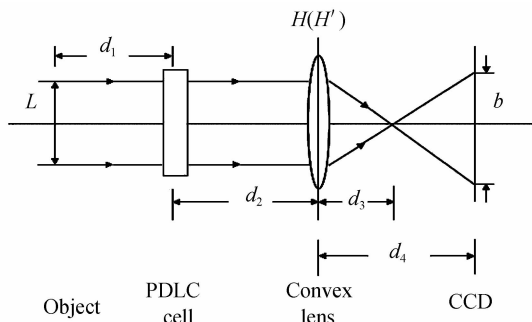


图5 外加电压为 0 V 时的成像光路

Fig. 5 Experimental setup of PDLC lens without external voltage

实验时, 在聚合物分散液晶盒上施加 50 Hz 交流电压, 驱动聚合物分散液晶材料中的液晶分子转动, 以改变其折射率. 当外加电压从 0 V 逐渐增加到 170 V 时, 用 CCD 连续接收图像.

当外加电压为 0 V 时, 聚合物分散液晶透镜没有透镜效果, 相当于一块平板玻璃板, 如图5将凸透镜与 PDLC 透镜之间的距离计算在内, 系统焦距为后透镜焦距 $f_1 = 7$ cm.

测量可知, CCD 上接受到的像高 b 满足

$$\frac{b}{L} = \frac{d_4 - 7}{7} \quad (2)$$

式(2)中, L 为物高, $L = 0.28$ cm, d_4 为凸透镜到 CCD 的距离, 测量值为 11.5 cm. 计算可得到实际像高 $b = 0.18$ cm.

利用 Photoshop 上的测量工具对 CCD 上所成的图像进行测量, 得到电压为 0 V 时的测量结果, 如图6(a)、(b), 圆孔直径为 3 mm 时的测量值为 11.78, 圆孔直径为 6 mm 的测量值为 11.85, 测量结果和实际的像高成一定比例关系, 当施加电压时, 实际像高可以依据式(3)和 CCD 上成像的测量值计算, 即

$$b_1 = a_1 \cdot b/a \quad (3)$$

式(3)中, a 为电压 0 V 时, CCD 上测量的像高; b 为电压 0 V 时, 实际像高; a_1 为加一定电压时, CCD 上测量的像高, 且 a_1 随电压值变化而变化; b_1 为加一定电压时, 实际像高.

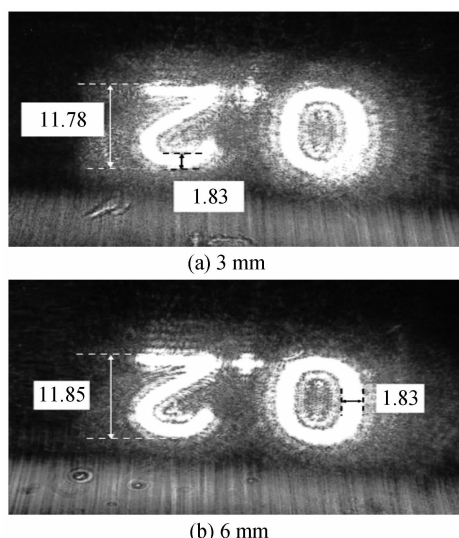


图6 3 mm、6 mm 圆孔透镜组在 0 V 时的图像
Fig. 6 The image of PDLC lens with different circles without external voltage

当在聚合物分散液晶透镜上施加电压时,PDLC 透镜对入射平行光线有聚焦效果,如图 7.

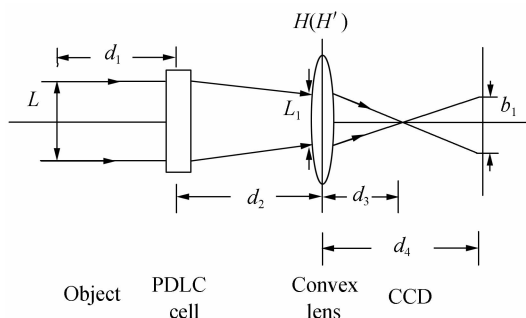


图7 外加一定电压时的成像光路
Fig. 7 Experimental setup of PDLC lens with external voltage

依据 CCD 上的成像测量值、物高、凸透镜焦距以及聚合物分散液晶盒、透镜、CCD 之间的距离,利用几

表 1 3 mm 和 6 mm 透镜组焦距测量结果

Table 1 The focal length of PDLC lens with 3 mm circle and 6 mm circle

| | Voltage/V | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 130 | 150 | 160 | 170 |
|------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 mm | CCD Measure | 1.98 | 2.12 | 2.15 | 2.19 | 2.22 | 2.26 | 2.33 | 2.36 | 2.4 | 2.61 | 2.75 |
| | Focal Length/m | 2.633 | 1.362 | 1.234 | 1.097 | 1.013 | 0.918 | 0.790 | 0.745 | 0.693 | 0.506 | 0.429 |
| 6 mm | CCD Measure | 1.94 | 2.05 | 2.08 | 2.11 | 2.16 | 2.23 | 2.26 | 2.29 | 2.33 | 2.42 | 2.54 |
| | Focal Length/m | 3.540 | 1.770 | 1.558 | 1.391 | 1.180 | 0.974 | 0.906 | 0.847 | 0.779 | 0.660 | 0.548 |

3 结论

实验验证了具有非对称电极的聚合物分散液晶盒的调焦特性. 结果表明,当施加在 PDLC 液晶盒上的电压从 50 V 增加到 170 V 时,透镜焦距逐渐减小,刻蚀 3 mm 圆孔的 PDLC 液晶盒焦距从 1.361 63 m 减小到 0.429 21 m,刻蚀 6 mm 圆孔的 PDLC 液晶盒焦距从 1.769 92 m 减小到 0.548 43 m. 对比 3 mm 和 6 mm 圆

何光学原理,可以计算出聚合物分散液晶盒的焦距. 计算式为

$$\frac{L_1}{L} = \frac{f-d_2}{f} \quad (4)$$

$$\frac{b_1}{L_1} = \frac{d_4-d_3}{d_3} \quad (5)$$

$$\frac{L_1}{2d_3} = \frac{f_1 \cdot \frac{L}{f} + L_1}{f_1} \quad (6)$$

式(4)~(6)中, d_2 为聚合物分散液晶透镜至凸透镜长度, d_3 为光线与光轴交点到凸透镜的距离, d_4 为凸透镜至 CCD 长度, f_1 为凸透镜焦距, f 为聚合物分散液晶盒的焦距, L 为物高, L_1 为光线到达透镜时的高度.

将实验测得的 a_1 、 a 、 b 、 d_2 、 d_4 、 L 代入式(3)~(6),分别计算出 3 mm 孔径和 6 mm 孔径的聚合物分散液晶盒的焦距随电压变化值.

表 1 为 3 mm 和 6 mm 圆孔在不同电压下,聚合物分散液晶盒焦距计算结果. 图 8 为 3 mm 和 6 mm 圆孔的聚合物分散液晶盒焦距随电压变化的指数分布拟合曲线.

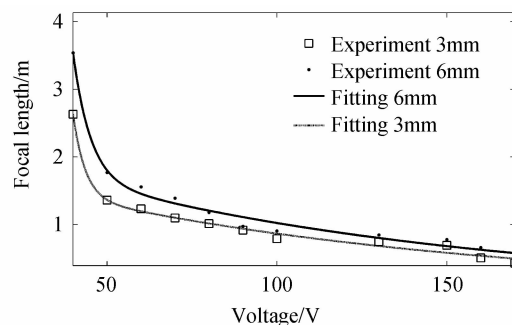


图8 直径 3 mm 和 6 mm 圆孔的聚合物分散液晶盒焦距随电压的变化

Fig. 8 Curve of focal length of PDLC lens with 3 mm and 6 mm circle along with external voltage

孔在同一电压下的焦距长短发现圆孔直径越小,焦距越短. 对于大孔径 PDLC 透镜,将两片具有调焦特性的 PDLC 液晶盒叠加在一起,对两片聚合物分散液晶盒施加不同的电压,可以缩短透镜焦距增加透镜的调焦范围.

参考文献

[1] LIU Jian, WANG Ming-le, GAO Liu-de, et al. Orientation mode of azobenzene mesogens and their effects on the orientation stability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 902-906.

- 刘剑,王明乐,高刘德,等. 偶氮苯介晶基元取向方式对其取向稳定性影响[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 902-906.
- [2] JIN Shi-wei, YANG Xin-jun. A novel micro-led backlighting design technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 766-770.
金诗玮,杨新军. 一种新颖微型液晶显示器背光设计技术[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 766-770.
- [3] YANG Ming-wei, XIAO Jun, LI Rui. Tunable negative refraction photonic crystals filled with liquid crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 176-180.
杨明玮,肖峻,李锐. 液晶光子晶体的负折射率特性研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 176-180.
- [4] CHEN Wing-wang. Liquid crystal adaptive lens high density electrode configuration[D]. The University of Alabama in Huntsville. 1997, 1-2.
- [5] SUN Yi. Liquid crystal adaptive lens with circular electrodes [D]. The University of Alabama in Huntsville. 2002, 1-2.
- [6] HUANG Y P, CHEN C W, SHEN T C, *et al.* Autostereoscopic 3D display with scanning multi-electrode driven liquid crystal (MeD-LC) lens[J]. *3D Research*, 2010, **1**(1): 39-42.
- [7] DODGSON N A, MOORE J R, LANG S R, *et al.* A 50 time-multiplexed autostereoscopic display[C]. Proceedings of The International Society for Optical Engineering, 2000, **3957**: 177-183.
- [8] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, **18**(9): 1679-1864.
- [9] NOSE T, SATO S. A liquid crystal microlens obtained with a nonuniform electric field[J]. *Liquid Crystal*, 1989, **5**(5): 1425-1433.
- [10] NAVMOV A F, LOVE G D, LOKTEV M Y, *et al.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses [J]. *Optics Express*, 1999, **4**(9): 3442352.
- [11] MILTON H, BRIMICOMBE P, MORGAN P *et al.* Optimization of refractive liquid crystal lenses using an efficient multigrid simulation[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 11159-11165.
- [12] CHE J H, SHEN C R. Using photopolymerization to achieve tunable liquid crystal lenses with coaxial bifocals[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(4): 4738-4746.
- [13] LUCCHETTA D E, MANNI A, *et al.* Nano-size polymer dispersed liquid crystals for phase-only optical modulation[J]. *Molecular Crystals And Liquid Crystals*, 2002, **375**(1): 397-409.
- [14] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. McGraw-Hill, 1968, New York.