

文章编号 1004-924X(2014)10-2592-06

电润湿双液体变焦透镜

赵 瑞*, 华晓刚, 田志强, 刘启超, 王 评, 梁忠诚

(南京邮电大学 光电工程学院 微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 研制了介电润湿双液体变焦透镜以实现变焦透镜的微型化及无机械部件情况下透镜的自动变焦。基于介电润湿原理制备了双液体变焦透镜。采用 CCD 图像测量系统, 测量了不同电压下透镜的焦距, 并与基于高斯光学理论推导的焦距公式进行了比较。然后, 采用 COMSOL 软件, 分析了双液体界面面形随电压的变化, 讨论了动力黏度系数对透镜性能的影响。结果表明, 随着电压的增大, 双液体界面从初始弯向导电盐溶液变为平面继而弯向绝缘油, 相应的双液体透镜实现了从凹透镜到凸透镜的转变, 临界电压为 50 V。当电压增大至 65 V 左右时, 透镜焦距不再减小。透镜焦距经历了从负到零再到正的变化($-\infty$, -22.83 mm) \cup (33.47 mm, $+\infty$), 基本实现了焦距大范围可调。当动力黏度系数为 0.03 时, 液体透镜的响应时间为 0.015 s, 对应的器件稳定性最佳。

关键词: 双液体透镜; 变焦距透镜; 电润湿驱动; COMSOL 软件

中图分类号: O435.1; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2592

Electrowetting-based variable-focus double-liquid lens

ZHAO Rui*, HUA Xiao-gang, TIAN Zhi-qiang, LIU Qi-chao, WANG Ping, LIANG Zhong-cheng

(Research Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaor@njupt.edu.cn

Abstract: An electrowetting-based double-liquid lens was developed to realize the small volume and automatic focusing without mechanical components for the focus-variation lens. The electrowetting-based double-liquid lens was designed and fabricated based on the dielectric wetting principle. Then, the focal length of liquid lens for different voltages was measured by a CCD image measurement system and it was compared with the theoretical value calculated by Gauss optical theory. Finally, COMSOL was employed to analyze the curvature radius of the double liquid interface at different voltages and to discuss the effect of dynamic viscosity on the response time and stability of the liquid lens. The results indicate that the double liquid interface bends to the conductive salt solution initially and then changes into a plane and finally bends to the insulating oil when the applied voltage is increased. Accordingly, the liquid lens changes from a concave lens to a convex lens, and the critical voltage is 50 V. However, the focal length of the liquid lens does not decrease any more when the applied voltage increases to 65 V. The whole focal length of the lens ranges from $-\infty$ to -22.83 mm and from 33.47 mm to $+\infty$, and it is adjusted continuously in a wider range. Moreover, when the dynamics viscosity of insulating oil is

收稿日期: 2013-12-31; 修订日期: 2014-02-07.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2011752)

0.03, the response time is 0.015 s and the corresponding performance of the device is optimal.

Key words: double-liquid lens; variable-focus lens; electrowetting drive; COMSOL software

1 引 言

焦距可变的透镜在智能手机、摄像机、显微镜等现代成像设备中有着广泛的应用和重要的意义^[1-2]。传统的变焦镜头通常由两片或者多片透镜组合而成,有些甚至要结合棱镜等其他光学部件,并利用电机和齿轮等机械装置调节透镜间的相对位置来实现变焦。因此,这些镜头的结构复杂、精确度低、质量大、能耗高,不仅制约其应用范围,而且不利于微型化。为了在不配备机械部件的情况下实现自动对焦和变焦功能,国内外研究学者提出了许多方案,如液压式微透镜^[3],基于液晶的微变焦透镜^[4]及基于电润湿原理的液体光学透镜^[5-6]等。其中,模仿人眼结构的基于电润湿原理的液体透镜具有结构简单、成本低、耗电量小、寿命长、易于实现阵列型结构和集成、响应速度快等诸多优点,因此非常适用于对可靠性和耐用度要求高的场合。目前,国内外许多大学和研究组已针对电润湿效应的基本原理、器件结构及其应用进行了大量深入的研究^[7-8]。

电润湿效应^[5]是一种物理化学现象,它通过改变导电液滴与基板之间的电压来改变液滴在基板上的润湿性,即改变接触角使液滴发生形变和位移。在实际应用中,通常在与液滴接触的基板表面涂敷数微米的介质层和数百纳米的疏水层来增大接触角的动态变化范围;液滴通常是电解质盐溶液,盐溶液周围可以是空气,也可以是另一种不溶液体,如非极性油溶液。基于电润湿原理的液体光学透镜利用电润湿效应的特性,通过调节外加电压来改变透镜的焦距。2000年,法国科学家 Berge 和 Peseux 最早提出将电润湿技术应用于变焦液体透镜^[9],从此揭开了基于介质上电润湿(简称介电润湿)原理的光学器件研制的序幕。Varioptic 公司先后推出了多款液体镜头聚焦照相模块。2004年,Philips^[10]公司发布了实用化的液体变焦透镜,其响应时间约为几十毫秒。但这些年液体变焦透镜均存在曲率变化不够精密、成像质量不够稳定且响应速度慢等问题。

本文设计并制作了基于介电润湿驱动的双液

体变焦微透镜,分析了双液体界面面形及相应的透镜焦距随电压的变化,讨论了动力黏度系数对透镜响应时间、稳定性及精确度的影响,找出了影响界面曲率变化、稳定性和响应速度的主要因素。该透镜具有快速精确聚焦的功能。

2 器件制备与测试

图 1 为基于介电润湿效应的液体光学透镜的结构示意图。实验中,透镜腔体采用直径为 15 mm、高度为 40 mm 的不锈钢空心圆管(壁厚为 1 mm)。为保证透镜具有良好的透光和操作性能,实验中将 ITO 基片用丙酮冲洗后,放入装有去离子水的器皿中并在超声波清洗机中洗涤 5 min,再放在洁净平台上吹干。在用于制作透镜腔体的不锈钢空心圆管内先后镀大约 $1.5\mu\text{m}$ 厚的派瑞

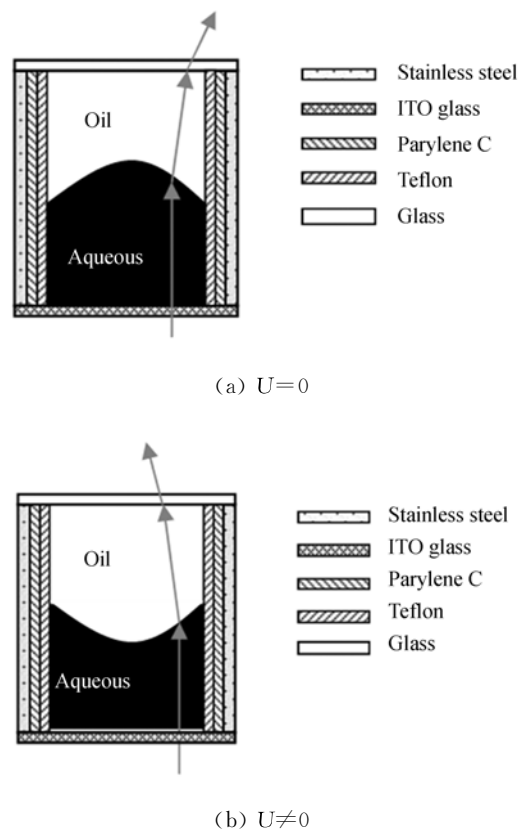


图 1 基于介电润湿效应的液体光学透镜的结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of liquid optical lens based on electrowetting

林(Parylene C)和~100 nm的特氟龙(Teflon)疏水层;采用无影紫外线胶(DOBIVER)对透镜腔体与ITO玻璃基底进行封装,随后采用紫外光进行固化。将两种质量分数均为2%的不混溶的液体NaCl导电盐溶液($n=1.3, \gamma=75 \text{ mN/m}$)和硅油(Dow Corning OS silicone oils, $\gamma=20 \text{ mN/m}, n=1.65$)注入腔体中。透镜的上盖片采用透光性能较好的玻璃基片,用紫外线固化胶进行封装。用ENSON牌导电银胶 HE-6106B8 将细铜丝粘在壁面外侧和ITO基底作为接入电极。当电极上的调控电压为零时,双液体界面呈现弯曲形状,由于表面张力的作用,弯曲界面朝向电解质盐溶液一侧;当控制电压不为零时,根据介电润湿原理^[11-12],外加电场将改变导电液体和透镜壁面的接触角。根据Young-Lippmann方程^[11-12],接触角随电压的增大而减小,相应的双液体界面曲率也发生变化。由于双液体界面两侧的折射率不同,当入射光线沿双液体界面出射时,不同的界面曲率将改变光线的扩散或会聚程度,从而实现透镜功能,即透镜焦距发生变化。

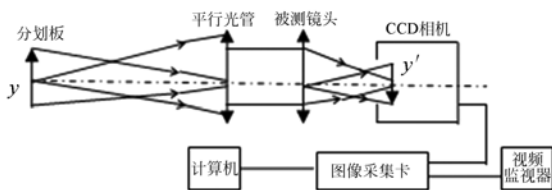


图2 基于CDD图像测量系统的液体透镜焦距测量示意图

Fig. 2 Diagram of focal length detection based on CCD measuring system

图2为待测液体透镜的焦距测量示意图。波罗板位于平行光管物方焦平面上,经平行光管准直后,成像于被测透镜的像方焦平面上。设平行管的焦距为 f' ,被测镜头的焦距为 f ,波罗板上—对刻线的间隔为 y ,经被测镜头所成的像为 y' ,有:

$$f = \pm f' (y' / y) . \quad (1)$$

设CCD相机的像素间隔为 c ,波罗板—对刻线间隔的像在CCD相机上所占像素为 ΔN ,则该刻线像的大小为:

$$y' = \Delta N c . \quad (2)$$

液体透镜的焦距公式为^[13]

$$f = \pm f' (\Delta N c / y) , \quad (3)$$

式中: f', c, y 都为已知量,只需在实验中读出刻

线像所占的像素点数 ΔN ,即可求得待测镜头的焦距值。其中平行光管的焦距 $f' = 590.30 \text{ mm}$, CCD相机的像素尺寸 c 为 $11.72 \mu\text{m}$ 。

为减小实验误差,选取间隔 $y = 4, 8$ 和 15 mm 3组分隔板,采用3次测量求平均值的方法。电压取值为 $0 \sim 80 \text{ V}$,测量间隔为 5 V 。

3 模拟仿真与讨论

仿真时采用COMSOL Multiphysics中的Microfluidics Module模块建立双液体透镜模型,相关参数如表1所示。

表1 参数设置

Tab. 1 Parameter settings

Parameter	Value
Zero voltage contact angle θ_0	160°
Surface tension γ	0.02 N/m
Insulating fluid viscosity μ_{oil}	$1.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Relative dielectric constant ϵ_r	2.65
Dielectric thickness d_f	$1.5 \mu\text{m}$
Applied voltage U_{app}	80 V

仿真过程中,设定上层液体为硅油,下层液体为电解质盐溶液。表2给出了不混溶液体的相关物理参数。

表2 液体参数设置

Tab. 2 Parameters of liquid materials

Liquid	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Index of refraction	Dynamic viscosity / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
NaCl	1 000	1.3	2.7×10^{-3}
Silicone oil	1 000	1.65	1.3

图3给出了动力黏度系数为1.3、电压分别为 $U = 0, 50, 80 \text{ V}$ 时双液体的界面形状。从图中可以看到,导电液体与透镜腔体壁面的接触角随着电压的增大而减小,变化范围从大于 90° (见图a)减小到 90° (见图b),再到小于 90° (如图c所示)。相应地,双液体界面从弯向导电溶液一侧过渡为平面,进而弯向绝缘油一侧,双液体透镜实现从凹透镜到凸透镜功能的转变。

由于介电润湿液体透镜主要依赖双液体界面形状的变化来实现透镜焦距的变化,因此,通过跟

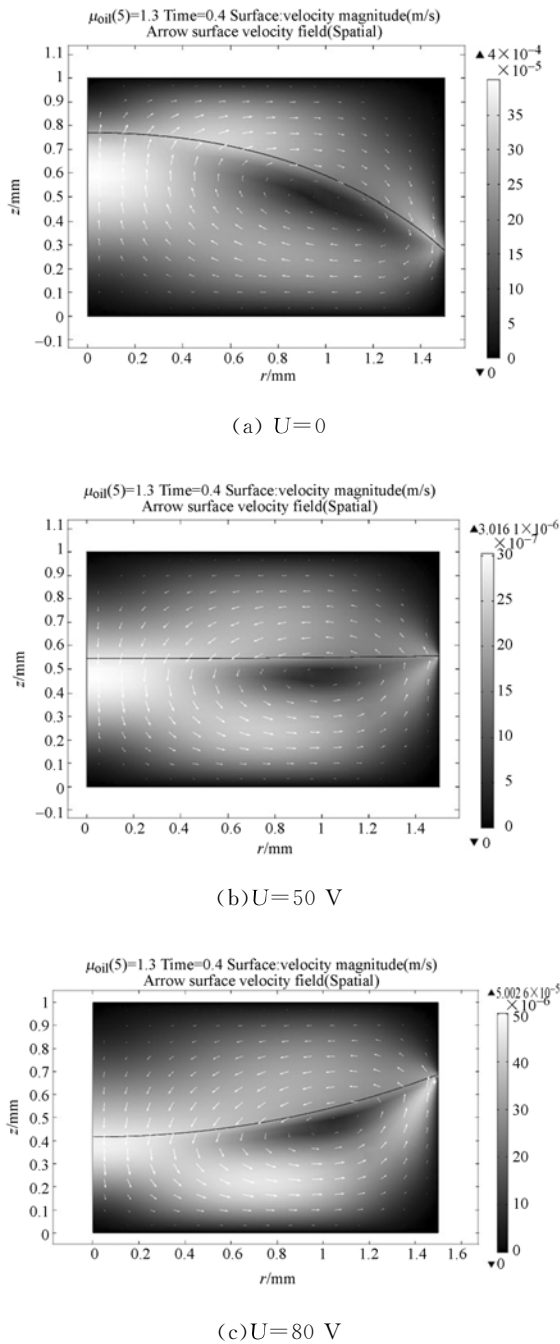


图 3 不同电压下,两相液体界面形状的仿真图(灰度代表流速,箭头代表方向)

Fig. 3 Shapes of liquid interface at different applied voltages (gray scale represents velocities of liquids and arrows represent directions)

踪图 3 中电解质盐溶液与固体壁面接触线长度的变化,获得了双液体界面位移随工作电压的变化情况。图 4 给出了动力黏度系数分别为 0.01, 0.03, 0.05, 1, 1.3 和 1.5 时,双液体界面位移随时间的变化关系。从图中可以看出,当动力黏度

系数 ≥ 0.05 时,系统已处于过阻尼状态。当动力黏度系数 ≤ 0.01 时,系统处于振荡状态。在实际应用中,应避免产生上述两种现象。虽然动力黏度系数的改变对界面位移的影响不大,但对系统的响应时间及稳定性能影响较大。动力黏度系数越大,响应时间越长。当黏度系数为 1.3 时,双液体界面趋于稳定所需的时间约为 0.4 s。从图 4 可以看出, $\mu_{oil} = 0.03$ 为最佳黏度系数,无阻尼振荡和过阻尼现象出现,相应的响应时间为 0.015 s。

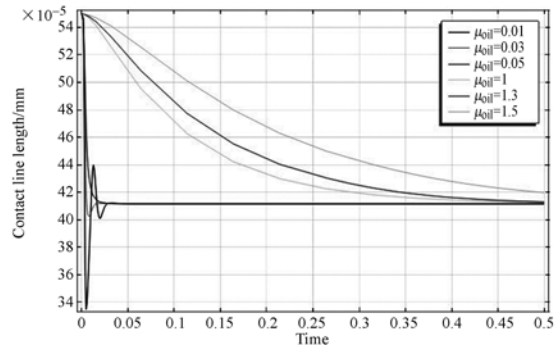


图 4 双相液体界面位移与动力黏度关系

Fig. 4 Liquids interface displacement versus dynamic viscosity of insulating fluid

根据高斯光学理论,双液体透镜焦距 f 和电压 U 的关系式为^[14]:

$$f = \frac{a}{(n_1 - n_2) \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (n_1 - n_2)}{2e\gamma_{12}} U^2}, \quad (4)$$

其中: a 为圆柱体不锈钢容器的半径, n_1 为绝缘液体的折射率, n_2 为导电液体的折射率, θ_0 为初始接触角, ϵ_0 为空气绝对介电常数, ϵ_r 为介质材料相对的介电常数, γ_{12} 为界面张力, e 为介质层厚度, U 为所加电压值。

根据式(4),采用 Origin 绘出液体透镜焦距随电压变化的关系,如图 5 所示。式(4)中相关参数的取值与物理原型器件的尺寸和参数吻合,即 $a=7.5$ mm, $n_1=1.3$, $n_2=1.65$, $\theta_0=160^\circ$, $e=1.5$ μm , $\gamma_{12}=20$ mN/m, $\epsilon_r=2.65$ 。从图 5 可以看出,在低电压($U < 50$ V)下,系统焦距变化与理论预测曲线基本吻合,标准差在 1.5 左右,此时对应的液体透镜为凹透镜。随着电压的增大,双液体透镜的焦距逐渐减小,从 -22.83 mm 减小到 $-\infty$;当液体透镜焦距变为无穷大($-\infty$)时,工作电压约为 50 V,此时双液体界面形状为平面,对

应的光焦度为零;当电压大于 50 V 时,液体透镜从凹透镜转变为凸透镜。随着电压的继续增大,根据式(4)计算出的透镜焦距从正无穷大($+\infty$)逐渐减小到 13.54 mm;然而,事实上当电压增大到 65 V 左右时,对应的系统焦距为 33.47 mm,即使再增大电压,透镜焦距也不再发生变化。实验测量值与理论计算值出现较大偏差的原因是:在大电压下,导电液体与透镜腔体间的接触角产生了饱和现象,而式(4)的理论推导基础 Young-Lippmann 方程未考虑接触角饱和的问题,因此不能很好地描述大电压下接触角的变化趋势,致使理论值和实验值存在较大偏差。接触角饱和是

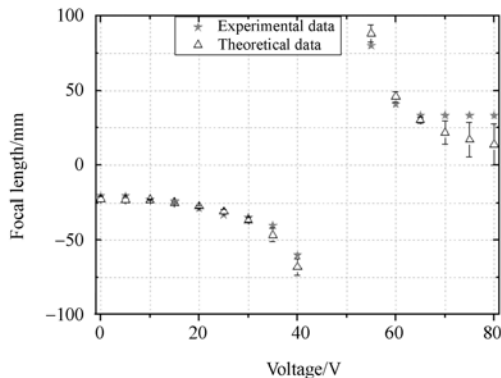


图 5 双液体透镜焦距随电压变化关系图

Fig. 5 Focal length of liquid lens versus voltage

参考文献:

- [1] KAVEHVASH Z, MEHRANY K, BAGHERI K. Optimization of lens-array structure for performance improvement of integral imaging [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(20): 3993-3995.
- [2] 张鹰, 张新, 史广维, 等. 液体透镜在变焦系统中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(1):46-56.
ZHANG Y, ZHANG X, SHI G W, *et al.*. Application of liquid lenses in zoom system [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):46-56. (in Chinese)
- [3] CHEN J, WANG W S, FANG J. Variable-focusing microlens with microfluidic chip [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(5):675-680.
- [4] MORAN P M, DHARMATILLEKE S, KHAW A H. Fluidic lenses with variable focal length [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(041120):1-3.
- [5] 李零印, 王一凡. 液体变焦技术的发展与展望[J]. *中国光学*, 2012, 5(6):578-582.

目前国内外学者致力研究的重要难题之一。

4 结 论

本文根据现代光学对透镜的微型化、集成化、低成本化及不配备机械部件的情况下自动对焦和变焦功能的要求,研制了一种基于介电润湿原理的双液体微光学变焦透镜(口径为 15 mm,高度为 40 mm),并介绍了双液体透镜的结构和工作原理,分析了双液体界面面形及曲率与电压的关系,讨论了动力黏度系数对透镜响应时间及稳定性的影响。实验结果表明,随着电压的增大,双液体界面的弯曲方向从弯向导电盐溶液逐渐变为平面继而弯向绝缘油,相应的双液体透镜实现了从凹透镜到凸透镜的转变,对应的临界电压为 50 V。当工作电压从零增大到 80 V 时,该液体透镜的焦距从 -22.83 mm 变化到 $-\infty$,随后焦距跃变为 $+\infty$ 后再逐渐减小到 33.47 mm,基本实现了透镜微型化且焦距大范围内可调的要求。当动力黏度系数为 0.03 时,液体透镜的响应时间为 0.015 s,此时液体光学透镜器件的性能最佳。这些结果为液体光学透镜的进一步实用化提供了理论参考和实验依据。

- [6] LI L Y, WANG Y F. Development and prospect of varifocal-liquid technique [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):578-582. (in Chinese)
- [7] HU X, ZHANG S, LIU Y, *et al.*. Electrowetting based infrared lens using ionic liquids [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99:2135-2140.
- [8] JORGE F F, SALVADOR C, LUIS C, *et al.*. Test and evaluation of a variable focus liquid lens for curvature wavefront sensors in astronomy [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30):7256-7264.
- [9] JULIET T G, VICTOR M B, CAROL C C, *et al.*. Simulation of electrowetting lens and prism arrays for wavefront compensation [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6618-6623.
- [10] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85:1128-1130.
- [11] BERGE B, PESEUX J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting [J]. *The European Physical Jour-*

- nal E, 2000, 3: 158-163.
- [11] CHEVALLIOT S, KUIPER S, HEIKENFELD J, et al.. Experimental validation of the invariance of electrowetting contact angle saturation [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, 26:1909-1930.
- [12] WYATT C, NELSON C J. Droplet actuation by electrowetting-on-dielectric [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, 26:1747-1771.
- [13] 何平安, 林银森. 透镜焦距的 CCD 图像测量系统 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(1):24-26.
- HE P A, LIN Y S. CCD image measurement system for lens focal length [J]. *Journal of Wuhan Technology University of Surveying and Mapping*, 1999, 24(1):24-26. (in Chinese)
- [14] 彭润玲. 电湿效应无机械运动变焦光学系统研究 [D]. 上海:上海理工大学, 2010.
- PENG R L. *Study on non mechanical movement zoom optical system based on electrowetting* [D]. Shanghai: Shanghai University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

作者简介:



赵 瑞(1977—),女,江苏徐州人,博士,副教授,硕士生导师,2002年于江苏师范大学获得学士学位,2007年于南京理工大学获得博士学位,主要从事以微流控芯片为基础的电润湿理论、介电泳理论及相关器件的研究。E-mail: zhaor@njupt.edu.cn



华晓刚(1986—),男,江苏无锡人,硕士研究生,2004年于南京师范大学获得学士学位,主要从事基于电润湿理论及器件的研究。E-mail: huaxiaogang1986@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)