

基于平板电极的非球面组合液体透镜的仿真与实验分析

孔梅梅^{1*}, 董媛¹, 徐春生², 刘悦¹, 薛银燕¹, 李明洋¹, 张舒涵¹

¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

²南京南瑞信息通信科技有限公司, 江苏 南京 211100

摘要 应用介电泳原理设计了一种基于平板电极的非球面组合液体透镜。该透镜主要由上下平行的 4 块氧化铟锡(ITO)导电平面玻璃板、腔体、介质层和疏水层组成,具有结构简单、易于实现的优点。利用 COMSOL、MATLAB 和 Zemax 软件,建立了基于平板电极的非球面组合液体透镜的光学模型,仿真分析了其不同电压下的焦距变化,并讨论了平板电极的平行度对组合透镜焦距的影响。对该非球面组合透镜的器件制备与实验分析,结果表明:当工作电压由 0 增加到 280 V 时,焦距由 28.7135 mm 变化为 20.1943 mm,与仿真结果基本相符;该器件的成像分辨率最高可达 49.8244 lp/mm。

关键词 光学器件; 介电泳原理; 非球面; 平板电极; 液体变焦透镜

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231775

1 引言

与传统的固体透镜相比,液体透镜具有体积小、无需外部机械装置、反应速度快、寿命长、成本低等特点^[1],在手机摄像头、内窥镜、全息成像等方面得到了广泛的应用^[2]。目前科研工作者已经探索了各种技术和调谐机制来制作液体透镜,包括流体压力透镜^[3-4]、热效应透镜^[5]、电磁波透镜^[6]、自适应水凝胶透镜^[7]、介电泳透镜^[8]和电润湿透镜^[9]等。其中,流体压力透镜需要由外部泵提供流体压力,这增加了器件的体积;基于电润湿效应的液体透镜通过改变盐水和油之间的界面来调整其表面轮廓,然而自由电荷的传输可能会在盐水中产生电解,且交变电场可能会使溶液受热,从而产生微气泡;而介电泳透镜无需导电液体,且不会产生蒸发和微气泡等问题^[10]。

在光学系统中,球差往往是研究人员特别关注的像差,所以对于液体透镜首先需要考虑其球差的校正。对于传统的可调焦液体透镜,其变形后表面轮廓的形状近似于球面,所以会引入显著的球差,而设置液体透镜的表面为非球面则可以提高透镜校正像差的能力。2009年,Zhan等^[11]提出了一种利用静电力调控的非球面聚合物液体透镜。光固化聚合物的绝缘液滴放置在两个透明氧化铟锡(ITO)玻璃电极之间的介质基板上,在强静电场作用下,液体透镜可以从

初始的球形变形为抛物线形,甚至近圆锥形,但是固化之后的液滴便失去了可调节性。2017年,Mishra团队提出了一种利用流体静压力和静电力结合的非球面液体透镜^[12]。通过在 10×10 电极阵列上施加不同的电压以产生复杂的电场分布,从而动态调节透镜的形状,进而调节球差、彗差、像散等像差。由于透镜的电极数量较多,单元电极的控制比较困难。2019年,Wang等^[13]提出了一种集成非球面的液体透镜系统,利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)液滴的重力以及液体界面张力,可以固化得到相应的非球面面型,并与电润湿透镜组合,在不改变透镜尺寸的前提下,实现球差的调节。然而该器件制备工艺较复杂,不利于透镜的快速、低成本生产。本课题组基于液体的密度差,在液体透镜中引入了非球面面型,分别进行了非球面双液体透镜的光学特性分析、非球面三层液体透镜在人眼晶状体光学模型中的应用研究,以及方腔结构的非球面液体透镜的实验分析^[14-16]。

本文在已有的研究基础之上,通过仿真与实验分析,研究了一种基于平板电极的非球面组合液体透镜。通过理论仿真,结合基于平行平板电极的单个非球面双液体透镜,对比分析了不同电压下的双液体透镜的焦距变化,讨论了平板电极的平行度对非球面液体透镜组合结构焦距的影响,并对其焦距和成像质量进行了实验分析,实验结果与仿真基本一致。与图案

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-01-24; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61905117, 61775102)

通信作者: *kongmm@njupt.edu.cn

化电极相比,该非球面组合液体透镜结构使用连续电极,加工更简单,成本更低,更易于实现,更具有实用性。

2 基本原理与结构设计

介电泳(DEP)力是在非均匀电场影响下施加在不带电的介电粒子或导电粒子的电偶极矩上的力。电场使粒子极化,两极沿着电场线受力,根据偶极子的方向,力可以相互吸引或相互排斥。由于电场是不均匀的,所以电场较大的一极将会支配另一极,粒子产生移动,并且偶极子的方向取决于粒子和介质的相对极化率。当施加电压时,由于两种液体材料之间介电常数存在差异,因此在液滴上产生介电泳力。介电泳力使液滴收缩,从而增加液滴的接触角,介电泳力^[17]可表示为

$$\mathbf{F} = \epsilon_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)(\nabla \mathbf{E})^2/2, \quad (1)$$

式中: ϵ_0 、 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为真空、液滴和环境液体的介电常数。由式(1)可知,所用液体材料的介电常数差和电场梯度 $\nabla \mathbf{E}$ 的大小对介电泳力起着关键作用。

图1展示了所设计的基于平行平板电极的非球面

组合液体透镜结构的示意图,该结构主要由4块透明的ITO导电平面玻璃板、腔体、介质层和疏水层组成。其中,ITO导电平面玻璃上涂覆的介质层和疏水层分别采用SU8和Parylene溶液,上下基板施加的电压大小相等($V_1=V_2$)。腔体中填充有两种互不混溶的液体,为了满足介电泳原理,选用的液体必须为介电常数差较大的两种绝缘液体,本实验选择甲基硅油为液滴材料,去离子水充当环境液体,二者的介电常数相差75.66,且这两种材料都是绝缘的。两种液体材料的关键参数如表1所示。结合这两种材料的密度差(甲基硅油的密度 $\rho_1=0.97 \text{ g/cm}^3$,去离子水的密度 $\rho_2=1.00 \text{ g/cm}^3$,则 $\Delta\rho=0.03 \text{ g/cm}^3$)和液滴的尺寸,可以得到邦德数^[18] $B_0=\Delta\rho g R^2/\gamma=0.097 \ll 1$ (其中重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$,液滴覆盖底面的半径 $R=2.7 \text{ mm}$,表面张力 $\gamma=22 \text{ mN/m}$),因此在实验中重力是可以忽略不计的。在初始状态下,液滴呈球形,当施加外部电压后,介电常数较高的液滴会沿电场方向运动,挤压介电常数较低的液滴,液-液界面曲率半径发生改变。调整施加在中间两块ITO导电平面玻璃板上的电压,就可以改变液-液界面的曲率半径,从而实现焦距的调节。

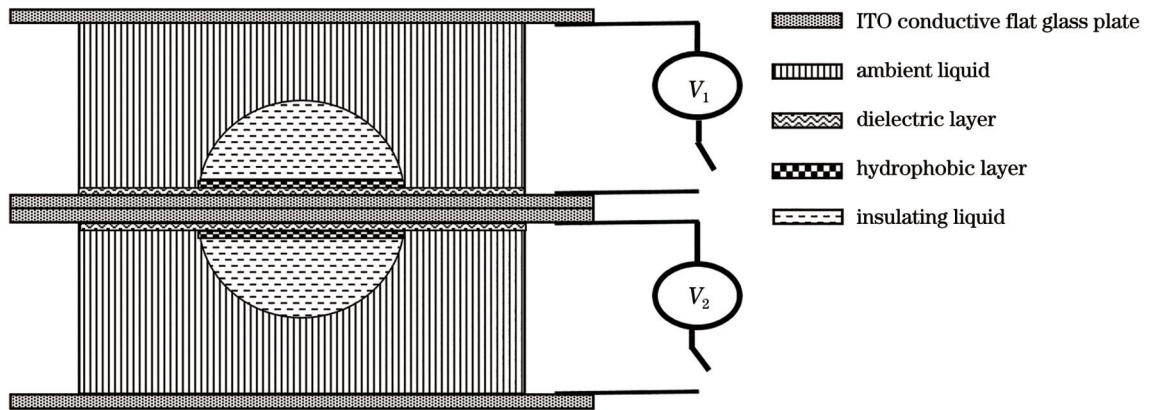


图1 基于平行平板电极的非球面组合液体透镜系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of aspherical combined liquid lens system based on parallel flat electrodes

表1 液体材料的关键参数

Table 1 Key parameters of liquid materials

Material	Dielectric constant	Density / (g/cm^3)	Refractive index	Surface tension / (mN/m)
Methyl silicone oil	2.70	0.97	1.403	22
Deionized water	78.36	1.00	1.333	72

3 仿真分析

利用COMSOL、MATLAB和Zemax软件对基于平行平板电极的非球面组合液体透镜系统进行建模与仿真分析,其主要的流程示意图如图2所示。首先,采用COMSOL软件建立不同电压下基于平行平板电极的非球面组合液体透镜的模型,并得到非球面界面的面型数据。然后,通过MATLAB将非球面

面型数据与非球面公式进行拟合,从而得到相应的非球面系数,最后在此基础上,结合Zemax软件建立基于平板电极的非球面组合液体透镜的光学模型。

采用COMSOL软件对所提的非球面组合液体透镜进行建模与仿真分析,该组合系统的几何结构模型如图3(a)所示。首先建立两个高为5 mm的圆柱形腔体和两个球面液滴,通过ITO导电平面玻璃板对腔体

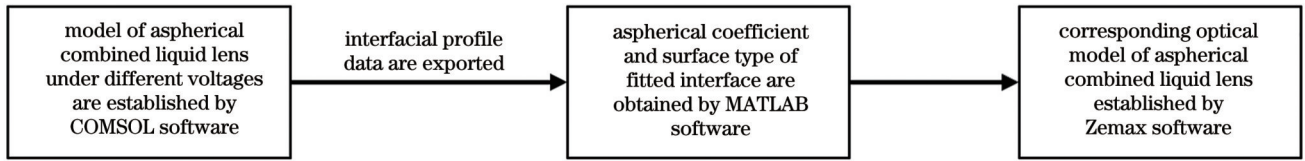


图 2 非球面组合液体透镜的仿真分析流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation analysis of aspherical combined liquid lens

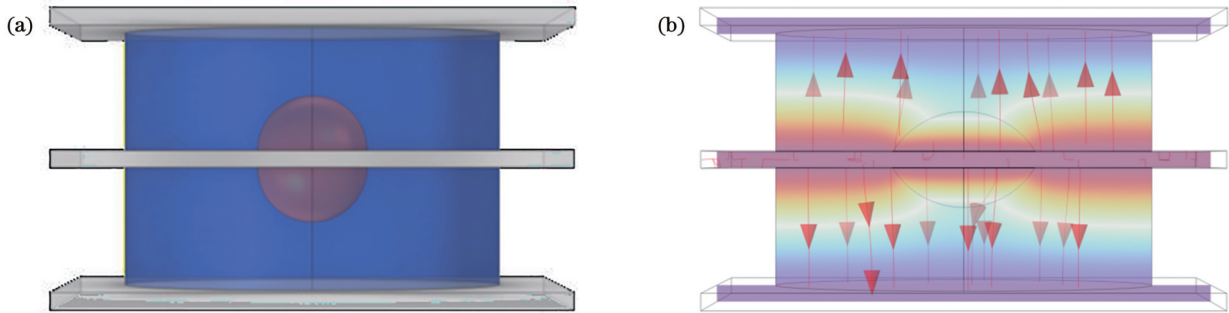


图 3 非球面组合液体透镜模型的建模示意图。(a)初始状态下的立体图;(b)电场线分布图(40 V)

Fig. 3 Modeling diagram of aspherical combined liquid lens model. (a) Stereogram in initial state; (b) electric field line distribution diagram (40 V)

进行封装。其次,添加环境液体和介电液滴的材料,其中设置上下两层的环境液体为去离子水,两个介电液滴的材料为甲基硅油,覆盖底面的半径约为 2.7 mm。随后,给整个模型添加电场,设置上下基板接地,就可以得到基于平板电极的非球面组合液体透镜的电场线分布示意图。图 3(b)为当施加 40 V 电压时,基于平板电极所产生的电场线分布。最后,对整个模型进行网格划分,考虑到每个液体在透镜中接触的电压会发生变化,也直接影响了接触角大小的精度变化,因此对双液体界面处进行加密处理。对模型施加不同的电压,计算得到不同电压下的非球面数据。

在 MATLAB 软件中导入由 COMSOL 得到的非球面面型数据,可拟合获得不同电压下的非球面系数,

计算公式为

$$z = a + b \times (x^2 + y^2) + c \times (x^2 + y^2)^2 + d \times (x^2 + y^2)^3 + e \times (x^2 + y^2)^4 + f \times (x^2 + y^2)^5, \quad (2)$$

式中: (x, y, z) 为非球面上某一点的坐标; a 为双液体界面的位置; b, c, d, e, f 为多项式系数。将得到的系数代入到 Zemax 中,建立相应的非球面组合液体透镜的光学模型。为了进一步研究非球面组合液体透镜的特性,将其与非球面单个液体透镜进行对比,两种液体透镜的液体材料、腔体结构和液滴体积的设置保持一致。图 4 展示了当工作电压为 280 V 时,非球面组合和单个液体透镜的光路图,像面选取为高斯像面。由图 4 可知,非球面组合液体透镜的会聚能力明显大于非球面单个液体透镜。

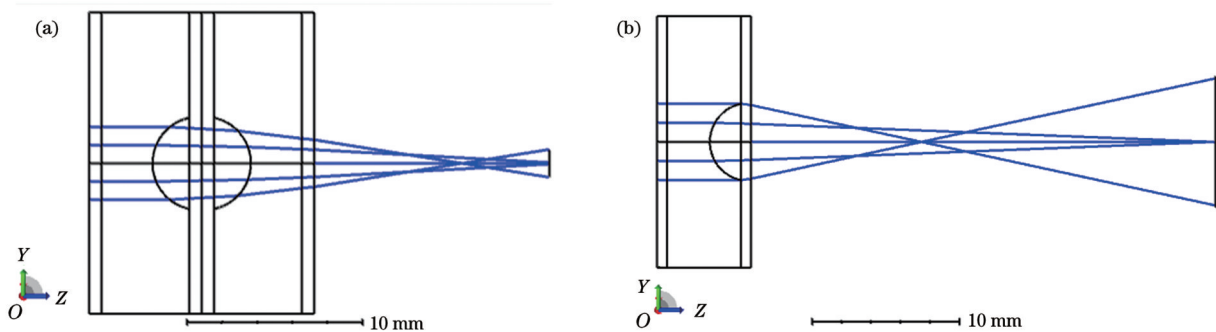


图 4 在 280 V 电压下的非球面液体透镜光路图。(a)非球面组合液体透镜;(b)非球面单个液体透镜

Fig. 4 Optical path diagram of aspherical liquid lens at 280 V voltage. (a) Aspherical combined liquid lens; (b) aspherical single liquid lens

当外加电压由 0 逐渐增加到 280 V 时,介电液滴的曲率会发生变化,因此可以实现透镜焦距的调节。利

用 Zemax 软件搭建不同外加电压下非球面组合和单个液体透镜的光学模型,可以得到其变焦范围,将二者

的变焦范围进行对比分析,结果如图 5 所示。当外加电压从 0 逐渐增加到 280 V 时,基于平行平板电极的非球面单个液体透镜的焦距由 52.7171 mm 变化为 34.1314 mm;非球面组合液体透镜的焦距由 27.2147 mm 变化为 18.1145 mm。由此可以看出,非球面组合液体透镜的焦距段比非球面单个液体透镜的小,且其聚焦能力更强,更适合应用于需要大景深的照相机镜头。

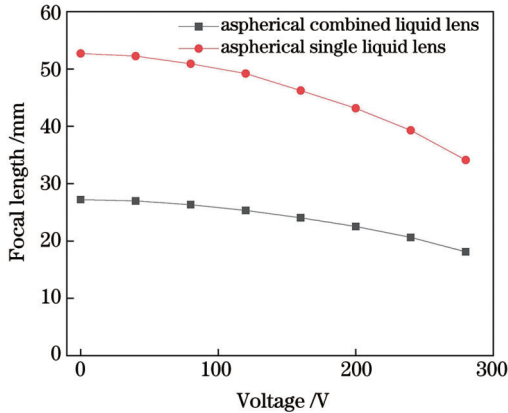


图 5 不同电压下非球面组合和单个液体透镜的焦距对比
Fig. 5 Comparison of focal lengths between aspherical combined and single liquid lens at different voltages

此外,考虑到平板电极的平行度可能对非球面组合液体透镜存在影响,利用 COMSOL 软件模拟了不同平行度下的基于平板电极的非球面组合液体透镜界面面型变化情况。在模型的仿真过程中,将下平板设置为水平放置,当上平板与下平板不平行时,即上平板与水平方向存在一定的倾斜角度时,分析液体透镜模型中的电场分布情况。设置上平板倾斜 4° 并施加 40 V 电压,非球面组合液体透镜中的电势分布如图 6 所示,与图 4(b)中上下平板平行且无倾斜情况下的模型相比,液体界面的面型与无倾斜情况下的面型并未有明显的区别。将界面面型数据导出,然后应用

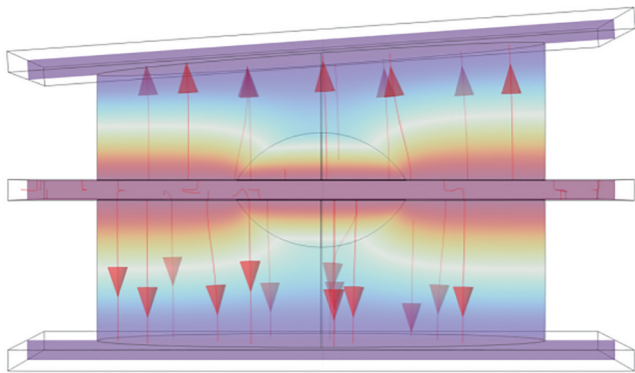


图 6 上平板倾斜 4° 时 40 V 电压下非球面组合液体透镜电势分布
Fig. 6 Potential distribution of aspherical combined liquid lens with 40 V voltage when upper flat is tilted 4°

MATLAB 拟合面型,并利用 Zemax 软件对比分析不同平行度下的非球面双液体透镜。主要选取倾斜 1° 、 2° 、 3° 、 4° 和无倾斜这 5 种情况下非球面组合液体透镜的界面面型进行对比分析,图 7 给出了液体透镜焦距在不同电压下的变化情况,可以看出当平板存在较小的倾斜度($1^\circ\sim 4^\circ$)时,平板电极的平行度对非球面组合液体透镜的焦距影响不大。

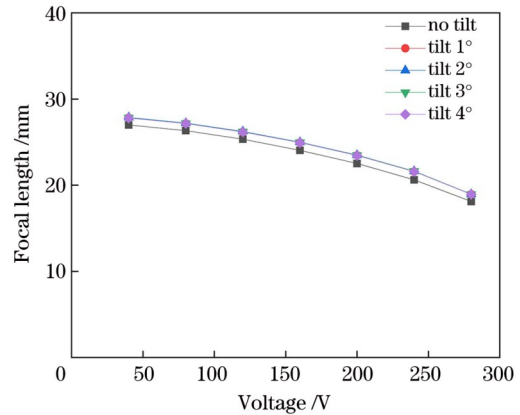


图 7 不同平行度下非球面组合液体透镜的焦距对比
Fig. 7 Focal length comparison of aspherical combined liquid lens with different parallelism

4 实验分析

4.1 实验制备

本实验所用的 ITO 导电平面玻璃板的尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,厚度为 0.4 mm,首先用无水乙醇对 ITO 导电平面玻璃板正反两面进行完全清洗,接着用无尘纸擦去表面可见的乙醇;然后将玻璃板放入超声波清洗仪中,利用去离子水清洗电极 3 min 左右,清洗完毕之后关闭清洗仪,取出玻璃片并再次用无尘纸擦拭干净。在 ITO 导电平面玻璃板上先涂覆 SU8,利用匀胶机涂覆均匀(厚度约为 $6\text{ }\mu\text{m}$),放入烤箱中烘烤。在烘烤完毕的 ITO 导电平面玻璃板上涂覆 Parylene 溶液,以获得更大的初始接触角,选择圆柱形透明亚克力管作为腔体材料,该透明亚克力管的具体参数:外径为 17 mm,内径为 13 mm,壁厚为 2 mm,高为 5 mm。在处理好的 ITO 电极导电平面玻璃板上用紫外线固化胶(UV 胶)固定好腔体,先注入体积约为圆柱形腔体体积的 $5/6$ 的去离子水,然后利用针管注入甲基硅油充当介电液滴,确保甲基硅油滴在疏水层的中心,注入的甲基硅油液滴在松弛状态下覆盖底面的半径约为 2.7 mm,再次注入去离子水至液面高于腔体呈微凸起状态。最后,将所得到的液体透镜结构封装,顶部采用涂覆 $6\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 SU8 的 ITO 导电平面玻璃板完成单个非球面液体透镜的封装。将上述两个平行平板电极的单个非球面液体透镜利用 UV 胶进行黏合,最终实现非球面组合液体透镜系统,所制备的器件实物图如图 8 所示。

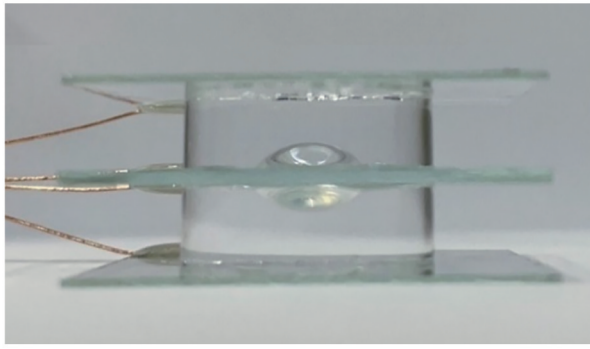


图 8 封装后的基于平行平板电极的非球面组合液体透镜
Fig. 8 Packaged aspherical combined liquid lens based on parallel flat electrode

4.2 焦距与成像分析

本实验使用实验室自制的焦距仪^[19],通过记录显微镜中不同线对的位置读数,来测试并计算出所制备的液体组合透镜的聚焦能力。如图 9 所示,其中方形线为利用 Zemax 软件仿真得到的焦距值,圆点线为利用焦距仪实验所测得的焦距值;当工作电压由 0 增加到 280 V 时,仿真得到非球面组合液体透镜的焦距由 27.2147 mm 变化到 18.1145 mm;实验测得的焦距由 28.7135 变化到 20.1943 mm,实验与仿真的焦距变化基本一致。

利用该非球面组合液体透镜对 USAF 1951 分辨率板进行成像实验分析,得到不同电压下的成像结果,如图 10 所示。当工作电压为 0 时,图 10(a)为液滴处于初始的放松状态下的成像结果,该组合液体透镜

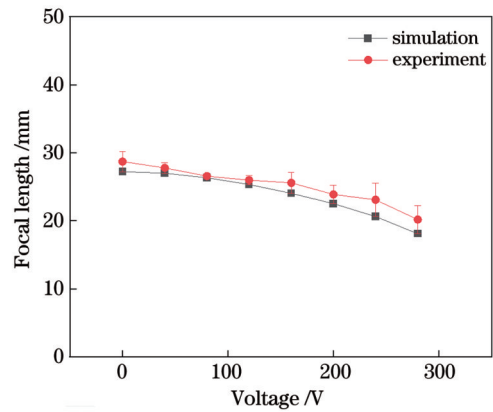


图 9 不同电压下仿真与实验测得的焦距对比
Fig. 9 Comparison of focal length measured by simulation and experiment at different voltages

的分辨率为 28.5090 lp/mm (第 4 组第 6 号元素)。随着电压的逐渐增加,液-液界面接触角发生改变,液滴表面在介电泳力的作用下逐渐凸起,透镜的焦距越来越小,图 10(b)为施加 160 V 电压时的成像结果,可以得到该组合液体透镜的分辨率为 32.0000 lp/mm (第 5 组的第 1 号元素),图 10(c)为施加 280 V 的外加电压时的成像结果,可以得到该组合液体透镜的成像分辨率图,选取 5 位同学对该分辨率图进行观测,5 位同学分别能看到第 5 组的第 4 号元素、第 5 组的第 4 号元素、第 5 组的第 5 号元素、第 5 组的第 5 号元素和第 5 组的第 6 号元素,通过计算其平均值得到在施加 280 V 电压下,非球面组合液体透镜的最大分辨率可达 49.8244 lp/mm。

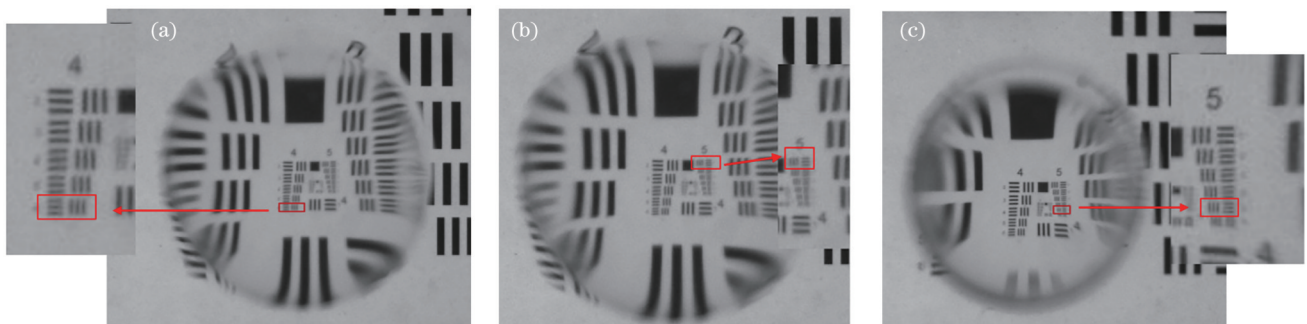


图 10 不同电压下基于平板电极的非球面组合液体透镜的分辨率。(a) 0; (b) 160 V; (c) 280 V
Fig. 10 Resolution of aspherical combined liquid lens based on flat electrode at different voltages. (a) 0; (b) 160 V; (c) 280 V

5 结 论

基于介电泳原理提出了一种基于平行平板电极的非球面组合液体透镜,该液体透镜由两个密封有两种非导电液体的非球面单个液体透镜组合而成。利用软件搭建了相关的光学模型,计算得到不同电压下的非球面组合液体透镜的焦距,并与非球面单个液体透镜进行对比分析,结果表明非球面组合液体透镜的焦距段要比非球面单个液体透镜要小,成像质量也更好;此

外还讨论平板电极的平行度对非球面组合液体透镜的焦距的影响。对所设计的非球面组合液体透镜进行了实验制备,测量了其焦距和成像分辨率,当工作电压由 0 增加至 280 V 时,焦距由 28.7135 mm 变化为 20.1943 mm,与仿真基本一致,实验验证了该透镜结构的可行性,其成像分辨率最大可达到 49.8244 lp/mm。

本实验所设计的非球面组合液体透镜与之前所提出基于平行平板电极的单个非球面双液体透镜^[20]相比,两者结构都比较简单,尺寸也都在毫米数量级,但

后者的成像分辨率约为 45.2550 lp/mm, 而前者的成像分辨率最大可达到 49.8244 lp/mm, 像质优于之前所提出的非球面双液体透镜。

参 考 文 献

- [1] Wei K, Zhao Y. A three-dimensional deformable liquid lens array for directional and wide angle laparoscopic imaging[C]// 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 20–24, 2013, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2013: 133-136.
- [2] 董健, 王春艳, 孙昊, 等. 腹腔镜用液体透镜变焦光学系统设计研究[J]. 中国激光, 2023, 50(21): 2107204.
Dong J, Wang C Y, Sun H, et al. Design and study of liquid lens zoom optical system for laparoscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(21): 2107204.
- [3] Zhao P P, Ataman Ç, Zappe H. Spherical aberration free liquid-filled tunable lens with variable thickness membrane[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21264-21278.
- [4] Choi S T, Son B S, Seo G W, et al. Opto-mechanical analysis of nonlinear elastomer membrane deformation under hydraulic pressure for variable-focus liquid-filled microlenses[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6133-6146.
- [5] Miccio L, Finizio A, Grilli S, et al. Tunable liquid microlens arrays in electrode-less configuration and their accurate characterization by interference microscopy[J]. Optics Express, 2009, 17(4): 2487-2499.
- [6] Lee S W, Lee S S. Focal tunable liquid lens integrated with an electromagnetic actuator[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(12): 121129.
- [7] Dong L, Agarwal A K, Beebe D J, et al. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels[J]. Nature, 2006, 442(7102): 551-554.
- [8] Xu S, Lin Y J, Wu S T. Dielectric liquid microlens with well-shaped electrode[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10499-10505.
- [9] Krogmann F, Monch W, Zappe H. Electrowetting for tunable microoptics[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(6): 1501-1512.
- [10] Cheng C C, Yeh J A. Dielectrically actuated liquid lens[J]. Optics Express, 2007, 15(12): 7140-7145.
- [11] Zhan Z X, Wang K Y, Yao H T, et al. Fabrication and characterization of aspherical lens manipulated by electrostatic field[J]. Applied Optics, 2009, 48(22): 4375-4380.
- [12] Lima N C, Mishra K, Mugele F. Aberration control in adaptive optics: a numerical study of arbitrarily deformable liquid lenses [J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6700-6711.
- [13] Wang J H, Zhou X, Luo L, et al. Tunable liquid lens integrated with aspheric surface[J]. Optics Communications, 2019, 445: 56-63.
- [14] Kong M M, Zhu L F, Chen D, et al. Effect of the liquid density difference on interface shape of double-liquid lens[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(3): 427-430.
- [15] Kong M M, Chen X, Yuan Y, et al. Optical model of a human eye's crystalline lens based on a three-layer liquid lens[J]. Current Optics and Photonics, 2019, 3(2): 177-180.
- [16] 孔梅梅, 潘世成, 袁东, 等. 方腔结构非球面液体透镜的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2122005.
Kong M M, Pan S C, Yuan D, et al. Design and analysis of aspheric liquid lens with square cavity structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2122005.
- [17] Ren H W, Wu S T. Introduction to adaptive lenses[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2012.
- [18] Mishra K, Murade C, Carreel B, et al. Optofluidic lens with tunable focal length and asphericity[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6378.
- [19] 梁丹. 基于微流控技术的可变液体光圈的设计与制作[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022: 23-24.
Liang D. Design and fabrication of microfluidic variable aperture[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022: 23-24.
- [20] 孔梅梅, 董媛, 徐春生, 等. 基于平行平板电极的非球面双液体透镜的仿真与实验分析[J]. 物理学报, 2023, 72(24): 244203.
Kong M M, Dong Y, Xu C S, et al. Simulation and experimental analysis of aspherical double-liquid lens based on parallel plate electrode[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(24): 244203.

Simulation and Experimental Analysis of Aspherical Combined Liquid Lens Based on Flat Electrode

Kong Meimei^{1*}, Dong Yuan¹, Xu Chunsheng², Liu Yue¹, Xue Yinyan¹, Li Mingyang¹, Zhang Shuhan¹

¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

²Nanjing NARI Information & Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China

Abstract

Objective As an important branch of microfluidic optics, microfluidic optics has become a key technology to promote the development of highly miniaturized and functional optics. Liquid lenses are a common form of microfluidic optical lenses, and as an important part of optical systems, they have obvious advantages over solid lenses, such as a reconfigurable geometry and tunable refractive index. At present, researchers have explored various techniques and tuning mechanisms to make liquid lenses, including fluid pressure lenses, electromagnetic wave lenses, electrowetting lenses and dielectrophoresis lenses. Unlike electrowetting driven liquid lenses, dielectrophoresis driven liquid lenses do not require

conducting liquid and do not produce problems such as evaporation or microbubbles. To correct aberrations in practical applications, it is necessary to design a liquid lens with an aspherical surface, which has the advantages of a simple structure and easy realization because of the use of continuous electrodes compared with patterned electrodes.

Methods Based on the dielectrophoresis effect, we design an aspherical combined liquid lens based on flat electrode. A certain dielectric constant difference exists between the two liquid materials filled with miscible pairs in the cavity. When the external voltage is applied, the droplet with high dielectric constant will move along the electric field direction and squeeze the droplet with low dielectric constant, and the curvature radius of the liquid-liquid interface will change. By adjusting the voltage applied to the two indium tin oxide (ITO) conductive glass flats in the middle, the curvature radius of the liquid-liquid interface can be changed to adjust the focal length. First, a model of an aspherical combined liquid lens based on a parallel flat electrode under different voltages is built by COMSOL, and the surface profile data of the aspherical interface are obtained. Then, the aspherical surface profile data and aspherical formula are fitted by MATLAB to obtain the corresponding aspherical coefficient. Finally, on this basis, the optical model of the aspherical combined liquid lens based on flat electrode is built by Zemax, and the focal length of the aspherical combined liquid lens under different voltages is obtained.

Results and Discussions First, we compare the aspherical combined liquid lens based on the flat electrode with the aspherical single liquid lens, which has the same liquid material and droplet volume as the aspherical composite liquid lens. The results show that the aspherical combined liquid lens has a smaller focal length and stronger focusing ability than the aspherical single liquid lens and is more suitable for camera lenses requiring a large depth of field (Fig. 5). In order to further study the characteristics of aspherical combined liquid lens based on flat electrode, COMSOL software is used to simulate the change of the interface profile of aspherical combined liquid lens based on flat electrode under different parallelism. In the simulation process of the model, the lower flat is set to be placed horizontally. When the upper and lower flat are not parallel, that is, the upper flat and the horizontal direction have a certain tilt angle, the electric field distribution in the liquid lens model is analyzed (Fig. 6). The interface profile data obtained in COMSOL is derived, then MATLAB is applied to fit the profile, and the comparison and analysis of aspherical combined liquid lenses with different parallelism is carried out by using Zemax. It is found that the focal length of the aspherical combined liquid lens is little affected when the flat electrode has a small inclination (1° to 4°) (Fig. 7).

Conclusions Based on the dielectrophoresis effect, an aspherical combined liquid lens based on flat electrode is designed in this study. The liquid lens consists of four ITO conductive flat glass plates, cavities, dielectric layers and hydrophobic layers parallel up and down. The focal length of the aspherical combined liquid lens under different voltages is calculated by using the relevant optical model, and the results show that the focal length of the aspherical combined liquid lens is smaller than that of the aspherical single liquid lens, and the imaging quality is better. The influence of the parallelism of the flat electrode on the focal length of the aspherical combined liquid lens is also discussed. The aspherical combined liquid lens is prepared experimentally, and its focal length and imaging resolution are measured. When the operating voltage increases from 0 to 280 V, the focal length varies from 28.7135 mm to 20.1943 mm, which is basically consistent with the simulation. The feasibility of the lens structure is verified by experiments. The imaging resolution is up to 49.8244 lp/mm. The designed aspherical combined liquid lens based on a flat electrode can provide a new scheme for the high-quality imaging of liquid lenses and their applications and can expand the application.

Key words optical device; dielectrophoresis principle; aspherical; flat electrode; liquid zoom lens