

## 方腔结构非球面液体透镜的设计与分析

孔梅梅\*, 潘世成, 袁东, 孙小波, 薛银燕, 赵瑞, 陈陶

南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 基于介电润湿液体透镜的原理, 利用 COMSOL 仿真软件设计了方腔结构的非球面双液体透镜模型, 分析了 MATLAB 工具对模型中界面面型的拟合精度。设计加工了具体的器件结构, 研究了非球面双液体透镜的面型变化情况。通过图像处理和面型拟合分析, 获得非球面面型的实验结果, 验证了方腔结构的非球面液体透镜结构的可行性。

**关键词** 光学设计; 液体透镜; 介电润湿效应; 非球面

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221803

## Design and Analysis of Aspheric Liquid Lens with Square Cavity Structure

Kong Meimei\*, Pan Shicheng, Yuan Dong, Sun Xiaobo, Xue Yinyan, Zhao Rui, Chen Tao

College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing 210023, Jiangsu, China

**Abstract** Based on the principle of electrowetting liquid lenses, an aspherical double-liquid lens model with a square cavity structure is designed using the COMSOL simulation software, and the accuracy of the MATLAB tool for fitting the interfacial shape of the model is analyzed. The specific device structure is designed and processed, and the surface change of the aspheric double-liquid lens is investigated. The experimental results of the aspheric surface are obtained via image processing and surface fitting analysis, thus verifying the feasibility of the aspheric liquid lens with a square cavity structure.

**Key words** optical design; liquid lens; dielectric wetting effect; aspheric surface

## 1 引言

传统光学设备通常会受到固定焦距的限制, 而自适应光学可以通过外部刺激来调节光学表面的形状, 从而调节焦距以克服这一限制。自适应光学系统被认为是固体透镜的有效替代, 可以达到许多先进的成像要求, 尤其是当它被应用到二维、三维的成像当中时, 可实现的功能包括宏观/微观成像、光学相干层析成像、广角成像、光谱成像、光学缩放和可切换的单目、双目视觉<sup>[1-3]</sup>。近几年, 小型化的自适应光学系统得到了很好的发展, 其中, 由于微流控液体透镜器件结构紧凑、焦距可调, 它的出现为原始光学系统的重新设计和改进提供了一条新路径<sup>[4]</sup>。在众多微流控透镜的驱动方式之中, 介电润湿技术已经成为操控液-液界面的有力工具。因此, 介电润湿液体透镜是当下微流控可调节透镜的重要研究方向, 可通过外部控制改变透镜的表面曲率来实现变焦, 能够实现主动聚焦、光学放大和

像差控制。近年来, 液体透镜已经得到广泛的应用, 如在手机摄像头<sup>[5]</sup>、内窥镜<sup>[6]</sup>、全息成像<sup>[7]</sup>等方面。

由于球面透镜具有球差等像差, 其成像质量受到影响, 而非球面透镜能实现多个球面透镜校正像差的效果。使用非球面透镜可以有效地减少透镜的数量, 从而减小光学系统的体积和数量, 这满足当下社会对轻量化光学系统的需求, 为相机和投影仪等光学系统的微型化和轻量化提供了可能<sup>[8]</sup>。

近年来, 国内外许多学者尝试在液体透镜中引入非球面<sup>[9]</sup>, 其中包括对一些更好的封装和检测方法的探索。例如, 2014年, 中国科学技术大学王克逸教授带领的课题组使用电场调控液滴法来制作非球面透镜<sup>[10]</sup>。2016年, 德国弗莱堡大学 Zhao 等<sup>[11]</sup>采用了一种弯月面状膜来构筑非球面, 充液室的顶部由可变厚度的弹性体膜密封, 底部由刚性基底密封, 通过压力入口施加外部压力, 弯月面状的膜可以膨胀(放气)成凸(凹)形。2017年, 苏州大学丁增千<sup>[12]</sup>同样采用了非均

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-06-09; 录用日期: 2022-06-17; 网络首发日期: 2022-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61905117, 61775102)

通信作者: \*kongmm@njupt.edu.cn

匀膜来实现非球面,并通过旋涂和浇注技术制备非均匀膜,通过键合技术封装液体透镜,通过光学相干断层扫描技术非接触式动态测量液体透镜表面的形貌变化。2018年,荷兰代尔夫特理工大学 Strauch 等<sup>[13]</sup>利用液体表面振荡理论研究了非球面液体透镜,通过人为地制造液面振荡来创造特定形状的非球面。2019年,四川大学 Wang 等<sup>[14]</sup>提出并实验验证了一种可调谐的非球面液体透镜,通过倒悬的聚二甲基硅氧烷(PDMS)液滴自身的重力和液体界面张力形成非球面,再通过对非球面面型的优化,显著降低球差和畸变。

本文主要基于方腔结构的非球面液体透镜进行设计与分析。液体透镜是具有方形外腔的双液体透镜,驱动方式为介电润湿驱动。与圆柱腔相比,方腔结构的透镜更容易实现 2 个正交方向上不同的曲率面型,从而获得更多形式的非球面结构。方腔结构的透镜比已有的非球面液体透镜的面型形式更丰富,而且结构更简单,更易得到广泛应用。本文首先介绍非球面液体透镜的理论;然后根据双液体非球面透镜的光学特性,采用乙二醇和二甲硅油溶液,具体设计了双液体透镜的光学系统模型,模拟了不同非球面面型的变化;最后,制作透镜,实验分析了非球面液体透镜的界面面型。

## 2 非球面液体透镜理论

### 2.1 介电润湿效应

介电润湿效应的结构原理如图 1 所示,其中  $\gamma_{LG}$  为液滴与空气的界面张力,  $\gamma_{SG}$ 、 $\gamma_{SL}$  为固体基底与空气的界面张力,  $\theta$  为接触角,  $U$  为工作电压。在电极和导电液体之间添加了一层介电层,当施加电压时,在介电层的电场下,可以有效地控制接触角  $\theta$ 。当施加工作电压  $U$  时,接触角  $\theta$  与  $U$  之间的关系满足杨氏(Lippman-Young)方程<sup>[5]</sup>

$$\cos \theta = \cos \theta_0 - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d \gamma_{LG}} U^2, \quad (1)$$

式中:  $\theta_0$  为初始接触角;  $\epsilon_0$  为绝缘层的介电常量;  $\epsilon_r$  为真空介电常量;  $d$  为绝缘层厚度。当  $d$  很小时,  $\cos \theta > 1$

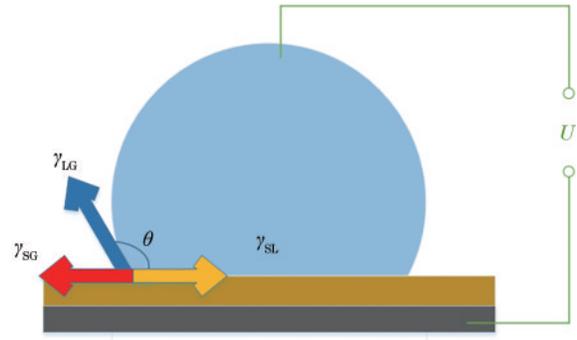


图 1 介电润湿结构的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dielectric wetting structure

(实际上是不存在这样的接触角的),此时为击穿状态;而  $d$  过大时,若施加电压,电压对接触角的影响减小。选择合适的介电层厚度,既需要尽可能减小介电层的厚度,从而降低驱动电压的值,又需要保持液体透镜本身处于稳定的电场环境下,介电层不能被击穿。

### 2.2 液体密度与液体界面面型

非球面透镜的面型与双液体的密度差相关<sup>[15-19]</sup>。理论上,液体密度越相近,面型就越接近球面。当液体间的密度差为 0 时,界面形状完全为球形;当液体间的密度差不为 0 时,界面形状变为非球面,并且液体密度差越大,界面的非球面性越明显,形成的光斑的尺寸越小,图像质量越好<sup>[20]</sup>。

当重力指向方向为下方,密度较小的液体为双液体透镜的上方液体时,得到的含有非球面界面的液体透镜相比界面为球面的液体透镜,在成像质量方面表现较好。并且,基于对不同密度差的液体组合系统的比较分析,发现非球面度和成像质量没有正相关性<sup>[21]</sup>。

## 3 模型的建立与仿真分析

采用 COMSOL 软件构建液体透镜模型:首先,建立方腔结构的非球面双液体透镜模型并且设置相应的参数;其次,对整个透镜模型进行网格剖分并进一步细化液体界面处的网格;最后,进行研究和计算。

图 2(a)是方腔的剖面图,其中:下方液体是乙二醇的导电溶液(2% 四丁基氯化铵),密度为  $1115 \text{ kg/m}^3$ ,

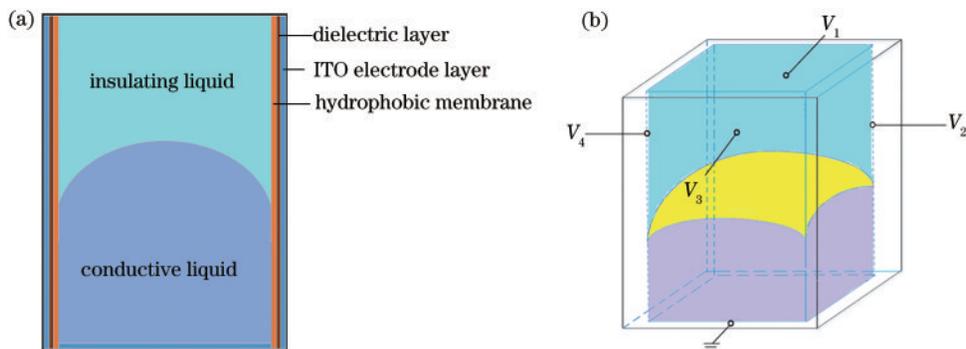


图 2 双液体结构的方腔结构模型。(a)方腔横截面;(b)立体图

Fig. 2 Square cavity structure model of double liquid structure. (a) Cross section of square cavity; (b) stereogram

折射率为 1.4306,黏度为 0.001 Pa·s;上方液体为二甲硅油溶液,密度为 965 kg/m<sup>3</sup>,折射率为 1.410,黏度为 0.02566 Pa·s,是绝缘液体。腔室内壁镀有锡-钢氧化物(ITO)导电层、介电层、疏水层。图 2(b)为立体模型,导电液体与绝缘液体的位置与剖面图一致。在 4 个壁面上增加了 4 个驱动电压,分别为 V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>、V<sub>3</sub>、V<sub>4</sub>。

首先,尝试对 4 个壁面施加相同的电压。在这种驱动条件下,对面型进行拟合,监测最终的拟合精度。由于对称性,可以采用类似偶次非球面公式

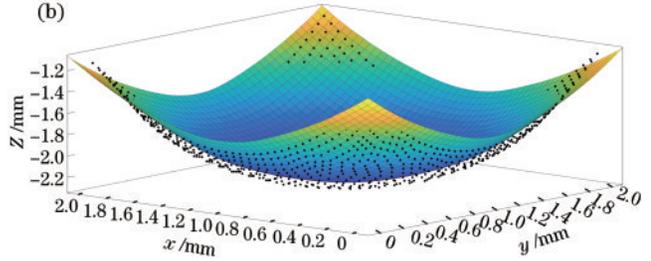
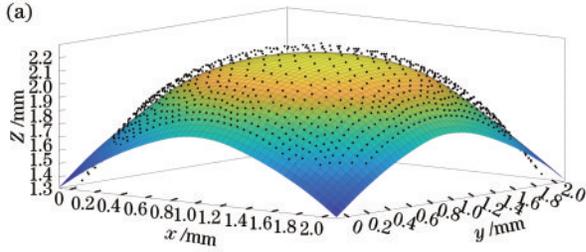


图 3 对 4 个壁面同时施加电压时的面型变化。(a) 80 V; (b) 300 V

Fig. 3 Surface shape change driven by simultaneous voltage application on four walls. (a) 80 V; (b) 300 V

其次,通过对左右侧壁施加相同的电压,对前后壁面不加电压的方式,实现 2 个方向上不同曲率的曲面。由于透镜面型的 2 个正交方向的曲率不相同,面型不再对称,尝试使用一些适用于方腔结构的其他非球面拟合公式

$$Z = Z_0 + A_1 \cos(x) + B_1 \cos(y) + A_2 \cos(2x) + C_1 \cos(x) \cos(y) + B_2 \cos(2y), \quad (3)$$

$$Z = Z_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4 + A_5 x^5 + B_1 y + B_2 y^2 + B_3 y^3 + B_4 y^4 + B_5 y^5, \quad (4)$$

$$Z = \frac{Z_0 + A_1 x + B_1 y + B_2 y^2 + B_3 y^3}{1 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + B_1 y + B_2 y^2}, \quad (5)$$

$$Z = \frac{Z_0 + A_1 x + B_1 y + B_2 y^2 + C_2 xy}{1 + A_1 x + B_1 y + A_2 x^2 + B_2 y^2 + C_2 xy}, \quad (6)$$

式中:Z<sub>0</sub>为液体界面的相对位置;A、B、C分别为对应的非球面系数。为确保拟合适用性,对式(3)~(6)的拟合精度进行分析,如表 1 所示。

表 1 中用 R-square 值表示拟合公式的拟合精度,该值越接近 1,表示拟合的效果越好。由表 1 可知,4 个公式的拟合精度都较高,其中式(3)的拟合精度最高,

表 1 不同电压下 4 个拟合公式的拟合精度

Table 1 Fitting accuracy of four fitting formulas at different voltages

Formula	R-square value		
	60 V	90 V	140 V
Fitting formula(3)	0.9992	0.9989	0.9937
Fitting formula(4)	0.9760	0.9892	0.9918
Fitting formula(5)	0.9837	0.9884	0.9854
Fitting formula(6)	0.9837	0.9884	0.9853

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

式中:a为液体透镜界面的相对位置;b、c、d、e、f这 5 个值分别为偶次非球面系数;Z、x、y为液面各点的位置坐标。

如图 3 所示,对 4 个壁面同时施加电压时,面型各个方向的变化曲率相同。电压为 80 V 和 300 V 时,液体界面分别呈现出上凸和下凹的状态,面型的拟合精度分别为 0.9404 和 0.9342,精度均较高并且满足对称性特点。

但考虑到后期在 Zemax 光学软件中的应用,选择式(4)作进一步的分析。基于此公式,维持左右侧壁施加的相同电压不变,并对前后壁面也施加同样的电压。当驱动电压逐渐增大时,面型出现了“双二次曲面-圆柱面-马鞍面”的变化趋势,即将腔室的前后方向、左右方向分为两部分,其中一部分保持固定曲率,另一部分的曲率逐渐变化,拟合的情况如图 4 所示。

## 4 初步的实验研究

### 4.1 材料与器件选择

为了更好地研究方腔结构的非球面液体透镜,设计加工了具体的器件结构,主要选用的材料和器件如下:

1) 1 片 15 mm×15 mm、厚度为 1 mm 的 ITO 玻璃片,4 片 11 mm×15 mm、厚度为 1 mm 的 ITO 玻璃片。玻璃片的透过率大于 80%,ITO 玻璃的方阻为 7~8 Ω,ITO 膜厚度为 185 nm,玻璃的折射率为 1.55。

2) 乙二醇的导电溶液,密度为 1115 kg/m<sup>3</sup>,折射率为 1.4306。绝缘液体为二甲硅油溶液,密度为 965 kg/m<sup>3</sup>,折射率是 1.410。

3) 电源、紫外固化胶、紫外探照灯,分别用于提供仪器电源、器件键合以及胶水固化。利用紫外灯照射紫外胶,可以使紫外胶固化。

4) 真空镀膜机,用于在 ITO 玻璃表面镀高度致密的 SiO<sub>2</sub> 薄膜。

5) 接触角测量平台,内置照射光源,用于调节照射光源以及设置用于捕捉面型的透镜。

6) 超声波清洗仪,主要用于对玻璃的清洁。玻璃片的清洁度对于介电层在玻璃片上成膜的质量有很大

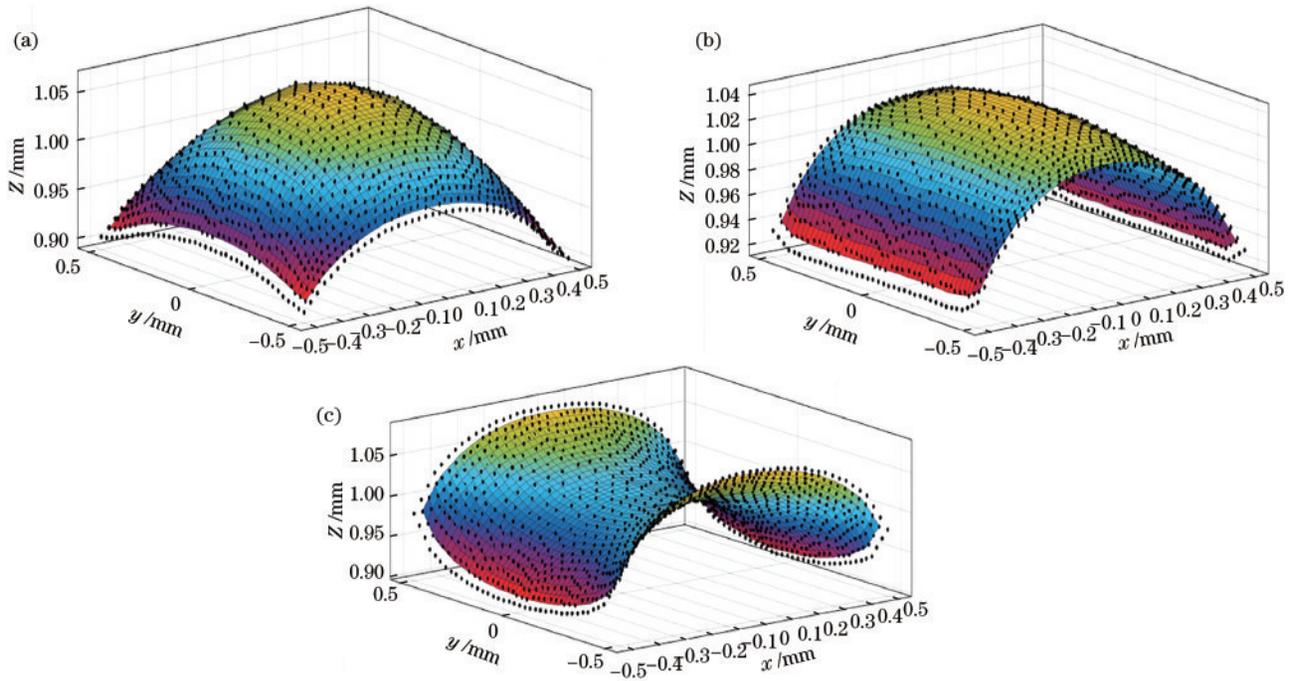


图 4 对前后壁面同时施加不同电压时的面型变化。(a) 60 V; (b) 90 V; (c) 140 V

Fig. 4 Change of surface shape driven by different voltages applied to the front and rear walls at the same time. (a) 60 V; (b) 90 V; (c) 140 V

的影响,需要对玻璃片进行清洗预处理。

#### 4.2 器件制作

利用无水乙醇擦拭玻璃片以保持内壁清洁,在玻璃片上涂覆厚度为  $3\ \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  膜,选用  $11\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$  的镀膜后厚度为  $1\ \text{mm}$  的玻璃片形成方腔通道,将玻璃方腔键合到底部的 ITO 玻璃板上,成品如图 5(a) 所示。外腔搭建完毕后,在方腔液体透镜的侧壁和底部的导电玻璃上加电极,用滴管先后加入高度为  $5\ \text{mm}$  的乙二醇的盐溶液以及等量的硅油溶液,透明样品如图 5(b) 所示。将成品放置于接触角测量仪上,拍摄效果如图 6 所示。连接电源,对 4 个壁面同时施加电压。在逐步施加驱动电压后,界面面型开始发生变化,由上凸向下凹转变。通过测量平台相机捕获的界面面型如图 7 所示。

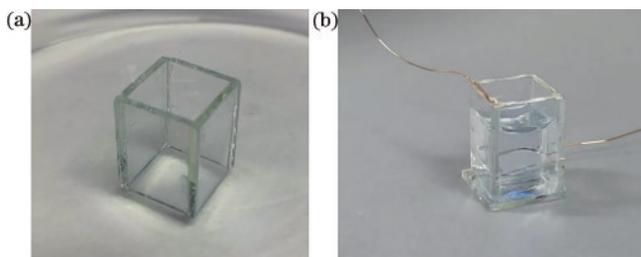


图 5 器件制作图。(a) 组装后的外腔示意图; (b) 器件结构体  
Fig. 5 Device fabrication diagrams. (a) Schematic diagram of the assembled outer cavity; (b) device structure

#### 4.3 实验分析与结果

将拍摄完成的原片导入 MATLAB 软件,通过预处理、增强灰度对比度、中值滤波、固化轮廓曲线、导出至 Excel 等步骤对图片进行处理,图像处理结果如图 8

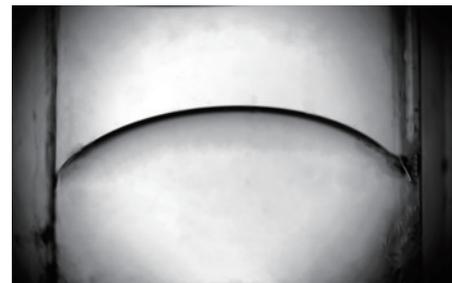


图 6 液体透镜侧面拍摄图  
Fig. 6 Side view of liquid lens

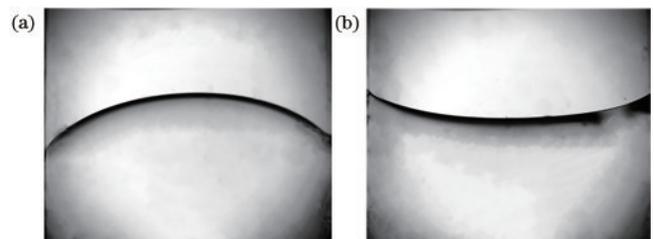


图 7 外加驱动电压下的面型变化。(a) 80 V; (b) 300 V  
Fig. 7 Surface shape change diagram under applied driving voltage. (a) 80 V; (b) 300 V

所示。为了获取可视化程度更高的曲线拟合结果,提取轮廓曲线的像素坐标并进行曲线拟合等操作,利用式(2)输出的最终面型如图 9 所示。

在驱动电压为  $80\ \text{V}$  和  $300\ \text{V}$  的情况下,得到的非球面面型的拟合精度分别为  $0.9976$  和  $0.9785$ 。对图 3 和图 9 进行比较,可知实验的结果初步验证了这种液体结构的非球面的实现方式。后续将进一步对其他非

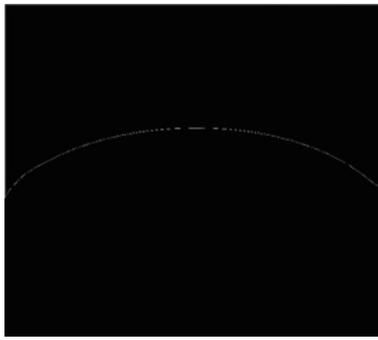


图 8 图像处理结果(以 80 V 时的界面为例)

Fig. 8 Image processing result (taking the interface at 80 V as an example)

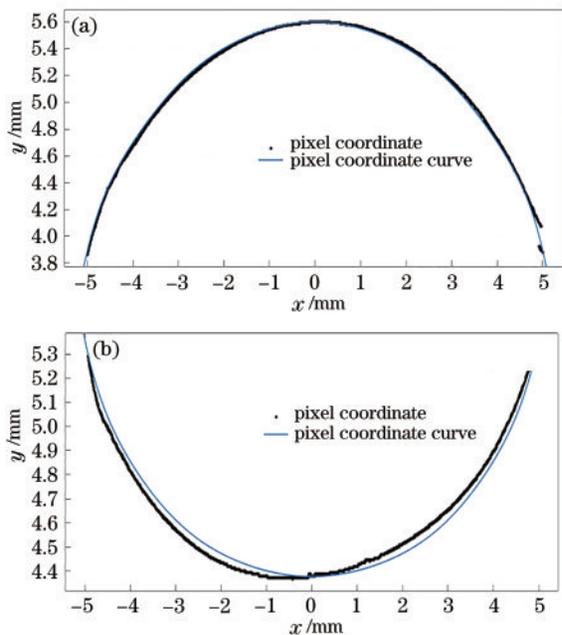


图 9 界面面型的拟合图。(a) 80 V; (b) 300 V

Fig. 9 Fitting diagrams of interface shape. (a) 80 V; (b) 300 V

球面面型的实验展开分析研究。

## 5 结 论

基于介电润湿原理,以仿真分析结合实验验证的方式设计和制作了方腔结构的双液体非球面液体透镜,探究了其面型的变化规律。利用 COMSOL 仿真软件设计了方形腔结构的非球面双液体透镜模型,利用 MATLAB 软件对不同电压下的非球面面型进行拟合。根据在左右壁与前后壁施加电压的不同情况,选择相应的拟合公式进行面型拟合,初步开展了方腔结构的双液体透镜实验,并对实验的结果进行图像处理与面型拟合。研究的意义在于,使用方腔结构的非球面液体透镜不仅可实现变焦性能,而且可以获得多种非球面面型,为提高光学系统的像质提供了更多的选择。另外,这种透镜在 2 个方向上都可以产生不同的曲率,这符合人眼角膜的面型特性,因此该透镜还可以应用于仿生眼球模型设计,有助于医学方面的研究工

作者对眼球屈光状态和介质分布等方面进行深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] 王心怡. 介电润湿法微液滴驱动芯片及其控制系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
Wang X Y. Design of electrowetting-on-dielectric based micro droplets driving chip and its control system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [2] 黄翔, 林四英, 谷丹丹, 等. 液体变焦镜头的研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1179-1194.  
Huang X, Lin S Y, Gu D D, et al. Review on progress of variable-focus liquid lens[J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1179-1194.
- [3] 徐庆宇, 沈凯, 肖长诗. 电润湿显示单元研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(4): 225-229.  
Xu Q Y, Shen K, Xiao C S. The fabrication of the electrowetting display unit[J]. Optoelectronic Technology, 2010, 30(4): 225-229.
- [4] Marks R, Mathine D L, Schwiegerling J, et al. Astigmatism and defocus wavefront correction via Zernike modes produced with fluidic lenses[J]. Applied Optics, 2009, 48(19): 3580-3587.
- [5] Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [6] Seo S W, Han S, Seo J H, et al. Microelectromechanical-system-based variable-focus liquid lens for capsule endoscopes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(5): 524041-524044.
- [7] Wang D, Liu C, Wang Q H. Method of chromatic aberration elimination in holographic display based on zoomable liquid lens[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10058-10066.
- [8] 王琼华, 王金辉, 李磊, 等. 一种非球面电润湿液体透镜: CN107678155A[P]. 2018-02-09.  
Wang Q H, Wang J H, Li L, et al. Aspheric electrowetting liquid lens: CN107678155A[P]. 2018-02-09.
- [9] Cao Z L, Cheng C, Wang K Y. Numerical simulation on aspherical lens modulated by electrostatic force[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9281: 92810H.
- [10] 陈德良. 基于介电润湿技术的微流体光学器件设计、建模与仿真[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.  
Chen D L. Design, modeling and simulation of microfluidic optical device based on electrowetting[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [11] Zhao P P, Ataman Ç, Zappe H. Gravity-immune liquid-filled tunable lens with reduced spherical aberration[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7816-7823.
- [12] 丁增千. 基于非均匀薄膜的液体透镜设计与制备[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.  
Ding Z Q. Design and fabrication of liquid lens with inhomogeneous membrane[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.

- [13] Strauch M, Somers P A A M, Bociort F, et al. Creation of aspheric interfaces on an electrowetting liquid lens using surface oscillations[J]. AIP Advances, 2018, 8(11): 115224.
- [14] Wang J H, Zhou X, Luo L, et al. Tunable liquid lens integrated with aspheric surface[J]. Optics Communications, 2019, 445: 56-63.
- [15] 胡水兰, 彭润玲, 李一凡, 等. 双层介电薄膜结构双液体变焦透镜的研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0223003.  
Hu S L, Peng R L, Li Y F, et al. Research on the double-liquid lens with double-layer dielectric films[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0223003.
- [16] 詹珍贤. 非球面液滴微透镜及其阵列的制作和应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.  
Zhan Z X. Fabrication and applications of aspherical liquid micro lens and lens array[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [17] 彭润玲, 陈家璧, 庄松林. 电湿效应变焦光学系统的设计与分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1141-1146.  
Peng R L, Chen J B, Zhuang S L. Design and analysis of a variable-focus optical system based on electrowetting [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1141-1146.
- [18] 魏茂伟, 彭润玲, 汤征洋, 等. 低压双液体变焦透镜的理论及工艺研究[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 0523005.  
Wei M W, Peng R L, Tang Z Y, et al. Study on theory and technology of low voltage variable-focus double liquid lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 0523005.
- [19] 王亮, 段俊萍, 王万军, 等. 介电材料在介电润湿器件中的应用进展[J]. 材料导报, 2016, 30(19): 70-76, 88.  
Wang L, Duan J P, Wang W J, et al. Application advance of dielectric materials in electrowetting-on-dielectric devices[J]. Materials Review, 2016, 30(19): 70-76, 88.
- [20] 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.
- [21] 朱凌峰, 孔梅梅, 宋驰, 等. 电润湿双液体透镜的界面形状分析[J]. 光电工程, 2016, 43(12): 65-71.  
Zhu L F, Kong M M, Song C, et al. Analysis on the interface shape of double liquid lens based on electrowetting technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(12): 65-71.