

## 基于组合结构的双界面液体透镜的设计与分析

刘悦 孔梅梅 徐春生 董媛 薛银燕 李明洋 张舒涵

### Design and analysis of the double-interface liquid lens based on a combination structure

LIU Yue, KONG Mei-mei, XU Chun-sheng, DONG Yuan, XUE Yin-yan, LI Ming-yang, ZHANG Shu-han

#### 引用本文:

刘悦, 孔梅梅, 徐春生, 董媛, 薛银燕, 李明洋, 张舒涵. 基于组合结构的双界面液体透镜的设计与分析[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1255–1264. doi: 10.37188/CO.2024-0068

LIU Yue, KONG Mei-mei, XU Chun-sheng, DONG Yuan, XUE Yin-yan, LI Ming-yang, ZHANG Shu-han. Design and analysis of the double-interface liquid lens based on a combination structure[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1255-1264. doi: 10.37188/CO.2024-0068

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0068>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 电润湿透镜重复变焦精度指标及其优化方法

Repeated zoom accuracy index of an electrowetting lens and its optimization method  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 868 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0209>

#### 基于最小偏向角法的高精度液体折射率测量装置的优化设计与测量研究

Optimization design and test of a high-precision measuring device of liquid refractive index based on the method of minimum deviation angle  
*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(4): 789 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0064>

#### 低维光电材料缺陷与界面增强拉曼散射

Defects- and interface-enhanced Raman scattering in low-dimensional optoelectronic materials  
*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(1): 170 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0145>

#### 基于透镜阵列的三维姿态角度测量

3D position angle measurement based on a lens array  
*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(1): 45 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0129>

#### 基于Au纳米平行双棒超表面阵列的双Fano共振和折射率传感器特性研究

Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel-arranged Au nanorod dimer metasurface arrays  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 961 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0008>

#### 基于双速度环观测器的光电平台稳定方法

Stabilization method of photoelectric platform based on double speed loop observer  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(5): 1168 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0048>

文章编号 2097-1842(2024)06-1255-10

## 基于组合结构的双界面液体透镜的设计与分析

刘悦<sup>1</sup>, 孔梅梅<sup>1\*</sup>, 徐春生<sup>2</sup>, 董媛<sup>1</sup>, 薛银燕<sup>1</sup>, 李明洋<sup>1</sup>, 张舒涵<sup>1</sup>

(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:** 为了提高液体透镜的成像质量和变焦范围, 应用介电泳和液压驱动, 设计了一款基于组合结构的双界面液体透镜, 其主要由介电泳双液体透镜和 PDMS 薄膜液体透镜组成。首先, 在 Comsol 软件中建立液体透镜模型, 研究不同电压下的液滴界面和 PDMS 薄膜的面型变化, 并导出两个曲面的面型数据。其次, 在 Matlab 软件中, 采用非球面表达式进行拟合, 得到不同电压下液滴的界面和薄膜的面型图及其相应的非球面系数。最后, 在 Zemax 软件中, 构建出相应的双界面组合液体透镜光学模型, 像面选取为高斯像面, 并通过相应器件的制备与初步实验研究, 将仿真结果和实验数据进行比较分析。结果表明, 所设计的基于组合结构的双界面液体透镜仿真和实验的变焦范围基本一致, 同时实验获得的变焦比可达 2.1254、成像分辨率最大可达 101.5937 lp/mm。本文设计的基于组合结构的双界面液体透镜具有结构简单紧凑、界面可控性强、成像分辨率高的优点。

**关键词:** 液体透镜; 液压驱动; 介电泳效应; 双界面; PDMS 膜

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0068

CSTR: 32171.14.CO.2024-0068

## Design and analysis of the double-interface liquid lens based on a combination structure

LIU Yue<sup>1</sup>, KONG Mei-mei<sup>1\*</sup>, XU Chun-sheng<sup>2</sup>, DONG Yuan<sup>1</sup>, XUE Yin-yan<sup>1</sup>,

LI Ming-yang<sup>1</sup>, ZHANG Shu-han<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics(Future Technology),

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. NARI Information & Communication Technology CO., Ltd., Nanjing 211100, China)

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

**Abstract:** In order to improve the image quality and variable range of focal length of liquid lenses, a double-interface liquid lens based on a combination structure is designed utilizing dielectrophoretic and hydraulic drive mechanisms, which mainly consists of a dielectrophoretic double-liquid lens and a PDMS membrane liquid lens. First, the liquid lens model is established with Comsol software, the surface profile changes of droplets and PDMS membrane under different voltages are studied, and the surface profile data of two surfaces are derived. Second, the aspherical expression is used to fit with Matlab software, and the interface profiles of droplets and PDMS membrane under different voltages and the corresponding aspherical coefficient

收稿日期: 2024-04-10; 修订日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61905117, No. 61775102)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61905117, No. 61775102)

are obtained. Finally, the corresponding double-interface combined liquid lens optical model is built with Zemax software, and the image plane is selected as the Gaussian image plane. The simulation and experimental data are compared and analyzed through the corresponding device's fabrication and the preliminary experimental research. The results show that the variable focal length range of the designed double-interface liquid lens based on the combined structure of the simulation is consistent with that of the experiment. Additionally, the results show that the zoom ratio and the imaging resolution can reach 2.1254 and 101.5937 lp/mm, respectively. The double-interface liquid lens based on the combination structure has the advantages of a simple and compact structure, strong interface adjustability, and high resolution imaging.

**Key words:** liquid lens; hydraulic drive; dielectrophoretic effect; double interfaces; PDMS membrane

## 1 引 言

关于液体透镜的驱动技术, 研究与应用较多的是电控驱动和液压驱动。其中电控驱动中的介电泳技术使用的两种液体是不导电液体, 也就不会产生蒸发和微气泡等问题, 因此, 只需选择折射率和介电常数差较大的两种液体即可, 这进一步拓宽了液体的选择范围<sup>[1]</sup>。液压驱动的液体透镜具有结构简单、变焦范围大、有效口径大、成本低和稳定性好的优点<sup>[2]</sup>。近年来国内外研究人员对有关介电泳或液压液体透镜开展了大量研究。

在介电泳液体透镜方面, 2006 年, Cheng C C 等人提出了一种由介电泳 (Dielectrophoresis, DEP) 力驱动的液晶液滴透镜<sup>[3]</sup>, 在非均匀交流电场作用下, 液晶液滴透镜受到 DEP 力的作用而发生形变, 当电极间距为 50  $\mu\text{m}$ , 外加电压为 0~200 V 时, 变焦范围为 2.6~1.6 mm。2008 年, 美国佛罗里达中央大学的 Ren H 等人提出了一种基于介电泳效应的可调焦距液体微透镜阵列<sup>[4]</sup>。其底板电极具有孔径为 140  $\mu\text{m}$  的圆孔图案, 而顶板电极是连续的, 外加电压会产生不均匀电场, 当电压从 0 V 到 88 V 时, 变焦范围为 2.1 mm 到 1.4 mm。2015 年, 韩国全北国立大学的 Xu M 等人提出将 ITO 电极图案化成具有径向叉指状条带的介电泳液体透镜<sup>[5]</sup>, 当电压从 0 V 到 45 V 变化时, 直径为 2.3 mm 的液体透镜的焦距可从 12 mm 变到 5 mm, 在松弛状态下, 透镜分辨率可达 40 lp/mm。2017 年, 韩国全北国立大学的 Jin B 等人利用介电泳驱动设计了一款基于人字形图案电极驱动的微流控光学透镜<sup>[6]</sup>, 利用人字形图案电极, 施加电压后, 液滴可在透镜中央实现有效且近乎对称的变形。

2018 年, 香港理工大学的 Chen Q 等人提出了一种平面液体透镜<sup>[7]</sup>, 利用 DEP 力将液体透镜从双凹形连续调谐到双凸形, 焦距可以实现从 -0.5 mm 到无穷大再到 +0.5 mm 的连续调制。

在液压驱动液体透镜方面, 2007 年, 佛罗里达中央大学的 Ren H 和 Wu S T 等人设计了一种薄弹性膜液体透镜<sup>[8]</sup>, 在其顶部基板上有一外表面用薄弹性膜密封的 5 mm 圆孔, 并且底部圆孔也利用薄弹性膜密封在底部基板的内表面上。通过顶部基板的膜向内施加压力, 使底部基板的膜向外膨胀, 从而形成平凸透镜, 透镜的通光孔径为 5 mm, 分辨率大于 25 lp/mm, 响应时间约为 40 ms。2010 年, 新加坡国立大学的 Hong B Y 等人设计了一种新型的液压液体透镜<sup>[9]</sup>, 在整个透镜结构中, 底部有用来补偿薄膜形变期间出现的固有球差的固定非球面, 结果表明该透镜在特定的工作区域 (焦距小于 24 mm) 内, 光学性能得到了显著改善, 在一个透镜上可同时实现高焦距可调性及光学质量提高, 且不增加制作复杂性。2016 年, 浙江大学的 Du J W 等人设计并制作了一种基于非球面固液混合变焦透镜的仿生光学成像系统<sup>[10]</sup>, 变焦透镜由聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 透镜、聚甲基丙烯酸甲酯透镜和液体乙基硅油组成, 通过使用微量注射器将液体泵入或泵出腔体来改变 PDMS 薄膜曲率, 从而使透镜焦距发生变化, 焦距范围为 25.05~14.61 mm, 屈光度变化为 28.5D, 大于人眼屈光度变化量。2018 年, 浙江大学的陈帅等人设计了一款 PDMS 薄膜型可变焦液体透镜系统<sup>[11]</sup>, 利用固体透镜校正像差, 并对整个系统进行像差分析, 结果表明该透镜系统的球差比采用单个薄膜液体透镜时大大减小。2019 年, 华中科技大学的 Zhou H 等人提出了一种新型基于弹性

膜的可调非球面液体透镜的设计方案<sup>[12]</sup>,其膜的横截面被设计为具有明确定义的非球面轮廓的平凸形状。

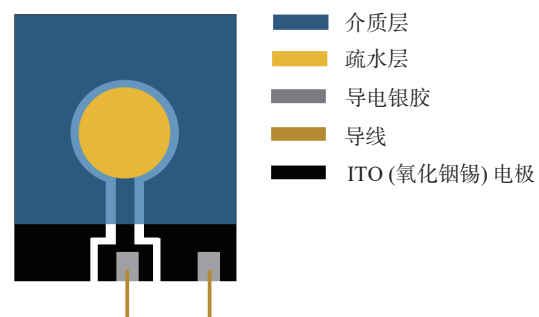
介电泳和液压驱动的可变焦液体透镜虽然设计多样,但是它们都有各自缺点,比如:Cheng C C提出的液体透镜变焦比较低;Xu M提出的液体透镜虽然变焦比增加了,但是分辨率不高;Chen Q提出的液体透镜虽然变焦范围广,但是该透镜仅在平面上能适用,可见目前对于大变焦比和高分辨率透镜的研究仍有不足。本文结合本课题组对基于平面电极的非球面双液体透镜的已有研究<sup>[13]</sup>,在结构中添加PDMS膜,设计了一种基于组合结构的双界面液体透镜结构。通过理论仿真,对光学系统的成像质量进行分析。同时结合实验数据,对比分析了未注液时不同电压下和同一电压(200 V)下不同注液量时透镜的仿真和实验变焦范围。并对制作的透镜成像分辨率进行了实验分析。本文中的注液量指的是将PDMS膜的平面状态作为初始状态,相较该状态增加的液体体积。

## 2 基本原理与结构设计

改变液体透镜中的液体界面曲率通常有两种方法:一种是使用两种不混溶液体之间的界面作为液体可变形界面<sup>[14-16]</sup>,这种方法可以利用电控驱动实现,如介电泳驱动;另一种就是基于透明弹性薄膜的液压液体透镜<sup>[17-18]</sup>。在第一种方法中,若微粒位于不均匀电场中,由于局部电场强度不同,会产生一种净力,这种力就是介电泳(Dielectrophoresis, DEP)力。DEP描述的是电介质粒子由于处于不均匀电场而产生介电极化,从而引起位移的现象,这种现象与外加电场有关。介电泳液体透镜的液滴在DEP力的影响下向更强的电场强度方向移动,随着外加电压的增加,DEP力也不断变化,固-液之间的接触角也随之变化<sup>[1]</sup>。在第二种方法中,透明的弹性薄膜一般附着在透明腔室表面,腔室内充满液体,将液体泵入或泵出腔室可以使薄膜发生形变,从而使其表面曲率发生变化,由此可以实现基于薄膜的液压液体透镜的可变焦性<sup>[19]</sup>。

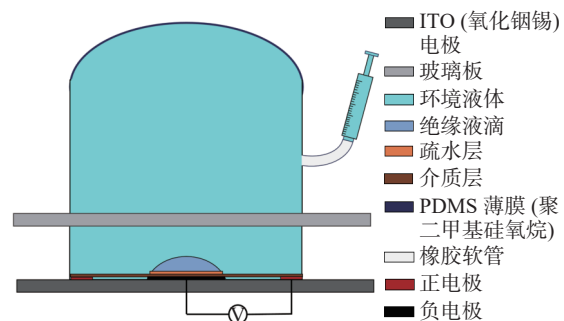
基于介电泳和液压驱动,基于组合结构的双

界面液体透镜结构示意图如图1(彩图见期刊电子版)所示。底部采用氧化锡锡(ITO)制成表面刻蚀环形图案的平面电极(图1(a)),电极表面涂敷一层SU8,作为介质层,再涂敷一层Parylene溶剂,作为疏水层。柱状透明腔体内部先注满密度为 $1000\text{ kg/m}^3$ ,介电常数为78.36,折射率为1.333的去离子水作为环境液体,再将密度为 $970\text{ kg/m}^3$ ,介电常数为2.7,折射率为1.403的甲基硅油作为液滴附着在疏水层上。采用普通玻璃板进行封顶,形成一个基于平面电极的介电泳双液体透镜结构,其腔体外径为17 mm,内径为13 mm,高度为4 mm。然后,基于介电泳双液体透镜结构,在玻璃板上粘一个含有微通道的腔体,将注射器连接到微通道上。腔体上部用PDMS膜封装,形成一个基于液压驱动的PDMS薄膜液体透镜结构,其腔体内的液体也是去离子水,腔体的外径和内径尺寸与下方的双液体透镜结构相同,侧壁的微通道孔径为4.2 mm,腔体高为10 mm。基于下方介电泳双液体透镜中的液-液界面和上方PDMS薄膜液体透镜中的液-膜界面,最终得到基于组合结构的双界面液体透镜,如图1(b)所示。



(a) 平面环形电极示意图

(a) Schematic diagram of the planar annular electrode



(b) 组合式液体透镜的结构示意图

(b) Schematic diagram of the structure of the combined liquid lens

图1 基于组合结构的双界面液体透镜结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of the double-interface liquid lens based on combination structure

### 3 仿真分析

基于组合结构的双界面液体透镜建模仿真主要分为三个步骤,其流程如图 2 所示。首先在 Comsol 软件中建立所设计的双界面组合液体透镜模型,研究不同电压下液滴和液体不同注入量下的 PDMS 膜的形变量,并导出两个界面的面型数据。其次,在 Matlab 软件中对面型数据进行拟合,得到非球面系数,同时,由于薄膜在形变时的面型并不是球形<sup>[1]</sup>,因此可以通过非球面方程对 PDMS 膜进行拟合,从而获得 PDMS 膜的非球面系数。最后,在 Zemax 软件中根据得到的非球面系数,建立基于组合结构的双界面液体透镜的光学模型。

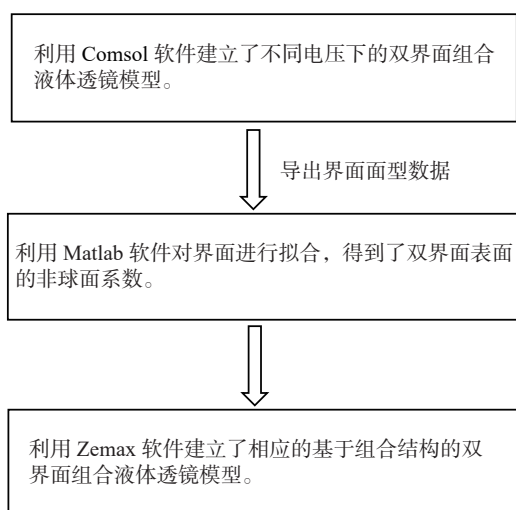


图 2 利用软件进行双界面组合液体透镜建模的仿真流程图

Fig. 2 Simulation flow chart of the double-interface combined liquid lens modeling using software

在 Comsol 软件中,首先建立透明腔体,其直径为 13 mm,高为 4 mm,下表面是厚度为 0.7 mm 的平面环形电极板,上表面是同厚度的透明玻璃板。然后在材料类别里根据液体的物理属性,分别添加环境液体和液滴,其中液滴在电极板上覆盖直径约为 4.2 mm,随后在上层玻璃板上表面添加高度为 10 mm 的腔体,并设置腔内液体为去离子水,再在该腔体上设置注入不同体积去离子水时的 PDMS 膜表面,最后在平面环形电极板上添加静电场,得到如图 3(彩图见期刊电子版)所示的模型,图 3(a)和图 3(b)分别是它的侧面图和立

体斜视图。为了优化建模,进一步细化网格,最后记录不同电压下的液滴面型变化和不同注液量下的 PDMS 膜面型变化,并导出两个界面面型数据。

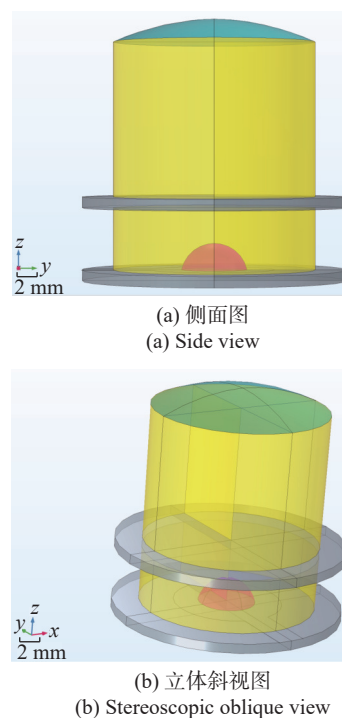
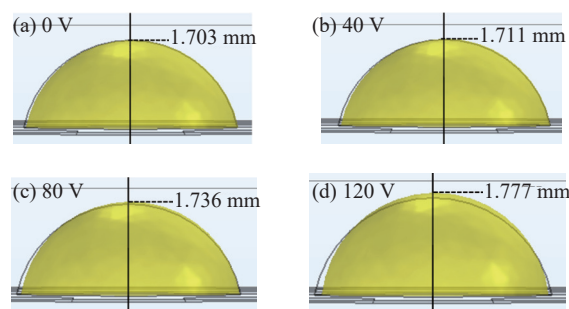


图 3 利用 Comsol 软件建立的双界面组合液体透镜模型  
Fig. 3 The double-interface combined liquid lens modeling with Comsol software

#### 3.1 面型的变化分析

在 Comsol 中定义接触角方程,改变外加电压,接触角也随之改变,从而导致液滴面型也发生变化。但在实验中,对透镜长时间施加高压,在一定情况下会发生击穿现象,根据实验经验得知最高压为 200 V 时一般不会出现击穿现象。利用 Comsol 软件,在 0~200 V 内、以 40 V 为间隔调整外加电压,获得的硅油液滴面型变化情况如图 4(彩图见期刊电子版)所示,记录不同电压下的液滴中心高度,如表 1 所示。



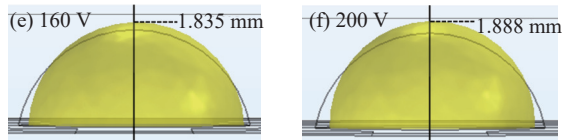


图 4 利用 Comsol 拟合得到的不同电压下的液滴面型变化示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of droplet pattern changes fitted with Comsol under different voltages

从表 1 可以看出, 在电压为 0~80 V 时, 液滴的中心高度增加幅度缓慢, 从图 4(a)~4(c) 也可看出面型变化较小。当电压增加到 120 V 之后, 高度的增加幅度变大, 图 4(d)~4(f) 中面型也有了较为明显的变化。

表 1 不同电压下的液滴中心高度

Tab. 1 Heights of droplet center under different voltages

电压/V	高度/mm
0	1.703
40	1.711
80	1.736
120	1.777
160	1.835
200	1.888

基于在 Comsol 软件中得到的硅油液滴面型数据, 在 Matlab 软件中, 采用非球面表达式(如式(1)所示)进行拟合, 得到不同电压下的液滴界面面型图及其相应的非球面系数<sup>[20]</sup>。根据 Comsol 中的面型变化趋势, 以面型变化不明显、明显形变和最终形变为依据, 选取电压分别为 40 V、120 V、160 V 和 200 V, 得到的液滴面型如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。

为了分析 PDMS 薄膜在注入液体时的面型变化情况, 在 Matlab 中利用式(1)进行拟合<sup>[10]</sup>, 得到不同注液量下 PDMS 膜的面型图及其相应的非球面系数。

$$z = a + b(x^2 + y^2) + c(x^2 + y^2)^2 + d(x^2 + y^2)^3 + e(x^2 + y^2)^4 + f(x^2 + y^2)^5, \quad (1)$$

其中  $a$  表示双液体界面的相对位置,  $b, c, d, e, f$  表示多项式系数。

实验中受注液针管的容量限制, 稳定状态下最多注液 0.3 mL。选择注液量最少和最多的情况进行观察分析, 图 6 (彩图见期刊电子版) 是 PDMS 膜在注液量分别为 0.05 mL 和 0.3 mL 下的面型图。

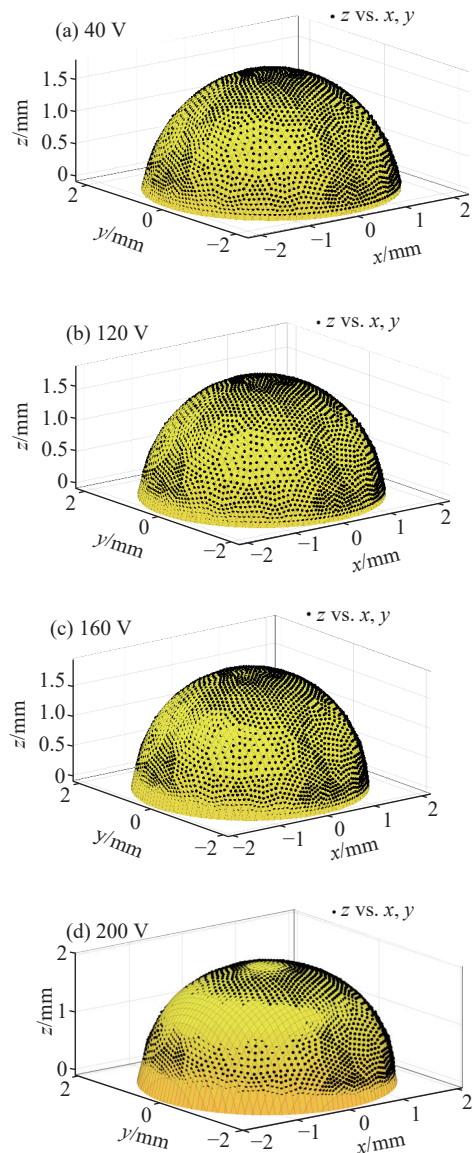


图 5 不同电压下, 拟合得到的液滴面型示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of the fitted surface of droplet interfaces under different voltages

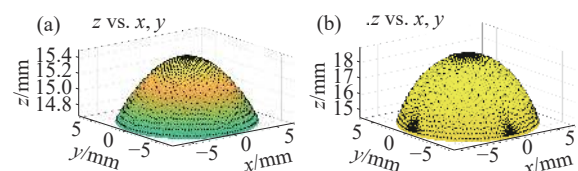


图 6 PDMS 膜在不同注液量下的 Matlab 拟合图。(a) 注液量为 0.05 mL; (b) 注液量为 0.3 mL

Fig. 6 Fitting graphs of PDMS membrane fitted with Matlab under different volumes of injected liquid. Volume of injected liquid are (a) 0.05 mL and (b) 0.3 mL

### 3.2 光学结构模型

根据 Matlab 拟合得到液滴面型和 PDMS 薄

膜面型的非球面系数,在 Zemax 软件中,构建出相应的双界面组合液体透镜光学模型,像面选取

为高斯像面,表 2 是外加电压为 200 V 时,注液量为 0.05 mL 时模型的具体光学系统参数。

表 2 双界面组合液体透镜光学模型的结构参数 (200 V, 0.05 mL)

Tab. 2 Structural parameters of the optical model of the double-interface combined liquid lens (200 V, 0.05 mL)

表面类型	曲率半径	厚度/mm	材料	通光孔径/mm	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
Object(标准面)	无限	无限		0					
1(标准面)	无限	0.7	BK7	6.5					
2(标准面)	无限	1.888	甲基硅油	1.6					
STO(偶次非球面)	无限	2.112	去离子水	1.6	-0.195	-0.995	0.744	-0.234	0.025
4(标准面)	无限	0.7	BK7	6.5					
5(标准面)	无限	10.760	去离子水	6.5					
6(偶次非球面)	无限	14.737		6.5	-0.018	$-5.56 \times 10^{-6}$	$-6.28 \times 10^{-9}$	$9.19 \times 10^{-11}$	$-1.09 \times 10^{-12}$
IMA(标准面)	无限			5.281					

表 2 中, Object、STO 和 IMA 分别表示物面、光阑面和像面,第 1 个面到第 2 个面和第 4 个面到第 5 个面表示介电泳双液体透镜的平板电极和玻璃板,厚度均为 0.7 mm。第 2 个面到 STO 面(即第 3 个面)表示液滴,材料为甲基硅油,STO 面表示在 Matlab 中拟合得到的非球面面型,即液滴界面, $b, c, d, e, f$  是通过公式(1)得到的非球面系数。STO 面到第 4 个面表示环境液体,材料为去离子水。第 5 个面到第 6 个面表示 PDMS 薄膜液体透镜的腔体,第 6 个面表示拟合得到的 PDMS 膜的面型。

图 7 对应图 5 给出了注入液体为 0 mL 的组合液体透镜在外加电压分别为 40 V、120 V、160 V、200 V 下的光路图,图 8 对应图 6 给出了在 200 V 电压下组合液体透镜中注液量分别为 0.05 mL 和 0.3 mL 时的光路图。

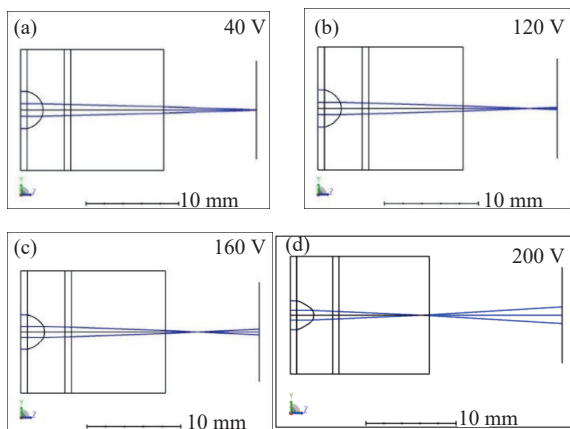


图 7 未注入液体(0 mL)薄膜未变形时不同电压下的组合液体透镜的光路图

Fig. 7 Optical path diagrams of the combined liquid lens without injected liquid (0 mL) and membrane non-deformation under different voltages

在注液量为 0 mL 的情况下,当电压由 0 V 逐渐增加至 200 V 时,利用 Zemax 建立不同电压下的模型,通过仿真可得到双界面组合液体透镜的变焦范围为 34.7598~24.9032 mm,变焦比约为 1.3958;在外加电压为 200 V 时,当注液量由 0 mL 逐渐增加至 0.3 mL 时,仿真得到的变焦范围为 24.9032~16.3374 mm,变焦比约为 1.5243。综上所述,整个组合液体透镜仿真的变焦范围可达 34.7598~16.3374 mm,变焦比约为 2.1276。

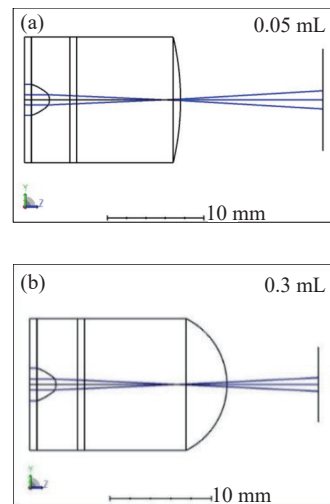


图 8 同一电压(200 V)不同注液量下的组合液体透镜光路图

Fig. 8 Optical path diagrams of the combined liquid lens at the same voltage (200 V) under different volumes of injected liquid

## 4 初步的实验分析

### 4.1 实验制备

首先用乙醇溶剂清洗玻璃板和 ITO 板,在

ITO 板上涂上介质层 SU8 溶液, 之后放进鼓风机中烘干, 然后再在板上涂上疏水层 Parylene 溶液。之后将透明亚克力腔体使用 UV 胶装在 ITO 板上, 向腔内注入去离子水, 观察注入的液体高度, 当注入 4/5 腔高时, 再注入甲基硅油, 其位于疏水层的中心位置, 接着再向腔内注入去离子水, 直到液体界面微高于腔体, 液面呈现微凸起, 然后使用 UV 胶将透明玻璃板胶装到腔体上方。最后在玻璃板上胶装高度为 10 mm、侧壁微通道孔径为 4.2 mm 的有机玻璃腔体, 之后将充满去离子水的针管通过橡胶管插入孔中, 连接到腔体上, 再向腔体内注满去离子水, 并使其液面微高于腔体, 后使用有机硅粘合剂将 PDMS 薄膜粘合在腔体上方, 完成封装, 得到的成品如图 9 所示。

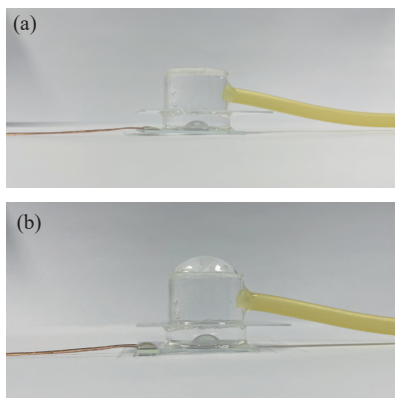


图 9 所制备的基于组合结构的双界面液体透镜实物图。  
(a) 注液量为 0 mL; (b) 注液量为 0.2 mL

Fig. 9 Physical drawing of the double-interface liquid lens based on combined structure. Volume of injected liquid are (a) 0 mL and (b) 0.2 mL

### 4.2 液滴面型变化分析

将待测量的液体透镜放置于接触角测量平台上, 调整器件的位置使通过 CCD 相机可获得较好的观察效果并固定, 将函数信号发生器产生的频率为 500 Hz、幅度为 100 mVPP 的交流信号作为输入端连接到功率放大器上, 将输出的交流驱动电压连接在液体透镜电极板引出的导线上, 启动并逐步增加外加电压。本文在实验中, 每间隔 40 V 采集一次液滴的轮廓图像, 观察得到不同电压下的界面面型, 如图 10 所示。

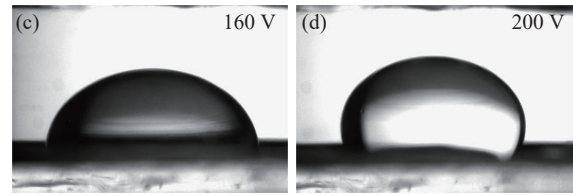
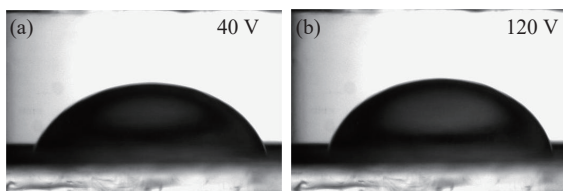


图 10 不同电压下的组合液体透镜的面型变化图

Fig. 10 Surface variation of the combined liquid lens at different voltages

### 4.3 焦距分析

将仿真的变焦范围和实验中记录的变焦范围进行比较分析。

图 11 是组合液体透镜的仿真和实验变焦范围对比图。由图 11 可知, 随着外加电压的增大, 液体透镜的界面曲率半径逐渐减小, 从而使得整个液体透镜的焦距也逐渐减小。而且组合液体透镜的仿真和实验变焦范围基本一致, 仅存在的较小误差可能是由于实验读数产生的。当驱动电压在 0~200 V 之间以 40 V 为间距进行调节时, 仿真得到的变焦范围为 34.7598~24.9032 mm, 变焦比约为 1.3958, 而实验得到的变焦范围为 34.7843~24.9860 mm, 变焦比约为 1.3922。由此可知, 当无注液时, 所设计的基于组合结构的双界面液体透镜的变焦范围的仿真和实验结果基本一致。

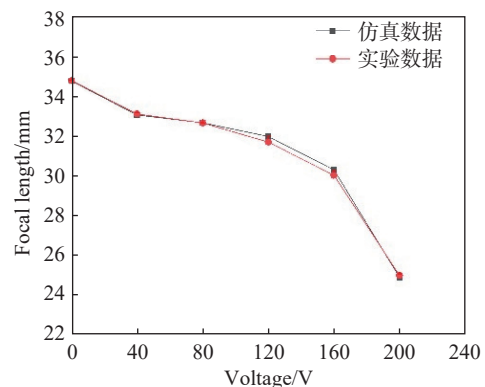


图 11 未注入液体(0 mL)薄膜未形变时不同电压下的仿真和实验的变焦范围对比图

Fig. 11 Comparison of variable focal length range of the combined liquid lens without injected liquid (0 mL) and membrane non-deformation in simulation and experiment at different voltages

组合结构的双界面液体透镜在外加电压为 200 V 时, 当注液量由 0 mL 以 0.05 mL 为间隔逐渐增加至 0.3 mL 时, 仿真和实验的变焦范围对比图如图 12 所示。由图 12 可见, 仿真得到的变焦范围为 24.9032~16.3374 mm, 变焦比约为 1.5243,



而实验得到的变焦范围为 24.9860~16.3662 mm, 变焦比约为 1.5267, 存在 0.24% 的误差, 误差较小, 属于正常实验误差。

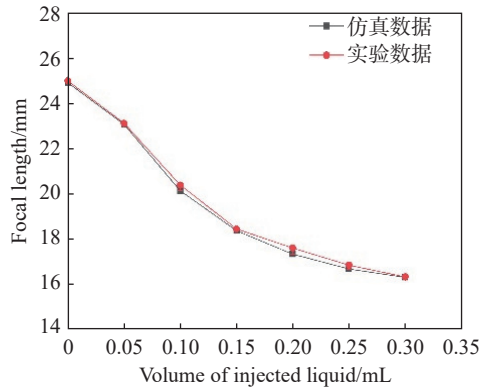


图 12 同一电压(200 V)不同注液量下的仿真和实验的变焦范围对比图

Fig. 12 Comparison of variable focal length range of the combined liquid lens in simulation and experiment at the same voltage (200 V) under different injection volumes

结合图 11 和图 12 可知, 不同外加电压(最大至 200 V)和液体注入量(最大至 0.3 mL)下, 基于组合结构的双界面液体透镜仿真变焦范围为

34.7598~16.3374 mm, 变焦比约为 2.1276, 实验的变焦范围为 34.7843~16.3662 mm, 变焦比约为 2.1254。可见, 无论是仿真还是实验都能实现较大的变焦比, 从而可进一步扩大单液滴结构的双液体透镜的变焦范围。

#### 4.4 成像分析

实验中对 USAF 1951 分辨率板进行成像, 图 13 是不同电压和不同注液量下的基于组合结构的双界面液体透镜的分辨率成像图。如图 13(a)所示, 在注液量为 0 mL 的情况下, 当液滴处于未加压的初始状态时, 设计的组合液体透镜的分辨率为 35.9188 lp/mm(第 5 组的第 2 号元素)。如图 13(b)所示, 当电压增加至 200 V 时, 液滴曲率半径减小, 焦距也随之减小, 同时成像范围不断缩小, 因此成像质量随之提高, 此时分辨率可达到 50.7968 lp/mm(第 5 组的第 5 号元素)。在外加电压为 200 V 下, 当一共注液 0.3 mL 的液体, 平均每次注液 0.05 mL 时, 分辨率变化情况如图 13(c)~13(h)所示, 其中图 13(h)的分辨率最大, 已达到 101.5937 lp/mm(第 6 组的第 5 号元素), 即注液量为 0.3 mL 时。

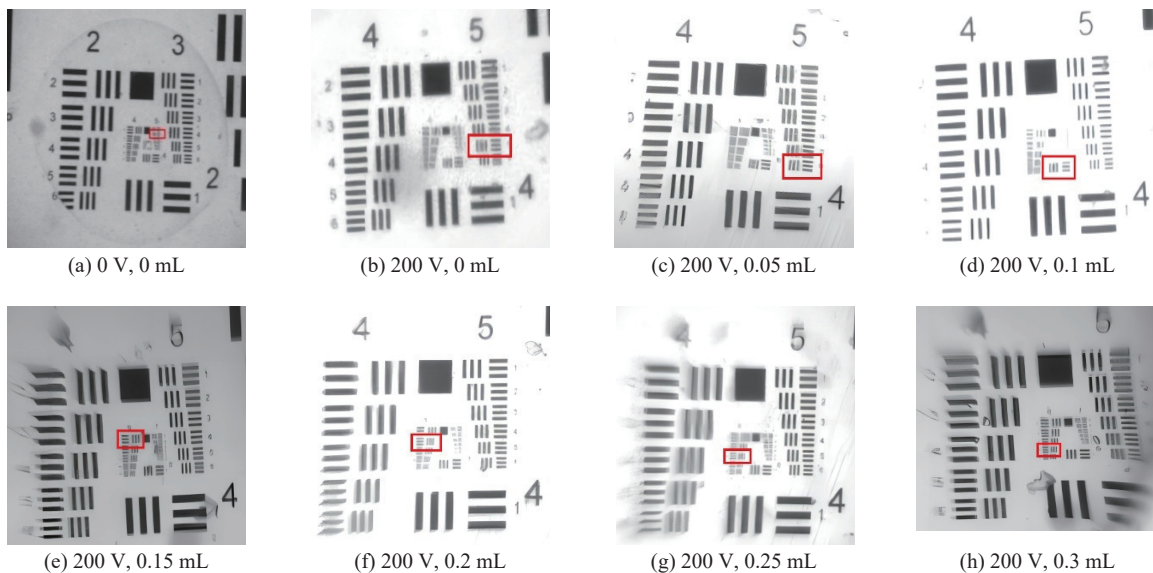


图 13 不同电压和注液量下双界面组合液体透镜的分辨率图

Fig. 13 Resolution diagrams of the double-interface combined liquid lens at different voltages under different injection volumes

## 5 结 论

应用介电泳和液压驱动, 设计了一款基于组

合结构的双界面液体透镜。其主要由介电泳双液体透镜和 PDMS 薄膜液体透镜组成。通过软件建立了所提出的基于介电泳和液压驱动的双界面液体透镜模型, 分析了其在薄膜未形变(未注入

液体)时不同外加电压下的透镜变焦范围,和同一电压(200 V)下液体不同注入量时的透镜变焦范围,并记录实验中不同电压和不同注液量下的焦距,并将仿真和实验数据进行比较分析。整个组合液体透镜的仿真变焦范围可达 34.7598~16.3374 mm,变焦比约为 2.1276,实验的变焦范围为 34.7843~16.3662 mm,变焦比约为 2.1254。结果表明,所设计的基于组合结构的双界面液体透镜仿真和实验的变焦范围基本一致,且由于两个界面分别调控,所以该组合液体透镜结构的可控性强。同时在实验中获得的变焦比可达 2.1254、

成像分辨率最大可达 101.5937 lp/mm。本课题组之前提出的基于平面图案电极的非球面双液体透镜成像分辨率约为 40.318 lp/mm<sup>[13]</sup>,而本文在原本结构的基础上进行优化,提出的组合液体透镜的分辨率远高于之前提出的液体透镜,成像质量得到大幅提高。

本文所设计的基于组合结构的双界面液体透镜具有构造简单紧凑、界面可调控性强、高分辨率成像的优点。本文为液体透镜的高质量成像和结构设计提出了新的方法,进一步拓展了液体透镜的应用范围。

### 参考文献:

- [1] 王琼华,刘超,王迪,等. 液体光子器件[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
WANG Q H, LIU CH, WANG D, *et al.*. *Liquid Photonic Device*[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese).
- [2] 甘俊杰,李磊. 可补偿像差的PDMS液体透镜[J]. 光电工程, 2022, 49(05): 210404.  
GAN J J, LI L. PDMS liquid lens with corrected aberrations[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(05): 210404. (in Chinese).
- [3] CHENG C C, CHANG C A, YEH J A. Variable focus dielectric liquid droplet lens[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 4101-4106.
- [4] REN H W, WU S T. Tunable-focus liquid microlens array using dielectrophoretic effect[J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2646-2652.
- [5] XU M, WANG X H, REN H W. Tunable focus liquid lens with radial-patterned electrode[J]. *Micromachines*, 2015, 6(8): 1157-1165.
- [6] JIN B Y, REN H W, CHOI W K. Dielectric liquid lens with chevron-patterned electrode[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32411-32419.
- [7] CHEN Q M, LI T H, LI ZH H, *et al.*. Dielectrophoresis-actuated liquid lenses with dual air/liquid interfaces tuned from biconcave to biconvex[J]. *Lab on a Chip*, 2018, 18(24): 3849-3854.
- [8] REN H W, WU S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- [9] YU H B, ZHOU G Y, LEUNG H M, *et al.*. Tunable liquid-filled lens integrated with aspherical surface for spherical aberration compensation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9945-9954.
- [10] DU J W, WANG X Y, LIANG D. Bionic optical imaging system with aspheric solid-liquid mixed variable-focus lens[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 023105.
- [11] 陈帅. PDMS薄膜型可变焦液体透镜研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
CHEN SH. *Study on the variable focus liquid lens using PDMS membrane*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese).
- [12] ZHOU H, ZHANG X F, XU Z J, *et al.*. Universal membrane-based tunable liquid lens design for dynamically correcting spherical aberration over user-defined focal length range[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37667-37679.
- [13] 孔梅梅,刘悦,董媛,等. 基于平面电极的非球面双液体透镜的设计与分析[J]. 物理学报, 2023, 72(15): 154206.  
KONG M M, LIU Y, DONG Y, *et al.*. Design and analysis of aspherical double-liquid lens based on planar electrode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(15): 154206. (in Chinese).
- [14] REN H W, WU S T. Variable-focus liquid lens by changing aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211107.
- [15] KUWANO R, TOKUNAGA T, OTANI Y, *et al.*. Liquid pressure varifocus lens[J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 405-408.
- [16] CU-NGUYEN P H, GREWE A, HILLENBRAND M, *et al.*. Tunable hyperchromatic lens system for confocal hyperspectral sensing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 27611-27621.

- [17] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physica Letters*, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [18] REN L CH, PARK S, REN H W, *et al.*. Adaptive liquid lens by changing aperture[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(4): 953-958.
- [19] PATRA R, AGARWAL S, KONDARAJU S, *et al.*. Membrane-less variable focus liquid lens with manual actuation[J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 74-78.
- [20] 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 SH CH, YUAN D, *et al.*. Design and analysis of aspheric liquid lens with square cavity structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2122005. (in Chinese).

#### 作者简介:

孔梅梅(1983—),女,江苏南京人,博士,副教授,硕士生导师,2009年于南京理工大学光学工程专业获得工学博士学位,现任职于南京邮电大学电子与光学工程学院,一直从事光学设计、视光学理论与微流控光学技术相关方面的教学与科研工作。E-mail: [kongmm@njupt.edu.cn](mailto:kongmm@njupt.edu.cn)