

含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜的设计与分析*

孔梅梅^{1)†} 薛银燕¹⁾ 徐春生²⁾ 董媛¹⁾ 刘悦¹⁾ 潘世成¹⁾ 赵瑞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, 南京 210023)

2) (南京南瑞信息通信科技有限公司, 南京 211100)

(2023年8月8日收到; 2023年9月21日收到修改稿)

基于平行平板电极的变焦液体透镜的有关研究, 通过应用介电泳效应, 提出了一种含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜模型, 是一种新型的三层液体透镜结构. 利用 Comsol, Matlab 和 Zemax 软件仿真分析了该模型在不同电压下的面型变化与成像光路, 得出其变焦范围为 22.6—15.9 mm, 并对制备的器件进行具体的实验分析, 获得了不同电压下双凸液体透镜的液滴上下界面面型和该透镜的变焦范围 23.8—17.5 mm, 与仿真结果基本一致, 而且其成像分辨率可达到 45.255 lp/mm. 结果表明, 所提出的这种新型三层液体结构的双凸液体透镜具有结构简单、易于实现的特点, 而且具备良好的成像质量.

关键词: 双凸液体透镜, 介电泳效应, 变焦, 成像质量

PACS: 42.79.Bh, 47.55.D-, 68.05.-n

DOI: 10.7498/aps.73.20231291

1 引言

近年来, 液体透镜凭借体积紧凑、操作简单、响应时间快等优势^[1], 已被广泛研究和应用. 液体透镜通过改变液体几何形状或折射率^[2]实现变焦, 驱动机制包括介电泳技术、介电润湿技术、静电力、电磁力和压力调节等. 相比于介电润湿, 介电泳技术克服了液体透镜驱动时产生蒸发和微气泡等问题^[3,4], 所以促使人们对介电泳技术进行更深入的研究.

目前国内外有关介电泳液体透镜方面的研究已开展了不少工作, 其中电极结构也是非常重要的研究对象. 2006年 Cheng 等^[5]提出利用同心圆环叉指电极控制的介电泳液体透镜, 同心圆环电极的圆心与液滴中心皆位于光轴上. 2008年, Ren 等^[6]

提出了一种无图案电极的介电泳透镜结构, 液滴表面的连续变化导致了双平板电极间的电场具有梯度分布. 与图案化液体透镜相比, 该透镜易于制造, 结构简单. 2009年, Xu 等^[7]提出了一种顶部是平面电极, 底部是井形电极的介电泳液体微透镜, 井形电极固定了透镜的位置. 2013年, Lu 等^[8]提出了基于聚二甲基硅氧烷制成的柔性基底的介电泳透镜, 将同心圆环叉指电极附着在该柔性基板上, 增加了介电泳液体透镜的灵活性和可重构性. 2018年, Chen 等^[9]提出了一种由介电泳力驱动的具有两个气-液界面的电可重构微流控光学透镜. 本课题组于 2016 年和 2019 年在双液体透镜和三层液体透镜中^[10,11], 利用液体的密度差分别引入了非球面面型, 进行了相关的光学特性分析和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; 并于 2023 年应用介电泳效应, 设计了一款基

* 国家自然科学基金(批准号: 61905117, 61775102)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kongmm@njupt.edu.cn

于平面电极的非球面双液体透镜^[12].

基于本课题组已完成的有关液体透镜的研究内容, 本文提出了一种新型的三层液体透镜的设计, 其中电极结构主要由一块含有圆孔的平板和两块平行平板组成. 通过理论推导、仿真和实验分析了在不同电压下该液体透镜的界面面型、调焦范围及其成像质量.

2 基本原理与结构设计

介电泳效应是指自由介电分子在非均匀电场中会极化并受力移动, 从而使介电液体发生形变的现象^[13]. 液体在不均匀电场下, 电介质趋于向电场强度较高的区域移动^[14,15]. 介电泳液体透镜中使用两种绝缘液体, 仅需选择折射率和介电常数相差较大的两种液体, 增加了液体的选择范围.

当介电粒子处于非均匀电场中时, 由于所处位置场强的不同, 电偶极子的正电荷 (+ Q) 和负电荷 (- Q) 受到的电场力不同^[16]. 偶极子上的总力即每个电荷上的力之和, 因此单位体积受到的开尔文极化力为 (1) 式, 介电材料极化产生的力称为开尔文极化力^[17]:

$$F = P \cdot \nabla E, \quad (1)$$

其中, P 为材料的极化系数, 当介电常数为 ϵ_d 的介电物体被介电常数为 ϵ_m 的介质包围时, (1) 式可改写为

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_d - \epsilon_m) \nabla E^2. \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 介电常数是表征介电体的电性能的一个重要参数. (2) 式为控制和操纵介电泳液滴形状的基本机理.

本文采用介电泳力原理, 设计的含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜结构示意图如图 1 所示. 该液体透镜主要由上平板、下平板、中间含有圆孔的平板、腔体、介电层和疏水层组成. 上下平板接正极, 中间含圆孔的平板接负极, 施加电压 U_1 和 U_2 , 分别控制上下界面的面型变化. 腔体中填充有低介电常数液滴和高介电常数环境液体. 液滴材料: 烷基硅油, 密度为 930 kg/m^3 , 折射率为 1.426, 介电常数 2.7. 环境液体材料: 去离子水, 密度为 1000 kg/m^3 , 折射率为 1.333, 介电常数 78. 这两种液体材料存在较大的介电常数差, 由 (2) 式得知, 可产生较大的介电泳力.

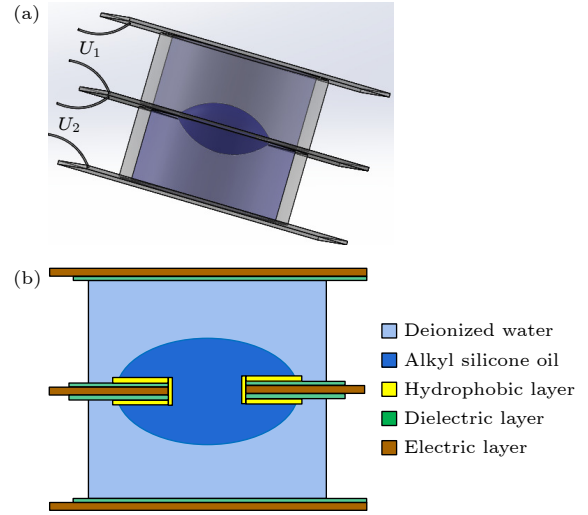


图 1 含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜结构 (a) 立体示意图; (b) 剖面图

Fig. 1. Structure of the biconvex liquid lens with a circular hole plate electrode: (a) Stereogram; (b) profile map.

3 理论与仿真分析

3.1 理论研究

根据模型结构进行焦距与电压关系的理论推导, 相应的示意图如图 2 所示.

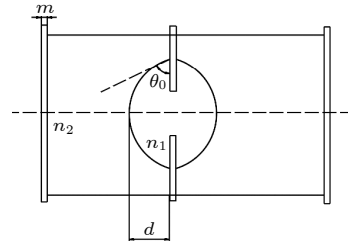


图 2 理论推导结构

Fig. 2. Structure of theoretical derivation.

假设左右液滴界面的曲率半径大小相等, 都设为 R , 利用高斯公式, 得到含有圆孔平板电极结构的双凸球面液体透镜的焦距 f' 为

$$f' = \frac{n_1 R^2}{(n_1 - n_2) [2n_1 R - (n_1 - n_2)(2d + m)]}, \quad (3)$$

其中, m 为玻璃板的厚度, d 为液滴中心高度, n_1 为液滴折射率, n_2 为环境液体折射率.

当液滴的体积取 V 时, 根据球缺体积计算公式, 得到曲率半径 R 、液滴高度 d 与接触角 θ 的关系为^[12]

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)}}, \quad (4)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{3V(1 - \cos \theta)}{\pi(2 + \cos \theta)}}. \quad (5)$$

外加电压 U 与接触角 θ 的关系^[18] 为

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2, \quad (6)$$

$$f' = n_1 \sqrt[3]{\left\{ 3V / \left[\pi \left(1 - \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right)^2 \left(2 + \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right) \right] \right\}^2} \\ \times \left\{ (n_1 - n_2) \left[2n_1 \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi \left(1 - \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right)^2 \left(2 + \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right)}} \right. \right. \\ \left. \left. - (n_1 - n_2) \left(2 \sqrt[3]{\frac{3V \left(1 - \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right)}{\pi \left(2 + \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{12}e} U^2 \right)}} + m \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (7)$$

由 (7) 式可知, 焦距不仅与电压有关, 还和玻璃板的厚度 m 有关. 通过利用含有圆孔的平板电极, 减少了玻璃板对焦距和成像质量的影响, 不仅提高了光的透过率, 而且使得成像更加清晰.

3.2 仿真分析

利用 Comsol 仿真软件, 基于图 1 的示意图, 建立的含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜如图 3 所示, 其中图 3(a), (b) 分别是它的侧面图和立体斜视图. 设置材料属性, 添加层流场和静电场, 对模型网格进行剖分, 并对液滴界面处进一步细化, 分析模型在不同电压下的面型变化, 并得到相应的非球面面型数据. 其中, 上下所施加电压的大小也都相同, $U_1 = U_2$.

由于液滴面型变化为上下界面的变形, 中间圆孔内的液体部分默认为不会发生变化, 因此, 只需

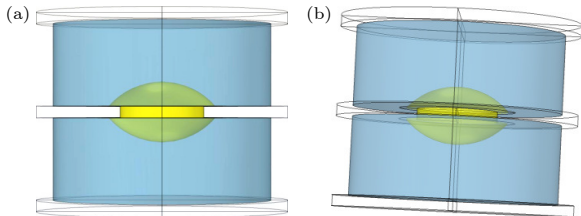


图 3 Comsol 中含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜模型 (a) 侧面图; (b) 立体斜视图

Fig. 3. Biconvex liquid lens model with circular hole plate electrode structure in comsol: (a) Side view; (b) stereoscopic oblique view.

其中 θ_0 为液滴初始接触角, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为介质的相对介电常数, γ_{12} 为环境液体与液滴的表面张力, e 为介电层厚度.

将 (4) 式—(6) 式代入 (3) 式, 最终可得到焦距 f' 与电压 U (取 $U = U_1 = U_2$) 的关系为

对上下液滴表面进行计算与拟合分析, 分别导出三维结构的上液滴和下液滴坐标. 将坐标进行处理后, 导入 Matlab 软件中进行拟合. 由于液-液界面为非球面, 在 Matlab 中使用的非球面拟合公式为^[19]

$$Z = a + b(x^2 + y^2) + c(x^2 + y^2)^2 + d(x^2 + y^2)^3 \\ + e(x^2 + y^2)^4 + f(x^2 + y^2)^5, \quad (8)$$

其中, a 表示液体界面的相对位置, b, c, d, e, f 分别表示多项式系数.

初始状态 (0 V) 和电压加到最大 (260 V) 下, 该液体透镜模型的液滴上下界面的面型拟合结果分别如图 4 和图 5 所示.

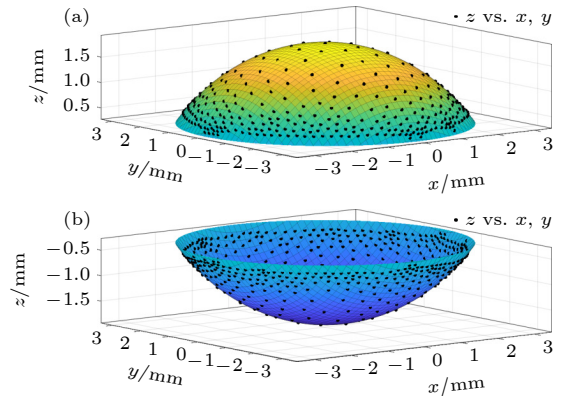


图 4 初始状态 (0 V) 时, 双凸液体透镜的液滴面型拟合结果 (a) 上界面; (b) 下界面

Fig. 4. Droplet profile of the biconvex liquid lens is fitted at the initial state (0 V): (a) Upper interface; (b) lower interface.

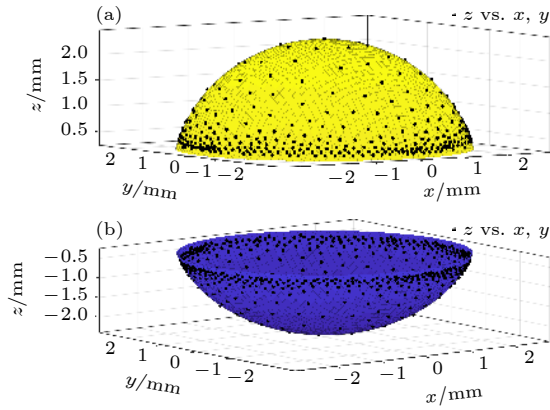


图5 电压最大(260 V)时,双凸液体透镜的液滴面型拟合结果 (a)上界面;(b)下界面
Fig. 5. Droplet profile of the biconvex liquid lens is fitted at maximum voltage (260 V): (a) Upper interface; (b) lower interface.

基于 Matlab 得到了液体透镜上下界面的面型拟合系数,利用 Zemax 软件建立了含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜的光学模型.施加电压 0 V 和 260 V 时相应的光路图分别如图 6(a), (b) 所示,随着电压的增大,该液体透镜模型对光线的会聚能力变强,焦距变短,仿真得到的焦距从 22.6 mm 变化到 15.9 mm.

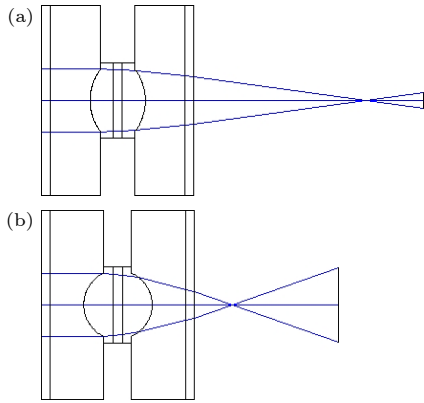


图6 双凸液体透镜的光路图 (a)初始状态(0 V);(b)电压加到最大(260 V)
Fig. 6. Optical path diagram of the biconvex liquid lens: (a) Initial state (0 V); (b) maximum voltage state (260 V).

4 实验研究

4.1 实验制备

实验中选用两片单面导电平板氧化铟锡(ITO)玻璃,以及一片含有圆孔(直径 5 mm)的双面导电平板 ITO 玻璃,ITO 玻璃的尺寸均为 30.0 mm×30.0 mm×0.7 mm.中间连接用的两个

圆柱形腔体,尺寸为外径 17 mm,内径 13 mm,高 5 mm.首先用乙醇溶液清洗平板玻璃及腔体,其次在平板 ITO 导电面涂敷 SU8 绝缘层,其中通过胶带隔离一部分用于连接导线.接着采用导电银浆将导线固定于无绝缘层的地方,放入电热恒温鼓风干燥箱进行烘干操作.然后在含有圆孔的 ITO 玻璃的圆孔四周涂疏水层(派瑞林 800).最后进行注液和封装操作,制备完成的实验器件如图 7 所示.

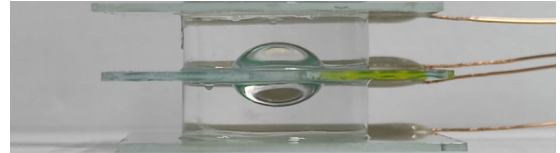


图7 制备的含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜实物图
Fig. 7. Physical image of the biconvex liquid lens with a circular hole plate electrode structure.

4.2 面型分析

将制备好的液体透镜置于接触角测量平台上(型号:中仪科信 SCI3000 F 型),调节器件在平台上的位置,使液滴在正中心,方便观察.打开信号发生器,选择频率为 500 Hz,幅度为 100 mVpp 的交流电.启动电源,对上下电极板施加相同的电压 $U = U_1 = U_2$,观察到不同电压下的界面面型如图 8 所示,随着电压的增大,液滴上下界面变化基本一致,其高度逐渐增大,界面曲率半径逐渐减小.

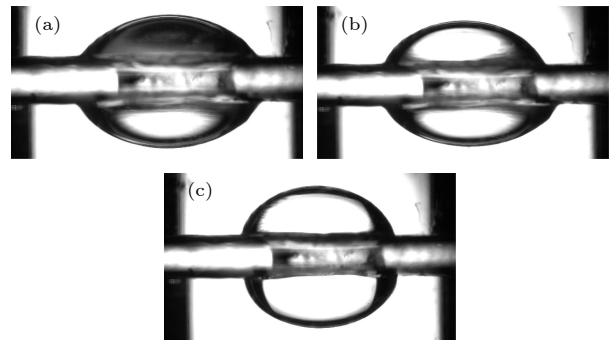


图8 不同电压下的双凸液体透镜面型图 (a)0 V;(b)160 V;(c)260 V
Fig. 8. Surface profiles of the biconvex liquid lens under different voltages: (a) 0 V; (b) 160 V; (c) 260 V.

根据文献 [14] 中有关液体重力因素的分析,若是液滴与空气接触时,由于重力作用的方向是垂直的,所以液滴在水平面上的形状保持几何对称而不变形,但垂直放置的状态中重力效应会引起液滴的

变形;若液滴周围有其他液体材料,由于周围液体的支持,液滴的重力对其几何形状扭曲的影响很大程度上减小或可以忽略不计.本文中所提出的液体透镜中含有液滴和环境液体,而且在实验中也是水平放置的,所以,在前面的仿真分析中,液体的重力因素可以忽略不计.但是,在实验中,双凸液体透镜上下界面出现少许的非对称性,如图8(b)所示,实验与仿真存在一定的误差.因此,在实验分析方面,今后将基于平板电极结构的液体透镜形式,分别对液滴水平放置与液滴倒置后水平放置两种情况进行具体的测试分析,得到液滴的重力在实际成像中对焦距的影响结果.

4.3 焦距测量

采用实验室自制的焦距仪(由物镜和测微目镜组成)测量透镜的焦距.通过记录目镜中不同线对的位置读数,计算出所制备的液体透镜的聚焦能力.测量原理为放大率法^[20].平行光管物镜焦平面上从内向外依次有3组玻罗分化线,如图9所示,3组线对关于光轴对称.将所制备的双凸液体透镜置于焦距仪的可伸缩测量台,打开电源,从0—

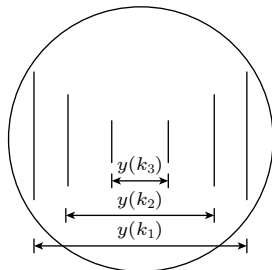


图9 玻罗分化线

Fig. 9. Borro differentiation lines.

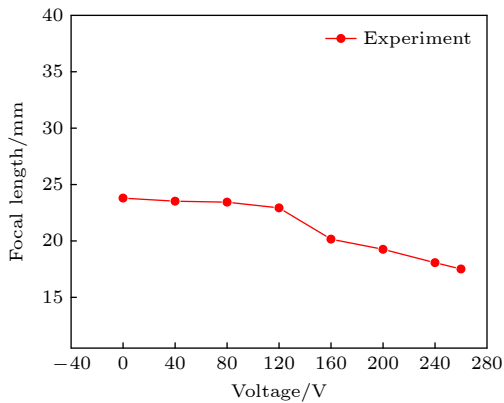


图10 不同电压下的双凸液体透镜焦距图

Fig. 10. Focal length of the biconvex liquid lens under different voltages.

260 V,每隔40 V记录在不同电压下的测微目镜从右到左不同的3组线对刻度读数,计算出不同电压下的透镜的焦距值,得到焦距从23.8 mm变化到17.5 mm,如图10所示.

4.4 成像分析

将该液体透镜放置在USAF 1951分辨率板的正上方,分辨率板作为被测物体,得到不同电压下液体透镜的成像分辨率.初始状态下(0 V,即液滴处于松弛状态),双凸液体透镜的成像分辨率为16 lp/mm(第4组的第1号元素,图11(a)).施加电压后,成像质量逐渐提高,双凸液体透镜的分辨率最大可达到45.255 lp/mm(第5组的第4号元素,图11(b)).

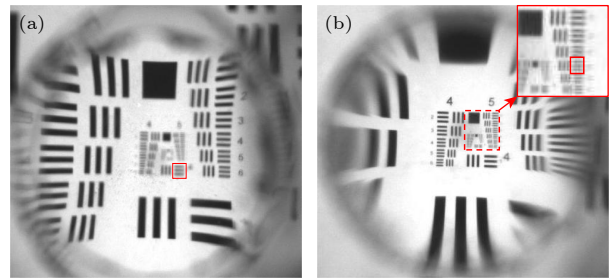


图11 不同电压下的双凸液体透镜的分辨率图 (a) 初始状态; (b) 分辨率最大(260 V)

Fig. 11. Resolution diagram of the biconvex liquid lens under different voltage: (a) Initial state; (b) maximum resolution state (260 V).

将实验与仿真焦距进行比较,如图12所示,二者变化基本一致.但存在一定范围的误差,分析原因:由于实验中的介电层与疏水层的涂覆、注液封装等制备过程都主要是手工操作的,存在不可避

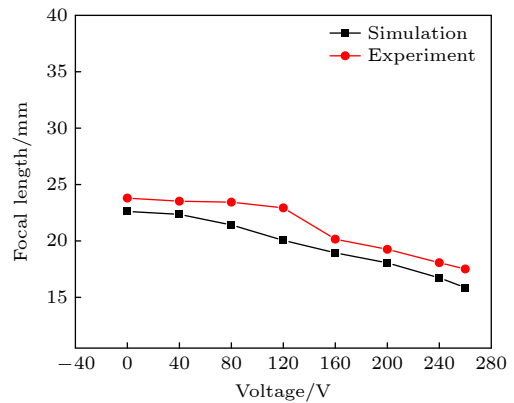


图12 双凸液体透镜实验与仿真的焦距对比图

Fig. 12. Comparison of focal length between experimental and simulated the biconvex liquid lens.

免的细微误差, 实验液滴的接触角与体积无法确保与仿真中所设置的完全相同. 因此, 可能由于实验液滴的初始接触角比仿真初始接触角小, 导致实验中测得的焦距稍大于仿真的结果.

5 结 论

本文提出了一种新型的三层双凸液体透镜结构的设计, 其主要通过一片含有圆孔的双面导电平板 ITO 玻璃以及两片单面导电平板 ITO 玻璃分别形成两组平板电极结构, 可分别控制液滴的上下两个界面, 而且通过利用含有圆孔的平板电极, 减少了中间玻璃板对焦距和成像的影响. 基于介电泳效应, 对所提出的液体透镜模型进行了建模仿真分析与相应的实验研究. 结果表明, 当施加电压从 0 V 增加到 260 V 时, 仿真和实验获得的变焦范围分别为 22.6—15.9 mm 和 23.8—17.5 mm, 基本相一致, 验证了该液体透镜结构的可行性, 而且实验测得的其成像分辨率可达到 45.255 lp/mm. 因此, 所提出的这种双凸液体透镜结构简单、易于实现, 可为拓展液体透镜的高分辨率成像研究及其应用提供一种新思路.

参考文献

- [1] Zhao Z Z, Kuang F L, Zhang N H, Li L 2021 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **33** 1297
- [2] Liu J, Li H 2014 *J. Opt.* **3** 25
- [3] Liu C, Wang Q H, Yao L X, Wang M H 2014 *Micromachines-Basel* **5** 496
- [4] Kopp D, Zappe H 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 597
- [5] Cheng C C, Chang C A, Yeh J A 2006 *Opt. Express* **14** 4101
- [6] Ren H W, Xianyu H Q, Xu S, Wu S T 2008 *Opt. Express* **16** 14954
- [7] Xu S, Lin Y J, Wu S T 2009 *Opt. Express* **17** 10499
- [8] Lu Y S, Tu H E, Xu Y, Jiang H R 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 26113
- [9] Chen Q M, Li T, Li Z, Lu C, Zhang X 2018 *Lab Chip.* **18** 3849
- [10] Kong M M, Zhu L F, Chen D, Liang Z C, Zhao R, Xu E M 2016 *J. Opt. Soc. Korea* **20** 427
- [11] Kong M M, Chen X, Yuan Y, Zhao R, Chen T, Liang Z C 2019 *Curr. Opt. Photonics* **3** 177
- [12] Kong M M, Liu Y, Dong Y, Xue Y Y, Pan S C, Zhao R 2023 *Acta. Phys. Sin.* **72** 154206 (in Chinese) [孔梅梅, 刘悦, 董媛, 薛银燕, 潘世成, 赵瑞 2023 物理学报 **72** 154206]
- [13] Wang Q H, Liu C, Wang D, Li L 2021 *Liquid Photonic Device* (Beijing: Science Press) pp82–83 (in Chinese) [王琼华, 刘超, 王迪, 李磊 2021 液体光子器件 (北京: 科学出版社) 第 82—83 页]
- [14] Ren H W, Wu S T 2012 *Introduction to Adaptive Lenses* (Hoboken: Wiley) pp107–148
- [15] Berthier J 2008 *Micro-drops and Digital Microfluidics* (New York: William Andrew) pp331–333
- [16] Xu S, Ren H W, Wu S T 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 483001
- [17] Edwards A M J, Brown C V, Newton M I, McHale G 2018 *Curr. Opin. Colloid. In.* **36** 28
- [18] Chamakos N T, Kavousanakis M E, Papathanasiou A G 2014 *Langmuir* **30** 4662
- [19] Yuan D 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [袁东 2021 硕士学位论文 (南京: 南京邮电大学)]
- [20] Liang D 2022 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [梁丹 2022 硕士学位论文 (南京: 南京邮电大学)]

Design and analysis of biconvex liquid lens with circular hole plate electrode structure*

Kong Mei-Mei^{1)†} Xue Yin-Yan¹⁾ Xu Chun-Sheng²⁾ Dong Yuan¹⁾
Liu Yue¹⁾ Pan Shi-Cheng¹⁾ Zhao Rui¹⁾

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*)

(Received 8 August 2023; revised manuscript received 21 September 2023)

Abstract

In this paper, based on the research of zoom liquid lens with parallel plate electrode and the principle of dielectrophoresis, a model of the biconvex liquid lens with circular hole plate electrode structure is proposed, which is a novel three-layer liquid lens structure. The dielectrophoretic effect refers to the phenomenon that free dielectric molecules will be polarized and moved by the force in a non-uniform electric field, thus deforming the dielectric liquid. In the dielectrophoretic liquid lens, only two insulating liquid materials with large refractive index difference and dielectric constant difference need to be selected, which can increase the selection range of liquid materials. The liquid lens structure mainly consists of a piece of double-sided conductive flat plate ITO glass with a circular hole and two pieces of single-sided conductive flat plate ITO glass, which respectively form two sets of flat electrode structures to control the upper interface and lower interface of the liquid droplet. In this structure, the influences of the intermediate glass plate on the focus and imaging are reduced by using the flat plate electrode with circular hole. The theoretical analysis of the structure is carried out with simulation software. Firstly, the models of the biconvex liquid lens with circular hole plate electrode under different voltages are built with Comsol software, the data of upper interface and lower interface of the liquid droplet are exported. Then by using Matlab, the surface shapes of the upper interface and lower interface of the droplet are fitted and the corresponding aspheric coefficients are obtained. Finally, the optical models are built with Zemax software, the imaging optical paths and the variation range of focal length under different voltages are analyzed. On the basis of the simulation, the corresponding device is made, and the specific experimental analysis is carried out. The surface patterns of the upper interface and lower interfaces of the droplet of the biconvex liquid lens under different voltages are recorded, the focal length and imaging resolution of the liquid lens are measured. When the operating voltage is in a range of 0–260 V, the focal length varies from 23.8–17.5 mm, which is basically consistent with the simulation results (22.6–15.9 mm). The feasibility of the structure of the biconvex liquid lens with circular hole plate electrode structure is verified experimentally. The imaging resolution can reach 45.255 lp/mm. The results show that this proposed novel three-layer liquid structure of the biconvex liquid lens has the characteristics of simple structure, easy-to-realize and good imaging quality. Therefore, the research of this biconvex liquid lens can provide a new idea for expanding the high-resolution imaging research of liquid lenses and their applications.

Keywords: biconvex liquid lens, dielectric electrophoresis effect, zoom, image quality

PACS: 42.79.Bh, 47.55.D–, 68.05.–n

DOI: 10.7498/aps.73.20231291

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61905117, 61775102).

† Corresponding author. E-mail: kongmm@njupt.edu.cn

含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜的设计与分析

孔梅梅 薛银燕 徐春生 董媛 刘悦 潘世成 赵瑞

Design and analysis of biconvex liquid lens with circular hole plate electrode structure

Kong Mei-Mei Xue Yin-Yan Xu Chun-Sheng Dong Yuan Liu Yue Pan Shi-Cheng Zhao Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 014207 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231291

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231291>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

缪子多模态成像图像质量分析

Image quality evaluation of multimodal imaging of muon

物理学报. 2022, 71(2): 021401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211083>

基于迭代重构算法改进晶体衍射分光X射线鬼成像的图像质量研究

Improving quality of crystal diffraction based X-ray ghost imaging through iterative reconstruction algorithm

物理学报. 2022, 71(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211978>

大焦深离轴超透镜的设计与制作

Design and fabrication of off-axis meta-lens with large focal depth

物理学报. 2021, 70(19): 197802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202235>

天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法

Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere

物理学报. 2018, 67(8): 088701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172625>

考虑磁透镜边缘场的质子成像系统优化设计

Optimization of proton imaging system including fringe field of magnetic lens

物理学报. 2021, 70(2): 022901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201141>

平板式螺旋相位板的设计与应用

Design and application of flat spiral phase plate

物理学报. 2019, 68(5): 054102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181677>