

基于平面电极的非球面双液体透镜的设计与分析*

孔梅梅[†] 刘悦 董媛 薛银燕 潘世成 赵瑞

(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)

(2023年5月9日收到; 2023年5月24日收到修改稿)

为了研究易于实现、结构简单的非球面液体透镜结构, 应用介电泳效应, 设计了一款基于平面电极的非球面双液体透镜. 利用 Comsol, Matlab 和 Zemax 软件, 建立了所提出的非球面双液体透镜模型, 分析了其在不同电压下的面型变化与成像特点, 并与球面的双液体透镜模型进行了比较分析. 结果表明, 非球面双液体透镜的变焦范围大于球面的, 前者的成像质量亦优于后者. 而且, 通过该非球面双液体透镜的器件制备与初步实验分析, 获得了其成像分辨率可达 40.318 lp/mm 的结果.

关键词: 液体透镜, 非球面, 平面电极, 介电泳效应**PACS:** 42.79.Bh, 47.55.D-, 68.05.-n**DOI:** 10.7498/aps.72.20230758

1 引言

基于电场调控的液体透镜具有易于变焦的自适应光学特性, 使其应用广泛^[1-4]. 随着液体透镜的研究深入, 对其成像质量的要求也逐渐提高, 所以, 通过引入非球面, 人们开始了对非球面液体透镜的有关研究.

目前国内外有关非球面液体透镜方面的研究, 主要有 2014 年中国科学技术大学的 Cao 等^[5] 使用电场调控液滴来制作非球面透镜; 荷兰 Twente 大学的 Mugele 课题组^[6-9] 于 2014—2019 年提出了利用流体静压力和电场力共同调节双液体界面面型的曲率和椭圆度, 得到相应的非球面面型; 2015—2017 年, 德国 Freiburg 大学的 Zappe 课题组^[10-12] 利用覆盖于液体透镜之上的非均匀聚二甲硅氧烷 (PDMS) 薄膜产生非球面面型; 2018 年, 荷兰代尔夫特理工大学 Strauch 等^[13] 理论提出了利用液体表面振荡创造特定形状的非球面液体透镜; 2019 年, 四川大学的 Wang 等^[14] 提出了基于

倒悬的 PDMS 液滴的自身的重力和液体界面张力, 并固化得到相应的非球面, 从而获得了集成该非球面的液体透镜. 本课题组于 2016 年^[15] 和 2019 年^[16], 基于液体的密度差, 在双液体透镜和三层液体透镜中分别引入了非球面面型, 分别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.

综上所述, 非球面液体透镜的结构多样化. 基于我们之前的研究基础, 本文提出一种基于平面电极形式的非球面双液体透镜结构, 通过理论仿真, 结合球面双液体透镜, 对比分析了不同电压下的非球面界面面型的变化与焦距的改变, 并对其成像质量进行了实验分析. 该非球面双液体透镜具有结构简单、易于实现的特点.

2 基本原理与结构设计

介电泳 (dielectrophoresis, DEP) 是一种将粒子置于非均匀电场中时发生的现象. 当带净电荷的粒子被置于电场中, 电场会使粒子产生极化, 携带

* 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

的电荷不均匀分布在介质界面,其沿着电场线受力,如果电场是非均匀的,那么电场强度较高的区域的极子会占据主导地位,粒子产生移动,产生介电泳现象.对于不能等效为单偶极子的宏观物体,可以用极化方法得到作用在物体上的介电泳力^[17]为

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon_r - \varepsilon_m) \nabla E^2, \quad (1)$$

其中 ε_0 表示真空的介电常数, ε_r 表示液滴的介电常数, ε_m 表示环境液体的介电常数, E 表示电场强度.由(1)式可以看出,介电泳力与液体的介电常数差成正比.

应用介电泳效应,如图1所示,介电泳液体透镜中的液滴在电场中发生极化,在介电泳力的作用下向着较高电场强度方向运动,随着外加电压的改变,介电泳力也发生变化,从而改变液滴在固体-液体界面的接触角.而且,在电控驱动的液体透镜中,介电泳透镜与电润湿透镜相比,介电泳液体透镜使用的均是绝缘液体,实验中不会产生蒸发和微气泡等问题^[18].

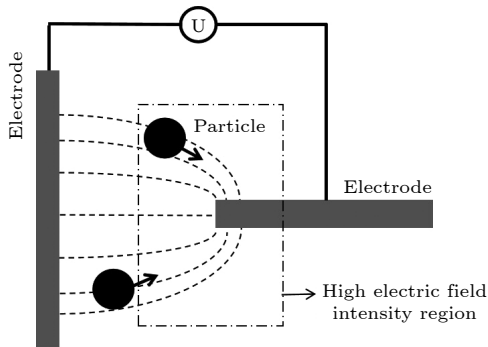


图1 粒子受到介电泳力作用示意图
Fig. 1. Schematic diagram of particles subjected to dielectrophoresis forces.

基于介电泳效应,所设计的非球面双液体透镜结构示意图如图2所示,底部采用材料为氧化铟锡(ITO)的平面环形电极,在电极上涂敷的介质层和疏水层分别采用SUS和Parylene溶液.腔体内的液滴和环境液体分别采用甲基硅油(密度为 970 kg/m^3 ,介电常数为2.7,折射率为1.403)和去离子水(密度为 1000 kg/m^3 ,介电常数为78.36,折射率为1.333),二者存在较大的介电常数差,由(1)式可知,可产生较大的介电泳力.最后采用普通玻璃板进行封装.

通常,液体透镜需要考虑重力因素,根据文献^[17]中有关重力效应的分析,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;若液滴周围有其他的液体材料,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.而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,这里的重力因素可以忽略不计.

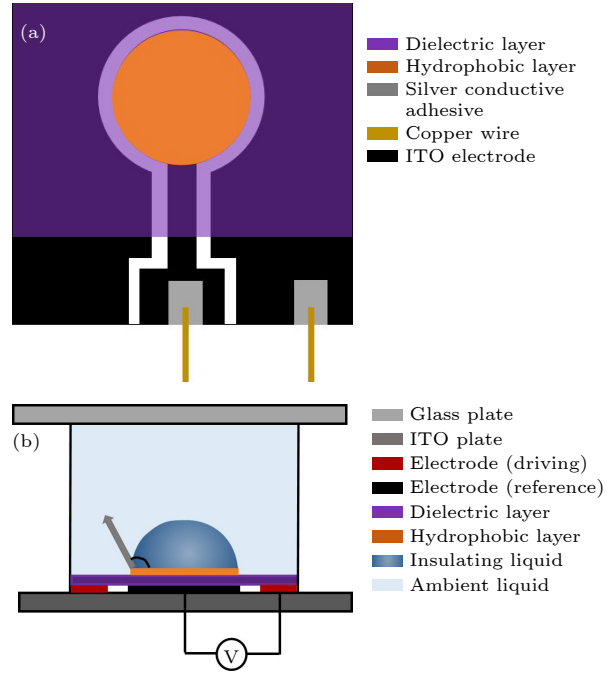


图2 基于平面环形电极的非球面双液体透镜的结构原理示意图 (a) 平面环形电极示意图; (b) 透镜结构原理示意图

Fig. 2. Schematic diagrams of the structure and principle of aspherical double-liquid lens based on planar annular electrode: (a) Schematic diagram of planar annular electrode; (b) schematic diagram of the structure and principle of lens.

3 仿真分析

非球面双液体透镜建模的仿真流程图如图3所示,主要包含3个部分的内容.首先利用Comsol软件建立不同电压下的双液体透镜的模型,导出界面面型数据,然后利用Matlab软件拟合界面得到相应的非球面系数,最后利用Zemax软件建立相应的非球面双液体透镜光学模型.

利用Comsol软件,首先构建高5 mm的腔体,封装腔体的上下分别为厚度均为0.7 mm玻璃板和平面电极板,其次在材料中添加液滴和环境液体,其中甲基硅油液滴在底面覆盖半径约为2.3 mm,

环境液体设置为去离子水, 随后在下层板上添加电场, 得到的模型如图 4 所示, 其中图 4(a) 和图 4(b) 分别是它的侧面图和立体斜视图. 对整个非球面双液体模型进行网格细化, 并对双液体界面处进一步细化, 最后对模型在不同施加电压下的面型变化进行分析, 并得到相应的非球面面型数据.

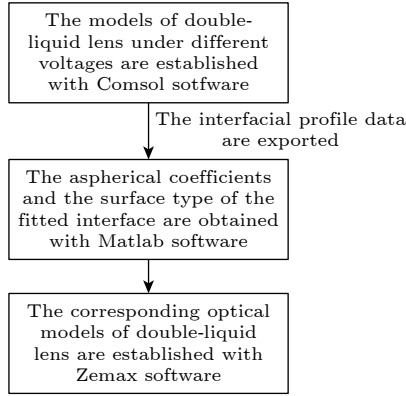


图 3 利用软件进行非球面双液体透镜建模的仿真流程图
Fig. 3. Simulation flow chart of aspherical double-liquid lens modeling with softwares.

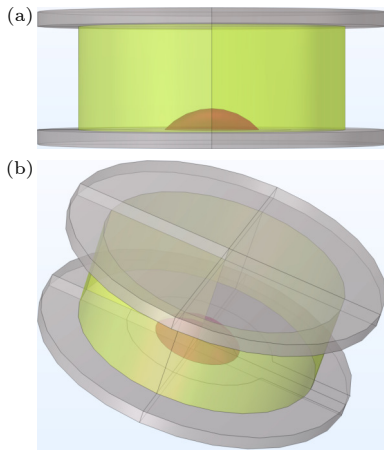


图 4 Comsol 中的非球面双液体透镜模型 (a) 侧面图; (b) 立体斜视图
Fig. 4. Aspherical double-liquid lens model in Comsol: (a) Side view; (b) stereoscopic oblique view.

基于 Comsol 中得到的非球面面型数据, 利用 Matlab 软件, 采用如 (2) 式所示的非球面公式进行拟合, 可以获得不同电压下双液体界面的面型图及其相应的系数 [19]. 图 5 给出了外加电压分别为 60 和 140 V 时的双液体透镜的非球面面型图.

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

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.

在传统的双液体透镜中, 双液体界面面型是以球面变化, 为了进一步研究非球面双液体透镜的特性, 遂将其与球面的特性进行对比. 球面双液体透镜如图 6 中的结构 [18]. 由图 6 中的几何关系可以得到

$$h = R(1 - \cos \theta), \quad (3)$$

其中 R 为液体界面的曲率半径; h 为绝缘液滴高度.

用积分方法计算液滴体积 V 得到

$$V = \int_{R-h}^R \pi(R^2 - z^2) dz = \frac{\pi h^2}{3}(3R - h). \quad (4)$$

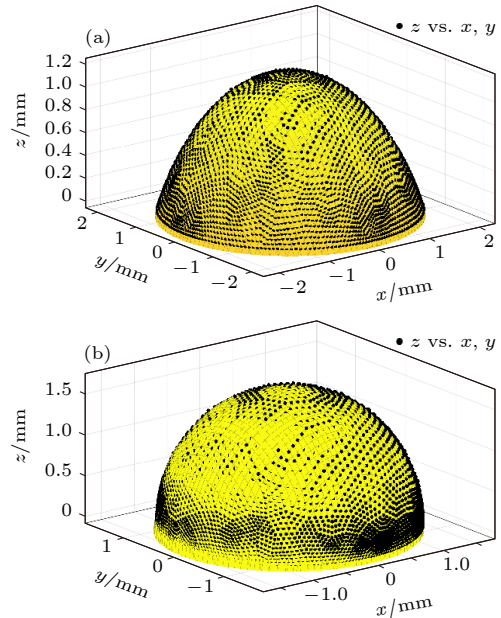


图 5 利用 Matlab 拟合的不同电压下的界面面型图 (a) 60 V; (b) 140 V
Fig. 5. Surface diagrams of interfaces fitted with Matlab under different voltages: (a) 60 V; (b) 140 V.

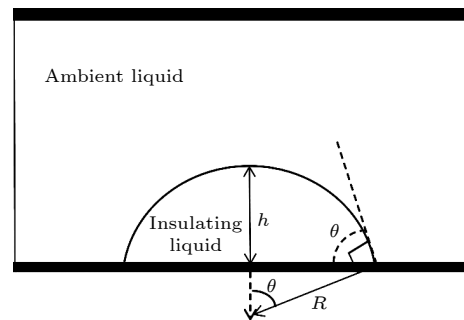


图 6 基于平面电极的球面双液体透镜结构示意图
Fig. 6. Schematic diagram of spherical double-liquid lens based on planar electrode.

将 (3) 式代入 (4) 式得到曲率半径 R 和液滴体积 V 的关系为

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

外加电压 U 与接触角 θ 的关系为

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

其中 θ_0 为零电压下的接触角, γ_{lm} 为液滴和环境液体之间的界面张力, d 为介电层的厚度.

将 (6) 式代入 (5) 式得到曲率半径 R 和外加电压 U 的关系为

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi \left(1 - \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{\text{lm}} d} U^2\right)^2 \left(2 + \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{\text{lm}} d} U^2\right)}}. \quad (7)$$

通过高斯光学理论^[20] 得到焦距 f' 和曲率半径 R 的关系为

$$f' = R / (n_r - n_m), \quad (8)$$

其中 n_r 和 n_m 分别为液滴和环境液体的折射率.

将 (7) 式代入 (8) 式得到焦距 f' 和外加电压 U 的关系为

$$f' = \frac{1}{n_r - n_m} \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi \left(1 - \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{\text{lm}} d} U^2\right)^2 \left(2 + \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2\gamma_{\text{lm}} d} U^2\right)}}. \quad (9)$$

基于 Matlab 拟合得到的不同电压下的非球面系数, 利用 Zemax 软件, 构建出相应的非球面双液体透镜的光学模型; 对于球面双液体透镜, 所用的液体材料、腔体结构和液滴体积都与非球面的相同, 然后, 通过 (7) 式可以算出不同电压下的曲率半径, 从而就可以在 Zemax 中建立起相应的球面双液体透镜的光学模型. 将上述两种光学模型进行比较.

图 7 是 140 V 电压下非球面和球面双液体透镜对应的光路图, 像面选取为高斯像面, 可知非球面双液体透镜的球差明显小于球面的, 前者在像面上形成的圆形弥散斑也明显小于后者.

当外加电压由 0 V 逐渐增加至 140 V, 间距

20 V 时, 通过 Zemax 中建立的不同电压下的模型仿真得到非球面双液体透镜的变焦范围, 通过 (9) 式计算得到相同电压变化下的球面双液体透镜的变焦范围, 将两者的变焦范围和成像质量进行了比较分析.

整体而言, 随着驱动电压的增加, 两种双液体透镜的液体界面曲率半径逐渐减小, 从而导致焦距都逐渐减小. 图 8 是非球面与球面双液体透镜的变焦范围对比图. 由图 8 可知, 前期当驱动电压为 0—60 V 时, 两种液体透镜的焦距变化趋势基本一致, 差距不明显, 但当电压大于 60 V 时, 非球面的焦距值明显小于球面的, 而且随着电压的逐渐增加, 差距亦逐渐变大. 当驱动电压在 0—140 V 之间

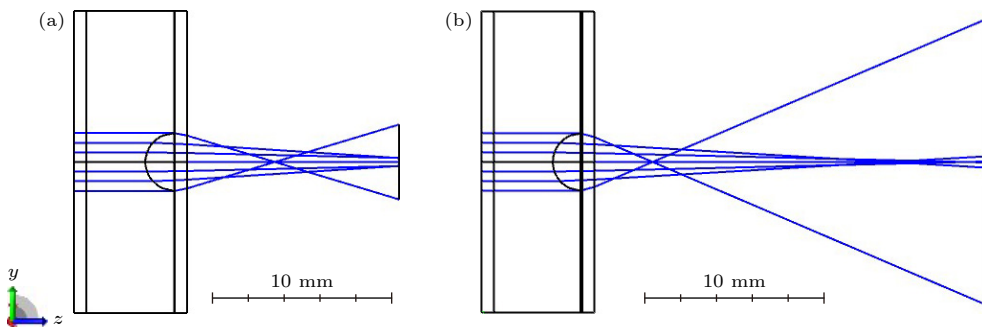


图 7 同一电压 (140 V) 非球面和球面双液体透镜的光路图 (a) 非球面双液体透镜; (b) 球面双液体透镜

Fig. 7. Optical path diagrams of aspherical and spherical double-liquid lenses surface at 140 V: (a) Aspherical double-liquid lens; (b) spherical double-liquid lens.

调节时, 球面双液体透镜的变焦范围为 23.4901—43.0506 mm, 变焦比约为 1.8327, 而非球面双液体透镜的变焦范围为 13.4038—42.2765 mm, 变焦比约为 3.1541. 综上非球面的变焦范围明显大于球面的变焦范围.

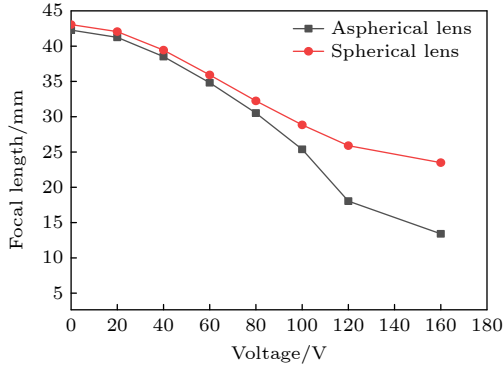


图 8 非球面与球面双液体透镜的变焦范围对比图
Fig. 8. Comparison of variable range of focal length of aspherical and spherical double-liquid lenses.

光学系统的成像点列图 RMS 半径 (RMS radius) 即均方根半径, 它是一个重要的半径参数, 可以反映由像差引起的弥散斑的大小, 是可直观表征光学成像质量的一个重要参数指标. 图 9 是基于平面电极的非球面和球面双液体透镜点列图 RMS 半径对比图. 由图 9 可见, 当驱动电压为 0—60 V 时, 两种透镜的 RMS 半径几乎没有差距; 当驱动电压为 60—100 V 时, 球面双液体透镜 RMS 半径从 981.366 μm 增加到 1772.4 μm , 而非球面双液体透镜只从 905.938 μm 增加到 1224.9 μm , 增加幅度明显小于球面透镜; 继续增加电压至 140 V, 球面透镜的 RMS 半径急剧增加, 而非球面透镜的已逐渐减小到 1137.77 μm , 且远小于球面透镜的. 图 9 也给出了在 120 V 时非球面和球面双液体透镜的具体点列图示例, 相同标尺下, 可以明显看出非球面双液体透镜的成像光斑比球面的小得多. 因此, 图 9 的结果表明随着电压的增加, 球面双液体透镜的弥散斑大小不断增加, 成像质量逐渐变劣, 相反非球面双液体透镜的弥散斑大小先缓慢增加后逐渐减小, 且增值范围仅有 576.476 μm , 远小于球面透镜, 综上非球面双液体透镜的成像质量优于球面透镜.

由于刚施加电压 (0—60 V) 时, 非球面液体透镜中液体界面的变形不明显, 与球面面型相似, 所以成像的弥散斑大小也与球面的液体透镜相似, 先缓慢增加, 而随着驱动电压的逐渐增大, 液体界面

的形变变大, 非球面面型的非球面性逐渐显现, 对像差的校正能力逐渐提高, 所以弥散斑大小后又逐渐减小.

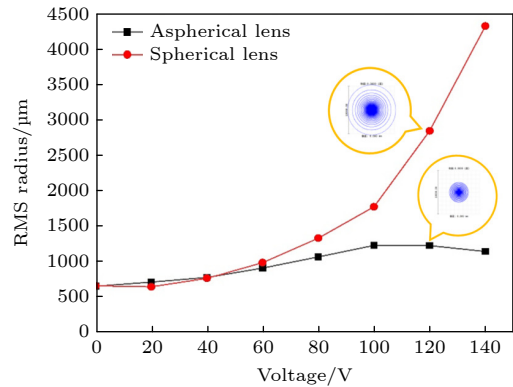


图 9 不同电压下非球面与球面双液体透镜的成像点列图中 RMS 半径的对比

Fig. 9. Comparison of RMS radius of spot diagrams of aspherical and spherical double-liquid lenses at different voltage.

4 初步的实验分析

4.1 实验制备

先用乙醇溶液将平面电极板进行清洗, 并利用干燥箱进行烘干, 在 ITO 板上先后涂覆 SUS 和 Parylene 溶液, 将高度为 5 mm 的有机玻璃腔体胶装在 ITO 板上. 然后先注入约 6/7 腔体体积的去离子水, 后将甲基硅油液滴滴在疏水层的中心, 再注入去离子水至液面高于腔体呈微凸起状态, 最后使用 UV 胶将上层普通玻璃板与腔体连接, 完成封装, 成品如图 10 所示.

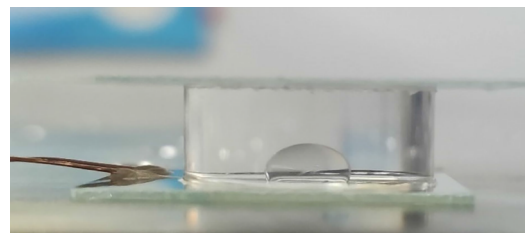


图 10 制备的基于平面电极的非球面双液体透镜实物图
Fig. 10. Physical drawing of aspherical double-liquid lens based on planar electrode.

4.2 成像分析

实验中对 USAF 1951 分辨率板进行成像, 得到不同状态下的非球面双液体透镜的分辨率如图 11 所示. 当液滴处于松弛的初始状态时 (图 11(a)), 非

球面双液体透镜的分辨率为 7.127 lp/mm (第 2 组的第 6 号元素); 随着电压增加, 液体界面逐渐凸起, 成像范围逐渐缩小, 焦距逐渐减小, 成像质量逐渐提高, 如图 11(b) 所示, 非球面双液体透镜的分辨率最大可达到 40.318 lp/mm (第 5 组的第 3 号元素), 此时对应的电压为 230 V.

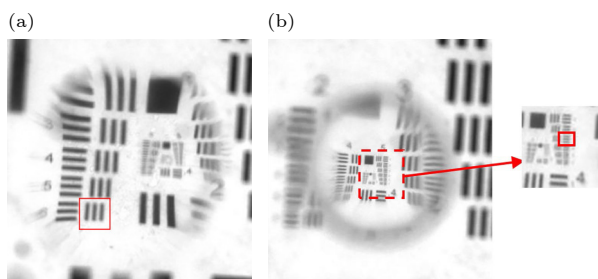


图 11 不同状态下非球面双液体透镜的分辨率图 (a) 初始状态时; (b) 分辨率最大时 (230 V)

Fig. 11. Resolution diagrams of aspherical double-liquid lens in different states: (a) Initial state; (b) maximum resolution state (230 V).

5 结 论

应用介电泳效应, 设计了一款基于平面电极的非球面双液体透镜, 通过理论仿真, 对不同电压下该液体透镜的非球面面型变化进行了分析, 建立了相应的非球面双液体透镜的光学模型, 并与球面双液体透镜模型进行了变焦范围和成像质量的比较分析. 结果发现, 非球面双液体透镜模型的变焦范围大于球面双液体透镜; 前者点列图的 RMS 半径小于后者的, 即前者的成像质量优于后者. 而且, 通过非球面双液体透镜器件的制备, 获得了初步的实验分析结果, 其成像分辨率可达到 40.318 lp/mm.

本文所提出的非球面双液体透镜的形式与 2022 年 Xu 等^[21]提出的一种使用新型透明电响应流体己二酸二丁酯 (DBA) 的球面液体透镜相似, 都是结构简单的平凸透镜, 且结构尺寸都在毫米数量级, 其分辨率约为 28.5 lp/mm. 而本文所提出的非球面液体透镜的分辨率最大可达到 40.318 lp/mm,

像质优于他们所提出的液体透镜. 而且, 本文的非球面双液体透镜具有结构简单、易于实现的特点, 能够为液体透镜的高质量成像及其应用提供一种新的方案, 更可以拓展液体透镜的应用.

参考文献

- [1] Kuiper S, Hendriks B H W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1128
- [2] Kuiper S 2011 *Electrowetting-based Liquid Lenses for Endoscopy* (San Francisco: SPIE) p47
- [3] Zhang F M, Yao Y N, Qu X H, Zhang T 2017 *Opt. Laser. Technol.* **88** 198
- [4] Ma H G, Cheng Z W, Wang Z Y, Xiong K D, Yang S H 2019 *Opt. Lett.* **44** 1880
- [5] Cao Z L, Cheng C, Wang K Y 2014 *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies Harbin, China, August 6, 2014* p111
- [6] Mishra K, Murade C, Carreel B, Roghair I, Oh J M, Manukyan G, Dirk V D E, Mugele F 2014 *Sci. Rep.* **4** 6378
- [7] Mishra K, Mugele F 2016 *Opt. Express* **24** 14672
- [8] Lima N C, Mishra K, Mugele F 2017 *Opt. Express* **25** 6700
- [9] Mishra K, Narayanan A, Mugele F 2019 *Opt. Express* **27** 17601
- [10] Zhao P P, Ataman Ç, Zappe H 2016 *IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Shanghai, China, January 24–28, 2016* p609
- [11] Zhao P P, Ataman Ç, Zappe H 2016 *Appl. Optics* **55** 7816
- [12] Zhao P P, Ataman Ç, Zappe H 2017 *Opt. Eng.* **56** 103110
- [13] Strauch M, Somers P A A M, Bociort F, Urbach H P 2018 *AIP. Adv.* **8** 115224
- [14] Wang J H, Zhou X, Luo L, Yuan R Y, Wang Q H 2019 *Opt. Commun.* **445** 56
- [15] Kong M M, Zhu L F, Chen D, Liang Z C, Zhao R, Xu E M 2016 *J. Opt. Soc. Korea* **20** 427
- [16] Kong M M, Chen X, Yuan Y, Zhao R, Chen T, Liang Z C 2019 *Curr. Opt. Photonics* **3** 177
- [17] Wu S T, Ren H 2012 *Introduction to Adaptive Lenses* (Hoboken: Wiley) pp108–148
- [18] Wang Q H, Liu C, Wang D, Li L 2021 *Liquid Photonic Device* (Beijing: Science Press) p37 (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37页]
- [19] Kong M M, Pan S C, Yuan D, Sun X B, Xue Y Y, Zhao R, Chen T 2023 *Laser. Optoelectron. Progr.* **60** 192202 (in Chinese) [孔梅梅, 潘世成, 袁东, 孙小波, 薛银燕, 赵瑞, 陈陶 2023 激光与光电子学进展 **60** 192202]
- [20] Zhang Y M 1982 *Applied Optics* (Beijing: China Machine Press) p30 (in Chinese) [张以谟 1982 应用光学 (北京: 机械工业出版社) 第30页]
- [21] Xu M, Liu Y T, Yuan Y, Lu H B, Qiu L Z 2022 *Opt. Lett.* **47** 509

Design and analysis of aspherical double-liquid lens based on planar electrode*

Kong Mei-Mei[†] Liu Yue Dong Yuan Xue Yin-Yan
Pan Shi-Cheng Zhao Rui

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

(Received 9 May 2023; revised manuscript received 24 May 2023)

Abstract

In order to study an aspherical liquid lens with simple structure and easy realization, an aspherical double-liquid lens based on planar electrode is designed based on the dielectrophoretic effect. The droplet in the dielectric electrophoretic liquid lens is polarized in the electric field and moves towards the higher electric field strength under the action of the dielectrophoresis force. With the change of the applied voltage, the dielectrophoresis force also changes, thus the contact angle of the droplet at the solid-liquid interface changes. Firstly, the models of the aspherical double-liquid lens under different voltages are established with Comsol software, and the interfacial profile data are obtained. Then the aspherical coefficients and the surface type of the fitted interface are obtained with Matlab software. Finally, the corresponding optical model of double-liquid lens is established with Zemax software. The variable range of focal lengths and root mean square (RMS) radii of the aspherical double-liquid lens at different voltages are obtained. In order to further study the characteristics of the aspherical double-liquid lens, it is compared with a spherical double-liquid lens model. Based on the contact angle theory of liquid lens and Gaussian optics theory, the relationship between the interfacial curvature radius of the spherical liquid lens and the applied voltage, and the relationship between the focal length and the applied voltage are obtained, respectively. The liquid material, cavity structure and droplet are the same as those of the aspherical lens. The corresponding spherical double-liquid lens model is established according to the two expressions relating to Zemax, and the voltage value is the same as that of the aspherical lens. Thus, the variable ranges of focal length and RMS radius in the spot diagram of the spherical double-liquid lenses at different voltages are obtained. Then, they are compared with those of aspherical double-liquid lens, and the results show that the variable range of focal length of the aspherical double-liquid lens is larger than that of the spherical double-liquid lens, and the imaging quality of the former is better than that of the latter. Moreover, through the device fabrication and preliminary experimental analysis of the aspherical double-liquid lens, the imaging resolution can reach 40.318 lp/mm. The aspherical double-liquid lens proposed in this work has the characteristics of simple structure and easy realization, which can provide a new scheme for high-quality imaging of liquid lens and its applications, and can expand the application scope of liquid lens.

Keywords: liquid lens, aspherical surface, planar electrode, dielectrophoretic effect

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230758

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

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



基于平面电极的非球面双液体透镜的设计与分析

孔梅梅 刘悦 董媛 薛银燕 潘世成 赵瑞

Design and analysis of aspherical double-liquid lens based on planar electrode

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 154206 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230758

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230758>

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

一种非对称双面离轴非球面反射镜检测补偿变焦光路设计方法

A method of designing asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror detection compensation zoom light path

物理学报. 2019, 68(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182253>

液体电极上辉光放电丝的运动特性研究

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface

物理学报. 2018, 67(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172205>

表面效应对纳米线电极屈曲失稳的影响

Surface effects on buckling of nanowire electrode

物理学报. 2022, 71(3): 033101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211864>

激光照明条件对超振荡平面透镜聚焦性能的影响

Effect of laser illumination conditions on focusing performance of super-oscillatory lens

物理学报. 2020, 69(18): 184215 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200577>

基于中红外光参量振荡器光束质量优化的90° 像旋转四镜非平面环形谐振腔型设计与分析

Design and analysis of 90° image rotating four-mirror non-planar ring resonator based on mid-infrared optical parametric oscillator beam quality optimization

物理学报. 2019, 68(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182001>

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>