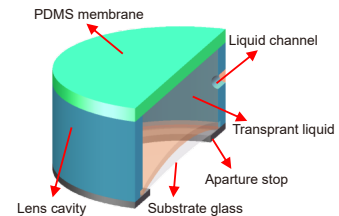


DOI: 10.12086/oe.2022.210404

可补偿像差的 PDMS 液体透镜

甘俊杰, 李磊*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065



摘要: 聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 液体透镜具有大口径、高光焦度的优点, 然而存在比较严重的像差。本文提出了一种可补偿像差的 PDMS 液体透镜, 由 PDMS 膜、液体材料和补偿基底组成。根据建立的抛物面面形的 PDMS 液体透镜的光学模型, 采用具有高折射率的液体材料 (1-乙基-3-甲基咪唑三氟甲磺酸) 和特殊设计的基底进行整体像差校正和提高光焦度的设计。我们对提出的透镜进行了加工制作和实验验证, 其有效光学口径为 25 mm, 光焦度范围为 $-5\text{ D} \sim +6\text{ D}$, 在可见光波段透过率超过 90%。对比传统的 PDMS 液体透镜, 本文提出的液体透镜可以改善成像质量, 在 $+5\text{ D}$ 光焦度时分辨率可达到 15 lp/mm, 在大口径的光学成像系统, 比如望远镜、AR、VR 等, 具有潜在的应用前景。

关键词: 液体透镜; 聚二甲基硅氧烷; 大口径; 透镜

中图分类号: O439

文献标志码: A

甘俊杰, 李磊. 可补偿像差的 PDMS 液体透镜 [J]. 光电工程, 2022, 49(5): 210404

Gan J J, Li L. PDMS liquid lens with corrected aberrations[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(5): 210404

PDMS liquid lens with corrected aberrations

Gan Junjie, Li Lei*

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract: Polydimethylsiloxane (PDMS) liquid lens has the advantages of large aperture and high power, but its aberration is serious. In this paper, a PDMS membrane liquid lens for correcting aberrations is proposed. The proposed lens is composed of a PDMS membrane, liquid material, and compensation substrate. Based on the paraboloid membrane model, an optical model of the liquid lens is established. The high refractive index liquid (1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate) and a compensatory substrate are used for correcting the aberration and improving the optical power. The proposed liquid lens is fabricated and the experimental results show that the effective optical aperture is 25 mm, the power range is $-5\text{ D} \sim +6\text{ D}$, and the transmittance in the visible band is more than 90%. Compared with the traditional lenses, the proposed liquid lens can improve the image quality, and the resolution is 15 lp/mm at $+5\text{ D}$ power. The proposed liquid lens has potential applications in large aperture optical imaging systems, such as telescopes, AR, VR, etc.

Keywords: liquid lens; polydimethylsiloxane; large aperture; lens

收稿日期: 2021-12-20; 收到修改稿日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61975139; 61927809)

*通信作者: 李磊, leili@scu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

液体透镜是一种可改变焦距的自适应透镜^[1-8], 相比于传统固体机械式变焦镜头, 液体透镜具有结构简单、体积小、无机械移动、易集成等优点, 在医用内窥镜、生物显微镜、手机镜头等诸多领域存在潜在的应用潜力。在多种驱动机理的液体透镜中, 基于液体表面曲率改变的弹力膜液体透镜具有结构简单、变焦范围更大、有效口径更大、驱动方式灵活等优点, 但也存在易受重力效应、膜层变形不均匀带来像质较差的缺点, 限制了弹力膜液体透镜的应用。

弹力膜液体透镜自上世纪就已受到人们的注意, 1971年, 美国佐治亚理工学院 Knollman^[4]等首先提出了弹力膜液体透镜的基本构想, 但没有对透镜细节进行过多描述。之后, 1993年, 日本名古屋大学 Sugiura 和 Morita^[5]提出了细化的透镜模型, 分析了液体透镜形变时的弹力膜面形, 但透镜像质仍有改进空间。进入 21 世纪, 针对弹力膜液体透镜的研究趋于活跃, 大量学者针对弹力膜液体透镜的口径、像质、光焦度等参数进行了研究。美国加州大学圣地亚哥分校 Zhang 等人在 2003 年提出基于 PDMS 的弹力膜液体透镜, 透镜口径达 20 mm, 最高分辨率为 25.39 lp/mm^[6]。次年又提出了改进型的液体透镜结构, 对光焦度进行了提升。但是在像质方面仍有提高的空间^[7]。中佛罗里达的 Wu 等人基于弹力膜提出了多种不同驱动机理的液体透镜^[8-11], 但这些透镜结构的有效口径较小。2009 年, Yu 等^[12]提出一种新颖的由气压驱动的透镜结构, 并在制作方法上有所研究, 口径约为 5 mm。2018 年, 浙江大学的 Chen^[13]提出了利用固体透镜校正像差的弹力膜液体透镜结构, 但透镜有效口径为 6 mm。2019 年, 华中科技大学的 Zhou 等^[14]人

提出利用非等厚的弹力膜提升弹力膜液体透镜像质的结构, 透镜有效口径为 4 mm。2020 年, 厦门大学的 Huang^[15]等人提出了一种利用电流体进行驱动的结构, 可以使用电磁源驱动, 口径为 3 mm。这几种结构在口径上仍有待提高。在能兼顾大口径、高像质的弹力膜液体透镜上还有待进一步研究。

为校正弹力膜液体透镜存在的像差, 本文提出了一种可补偿像差的大口径 PDMS 液体透镜, 提出的液体透镜由 PDMS 膜、液体材料和补偿基底组成, 弹力膜选用的 PDMS 具有良好的光学和力学性能, 是制造微流体系统常用的光学材料^[16-18]。根据建立的抛物面面形的 PDMS 液体透镜的光学模型, 采用具有高折射率的液体材料 (1-乙基-3 甲基-咪唑三氟甲磺酸) 和补偿基底进行整体的提高光焦度和校正像差的设计, 在正负两个光焦度范围分别对液体透镜进行像差校正。对提出的液体透镜进行了加工制作和实验验证。提出的液体透镜有效光学口径为 25 mm。对比传统的 PDMS 液体透镜, 提出的液体透镜明显地改善了成像质量。

2 透镜结构及原理

所提 PDMS 液体透镜的结构如图 1(a) 所示, 透镜由 PDMS 弹力膜、透镜腔、填充液体和基底玻璃组成, 透镜腔留有液体进出的通道。其中, 光阑的作用是遮挡弹力膜变形过程中边缘不规则形变引入的杂散光线。外接的注射泵通过液体透镜腔的液体通道灌注或抽取液体, 造成透镜主体腔内的液体体积发生变化。初始状态下, 弹力膜不发生变形, 处于平面状态, 如图 1(a) 所示; 透镜腔内注入液体时, 透镜腔内液体量增加, 弹力膜受力鼓起, 此时透镜呈现凸透镜状态, 如图 1(b) 所示; 抽出液体时, 透镜腔内液体量减小,

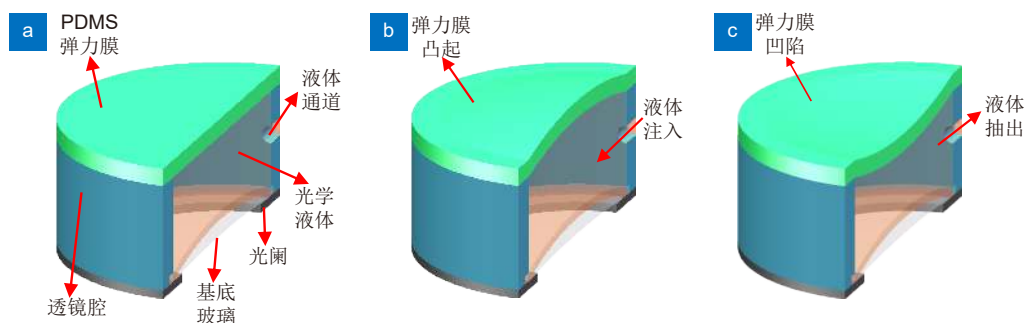


图 1 PDMS 液体透镜结构及工作原理。

(a) 透镜结构图; (b) 凸透镜状态; (c) 凹透镜状态

Fig. 1 Structure and principle of PDMS liquid lens.

(a) Lens structure; (b) Convex lens state; (c) Concave lens state

弹力膜受力凹陷, 此时透镜呈现凹透镜状态 (如图 1(c) 所示), 从而实现了液体光焦距的变化。

提出的液体透镜的光焦距主要由两部分组成: 液体部分光焦距 ϕ_1 和基底玻璃光焦距 ϕ_2 。

$$\phi = \phi_1 + \phi_2, \quad (1)$$

$$S = S_1 + S_2. \quad (2)$$

整个透镜的像差也由两个部分组成: 液体部分像差 S_1 和基底玻璃部分像差 S_2 。

传统的弹力膜液体透镜属于平凸透镜类型, 具有难以校正的像差。提出的液体透镜可以通过设计基底玻璃的面形改变光焦距和像差, 从而提升液体透镜光焦距, 减小像差, 如式 (3) 和式 (4) 所示。

$$\phi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right), \quad (3)$$

$$\phi_2 = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right), \quad (4)$$

式中: r_{11} 和 r_{12} 分别为玻璃部分前后面的曲率半径, r_{21} 和 r_{22} 分别为液体部分前后面的曲率半径, n_1 和 n_2 分别为玻璃和液体的折射率。

3 弹力膜形变模型建立及光学仿真

3.1 PDMS 液体透镜制作

为了获得形变后的 PDMS 弹力膜面形数据, 制作了弹力膜透镜, 制作流程如图 2 所示。透镜包括透镜腔、PDMS 薄膜、金属压片、连通管道、注射泵控制器等部分。透镜腔和金属压片均为铝合金圆环, 内

外径分别为 35 mm 和 43 mm。透镜腔厚度为 3 mm, 其中 1 mm 作为层台用于粘接基底玻璃, 侧壁留有通孔作为液体进出的通道; 金属压片厚度为 1 mm, 制作时粘接于 PDMS 弹力膜上表面上, 并略大于弹力膜的口径, 便于固定 PDMS 弹力膜。基底玻璃口径为 39 mm, 厚度为 1 mm。为了保证良好的面形, 采用光阑片限制, 因此, 透镜的有效通光口径为 25 mm。使用的液体为离子液体 1-乙基-3-甲基咪唑三氟甲磺酸, 折射率为 1.434, 阿贝数为 40.6。PDMS 为美国道康宁公司生产的 SYLGARD 184, 包括预聚物和固化剂两个部分, 配比比例为 9:1, 采用浇注法热固化成形, 得到的 PDMS 弹力膜直径为 42 mm, 厚度为 1 mm。

3.2 弹力膜形变模型建立

对制作好的 PDMS 液体透镜进行弹力膜面形的测试。用液体注射泵调整控制液体透镜腔中的液体量, 得到不同的光焦距, 用三维轮廓仪对不同光焦距下液体透镜的弹力膜进行面形扫描, 结果如图 3 所示。横坐标表示垂轴位置, 纵坐标表示薄膜的轴向形变量。其中, 图 3(a) 表示弹力膜的全口径形变情况, 可以看到弹力膜在靠近边缘的位置变形规律与其它位置不同, 这是由于弹力膜边缘处的形变受到固定方式的影响, 这部分面形会对光学成像引入不规则的像差。因此, 后续对弹力膜形变的测量, 只选取未受边缘影响的中心区域进行, 区域直径约为 25 mm。此外, 部分位置深度有跳变, 分析认为由于 PDMS 材料的特性, 容易有灰尘等小颗粒在弹力膜上吸附, 高精度的扫描探

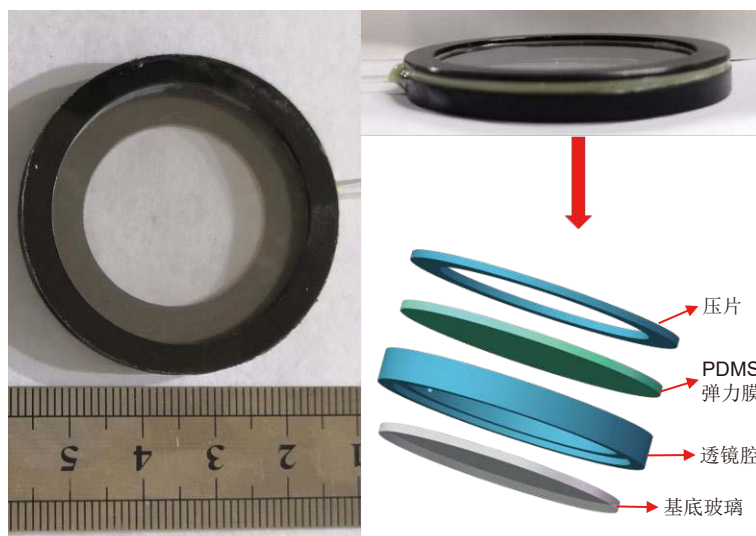


图 2 PDMS 液体透镜制作

Fig. 2 Fabrication of PDMS liquid lens

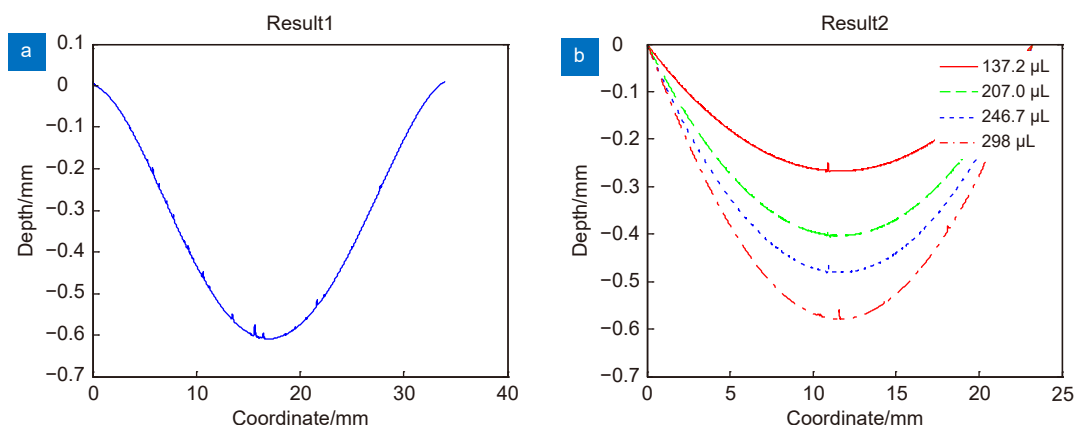


图3 弹力膜面形。

(a) 全口径面形; (b) 中心 25 mm 区域面形

Fig. 3 The deformation information of PDMS membrane.

(a) Surface profile of full aperture; (b) Surface profile of 25 mm in the central area

针在这些位置会将灰尘附加的深度信息记录进去, 折线图中的明显跳变均认为是污染造成, 不影响最终拟合结果。用酒精对弹力膜进行清洗, 液体注射泵抽取不同的液体量, 用三维轮廓仪扫描液体透镜的弹力膜面形, 扫描结果及部分拟合曲线如图 3(b) 所示。

根据面形测量结果, 弹力膜的面形数据可以用一元二次函数进行较好地拟合。因此, 薄膜形变时的表面不是一个球面, 而是一个抛物面。需要指出, 此处只扫描了 PDMS 软膜外侧的面形, 但考虑膜层厚度相对于有效直径很小, 同时为了简化后续光学设计的流程, 可以认为 PDMS 弹力膜两侧面形相同。

4 光学仿真及实验

4.1 光学仿真

根据测得的 PDMS 弹力膜面形, 在光学设计软件 Zemax 中建立了 PDMS 液体透镜的模型, 模型关键参数如表 1 所示。系统的入瞳直径为 25 mm, 最大视场角为 4° , 波段为可见光波段。由于优化变量较少, 仅在正焦距的焦段进行像质优化的选取主要与透镜的应用场景和所需要的光焦度相关。在本文中, 所提 PDMS 液体透镜在正光焦度段进行像差补偿, 范围约为 $0 \sim +6$ D。因此, 基底玻璃补偿像差的中心光

焦度选择在 $+2D \sim +2.5D$ 左右, 在此光焦度下达到最优的补偿效果, 而两边像质有一定的退化。

最终优化结果的布局图及在多个光焦度下的调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 曲线如图 4 所示, 其中图 4(a)、4(c)、4(e) 为优化结构的结果, 图 4(b)、4(d)、4(f) 为传统结构的结果。根据仿真结果, 正光焦度时, $+3D$ 、 $+5D$ 光焦度下, 优化结构的 MTF 在截止频率为 10 lp/mm 时的对比度分别约为 0.10 和 0.08, 中心视场的点列图 RMS 半径分别为 $50.90 \mu\text{m}$ 、 $75.43 \mu\text{m}$; 而传统结构的 MTF 在截止频率为 10 lp/mm 时的对比度分别约为 0.05 和 0.01, 中心视场的点列图 RMS 半径分别为 $98.66 \mu\text{m}$ 、 $102.35 \mu\text{m}$ 。经基底玻璃优化后的 PDMS 液体透镜成像质量有了显著提升。

4.2 成像实验

根据设计得到的参数, 制作了可补偿像差的 PDMS 液体透镜。对其进行成像效果的实验和测试。首先, 使用外接的注射泵控制器调节 PDMS 液体透镜腔内的液体体积, 测量了不同的液体改变量下液体透镜的光焦度, 得到液体透镜光焦度随液体改变量变化的关系, 如图 5 所示。可以看出光焦度的变化范围约为 -5 D $\sim +6$ D。拍摄实物成像效果, 对纸张上的

表 1 液体透镜材料关键参数

Table 1 Key parameters of liquid lens materials

面	材料	折射率	阿贝数	厚度/mm
液体	1-乙基-3-甲基咪唑三氟甲磺酸	1.434	40.6	边缘2.5
弹力膜	PDMS	1.411	40.0	1
基底玻璃	D-FK61	1.500	81.6	中心1

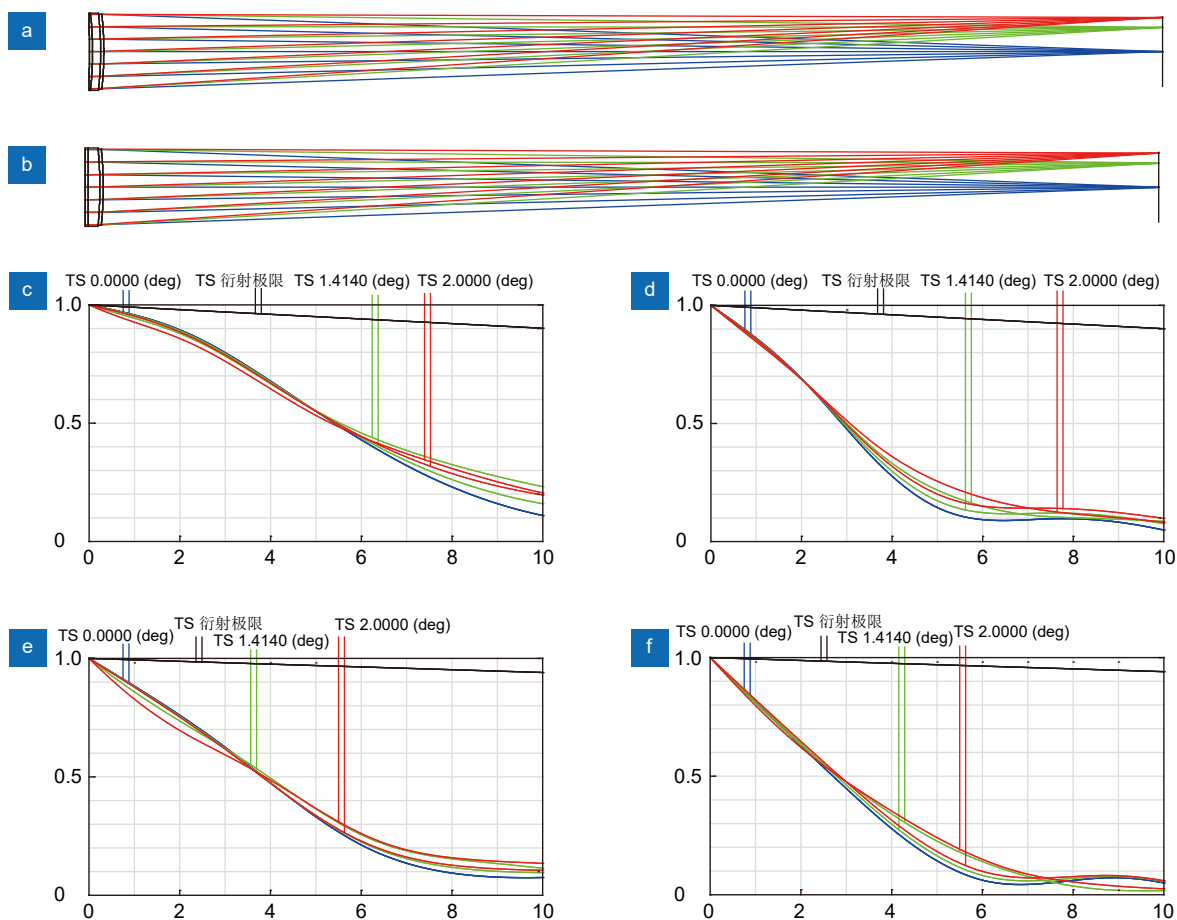


图4 光路及MTF曲线对比。

(a) 优化结构布局图; (b) 传统结构布局图; (c) 优化结构+3D时的MTF;
 (d) 传统结构+3D时的MTF; (e) 优化结构+5D时的MTF; (f) 传统结构+5D时的MTF

Fig. 4 The comparison of MTF curve.

(a) 2D layout of optimize structure; (b) 2D layout of optimize structure; (c) MTF curve of optimize structure at +3D;
 (d) MTF curve of traditional structure at +3D; (e) MTF curve of optimize structure at +5D; (f) MTF curve of traditional structure at +5D

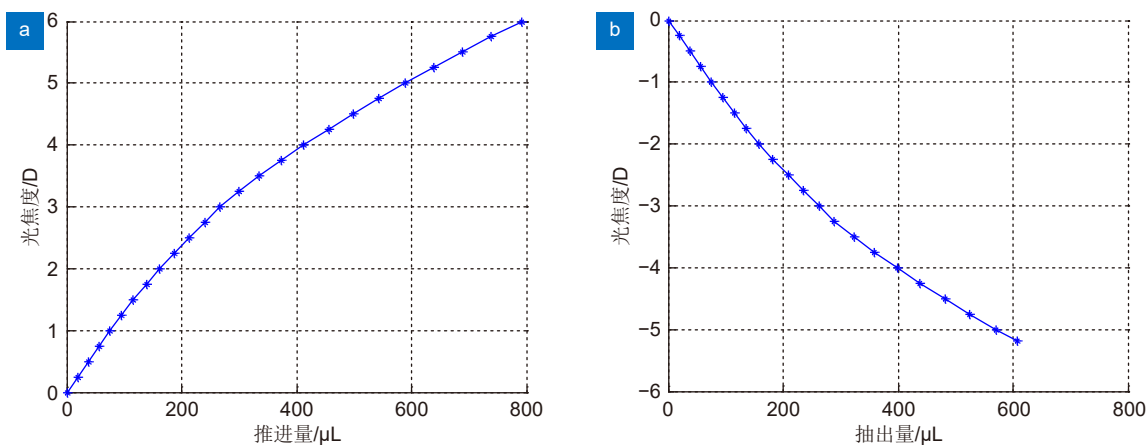


图5 PDMS液体透镜光焦度与液体改变量关系。

(a) 正焦距段; (b) 负焦距段

Fig. 5 Relationship between optical power and liquid variation of PDMS liquid lens.

(a) Positive focal length; (b) Negative focal length

“Liquid Lens”字样进行成像, 并用手机镜头进行拍摄, 物距为 12 mm, 像距为 22 mm, 得到不同液体改变量下透镜成像质量, 结果如图 6 所示。

其次, 搭建分辨率系统测试提出的液体透镜的成像质量, 实验装置如图 7 所示。使用平行光管对液体透镜进行像质测试, 平行光管型号为 FPG-6, 分辨率靶型号为平行光管自带的 2 号靶, CMOS 相机采集经过提出的液体透镜所呈出的分辨率靶的像。所用 CMOS 像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 分辨率为 1280×960 。使用液体泵控制器调节液体透镜光焦度为 +5D, 实验时使用 25 mm 光阑遮拦住通光口径外的区域, 以避免弹力膜边缘部分面形不规则形变带来的影响。对比实验为传统结构 PDMS 液体透镜进行的分辨率测试, 与所提透镜相比, 传统透镜仅在基底玻璃上有所不同, 传统透镜的基底玻璃为平板玻璃, 此处厚度为 1 mm。所得结果如图 8 所示。对比实验测试图,

可以看出, 提出的液体透镜最高可分辨 15 lp/mm, 传统结构的液体透镜最高可分辨 12 lp/mm。提出的 PDMS 液体透镜可以分辨更细的线对, 证明提出的 PDMS 液体透镜具有更好的像质。实验还测定了所提 PDMS 液体透镜的光学透过率, 在可见光波段透过率均在 90% 以上, 与传统 PDMS 液体透镜基本一致。

对比优化结果, 实验中液体透镜的分辨率要低于仿真结果。分析其原因如下, 首先, 分辨率靶成像结果存在一定程度的光晕, 分析认为是液体透镜多层面的结构带来的反射现象较为严重, 鬼像的存在影响了液体透镜的分辨率, 这个问题可以通过提高制作工艺, 如利用键合工艺进行较好的解决; 其次, 分辨率靶图像在不同方向的分辨率有差异, 表示透镜存在一定的像散, 除结构本身存在的像散, 更重要的是 PDMS 弹力膜受到液体重力效应的影响, 需要增大弹力膜的厚度或提高 PDMS 主剂的比例。

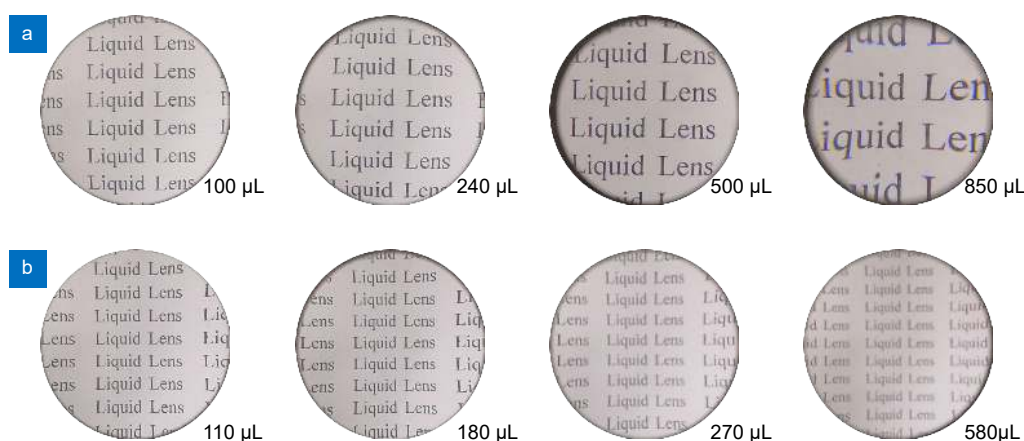


图 6 实物成像结果。

(a) 灌注不同液体量; (b) 抽取不同液体量

Fig. 6 Physical imaging results.

(a) Fill with different amount of liquid; (b) Draw with different amount of liquid

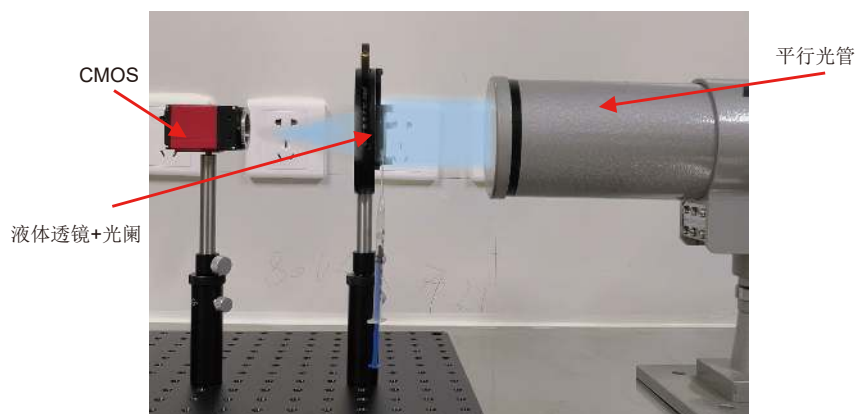


图 7 分辨率测试光路

Fig. 7 The optical system for resolution test

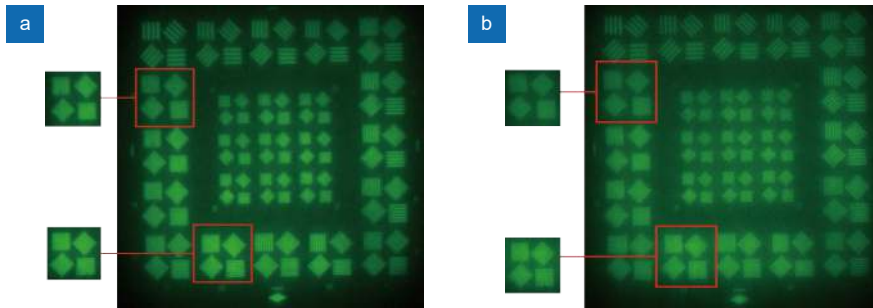


图 8 光焦度为+5 D 时分辨率测试结果。

(a) 提出的结构; (b) 传统结构

Fig. 8 The results of resolution test at +5D power.

(a) Proposed structure; (b) Traditional structure

5 结论

提出了一种大口径的可补偿像差的 PDMS 液体透镜, 通过液体泵的驱动改变透镜腔内的液体体积, 利用基底玻璃对液体透镜进行像差校正, 其具有 25 mm 有效通光口径, 透镜光焦度与液体量变化的三次方成正比, 最高分辨率为 15 lp/mm, 光学透过率超过 90%。相较于传统的 PDMS 液体透镜, 所提的 PDMS 液体透镜具有良好的成像效果, 在望远镜、眼镜、AR、VR 等大口径光学系统中, 具有潜在的应用前景。

参考文献

- [1] Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. *Eur Phys J E*, 2000, **3**(2): 159-163
- [2] Li L, Xiao L, Wang J H, et al. Movable electrowetting optofluidic lens for optical axial scanning in microscopy[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(2): 180025
- [3] Zhao R, Peng C, Zhang K, et al. Design and simulation of bionic compound eye with electrowetting liquid lens[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(2): 49-56
赵瑞, 彭超, 张凯, 等. 介电润湿液体透镜仿生复眼的设计与仿真[J]. *光电工程*, 2021, **48**(2): 49-56
- [4] Knollman G C, Bellin J L S, Weaver J L. Variable - focus liquid - filled hydroacoustic lens[J]. *J Acoust Soc Am*, 1971, **49**(1B): 253-261
- [5] Sugiura N, Morita S. Variable-focus liquid-filled optical lens[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(22): 4181-186
- [6] Zhang D Y, Lien V, Berdichevsky Y, et al. Fluidic adaptive lens with high focal length tunability[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(19): 3171-3172
- [7] Zhang D Y, Justis N, Lo Y H. Fluidic adaptive lens of transformable lens type[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(21): 4194-4196
- [8] Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens by changing aperture[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(21): 211107
- [9] Ren H W, Fox D, Anderson P A, et al. Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(18): 8031-8036
- [10] Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(10): 5931-5936
- [11] Xu S, Ren H W, Lin Y J, et al. Adaptive liquid lens actuated by photo-polymer[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(20): 17590-17595
- [12] Yu H B, Zhou G Y, Siong C F, et al. Lens with transformable-type and tunable-focal-length characteristics[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, **15**(5): 1317-1322
- [13] Chen S. Study on the variable focus liquid lens using PDMS membrane[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
陈帅. PDMS薄膜型可变焦液体透镜研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [14] 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]. *Opt Express*, 2019, **27**(26): 37667-37679
- [15] Huang X, Jin H, Lin S Y, et al. Adaptive electrofluid-actuated liquid lens[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(2): 331-334
- [16] Duffy D C, McDonald J C, Schueller O J A, et al. Rapid prototyping of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane) [J]. *Anal Chem*, 1998, **70**(23): 4974-4984
- [17] Schneider F, Draheim J, Kamberger R, et al. Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2009, **151**(2): 95-99
- [18] Ozkan E, Mondal A, Douglass M, et al. Bioinspired ultra-low fouling coatings on medical devices to prevent device-associated infections and thrombosis[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2022, **608**: 1015-1024

作者简介



甘俊杰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事液体光子器件研究。

E-mail: 3188198044@qq.com

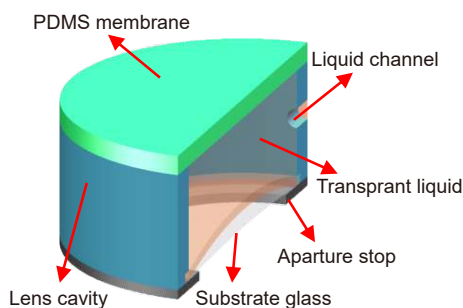


【通信作者】李磊 (1985-), 男, 研究员, 主要从事光学成像及光流控透镜研究。

E-mail: leili@scu.edu.cn

PDMS liquid lens with corrected aberrations

Gan Junjie, Li Lei*



The structure of PDMS liquid lens

Overview: As an important device of adaptive optics, Polydimethylsiloxane (PDMS) liquid lens has the advantages of large aperture and high power. By changing the amount of liquid in the cavity, the lens focusing can be realized with the deformation of the membrane. This kind of lens has been studied for more than half a century. However, the development and application of PDMS liquid lens were restricted because of its aberration. PDMS is an excellent optical material, but as a hyper-elastomer, its deformation characteristics are complex. Moreover, the deformable membrane can be susceptible to gravity effects. As a result, the aberration of the PDMS liquid lens is serious. In this paper, a PDMS membrane liquid lens for correcting aberrations is proposed. The proposed liquid lens is composed of a PDMS membrane, liquid material, and compensatory substrate. The aberrations caused by the compensatory substrate were opposite to the liquid part and the overall aberrations reduce. The work is divided into three steps. The first step is to measure and fit the surface profile of the PDMS membrane. Firstly, using a three-dimensional profilometer, the surface profile of the liquid lens at different power was scanned by the scanning probe stylus. Then curve fitting for depth data was performed to find the surface characteristics, and the results show that the PDMS membrane has a paraboloid profile during deformation. In the second step, an optical model of the liquid lens was established based on the paraboloid membrane model. Through optimization by Zemax software, the compensatory substrate parameters were determined. The high refractive index liquid (1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate) and a compensatory substrate are used for correcting the aberration and improving the optical power. In the third step, the proposed liquid lens is fabricated. Measurement with a focimeter for the relationship between optical power and liquid variation of the proposed liquid lens was conducted. The experimental results show that the effective optical aperture of the liquid lens is 25 mm and the power range is -5 D ~ +6 D. Finally, the optical performance was measured. Photos imaged through the proposed liquid lens were taken by a phone camera. An experimental system was designed for the resolution test, where the resolution target in a collimator was imaged through the liquid lens. What's more, the transmittance of the liquid in the visible band is more than 90%. Compared with the traditional lens, the proposed liquid lens can improve the image quality, and the resolution is 15 lp/mm at +5D power. The proposed liquid lens has potential applications in large aperture optical imaging systems, such as telescopes, glasses, AR, VR, etc.

Gan J J, Li L. PDMS liquid lens with corrected aberrations[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(5): 210404; DOI: [10.12086/oe.2022.210404](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210404)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61975139, 61927809)

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

* E-mail: leili@scu.edu.cn