

光学胶膜液体可变焦微透镜阵列

郭 凯, 彭 旷, 王文峰, 赵 江*, 李志彬

(湖北大学 物理与电子科学学院, 湖北 武汉 430061)

摘要: 微透镜阵列在光束匀化、波前测量、集成成像等领域有广泛应用。设计了一种基于光学胶膜 (Optically Clear Adhesive, OCA) 的液体可变焦微透镜阵列。采用矩形排列的硅微孔阵列控制单个透镜的孔径和排布, 并以 OCA 光学胶膜和去离子水作为微透镜阵列的塑形材料。通过调整微流体腔内液体注入的体积实现对透镜焦距从 1.46~10.44 mm 的调整。依据聚焦与成像实验证实了微透镜阵列具有良好的均匀性。最后, 将该微透镜阵列应用于激光光束匀化整形, 通过一对微透镜阵列实现了光束匀化整形。进一步通过固定一对微透镜阵列的间距实现匀化光斑尺寸在 7.2~8.4 mm 内可调, 为匀化光斑尺寸可调提供了新思路。

关键词: 微流控光学; 液体变焦微透镜阵列; 仿真; 匀化整形

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210958

Optical film liquid variable focus microlens array

Guo Kai, Peng Kuang, Wang Wenfeng, Zhao Jiang*, Li Zhibin

(School of Physics and Electronic Science, Hubei University, Wuhan 430061, China)

Abstract: Microlens arrays are widely used in beam homogenization, wavefront measurement, integrated imaging and other fields. A liquid tunable-focus plano-convex microlens array based on optical film (Optically Clear Adhesive, OCA) was demonstrated. A rectangular array of silicon microholes was used to control the aperture and arrangement of a single lens, and OCA optical film and deionized water were used as the shaping material of the microlens array. The focal length of the lens could be adjusted from 1.46 mm to 10.44 mm by adjusting the volume of liquid injection in the microfluidic cavity. According to the focusing and imaging experiments, it was confirmed that the microlens array had good uniformity. Finally, this microlens array was applied to laser beam homogenization and shaping. The beam homogenization and shaping were realized by a pair of microlens arrays. Furthermore, by fixing the spacing of a pair of microlens arrays, the size of the homogenized light spot can be adjusted within 7.2 mm to 8.4 mm, which provides a new idea for the adjustment of the size of the homogenized light spot.

Key words: microfluidic optics; liquid tunable-focus microlens array; simulation; homogenization

收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-02-21

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划 (Q20201006); 湖北省自然科学基金 (2020 CFB266)

作者简介: 郭凯, 男, 硕士生, 主要从事光器件设计与制作等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 赵江, 男, 讲师, 博士, 主要从事光电器件与系统等方面的研究。

0 引言

微透镜阵列是一系列微米级至毫米级孔径尺寸的透镜按照一定的排列形成的阵列。相较于传统的单透镜,微透镜阵列具有高并行性,每个单元都能独立完成各项功能。微透镜阵列在光场成像^[1-2]、光束匀化^[3]、集成成像^[4]、LED 相关色温调节^[5]等方面有广泛应用。然而,传统的定焦微透镜阵列却无法在一些可变焦距或宽视场的应用中发挥作用。采用微流体操控技术制备的微透镜阵列以其灵活的可调控性、制造工艺简便性、制造成本低廉等优点在微透镜制造领域一直是研究热点。其形成原理是微流体克服薄膜张力使薄膜表面发生凸起形变,从而形成微透镜阵列,微透镜阵列表面曲率由注入的微流体体积控制。目前,根据控制条件的不同,这种焦距可调的微透镜阵列主要被分为以下几种:驱动电压控制的电湿润效应的可变焦透镜阵列^[6-8]、电压控制的聚合物分散液晶的可变焦透镜阵列^[9-10]以及液压控制的充液型可变焦透镜阵列^[11-12]。相较于电压控制的微透镜阵列,充液型微透镜阵列可实现液压调节、液体粘度调节等多方式调节。

近年来,液体可调焦微透镜阵列通常采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜作为塑形材料^[13-14]。但由于其无粘性,需要利用键合技术将其与基片贴合。而光学胶膜(OCA)作为触摸屏的重要组成部分,具有良好的弹性、粘性(泊松比 0.3,杨氏模量 58 kPa)以及可见光范围高透光率(达到 99% 以上)等特性。薄膜本身还具有易于加工、成本低的特点,并且便于大量生产。相较于 PDMS 薄膜,由于其自身粘性较强,可以直接与基片贴合从而提升制作效率。由此,笔者利用 OCA 薄膜、微孔硅片阵列、基板玻璃、去离子水等材料设计了一种液体可变焦平凸微透镜阵列。

1 原理与制备

1.1 原理

液体可变焦微透镜阵列结构与形成原理如图 1 所示,OCA 薄膜粘附于具有矩形排布微孔的硅片上,玻璃基底、玻璃支撑与硅片组成微流体腔。微流体腔两侧分别设有毛细管作为微流体通道,用于空气的排出和液体的注入。未注入液体前,微流体腔内的气压与外界大气压保持一致,薄膜两侧压强相等,此时薄

膜不发生形变,如图 1(a) 所示。利用注射器注入去离子水,待微流体腔内气体排净后,密封出口。继续注入一定体积的去离子水,此时 OCA 薄膜两侧形成压强差,并发生一定程度的形变,形成平凸透镜,如图 1(b) 所示。通过调控薄膜形变量可以实现微透镜阵列的变焦。

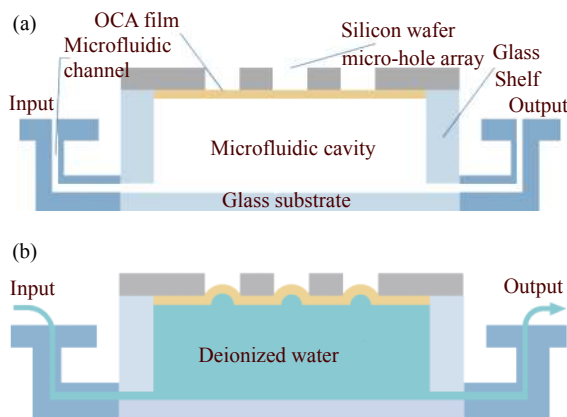


图 1 可变焦液体微透镜阵列原理图。(a) 注水前;(b) 注水后
Fig.1 Schematic diagram of tunable-focus liquid microlens array.
(a) Before the water injection; (b) After the water injection

1.2 制备工艺流程

(1) 微孔阵列制作:采用厚度为 0.2 mm 的硅片作为基材,利用飞秒激光打孔技术在该硅片上雕刻 3×3(单个孔径为 500 μm)的微孔阵列。飞秒激光波长为 515 nm,单脉冲能量为 120 μJ。获得的微孔阵列典型光学显微镜图如图 2 所示,各微孔均匀性较好,无崩边。

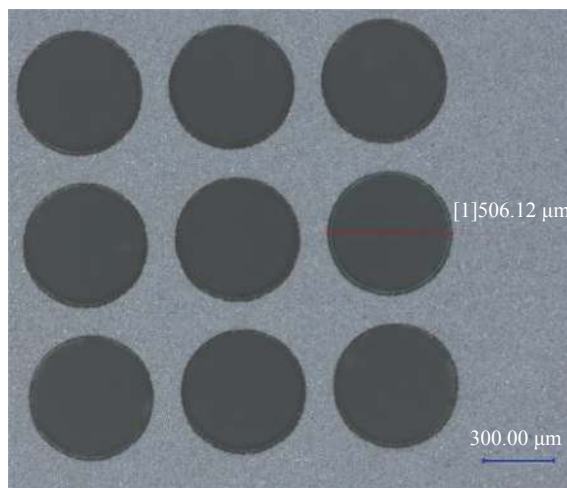


图 2 硅微孔阵列光学显微镜图
Fig.2 Optical microscope image of the silicon micro-holes array

(2) OCA 薄膜固定: 为了清除激光打孔后孔壁残余氧化物, 先将步骤 (1) 中制作完成的微孔阵列置于 5% 的氢氟酸中浸泡 10 min, 再用去离子水超声波清洗 10 min, 然后将清洗完成的样品取出吹干, 最后将样品平放至实验台, 将 OCA 薄膜 (厚度为 100 μm) 平铺至硅片上并完全覆盖微孔阵列区域, 均匀按压, 使其完全粘附, 如图 3(b) 所示。

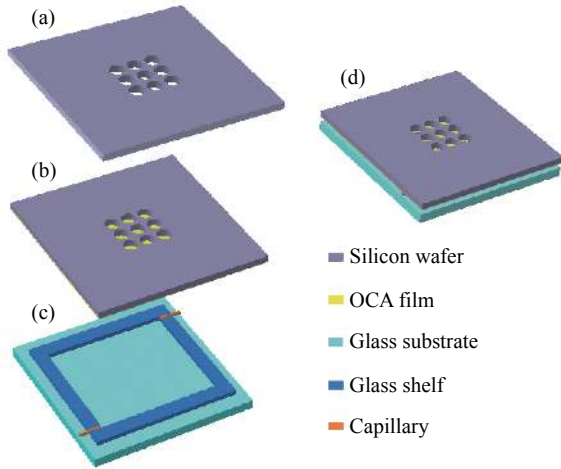


图 3 微透镜阵列制作流程图

Fig.3 Flow chart of microlens array fabrication

(3) 微流体通道制作: 如图 3(c) 所示, 一块面积为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 、厚度为 1.1 mm 的玻璃作为基底, 四块厚度为 0.6 mm 的矩形玻璃作为支撑, 内壁两侧预留宽度 0.6 mm 微孔通道放置毛细管 (内径为 0.3 mm), 利用紫外光学胶将毛细管密封到微孔通道中, 制成微流体通道。

(4) 微流体腔制作: 如图 3(d) 所示, 将紫外光学胶均匀涂抹至图 3(c) 中玻璃支撑上表面, 将步骤 (2) 中

制得的结构以 OCA 胶面朝玻璃支撑上表面粘贴, 并置于紫外光下照射 20 min 至紫外光学胶完全固化。

(5) 制作完成的可变焦液体微透镜阵列实物图如图 4 所示。



图 4 可变焦液体微透镜阵列实物图

Fig.4 The picture of assembled tunable-focus liquid microlens array

2 参数测量与性能测试

可调焦微透镜阵列焦距测量光路图如图 5 所示, 红光激光 (波长为 650 nm) 通过扩束后正入射至待测微透镜阵列玻璃基板, 待测微透镜阵列放置在 z 轴可移动位移平台 (带有螺旋测微仪) 上, 凸面朝向显微镜。固定微透镜阵列位置, 将 CMOS 相机置于显微镜目镜端, 调节显微镜物镜位置, 当通过 CMOS 相机观察到 OCA 薄膜与硅片粘合处最清晰的像时, 记录此时螺旋测微仪的值 l_1 。固定显微镜位置不变, 移动 z 轴可移动平台, 通过 CMOS 相机观察到激光聚焦后光斑直径最小时的红点光斑, 记录此时螺旋测微仪的值 l_2 , OCA 薄膜与硅片粘合表面位置至光斑直径最小时位置的距离视为焦距, 此时焦距为 l_2 与 l_1 的差值。

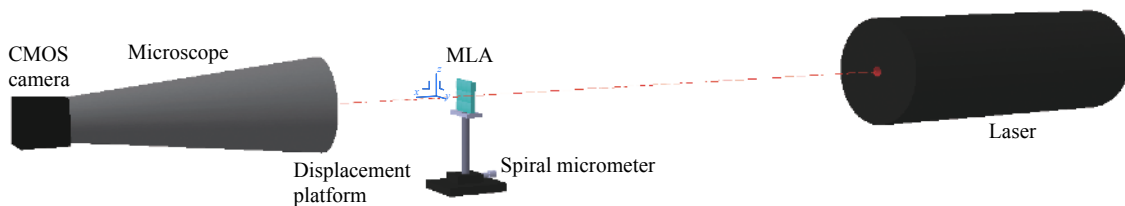


图 5 焦距测量原理图

Fig.5 Schematic diagram of focal length measurement

调节微透镜焦距时, 首先将注射器固定在提拉仪上, 设置提拉速度, 使去离子水以 $10\ \mu\text{m/s}$ 的速度注满

微流体腔, 待腔内空气排净后, 关闭出水口。之后, 控制提拉仪提拉速度和时间, 分六次逐次注入去离子

水,每次分别注入 0.33 μL,分别测量每次注水后微透镜阵列的焦距并记录聚焦光斑。其焦距与注水体积的关系如图 6 所示。微透镜阵列的焦距可以从 1.46~10.44 mm 调整,注水体积由 0.33~1.98 μL 调整,当注水体积到达 1.98 μL 后焦距基本保持不变,此时焦距值为 1.46 mm。主要原因在于硅片具有一定厚度,去离子水注入微流体腔到达一定程度时靠近平面区域薄膜会沿着孔内壁向外形变,此时薄膜的形变程度已经达到最大值,凸起程度不发生变化。不同注水体积下激光聚焦光斑如图 7 所示。可以看出,各个微透镜阵列聚焦光斑比较均匀。图 7(a)~(f) 注入水的体积逐渐增加,激光聚焦光斑直径也逐渐降低,这是由于 OCA 薄膜形变导致微透镜阵列焦距随注水体积增加而减小。

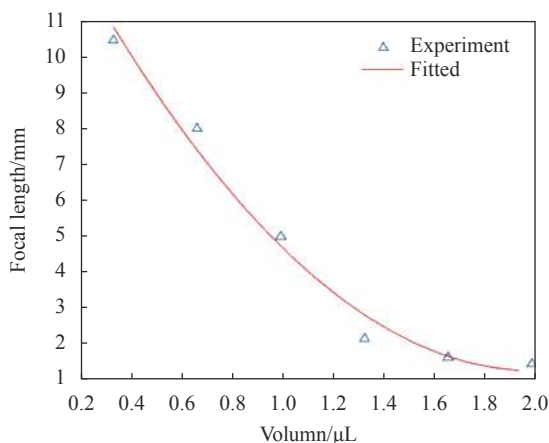


图 6 注水体积与焦距关系

Fig.6 Relationship between water injection volume and focal distance

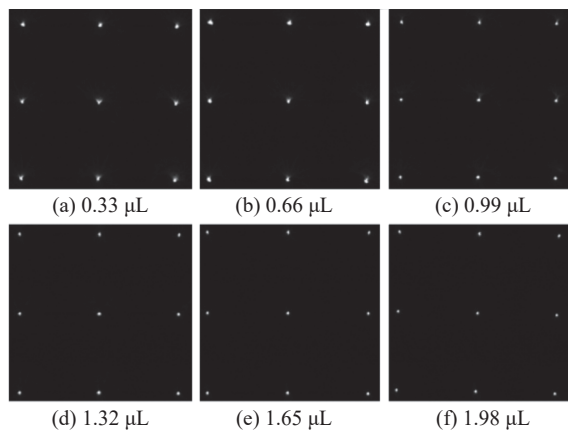


图 7 不同注水体积下激光聚焦光斑图

Fig.7 Laser spot focusing diagram of different water injection volume

进一步对微透镜阵列进行了成像测试,实验光路如图 8 所示。采用白光 LED 作为光源,在 LED 前设置有匀光板,使 LED 光均匀照射一个中心镂空有一个“F”字母(尺寸为 5 mm×3 mm)的矩形铝片掩模板。该字母作为物体,采用微透镜阵列对其成像。由于微透镜阵列焦距较短,物距较长,像距较短,为了使用 CMOS 相机记录所成的像,文中采用显微镜进行二次成像。将可调焦微透镜阵列、显微镜和 CMOS 相机同轴设置。显微镜分别采用×3 物镜和×16 目镜。固定物距,微调显微镜的位置,记录不同注水体积下成的像,如图 9 所示。

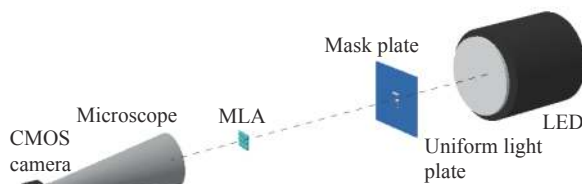


图 8 成像实验图

Fig.8 Imaging experimental diagram

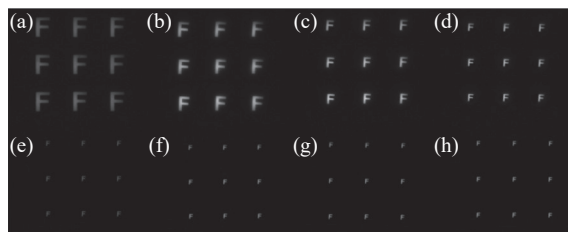


图 9 (a)~(h) 注水体积 0.33、0.66、0.99、1.32、1.65、1.98、2.31、2.64 μL 成像图

Fig.9 (a)-(h) Water injection volume 0.33, 0.99, 1.32, 1.65, 1.98, 2.31, 2.64 μL imaging diagram

由图 9 可见,在不同注水体积下,所成的像都表现出良好均匀性,进一步证实了微透镜阵列具有很好的均匀性。随着注水体积增加,微透镜阵列焦距减小,由高斯公式:

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

像距减小,垂轴放大率 $\beta = \frac{l'}{l}$ 也降低,因此,随着注水体积增大,成像尺寸逐渐降低。如图 9(f)~(h) 所示,当注水体积大于 1.98 μL 时,像的尺寸不再发生变化,主要原因是此时微透镜阵列焦距不再发生变化。

3 激光光束匀化整形

微透镜阵列在激光光束匀化整形中有着广泛的应用^[45], 激光光束匀化整形原理图如图 10 所示。

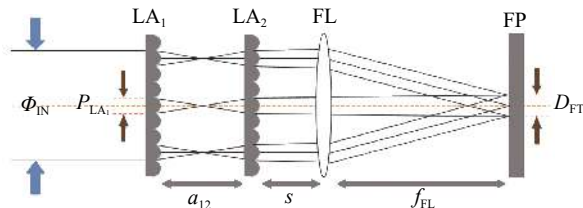


图 10 激光光束匀化整形原理图

Fig.10 Principle diagram of laser beam homogenization and shaping

光通量为 Φ_{IN} 的准直高斯光束分别通过第一组微透镜阵列 LA_1 、第二组微透镜阵列 LA_2 后被分割为若干束子光束, 由傅里叶透镜 FL 对子光束聚焦, 并在目标平面 (FP) 上叠加形成能量均匀的光斑。其中, a_{12} 为两透镜阵列间距, s 为 LA_2 与 FL 的间距, f_{FL} 为傅里叶透镜焦距。目标面上光斑尺寸为:

$$D_{FT} = P_{LA_1} \frac{f_{FL}}{f_{LA_2}} - P_{LA_1} \frac{f_{FL}}{f_{LA_1} \times f_{LA_2}} (a_{12} - f_{LA_2}) \quad (2)$$

式中: P_{LA_1} 为单个透镜孔径; f_{FL} 为傅里叶透镜焦距; f_{LA_1} 与 f_{LA_2} 分别为 LA_1 与 LA_2 焦距, 传统的定焦透镜阵列依据公式 (2) 中光斑尺寸约束条件, 通过调节 a_{12} 的大小, 可以在目标平面上得到匀化光斑 D_{FT} 。变焦透镜阵列则可以通过调整微透镜阵列的焦距方式实现光束匀化整形并且能实现匀化光斑可调。

依据激光光束匀化整形约束条件公式 (2) 与微透镜阵列可调范围, 确定参数如下: P_{LA_1} 为 0.5 mm, f_{FL} 为 38.1 mm, a_{12} 为 7.6 mm, s 为 13.74 mm。利用软件仿

真确定可实现匀化的参数值, 确定的两透镜阵列焦距可行范围为 5.5~6.6 mm。依据仿真参数值进行实验, 实验装置如图 11 所示, 激光通过衰减器衰减后经过扩束镜扩束, 并垂直入射两个同轴微透镜阵列。

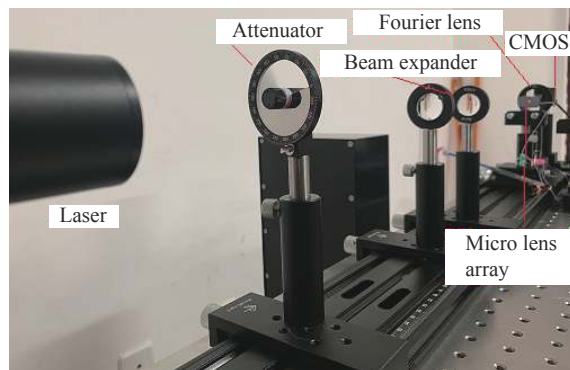
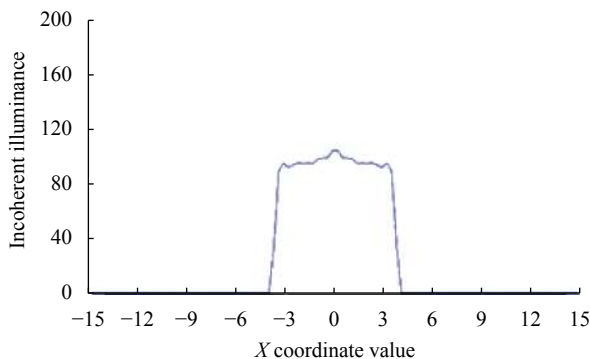
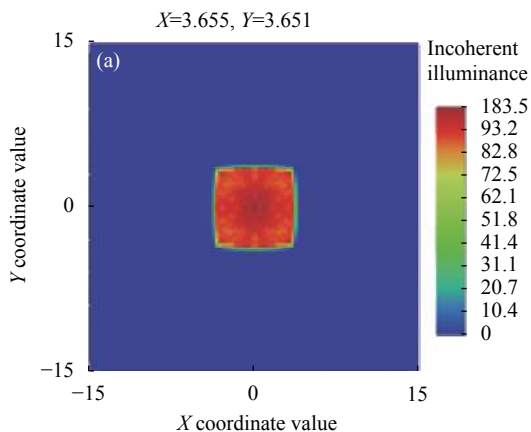


图 11 实验图

Fig.11 Experimental diagram

调节 LA_1 与 LA_2 的焦距大小, 获得了几组可实现匀化的系统参数值。图 12~14 为实现激光光束匀化整形仿真图与对应的实验图, 当 f_{LA_2} 为 5.5 mm、 f_{LA_1} 为 6.5 mm 时, 得到第一组光斑尺寸为 7.2 mm 的矩形匀化光斑, 如图 12 所示。可见光斑能量分布较为均匀, 但是光斑四角处能量较中间区域更低。由于实验采用了 3×3 透镜阵列, 透镜个数较少, 限制了高斯光源分割数, 影响了最终的匀化均匀性, 可以通过增加微透镜阵列的子透镜个数改善均匀性。

随着 f_{LA_2} 增加, 获取到第二组匀化光斑图, 如图 13 所示。当 f_{LA_2} 为 5.7 mm、 f_{LA_1} 为 6.3 mm 时, 光束实现匀化整形且匀化光斑由 7.2 mm 增加至 7.8 mm。此时, 随着 f_{LA_2} 由 5.5 mm 增加至 5.7 mm, 匀化光斑大小



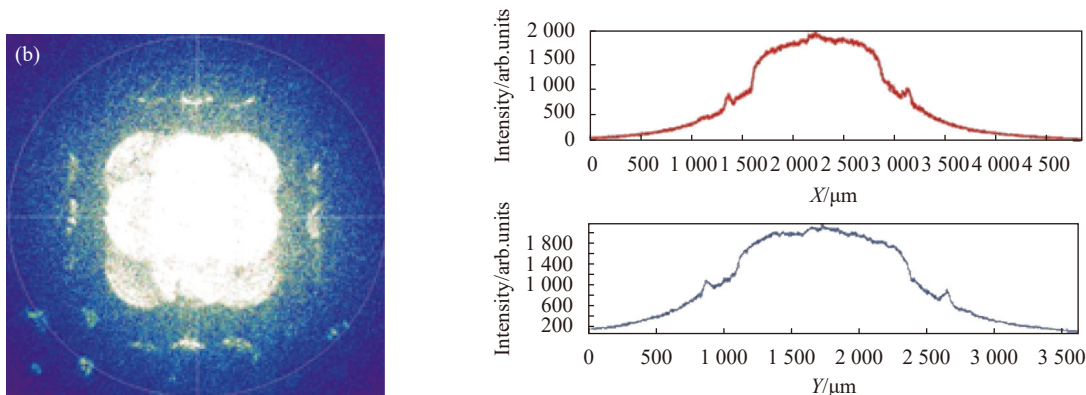


图 12 (a) f_{LA1} 为 6.5 mm 时仿真结果; (b) f_{LA1} 为 6.5 mm 时实验结果

Fig.12 (a) Simulation result when f_{LA1} is 6.5 mm; (b) Experimental the result when f_{LA1} is 6.5 mm

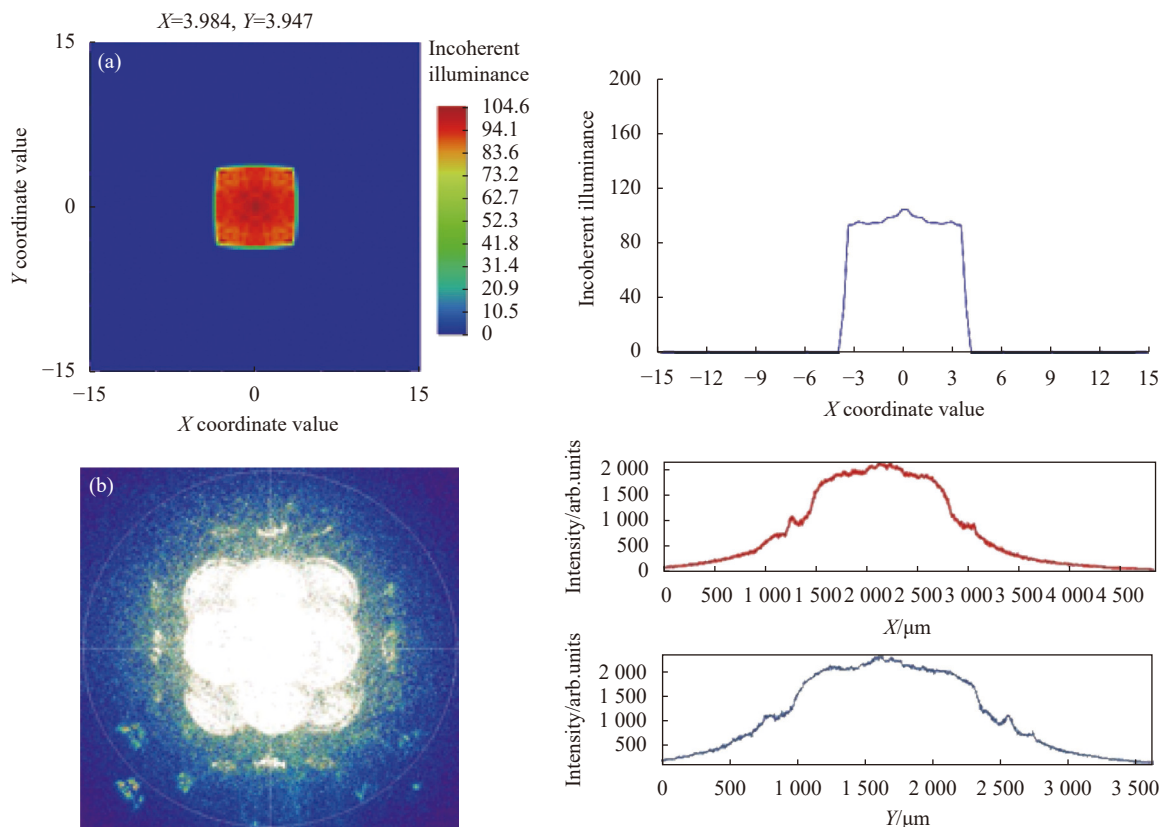


图 13 (a) f_{LA1} 为 6.3 mm 时仿真结果; (b) f_{LA1} 为 6.3 mm 时实验结果

Fig.13 (a) Simulation result when f_{LA1} is 6.3 mm; (b) Experimental result when f_{LA1} is 6.3 mm

随之增加。由此证实了匀化光斑的可调性,通过调整两组透镜阵列的焦距可以实现匀化光斑尺寸的调节。

继续增加 f_{LA2} 至 6.0 mm, f_{LA1} 分别为 6.1、6.2 mm 时,获取到第三组实验图如图 14 所示,匀化光斑增大。由公式 (2) 可知,由于 a_{12} 固定不变且均大于 f_{LA1} 与 f_{LA2} , 当 f_{LA2} 不变、 f_{LA1} 增大时, D_{FT} 随之增大。当

设定 f_{LA2} 为 6.0 mm、 f_{LA1} 由 6.1 mm 增加至 6.2 mm 时,光斑尺寸由 7.8 mm 增加至 8.4 mm,证实了实验的合理性。这种方式实现光束匀化相较于定焦透镜更加灵活,并且可以得到不同光斑大小的匀化光斑,为中低功率可见和近红外激光光束的匀化提供了一种新的思路。

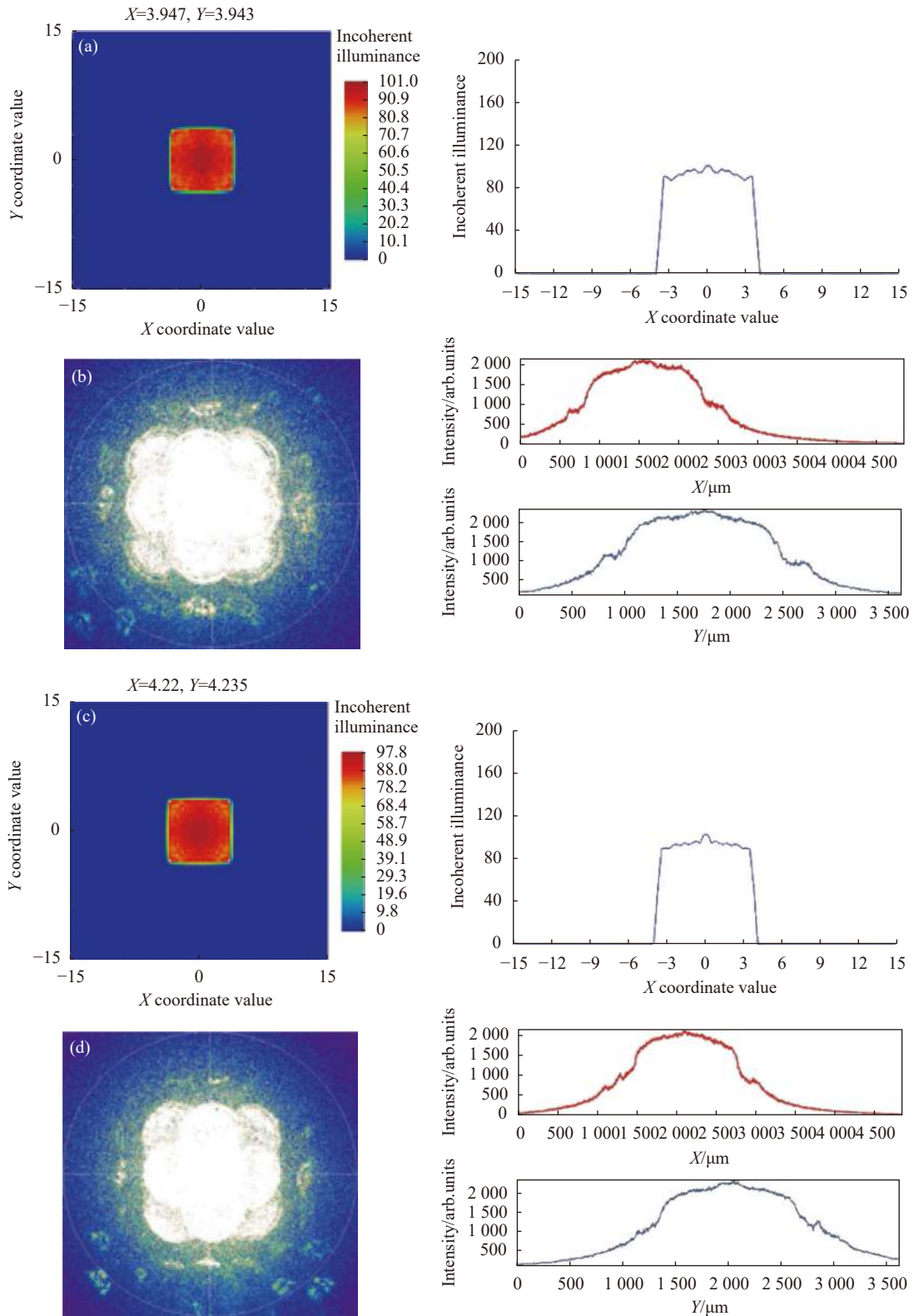


图 14 (a)、(c) f_{LA1} 分别为 6.1 mm 与 6.2 mm 时仿真结果; (b)、(d) f_{LA1} 分别为 6.1 mm 与 6.2 mm 时实验结果

Fig.14 (a), (c) Simulation result graphics of the f_{LA1} is 6.1 mm and 6.2 mm respectively; (b), (d) Experimental result graphics of the f_{LA1} is 6.1 mm and 6.2 mm respectively

4 结 论

文中利用 OCA 薄膜和超快激光打孔硅片实现了液体可调焦微透镜阵列的制作,采用调节去离子水注入体积控制薄膜形变的方法,实现了透镜焦距从 1.46~10.44 mm 的大范围调焦。分别通过聚焦光斑和成像实验证实了这种微透镜阵列在不同焦距下的均匀性。通过激光光束匀化整形仿真与实验证实仅通过改变单个微透镜阵列的焦距,而保持两个微透镜阵列的间距不变,可以实现矩形匀化光斑尺寸在 7.2~8.4 mm 内可调,但这种矩形匀化光斑尺寸的可调范围不大。可以预见,通过改变微透镜阵列中的单个透镜单元的排列可以得到不同形状的圆形光斑;增加单个透镜单元的数目可以进一步提升匀化光斑的均匀性。这种微透镜阵列有望在可见光和近红外中低功率下的可调匀化光斑应用领域中发挥作用。

参考文献:

- [1] Yang F, Li H, Peng J, et al. Research on microscopic imaging of high resolution light field based on graph regularization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0918001. (in Chinese)
- [2] Wang T F, Chen Y H, Fu Y T. Infrared light field relay imaging system based on micro field lens array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190548. (in Chinese)
- [3] An Y, Dong K, Li X, et al. Design of laser communication optical system with microlens array based on 3×3 optical matrix [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2206003. (in Chinese)
- [4] Wang X, Hua H. Design of a digitally switchable multifocal microlens array for integral imaging systems [J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33771-33784.
- [5] Chen J, Fritz B, Liang G, et al. Microlens arrays with adjustable aspect ratio fabricated by electrowetting and their application to correlated color temperature tunable light-emitting diodes [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): A25-A38.
- [6] Zhao R, Hua X G, Tian Z Q, et al. Electrowetting-based variable-focus double-liquid lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2592-2597. (in Chinese)
- [7] Noda K, Binh-Khiem N, Takei Y, et al. Focal length measurement of a varifocal liquid lens with capacitance detection [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(1): 69-76.
- [8] Sun K G, Kang M, Ouyang F, et al. Variable-focus liquid lens with suspended conical ring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1397-1402. (in Chinese)
- [9] Lei Y, Tong Q, Zhang X Y. Light field imaging with a gradient index liquid crystal microlens array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0220002. (in Chinese)
- [10] Wang D, Xu J B, Yuan R Y, et al. High stability liquid lens with optical path modulation function [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27104-27117.
- [11] Zhang X J, Zhou X, Yang Z X, et al. High-throughput and controllable manufacturing of liquid crystal polymer planar microlens array for compact fingerprint imaging [J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 3101-3112.
- [12] Cheng Y, Cao J, Tang X, et al. Optical zoom imaging systems using adaptive liquid lenses [J]. *Bioinspiration Biomimetics*, 2021, 16(4): 041002.
- [13] Wu W T, Liang Z C, Zhang L. Optofluidic varifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(6): 718-723. (in Chinese)
- [14] Sheng B, Wu H, Luo L, et al. Elastomeric microlens arrays with tunable focal length [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(22): 1952-1955.
- [15] Sun Y B, Xiong L L, Zhang P, et al. Optical design of laser diode beam-homogenizing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1205003. (in Chinese)