

液滴透镜在电场中的变形研究*

詹珍贤, 王克逸, 丁志中, 姚海涛

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 230027)

摘要: 利用电场作用操控液滴面形获得非球面液滴透镜, 并实时检测其光学性能, 利用紫外光固化技术使液滴透镜固化得到固体非球面透镜. 实验测量了液滴透镜的面形并经过图像处理提取面形轮廓, 经多项式拟合得出液滴透镜的面形表达式. 比较了不同强度电场作用下的液滴透镜面形, 计算了主曲率随电场的变化规律, 讨论了液滴透镜在电场中的变形机制; 根据透镜面形表达式, 采用光线追迹法得出了液滴透镜的焦距随电场的变化规律, 结合 ZEMAX 软件计算了 3 550 V 时液滴透镜的最大波像差为 0.32 个波长, Strehl Ratio 为 0.74, 及光学传递函数等参数, 计算了所制作的非球面透镜的像差, 为低像差非球面透镜的研制提供了依据.

关键词: 微光学; 液滴透镜; 电场作用; 非球面透镜

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)11-2900-4

0 引言

微透镜是微光学领域的重要元件之一. 近年来, 微透镜及其阵列器件在光互联^[1]、光学神经网络^[2]、集成成像^[3]等领域得到了广泛的应用, 其制作技术也得到了飞速的发展. 目前, 制作微透镜的方法主要有金刚石切削、光刻胶热熔成型法^[4]、模压成型法^[5]、光刻离子交换技术^[6]等. 液滴透镜法^[7]制作成本低, 表面光洁度高, 适合大批量生产和制造透镜阵列器件, 是制作微透镜的重要方法之一. 由于液滴自然形成的面形一般是球面, 通常不能很好地符合光学成像的要求, 因此目前采用液滴透镜法制作的微透镜多用于聚光, 而不能用于成像. 随着复眼透镜、3D 图像识别等技术的发展对微透镜及其阵列成像性能要求的提高, 非球面微透镜制作技术成为研究热点.

电场作用可以改变液滴面形现象的发现促进了非球面液滴透镜技术的迅速发展. Bell 实验室通过在分割的基底区域上施加电压, 改变液滴与基底的浸润角和液滴的表面张力从而改变了液滴的面形^[8]. 利用类似原理, Philips 公司研制出可变焦的微透镜并已形成产品^[9]. 实验证明通过施加电场, 液滴面形会由自然状态下的球冠形变为抛物面形甚至成为类圆锥形^[10]. 若采用紫外光固化技术将变形的液滴透镜固化, 则能形成固体微透镜^[11].

本文提出了一种制作变焦非球面液滴微透镜并

实时检测其光学性能的新方法. 选择透光的紫外光固化材料, 在实时进行光学检测的条件下, 利用电场作用操控液滴透镜的面形, 在检测到较好的透镜面形和聚焦状态时, 采用紫外光固化技术使液滴透镜固化, 可以制作具有良好成像和聚焦性能的非球面微透镜^[12]. 本文比较了不同强度电场下的液滴透镜面形, 研究了液滴透镜的主曲率和焦距随电场的变化规律, 计算了液滴透镜的波像差、光学传递函数和 Strehl Ratio 等参数.

1 透镜制作

本文研制了电场作用下的光固化非球面液滴透镜制作及实时检测的实验平台, 该系统的原理示意图如图 1. 该系统主要由液滴面形操控模块、横向检测光路、纵向检测光路和紫外光固化模块组成.

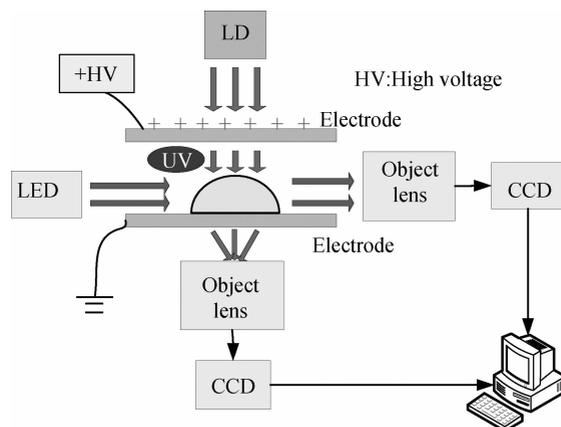


图 1 非球面液滴透镜制作及实时检测实验系统
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

将液滴透镜放置于两个平行的 ITO 透明导电玻璃电极之间, 上电极接高压电源, 下电极为零电位电极. 液滴透镜的面形随电场的变化而变化. 横向光

* 国家高技术研究发展计划(2006AA04Z333)和中国科学技术大学研究生创新基金(KD2007041)资助

Tel: 0551-3600149

Email: xianzz@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2008-11-17

修回日期: 2008-12-22

路由漫散射白光照明,使液滴侧面在 CCD 相机上成像,通过图像处理提取液滴透镜的面形轮廓,并经多项式拟合可以得出液滴透镜的面形表达式;根据面形表达式可以进一步进行光线追迹和像差计算.纵向光路由半导体激光器发出的光束经准直扩束后,经液滴透镜聚焦,用高倍光学显微物镜将聚焦光斑放大,通过 CCD 相机和自动寻焦系统获取液滴透镜的聚焦光斑图像,可以得到焦斑的位置,还可以进一步计算光学传递函数.若选用对紫外光敏感的液滴材料,在实时检测到较好的液滴面形和聚焦状态时,启动紫外光源将液滴透镜固化,则可以获得具有良好光学性能的非球面微透镜.该方法工艺简单,重复性高,配合精密二维平移台,可以制造非球面微透镜阵列器件.

2 结果及讨论

2.1 液滴透镜面形比较

放置于平面洁净基底上的液滴,由于尺度很小,重力的影响可以忽略^[13],液滴面形主要由表面张力决定;根据表面自由能最小原理^[14],液滴面形可以近似为球冠形.在静电场中,液滴表面受电场作用产生相应的感应电荷,导致液滴表面产生向外的作用力.该作用力与液滴表面张力相互作用,使液滴面形从自然状态下的近似球面向静电场作用下的非球面变化.因此,液滴在静电场中的面形是感应电荷产生的作用力和液滴表面张力相互作用平衡的结果.

利用上述实验平台,选用 Navitar 公司的 Precise Eye 系列低像差镜头(失真率保持在 0.14% 以下),本文测量了同一液滴透镜在不同强度电场作用下的面形图像.为了明显地比较不同强度电场作用下液滴透镜的变形,我们对液滴透镜的面形图像经过二值化、轮廓提取等图像处理,进行曲线多项式拟合.由于透镜是旋转对称的,其面形表达式为偶次多项式.由于液滴和基底浸润后底面积基本不变,起主要作用的是液滴透镜中心部分的变形,所以略去了 6 次以上的高次项,拟合的多项式形式如式(1).

$$z = z_0 + \frac{C(r+r_0)^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)C^2 r^2}} + a(r+r_0)^4 + b(r+r_0)^6 \quad (1)$$

式中 z 为轴向, r 为径向,引入 z_0 、 r_0 用于坐标轴矫正, C 为主曲率, K 为圆锥系数, a 、 b 为多项式系数.根据拟合得到的面形表达式,可以清楚地看出透镜面形轮廓的变形,如图 2.该液滴体积约 $10 \mu\text{L}$,材料折射率为 1.487 5,上下电极板间距为 3 mm.随着上电极电压的增大,液滴透镜的面形从初始状态下的球冠形向抛物面形变化,随着电场强度的进一步

增大,面形主曲率增大,液滴透镜面形变为类圆锥形,如图 2.这是由于上电极的高压静电场作用使液滴顶部聚集了大量的感应电荷,感应电荷产生的作用力使液滴顶部产生向外的作用力,该作用力与液滴表面张力相互作用达到平衡,使得液滴顶部面形曲率变大,成抛物面形甚至类圆锥形.从图 2 也可以发现,不同强度的电场中,3 550 V 时的液滴透镜面形与根据等光程原理得到的理想透镜面形^[15]最为接近.可见,随着电场强度的增强,液滴透镜的面形越来越接近理想透镜的面形,其成像性能也将越来越好.

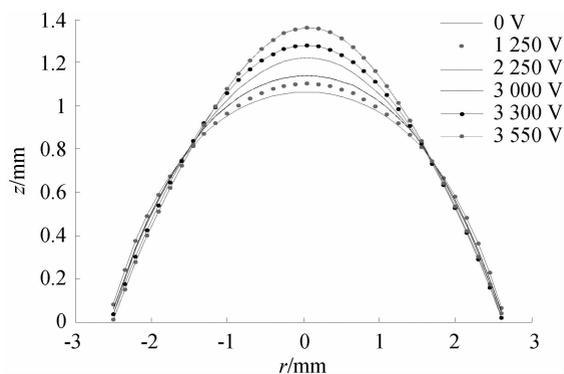


图 2 不同强度电场作用下的液滴透镜轮廓变形比较
Fig. 2 Comparison of liquid lens profiles in different electrostatic fields

为了更好地研究液滴透镜在电场作用下的变形规律,把液滴透镜随电场的变形量化,比较了各透镜面形的主曲率,即式(1)中的 C .根据已经拟合出的各电场强度下的液滴透镜面形表达式,很容易得到各电场强度下的液滴透镜面形主曲率,其数值和三次拟合曲线如图 3.图 3 表明,液滴透镜的面形主曲率随着电场强度的增大而增大,电压较低时主曲率增大的趋势较平缓,当上电极电压大于 2 000 V 时,主曲率随电场强度的增大而急剧增大.其变化与液滴材料的表面张力系数、液滴与基底的浸润角、上下极板间距等参数有关.

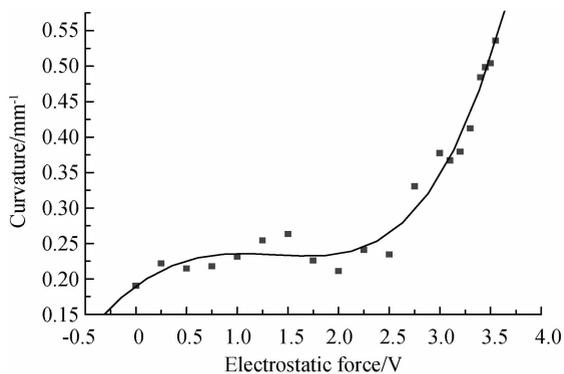


图 3 面形主曲率随电场变化曲线
Fig. 3 Principal curvatures in different electrostatic fields

2.2 焦距变化规律

为了考察液滴透镜聚焦性能的变化,根据拟合出

的各电场强度下的液滴透镜面形表达式,采用光线追迹法,计算了各电场强度下液滴透镜的焦距,其数值和三次拟合曲线如图 4. 焦距随电场强度的增大而减小,其减小趋势在电压低时较平缓,电压高时较急剧. 这表明利用高强度的电场作用能够制作大光焦度的非球面透镜;也表明采用电场作用操控液滴透镜面形的方法可以实现微透镜的变焦,其变形响应时间约为几十毫秒,且重复性好,可以应用在仿生眼、自动聚焦系统等一些需要连续、快速变焦的场合.

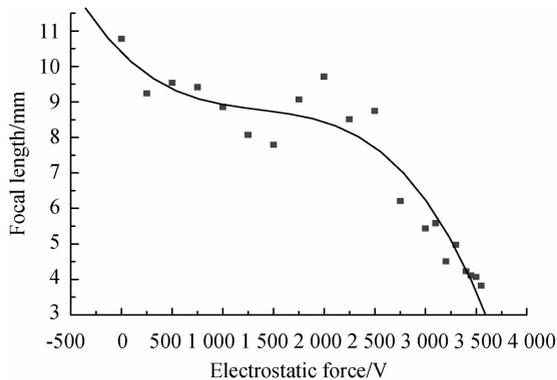


图 4 焦距随电场变化曲线

Fig. 4 Focal lengths in different electrostatic fields

2.3 光学性能评价

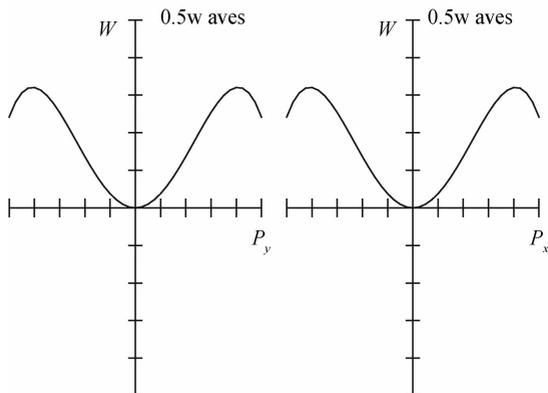


图 5 3 550 V 时非球面透镜的波像差

Fig. 5 Wave aberration of aspherical lens in 3 550 V

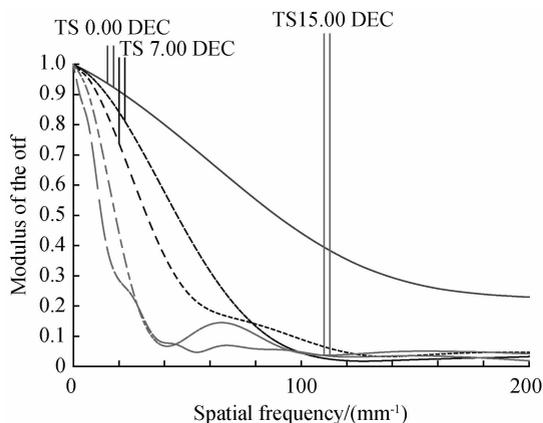


图 6 3 550 V 时非球面透镜不同视场角的光学传递函数

Fig. 6 Optical Transfer Function of aspherical lens in 3 550 V with different field angle

利用拟合出的液滴透镜面形表达式,将各多项式系数输入到 ZEMAX 光学设计软件中,用 ZEMAX 软件计算透镜的像差参数,对非球面透镜的光学性能进行评价. 3 550 V 电场作用下的非球面液滴透镜的波像差曲线如图 5,入射光线为 0° 入射的平行光,波长 λ 设为 650 nm,图示波像差的最大范围为 $\pm 0.5\lambda$, P_x 、 P_y 分别为透镜在 x 、 y 方向上的归一化光瞳半径. 可见,透镜的最大波像差为 0.32λ ,即 $0.2 \mu\text{m}$. 计算了 3 550 V 电场作用下非球面液滴透镜在 0° 、 7° 和 15° 三个不同视场角的光学传递函数,如图 6. 图 7 是 3 550 V 电场作用下非球面液滴透镜的点扩散函数的截面图,从点扩散函数可以计算出此时非球面液滴透镜的 Strehl Ratio 为 0.74. 这些参数说明所制作的非球面透镜的像差较小,具有良好的光学性能. 图 8 是所制作的非球面透镜的成像图像.

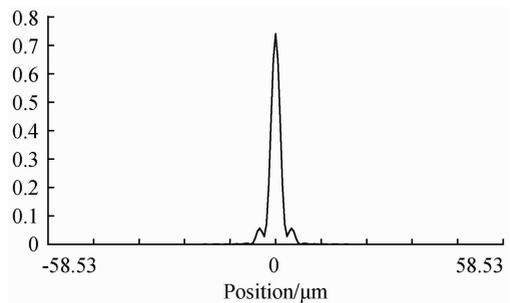


图 7 3550 V 时非球面透镜的点扩散函数

Fig. 7 Point spread function of aspherical lens in 3 550 V



图 8 非球面透镜的成像图像

Fig. 8 Image photograph of aspherical lens

3 结论

本文采用了一种制作变焦非球面液滴透镜的新方法,它利用电场作用操控液滴透镜的面形,并能实时检测透镜的面形和聚焦光斑图像. 实验测量并通过多项式拟合比较了不同强度电场作用下的非球面液滴透镜的面形,观察到透镜面形由球面变为非球面,讨论了透镜的主曲率、焦距随电场的变化规律,结合 ZEMAX 软件采用光线追迹法计算了 3 550 V 时非球面透镜的最大波像差为 0.32λ , Strehl Ratio 为 0.74, 并计算了光学传递函数,有助于进一步研制具有良好聚焦和成像性能的非球面微透镜及其阵列.

参考文献

- [1] CRAFT N C, FELDBLUM A Y. Optical interconnects based on arrays of surface-emitting lasers and lenslets[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(11):1735-1739.
- [2] AGU M, AKIBA A, MOCHIZUKI T, *et al*. Multimatched filtering using a microlens array for an optical - neural pattern recognition system[J]. *Appl Opt*, 1990, **29**(28):4087-4091.
- [3] HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square self-focusing lens array and its image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):221-223.
韩艳玲,刘德森,蒋小平.方形自聚焦透镜元阵列及其成像[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2):221-223.
- [4] GAO Ying-jun, LIU De-sen, YAN Guo-an, *et al*. Fabrication of high quality photoresist microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(10):909-913.
高应俊,刘德森,阎国安,等.高质量光刻胶微小透镜阵列的制作[J]. *光子学报*, 1996, **25**(10):909-913.
- [5] SHEN X J, PAN L W, LIN L. Microplastic embossing process: experiment and theoretical characterizations[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, **97**(98):428-433.
- [6] ZHANG Yu, LIU De-sen. Manufacture of hexagon aperture plane micro-lens array and its basic characteristic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8):1639-1642.
张玉,刘德森.六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8):1639-1642.
- [7] XIE Y, LU Z. Tunable liquid microlens with three-dimensional adjustment of the position of the focal spot[J]. *J Opt Tech*, 2005, **72**(6):445-447.
- [8] KRUPENKIN T, YANG S, MACH P. Tunable liquid microlens[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(3):316-318.
- [9] WERBER A, ZAPPE H. Tunable microfluidic microlenses[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(16):3238-3245.
- [10] CHEN C, TSENG F. Tunable micro-aspherical lens manipulated by 2D electrostatic forces[J]. *IEEE Transducer*, 2005, **2A3. 2**:376-379.
- [11] O'NEILL F T, OWEN G, SHERIDAN J T. Alteration of profile of ink-jet-deposited UV-cured lenses using applied electric fields[J]. *Optik*, 2005, **116**:158-164.
- [12] ZHAN Zhen-xian, WANG Ke-yi. Fabrication of aspherical liquid lens controlled by electrostatic force[C]. *SPIE*, 2007, **6722**:67224P-1-67224P-7.
- [13] SCHILLING A, MERZ R, OSSMANN C, *et al*. Surface profiles of reflow microlenses under the influence of surface tension and gravity[J]. *Opt Eng*, 2000, **39**(8):2171-2176.
- [14] GENNES P G. Wetting: Statics and dynamics[J]. *Rev Mod Phys*, 1985, **57**(3):827-863.
- [15] ZHAN Zhen-xian, HE Jian-hui, YAO Hai-tao, *et al*. Aspherical liquid micro-lens manipulated by electrostatic forces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):361-364.
詹珍贤,何建慧,姚海涛,等.电场作用下的变焦非球面液滴微透镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2):361-364.

Deformation of Liquid Lens in Electrostatic Field

ZHAN Zhen-xian, WANG Ke-yi, DING Zhi-zhong, YAO Hai-tao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A new method of fabricating aspherical liquid lens by employing electrostatic forces to manipulate the shape of the liquid polymer lens with real-time measurement is proposed. The liquid lens shape has a deformation from spherical to parabolic and to near cone with the increase of the electrostatic force. Surface profiles of liquid lens in different electrostatic fields are compared and the mathematic expressions of the surface profiles are achieved by polynomial fitting. The variation of the lens principle curvatures is calculated and the mechanism is discussed. The focal lengths of liquid lens in different electrostatic fields is calculated by ray tracing method. The focal length decreases with the increase of the electrostatic force. Calculated by employing ZEMAX software, the max wave aberration of the aspherical liquid lens in 3 550 V electrostatic field is 0.32λ , and the Strehl Ratio is 0.74. And also, the Optical Transfer Function is calculated. The results are useful for the fabrication of aspherical liquid lenses with fine optical performance.

Key words: Micro optics; Liquid lens; Electrostatic force; Aspherical lens



ZHAN Zhen-xian was born in 1982. Currently he is working as a Ph. D. degree candidate at USTC, and his research interests focus on micro lens, aspherical lens and liquid lens.