

文章编号: 0253-2239(2008)02-0361-04

# 电场作用下的变焦非球面液滴微透镜

詹珍贤 何建慧 姚海涛 王克逸

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 提出了一种制作变焦非球面液滴微透镜并在线检测其光学性能的新方法。在实时进行光学检测的条件下, 选择光固化材料, 利用电场作用操控液滴透镜的面形实现变焦, 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, 可制作具有良好光学成像和聚焦性能的非球面微透镜。研制了紫外光固化非球面液滴微透镜制作平台及在线检测系统, 实验观察并讨论了液滴透镜面形和聚焦光斑随电场作用的变化规律, 成功实现了液滴透镜的变焦, 并获得了良好的非球面面形和聚焦光斑, 证明了用此方法制作高成像性能的非球面微透镜的可行性。

**关键词** 微光学; 非球面透镜; 电场作用; 液滴透镜; 变焦透镜

**中图分类号** TN256; TN942.2<sup>+</sup>1 **文献标识码** A

## Aspherical Liquid Micro-Lens Manipulated by Electrostatic Forces

Zhan Zhenxian He Jianhui Yao Haitao Wang Keyi

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

**Abstract** A novel method of fabricating zoom aspherical liquid micro-lens from ultra-violet (UV) curable polymer with on-line measurement is proposed. Electrostatic forces are employed to manipulate the shape of liquid polymer lens. Surface profile distortions of the liquid lens result in its focus variability. UV light is employed to cure the liquid lens when its surface profile and focal spot are appropriate. Therefore, aspherical micro-lens with nice optical imaging and focusing abilities can be fabricated. An experimental system which can fabricate zoom aspherical liquid micro-lenses and on-line measure their surface profiles and focal spots is developed. Experimental results show the variations of the surface profiles and focal spots of liquid lens changing with the electrostatic forces, and realize its zoom focus successfully. Fine aspherical surface profiles and focal spots of the liquid lens demonstrate the feasibility of fabricating aspherical micro-lens by using this method.

**Key words** microoptics; aspherical lens; electrostatic forces; liquid lens; zoom lens

## 1 引 言

微透镜及其阵列器件在光学互联、光学测量设备、组合光学器件、光学通信以及光信息处理等领域有广泛的应用。近年来, 光束耦合<sup>[1]</sup>、光学神经网络<sup>[2]</sup>、集成成像<sup>[3]</sup>等技术的发展对微透镜成像性能的要求越来越高。非球面透镜因其优良的成像性能成为研究的热点。液滴透镜法<sup>[4]</sup>是制作非球面微透镜的重要方法之一。电场作用可以改变液滴面形现象的发现促进了液滴透镜技术的迅速发展。贝尔实

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<sup>[5]</sup>。利用类似原理, 飞利浦公司研制出可变焦的微透镜并已经形成产品<sup>[6]</sup>。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<sup>[7]</sup>。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<sup>[8]</sup>。

本文研究了电场作用下的光固化液滴非球面微透镜的制作及在线检测平台。选用对紫外光敏感的

收稿日期: 2007-05-11; 收到修改稿日期: 2007-09-30

基金项目: 国家 863 计划(2006AA04Z333)资助课题。

作者简介: 詹珍贤(1982-), 男, 福建龙岩人, 博士研究生, 主要从事非球面液滴微透镜方面的研究。

E-mail: xianzz@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王克逸(1962-), 男, 河北保定人, 教授, 博士生导师, 主要从事微光学和信息光学等方面的研究。

E-mail: kywang@ustc.edu.cn

液滴材料,在实时检测到良好的透镜面形和聚焦状态时,将液滴透镜固化则可得到光学性能良好的非球面微透镜。

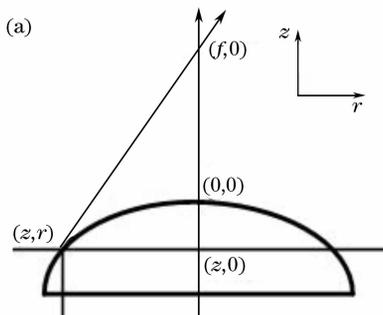
## 2 原理与方法

### 2.1 基本原理

理想的单透镜应能把入射的平行光束聚焦于一点,即入射到透镜各部分的光线在聚焦时所走过的光程应相等。

在图 1(a)中,根据等光程原理,两平行光线被透镜折射到焦点处的光程应相等,则有

$$\sqrt{(f-z)^2 + r^2} = f + n(-z), \quad (1)$$



化简为

$$4(n^2 - 1)z^2/D + 8(1 - n)(f/D)z - D = 0, \quad (2)$$

$$z < 0$$

式中  $n$  为透镜材料的折射率,一般大于空气折射率,  $D$  为透镜直径,  $f$  为顶焦距,  $f/D$  为透镜的相对孔径,  $z$  向为光轴方向。(2) 式所表述的是类抛物线的一条曲线,而且随着顶焦距  $f$  的减小,曲线的中心曲率即主曲率逐渐增大,变形为类锥线。假设透镜材料的折射率为 1.5,像方顶焦距为 1 mm,则(2)式所表述的理想透镜面形如图 1(b)所示,这是一条主曲率较大的曲线。

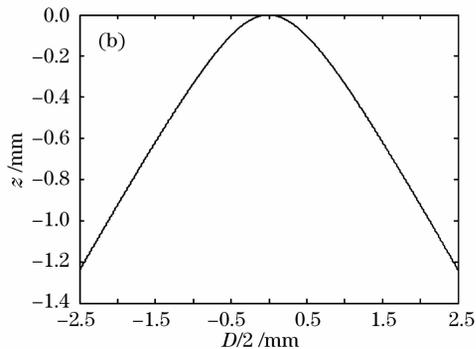


图 1 (a) 等光程光线, (b) 理想透镜面形

Fig. 1 (a) Light rays with equal optical path, (b) surface profile of a perfect lens

然而,传统的实际透镜的面形一般为球面,因此无法良好聚焦,存在不可避免的球差,具体表现为透镜无法将平行入射的光束聚焦于一点,而是形成一个较大的光斑,成像性能较差。为了获得良好的聚焦和成像性能,将液滴透镜放置于两个透明电极之间,利用电场作用改变液滴透镜的面形,得到了非球面液滴透镜。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,液滴面形主要由表面张力决定。根据表面自由能最小原理,液滴面形可近似为球冠形。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。

### 2.2 实验系统

光固化非球面液滴微透镜的制作及在线检测系统框架图如图 2 所示。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。将液滴透镜放置于两个平行的氧化锡锡

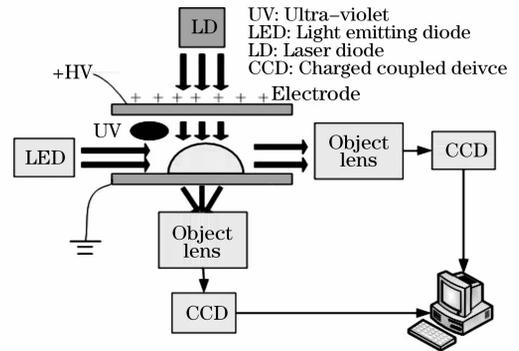


图 2 实验系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system (ITO)导电玻璃透明电极之间,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。横向光路由漫散射白光照明,使液滴侧面在电荷耦合器件(CCD)相机上成像,通过图像处理提取液滴透镜的面形轮廓,并经多项式拟合得出液滴透镜面形的表达式,根据面形表达式可以进一步进行光线追迹和像差计算。纵向光路由激光二极管发出的光束经平行准直后,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

进一步计算光学传递函数和焦点位置。

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。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 液滴透镜面形

图 3 显示了同一液滴透镜在不同强度电场作用下的面形图像。该液滴体积约  $10 \mu\text{L}$ ,上下极板间距为  $3 \text{ mm}$ 。将图 3 中的液滴透镜面形图像经过轮廓提取等处理及曲线多项式拟合,其面形轮廓变形比较如图 4 所示。

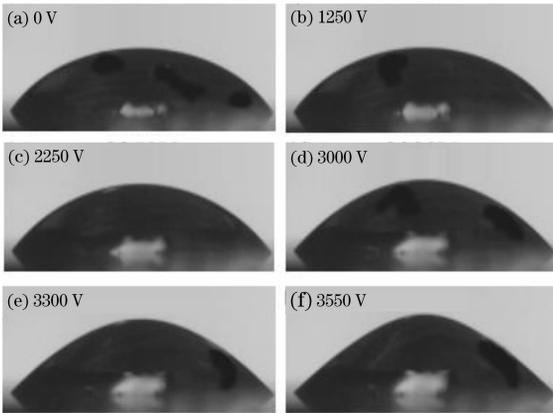


图 3 不同强度电场作用下的液滴透镜面形图像  
Fig. 3 Surface profile images of liquid lens at different electrostatic fields

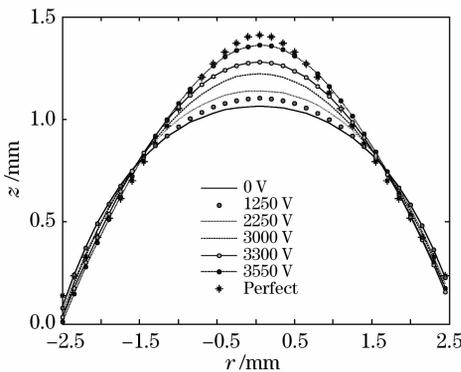


图 4 多项式拟合的不同强度电场作用下的液滴透镜轮廓变形比较

Fig. 4 Comparison of liquid lens profiles at different electrostatic fields, depicted by curve fitting

从图 4 中可以清楚地看到,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面向抛物面变化,随着电场强度的进一步增强,面形主曲率增大,液滴透镜面形变为类圆锥形,如图 3(f) 所示。

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 4 也可以发现,不同强度的电场中,3550 V 下的液滴透镜面形与(2)式所表述的理想透镜面形最为接近。因此,有理由认为,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。下文中的液滴透镜聚焦光斑随电场的变化规律也将证明这一点。

#### 3.2 液滴透镜聚焦光斑

液滴透镜的面形随电场作用的变化而变化,其聚焦性能也随之改变。将激光二极管(波长  $650 \text{ nm}$ )发出的光束准直扩束,经液滴透镜聚焦,用  $40\times$  显微物镜将聚焦光斑放大成像于 CCD 相机。图 5 显示了同一液滴透镜在不同强度电场作用下的聚焦光斑图像。将聚焦光斑图像用大津法取灰度阈值并二值化,计算焦斑的等效圆半径。液滴透镜的焦斑半径随上电极电压的变化趋势如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以发现,上电极电压在  $1250\sim 2500 \text{ V}$  时,液滴透镜的焦斑半径随电压的增大而增大,而在  $2500\sim 3550 \text{ V}$  时,焦斑半径随电压的增大急剧减小。这主要是由于在  $1250\sim 2500 \text{ V}$  时,液滴

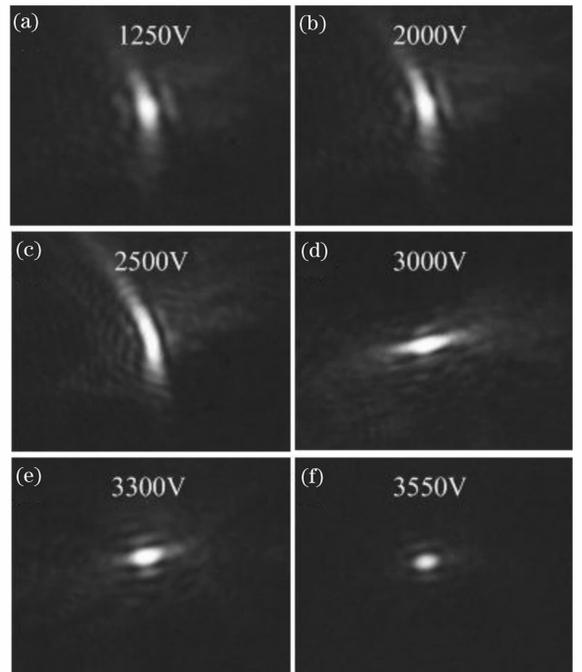


图 5 不同强度电场作用下的液滴透镜聚焦光斑图像  
Fig. 5 Focal spot images of liquid lens at different electrostatic fields

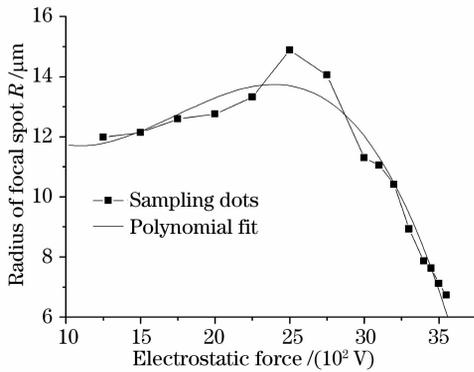


图 6 液滴透镜聚焦光斑半径随电场变化曲线

Fig. 6 Focal spot radii of liquid lens at different electrostatic fields

透镜因电场作用产生的感应电荷作用力较小,透镜面形主要由液滴透镜的表面张力决定。而放置于平面基底上的液滴透镜,其光轴自居中性较差,液滴透镜的底面形状可能偏离标准圆,因此其聚焦光斑存在较大的像差(主要为球差和像散)。而在 2500~3500 V 时,强电场作用使液滴透镜的感应电荷作用力增大,此时透镜面形主要由感应电荷作用力决定。因为对聚焦起主要作用的是透镜中心部分,边缘部分作用较小。强电场作用使液滴透镜的面形主曲率增大,呈抛物面形,因此像差较小,聚焦光斑变小变圆。而在 3550 V 附近,液滴透镜面形为类圆锥形,与(2)式所表述的理想透镜面形接近,因此得到的焦斑又小又圆,像差很小,体现出良好的成像性能。

但是,电场强度不能无限度地升高。当上下两电极板间距一定时,系统存在一个电压阈值。在本实验中,上电极电压超过 3550 V 时,液滴透镜的面形难以稳定,甚至有微小液滴颗粒被吸到上电极板,形成“纳米线”现象。这是由于强电场作用使液滴透镜顶部聚集了大量的感应电荷,感应电荷产生的作用力远大于液滴表面张力,无法达到平衡,导致

微液滴颗粒脱离了液滴表面的束缚。

## 4 结 论

用电场作用操控液滴透镜的面形,并实时检测液滴透镜面形和聚焦光斑的变化,在检测到较好的面形和聚焦状态时,使液滴透镜光固化,制作具有良好成像性能的非球面微透镜。实验检测了液滴透镜的聚焦光斑随电场作用的变化规律,得到了半径约 6.5 μm 的聚焦光斑,证明了利用电场作用操控液滴面形法制作具有高成像性能的非球面液滴微透镜的可行性,为研究高质量非球面微透镜及阵列的应用打下了良好基础。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Hua, Zeng Xiaodong, An Yuying. Double half cylindrical lens collimate the beam of laser diode[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 937~940  
马 华,曾晓东,安毓英. 双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 937~940
- 2 Chen Shu, Zhang Yanxin. Simulation on the errors of three optoelectronic hybrid neural networks induced by diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 430~436  
陈 戌,张延忻. 三种光电混合神经网络系统衍射误差的仿真研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 430~436
- 3 Liu Xu, Chen Lin, Cai Chun *et al.*. Investigation on focusing performance of tapered and lensed fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1182~1186  
刘 旭,陈 麟,蔡 纯等. 锥形透镜光纤聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1182~1186
- 4 Y. Xie, Z. Lu. Tunable liquid microlens with three-dimensional adjustment of the position of the focal spot [J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, **72**(6): 445~447
- 5 T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 316~318
- 6 Armin Werber, Hans Zappe. Tunable microfluidic microlenses [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(16): 3238~3245
- 7 Changwei Chen, Fangang Tseng. Tunable micro-aspherical lens manipulated by 2D electrostatic forces[J]. *IEEE Transducer*, 2005, **1**: 376~379
- 8 Feidhlim T. O'Neill, G. Owen, John T. Sheridan. UV cured lens: applied electric fields[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5523**: 330~338