

文章编号: 0253-2239(2009)11-3212-05

# 非球面液滴微透镜固化控制和焦斑测量研究

詹珍贤 王克逸 姚海涛 丁志中

(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** 利用电场改变液滴透镜的面形得到非球面,并实时检测其面形和焦斑图像,在适当的时候用紫外光固化液滴制作具有良好光学性能的非球面微透镜。比较了非球面液滴微透镜在固化前后面形、焦斑的变化和对透镜性能的影响,讨论了液滴透镜在固化过程中变形的机理和相应的解决方法。用分辨率 50 nm 的光斑探针扫描仪精确测量了固化后的非球面微透镜的聚焦光斑,测得了光斑轴向分布曲线和均方根直径  $3.384 \mu\text{m}$  的聚焦光斑,经图像处理计算了透镜的点扩散函数和光学传递函数,评价了所制作的非球面微透镜的聚光和成像能力,并给出了透镜的实际成像图像,对于完善高品质非球面微透镜及其阵列的制作工艺具有重要意义。

**关键词** 光学器件;非球面透镜;固化;液滴透镜;光斑探针扫描仪

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3212

## Study on Curing Control and Focal Spot Measurement of Aspherical Liquid Microlens

Zhan Zhenxian Wang Keyi Yao Haitao Ding Zhizhong

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

**Abstract** Aspherical liquid microlens of ultra-violet(UV) curable polymer was fabricated by using electrostatic field and real-time measurement. It was investigated that the surface profile and focal spot of the aspherical liquid lens had distortions while UV curing. The surface profiles and the focal spots before and after curing were compared. The reasons why distortion happened, its influence on lens's optical quality and how it can be solved were all discussed. Spot probe scanning microscope with 50 nm resolution was employed to accurately measure the focal spots of the aspherical microlens. The spots at different axis positions and focal spot with  $0.384 \mu\text{m}$  diameter were achieved. The point spread function and optical transfer function of the aspherical microlens were calculated, and the actual imaging photographs were provided. So the imaging ability of the aspherical microlens can be evaluated and it's important for perfecting the lens fabricating technology.

**Key words** optical devices; aspherical lens; curing; liquid lens; spot probe scanning microscope

## 1 引 言

作为微光学系统的重要器件,微透镜及其阵列广泛应用在光互联、光准直、集成成像等领域。液体透镜因其表面光洁、制作成本低、工艺简单等优点成为制作微透镜的重要方法之一。电润湿效应的发现

更使其成为研究的热点<sup>[1~3]</sup>。电润湿效应(Electrowetting)是通过改变固体-液体界面的外加电压来控制液体在固体上的润湿特性,Philips<sup>[4]</sup>和Varioptic公司<sup>[5]</sup>利用该效应改变两种等密度液体界面的曲率半径进行液体变焦透镜的研发,并推出

收稿日期: 2008-12-24; 收到修改稿日期: 2009-02-26

基金项目: 国家 863 计划(2006AA04Z333)和中国科学技术大学研究生创新基金(KD2007041)资助课题。

作者简介: 詹珍贤(1982—),男,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,教授,博士生导师,主要从事微光学、近场光学和信息光学等方面的研究。

E-mail: kywang@ustc.edu.cn

了原型产品。另一种方法是利用纵向的平板电容式电场控制放置于电场中的液滴透镜的面形,从而制作非球面液滴透镜<sup>[6,7]</sup>。由于非球面透镜能消除球差,因而能获得更高的成像质量。

我们研制了电场作用下的光固化液滴非球面微透镜制作及实时检测平台。选用光固胶作为透镜材料,利用平板电容式电场操控液滴透镜的面形,并实时检测液滴透镜的面形和聚焦光斑图像,在适当的时候用紫外光固化液滴制作具有良好光学性能的非球面微透镜<sup>[8]</sup>。本文研究了非球面液滴透镜在固化过程中的收缩变形对其光学性能的影响,并用光斑探针扫描仪精确测量了非球面微透镜的焦斑,计算了点扩展函数和光学传递函数等参数。

## 2 固化前后的变形

将液滴透镜放置于两个平行的氧化锡锡(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。随着电场作用的增大,液滴透镜的面形由初始状态下的近似球面向抛物面变化,甚至成为类圆锥形<sup>[8]</sup>。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光学性能良好的非球面微透镜。然而,实验中我们发现在受紫外光照射固化时,液滴透镜出现收缩变形,其面形和聚焦光斑都发生了变化,如图 1 和图 2 所示。

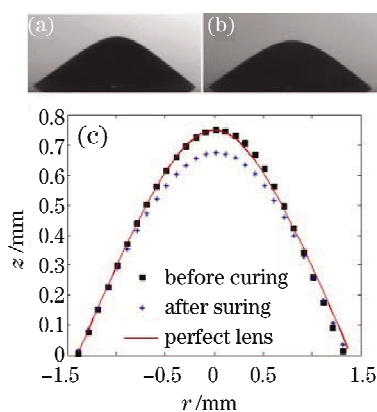


图 1 非球面液滴透镜固化前后的面形与理想透镜面形的比较

Fig. 1 Comparison of the surface profiles of aspherical liquid lens before and after curing with perfect lens

图 1(a)是一个非球面液滴透镜在固化前的面形图像,图 1(b)是固化后的面形图像,图 1(c)是图 1(a)和图 1(b)的面形图像经过轮廓提取和多项式拟合方法处理后的曲线比较,以及与根据等光程原理计算的相同焦距和折射率的理想透镜面形<sup>[8]</sup>的比

较。液滴材料为 MicroChem 公司的 SU-8 紫外光刻胶,此时上下电极间距 2.5 mm,上电极电压为 3970 V。图 2 是相应的焦斑图像对比,由平行光经液滴透镜聚焦,用 40 倍的平场显微物镜放大成像于 CCD 相机上测量得到,焦斑右上方的另一弱光斑是由显微镜同轴光源光路中半透半反镜的弱反射面造

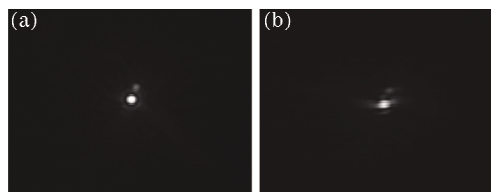


图 2 非球面液滴透镜固化前后的焦斑比较

Fig. 2 Comparison of the focal spots of aspherical liquid lens before curing(a) and after curing(b)

成的。图 1 清楚地显示,固化后非球面透镜发生了收缩变形,透镜高度由 0.747 mm 变为 0.674 mm,顶点曲率也由 0.864 变为 0.723。固化前,非球面液滴透镜的面形与理想透镜的面形基本吻合,如图 1(c)所示,其聚焦光斑为一个完美的艾里(Airy)斑,如图 2(a)所示。固化后,图 1(c)的比较显示固化变形使透镜面形与理想透镜面形存在偏差,面形的收缩变形导致了焦斑的弥散和离焦,图 2(b)所示的焦斑图像显示此时的非球面透镜存在微小的像差(主要为球差和像散),焦斑在光轴方向的位置与图 2(a)相比远离透镜约 110  $\mu\text{m}$ 。

收缩变形是光固化中普遍存在的问题,其主要原因是光固胶受紫外光照射发生液-固相变时产生的体积收缩。高分子固化过程中一般均会产生体积收缩现象,如丙烯酸树脂固化时体积收缩率达 15%~20%,而环氧树脂固化时体积收缩率也超过 5%<sup>[9]</sup>。我们所使用的 SU-8 光刻胶的主要成分是环氧树脂,它在光固化过程中,由于树脂的交联等原因会发生收缩。高分子固化时,由于高分子链上基团之间相互反应或与交联剂分子反应,基团间距离由原来的范德瓦耳斯力距离(约 0.3~0.5 nm)变为共价键距离(C-O 键约 0.154 nm)<sup>[9]</sup>,这是造成体积收缩的主要原因。

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,液滴透镜在电场中的面形就是这两个力相互作用平衡的结果。而环氧胶液在液-固相变过程中,其表面张力随之增大<sup>[10]</sup>,新的平衡状态使液滴透镜面形下降。这也是非球面液滴透镜在固化过程中变形的原因之一。

针对非球面液滴透镜在固化过程中收缩变形的问题,我们提出了预先补偿和实时补偿的解决方法。在加电场作用改变液滴透镜面形,实时测得良好的面形和焦斑时,把上电极电压再升高若干伏,将液滴透镜的面形适当提升,可以补偿固化过程中的收缩变形;并在紫外光照射固化过程中,根据透镜面形和焦斑的变化实时微调上电极电压,使焦斑保持固化前的形状和位置,不弥散不离焦,从而获得高质量的固体非球面透镜。另外,由于我们采用圆周均布的四个波长 365 nm 高亮度发光二极管组成环形紫外光源,图 2(b)所示的微小像差也可能是由于液滴透镜各部分受紫外光照射的不均匀所引起的,这可以通过增加紫外发光二极管的个数,或者固化时令环形紫外光源旋转使液滴透镜各部分均匀固化来解决。

### 3 探针扫描光斑测量

#### 3.1 光斑探针扫描仪

由于我们所制作的非球面微透镜的焦斑直径为若干微米,为了显示焦面光斑能量分布的细节,更可信地评价所制作透镜的成像质量,我们利用自行研制的光斑探针扫描仪精确测量了非球面透镜的聚焦光斑。光斑探针扫描仪是利用光纤探针扫描成像技术,可以精确测量微透镜及其阵列、自聚焦透镜和其他微光学元件的微光斑和工作距离等参数的仪器<sup>[11]</sup>,其系统原理图如图 3 所示。激光经望远系统扩束后,均匀照明被测透镜样品,经被测透镜样品聚焦后在其焦面上形成微光斑,由压电陶瓷管扫描器驱动的光纤探针在被测透镜的焦面上进行横向二维扫描,所得光学信号经光纤探针收集后传输到光电倍增管进行电信号转换,再经信号放大和 A/D 转换为数字信号,输入到计算机中重建成为光斑能量分布图,供显示、存储和分析计算。

光斑探针扫描仪可测量轴向范围 0.1 ~ 20 mm,横向范围 0.2 ~ 50  $\mu\text{m}$  的光强能量分布。

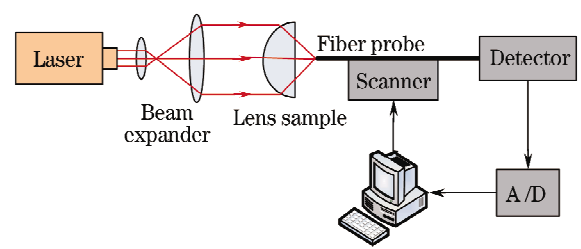


图 3 光斑探针扫描仪系统原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of spot probe scanning microscope

最重要的是,光纤探针经拉伸、腐蚀出尖锥并经过镀膜处理后,结合压电陶瓷管扫描器,所测量微光斑分布的光学分辨率高达约 50 nm,因此能够精确可靠地测量我们所制作的非球面透镜及其阵列的光斑图像,清楚地显示透镜焦斑能量分布的细节。并且,对扫描得到的光斑图像进行图像处理可获得二维和三维的点扩展函数(Point spread function, PSF),经快速傅里叶变换可以得到调制传递函数(Modulation transfer function, MTF),并能给出不同轴向位置的光场分布,能给出曲线并分析出能量密度与轴向位置的关系,因此可以正确地评价微透镜及其阵列的光学性能。

#### 3.2 非球面透镜焦斑

采用波长 650 nm 的半导体激光器作为光源,经原点定位、不同轴向位置的初步测量,初步确定了被测非球面透镜的焦面位置,然后在该位置轴向前后一段区域内进行有规律的层析扫描,得到了透镜光斑在焦面前后一段距离内的轴向分布曲线,如图 4 所示,显示了透镜光斑由离焦到聚焦再由聚焦到离焦全过程的情况。常见的激光光斑直径数值算法有等效圆法和均方根(Root mean square, RMS)法两种。等效圆法是利用与光斑具有相同面积的圆的直径来表征光斑大小。采用均方根法对测得的光斑直径进行计算,算法如下式所示,式中  $R(x)$  表示包含光斑总能量  $x\%$  部分所对应的半径

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{R^2(30) + R^2(50) + R^2(75) + R^2(80) + R^2(100)}{5}} \times 2.$$

所测非球面微透镜在焦面处的光斑图像如图 5 所示,其 RMS 直径为 3.384  $\mu\text{m}$ 。图 5 和图 2(b)都是非球面透镜固化后的焦斑图像,但测量方法不同;与图 2(b)相比,图 5 不存在测量光路造成的干扰弱光斑,且图 5 具有更高的分辨率,能更清楚地显示焦斑能量分布的细节。透镜的点扩展函数是把物体视

为发光点的集合,并以一点成像时的能量集中程度来表征透镜的成像质量。图 6(a)是对图 5 的焦斑图像进行图像处理得到的伪三维点扩展函数,图 6(b)是透镜焦斑在中心截面处的光强能量分布,以归一化的灰度值表示。图 6 表征了焦面上光斑能量的分布情况,中央亮斑集中了全部能量的 80% 以

上,说明所制作的非球面微透镜具有较良好的聚光和成像能力。

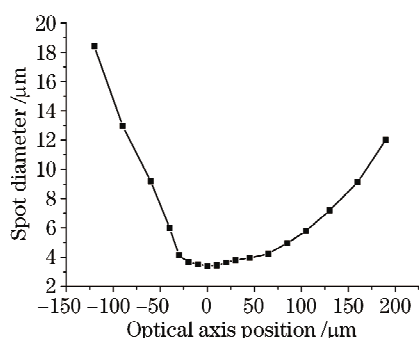


图 4 光斑轴向分布曲线

Fig. 4 Spot sizes at different axis positions

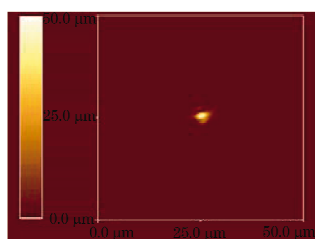


图 5 非球面微透镜聚焦光斑图像

Fig. 5 Focal spot of aspherical microlens

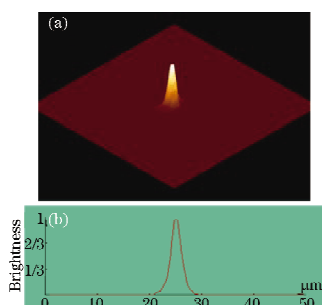


图 6 非球面微透镜点扩展函数

Fig. 6 PSF of aspherical microlens

透镜的光学传递函数是通过反映透镜对物体不同空间频率成分的传递能力来表征透镜的成像质量。图 7 是非球面微透镜的焦斑图像经快速傅里叶变换计算得到的 MTF 曲线,其截止频率约为 250 lp/mm,lp 为线对。说明所制作的非球面微透镜的成像性能较良好。图 8 是所制作的非球面微透镜的实际成像图像。

由于透镜各种像差的影响,在焦面附近的光斑尺寸会存在微小的波动。光纤探针较大的锥角和良好的镀膜可以提高光学信号的传输效率,其尖端小孔的直径则直接决定了光斑探针扫描仪的光学分辨率。另外,压电陶瓷管扫描器的非线性也是影响测量精度的主要因素。

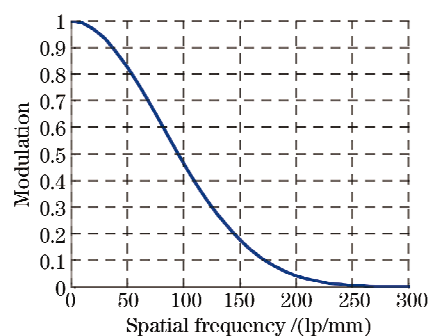


图 7 非球面微透镜调制传递函数

Fig. 7 MTF of aspherical microlens

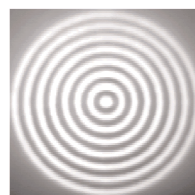


图 8 非球面微透镜成像图像

Fig. 8 Imaging photograph of aspherical microlens

与理想透镜的圆形焦斑相比,制作的非球面微透镜目前存在的像差主要是由固化过程中的收缩变形造成的;另外,透镜基底的不水平和表面粗糙度也可能影响透镜的轴对称性,使透镜底面形状偏离圆形,从而导致像差的出现。下一步,将采取补偿收缩变形、改造紫外光源以及控制透镜底面形状等方法优化透镜制作工艺,消除像差,制作具有更好成像性能的非球面微透镜。

## 4 结 论

用电场操控面形的方法制作非球面微透镜,发现非球面液滴透镜在紫外光固化过程中发生收缩变形,透镜高度缩小了 0.073 mm,顶点曲率由 0.864 降为 0.723,焦斑也出现 110 μm 的离焦。讨论了其收缩变形的机理和相应的解决办法。利用自行研制的光学分辨率高达 50 nm 的光斑探针扫描仪,对所制作的非球面微透镜的光斑进行了精确测量,得到了光斑轴向分布曲线和均方根直径 3.384 μm 的聚焦光斑,经图像处理计算了点扩散函数和光学传递函数,并给出了透镜的实际成像图像,说明了我们所制作的非球面微透镜具有较良好的聚光和成像能力。

## 参 考 文 献

- 1 C. Quilliet, B. Berge. Electrowetting: a recent outbreak[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2001. 6: 34~39

- 2 T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **82**(3): 316~318
- 3 Peng Runling, Chen Jiabi, Zhuang Songling. Design and analysis of a variable focus optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1141~1146  
彭润玲, 陈家璧, 庄松林. 电湿效应变焦光学系统的设计与分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1141~1146
- 4 S. Kuiper, B. H. W. Hendriks. Variable focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7): 1128~1130
- 5 B. Berge, J. Peseux. Variable focal lens controlled by an external voltage; an application of electrowetting[J]. *Eur. Phys. J. E*, 2000, **3**: 159~163
- 6 F. T. O'Neill, G. Owen, J. T. Sheridan. Alternation of the profile of ink-jet-deposited UV-cured lens using applied electric fields[J]. *Optik*, 2005, **116**: 158~164
- 7 Changwei Chen, Fangang Tseng. Tunable micro-aspherical lens manipulated by 2D electrostatic forces[J]. *IEEE Transducer*, 2005, **1**: 376~379
- 8 Zhan Zhenxian, He Jianhui, Wang Keyi *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, 王克逸 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
- 9 Zhen Zushuang, Li Miaozen, Wang Erjian. Photocrosslinking and application of linear copolymer P(VS-alt MA) containing oxo-spirocyclic pendant group [J]. *J. Func. Poly.*, 2000, **13**(1): 15~18  
郑祖爽, 李妙贞, 王尔监. 含氧螺环侧基线型共聚物的光交联和应用[J]. *功能高分子学报*, 2000, **13**(1): 15~18
- 10 Sun Deman. *Application Theory and Technology of Epoxy Resin* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 234~235  
孙德曼. 环氧树脂应用原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 234~235
- 11 Mi Changwen, Wang Keyi, Li Ming *et al.*. The method of measuring optical spot of radial gradient lens based on optical probe technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 244~247  
糜长稳, 王克逸, 李明 等. 基于光探针技术的自聚焦透镜光斑测量方法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 244~247