

飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列*

李明,程光华,赵卫,王屹山,贺俊芳,陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

摘 要:基于飞秒激光光刻技术和氢氟酸对光学玻璃的刻蚀,在 K9 光学玻璃表面制作了凹面微透镜阵列,并且可以以此为模板实现凸微透镜阵列的大量复制.用相位对比显微镜和扫描电子显微镜分析了微透镜阵列的表面轮廓,测试了微透镜阵列的光学衍射特征.该方法简单、透镜参量可控,制作的微透镜阵列能够用于分光、光束匀化、并行光刻等强激光领域.

关键词:飞秒激光;酸刻蚀;凹面微透镜阵列

中图分类号:O437 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2009)03-547-4

0 引言

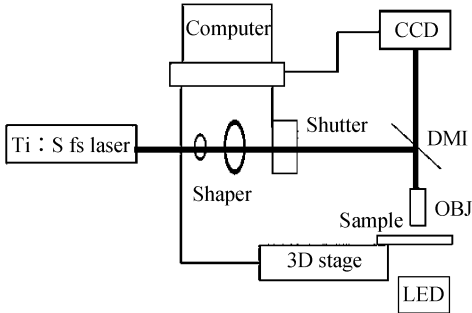
微透镜阵列是指由一系列直径在 10~100 μm 之间的微型透镜按一定的方式排列而成的阵列^[1-2].自 20 世纪 80 年代诞生以来,利用微透镜阵列可以实现光束的发射、聚焦、偏折、分割、复合、开关、耦合和接收等功能,以其重量轻、体积小、设计灵活可阵列化易于集成等优点,微透镜阵列,被广泛应用于光通信、自动控制、图像处理、数据储存、光计算及光互联等方面^[3].

文中介绍了一种用飞秒激光在透明介质上光刻和酸刻蚀制作微透镜阵列的方法,并且研究了以其为模板的复制技术.由于飞秒激光烧蚀具有较低的损伤阈值、有限的热影响区域和较高的加工准确度,在激光微加工领域具有重要的应用价值^[4-6].在实验中由于飞秒激光脉冲持续时间只有飞秒量级,远小于材料中受激电子通过声子将能量转移、转化等形式的放时间,从而避免了热扩散的影响,在加工过程中限制了热影响区,避免了热熔化的存在,实现了相对意义上的“冷”加工,因此飞秒激光光刻孔周围的区域不会将受到热影响,而且孔的边缘不会出现大量的熔化物质.

所用单脉冲能量约为 100 μJ,脉宽为 100 fs 的飞秒激光,用计算机自动控制系统控制放置了透明玻璃的微加工平台,利用超短脉冲激光与透明介质作用时^[7]的库仑爆炸机理在光学玻璃上制备了 20×20 的点阵,然后利用氢氟酸对光学玻璃的刻蚀的特点,在多种光学玻璃表面制作了凹微透镜阵列.并用静态铸塑复制的方法,复制了 PMMA 正微透镜阵列.

1 微透镜制作的工艺过程

图 1 为飞秒激光微加工系统的实验装置示意图,主要包括飞秒激光系统、光束控制系统、实时监控和聚焦系统、三维移动系统、快门和工业控制计算机及 CAD 控制软件.实验使用美国光谱物理公司的 MAITAI 自锁模钛宝石激光器作为飞秒激光种子源,输出的单脉冲能量约为 10 nJ,脉宽为 80 fs.放大器为光谱物理公司的 Spitfire,在 1 kHz、5 mJ 的激光泵浦下,输出能量 800 μJ,激光输出脉宽小于 120 fs.光束控制系统包括光束匀化、二分之一波片和偏振片组合的能量调节元件,其目的是保证好的光束质量.平场长工作距离聚焦物镜一方面将通过 45°反射镜的飞秒激光聚焦在样品上,同时将样品表面形貌成像在 CCD 上,其中 CCD 和物镜的距离是可调的.待加工材料样品放置在一个三维步进式精密移动平台上,移动平台为德国 PI 公司的 M405、M126 和 M111,在 X、Y、Z 方向的步长分别为 100 nm、118 nm 和 7 nm.本实验采用的待加工材料为透明的玻璃.本文中所开展的实验全部是在洁净(千级)空气条件下进行的.计算机控制的快门和三维移动平台在电脑的控制下,协同工作.整个系统由计算机自动控制,系统的位置误差不超过 0.1 μm,



* 国家自然科学基金(60678013)资助
Tel:029-88887601 Email:lmshgzhx@126.com
收稿日期:2007-12-05

图 1 飞秒微透镜加工实验装置
Fig. 1 Setup of femtosecond pulse laser micro-machining system

用 VC 语言程序编程控制三维微移动平台的运动的速度、位置、加速度和快门的开关。

2 结果

2.1 飞秒激光光刻

图 2(a)是用扫描电子显微镜拍摄的飞秒激光在 K9 光学玻璃表面制作的阵列,每一个点是 100 个飞秒激光脉冲在玻璃表面诱导的光学损伤产生的,点间距为 500 μm ,原始图是一个 20×20 的阵列,点的形貌与激光能量和激光脉冲数有关,选择合适的激光能量和激光脉冲数可以形成圆形的微爆坑,中间深、边沿浅,表面比较光滑整齐,如图 2(b). 强飞秒激光在不导电的玻璃表面消除材料的机理主要是库仑爆炸^[8-11],该过程首先是材料通过多光子过程吸收部分激光能量电离,强电离的结果导致电子全部溢出,剩下带正电荷的离子,由于正电荷之间的库仑斥力将离子、离子团推出,形成的损伤坑. 该过程与激光强度和电场的空间分布相关,由于实验中所用的激光光束为高斯分布,因此坑的形态也是中间深、边沿浅. 另外,库仑爆炸遗留下来的坑周围有结构缺陷和众多的离子键,由图 2(a)可以看出,每个损伤坑的周围有深色较大的表面损伤破坏区域,对 HF 的腐蚀很敏感,利用 HF 酸溶液酸腐蚀玻璃的原理对微透镜表面抛光,因此,在 HF 的腐蚀下,坑逐渐变大,表面光洁度变得更好.

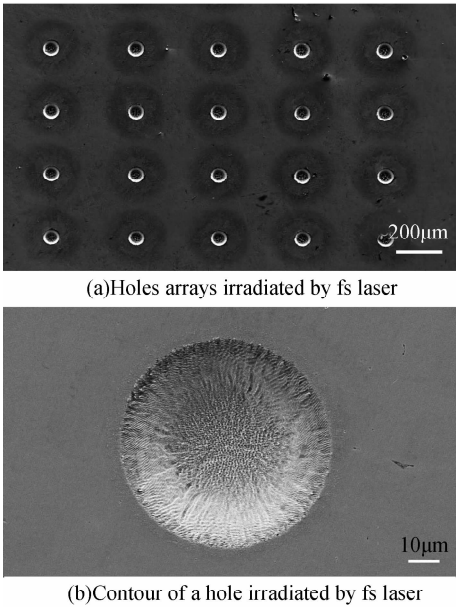


图 2 用 fs 激光在玻璃上光刻的损伤坑阵列及单个坑的形貌
Fig. 2 The original samples irradiated by fs laser

2.2 HF 溶液刻蚀

将光刻后的玻璃样品浸入稀的 HF 酸溶液中,浓度低的 HF 酸溶液对正常的玻璃表面作用极其缓慢,但是光刻后的损伤坑是由于飞秒激光与玻璃体

库仑爆炸产生的,而库仑爆炸就是破坏离子团中的库仑力,所以损伤坑周围的黑色破坏区域(图 2(a))是由于部分离子团被破坏产生 Ca 离子等形成的毛刺区域,因此这一区域极易与 HF 酸作用而被腐蚀. 因此腐蚀前期主要是微爆坑的破坏区域被 HF 腐蚀掉,后期为由于损伤坑表面在 HF 酸作用下进行表面抛光. 图 3 是把光刻后的玻璃样品用 5% HF 酸溶液刻蚀,每浸泡两个小时取出来用显微镜观察腐蚀效果,图 3 中(a)、(b)就是分别浸泡 2h、4h 的结果. 其中图 3(a)是在透射式光学显微镜(Olympus, BX51)下观测的,图 3(b)是在 Zess 相位对比光学显微镜拍摄的. 从图 3(b)可以看出,凹面微透镜阵列排列规整、具有光滑平整表面的外形.

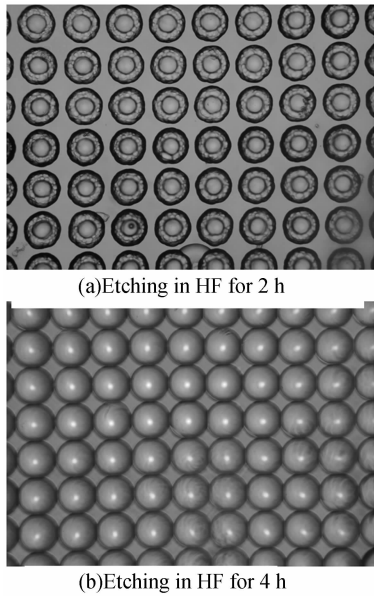


图 3 HF 溶液浸泡
Fig. 3 Etching in HF

为了检测微透镜的一致性,用氦氖激光器作光源($\lambda=632.8\text{ nm}$),测试了微透镜阵列的衍射和干涉图案,如图 4,中心为零级衍射,围绕零级的光斑为一级衍射,可以看出一级衍射光斑强度均匀,说明透镜阵列的一致性很好.

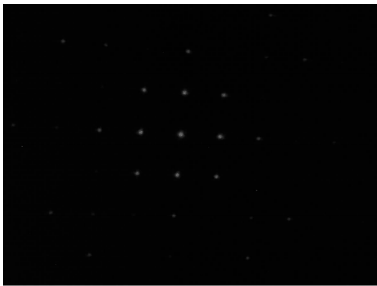


图 4 微透镜阵列的衍射和干涉图像
Fig. 4 Diffraction and interference image of MLA

2.3 表面轮廓仪检测

表面轮廓测量则可以提供定量的表面形貌数据,从而可以得到表面形貌以及玻璃体微透镜阵列

单元透镜的误差情况,采用 Taylor Hobson 公司的 Form TalySurf Series2 表面轮廓检测仪,对飞秒激光光刻及酸腐蚀后的玻璃体微透镜阵列(图 3(b))进行测试,实际测量结果如图 5.

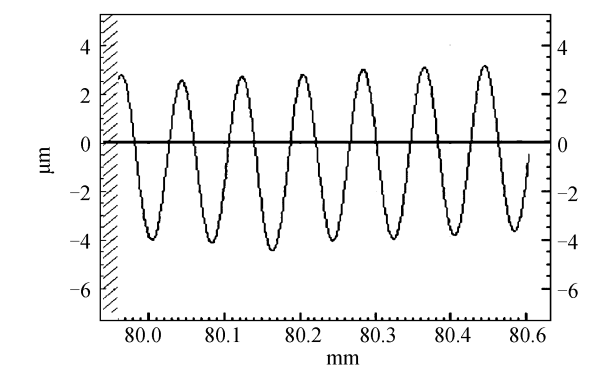


图 5 微凹透镜表面轮廓图
Fig.5 Contour of MLA

图 4 中曲线可以发现,微透镜阵列单元重复性好,小透镜深度一致,为 6.8 μm ,直径为 50 μm ,误差为纳米量级,基本可忽略不计,其结果表明用飞秒激光和酸刻蚀的方法制作的微透镜阵列表面光滑,单元重复性好,具有良好的表面轮廓.

3 铸塑复制

选择普通玻璃利用飞秒激光及酸刻蚀的方法制作的凹微透镜阵列,其材料价格低廉且具有良好的光学性能,并且玻璃体物理性能稳定,具有较高的熔点及耐压性,在空气中也不会产生中吸湿、溶胀致使微透镜阵列变形的情况,玻璃体的这些性能一方面保证了其广泛的应用前景,另一方面其适合作为母板利用复制技术大批量的制作凸微透镜阵列.

复制材料在本实验中选取光刻胶和 PMMA,由于光刻胶具有良好的脱膜性^[12],并且其不会和玻璃体模板发生反应,故可以采用光刻胶作为复制材料,制作工艺过程包括模板表面预处理(清洁)、涂胶及脱膜,此方法制作出由光刻胶构成的凸微透镜阵列面形保真度很高^[13],在实际应用中,满足系统的使用要求.然而光刻胶光学性能、抗磨损、抗腐蚀性能都不很理想,所以我们选择一种更好的复制材料 PMMA,具体的工艺过程同上述方法完全一致,采用氯仿与 PMMA 的摩尔比按照 10 : 1 的比例配备,在 30°封闭放置 24 h 后,滴在玻璃模板上面,并用匀胶机甩匀.将甩匀后的样品置于干燥箱内加温至 100°,然后放入 20°冷水实现脱膜,此过程制作的 PMMA 凸微透镜阵列如图 6,由于脱膜过程中各种不同的原因例如表面的粘结,表面粗糙度引起的摩擦,以及模腔侧壁负拔模角引起的聚合物自陷等,致使 PMMA 凸微透镜阵列表面有轻微程度的损伤,

对此过程将做进一步的研究以改进脱膜过程对凸微透镜阵列表面粗糙度的影响.

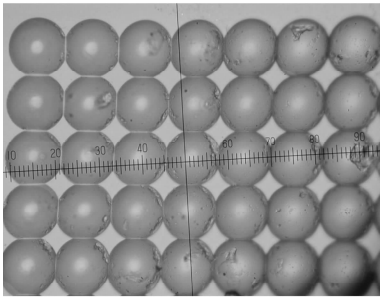


图 6 光刻胶微透镜阵列复件
Fig.6 Copies of Photoresist MLA

4 结论

利用强飞秒激光在透明介质表面诱导的库仑爆炸形成的微坑,再结合 HF 腐蚀的方法,可以制作各种单元尺寸的凹面微透镜阵列.并且以其作为模板,利用光刻胶或 PMMA 进行复制,所得元件面形保真度高,并且多次复制对模板影响很小,可以批量生产,满足系统使用要求.利用飞秒激光和酸刻蚀的方法制作微透镜及其复制技术工艺过程极其简单,使用材料价格低廉,适合于各种光耦合和光学传感器件并且效果良好,将会具有很大的市场前景.

参考文献

[1] LI YU-lin, FU Xiao-li. Micro-optics[J]. *Opt Precision Eng*, 1994, **2**(1):28-31.
李育林,付晓理. 微光学[J]. 光学精密工程, 1994, **2**(1):28-31.

[2] ZHANG Hong-hai, FAN Xi-qiu, HU Xiao-feng, et al. A novel method of fabricating microlens arrays[J]. *J Huzhong Univ of sci & Tech*, 2006, **34**(6):77-79.
张鸿海,范细秋,胡晓峰,等. 一种微透镜阵列制作方法[J]. 华中科技大学学报, 2006, **34**(6):77-79.

[3] HE Miao, YI Xin-jian, CHENG, Zu-hai, et al. Research on fabrication of 128 × 128 element GaAs concave microlenses array device[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **A28**(6):71-73.

[4] CHAN J, HUSER T, RISBUD S H, et al. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(21):1726-1728.

[5] CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, WHITE J D, et al. Demonstration of high-density three-dimensional storage in fused silica by femtosecond laser pulses[J]. *J Appl Phys*, 2003, **82**(4):1841-1844.

[6] CHENG Guang-hua, WHITE J D, WANG Yi-shan, et al. Microstructure on surface of linbo3 : Fe induced by a single ultra-short laser pulse[J]. *Chin Phys Lett*, 2003, **24**(8):1311-1313.

[7] LIU Qing, CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, et al. Three-dimensional optical storage inside silica glass using femtosecond pulse and mechanism study[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):276-279.

- 刘青, 光华, 王屹山, 等. 飞秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理[J]. 光子学报, 2003, **32**(3): 276-279.
- [8] HATEM D, WOLFGANG H. Fast electronic and thermal processes in femtosecond laser ablation of Au[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(10): 104102. 1-104102. 3.
- [9] HU Zhan, LIU Yao-ming. Mechanism for the ablation of Si<111> with pairs of ultrashort laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(13): 131910. 1-131910. 3.
- [10] LENNER M, KAPLAN A, PALMER R E. Nanoscopic coulomb explosion in ultrafast graphite ablation[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(15): 153119. 1-153119. 3.
- [11] DACHRAOUI H, HUSINSKY W, BETZ G. Ultra-short laser ablation of metals and semiconductors; evidence of ultra-fast Coulomb explosion[J]. *Appl Phys A*, 2006, **83**(2): 333-336.
- [12] REN Zhi-bin, ZHU Li-si, ZENG Hao, *et al.* Fabrication technology of microlens array by melting photoresist[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2006, **29**(4): 12-15.
- 任智斌, 朱丽思, 曾皓, 等. 微透镜阵列的光刻胶热熔制作技术[J]. 长春理工大学学报, 2006, **29**(4): 12-15.
- [13] DENG Qi-ling, DU Chun-lei. The research on replication of micro-optical elements[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 110-113.
- 邓启凌, 杜春雷. 微光学元件复制技术研究[J]. 光子学报, 2002, **31**(1): 110-113.

Concave Microlens Arrays Produced by Femtosecond Laser With HF Acid Etching

LI Ming, CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, HE Jun-fang, CHEN Guo-fu, ZHAO Wei
(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)
Received date: 2007-12-05

Abstract: The concave microlens arrays were fabricated on K9 optical glasses using the technology of femtosecond laser and hydrofluoric acid etching on the surface of optical glass. This concave MLA as mold can achieve lots of convex MLAs by replication. The surface micromorphology and optical diffraction characteristics of the concave microlens array were analyzed respectively by the phase contrast electronic microscope and the scanning electron microscope. The process was parameter-controllable and implemented simply. Those concave microlens arrays can be applied to the field of light splitting, beam smoothing and parallel photolithography etc.

Key words: Femtosecond laser; Hydrofluoric acid etching; Concave microlens array



LI Ming was born in 1980, and received his B. S. degree from Department of Physics, Shandong Normal University in 2004. Now he is working for his M. S. degree at State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science. His research interests focus on fiber sensor, laser material processing, and three-dimension optical data storage.