

文章编号: 0253-2239(2010)s100104

二氧化碳激光制备 PMMA 微透镜阵列

李晓刚 陈继民 刘富荣 李晓宇 张 强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 探索了一种新的微透镜阵列制作工艺,使用二氧化碳激光在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)表面进行选区刻蚀,研制出表面光洁、尺寸和曲率可控的微透镜阵列,并研究了其成形机理和加工特点。PMMA 表面受激光照射区域被汽化蒸发,熔融 PMMA 在液面张力的作用下,凝固后与未扫描区域形成弧形边缘,当圆形未扫描区域表面被完全熔化后整个液面呈球状凸起,冷凝后形成透镜。透镜曲率半径随单位面积输入能量增加而减小。含有杂质较多或表面清洁度不达标的 PMMA 在激光照射下发生反应产生气泡和坏点,导致透镜质量降低。

关键词 激光加工;光学器件;透镜阵列;选区刻蚀;曲率半径

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100104

PMMA Microlens Array Preparation Using Carbon Dioxide Laser

Li Xiaogang Chen Jimin Liu Furong Li Xiaoyu Zhang Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The experiment developed a novel method of microlens array preparation on polymethyl methacrylate (PMMA), which can fabricate the microlens with smooth surface, and the radius of curvature and size of lens could be controlled by changing laser machining parameters. Laser irradiation induced glass evaporation and vaporization, so the liquid glass surface transformed to sphere shape with the effect of surface tension. A microlens formed after the surrounded liquid glass cooling down. The lens radius of curvature could be diminished with the laser output enhanced. But when the PMMA was impure or dirty, the microlens were bad with air bubbles and failure points.

Key words laser machining; optical device; microlens array; selective etching; radius of curvature

OCIS codes 040.1240; 140.3390; 220.4000; 230.3990

1 引 言

随着光学器件小型化,轻型化发展,微透镜阵列以其重量轻,体积小,设计灵活,加工方法多样化逐渐凸显出巨大的应用优势。目前透镜阵列已经在光通讯、图像存储、光束整形、光路相差色差消除等方面有了广泛研究。其制作方法也具有多样化、柔性化的特点:文献中的曲率倒易法适于制作长焦距的透镜^[1];飞秒激光刻蚀减少了热作用,可用于精密度要求高的透镜加工^[2];杨修文等利用表面张力的作用,以光纤为材料,用分离的自聚焦透镜制作微透镜阵列^[3];陈涛等利用准分子激光在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板上刻蚀出曲率半径为 0.05~0.25 mm,焦

距 0.1~0.5 mm 的微透镜阵列^[4],他们还在光纤激光持续照射 PMMA 板生成微透镜方面做了研究^[5];热压印和铣削法比较适于批量生产微透镜^[6~7];用紫外曝光技术可获得角型透镜^[8];此外光刻^[9]、离子束刻蚀^[10]、软模压印^[11]等方法也可实现微透镜的加工。国内外文献所报道的各种制作微透镜方法均体现了独特的优势,然而其加工程序较为复杂,成本相对较高,这大大限制了这些方法的发展应用。本文探索的方法充分发挥了激光加工的柔性化优势,利用二氧化碳激光在 PMMA 表面进行选区刻蚀,制作出表面光滑,曲率可变的微透镜阵列,具有加工速度快,加工幅面大,柔性化程度高,易于

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-08-07

基金项目: 北京市教委重点项目(KZ200910005006)资助课题。

作者简介: 李晓刚(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: s200813026@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 陈继民(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: jimin@bjut.edu.cn

操作,成本低廉等特点,有望在工业领域推广使用。

2 实验方法

实验采用 10.6 μm 波长的 CO₂ 激光进行刻蚀,首先在计算机软件中编辑好加工所需图案导入能被激光器控制系统识别的软件,将待加工 PMMA 板置于工作台上,调整激光器输出参数,激光通过由线及面扫描方式作用在 PMMA 表面形成透镜。加工透镜所使用的 PMMA 材料厚度 0.7 cm,尺寸 10 cm×10 cm。用 Veeco 公司生产的 WYKO NT-1100 三维表面形貌仪研究透镜形貌和表面光洁度。所使用的激光器刻蚀系统参数如表 1 所示,该系统中,飞行激光束通过两个反射镜的反射后聚焦在加工平面,在横轴和纵轴方向伺服电机的协调作用下完成对材料的由线及面扫描。

表 1 30 W 二氧化碳激光刻蚀系统基本参数

Table 1 Basic parameters of 30 W CO₂ laser etching system

Parameters	Value
Laser wavelength /μm	10.60
Maximum power /W	30
Output mode	Continue
Power adjustment interval /W	0.3
Spot size /μm	200
Maximum scanning speed /(mm/s)	300
Speed adjustment interval /(mm/s)	1.8
The scope of the scanning /(mm ²)	910×420

3 结果与讨论

激光携带的大量光热作用在 PMMA 材料上,大量的材料被汽化蒸发,部分处于熔融半熔融状态,熔融的材料在表面张力和汽化、升华反冲力的综合作用下形成具有一定弧度的形态,随着液态 PMMA 的冷凝形成具有一定润湿度的形貌。如图 1 所示,二氧化碳激光在材料表面进行选区扫描,激光作用区域分为扫描区域和非扫描区域,非扫描区域为符合加工尺寸要求的圆。扫描区域受到强烈光热作用后大部分被蒸发汽化,由于热传导作用,非扫描区域部分也处于熔化和半融化状态,而在固态区域界面上形成一定的固液态过渡区。固态和熔融 PMMA 之间存在足够的吸附力,使得熔融 PMMA 仍然附在固态区周围。此时处于熔融的 PMMA 在液态与固态间张力、液态与气态间张力、蒸发材料反冲力的

共同作用下形成球面外形(图 2)。

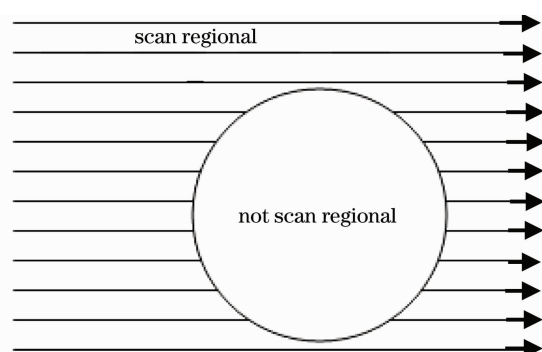


图 1 激光扫描区域示意图

Fig. 1 Laser scanning regional diagram

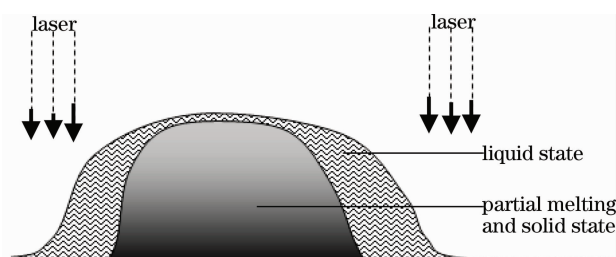


图 2 透镜成形原理图

Fig. 2 Schematic diagram of microlens formation

$$\Delta f = \sigma(k_1 + k_2), \quad (1)$$

$$\Delta f' = -\sigma(k_1 + k_2), \quad (2)$$

式中 $\Delta f, \Delta f'$ 分别表示凸起液面和凹进液面由于表面张力引起的压力差, σ 为液体表面张力系数, k_1, k_2 表示液态表面任意点两条相互垂直的曲线曲率。由(1)式、(2)式可看出,液面凸起时,液体内部压力大于外部压力,液面凹进时液体内部压力小于外部压力,亦即无论液面是凸起还是凹进,总有凹面压力大于凸面压力^[12]。实验中同时出现了凸起和凹进液面的情况,透镜顶端的液面呈凸起状,而靠近透镜底部的液面呈凹进形状,凸起和凹进部位相连接构成 S 曲线外形,经激光在非扫描圆形区域外围作用后,最终生成凸透镜轮廓。

图 3 所示为三维形貌仪对透镜表面的检测,从中可看到该透镜光滑的表面轮廓。为进一步观察透镜表面光洁程度,在透镜顶部不同区域中取 2 μm×2 μm 的面积微元分别测试平均粗糙度,然后取其平均值。表 2 即是在不同实验参数下所得透镜的表面粗糙度,所得数值分布在 5~20 nm 之间,说明所得透镜表面具有较好光洁度,且在一定的加工参数范围内其平均粗糙度的值能够保持在较低水平。

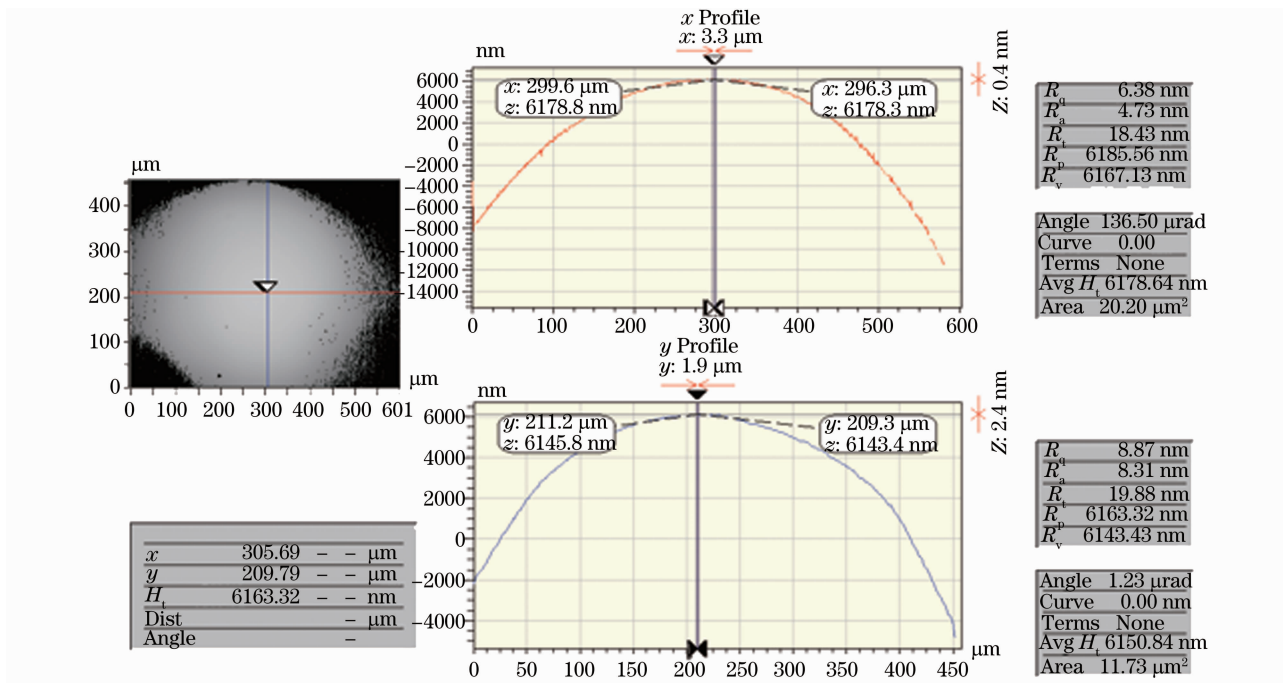


图 3 三维形貌仪对透镜表面的检测

Fig. 3 Measurement of microlens surface

表 2 透镜表面平均粗糙度 R_a 测定

Table 2 Measurement of microlens average surface roughness R_a

Laser power $P=10.5\text{ W}$		Scanning speed $V=26.4\text{ mm/s}$	
$V/(mm/s)$	R_a/nm	P/W	R_a/nm
21.0	9.87	9.6	10.84
22.8	10.88	9.9	7.20
24.6	7.53	10.2	9.23
26.4	15.24	10.5	10.43
28.2	12.66	10.8	15.26

实验通过调节激光扫描速度和输出功率来优化工艺参数,首先固定输出功率 $P=10.5\text{ W}$,依次增加扫描速度 V 透镜曲率半径呈增加趋势(图 4)。这是因为当扫描速度增加而其它条件不变时,PMMA 在单位面积上所摄入的激光能量减少,被蒸发汽化的材料也减少,通过热传导到达非扫描区域的热量只能使其表面更少的材料熔融,透镜表面的曲率半径由此增大。反之在固定扫描速度为 26.4 mm/s ,增大输出功率的情况下透镜表面曲率半径呈减小趋势(图 5)。这说明 PMMA 单位面积摄入的能量大小影响着透镜的曲率,因此可以利用此特点制作出不同焦距的凸透镜。(3)式、(4)式分别为制作 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 尺寸透镜曲率半径与扫描速度的关系和曲率半径与激光功率的关系的拟合方程,在实际操作中具有一定的指导作用。对于特定尺寸和曲率的透镜,若从所加工对应尺寸的拟合式中求出加工

参数,再作适量调整,工作量将大大减少。而当材料折射率一定时,透镜焦距随曲率半径呈正比关系[(5)式],因此将(3),(4)式直接代入(5)式将得到透镜焦距与加工参数的关系,由此可根据透镜焦距求得所需加工参数。

$$r = 1.774 - \frac{1.048}{1 + \exp\left(\frac{V}{0.764} - 34.902\right)}, \quad (3)$$

$$r = 1.666 + \frac{51.543}{1 + \exp\left(\frac{P}{0.559} - 13.869\right)}. \quad (4)$$

$$f = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (5)$$

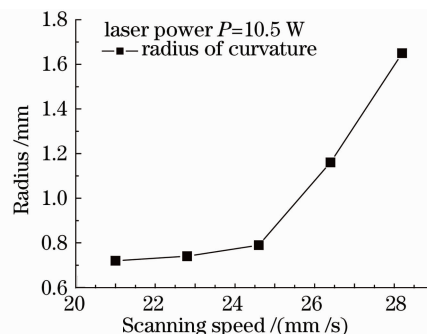


图 4 透镜曲率半径与扫描速度的关系

Fig. 4 The relation between radius and scanning speed

从透镜的尺寸变化来看,PMMA 表面单位面积摄入能量增加时,非扫描区域边缘被蒸发汽化的材料较多,透镜尺寸略有变小。因此加工特定尺寸和曲率

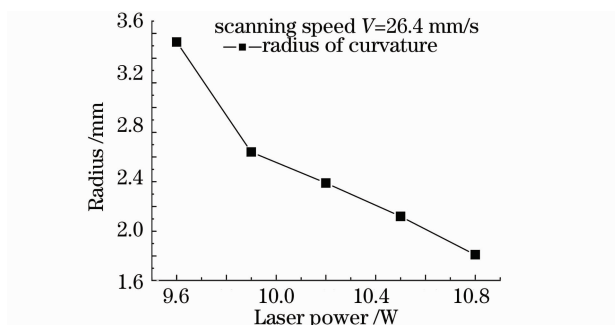


图 5 透镜曲率半径与激光功率的关系

Fig. 5 The relation between radius and laser power

的透镜时需要综合加工图案大小、形状、激光输出能量、扫描速度等因素来进行实验。所制作的图案可根据需要增加补偿值,如制作尺寸小于 2 mm 透镜时,非扫描区域应比实际尺寸大 0.05~0.1 mm 左右。

加工前材料的选择和清洁非常重要,应选择透射率好且较为纯净的 PMMA 进行实验,如果材料含有杂质较多或表面清洁不好,杂质在激光的作用下将发生剧烈的物理化学反应,在透镜中留下气泡甚至形成坏点(图 6),降低透镜质量。而光线入射透镜时在气泡、坏点的折射散射下将改变轨迹甚至被部分吸收,对光束的会聚和透过性造成不良影响。

实验的清洁方法是先将待加工的材料置于盛有酒精的超声清洗仪中清洗 3 min,再将材料取出风干。加工时应在封闭环境中进行,以减小材料表面的气流速度,避免液态 PMMA 在气流的作用下定

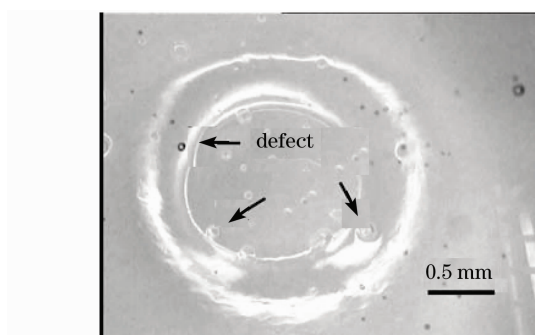


图 6 未优化工艺的 PMMA 透镜

Fig. 6 A failure sample of microlens

向流动,破坏液体表面张力的平衡,最终恶化透镜形貌。由于制作透镜是利用熔化材料的表面张力形成球形,而如有未熔化的部分存在会致使透镜顶端形成平顶(图 6),因此必须保证 PMMA 所摄入的能量能够使非扫描区域的表面全部发生熔化,这样在液体凝固后才能形成球形透镜轮廓。对于实验中加工尺寸 2 mm 的透镜,固定输出功率为 10.5 W 时扫描速度要在 20 mm/s 以上方能消除透镜平顶,固定

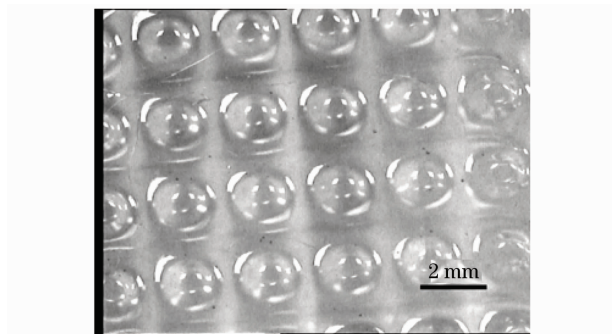


图 7 二氧化碳激光制备的 PMMA 微透镜阵列

Fig. 7 Microlens array fabricated with CO₂ laser

扫描速度为 26.4 mm/s 时输出功率要在 9.0 W 以上才能消除透镜平顶。图 7 为优化工艺制得的透镜阵列照片,透镜表面呈光滑球面状,透镜直径为 2 mm,相邻透镜中心相隔 2.5 mm,实际加工时可根据需要调整透镜尺寸和间隔。

4 结 论

1) 激光作用在 PMMA 表面,扫描区域表层被汽化蒸发,非扫描区域表面被完全融化时,液态材料在张力的作用下冷凝形成透镜;

2) 随着 PMMA 表面单位面积摄入的激光能量增加,透镜曲率半径呈减小趋势;透镜有较好的光洁度,工艺参数改变时,透镜表面粗糙度变化不大;

3) 含有杂质较多或表面清洗不干净的材料在激光照射下往往导致气泡和坏点的产生,从而降低透镜质量;

4) 输入能量过低时非扫描区域表面未能完全熔化,导致透镜平顶产生。

参 考 文 献

- 1 He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai. Fabrication of Si concave microlenses array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **21**(1): 33~36
何 苗, 易新建, 程祖海. 凹型 Si 微透镜阵列的制作[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(1): 33~36
- 2 Li Ming, Chen Guanghua, Zhao wei *et al.*. Concave microlens arrays produced by femtosecond laser with HF acid etching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 547~550
李 明, 程光华, 赵 卫 等. 飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 547~550
- 3 Yang Xiwen, Zhu Shengxiang, Xie Hong *et al.*. A method for fabrication of micro-lens array [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(3): 170~181
杨修文, 祝生祥, 谢 红 等. 一种微透镜阵列的研制[J]. *电子技术*, 2003, **23**(3): 170~181
- 4 Tao Chen, Tong Wang, Zhen Wang *et al.*. Microlens fabrication using an excimer laser and the diaphragm method [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9733~9747
- 5 Tao Chen, Tong Wang, Jimin Chen *et al.*. Microlens fabrication with fiber laser induced thermal-mechanical plastic forming

- method[C]. ICALEO 2009 proceedings, 810~816
- 6 R. F. Shyu, C. T. Pan, S. C. Lin. Parametric study of spherical microlens array[J]. *Materials Science Forum*, 2006, **505~507**: 595~600
- 7 Sebastian Scheiding, Andreas Gebhardt, Ramona Eberhardt *et al.*. Microlens array milling on large wafers[J]. *Micro-Optics*, 2009, **4**: 41~45
- 8 T. H. Lin, H. Yang, C. K. Chao. New high fill-factor triangular micro-lens array fabrication method using UV proximity printing[J]. *DTIP of MemS & Moems*, 2008, **9**(11): 187~191
- 9 Du Chunlei, Lin Dajian, Feng Beru *et al.*. Microlens array fabrication by using laser direct lithography System[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1194~1196
杜春雷, 林大键, 冯伯儒等. 激光直接光刻制作微透镜阵列的方法研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1194~1196
- 10 Zhang Xinyu, Tang Qingle, Zhang Zhi *et al.*. Concave refractive microlens arrays fabricated by Ion beam etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 485~490
张新宇, 汤庆乐, 张智等. 凹折射微透镜阵列的离子束刻蚀制作[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 485~490
- 11 Wang Wei, Zhou Changhe. New Technology for Fabrication of Polymer Microlens Arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
王伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 12 Zhu Ruilin, Zou Shaoming, Xu Li. The relation between different curve curvature of liquid surface [J]. *Chemical Equipment Technological*, 2007, **28**(5): 65~66
朱瑞林, 邹韶明, 徐立. 从液体表面张力看任意曲面上任一点处的曲率间的联系 [J]. *化工装备技术*, 2007, **28**(5): 65~66