

文章编号 1004-924X(2007)07-0997-05

化学刻蚀的光学元件面形修复

项震¹,侯晶^{1,2},聂传继¹,许乔²,张清华²,王健²,李瑞洁²

(1. 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,浙江杭州310027;

2. 成都精密光学工程研究中心,四川成都610041)

摘要:采用化学加工方法对光学元器件进行面形加工,可以避免传统的抛光工艺带来的亚表面缺陷和表面污染。实验中利用 Marangoni 界面效应有效控制化学液的驻留时间和驻留面积,并通过数控系统实现编程控制加工,进行了面形修复实验,利用轮廓仪测量了加工前后的表面粗糙度。结果表明,采用拼接小去除量多次加工的方法,有效地降低了面形误差,面形值由 $1.32 \lambda (\lambda = 632 \text{ nm})$ 减少到 0.66λ ,粗糙度基本维持不变。利用此实验装置使基片面形得到修复,避免了传统加工方式带来的亚表面缺陷等问题,有利于强激光系统的使用。

关键词:光学元器件;化学刻蚀;面形修复;Marangoni 界面效应;粗糙度

中图分类号:TN305.7 **文献标识码:**A

Form error of optical surface repaired by wet-etch figuring

XIANG Zhen¹, HOU Jing^{1,2}, NIE Chuan-ji¹, XU Qiao², ZHANG Qing-hua², WANG Jian², LI Rui-jie²

(1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Chengdu Fine Optic Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: A wet-etch figuring method is presented to repair the form error of optical surface to avoid the subsurface damage and surface pollution caused by traditional polishing technology. The Marangoni effect is used to control the dwell time and dwell area of chemical solvent, and the optical surface is repaired by program control of a digital system. The surface roughness of the optical surface before and after processing is measured by a profilometer. Experimental results show that the form error of the optical surface can be decrease from $1.22 \lambda (\lambda = 632 \text{ nm})$ to 0.66λ by the method in many wet-etch and a little wipe off surface figuring, but the optic surface roughness is invariable in test. The results also indicate that the method can improve the laser threshold of optical element.

Key words: optical element; wet-etch figuring; surface form error repairing; Marangoni effect; roughness

收稿日期:2006-10-10;修订日期:2007-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目;“NSAF 基金”(No. 10476025)

1 引言

目前,光学元件的面形加工技术主要有:传统光学元件加工技术,旋转抛光盘的小工具数控抛光技术,利用磁场来改变散粒磨料粘度的磁流变抛光技术(Magneto-Rheological Finishing, MRF)和离子束抛光技术(Ion-beam Milling)。影响高精度光学元件加工的复杂因素较多,如何提高光学制造技术的可控性,降低制造成本成为国际先进光学制造技术发展的核心。上述抛光技术在实用化中存在着一些原理上的限制,例如,这些抛光技术均依赖于需校准材料的去除率,其加工过程必然是一迭代过程(将工件取下测量,再加工,直到达到要求的精度),批量化成本较高;散粒磨料小工具抛光技术在加工过程中由于存在局部的机械应力,因而无法加工超薄的元件,而且容易形成无法去除的亚表面缺陷以及表面的污染层;离子束抛光需要配备大型的真空罩,设备成本很高。利用化学方法对光学元件的面形加工是光学加工技术的新尝试。本方法主要是借助于“Marangoni 干燥”的基本思想,采用可挥发的乙醇类蒸汽喷射光学表面,由于乙醇挥发形成的温度梯度(即 Marangoni 表面张力梯度)迅速使液膜表面产生收缩,从而达到干燥表面的目的。目前,这种干燥技术已被广泛应用于半导体工业中。美国 LLNL 也开展了基于 Marangoni 效应的衍射光学元件刻蚀加工技术研究,主要是利用乙醇挥发形成的表面张力梯度来控制 HF 腐蚀液在熔石英表面的刻蚀区域和刻蚀速度。本文利用并借鉴小工具数控抛光的基本工艺思想^[1],提出了采用化学刻蚀“磨头”对元件进行加工,目前取得了一定的进展。

2 光学元件的化学加工原理

利用酸性刻蚀液体(氢氟酸、氟化氨和水的混合溶液)对光学材料溶解,可以去除元件表面“多余”的材料,在去除过程中可运用 Marangoni 界面效应^[2]来控制刻蚀液的形状、大小和刻蚀液体的移动,定量控制去除量的大小。Marangoni 界面效应的基本思想是采用有机溶剂蒸汽喷射光学表面,由于表面张力梯度的存在(即 Marangoni

表面张力梯度),致使液膜表面产生收缩,从而实现非加工区域的“干燥”,保证了刻蚀时不留有残液等。此效应为化学刻蚀加工顺利进行提供了科学依据,图 1 为 Marangoni 效应的原理示意图,被溶解的光学材料随着刻蚀液的回流被带走。

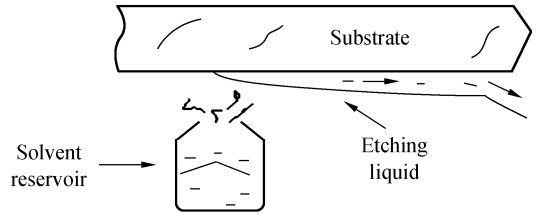


图 1 Marangoni 界面效应图

Fig. 1 Schematic of Marangoni effect experiment

数控化学刻蚀方法是基于 Marangoni 界面效应,通过特定的有机溶剂使得刻蚀液的表面张力形成梯度变化,达到控制刻蚀液在光学元件表面驻留面积和驻留时间的目的,实现对基片表面的定量抛光(刻蚀)。

3 实验装置

为控制刻蚀液在光学元件表面驻留面积和驻留时间,本文依据 Marangoni 效应设计制作了实验装置,包括:基片支架、刻蚀头、移动平台、刻蚀液供给系统和主机控制系统等几个部分。其工作原理是:

- (1) 根据干涉仪的检测结果,获得基片的初始面形数据;
- (2) 将基片定位于基片支架上, HF 酸刻蚀液通过泵泵入刻蚀头,经由喷嘴与基片下表面相接触进行化学腐蚀;
- (3) 刻蚀液喷嘴周围充满了易挥发的有机溶剂,保证了 Marangoni 效应的产生,达到了约束刻蚀的目的;
- (4) 通过计算机控制平台的三维移动,对刻蚀的路径进行设定,并根据基片面形数据计算各位置的去除量,再综合刻蚀液(氢氟酸、氟化氨和水的混合溶液)浓度、工作时的环境温度参数,编程设定平台不同时刻的运动速度,完成整个表面的刻蚀加工。

通过对 AD250 数控抛光机床和刻蚀头装置的整合(如图 2),保证刻蚀头在移动精度、基片装

夹和编程能力上满足实验要求。



图2 实验装置图

Fig. 2 Picture of practice structure

4 实验情况

4.1 刻蚀函数实验

实验中利用的刻蚀溶液是氢氟酸、氟化氢和水的混合溶液,工作温度在 25 °C 时课题组作了刻蚀函数曲线来指导面形的加工实验,并提供数据支持。通过变换刻蚀装置的移动速度来实现不同深度的刻蚀控制,图 3 是实验结果,刻蚀深度分别是 10 nm、20 nm 和 80 nm。

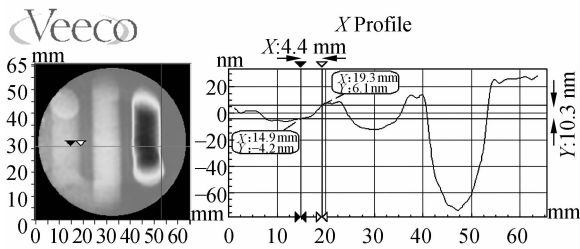


图3 加工函数曲线

Fig. 3 Function curve in! processing

4.2 面形修复实验

实验的目的是利用实验装置对光学元件面形进行化学刻蚀加工,使原始面形得到改善。

实验采用直径 100 mm 的熔石英基片作为加工对象,刻蚀溶液采用 5% 的氢氟酸、25% 的氟化氢和水溶液,在 20 °C 下进行加工。基片的初始反射面形误差(PV 值)为 1.45 λ ($\lambda = 632.8$ nm),如图 4,属于中间高边缘低的表面情况。运用控制程序读入干涉仪软件得到的面形数据,计算去除

量,并根据去除量、刻蚀液浓度及温度之间的对应关系,确定平台移动速度,完成机床的移动轨迹和速度的编程。

试验后的面形误差值为 1.08 λ ,如图 5 所示,PV 值减少了半个波长左右,去除深度和试验前的计算基本吻合,达到了实验要求。

Analysis results

Ra	0.268 λ
Rms	0.332 λ
20 Pt.PV	1.409 λ
2 Pt.PV	1.45 λ

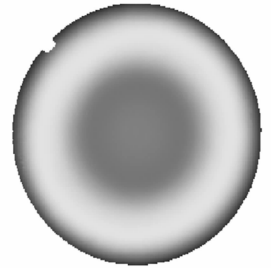


图4 实验前基片面型图

Fig. 4 Surface form error before processing

Analysis results

Ra	0.154 λ
Rms	0.198 λ
20 Pt.PV	1.034 λ
2 Pt.PV	1.08 λ



图5 实验后的基片面型图

Fig. 5 Surface form error after processing

4.3 表面缺陷分析与实验方法的改善

直径 100 mm 的熔石英基片加工完成后,其面形值降低了半个波长,提高了面形精度,但也带来了一些问题。由于加工时,刻蚀的边缘液体厚度较薄、挥发较快,相对中间部分其刻蚀时间相对较短,从刻蚀液的中间部分到边缘刻蚀深度呈渐变过渡,从而在元件表面出现刻蚀痕迹,其深度由各个位置的刻蚀速率决定。在激光的运用中这些痕迹对光学元件将会产生调制现象^[3]并降低元件的损伤阈值,因此必须避免由于特定的加工轨迹所带来的痕迹。

通过对刻蚀加工痕迹宽度的控制,采用多路径拼接的方式对元件进行多次、小去除量加工的方法可以有效地避免、减轻痕迹的产生^[4-5]。由于机床的移动精度较高,在加工程序中可以设定刻蚀头的移动,使得前次加工的路径边缘与这次加

工的路径边缘刚好重合或在允许的范围内,采用刻蚀头的快速运动(即采用较小的刻蚀去除量)和多次不同路线的组合,来有效地抑制加工痕迹。实验结果如图 6、7、8。

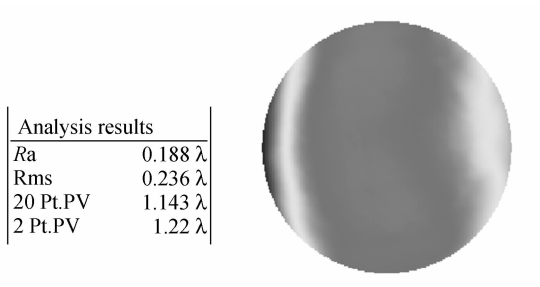


图 6 实验前基片的面形图

Fig. 6 Surface form error before processing

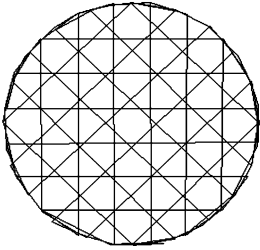


图 7 刻蚀头加工路径图

Fig. 7 Etching device path

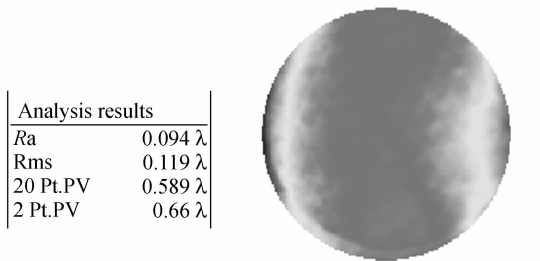


图 8 实验后的面形图

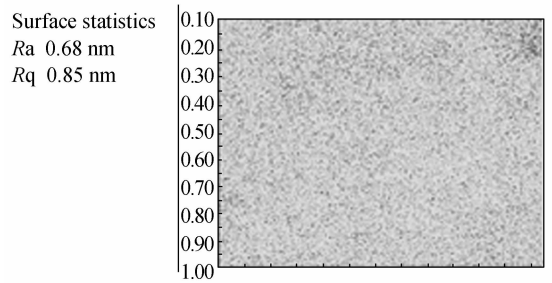
Fig. 8 Surface form error after processing

图中采用直径 100 mm 的熔石英基片,加工的初始面形为 1.22 λ ,加工后的面形为 0.66 λ ,面形得到了改善^[6],并且基片上刻蚀头的痕迹也得到了明显改善。

4.4 粗糙度对比情况

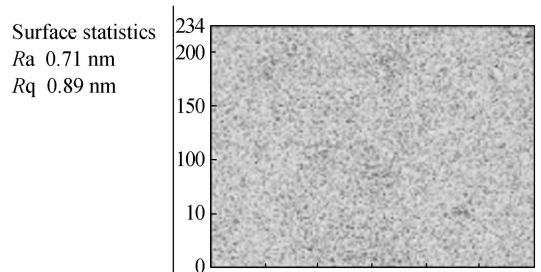
利用 Marangoni 效应的化学刻蚀方法能够实现基片可控的定量去除,面形也得到了一定程度的改善,而对刻蚀前后的表面粗糙度变化所进

行的定量研究,能够对刻蚀加工所带来的局部面形起伏影响进行评估^[7]。图 9 是运用 WYKO 轮廓仪对熔石英基片在刻蚀前后粗糙度的检测,结果表明粗糙度变化较小。由检测结果可知刻蚀前的粗糙度值(R_q)是 0.85 nm,刻蚀后的粗糙度值(R_q)是 0.89 nm,这个实验表明对熔石英基片在一定范围下的数控刻蚀,粗糙度变化较小,基本维持在刻蚀前的数值上。



(a) 刻蚀前

(a) before etching



(b) 刻蚀后

(b) after etching

图 9 刻蚀前后粗糙度值

Fig. 9 Roughness before and after etching

5 结 论

基于 Marangoni 界面效应的化学刻蚀,可控性较强,可对不同加工参数进行调整,例如对刻蚀头(Etching device)的移动速度、刻蚀区域的控制、刻蚀液的溶度等等,在程序设计中容易实现,修改参数也较方便。实验中通过数控系统实现编程控制加工,进行了面形修复实验,面形值由 1.22 λ ($\lambda = 632$ nm)减少到 0.66 λ 。利用轮廓仪测量了加工前后的表面粗糙度,粗糙度基本维持不变。此外,刻蚀加工方法是一种纯化学的刻蚀

机制,基片“污染”较少,可以有效地避免传统加工中引进的抛光原料的杂质和加工过程中产生的亚表面缺陷,有利于提高光学元件在强激光中的元件阈值,对基片加工后的表面应力变形也能很好

地抑制。针对目前较为困难的薄基片和中等口径的高精度、无污染的面形修补,化学蚀刻工艺有很好的应用前景和研究价值。

参考文献:

- [1] 王健,陈贤华,李洁,等. 数控抛光加工应用于波前校正[J]. 光学精密工程,2003,11(1):79-81.
WANG J, CHENG X H, LI J, *et al.*. Computer controlled optical finishing for wave front error correction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(1):79-81. (in Chinese)
- [2] SCRIVEN L E, LEENAARS H, LYNN N, *et al.*. The Marangoni effects[J]. *Nature*, 1960,187:187-191.
- [3] 任寰,卓志云,蒋晓东,等. 波前功率谱密度函数评价方法探讨[J]. 强激光与粒子束,2002,14(2):279-282.
REN H, ZHUO ZH Y, JIANG X D, *et al.*. Discussion of the specific method of power spectral density[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002,14(2):279-282.
- [4] 郭培基. 一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. 光学精密工程,2002,10(5):518-522.
GUO P J. Null lens design for small aspherical surface with large NA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(5):518-522. (in Chinese)
- [5] 陈世哲,胡涛,刘国栋,等. 基于光栅的快速精确图像拼接[J]. 光学精密工程,2006,14(2):242-246.
CHEN SH ZH, HU T, LIU G D, *et al.*. Fast and precision image mosaic based on grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):242-246. (in Chinese)
- [6] 马冬梅,孙军月,张波,等. 高精度大口径平面镜面角差法测试探究[J]. 光学精密工程,2005,13(增):121-126.
MA D M, SUN J Y, ZHANG B, *et al.*. High precision large flat mirror measurement by angle difference testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp):121-126. (in Chinese)
- [7] 高春甫,邬敏. 粗糙表面精度测量系统的研究[J]. 光学精密工程,2005,13(6):697-702.
GAO CH F, WU M. Study of measurement system for rough surface accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):697-702. (in Chinese)

作者简介:项震(1971—),男,浙江大学副教授,浙江大学光电子研究所副所长。主要研究方向为光学检测、激光技术等。

侯晶(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,主要从事先进光学制造技术的研究。E-mail: houjing97@sina.com