

文章编号 1004-924X(2012)04-0719-08

数控非接触式超光滑光学元件加工机床的设计

李显凌*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:基于数控技术,提出了一种非接触式光学元件表面超光滑液体抛光方法。通过磨头中心孔为抛光表面提供抛光液,抛光液在磨头自转的带动下与光学元件表面相互作用,实现光学元件表面材料的微量去除,利用计算机控制抛光磨头的运动轨迹完成对光学元件表面的抛光。根据上述原理,设计和研制了数控非接触表面超光滑光学元件加工机床样机,样机直线运动轴最低进给速度为 0.0001 m/s ,定位精度为 0.008 mm ;摆动轴最低转速为 0.0028 r/min ,定位精度为 $15''$ 。抛光实验结果表明,经过 20 min 的超光滑加工,熔石英材质光学元件上两点的表面粗糙度 R_a 值分别由加工前的 1.03 nm 和 0.92 nm 提高到加工后的 0.48 nm 和 0.44 nm ,显著提高了加工精度。

关键词:光学制造;非球面;非接触加工;超光滑抛光;液体抛光;加工机床

中图分类号:TQ171.684;TH161 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0719

Design of CNC non-contact super-smooth polishing machine for optical components

LI Xian-ling*

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lixianling@sklao.ac.cn

Abstract: A Computer Numerical Control (CNC) non-contact super-smooth polishing method for optical components was proposed. Polishing fluid was provided through a center hole of the polishing tool for the optical surface and it interacted with the surfaces of optical components driven by a rotated polishing tool to remove the materials on the optical components minutely. The motion trajectory of the polishing tool could be controlled by the computer. According to the proposed principle, a prototype of CNC non-contact super-smooth polishing machine for the optical components was designed and developed, and its minimum feed rate and positioning accuracy for the linear motion axis are 0.0001 m/s and 0.008 mm , respectively; the minimum rotate speed and positioning accuracy for the swing shaft are 0.0028 r/min and $15''$, respectively. The performance of the prototype could meet the requirements of spherical/aspherical optical components with diameters less than 200 mm for super-smooth polishing. To verify the prototype, an experiment was performed on a fused silica component. After super-smooth polishing for 20 min , the surface roughness of two points on the optical component is

收稿日期:2011-06-10;修订日期:2011-07-19.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX02205)

improved from 1.03 nm and 0.92 nm to 0.48 nm and 0.44 nm, which shows the polishing accuracy has been optimized greatly.

Key words: optical fabrication; aspheric surface; non-contact fabrication; super-smoothing polishing; liquid polishing; polishing machine

1 引言

目前,光学和光电子学,尤其是短波段光学涉及的相关技术对关键光学元件表面精度的要求越来越高,往往需要达到纳米甚至原子级,因此超光滑表面加工技术应运而生。超光滑表面不仅要具备较高的面形精度和极低的表面粗糙度,还要具有完整的表面晶格排布,消除亚表面损伤。因此,如何实现光学元件表面的超光滑抛光成为精密加工领域的一个重要课题。

超光滑表面加工方法可以分为接触式抛光和非接触式抛光两类。接触式抛光在加工过程中抛光工具与光学元件直接接触,依靠抛光磨料的机械磨削作用去除表面材料,主要有浴法抛光^[1]、聚四氟乙烯抛光^[2]和化学机械抛光^[3]等。其缺点是:在工件抛光的同时,抛光盘也被磨损,其面形不断变化,从而使工件表面材料去除函数不断变化,这对控制抛光过程的稳定性和重复性,以及实现数控抛光十分不利;另外,由于工件与较硬的固体抛光盘接触,受到较大压力,工件容易产生亚表面损伤。非接触式抛光在加工过程中抛光工具与光学元件不发生直接接触,依靠气体或液体介质作用于光学元件表面进行材料去除。非接触式抛光方法主要有离子束抛光^[4-5]、气体团簇离子束抛光^[6]、等离子体辅助化学刻蚀^[7]、大气等离子体抛光^[8]、射流抛光^[9]、浮法抛光^[10]、水面滑行抛光^[11]、弹性发射抛光^[12]及磁流变抛光^[13-14]等工艺。非接触式抛光不存在抛光盘磨损的问题,去除函数稳定,抛光过程的稳定性和重复性好,可以获得极低的表面粗糙度,且获得的超光滑表面晶格完好、无亚表面损伤、无表面残余应力。

小磨头抛光方法和浮法抛光技术是目前两种比较成熟的光学加工手段。小磨头抛光方法是一种接触式光学加工方法,该方法易于采用数控技术,能够进行平面、球面和非球面等各种光学表面

的加工,但是该方法加工出的光学表面粗糙度较大,且存在亚表面损伤。浮法抛光技术是一种非接触式超光滑加工方法,该技术加工出的光学表面粗糙度低,且无亚表面损伤,但只能加工平面光学元件,不能加工球面和非球面。

为了实现球面和非球面光学表面的超高精度超光滑抛光,本文根据浮法抛光技术和小磨头抛光技术的原理提出了一种新的小磨头非接触式超光滑抛光方法。该方法采用数控技术,同时集合了小磨头抛光方法和浮法抛光技术的优点,能够实现平面、球面和非球面光学元件表面的超高精度超光滑加工,在降低表面粗糙度的同时能够保证面形精度。文中详细叙述了该方法的基本原理,根据小磨头非接触式超光滑抛光工艺的要求,进行了机床运动功能设计,完成了数控小磨头非接触式超光滑抛光机床的研制,并进行了一系列的超光滑抛光实验。

2 非接触式超光滑抛光原理

图 1 为本文提出的小磨头非接触式超光滑抛光技术的基本原理示意图。图中, F_{in} 为抛光液入口、 F_{out} 为抛光液出口、 B 为抛光磨头摆动运动、 C 为工件台旋转运动、 C_p 为抛光磨头自转运动。当对球面或非球面光学元件做超光滑加工时,抛光磨头的中心线始终保持与光学元件表面的法线方向,与光学元件表面保持一个固定的间距且沿光学元件表面做摆动运动,抛光磨头做自转运动,光学元件做旋转运动。

抛光液经由抛光磨头尾部的中心口进入磨头内部,从磨头前端的多个微孔流出,保证在超光滑抛光过程中抛光磨头与光学元件表面之间始终保持有抛光液存在,抛光磨头与光学元件表面之间存在 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 的间隙。随着抛光液在抛光磨头自转运动的带动下在光学元件表面流动,抛光

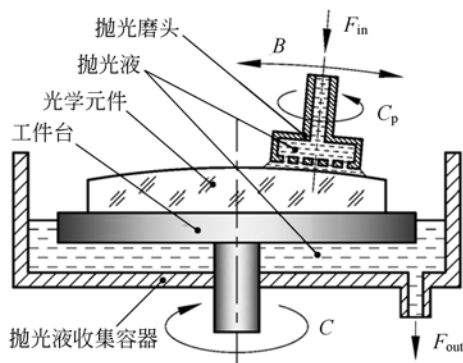


图1 小磨头非接触式超光滑抛光原理

Fig. 1 Principle of non-contact super-smooth polishing by small tool

液中的微小磨料与光学元件表面相互作用,从而实现光学元件表面材料的微量去除。由于微小磨料与光学元件表面相互作用所产生的能量不足以使光学元件表面材料发生塑性变形,只是产生原子间结合的微小弹性变形,所以可以得到原子级精度且无亚表面损伤的超光滑表面。采用数控技术可以保证抛光磨头和光学元件表面之间沿精确轨迹运动,同时使用过的抛光液沿着光学元件表面流至抛光液回收容器内,能够随时带走抛光过程中产生的热量,保证了光学元件加工区域温度的稳定,二者配合能够加工出具有极高面形精度的光学元件表面。因此,这种小磨头非接触式超光滑抛光方法能够在保证得到极高精度超光滑表面的同时,得到极高的面形精度。

3 数控超光滑抛光机床设计

3.1 设计指标

本文在原有浮法抛光机床(见图2)基础上结合小磨头非接触式超光滑抛光技术进行重新设计,将平面加工功能扩展为球面及非球面加工功能,并将其加工原理由浮法抛光改为小磨头非接触式超光滑抛光,最终实现数控高精度超光滑加工。

根据小磨头非接触式超光滑抛光技术的工艺要求,确定超光滑加工机床的具体设计指标如表1所示。

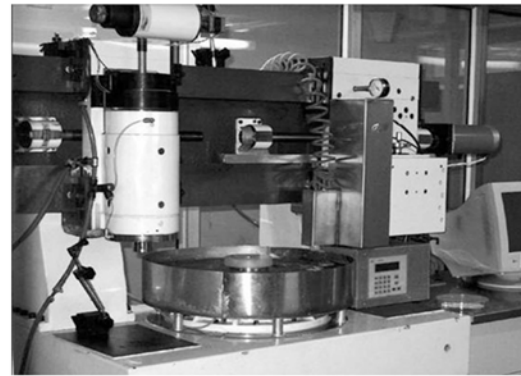


图2 浮法抛光机床

Fig. 2 Float polishing machine

表1 主要设计指标

Tab. 1 Design parameters of super-smooth polishing machine

项目类别	设计指标
加工工件最大直径/mm	200
加工工件最大高度/mm	30
X轴行程/mm	200
Z轴行程/mm	200
B轴摆动范围/(°)	±15
X, Z速度/cm·min ⁻¹	1
B轴速度/(°)·min ⁻¹	1
X, Z轴定位精度/μm	8
B轴定位精度/(")	15
工作台夹紧直径/mm	450
工作台旋转范围/(°)	n×360
工作台转动速度/r·min ⁻¹	30~200
电主轴最低转速/r·min ⁻¹	30
电主轴中心孔直径/mm	2~5

3.2 机床运动功能及结构布局方案

由图1所示的超光滑抛光原理可知,在超光滑抛光过程中光学元件须始终处于回转状态,抛光磨头的中心轴线必须时刻处于光学元件表面的法线方向,并保证磨头端面与光学元件表面的距离。这就要求抛光磨头或光学元件能够实现空间的三维运动,同时二者之一还要能够实现摆动运动,以保证抛光头能够加工到光学元件表面的任意位置,并且抛光磨头轴线处于光学元件的法线方向。

由于小磨头非接触式超光滑抛光机床是在原有浮法抛光机床的基础上进行设计的,所以必须结合原机床的实际情况来最终确定机床的运动功

能方案。原浮法抛光机床的底座工件侧即是回转单元 C, 刀具侧是直线运动单元 X, 没有 Y 轴且不具备增加 Y 轴的条件, 其他各轴的设计只能在 X 轴侧进行。因此方案中首先取消 Y 轴设置, 同时保证抛光磨头的轴线与光学元件的几何中心轴线处于同一平面上且此平面平行于 X 轴导轨平面。另外回转单元 B 一般与主轴相连, 设置在直线运动单元 Z 之后。因此, 确定超光滑加工机床的运动功能方案为

$$W/C \cdot XZB/C_p/T, \quad (1)$$

式中: W 为工件, 即光学元件; C 为回转工作台, 绕 Z 轴旋转, 实现光学元件的回转运动; \cdot 为机床底座; X 为水平直线运动轴, 实现 X 向进给运动; Z 为垂直直线运动轴, 实现 Z 向进给运动; B 为绕 Y 轴旋转的摆动轴; C_p 为主轴回转单元, 即电主轴; T 为刀具, 即抛光磨头。

此方案中, 包含 X 轴、Z 轴、B 轴和 C 轴共 4 个数控轴, 实现四轴联动, 图 3 为此方案的超光滑

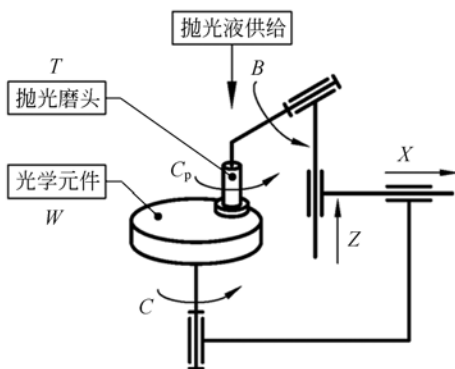


图 3 运动功能图

Fig. 3 Sketch of kinematical function

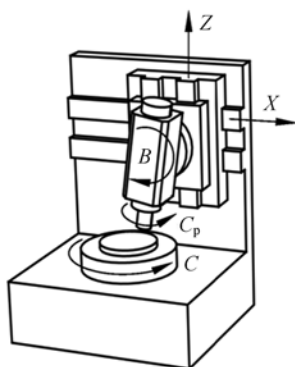


图 4 总体布局方案

Fig. 4 Scheme of kinematics distribution of machine

加工机床运动功能图。根据此方案, 并结合现有浮法抛光机床的具体结构就可以进行数控小磨头非接触式超光滑抛光机床的总体布局, 图 4 即为数控小磨头非接触式超光滑抛光机床的总体布局。

3.3 超光滑加工机床的传动系统设计

在浮法抛光机床基础上设计的数控小磨头非接触式超光滑抛光机床, 其传动系统的设计除了应满足前面所述的设计指标要求, 还要考虑原浮法抛光机床的具体结构及尺寸限制。

在结构方面, 现有浮法抛光机床可继续利用的部分有基座、回转单元 C 和直线运动单元 X, 因此, 根据上述研究得到的运动功能方案以及小磨头非接触式超光滑抛光的具体工艺, 需要在现有机床基础上增加直线运动单元 Z、回转单元 B、以及电主轴单元 C_p , 并重新设计直线运动单元 X 的传动系统。难点主要有实现 X、Z 和 B 轴极低的运行速度及极高的定位精度, 各轴具备加工的光学元件所需的运动行程, 并保证具有电主轴中心孔。

在尺寸限制方面, 由于原浮法抛光机床保留部分的结构所限, 所设计的 B 轴摆动机构轴向尺寸应在机床底座范围内, 即从工作台中心起 B 轴摆动机构尺寸要小于 345 mm, 电主轴及其装夹部分最大直径应小于 130 mm, X 轴导轨必须在总长度 450 mm 范围内保证所需要的加工行程, 如图 5 所示。

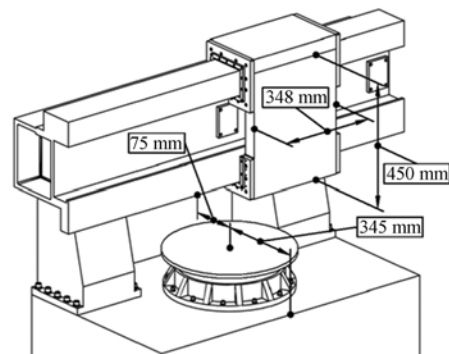


图 5 原浮法抛光机床结构尺寸限制

Fig. 5 Dimension limit of intrinsic float polishing machine

为实现 X、Z 和 B 轴的低速运行,本文采用伺服电机加上精密涡轮蜗杆减速器的驱动方法。同时为了减小 B 轴的轴向尺寸,B 轴采用涡轮蜗杆减速器加行星减速器。所有轴使用的涡轮蜗杆减速器减速比为 90,背隙 $\leq 1'$;行星减速器的减速比为 10,背隙 $\leq 1'$ 。

为保证机床精度,X、Z 轴均采用精密滚珠丝杠传动,滚珠丝杠公称直径为 25 mm,导程为 5 mm;X 轴滚珠丝杠代表运行距离误差为 ± 0.011 mm,Z 轴为 ± 0.009 mm;X 轴滚珠丝杠变动 ≤ 0.009 mm,Z 轴滚珠丝杠变动 ≤ 0.007 mm。

Z 轴导轨采用超高刚性型滚柱滚动导轨,导轨上下及左右两表面平行度 ≤ 0.0015 mm,高度误差 ≤ 0.003 mm,导轨之间平行度误差在 $-0.004 \sim -0.003$ mm。

根据小磨头非接触式超光滑抛光工艺的要求,电主轴应具备中心孔作为抛光液通道,同时由于机床尺寸的限制,要求电主轴直径尽量小,最终采用的电主轴额定转速为 $30 \sim 5\,000$ r/min,直径为 80 mm,中心孔直径为 5 mm,径向跳动 ≤ 0.003 mm,端面跳动 ≤ 0.002 mm。

最终,超光滑加工机床机械传动系统的设计结果如图 6 所示。

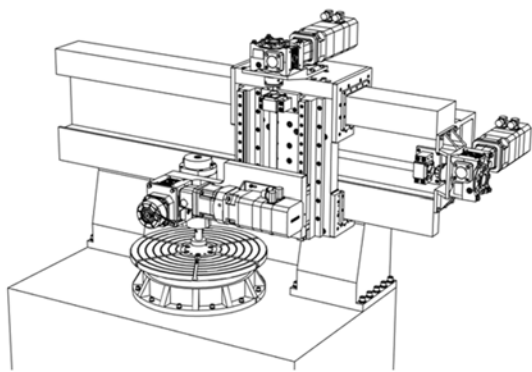


图 6 超光滑加工机床结构

Fig. 6 Structure of super-smooth polishing machine

3.4 超光滑加工机床样机

根据上述设计结果,研制了超光滑加工机床样机,如图 7 所示,机床的数控系统采用 SIEMENS SINUMERIK 840D。

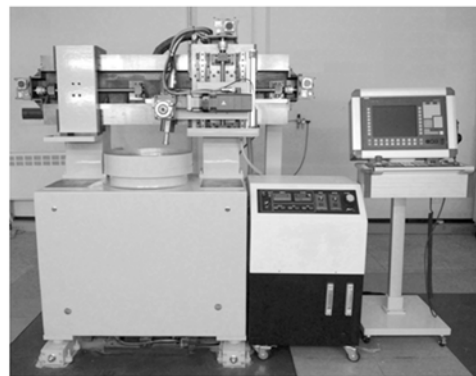


图 7 超光滑加工机床样机

Fig. 7 Prototype of super-smooth polishing machine

安装调试后,该机床已经达到所有设计指标要求,其实际性能指标见表 2。

表 2 超光滑加工机床性能参数

Tab. 2 Performance of super-smooth polishing machine

项目类别	设计结果
加工工件最大直径/mm	300
加工工件最大高度/mm	120
X 轴行程/mm	$-100 \sim +280$
Z 轴行程/mm	270
B 轴摆动范围/ $^{\circ}$	± 20
X、Z 轴最低速度/ $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	1
B 轴最低速度/ $^{\circ} \cdot \text{min}^{-1}$	1
X、Z 轴定位精度/ μm	8
B 轴定位精度/ $''$	15
工作台夹紧直径/mm	450
工作台旋转范围/ $^{\circ}$	$n \times 360$
工作台转动速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$20 \sim 300$
电主轴最低转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	30
电主轴中心孔直径/mm	5

4 超光滑加工实验

在数控小磨头非接触式超光滑抛光机床上进行了光学元件超光滑加工实验。实验中,加工的光学元件为直径 150 mm 的圆形平面镜,材质为熔石英,如图 8 所示。加工过程中采用自行配置的抛光液,单点抛光 20 min。

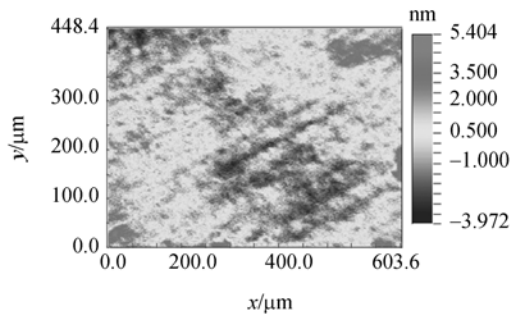
图 9 和图 10 分别为光学元件上 1,2 点在超



图 8 加工实验所用的光学元件

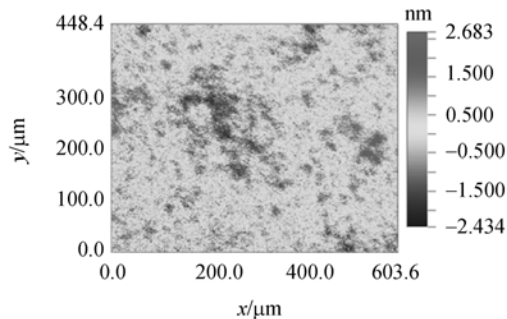
Fig. 8 Optical component in experiments

光滑加工前后使用 WYKO 轮廓仪检测的光学元件表面粗糙度对比。可以看出,光学元件上点 1 加工前的表面粗糙度 R_a 值为 1.03 nm,加工后的表面粗糙度 R_a 值为 0.48 nm;点 2 加工前的表面粗糙度 R_a 值为 0.92 nm,加工后的表面粗糙度 R_a 值为 0.44 nm。实验结果表明,本文研制的数



(a) 超光滑抛光前

(a) Before super-smooth polishing

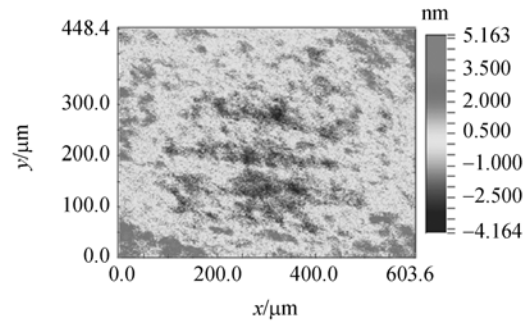


(b) 超光滑抛光后

(b) After super-smooth polishing

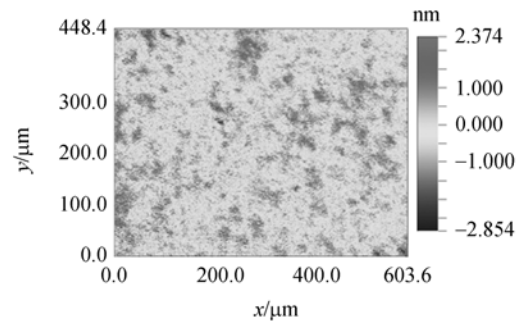
图 9 点 1 表面粗糙度对比

Fig. 9 Contrast of surface roughness of point 1



(a) 超光滑抛光前

(a) Before super-smooth polishing



(b) 超光滑抛光后

(b) After super-smooth polishing

图 10 点 2 表面粗糙度对比

Fig. 10 Contrast of surface roughness of point 2

控小磨头非接触式超光滑加工机床可以有效降低光学元件的表面粗糙度,能够实现光学元件的纳米级超光滑抛光。

5 结 论

针对日益增长的超光滑表面抛光需求,本文进行了数控小磨头非接触式超光滑抛光方法的研究。提出了一种小磨头非接触式超光滑抛光方法,根据其原理以及球面和非球面光学元件的特点,确定了数控小磨头非接触式超光滑抛光机床的运动功能方案,成功研制了数控小磨头非接触式超光滑抛光机床样机,并进行了超光滑加工实验。该样机直线运动轴最低进给速度为 0.000 1 m/s、定位精度为 0.008 mm,摆动轴最低转速为

0.002 8 r/min、定位精度为 $15''$,工作台最低转速可达20 r/min,电主轴最低转速可达30 r/min,所有性能指标均已达到或超过设计指标要求,满足小磨头非接触式超光滑抛光工艺的要求。对直径150 mm的平面熔石英光学元件进行了超光滑抛光实验,以光学元件上两点为例,表面粗糙度 R_a

值分别由加工前的1.03 nm和0.92 nm提高到加工后的0.48 nm和0.44 nm,说明数控小磨头非接触式超光滑抛光方法能够有效降低光学元件的表面粗糙度。研究认为,若对各项工艺参数进行优化设计,数控小磨头非接触式超光滑抛光方法的加工效果有望得到进一步提高。

参考文献:

- [1] DIETZ R W, BENNETT J M. Bowl feed technique for producing supersmooth optical surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1966,5(5):881-882.
- [2] LEISTNER A J, THWAITE E G, LESH A F, et al.. Polishing study using Teflon and pitch laps to produce flat and supersmooth surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1992,31(10):1472-1482.
- [3] 苏建修. IC制造中硅片化学机械抛光材料去除机理研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- SU J X. *Study on material removal mechanism of wafer chemical mechanical polishing in IC manufacturing* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] CARL ZEISS SMT AG. Ion beam figuring for lithography optics [J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2009,267(8-9):1390-1393.
- [5] 武建芬,卢振武,张红鑫,等. 光学非球面离子束加工模型及误差控制[J]. *光学精密工程*, 2009,17(11):2678-2683.
- WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, et al.. Model of ion beam figuring in aspheric optics and its error control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(11):2678-2683. (in Chinese)
- [6] KIRKPATRICK A. Gas cluster ion beam applications and equipment [J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2003, 206:830-837.
- [7] BOLLINGER L D, STEINBERG G, ZAROWIN C B. Rapid optical figuring of aspherical surfaces with plasma-assisted chemical etching [J]. *SPIE*, 1992, 1618:14-21.
- [8] 张巨帆,王波,董申. 大气等离子体抛光技术在超光滑硅表面加工中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11):1749-1755.
- ZHANG J F, WANG B, DONG SH. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1749-1755. (in Chinese)
- [9] 施春燕,袁家虎,伍凡,等. 冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(2):513-517.
- SHI CH Y, YUAN J H, WU F, et al.. Influence analysis of impact angle on material removal profile in fluid jet polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(2):513-517. (in Chinese)
- [10] 高宏刚,曹健林,陈斌,等. 浮法抛光原理装置及初步实验[J]. *光学精密工程*, 1995,3(1):57-60.
- GAO H G, CAO J L, CHEN B, et al.. A prototype apparatus for float polishing and initial experiments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,3(1):57-60. (in Chinese)
- [11] GORMLEY J V, MANFRA M J, CALAWA A R. Hydroplane polishing of semiconductor crystals [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, 52(8):1256-1259.
- [12] KANAOKA M, LIU C, NOMURA K, et al.. Processing efficiency of elastic emission machining for low-thermal-expansion material [J]. *Surf. Interface. Anal.*, 2008,40:1002-1006.
- [13] 石峰,戴一帆,彭小强,等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):162-168.

SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Removal of subsurface damage in grinding magnetorheological finishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1): 162-168. (in Chinese)

[14] JUNG B, JANG K I, MIN B K, *et al.*. Magneto-rheological finishing process for hard materials using sintered iron-CNT compound abrasives [J]. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 2009,49:407-418.

作者简介:



李显凌(1974—),男,辽宁新民人,博士,副研究员,1996年、2003年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事高精度光学元件制造、光学系统检测设备等方面的研究。E-mail:lixianling@sklao.ac.cn

● 下期预告

基于 MSM 结构和 FBG 的温度和折射率同时测量

童峥嵘,郭 阳,杨秀峰,曹 晔

(天津理工大学 计算机与通信工程学院,天津 300384)

利用单模光纤(SMF)中的包层模与纤芯导模之间的干涉,提出了一种基于多模-单模-多模(MSM)结构与布拉格光栅(FBG)级联同时测量温度和折射率的传感器。实验测得 MSM 结构的干涉谱和 FBG 的透射峰对温度和折射率具有不同的响应灵敏度,其温度灵敏度分别为 0.055 2 nm/°C 和 0.015 8 nm/°C,MSM 结构的折射率灵敏度为 109.702 nm/RIU,而 FBG 对折射率变化不敏感,因此可利用敏感矩阵实现对温度和折射率的同时测量,温度和折射率的测量精度分别为 ± 0.32 °C 和 ± 0.0023 。该结构中,MSM 结构的温度灵敏度比单模-多模-单模(SMS)结构传感器提高了 5 倍。同时,由于 SMF 中的包层模对外界环境的变化较敏感,该 MSM 结构也可应用于其他传感领域。