

文章编号: 1002-2082(2012)04-0784-04

红外跟踪系统中非球面硅透镜加工技术研究

马 放, 付秀华, 贾宗合, 谢 影, 唐昊龙

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要:随着军用光学仪器的飞速发展, 红外光学材料单晶硅广泛应用于红外光学元件和半导体行业, 为了满足精密仪器对光学系统的要求, 对光学元件的面型精度要求越来越高。针对红外跟踪系统中对高精度单晶硅透镜的加工技术要求, 以 $\Phi 26$ mm 的单晶硅透镜为例, 通过多次反复研磨修抛和检测分析, 并不断优化工艺参数, 设计了特殊的夹具, 解决了单晶硅表面光洁度问题以及中心偏差难以控制的加工技术难题, 并实现了批量生产。经检测, 单晶硅非球面面形精度达到 $0.2\ \mu\text{m}$, 表面光洁度达到 III 级以上, 中心偏差在 $1\ \mu\text{m}$ 以内, 各项参数均满足了红外跟踪系统的要求。

关键词:非球面; 单晶硅; 修正抛光; 面形精度; 表面光洁度

中图分类号: TN213; TG580.6

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201233.0405001

Processing technology of aspheric silicon lens in IR tracking system

MA Fang, FU Xiu-hua, JIA Zong-he, XIE Ying, TANG Hao-long

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: With the rapid development of military optical instruments, IR optical materials have been widely used in IR optical elements and semiconductor industry, especially single-crystal silicon. To meet the precision instruments requirement for the optical system, the surface figure of the optical components has been increasingly demanded. Aiming at the processing technology requirement of high-precision silicon lens in the IR tracking system, taking a $\Phi 26$ mm silicon lens as an example, by repeatedly grinding, repair/polishing, testing analysis, continuous optimization of the process parameters and designing a special fixture, this paper solved the problem of the silicon surface smoothness and the difficult control of the center deviation, and achieved mass production. After testing, the precision of the single-crystal silicon aspheric surface figure got $0.2\ \mu\text{m}$, the surface smoothness achieved above the grade III and the center deviation was less than $1\ \mu\text{m}$. All the parameters met the requirements of the infrared tracking system.

Key words: aspheric; single-crystal silicon; corrective polishing; surface accuracy; surface smoothness

引言

近年来随着光学仪器的广泛使用, 对非球面光学元件的需求也逐渐增多。相对于球面而言, 非球面光学元件能够更好地校正球差、彗差、像散

等, 从而提高成像质量^[1]。由于单晶硅质地硬脆、折射率高、色散小、在红外波段有很好的透过率, 因此单晶硅透镜不仅广泛应用于红外跟踪系统中, 甚至半导体元件中有 95% 都是由硅材料制

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2011-11-22

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2010B090400048)

作者简介: 马放(1987—), 女, 吉林省吉林市人, 硕士研究生, 主要从事非球面光学加工和检测方面的研究工作。

E-mail: iammafang@sohu.com

取的^[2]。

光学晶体元件与一般光学玻璃元件的加工工艺是不同的。由于非晶态物质的无序性,光学玻璃的性质各个方向是同性的,然而对于光学晶体元件而言,其原子在晶体内部的有序排列,导致其结构各向异性,因此光学性能也各向异性^[3]。

据资料显示,对于单晶硅透镜而言,高精度的加工工艺仍处于不成熟阶段,加工过程中往往很容易出现崩边等问题,因此表面光洁度以及面型精度也很难控制,如此一来就使单晶硅透镜的加工增加了难度。

基于以上问题,对单晶硅的加工技术进行多次重复实验研究,研制了高精度、高效率的加工工艺。

1 高精度单晶硅透镜的加工工艺

以 Φ26 mm 的单晶硅透镜为例,零件加工图如图 1 所示。

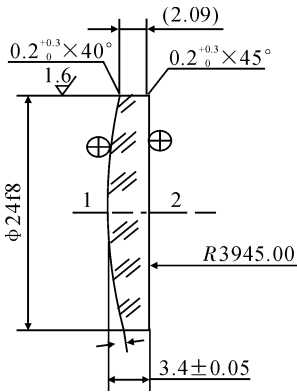


图 1 单晶硅加工零件图

Fig. 1 Machining drawing of a single-crystal silicon component
其非球面方程如下:

$$z = y^2 / R(1 + \sqrt{1 - (1 + k)y^2 / R^2}) + Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} + Fy^{12}$$

具体参数要求如表 1 所示。

表 1 非球面方程参数表

Table 1 Table of aspheric equation parameters

A	B	C	D	E	F
-5.351e-04	1.664e-07	1.737e-08	-4.326e-10	3.314e-12	-9.199e-15

针对表面 1 而言,顶点半径 R 为 52.15 mm,要求零件表面光洁度达到Ⅲ级以上。

2 工艺参数的研究

2.1 偏心问题

由图 1 可见,表面 2 的加工半径很大,因此很容易偏心,并且同轴度要求在 $1\ \mu\text{m}$ 范围内,为了保证铣磨的面型精度以及两个光学表面的同轴性,设计了特殊的工装夹具。如图 2 所示,该夹具

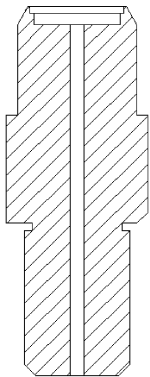


图 2 夹具图

Fig. 2 Chuck map

顶端所设计的凹槽可以使零件很好的固定,这样就可以很好地解决两个表面的同轴度问题,并且可以省去测量等厚等繁琐工序,为批量生产提供了有利条件。

2.2 工艺参数的优化

采用德国 Opto Tech 公司生产的 ASM100CNC 型非球面数控铣磨设备以及 Opto Tech ASP200CNC-B 型数控抛光机。为保证表面光洁度,并实现高效性的批量生产,经过反复实验研究,具体内容如下。

1) 铣磨进给量的控制

实验采用粒度为 D91、浓度为 C35 的粗磨轮和粒度为 D20、浓度为 C50 的精磨轮,由于硅的硬度要远远大于普通玻璃,通过控制进给量保证表面的粗糙度,避免出现崩边现象。经过反复多次实验,具体数据如表 2 所示。

表 2 玻璃以及单晶硅进给量对比表

Table 2 Feed rate comparison table of glass and silicon

	粗磨进给量 /(mm/rev)	精磨进给量 /(mm/rev)	再次精磨 /(mm/rev)
玻璃	0.05	0.010	不需要
单晶硅	0.01	0.002	0.002

通过实验证明:进刀量越小,非球面表面的沙眼越小,为抛光打下良好基础。

2) 转速的控制

首先,铣磨轮与工件间的相对运动速度的控制以及驻留时间决定了工件初始表面光洁度,然而对于抛光来说,全口径抛光除了要很好控制工具轴与工件轴转速之外还需考虑压力因素,经实验确定调整为 0.3 Pa 时较理想,基于以上条件,根据工具轴转速与工件主轴转速的多次不同组合,两个轴转速的匹配如表 3 所示。

表 3 工具轴转速与工件主轴转速

Table 3 Tool spindle and workpiece spindle speeds			
	粗磨/(r/min)	精磨/(r/min)	抛光/(r/min)
工具轴转速	9 000	10 000	2 000
工件主轴转速	20	10	35

根据上述参数,在加工过程中没有出现崩边或影响光洁度的不良现象。

3) 抛光粉的选择

对于晶体研磨来说,一般采用氧化铝、氧化铬、金刚石微粉进行抛光^[4]。经多次实验研究,平均粒度为 $0.08\mu\text{m}$ 、PH 为 9.2 的 Ultra Sol500S 高纯度胶体氧化硅抛光液,其具有很强的抛光磨削能力,其特殊的碱性溶液配方,能够很好地减少表面划擦,解决表面结晶等光洁度问题,会在抛光效率上占有相对的优势。抛光受很多外界因素的影响^[5],需要特别注意的是,抛光粉的参量在抛光过程中会发生变化^[6,10],抛光液的浓度会影响抛光表面的质量,若浓度过高,会导致硅透镜发热,使抛光表面容易产生划痕现象。实验首先采用去离子水和 Ultra Sol500S 高纯度胶体氧化硅抛光液的比例为 1.5:1 稀释后使用,在抛光过程中根据硅透镜的抛光质量逐渐减小抛光液浓度,保证表面光洁度达到Ⅲ级以上。

4) 抛光工艺调整

与古典抛光法相比较,ASP200CNC-B 型抛光机抛光的效率要远远高于它。经过实验对比,古典抛光法采用 1.3 倍零件口径的沥青盘上进行预抛光^[7,9],机床转速在 60 r/min,抛光 15 min。硅透镜同时进行数控抛光机全口径抛光,并采用同样大小口径的聚氨酯弹性抛光盘,同样时间内,用数控抛光机抛光的硅透镜光洁度要远远好于古典抛光法,因此预抛光和修抛都采用数控抛光机。

但是,数控抛光机器对于加工件的微小误差

很难控制,因此在最后阶段,可以采用古典抛光法进行修正,同时采用氧化铝中加入适量的抛光稳定剂,它能明显提高抛光的去除率,缩短抛光时间,并很好地保证了加工表面质量。

修抛后,经过 TAYLOR HOBSON 轮廓仪进行检测得到最终面型图如图 3 所示。

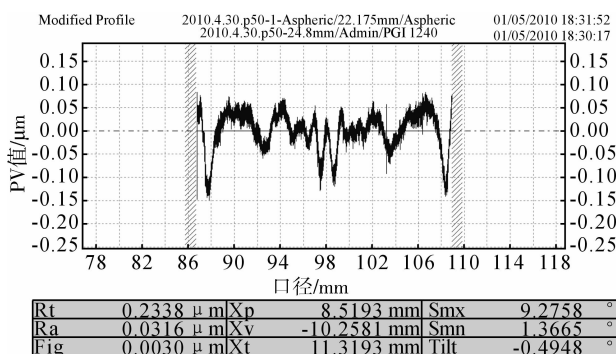


图 3 元件最终面型图

Fig. 3 Final surface figure of component

利用 zygo 干涉仪检测得的面形误差分布数据能准确地生成数据控制文件^[8],其非球面面型误差分布如图 4 所示。



图 4 元件表面检测图

Fig. 4 Inspection map of component surface

经检测,加工零件的 PV 值达到了 $0.2\mu\text{m}$,同时光洁度达到了Ⅲ级以上,各项技术指标均满足要求。

3 结论

通过口径 $\Phi 26\text{ mm}$ 的单晶硅进行了铣磨、全口径数控抛光以及小工具修抛等工艺,在加工过程中尝试了新型抛光粉,采用了数控与古典相结合的方法,并通过多次不同工艺的重复性实验,提出了高效、快捷的加工工艺流程。实验结果面型精度超过了预期要求,表面光洁度达到了Ⅲ级以上,解决了单晶硅的小批量生产问题。另外,在精度和效率方面的提高是下一步的主要技术目标。

参考文献:

- [1] 薛栋林, 张忠玉, 张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 198-203.
XUE Dong-lin, ZHANG Zhong-yu, ZHANG Xue-jun. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2): 198-203. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 魏昕, 杜宏伟, 袁慧, 等. 晶片材料的超精密加工技术现状[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(3): 77-78.
WEI Xin, DU Hong-wei, YUAN Hui, et al. Crystal material status of ultra-precision processing technology[J]. Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2004(3): 77-78. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 成清校. 单晶硅片超精密磨削减薄技术实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
CHENG Qing-xiao. Experimental research on ultra-precision grinding technology for silicon wafer thinning[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪, 等. 氧化铝粉在硅溶胶中分散行为的研究[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(3): 263-264.
ZHU Xin-wen, JIANG Dong-liang, TAN Shou-hong, et al. The technology of the Al power in the dispersion behavior of silica[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(3): 263-264. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 倪颖, 李建强, 王毅, 等. 一种高效率小口径非球面数控抛光方法[J]. 光学技术, 2008, 34(1): 33-35.
NI Ying, LI Jian-qiang, WANG Yi, et al. An efficient method of computer controlled polishing for small aspheric lens[J]. Optical Technique, 2008, 34(1): 33-35. (in Chinese with an English abstract)
- [6] CUMBO M J, FAIRHURST D, JACOBS S D, et al. Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass[J]. Applied Optics, 1995, 34(19): 3713-3755.
- [7] 韩荣久, 孙恒德, 徐德全. 单晶硅片的低温抛光技术[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 105-106.
HAN Rong-jiu, SUN Heng-de, XU De-quan. The low-temperature polishing technology of the single-crystal silicon[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 105-106. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 牛海燕, 张学军. $\Phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 541-542.
NIU Hai-yan, ZHANG Xue-jun. Research on computer controlled polishing technology of 124 mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 541-542. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 徐清兰, 伍凡, 吴时彬, 等. 单晶硅镜面超光滑表面工艺技术研究[J]. 光电工程, 2003, 30(5): 70-71.
XU Qing-lan, WU Fan, WU Shi-bin, et al. Study on technologies and techniques for processing super smooth surface of single-crystal silicon[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(5): 70-71. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 王松伟, 姚合宝, 蒋军彪. 一种新型古典抛光工艺的技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(2): 19-20.
WANG Song-wei, YAO He-bao, JIANG Jun-biao. New method of the classical polishing technologies[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(2): 19-20. (in Chinese with an English abstract)