

# 超薄石英晶片超精密抛光实验的研究<sup>\*</sup>

孙磊, 郭伟刚, 袁巨龙<sup>\*</sup>, 邓乾发, 冯铭, 吕冰海  
(浙江工业大学超精密加工研究中心, 浙江杭州 310014)

**摘要:**为了解决超薄石英晶片高表面质量的加工问题,以及寻求一种高效低成本的加工方法,将一种新的超精密抛光工艺应用到超薄石英晶片的加工中。给出了加工过程中的抛光原理,制定出了在研磨和抛光过程中的最优实验条件,并对加工后超薄石英晶片的粗糙度和厚度做了详细的分析;讨论了磨粒的尺寸对表面粗糙度和材料去除率的影响,同时对加工过程的材料去除机理做了论述,以表面粗糙度和厚度为评价目标对超薄石英晶片的加工特性和表面质量进行了评价。研究表明:使用该实验的工艺加工超薄石英晶片可以得到厚度为99.4  $\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为0.82 nm的超光滑表面;同时,该研究还发现通过延长抛光时间可以减小石英晶片的表面残余应力,可有效控制石英晶片四角“翘曲”现象,得到更好的平面度和平行度。

**关键词:**石英晶片;超精密抛光;表面质量;材料去除机理

中图分类号:TH161<sup>+</sup>.1;TG356.28

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1055-04

## Experimental study on ultra-precision polishing for ultrathin quartz substrates

SUN Lei, GUO Wei-gang, YUAN Ju-long, DENG Qian-fa, FENG Ming, LV Bing-hai  
(Ultra-precision Machining Research Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to solve processing problems of the high surface quality of the ultrathin substrates, and searching for a high efficiency and low cost manufacturing processing method, a new ultra-precision polishing process was applied to the process of ultrathin quartz substrates. The principle of the polishing process was given, the optimal conditions for the lapping and polishing process were formulated. A detailed analysis was done on the roughness and thickness of the ultrathin quartz substrates, the influence of particle size on the surface roughness and material removal rate was discussed. The material removal mechanism in the process of ultra-precision polishing was also discussed. The surface roughness and thickness were used as the evaluation target, and the processing characteristics and surface quality of ultrathin quartz substrates were evaluated. The experimental results indicate that an extremely smooth surface of the quartz substrate is obtained in the ultra-precision polishing process, the ultrathin quartz substrates with thickness is 99.4  $\mu\text{m}$  and the best surface roughness is  $R_a$  0.82 nm. The surface residual stress of the quartz substrates can be reduced by increasing the polishing time, at the same time, the flatness and parallelism can be controlled very well.

**Key words:** quartz substrate; ultra-precision polishing; surface quality; material removal mechanism

## 0 引言

石英晶体是目前世界上用量最大的晶体,石英晶片在工业生产、科学研究等领域中的应用十分广泛。利用石英晶体本身的物理特性制作的电子元件,具有很高的频率稳定性,被广泛应用于数字电路、计算机、

通讯等不同的领域<sup>[1-3]</sup>。随着通讯、电子技术的发展,市场对石英晶片的需求量大幅上升,同时对石英晶片表面质量的要求也越来越高;而传统工艺很难满足市场增长的需要。因此,研究者需要在不断改进加工工艺的同时寻求新的加工方法,来提高石英晶片的表面质量以及生产效率。

收稿日期:2013-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175166);浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ12E05001);浙江省自然科学基金资助项目(Y1101085)

作者简介:孙磊(1988-),男,江苏徐州人,主要从事精密与超精密研磨、抛光方面的研究。E-mail:sunalle@163.com

通信联系人:袁巨龙,男,教授,博士生导师。E-mail:jlyuan@wistates.com

目前,主要有以下几种方法对石英晶片进行加工:袁巨龙教授等人<sup>[4-5]</sup>研制出采用 SiO<sub>2</sub> 软质磨料微粉和软质沥青抛光盘,在修正环型抛光机上对石英晶片进行加工,获得了表面粗糙度为 0.1 nm~0.2 nm 的石英晶体超光滑表面,实现了超精密加工的极限精度。此后,袁巨龙教授等人<sup>[6]</sup>又利用浮法抛光方法和 SiO<sub>2</sub> 胶粒抛光石英晶片,获得了表面粗糙度为 0.2 nm~0.3 nm 的超光滑表面。另外,其他的学者利用水和抛光加工,在普通抛光机上的加工区域加上保温罩,使工件在过热水蒸汽介质中进行抛光,也可获得无划痕、平滑光泽无畸变的洁净表面。

通过对石英晶片加工现状的讨论与分析,本研究研究一种对超薄石英晶片高效高质量的加工工艺,讨论超薄石英晶片在超精密抛光过程中磨粒尺寸对表面质量和材料去除率的影响,同时也对石英晶片在加工过程中的材料去除机理进行论述。

# 1 实验过程

## 1.1 实验方案

试验中本研究采用 Nanopoli-100 平面抛光机。石英晶片研磨抛光原理示意图如图 1 所示。将石英晶片粘在基盘上,在基盘上施加载荷,然后修正环和抛光盘分别绕着各自的旋转轴旋转。定时向基盘和抛光盘之间添加抛光液,磨粒在晶片和抛光盘之间产生滚轧和微切削作用,从而达到材料去除的目的。同时,抛光液还兼具有清除抛光产生的废屑的作用。

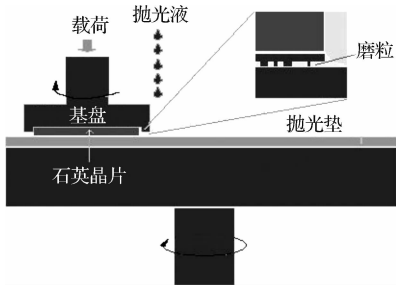


图 1 抛光原理图

实验中加工的工件为石英晶片,如图 2 所示。晶片每 3 片为一组,均匀粘贴在不锈钢基板的端面上。试件用石蜡和松香粘在基盘上,以等半径 120°间隔均匀分布,使晶片在加工过程中受力均匀。

实验中使用的超薄石英晶片尺寸为 29.5 mm×26 mm,厚度 200 μm。要求表面粗糙度加工到 10 nm,厚度加工到 100 μm,偏差为 5 μm。该实验采用 Veeco 光学轮廓仪检测工件表面粗糙度,并使用 Mahr 圆度仪测量石英晶片的平面度和厚度。石英晶片在研磨和抛光时的实验条件如表 1 所示。

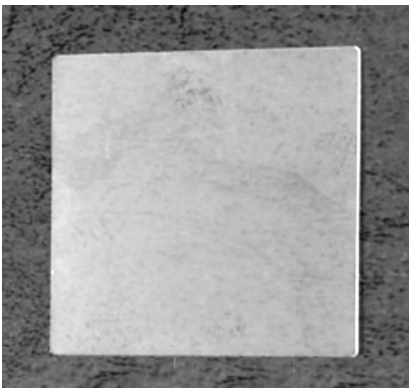


图 2 加工试件

表 1 实验条件

|      | 研磨                                             | 抛光                      |
|------|------------------------------------------------|-------------------------|
| 工件   | 石英晶片                                           |                         |
| 加工设备 | Nanopoli-100                                   |                         |
| 磨料   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (#2 000 #4 000) | CeO <sub>2</sub> (1 μm) |
| 磨料浓度 | 30% wt                                         | 10% wt                  |
| 转速   | 50 r·min <sup>-1</sup>                         | 30 r·min <sup>-1</sup>  |
| 载荷   | 0.8 N~10 N                                     | 0.8 N~2 N               |
| 抛光盘  | 铸铁盘                                            | 聚氨酯抛光垫                  |

## 1.2 研磨过程

石英晶片的加工余量主要在研磨阶段去除,所以研磨效率直接关系到整个加工效率的高低。而且,研磨作为抛光的前道工序,它为抛光所提供表面质量的好坏将严重地影响抛光的表面质量和时间<sup>[7]</sup>。在研磨过程中,半精研使用#2 000 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 磨粒,精研使用#4 000 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 磨粒。在研磨过程中使用铸铁盘,可以很好地保证石英晶片的形状精度。

为了得到更好的表面质量和材料去除率,实验中合适的研磨条件为:研磨液浓度 30% wt,研磨速度 50 r/min,研磨压力控制在 0.8 N~10 N 的范围内。

## 1.3 抛光过程

抛光的主要目的是提高石英晶片的表面质量,包括粗糙度、平面度等;同时也会去除在研磨过程中存留下来的表面残余应力。在石英晶片的抛光过程中,使用 10% wt 的 CeO<sub>2</sub> 抛光液,抛光盘使用聚氨酯的软质抛光垫。因为软质抛光垫对防止大颗粒产生的工件表面粗糙度恶化有利,可以得到更好的表面粗糙度。

该实验中合适的抛光条件:抛光液浓度 10% wt 的 CeO<sub>2</sub> 溶液,抛光盘转速 30 r/min,抛光压力控制在 0.8 N~2 N 的范围内<sup>[8-9]</sup>。

# 2 实验结果及其讨论

## 2.1 石英晶片的表面粗糙度

超薄石英晶片在加工前后表面质量的对比如图 3 所示。一般认为表面粗糙度是由抛光盘和工件之间存在的磨粒在工件表面产生摩擦痕迹,从而产生表面粗糙

度。但是抛光盘表面的微小不规则性也会导致工件表面形成表面粗糙度。在载荷作用下,抛光盘与工件表面紧密接触时,抛光盘施加给工件表面各点不均匀的压力使得工件表面各点的材料去除率不等,也会产生表面粗糙度。

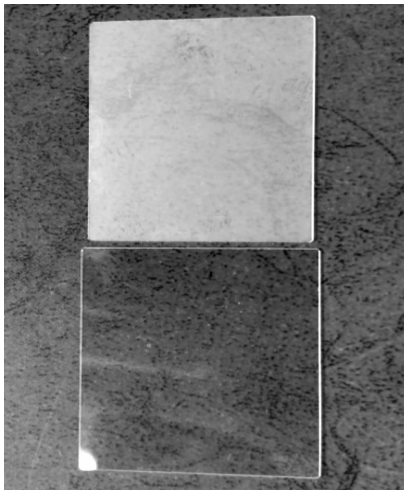
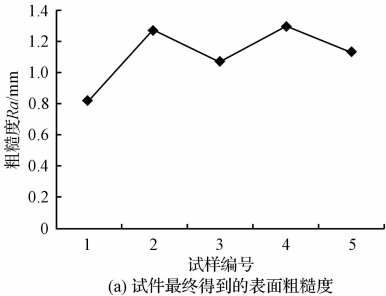
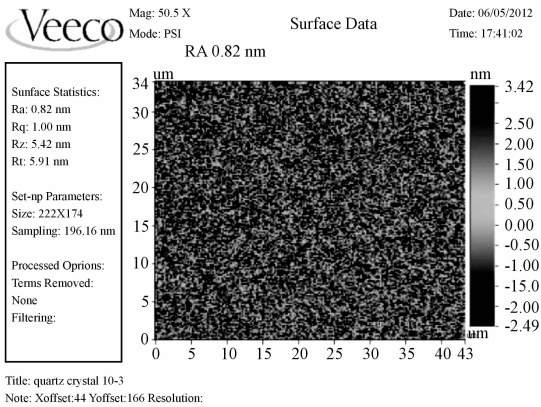


图 3 加工前、后表面质量的对比

经过对石英晶片的半精研、精研以及最终的抛光加工,石英晶片的表面粗糙度可以控制在 1 nm 左右。5 片试件经过最终的抛光加工后得到的表面粗糙度值如图 4(a)所示;得到的最好的表面粗糙度值为 0.82 nm,试件的粗糙度值( $Ra$  0.82 nm)如图 4(b)所示。



(a) 试件最终得到的表面粗糙度



(b) 试件的粗糙度值 ( $Ra$  0.82 nm)

图 4 石英晶片抛光后表面粗糙度和材料去除率的测量结果

2.2 石英晶片的厚度

在该实验中,对石英晶片的厚度有非常严格的要求,因为厚度会影响到石英晶片的谐振频率,谐振频率是石

英晶片的一个很重要的参数,只要保证了晶片的厚度和表面质量就可以保证石英晶片频率的高稳定性。试验中试件的厚度 200  $\mu\text{m}$ ,要求加工到 100  $\mu\text{m}$ ,偏差为 5  $\mu\text{m}$ 。所以该实验制定了在不同的研磨阶段和最终的抛光阶段,每个阶段去除石英晶片厚度的控制界限。石英晶片厚度的控制及磨料尺寸与材料去除率的关系如图 5 所示。

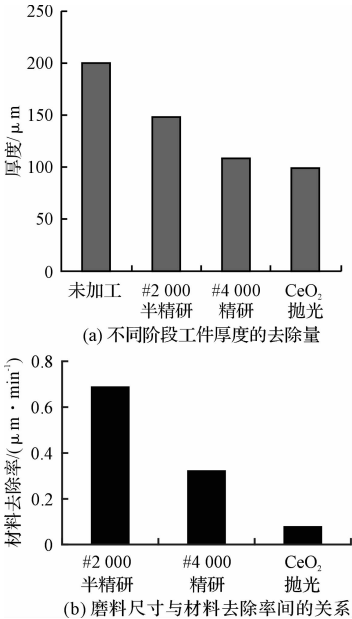


图 5 石英晶片厚度的控制及磨粒尺寸与材料去除率的关系

在研磨和抛光过程中,晶片的厚度和材料的去除率密切相关,而材料的去除率是由磨粒的粒径决定的。粒径越大,材料的去除率越高;但是,晶片的表面粗糙度就会下降,所以晶片的厚度很难控制。通过本研究的加工工艺可以把石英晶片的厚度偏差控制在 1  $\mu\text{m}$  以下。最终加工得到的石英晶片厚度如图 6 所示。

2.3 石英晶片在研磨和抛光过程中的材料去除机理

在研磨过程中,研磨的作用形式与研磨材料的性能密切相关。对于磨料嵌入性较好的研具,磨料主要靠滚轧和微切削作用联合去除石英材料,但以微切削作用为主;对于磨料嵌入性较差的研具,则以滚轧作用作为磨料的主要作用形式<sup>[10-11]</sup>。

由于磨料的作用,导致石英晶片被加工表面上产生微裂纹,这种微裂纹是石英晶体破坏的主要形式,具体表现在:由于磨料的滚轧作用在石英晶体表面产生带有裂纹的压痕;由于磨料微切削作用,在石英晶体表面刻划出带有裂纹的划痕。有的裂纹扩展延伸后与其他裂纹相交叉,受裂纹包围的区域就会崩离出碎片,这样就达到了去除材料的目的。

在抛光过程中,是以磨粒的微小塑形切削生成切屑为主体而进行的。由于  $\text{CeO}_2$  的粒径更小,抛光过程的材料去除基本上是以微切削作用完成的。磨粒嵌入抛

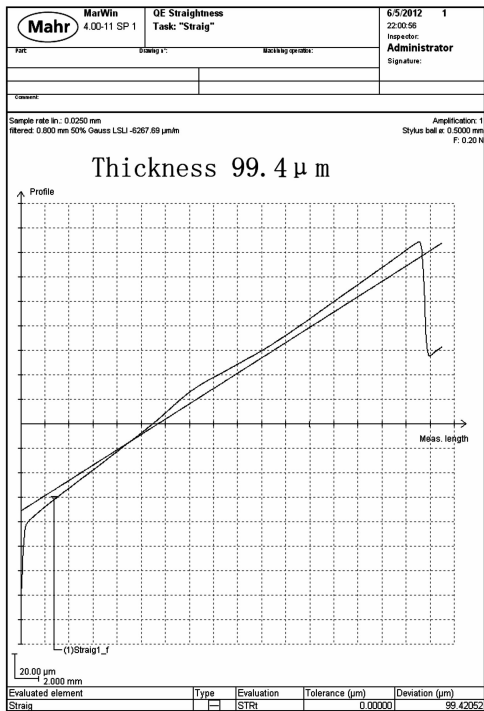


图 6 最终加工得到的石英晶片厚度(99.4 μm)

光盘,通过磨粒尖端刻划工件表面进行微切削,从而达到工件材料的塑性去除,达到材料去除的目的<sup>[12-13]</sup>。

## 2.4 实验过程中的问题

(1)在石英晶片的加工过程中,晶片在用#4 000的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 完成研磨后从基盘上取下,笔者发现晶片的四角有翘曲的现象。这种现象主要是由于在研磨石英晶片时,会在晶片表面产生残余应力,晶片两面的残余应力差现象导致了晶片翘曲现象的产生。

经实验研究发现,适当地增加抛光时间可以有效控制这个问题。因为在抛光过程中,笔者使用软质的聚氨酯抛光盘;在抛光初期,试件的边缘受到抛光盘的变形阻力较试件中部大。因此,在初期阶段试件边缘较中部去除量大。到抛光后期试件边缘处的抛光盘变形量较初期阶段减少,试件表面上各点所受抛光盘变形阻力逐渐趋于一致。最终,试件表面上各点的抛光量趋于相等,可以解决晶片翘曲的现象。

(2)在加工石英晶片时,石英晶片是用融化的石蜡和松香粘在基盘上,因此,石英晶片加工时的热变形、压力引起的弹性变形以及石蜡粘结层的均匀程度都会影响石英晶片最终的表面平面度和平行度。通过本研究的加工工艺加工超薄石英晶片,石英晶片的平面度可以控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

## 3 结束语

为了获得良好的超薄石英晶片的表面质量,本研究以表面粗糙度 $R_a$ 和厚度为评价目标,对石英晶片

的研磨抛光特性和抛光后的表面质量进行了分析和评价。研究结果表明:

(1)超薄石英晶片经超精密抛光后可获得厚度为 $99.4\text{ }\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $0.82\text{ nm}$ 的超光滑表面。

(2)磨料的种类选择是保证获得超平滑表面的必要条件;磨料的粒径越大,材料去除率越高,但是表面粗糙度也就越大。

(3)在研磨过程中,石英晶片的去除主要是依靠磨粒的滚轧作用和微切削作用共同完成的;在抛光过程中,则主要是以微切削去除为主。

(4)延长抛光时间可以减小石英晶片的表面残余应力,同时也可有效控制石英晶片四角“翘曲”现象。

(5)晶片加工时产生的热变形、压力引起的弹性变形以及石蜡粘结层的均匀程度都会影响石英晶片最终的平面度和平行度。

## 参考文献 (References):

- [1] 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):75-79.
- [2] 赵文宏,赵 蓉,邓乾发,等. 石英晶片加工现状与发展[J]. 航空精密制造技术,2011,47(1):11-14.
- [3] GUZZO P L. Ultrasonic abrasion of quartz crystals[J]. *Wear*,2003(255):67-77.
- [4] 沈中伟,袁巨龙,邢 彤. 晶体的超精密平面抛光[J]. 浙江工业大学学报,2001,29(1):20-25.
- [5] KASAI K, HORIO K, KARAKI D T. Improvement conventional polishing condition for obtain super smooth surface of compound semiconductor substrates[J]. *Annals of CIRP*, 1990,39(1):432-437.
- [6] 袁巨龙. 功能陶瓷的超精密加工技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.
- [7] 袁巨龙,崔丽芬,张如远. 石英晶体精密研磨技术的研究[J]. 制造技术与机床,1995(1):24-26.
- [8] YUAN Ju-long, ZHAO Ping, RUAN Jian. Lapping and polishing process for obtaining super-smooth surfaces of quartz crystal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003(138):116-119.
- [9] 袁巨龙,张如源,崔丽芬. 石英晶体无损伤理想镜面的超精密加工技术研究[J]. 仪器仪表学报,1995,16(1):181-186.
- [10] KOMANDURI R. On material removal mechanisms in finishing of advanced ceramics and glasses[J]. *Annals of CIRP*,1996,45(1):509-513.
- [11] WANG C C, LIN S C, HOCHEN H. A material removal model for polishing glass-ceramic and aluminium magnesium storage disks[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2002,42(8):979-984.
- [12] 张 才,计时鸣,金明生,等. 磁控式气囊抛光实验研究[M]. 轻工机械,2012,30(5):16-20.
- [13] 袁哲俊,王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

[编辑:张 翔]