

文章编号 1004-924X(2019)05-1087-09

单晶硅反射镜的超精密磨削工艺

王紫光, 康仁科, 周平*, 高尚, 董志刚

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了实现单晶硅反射镜高效低损伤的超精密加工, 研究了基于工件旋转法磨削原理的单晶硅反射镜超精密磨削工艺。通过形貌检测和成份测试的方法分析了该工艺采用的超细粒度金刚石砂轮的组织结构特征, 并对单晶硅进行了超精密磨削试验, 研究了超细粒度金刚石砂轮的磨削性能。通过砂轮主轴角度与工件面形之间的数学关系实现对磨削工件面形的控制。最后, 采用超细粒度金刚石砂轮对 $\Phi 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的单晶硅反射镜进行了超精密磨削试验验证。试验结果表明, 超细粒度金刚石砂轮磨削后的单晶硅表面粗糙度 R_a 值小于 10 nm , 亚表面损伤深度小于 100 nm , 磨削后的单晶硅反射镜面形 PV 值从初始的 $8.1 \mu\text{m}$ 减小到 $1.5 \mu\text{m}$ 。由此说明采用该工艺磨削单晶硅反射镜能够高效地获得低损伤表面和高精度面形。

关键词: 单晶硅反射镜; 工件旋转法磨削; 表面/亚表面损伤; 面形控制; 超细粒度金刚石砂轮

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1087

Ultra-precision grinding of monocrystalline silicon reflector

WANG Zi-guang, KANG Ren-ke, ZHOU Ping*, GAO Shang, DONG Zhi-gang

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: pzhou@dlut.edu.cn

Abstract: An ultra-precision grinding process employing a rotational grinding technique was investigated to achieve high-efficiency, low-damage grinding of monocrystalline silicon reflectors. First, the characteristics of ultra-fine wheels, such as their surface topography and compositions, were analyzed. The grinding performance of wheels was studied based on the grinding of monocrystalline silicon. Then, the shape of the grinding surface was controlled based on the mathematical relationship between the posture angles of the grinding wheel spindle and surface profile of the workpiece. Ultra-precision grinding experiments on $\Phi 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ silicon reflectors with ultra-fine diamond wheels are conducted for verification. The results show that the surface roughness R_a is less than 10 nm , the subsurface damage depth is less than 100 nm , and the PV value of the surface of the silicon reflector decreases from $8.1 \mu\text{m}$ to $1.5 \mu\text{m}$. It can be concluded that the grinding process can efficiently produce silicon reflectors with low surface damage and shapes of high precision.

Key words: silicon reflector; workpiece rotational grinding; surface and subsurface damage; surface profile control; ultra-fine diamond wheel

收稿日期: 2018-11-23; **修订日期:** 2019-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(No. 91323302); 国家自然科学基金资助项目(No. 51875078); 国家自然科学基金青年基金项目(No. 51505063); 国家科技重大专项(02 专项)(No. 2014ZX02504001)

1 引言

高能激光器中的光学元件在高密度激光束照射时容易吸收热量,导致这些光学元件自身产生一系列的热效应,从而影响激光器的使用性能^[1]。单晶硅由于具有较高的导热性和较低的热膨胀性,而且容易实现微沟槽等冷却结构的加工,被较多地应用在高能激光器中作为光学元件的衬底材料^[2]。单晶硅反射镜(硅镜)是高能激光器腔镜中常见的一种重要光学元件。

平面光学元件典型的加工方法是先对切割后的镜坯进行研磨或磨削加工,去除工件表面的切割残留损伤,并获得微米精度面形的表面,再通过抛光去除研磨或磨削产生的损伤。当对光学元件面形精度要求较高时,会继续采用计算机控制光学面形修形(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)和离子束修形等方法获得更高的面形精度^[3-5]。上述过程中,由于研磨的材料去除效率低,并且属于非确定性去除加工方法,对工件的面形精度要求越高,其加工效率就越低^[6-7]。因此,采用超精密磨削的方法替代研磨,实现高效确定性的加工已广泛地应用在光学元件的加工中^[8]。

自 1969 年德国学者 Kem^[9-10]第一次系统地研究杯形金刚石砂轮平面磨削光学玻璃开始,研究人员对光学元件的超精密磨削加工展开了一系列的研究。Mecholsky^[11]等人研究了玻璃磨削后的裂纹及断裂形式,给出了裂纹形成时磨粒平均切深与磨粒宽度的比值。Hed^[12]等人研究了石英玻璃、BK7 和微晶玻璃的磨削表面粗糙度与亚表面损伤之间的对应关系,研究结果表明了磨削后的玻璃表面粗糙度 PV 值和亚表面损伤深度之间的比值在 6.2~6.4。通过减小磨粒切削深度实现脆性材料的延性域磨削也可以有效控制裂纹损伤,将损伤深度减小到亚微米尺度。Bifano^[13]等人提出了玻璃磨削过程中材料延性域去除的概念,并建立了玻璃磨削过程中材料的脆塑性转变条件与磨削参数和材料属性之间的关系。大量的工艺研究表明,通过选用合适的砂轮及其修整方

式可以实现各种光学玻璃的延性域磨削,获得粗糙度 R_a 为几十纳米左右的超精密磨削表面。

基于集成电路领域对低损伤单晶硅高效加工的需求,单晶硅材料的超精密磨削方法也已经得到了广泛的研究。在磨削机理方面,Zarudi 和 Zhang^[14]等人采用压痕、划痕和磨削的方法研究了单晶硅的材料去除机理,通过透射电子显微镜观察各个试验条件下的单晶硅亚表面状态,研究结果包括:粗磨单晶硅的亚表面包含大量的位错和裂纹,精磨只有位错产生;单晶硅的纳米压痕和划痕试验表明单晶硅塑性变形受应力场的影响。在磨削工艺方面,Matsui^[15]在 1988 年首次提出工件旋转法磨削后,这种方法就成为了单晶硅超精密磨削的主要方法。Sun 和 Chidambaram^[16-17]等人对工件旋转法磨削单晶硅的面形进行了研究,建立了单晶硅磨削面形与砂轮主轴和工件主轴之间角度的关系,并进行了试验验证。Pei^[18]等人研究了工件旋转法磨削单晶硅时磨削参数对工件亚表面损伤的影响,研究指出磨削后的单晶硅亚表面损伤存在 6 种形状的裂纹,并指出亚表面损伤深度是磨粒粒径的 1/2。Zhang^[19]等人对单晶硅粗磨、半精密和精磨的亚表面损伤进行了详细研究,并建立了损伤模型。Zhang 和 Huo^[20-21]等人在基于工件旋转法磨削原理的磨床上利用新研制的金刚石砂轮实现了单晶硅纳米级表面粗糙度的加工结果,亚表面损伤深度小于 200 nm。

综上所述,研究人员已对光学材料的磨削方法进行了深入研究,获得了光学材料的磨削去除机理和损伤形成机制,表明超精密磨削光学元件能够实现低损伤的磨削表面,有利于减少后续的抛光时间;但针对平面光学元件面形有关的磨削方法研究较少,尤其是针对硅镜,同时考虑低损伤表面质量和高精度面形的超精密磨削工艺鲜有人研究。

鉴于上述分析,本文基于工件旋转法磨削原理,研究了超细粒度金刚石砂轮磨削单晶硅的性能,分析磨削后的单晶硅表面粗糙度和亚表面损伤深度,然后利用磨床砂轮主轴角度调整能够改变磨削工件的面形特点,使用超细粒度金刚石砂

轮对硅镜进行超精密磨削加工,测量了硅镜的磨削表面粗糙度和面形精度,利用该工艺能够同时实现硅镜的低损伤表面和面形的超精密磨削加工。

2 面形控制原理与磨削试验方法

2.1 工件旋转法磨削原理与工件面形控制方法

工件旋转法磨削原理如图 1 所示。理论上,砂轮主轴与工件主轴平行,并且需要保证杯形砂轮的磨削层外圆边缘与工件中心对齐。实际上,为了使得工件能够被完全加工到,需要将磨削层的几何中心与工件中心对齐,同时,为了减小磨削力,可以将砂轮主轴的角度进行调整使得砂轮与工件接触方式为半边接触;砂轮和工件绕各自主轴旋转,其中砂轮主轴高速旋转,工件主轴转速与砂轮主轴转速比约为 1 : 10,砂轮主轴沿轴线方向进行进给运动,进给速度为 1~999 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。工件旋转法磨削相对于其他磨削方法具有的优点为:砂轮与工件的接触面积、长度和切入角度在磨削工件的过程中是不变的,能够获得稳定的磨削状态;由于进给速度可以达到 1 $\mu\text{m}/\text{min}$,便于控制砂轮的切削深度,实现延性域磨削,使得工件表面的磨削损伤降低;另外,还可以通过调整砂轮的主轴角度实现对工件的面形控制,其面形截面轮廓与调整角度之间的关系可表达为^[22]:

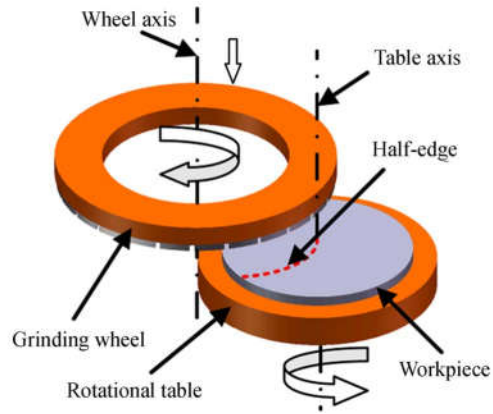


图 1 工件旋转法磨削原理

Fig. 1 Principle of workpiece rotation grinding

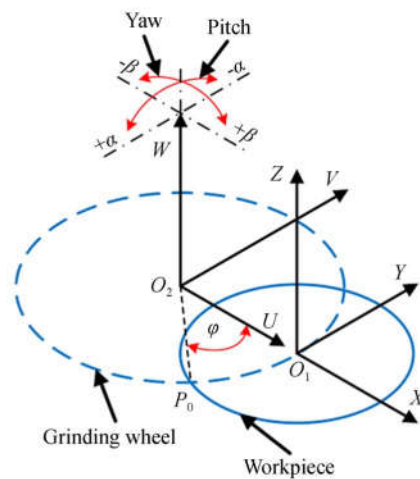


图 2 工件和砂轮坐标系

Fig. 2 Coordinate systems of workpiece and grinding wheel

$$z(r_p) = \pm (\sin^2 \alpha \sin \beta \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - r_p^2 + R^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} + r_p \cos \alpha \sin \alpha - \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - r_p^2 + R^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} + r_p \cos \alpha \sin \alpha \sin^2 \beta}{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}), \quad (1)$$

式中： r_p 为面形截面轮廓在 Y 轴方向上的投影坐标， α 为砂轮主轴的左右摆角， β 为砂轮主轴的前后倾角， R 为杯形砂轮磨削层圆环的外圆半径。建立的工件坐标系和砂轮坐标系如图 2 所示。

由式(1)可知， α 和 β 的大小影响轮廓线 $z(r_p)$ 的形状,通过计算机仿真方法得到不同 α 和 β 取值对应的工件典型面形轮廓主要有 6 种,如图 3 所示,分别为正直边尖顶、倒直边尖顶、正弧边尖顶、倒弧边尖顶、正弧边圆顶和倒弧边

圆顶。通过上述分析可知,调整砂轮主轴的角度 α 和 β 能够实现对工件面形的控制。在实际磨削过程中,针对尺寸为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、径厚比 ≥ 20 的低刚度工件,加工前工件真空吸附时产生的弹性变形在加工后释放真空会产生弹性回弹,会影响磨削后的工件面形,因此需要通过调整砂轮主轴角度使得加工出来的工件面形能够抵消弹性变形,砂轮主轴的 α 和 β 角度实际调整大小可以根据需要抵消的工件真空吸附变形量获得。 α 和 β 角度的确定过程如下^[22]:工件

吸附前,定义待磨削工件表面面形的截面轮廓为 $z_1(r_p)$;真空吸附后,工件产生弹性变形,工件面形的截面轮廓变为 $z_2(r_p)$,则可知工件由真空吸附产生的变形量为:

$$z_d(r_p) = z_1(r_p) - z_2(r_p). \quad (2)$$

假设砂轮主轴 α 和 β 调整后磨床能够加工出来的工件面形轮廓为 $h(r_p)$, $h(r_p)$ 是 α 和 β 的函数,用于抵消 $z_d(r_p)$,则有:

$$h(r_p) = -z_d(r_p). \quad (3)$$

由于 $h(r_p)$ 是 α 和 β 的函数,所以可通过反求法确定角度 α 和 β 的具体值,如式(4)所示:

$$\epsilon(\alpha, \beta) = \int_0^r [h(r_p) - z(r_p)] dr_p, \quad (4)$$

其中 $\epsilon(\alpha, \beta)$ 为偏差函数,当偏差最小时可获得 α 和 β 的大小。 $z(r_p)$ 可由式(1)求解。

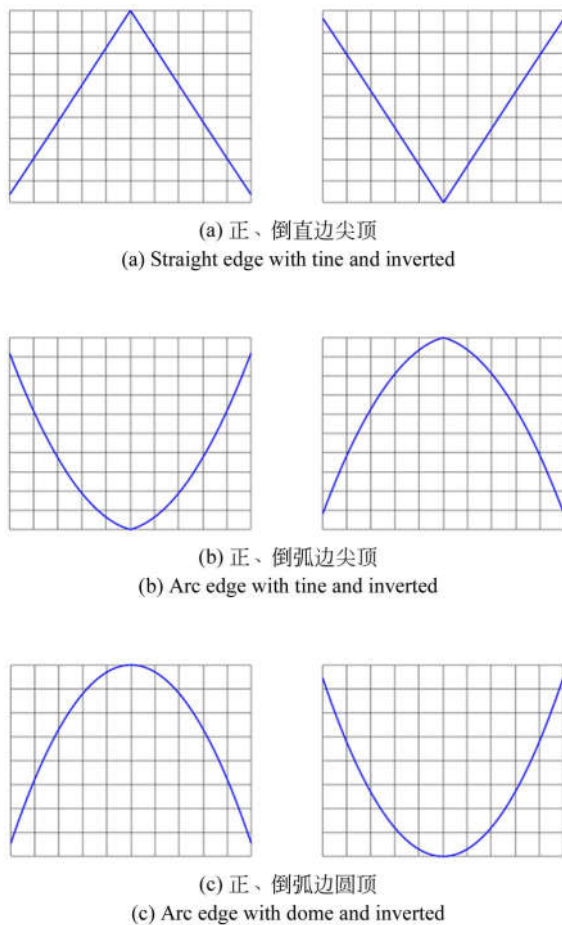


图 3 砂轮主轴角度调整可加工的工件典型面形
Fig. 3 Typical shapes generated with different angles of spindle of grinding wheel

表 1 磨床的性能指标

Tab. 1 Performance of grinder

名称	指标
砂轮主轴转速/(r·min ⁻¹)	3 000
工件主轴转速/(r·min ⁻¹)	300
进给速度/($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	999
最小进给量/ μm	0.1
轴向刚度/(N· μm^{-1})	780
径向刚度(N· μm^{-1})	400
轴向/径向跳动/ μm	0.05
磨削后工件面形精度/ μm	1

2.2 磨削试验

磨削试验是在基于工件旋转法磨削原理的超精密磨床上(VG401 MK II, Okamoto, 日本)进行的,该磨床装置如图 4(a)所示,磨床的性能指标如表 1 所示。磨床的砂轮主轴和工件主轴采用了刚度大的气浮主轴类型,砂轮进给也能够实现 $0.1\ \mu\text{m}$ 的微进给量,另外,轴向/径向跳动都在 $50\ \text{nm}$,这些指标为超细粒度金刚石砂轮磨削试验提供了基本条件。磨床的砂轮主轴可通过螺母 C_1 和 C_2 实现左右摆动的调整、螺母 C_3 实现前后摆动的调整,因此可通过砂轮主轴角度的调整控制工件面形。硅片和硅镜通过真空吸附的方法固持在多孔陶瓷吸盘表面。砂轮为自主研发的含有氧化铈(CeO_2)添加剂的超细粒度金刚石砂轮,如图 4(b)所示。试验样件分别为商用 $\Phi 200\ \text{mm}\times 675\ \mu\text{m}$ 的(100)P型单面抛光硅片(有研新材,中国)和尺寸为 $\Phi 100\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 的双面研磨硅镜,硅片和硅镜样品如图 4(c)所示。硅片和硅镜磨削

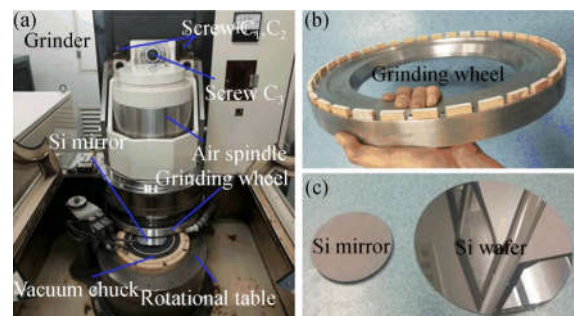


图 4 磨削装置(a)、砂轮(b)和磨削工件(c)
Fig. 4 Photos of grinding setup (a), grinding wheel (b) and workpieces (c)

试验采用的加工参数如表 2 所示。砂轮组份采用 X 射线能谱分析仪 (Energy Density Spectroscopy, EDS) X-MAX(Oxford, 英国) 分析, 砂轮地貌、磨削样件表面形貌采用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) SUPARR 55(Zeiss, 德国) 观察, 表面粗糙度采用原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) XE 200 (Park systems, 韩国) 测量, 硅镜面形采用激光干涉仪 Tropel FM200(Corning, 美国) 测量。

表 2 硅片和硅镜的加工参数

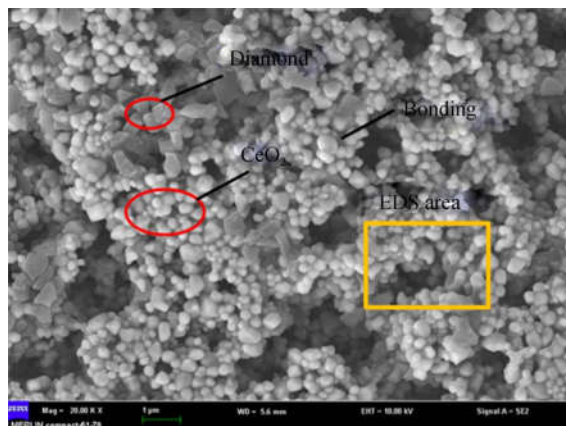
Tab. 2 Grinding parameter of silicon and silicon reflector

加工参数	硅片磨削	硅镜磨削
砂轮转速/(r · min ⁻¹)	2 399	2 399
工件转速/(r · min ⁻¹)	240	240
进给速度/(μm · min ⁻¹)	10	10
去离子冷却水流量/(L · min ⁻¹)	3	3

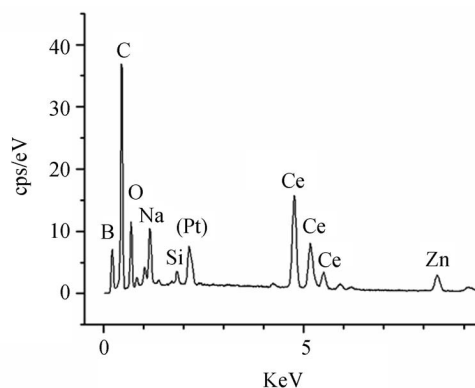
3 结果与讨论

3.1 超细粒度金刚石砂轮磨削性能

图 5(a)和图 5(b)分别是超细粒度金刚石砂轮的地貌和 EDS 分析结果。由图 5(a)可知,超细粒度金刚石砂轮的磨粒粒径小于 1 μm,金刚石磨粒周围被较多 CeO₂ 添加剂包裹, CeO₂ 的粒径在 0.5 μm 左右,它在磨削时能够起到润滑作用,提高磨削性能并且部分 CeO₂ 在磨削时还能够与硅表面发生固相化学反应,使得单晶硅表面生成硬度较低的薄膜而更容易被去除,弱化了金刚石磨粒的机械作用,提高了工件的表面质量^[23];砂轮表面具有较多的气孔,气孔的形状和大小均不规则,气孔不仅分布于砂轮表面而且在大气孔的内壁上也有较多的小气孔,在磨削过程中砂轮组织结构中的气孔会充满冷却液,并将它携带至磨粒和工件表面接触部位,有效地降低了磨削热和磨削力,同时提高超细粒度金刚石砂轮的气孔率,还能增大亚微米粒径磨粒的出刃率,提高磨削效率,避免了超细粒度金刚石砂轮因为材料去除能力弱而引起的堵塞、烧伤等现象^[24]。由图 5(b)可知,超细粒度金刚石砂轮的成份里检测到了 C 元素(金刚石)和 Ce 元素(CeO₂),除此之外,还检测到了 B, Si, Zn 和 Na 等元素,这些元素主要来自于砂轮陶瓷结合剂中的各个组份。



(a) SEM 检测结果
(a) Result of SEM



(b) EDS 检测结果
(b) Result of EDS

图 5 超细粒度金刚石砂轮表面的 SEM 和 EDS 检测结果
Fig. 5 SEM and EDS results of ultra-fine diamond grinding wheel

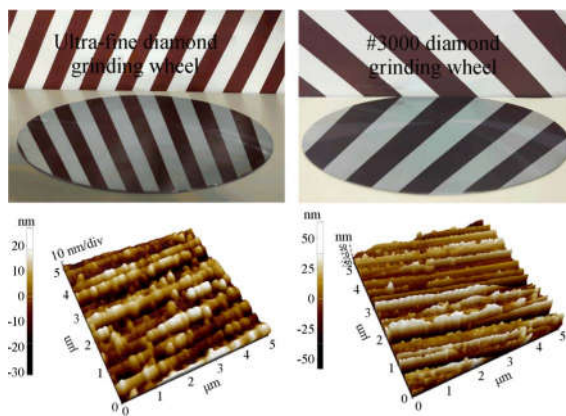


图 6 超细粒度金刚石砂轮磨削硅片和 #3000 硅片磨削表面的 AFM 测试结果

Fig. 6 AFM results of silicon surface machined by ultra-fine diamond grinding wheel and #3000 diamond grinding wheel

为了抵消弹性变形对硅镜磨削后面形的影响,通过调整磨床砂轮主轴的角度,使得磨床能够加工出抵消硅镜弹性变形的面形,以获得较好的硅镜磨削面形^[22,26]。由式(4)计算和分析可得,砂轮主轴角度 α 和 β 理论调整的大小分别为 0.0011° 和 -0.059° , ϵ 约为 0.0017 。将磨床砂轮主轴的角度按其大小调整后采用超细粒度金刚石砂轮对硅镜进行磨削,磨削后的面形结果如图 10 所示,磨削后的硅镜面形 PV 值从 $8.1 \mu\text{m}$ 降低到了 $1.5 \mu\text{m}$ 。磨削后的硅镜表面 AFM 形貌如图 11 所示,测量的 R_a 值约为 7.8 nm 。上述结果表明,利用工件旋转法磨削原理的特殊性,结合超细粒度金刚石砂轮磨削硅镜,能够获得表面粗糙度 R_a 小

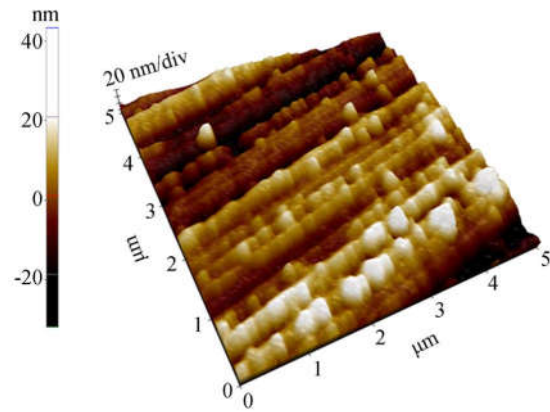


图 11 硅镜磨削后表面三维形貌

Fig. 11 Surface 3D topography of silicon reflector after grinding

于 10 nm 的表面质量和面形 PV 小于 $2 \mu\text{m}$ 的面形精度,该方法的加工效率明显优于研磨,并且能够实现对硅镜加工面形的控制。

4 结 论

本文基于工件旋转法磨削原理,将单晶硅的超细粒度金刚石砂轮低损伤磨削工艺与工件的面形控制磨削工艺相结合,实现了硅镜低损伤表面和高精度面形的超精密磨削加工。首先通过检测磨削后的单晶硅表面和亚表面质量,研究了超细粒度金刚石砂轮的磨削性能,然后理论分析了硅镜的面形控制方法,最后进行了硅镜磨削试验。试验结果表明,超细粒度金刚石砂轮的微观组织结构中,金刚石磨料粒径小于 $1 \mu\text{m}$,砂轮表面具有较多气孔,利用该砂轮对单晶硅进行磨削,结果表明磨削后单晶硅的表面粗糙度 $R_a < 10 \text{ nm}$ (AFM,测量范围为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$),亚表面损伤深度 $< 100 \text{ nm}$ (TEM,测量倍数为 $25\,000\times$);通过反求算法确定了用于抵消硅镜真空吸附时引起的弹性变形量所需的砂轮主轴角度, α 和 β 的理论值分别为 0.0011° 和 -0.059° 。按照该值对砂轮主轴角度调整后,采用超细粒度金刚石砂轮对硅镜进行超精密磨削加工。加工结果表明:磨削前硅镜的面形 PV 值为 $8.1 \mu\text{m}$,磨削后减小到 $1.5 \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 为 7.8 nm 。使用超细粒度金刚石砂轮在基于工件旋转法磨削原理的磨床上对硅镜进行超精密磨削,能够实现硅镜的低损伤表面和高精度面形加工。本文中硅镜磨

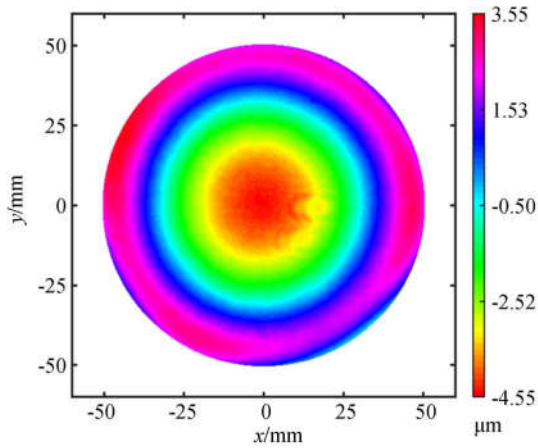


图 9 硅镜磨削前的面形 PV

Fig. 9 PV value of silicon reflector surface before grinding

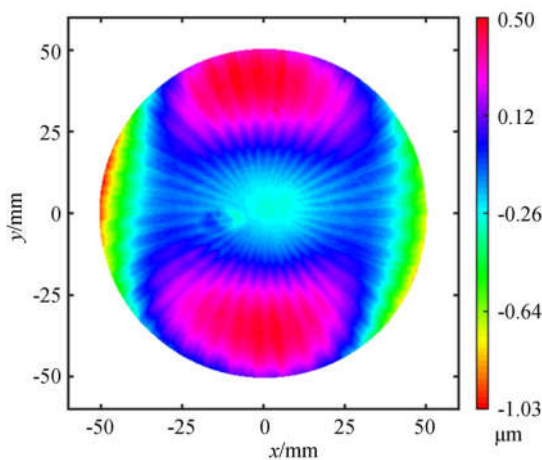


图 10 硅镜磨削后的面形 PV

Fig. 10 Surface PV value of silicon reflector after grinding

削使用的超精密磨床精度有限,如果采用精度更高并且能够实现砂轮主轴角度自动调整的磨

床,该方法能够进一步提高硅镜磨削的面形精度。

参考文献:

- [1] 田野,戴一帆,石峰,等. 单晶硅反射镜激光能量吸收系数与衬底表面质量的关联[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(6): 26-29.
TIAN Y, DAI Y F, SHI F, *et al.*. Correlation between substrate surface quality and laser energy absorption rate for mono-crystalline silicon reflector [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(6): 26-29. (in Chinese)
- [2] 王樊. 大尺寸单晶硅反射镜超精密连续抛光和检测的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
WANG F. *Research on Ultra-Precision Continuous Polishing and Detection of the Large-size Single-Crystal Silicon Optical Reflector*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] 王孝坤,薛栋林,张学军. 大口径非球面系统的共基准加工与检验[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 743-748.
WANG X K, XUE D L, ZHANG X J. Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 743-748. (in Chinese)
- [4] 宣斌,谢京江,宋淑梅. 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 41-50.
XUAN B, XIE J J, SONG S H M. Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 41-50. (in Chinese)
- [5] 张峰. 纳米级面形精度光学平面镜加工[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 616-621.
ZHANG F. Fabrication of optical flat mirror with nanometer surface error[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(04): 616-621. (in Chinese)
- [6] 朱永伟,李信路,王占奎,等. 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 367-374.
ZHU Y W, LI X L, WANG Z H K, *et al.*. Subsurface damage prediction for optical hard-brittle material in fixed abrasive lapping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 367-374. (in Chinese)
- [7] COOKE F, BROWN N, PROCHONOW E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(5): 407-415.
- [8] YIN S, OHMORI H, DAI Y, *et al.*. ELID grinding characteristics of glass-ceramic materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(3-4): 333-338.
- [9] KERN D. *Face Grinding of Optical Glass with Diamond Cup Wheels*[D]. Technical University Brunswick, 1969.
- [10] BRINKSMIEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, *et al.*. Ultra-precision grinding[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(2): 652-671.
- [11] MECHOLSKY J J J, FREIMAN S W, RICE R W. Effect of grinding on flaw geometry and fracture of glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 60(3-4): 114-117.
- [12] HED P P, EDWARDS D F. Relationship between surface roughness and subsurface damage[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4677-4680.
- [13] BIFANO, THOMAS G, THOMAS A D, *et al.*. Ductile-regime grinding of brittle materials: experimental results and the development of a model. Advances in fabrication and metrology for optics and large optics[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1989, 966: 108-105.
- [14] ZARUDI, I, ZHANG L. Subsurface damage in single-crystal silicon due to grinding and polishing [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1996, 15(7): 586-587.
- [15] MATSUI S. An experimental study on the grinding of silicon wafer-the wafer rotation grinding method[J]. *Bull. Japan Soc. Prec. Eng.*, 1988, 22(4): 295-300.
- [16] SUN W P, Z J P, G R F. Fine grinding of silicon wafers; effects of chuck shape on grinding marks [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(6): 673-686.
- [17] CHIDDAMBARAM S, PEI Z J, *et al.*. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chuck shape[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(7): 739-746.
- [18] PEI Z J, BILLINGSLEY S R, MIURA S. Grind-

- ing induced subsurface cracks in silicon wafers[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(7): 1103-1116.
- [19] ZHANG Y X, KANG R K, GUO D M, *et al.*. Microstructure studies of the grinding damage in monocrystalline silicon wafers[J]. *Rare Metals*, 2007, 26(1): 13-18.
- [20] HUO F, ZHAO H, ZHAO D. Nanogrinding of silicon wafer using a novel vitrified diamond wheel [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, 26(8): 977-981.
- [21] ZHANG Z, HUO F, WU Y, *et al.*. Grinding of silicon wafers using an ultrafine diamond wheel of a hybrid bond material[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 51(1): 18-24.
- [22] WANG Z, YAN Y, ZHOU P, *et al.* A high-efficient precision grinding for fabricating moderately thick plane mirror (MTPM)[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5-8): 2559-2566.
- [23] ZHANG Z, HUANG S, WANG S, *et al.* A novel approach of high-performance grinding using developed diamond wheels [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9): 1-12.
- [24] CAI R, ROWE W B, MORGAN M N. The effect of porosity on the grinding performance of vitrified CBN wheels [J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 238-239:295-300.
- [25] 王紫光,高尚,朱祥龙,等. 硅片低损伤磨削砂轮及其磨削性能[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2689-2696.
- WANG Z G, GAO SH, ZHU X L, *et al.*. Grinding wheel for low-damage grinding of silicon wafers and its grinding performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2689-2696. (in Chinese)
- [26] NGUYEN D, LV B, YUAN J, *et al.*. Experimental study on elastic deformation machining process for aspheric surface glass[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(1-4): 525-531.

作者简介:



王紫光(1984—),男,辽宁大连人,博士研究生,2009年于辽宁石油化工大学获得学士学位,2012年于大连交通大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料的精密与超精密加工。E-mail: wzg1107@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:



周平(1980—),男,浙江余姚人,博士,副教授,2003,2009年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,主要从事精密与超精密加工工艺机理、高性能零件制造技术和机械密封结构设计制造技术的研究。E-mail: pzhou@dlut.edu.cn

导师简介:



康仁科(1962—),男,陕西西安人,博士,教授,1984年、1987年、1999年于西北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为超精密加工与特种加工技术、难加工材料高效精密加工技术、半导体制造技术与设备。E-mail: kangrk@dlut.edu.cn