

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.07.015

单晶硅微尺度侧磨表面质量影响因素试验研究

周云光¹, 巩亚东², 高 奇², 朱宗孝²

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了获得具有较好表面质量的典型硬脆材料单晶硅微结构, 采用微尺度磨削技术, 利用直径为 0.9 mm 的微磨棒沿单晶硅(100)晶面进行磨削。首先通过三因素五水平的正交试验分析出影响单晶硅微尺度磨削表面粗糙度的主次因素; 其次优化出获得较小表面粗糙度的单晶硅微尺度磨削工艺; 最后通过单因素试验研究单晶硅微磨削表面粗糙度(R_a)随工艺参数的变化规律。结果表明: 在沿单晶硅(100)晶面的微磨削过程($20\ 000\ \text{r/min} \leq v_s \leq 60\ 000\ \text{r/min}$, $20\ \mu\text{m/s} \leq v_w \leq 170\ \mu\text{m/s}$ 和 $3\ \mu\text{m} \leq a_p \leq 15\ \mu\text{m}$)中, 主轴转速对 R_a 影响最大; 当主轴转速(v_s)为 50 000 r/min、进给速度(v_w)为 20 $\mu\text{m/s}$ 、磨削深度(a_p)为 3 μm 时, R_a 最小; R_a 随 v_s 的增大基本呈减小趋势, 但 v_s 过大时机床主轴出现振动, R_a 出现增大趋势。 R_a 随 v_w 和 a_p 的增大而增大。

关键词: 微加工; 微尺度磨削; 单晶硅; 磨削表面质量; 表面粗糙度

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)07-0983-06

Experimental Study on Influencing Factor of Surface Quality in Micro Side Grinding of Single Crystal Silicon

ZHOU Yun-guang¹, GONG Ya-dong², GAO Qi², ZHU Zong-xiao²

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHOU Yun-guang, E-mail: zhouyunguang123@126.com)

Abstract: To obtain the microstructure of single crystal silicon with a good surface quality, the single crystal silicon was grinded along the (100) crystal plane with microscale grinding technology by using microgrinding tool with diameter of 0.9 mm. Firstly, the main influence factors on microgrinding surface roughness of single crystal silicon were analyzed by the orthogonal experiment with three factors and five levels. Then, the microgrinding process was optimized to obtain minimum surface roughness. Lastly, the effect of process parameters on the surface roughness (R_a) of microgrinding single crystal silicon was analyzed through single-factor experiment. The results show that: in the microgrinding process ($20\ 000\ \text{r/min} \leq v_s \leq 60\ 000\ \text{r/min}$, $20\ \mu\text{m/s} \leq v_w \leq 170\ \mu\text{m/s}$ and $3\ \mu\text{m} \leq a_p \leq 15\ \mu\text{m}$) along (100) crystal plane of single crystal silicon, the influence of spindle speed on R_a was maximum; when the spindle speed (v_s) was 50 000 r/min, feeding rate (v_w) was 20 $\mu\text{m/s}$, grinding depth (a_p) was 3 μm , R_a was minimum; R_a reduces basically with the increase of v_s , but if v_s was too large, the spindle appeared vibration, R_a showed the tendency of increase. R_a raises with the increase of v_w and a_p .

Key words: micro machining; micro grinding; single crystal silicon; grinding surface quality; surface roughness

单晶硅作为微电子及微机电系统的基底材料,被广泛应用于航空航天设备及其他电子设备中。对我国来说,实现单晶硅微型零件及微结构的

高精度加工具有较大的战略意义。而微磨削作为微加工的最后一道工序,其表面质量的好坏直接影响着微型零件的使用寿命。微磨削主要是指使

收稿日期: 2016-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375082)。

作者简介: 周云光(1986-),男,河北秦皇岛人,东北大学博士研究生; 巩亚东(1958-),男,辽宁本溪人,东北大学教授,博士生导师。

用直径小于 1 mm 的微型磨棒对零件表面进行磨削加工. 国内外很多学者对微尺度磨削和单晶硅的机械加工进行了研究, 如: 巩亚东等^[1]从理论上介绍了微磨削表面形成机理, 并探讨了磨削深度、主轴转速和工件进给速度对塑性金属材料微磨削表面质量的影响. Ma 等^[2]研究了可加工陶瓷材料点磨削过程中的磨削表面质量. 程军等^[3]分析了微磨削工艺参数对单晶硅槽磨加工表面粗糙度的影响规律; 李萍^[4]揭示了微加工工艺条件对微磨削表面粗糙度的作用机理. Aurich 等^[5-6]分析了磨粒尺寸、磨粒浓度和工艺参数对微磨削单晶硅材料去除机理、磨削力、表面质量和表面精度的影响, 获得了较低表面粗糙度的磨削表面. Cheng 等^[7]揭示了单晶硅微磨削过程的脆塑转变过程. Zhou 等^[8]采用化学机械抛光法加工单晶硅, 获得了较高的形状精度和表面质量. Huo 等^[9]对单晶硅片磨削表面磨纹的产生机理进行了研究, 提出了抑制磨纹产生的工艺策略. Abdur-Rasheed 等^[10]采用田口方法对砂轮进给速度、硅片转速、砂轮转速和砂轮粒度对磨削单晶硅表面粗糙度的影响进行了试验研究. Shibata 等^[11]发现沿不同晶向车削单晶硅时亚表面损伤深度不同. Zhang 等^[12-13]通过透射电镜分析了单晶硅滑擦区域亚表面的变化, 发现在切屑形成前亚表面就出现了非晶层.

国内外学者对单晶硅的加工进行了大量的研究. 但就目前检索到的文献看, 关于单晶硅微尺度侧磨的研究还比较少. 因此, 本文对单晶硅的微尺度侧磨进行了研究; 优化出了微磨削单晶硅(100)晶面的优秀工艺; 分析了工艺参数对磨削表面质量的影响.

1 单晶硅微尺度磨削的材料断裂机理

多晶材料的断裂方式有晶内断裂和晶间断裂. 随着磨削过程的进行, 晶界吸收位错将导致晶界迁移、滑移和断裂, 从而形成剪切滑移带和磨屑. 而单晶材料整体由一个晶粒组成, 材料内部不存在晶界. 单晶硅在磨削过程中受到磨削力的作用而在晶格内部产生位错, 大量位错的累积、扩展和交叉而形成磨屑.

单晶硅的晶格如图 1 所示, 为面心立方晶胞结构, 其晶格常数 $a = 0.357 \text{ nm}$. 单晶硅常用的 3 个晶面为(100), (110)和(111)晶面, 见图 2. 晶格滑移断裂遇到多种阻力, 其中最基本的固有阻

力是晶格阻力, 其大小直接由晶面间距和原子间距决定, 而晶体中晶间指数不同的晶面, 其晶面间距也各不相同. 对于以密勒指数(hkl)表示的晶面来说, 其面间距 d_{hkl} 的计算公式如式(1)^[14]所示. 当 h, k, l 均为奇数时, 当且仅当 $h = k = l = 1$ 时, d_{hkl} 最大为 $a/\sqrt{3}$; 若 h, k, l 有奇有偶时, 当 h, k, l 中有且只有一个 1, 其余为 0 时, d_{hkl} 最大为 $a/2$, 则(111)相对于(110)和(100)是面间距最大的, 因此成为解理面.

$$d_{hkl} = \begin{cases} \frac{a}{\sqrt{(h)^2 + (k)^2 + (l)^2}} & (\text{当 } h, k, l \text{ 全为奇数}), \\ \frac{a}{2\sqrt{(h)^2 + (k)^2 + (l)^2}} & (\text{当 } h, k, l \text{ 有奇有偶}). \end{cases} \quad (1)$$

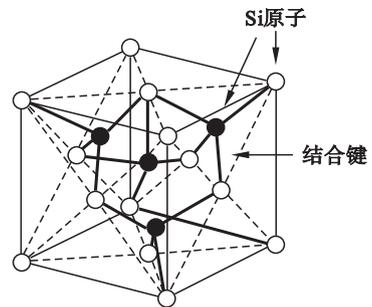


图 1 单晶硅晶胞质点模型

Fig. 1 Crystal cell model of single crystal silicon

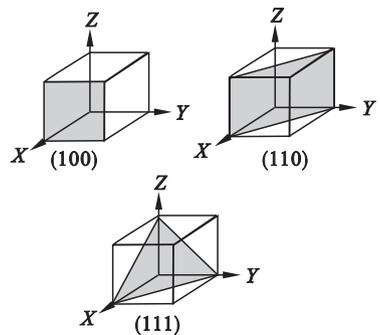


图 2 单晶硅常用晶面

Fig. 2 Common lattice plane of single crystal silicon

2 试验设备与材料

试验机床为 JX-1A 型精密微尺度磨削机床, 其最大转速为 60 000 r/min. 试验刀具: 表层电镀 500# 金刚石磨粒, 磨头直径为 0.9 mm, 刀柄直径为 3 mm 的微型磨棒, 见图 3a. 磨削方式为侧磨, 磨削加工过程如图 3b 所示. 测试仪器: 放大倍数为 500~5 000 倍的日本 VHX 超景深显微镜, 法国 STIL 公司生产的 MICROMEASURE 三维轮

廓仪. 试验材料: 晶向为(100)的单面抛光 P 型单晶硅片.

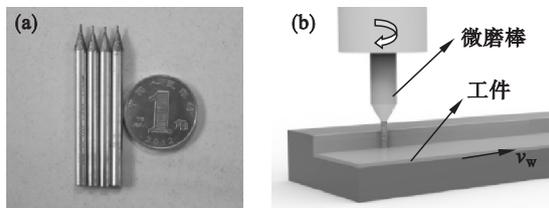


图 3 试验条件

Fig. 3 Experimental conditions

(a) — 微磨棒; (b) — 微侧磨加工示意图.

3 试验方案

本文采用三因素五水平正交表设计的正交试验方案及所测得的表面粗糙度值如表 1 所示, 考察的 3 个因素为主轴转速(v_s)、进给速度(v_w)和磨削深度(a_p).

表 1 单晶硅微磨削正交试验表
Table 1 Orthogonal table of micro grinding silicon

编号	$v_s / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_w / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$a_p / \mu\text{m}$	R_a / nm
1	20 000	20	3	831
2	20 000	70	6	892
3	20 000	120	9	1 090
4	20 000	170	12	1 210
5	20 000	220	15	1 490
6	30 000	20	6	710
7	30 000	70	9	897
8	30 000	120	12	992
9	30 000	170	15	1 010
10	30 000	220	3	918
11	40 000	20	9	782
12	40 000	70	12	943
13	40 000	120	15	1 060
14	40 000	170	3	723
15	40 000	220	6	999
16	50 000	20	12	571
17	50 000	70	15	826
18	50 000	120	3	639
19	50 000	170	6	691
20	50 000	220	9	806
21	60 000	20	15	778
22	60 000	70	3	586
23	60 000	120	6	694
24	60 000	170	9	902
25	60 000	220	12	1 180

4 试验结果与分析

4.1 正交试验结果极差分析

对表 1 中单晶硅微磨削正交试验的 R_a 值进行极差分析, 极差分析数据见表 2. A_i 为表 1 中该列的对应因素取第 i 水平时所对应的 R_a 平均值; K 为每一列不同 A_i 值间的最大差的绝对值, 如式 (2) 所示. 它的大小表示该因素对表面粗糙度的影响大小.

$$K = \max | (A_i - A_j) |, i, j = 1, 2, 3, 4, 5, i \neq j.$$

(2)

表 2 单晶硅微侧磨正交试验 R_a 值极差分析
Table 2 Range analysis on R_a of micro side grinding single crystal silicon in orthogonal experiment

因素	v_s	v_w	a_p
A_1	1 102.6	734.4	739.4
A_2	905.4	828.8	797.2
A_3	901.4	895.0	895.4
A_4	706.6	907.2	979.2
A_5	828.0	1 078.6	1 032.8
K	396.0	344.2	293.4

由表 2 可知, 在单晶硅的微尺度磨削试验中, v_s 对 R_a 的影响最大, v_w 次之; 当 $v_s = 50\ 000\ \text{r/min}$, $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$ 和 $a_p = 3\ \mu\text{m}$ 时, R_a 最小. 对此优化的试验方案进行试验验证, 图 4 为优化方案磨削表面形貌及对应的截面图. 通过比较可知, 该方案下的 R_a 最小, 为 468 nm.

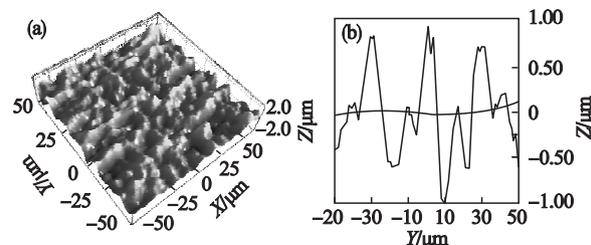


图 4 优化方案下的磨削表面及对应的截面图

Fig. 4 Grinding surface and corresponding section under the optimized experiment

(a) — 磨削表面; (b) — 对应的截面图.

4.2 主轴转速对微磨削单晶硅表面质量的影响

由图 5 知, 随着主轴转速的增大, 微尺度顺磨和逆磨单晶硅表面粗糙度值基本呈减小趋势, 且逆磨表面粗糙度值高于顺磨表面. 但主轴转速过大时, 单晶硅表面粗糙度出现小幅增加趋势. 图 6 为单晶硅在不同主轴转速下的磨削表面三维形貌, 可知, 图 6b 的三维形貌比图 6a 和图 6c 光滑;

在其他磨削条件固定的情况下, $v_s = 50\ 000\ \text{r/min}$ 时的磨削表面粗糙度值低于 $v_s = 20\ 000\ \text{r/min}$ 和 $v_s = 60\ 000\ \text{r/min}$ 时的磨削表面粗糙度值。

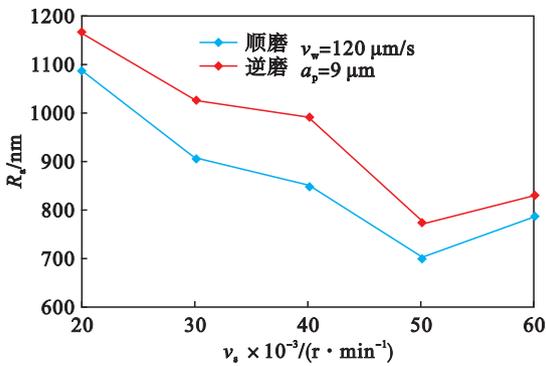


图 5 主轴转速对单晶硅表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of spindle speed on the grinding surface roughness

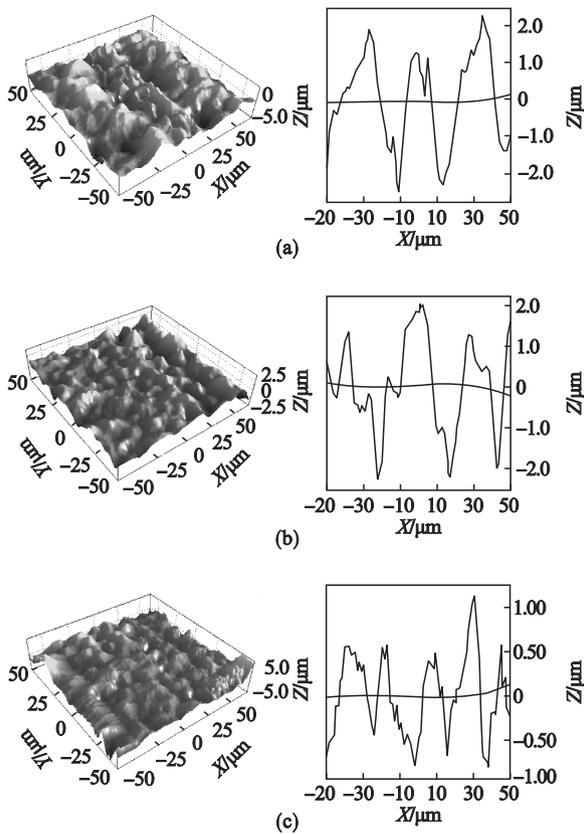


图 6 不同主轴转速磨削表面的三维形貌

Fig. 6 Three-dimensional topography of microgrinding surface with different spindle speed

(a) — $v_s = 2 \times 10^4\ \text{r/min}$;

(b) — $v_s = 5 \times 10^4\ \text{r/min}$; (c) — $v_s = 6 \times 10^4\ \text{r/min}$.

分析其原因: 主轴转速增大, 砂轮表面磨粒的线速度增大, 微磨棒上单位时间内参与磨削的磨粒数增加, 单颗磨粒的实际切削厚度减小. 这使得微磨棒所受的法向磨削力和切向磨削力均减小, 砂轮磨损程度降低, 磨削热的产生及功率的消耗

减小, 材料主要以塑性去除的方式成屑, 见图 7b. 当主轴转速低时, 单晶硅主要以脆性方式断裂, 磨削表面质量较差, 表面脆性断裂凹坑较多, 见图 7a. 而当主轴转速增大时, 微磨削表面微破碎及凹坑的占比显著减小, 见图 7b. 图 7b 中磨削纹理变得更加清晰, 磨削表面粗糙度值变小. 转速过高时磨削表面出现部分振痕, 见图 7c. 因此, 对于单晶硅的微尺度磨削, 可以适当提高主轴转速, 但主轴转速不宜过高, 否则机床主轴可能会出现振动, 影响表面质量。

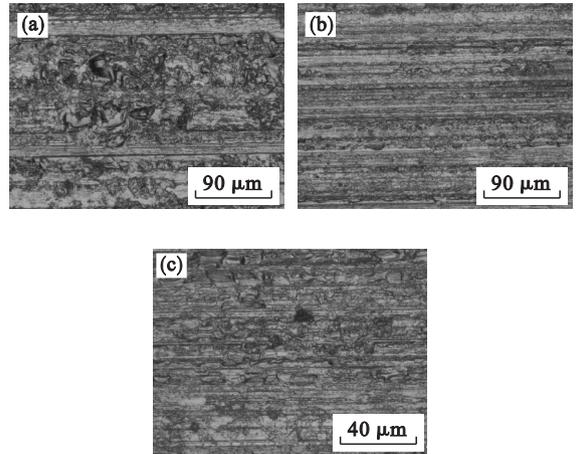


图 7 不同主轴转速的磨削表面

Fig. 7 Microgrinding surface with different spindle speed

(a) — $v_s = 2 \times 10^4\ \text{r/min}$;

(b) — $v_s = 5 \times 10^4\ \text{r/min}$; (c) — $v_s = 6 \times 10^4\ \text{r/min}$.

4.3 进给速度对微磨削单晶硅表面质量的影响

由图 8 知, 在单晶硅磨削过程中, 逆磨时的粗糙度值高于顺磨时的粗糙度值. 这主要是因为: 逆磨过程中单颗磨粒进入磨削区域后的切削厚度由小到大, 磨粒滑擦和耕犁作用明显大于顺磨. 随着逆磨时滑擦的进行, 逆磨时磨粒对材料的挤压作用增强, 材料形变量加大, 使材料更容易发生脆性断裂, 导致逆磨时的粗糙度值较大。

由图 8 和图 9 知, v_w 增大时, R_a 增大, 且增大趋势明显. 图 9b 的三维形貌颜色深于图 9a, 表明图 9b 的三维形貌高度差大于图 9a, R_a 值也大于图 9a. 分析其原因: 随着 v_w 的增大, 微磨棒上磨粒参与磨削的频率降低, 单颗磨粒的实际切削厚度增大, 磨削表面微破碎及凹坑数量增多; 单晶硅主要是以脆性断裂去除为主, 脆性断裂留下的凹坑深度明显深于磨粒产生的划痕深度, 磨削纹理变得模糊, 见图 10b. 当进给速度较低时, 材料以塑性方式被去除, 磨削表面主要是由塑性去除的微沟槽组成, 见图 10a, 磨削表面粗糙度值较小。

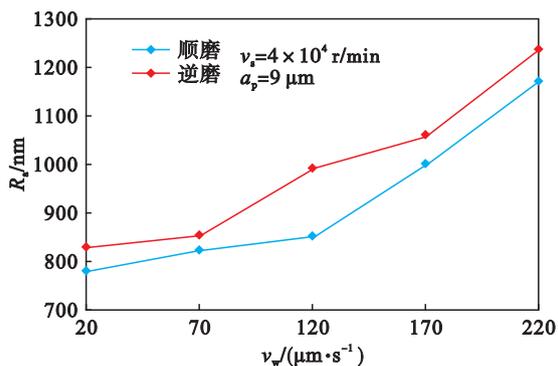


图 8 进给速度对单晶硅表面粗糙度的影响

Fig. 8 Effect of feeding rate on the grinding surface roughness

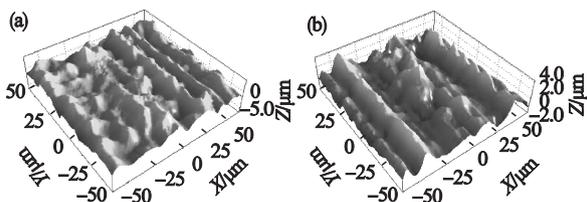


图 9 不同进给速度磨削表面的三维形貌

Fig. 9 Three-dimensional topography of microgrinding surface with different feeding rate

(a)— $v_w = 70 \mu\text{m}/\text{s}$; (b)— $v_w = 170 \mu\text{m}/\text{s}$.

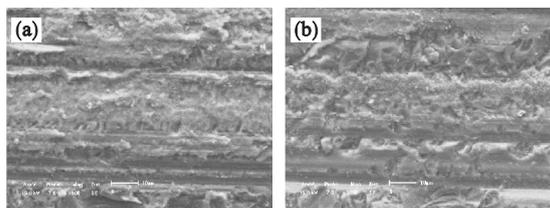


图 10 不同进给速度的磨削表面

Fig. 10 Microgrinding surface with different feeding rate

(a)— $v_w = 70 \mu\text{m}/\text{s}$; (b)— $v_w = 170 \mu\text{m}/\text{s}$.

4.4 磨削深度对微磨削单晶硅表面质量的影响

由图 11 知,随着磨削深度的减小,单晶硅逆磨及顺磨的表面粗糙度值减小.随着 a_p 的减小,单颗磨粒的实际切削厚度减小,切屑的横截面积变小.切屑变薄,单颗磨粒的切削载荷降低,同时微磨削材料去除率降低,磨粒及磨粒结合剂与工件之间的滑擦作用减小.这使得微磨削表面的微观不平度降低,即降低了微磨削表面粗糙度,见图 12a 和图 13a,磨削表面纹理清晰.增大磨削深度时,单颗磨粒的最大未变形切削厚度增大,磨粒及结合剂同工件之间的滑擦作用增强,并且磨削区弧长增大.这些导致磨削热不易扩散,磨削力增大,砂轮的磨损加重.同时由于单晶硅为典型的硬脆材料,磨削深度增大时,微磨削过程中的材料主要是以脆性断裂的形式被去除,磨削表面出现脆

性断裂坑、磨削表面质量变差、磨削表面粗糙度值增大,见图 12b 和图 13b.在微磨削中,为了提高加工表面精度应适当选取较小的磨削深度.

在不同工艺参数的磨削加工表面中,每个表面基本都会看到极个别的脆性断裂凹坑,这和表面缺陷特性与磨削工艺参数之间的影响规律有些不符,此种现象的发生主要是由微型磨棒在制作过程中砂轮表面存在个别尺寸较大的磨粒造成的,并不影响对单晶硅微磨削过程的分析.

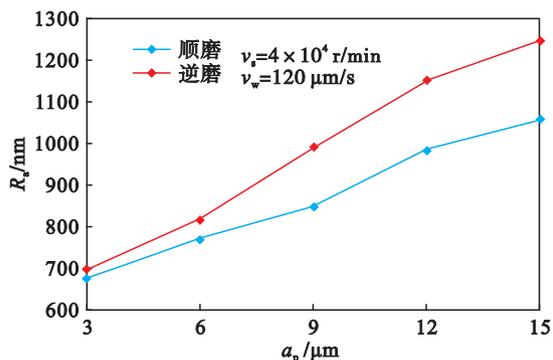


图 11 磨削深度对单晶硅表面粗糙度的影响

Fig. 11 Effect of grinding depth on the grinding surface roughness

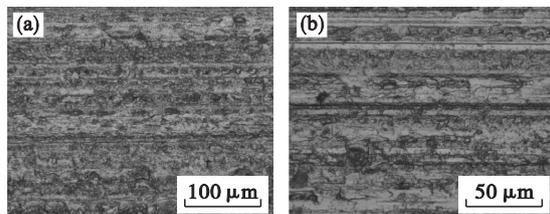


图 12 不同磨削深度的磨削表面

Fig. 12 Microgrinding surface with different grinding depth

(a)— $a_p = 6 \mu\text{m}$; (b)— $a_p = 12 \mu\text{m}$.

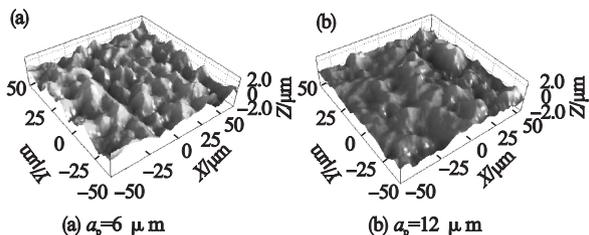


图 13 不同磨削深度磨削表面的三维形貌

Fig. 13 Three-dimensional topography of microgrinding surface with different grinding depth

(a)— $a_p = 6 \mu\text{m}$; (b)— $a_p = 12 \mu\text{m}$.

5 结 论

- 1) 单晶硅微尺度磨削(100)晶面过程中,单晶硅的晶格内部的主要解理面为{111}晶面族.
- 2) 通过单晶硅微尺度磨削正交试验的极差

分析,在微尺度磨削的主要影响因素中, v_s 对单晶硅微磨削表面 R_a 值影响最大.优化出了获得微磨削单晶硅(100)晶面最小 R_a 值的工艺组合,即 $v_s = 50\ 000\ \text{r/min}$, $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$ 和 $a_p = 3\ \mu\text{m}$ 时,单晶硅微磨削表面粗糙度最小,即 $R_a = 468\ \text{nm}$.

3) 通过单晶硅微磨削单因素试验,可以得出:随着进给速度和磨削深度的增大,单晶硅微磨削表面粗糙度值增大;随着主轴转速的提高,单晶硅微磨削表面粗糙度基本呈减小趋势.因此,在单晶硅微零件的实际加工中,适当选取小的 a_p 及 v_w ,适度提高 v_s .

参考文献:

- [1] 巩亚东,吴艾奎,程军,等.塑性材料微磨削表面质量影响因素试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(2):263-268.
(Gong Ya-dong, Wu Ai-kui, Cheng Jun, et al. Experimental study on influencing factors of surface quality in micro-grinding plastic materials [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2015, 36(2):263-268.)
- [2] Ma L J, Gong Y D, Chen X H. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 77(2):82-92.
- [3] 程军,王超,温雪龙,等.单晶硅微尺度磨削材料去除过程试验研究[J].机械工程学报,2014,50(17):194-200.
(Cheng Jun, Wang Chao, Wen Xue-long, et al. Experimental investigation on material removal process for micro-grinding of single crystal silicon [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(17):194-200.)
- [4] 李萍.微磨削结构阵列表面特征化评价及其功能特性研究[D].广州:华南理工大学,2015.
(Li Ping. Study of characterized microstructure array of ground surface and its functional properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.)
- [5] Aurich J C, Carrella M, Walk M. Micro grinding with ultra small micro pencil grinding tools using an integrated machine tool[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2015, 64(1):325-328.
- [6] Aurich J C, Engmann J, Schueler G M, et al. Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2009, 58(1):311-314.
- [7] Cheng J, Gong Y D. Experimental study of surface generation and force modeling in micro-grinding of single crystal silicon considering crystallographic effects[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 77(2):1-15.
- [8] Zhou L B, Hosseini B S, Tsuruga T, et al. Fabrication and evaluation for extremely thin Si wafer [J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2007, 1(1):94-105.
- [9] Huo F W, Kang R K, Li Z, et al. Origin, modeling and suppression of grinding marks in ultra precision grinding of silicon wafers [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 66:54-65.
- [10] Abdur-Rasheed A, Konneh M. Optimization of precision grinding parameters of silicon for surface roughness based on taguchi method[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 264(1):997-1002.
- [11] Shibata T, Fujii S, Makino E, et al. Ductile-regime turing mechanism of single-crystal silicon [J]. *Precision Engineering*, 1996, 18(2):129-137.
- [12] Zhang Z Y, Wang B, Kang R K, et al. Changes in surface layer of silicon wafers from diamond scratching [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2015, 64(1):349-352.
- [13] Zhang Z Y, Guo D M, Wang B, et al. A novel approach of high speed scratching on silicon wafers at nanoscale depths of cut[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:16395.
- [14] Fan Q C. Calculation of interplanar spacing and structure-factor of diamond-type structure [J]. *Material Sciences*, 2012, 2(3):106-109.