

## 二维超声振动辅助化学机械磨削技术及单晶硅实验

王振忠<sup>1</sup>, 郭隐彪<sup>1</sup>, 吴勇波<sup>2</sup>

(1. 厦门大学机电工程系, 厦门 361005; 2. 日本秋田县立大学系统科学技术学部, 秋田 0150055)

**摘要:** 为了提高材料去除率和加工通用性, 本文提出了工具施加二维超声波振动辅助的化学机械磨削(CMG)复合加工方式, 开发具有伸缩和弯曲两种模态的二维超声波振动子及实验装置. 以单晶硅片为加工对象, 进行单点切削加工轨迹特性分析, 并比较不同加工模式以及加工参数对表面粗糙度和材料去除率的影响. 实验结果表明, 二维超声辅助下的单点切削轨迹存在更多延性加工趋势. 在同样普通机床精度条件下, 随着时间的增加, 二维超声辅助CMG表面粗糙度明显改善, 达到纳米级. 较无超声情况下二维超声辅助CMG复合加工材料去除率提高约1倍, 可获得最优表面粗糙度5 nm, 一维径向超声辅助加工结果次之.

**关键词:** 二维超声振动; 化学机械磨削; 材料去除率; 表面精度

中图分类号: TG663 文献标志码: A 文章编号: 1672-6030(2011)06-0533-06

## Two Dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Chemical Mechanical Grinding and Experiment on Si Wafer

WANG Zhen-zhong<sup>1</sup>, GUO Yin-biao<sup>1</sup>, WU Yong-bo<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University, Akita 0150055, Japan)

**Abstract:** To improve material removal rate and machining popularity, two dimensional ultrasonic vibration assisted chemical mechanical grinding (CMG) was introduced in this paper as the combined grinding method. And two dimensional vibrators with longitudinal and bending modes and integrated experimental installation were developed. Si wafer was taken as machining material, and the experiments were carried out to examine the characteristic of machining locus using single point cutting, and the influence of different machining modes and parameters on surface roughness and material removal rate. The results show that two dimensional ultrasonic assisted single point cutting locus makes more ductile removal. When using the general-purpose machine, two dimensional ultrasonic assisted CMG can obtain better surface roughness at nanometer level as the machining time increases. Compared with conventional CMG without ultrasonic vibration the material removal rate improves by 100% and the best surface roughness is 5 nm. Two dimensional ultrasonic assisted CMG yields the best surface roughness and the largest material removal rate, and one dimensional radial ultrasonic assisted CMG is relatively backward.

**Keywords:** two dimensional ultrasonic vibration; chemical mechanical grinding; material removal rate; surface accuracy

近年来, 随着光电子、信息和半导体等产业技术不断革新, 光学玻璃、蓝宝石衬底、硅及碳化硅晶片以及

收稿日期: 2010-11-30.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA042501); 国家自然科学基金资助项目(50905150).

作者简介: 王振忠(1981—)男, 博士, 副教授.

通讯作者: 王振忠, wangzhenzhong@xmu.edu.cn.

石英晶片等硬脆性材料的超精密加工需求持续扩大, 工件表面质量要求也相应提高, 主要特征为: 表面粗糙度  $R_a$  趋于纳米级别、尽可能少的表层和亚表层损伤、表面残余应力极小、晶体表面具有完整的晶体结构. 现阶段最主要的材料全局平坦化技术是化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP), 其基于游离磨粒的加工特点, 去除量极其微小, 可以获得很好的表面粗糙度, 但因此 CMP 加工效率相对低下. 与固着磨粒加工方式相比, CMP 影响因素众多, 工艺可控性较差, 对于工件的面形几何精度相对较难保证. 此外, 传统工艺过程中大量使用的抛光液以及清洗液还存在污染环境<sup>[1]</sup>. 基于 CMP 技术本身特点及所存在的问题, 其关键发展趋势主要在抛光液方面, 已有学者开发了无磨粒 CMP<sup>[2-3]</sup>、固定磨粒 CMP<sup>[4-5]</sup> 以及化学机械磨削 (chemical mechanical grinding, CMG)<sup>[6-8]</sup> 等, 均有效改善 CMP 加工效应. 其中 Zhou 等<sup>[6]</sup> 提出了 CMG 方法, 兼有 CMP 和固着磨粒加工的特点, 是获得高面形精度及表面质量的新方法, 在专门开发的超高精度机床 UPG-300H 基础上, 已经成功应用于单晶硅晶片的加工. 为进一步提高 CMG 加工精度及加工效率, 并降低 CMG 加工对设备精度的依赖, 本文将二维超声振动辅助加工技术引入 CMG, 进行了该复合方法的技术开发及实验研究.

### 1 二维超声振动辅助加工原理及实验装置

基于超声波的复合加工方法, 主要特征在于超声波的发生装置与在加工工具或被加工材料的结合, 即超声波的施加方式. 本文采用具有伸缩和弯曲两种模态的二维超声波振动子设计, 由压电陶瓷块与金属弹性体黏合而成. 如图 1 所示, 实验系统包括二维超声振动子、振动子激励电源、横向进给运动机构、用于工件夹持的真空旋转吸盘、施加压力的进给运动和显示压力读数的动力计等.

由波函数发生器输出两路具有相位差  $\varphi$  的同峰值同频率交流电压信号  $V_A = V_{pp} \sin(2\pi ft)$  及  $V_B = V_{pp} \sin(2\pi ft + \varphi)$ , 经功率放大器放大后, 施加到振动子的两组压电陶瓷电极上, 振动子的伸缩和弯曲模态被同时激励, 产生垂直于工件平面的伸缩模态振动以及平行于工件表面的弯曲模态振动, 其合成二维椭圆振动方向垂直于工件平面. CMG 轮片粘贴于振动子端面, 工件由真空吸盘夹持进行旋转运动, 二维超声振动子固定于弹簧和动力计组成的支撑结构上, 在一定的预加压力及横向运动下, 扫描加工工件表面.

加工实验装置如图 2 所示. 横向进给往复运动由

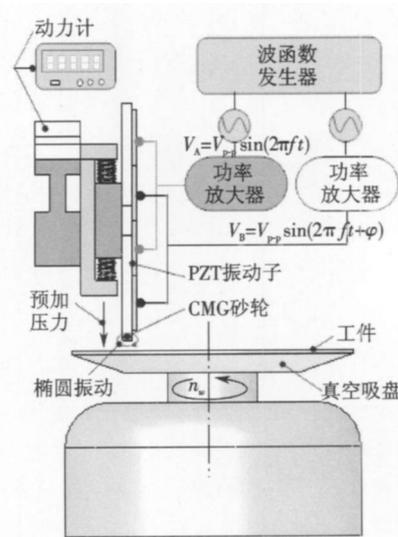


图 1 加工原理

单轴直线运动机构 GL-15 (THK Co., Ltd) 实现, 行程 0 ~ 220 mm, 速度范围 1 ~ 200 mm/s, 定位精度 20 μm. CMG 砂轮片用常温硬化粘结剂粘贴于二维超声振动子端面. 垂向手轮分辨率 1 μm, 用于施加加工所需预加压力, 所用测力计由八角测力环、应变片及数据采集器组成.

二维超声振动子工作原理为: 当输入的电压频率接近或等于振子两个模态的频率时, 振子产生弯曲和伸缩振动, 其运动合成为二维椭圆运动. 已有研究<sup>[9]</sup>表明振动子的激励频率主要与振动子金属弹性体的长度和厚度尺寸参数以及 PZT 电极的厚度参数密切相关. 二维超声振子的结构与尺寸设计采用有限元分析方法, 通过有限元软件 FEMAP 9.3 和频率响应分析软件 PIEZO plus 4.0 (Dynus Co., Ltd) 对振子进行模态分析. 为避免实验误差, 对实际制造出来的二维超声振动子进行频率和振幅验证. 通过频率阻尼分析仪器 4294A (Agilent Co., Ltd) 进行频率验证以确定加工中所使用

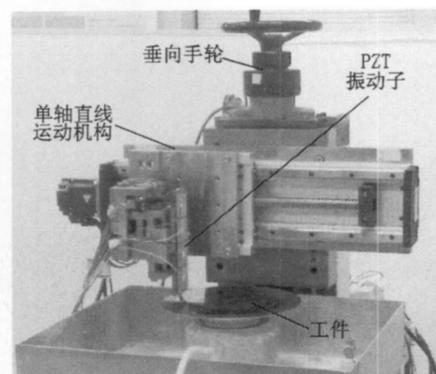


图 2 加工实验装置

频率值, 实际测量超声振动子频率为 15.3 kHz.

振幅测量系统主要由激光多普勒振动计 LV-4610 (Ono Sokki Co., Ltd.) 以及示波器 LT364L (Iwatsu Co., Ltd) 组成. 测量中施加电压信号峰值 150 V, 频率 15.3 kHz, 图 3 所示为在相位差 0°、155°、180° 时二维超声波的振动情况. 图 3(a) 所示超声振动轨迹近似于一维径向超声振动, 为弯曲振动模态轨迹. 而图 3(c) 为一维轴向超声振动, 为伸缩振动模态轨迹. 较理想的二维超声振动出现在 155° 相位, 即振动子的弯曲和伸缩模态的合成振动, 为椭圆振动轨迹.

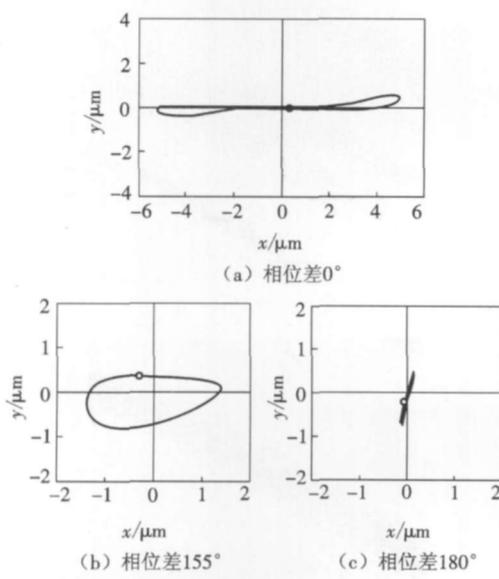


图 3 二维超声波振动轨迹测定(电压 150 V, 频率 15.3 kHz)

## 2 二维超声辅助加工轨迹分析

基于图 1 的加工原理, 对其进行加工轨迹分析, 如图 4 所示为加工运动轨迹模型示意, 工件以角速度  $\omega$  自转, CMG 砂轮片不自转, 在超声振子的带动下以速度  $V_x$  沿 X 轴向进给.

图 4 中磨头坐标系为  $xyz$ , 工件坐标系为  $XYZ$ . 根据图 4 的几何关系及坐标变换, 磨头上任意某点  $N$  在工件坐标系  $XYZ$  中的相对运动方程可表示为

$$\begin{cases} X = [-R + e + V_x t + a \cos(2\pi f t + \phi) + r \cos \theta] \cos \omega t + r \sin \theta \sin \omega t \\ Y = [R - e - V_x t - a \cos(2\pi f t + \phi) - r \cos \theta] \sin \omega t + r \sin \theta \cos \omega t \\ Z = b \sin(2\pi f t) \end{cases}$$

式中:  $a$  为椭圆振动长轴方向振幅;  $b$  为短轴方向振幅;  $f$  为振动频率;  $\phi$  为相位差;  $r$  为磨头上  $N$  点的半径;  $\theta$  为  $N$  点坐标与  $x$  轴夹角;  $R$  为工件半径;  $e$  为加工位置

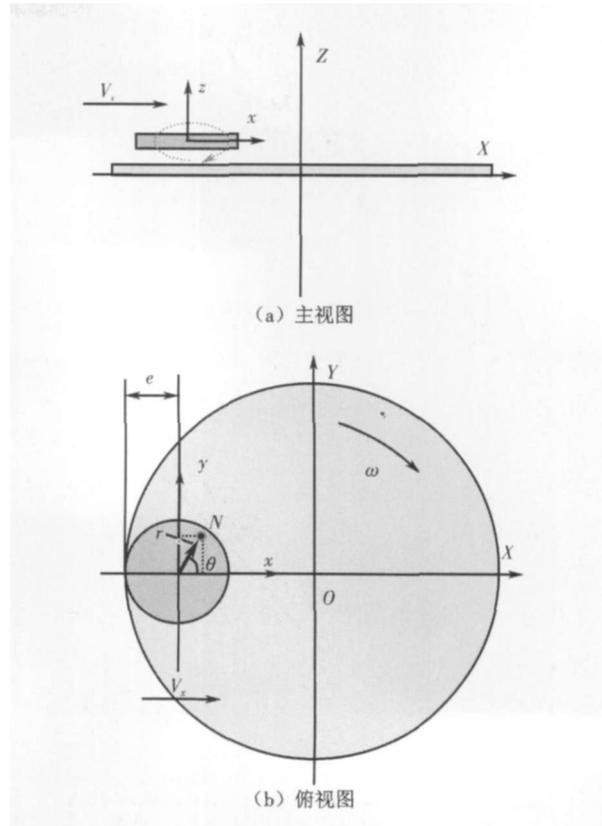


图 4 运动轨迹模型示意

偏移量;  $V_x$  为磨头横向移动速度;  $\omega$  为工件旋转角速度;  $t$  为加工时间.

根据以上分析的运动方程, 采用 Matlab 对加工磨粒的运动轨迹进行模拟, 如图 5 所示. 可以看出, 椭圆振动磨削的磨粒轨迹为空间螺旋曲线, 磨粒切削深度呈周期性变化, 磨粒的切削轨迹将变长, 对于该加工方法, 意味着重复磨削作用将加强, 有利于材料去除率的提高. 而随着工件旋转速度的提高, 椭圆振动的轨迹将变得稀疏.

基于以上的运动学分析, 为进一步阐述二维超声波辅助加工所产生的作用, 采用单点切削的方法进行验证实验. 所用样品为外购  $\Phi 200$  mm 单晶硅片(晶面 100), 其表面经研磨与抛光后表面粗糙度  $R_a$  小于 10 nm.

单点工具为车床用合金刀具的刀尖, 如图 6 所示. 刀尖顶端为圆弧状, 其半径 30  $\mu\text{m}$ . 为满足实验需要, 用线切割加工方法获得完整刀具的刀尖部分, 约 1.5 mm 左右, 因此质量极轻. 将刀尖在常温下用高硬度硬化粘合剂固定于 PZT 振动子底端. 通过设定实验装置垂向手轮的刻度坐标来保证实验中一致的切削深度. 单点切削实验参数如表 1 所示.

图 7 为无超声辅助加工下的单点切削轨迹. 可以看出, 刀尖与工件在划擦过程中持续接触, 形成连续型沟槽, 同时沟槽底部有较明显的破碎状出现. 图 8 为二

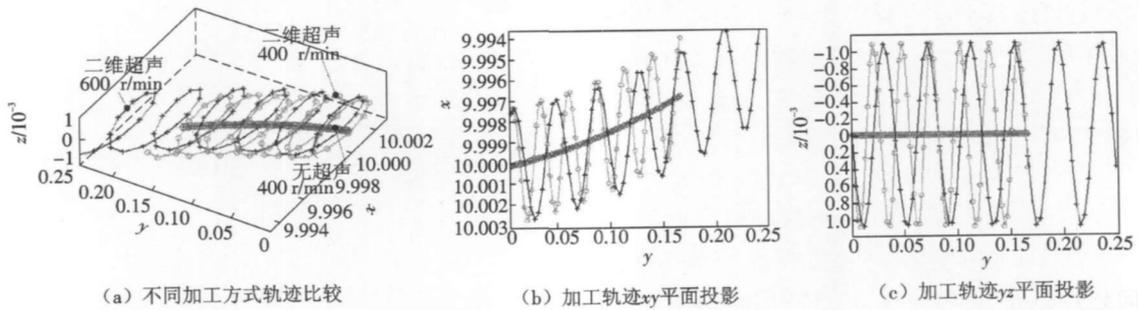


图5 加工磨粒的运动轨迹比较分析



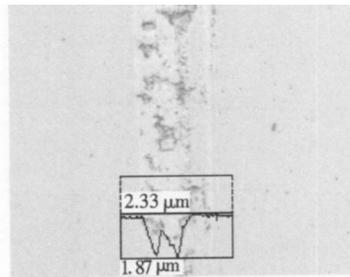
图6 单点实验刀尖

表1 单点切削实验参数

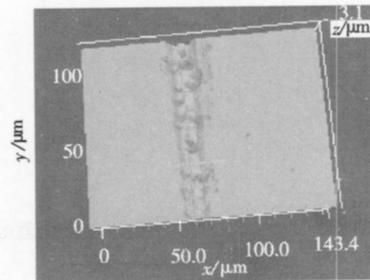
参数名称		数值
二维超声振动子	电压/V	150
	频率/kHz	15.3
	相位差/(°)	155
刀尖半径/ $\mu\text{m}$		30
横向进给速度 $V_x / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		250

维超声辅助加工下的单点切削轨迹情况. 在每个振动周期, 刀尖在工件表面上不断发生切入和切出工件的周期运动, 工件表面出现了断续的沟槽, 从图 8 (b) 的三维图上可以观察到, 在刀尖切出工件的时候, 有材料堆积的情况出现, 说明存在延性切削. 根据实验参数, 可以计算出每个振动周期刀尖加工点走过的距离约为  $16 \mu\text{m}$ . 而从图 8 (a) 中也可以直接测量出两个切削沟槽之间的距离约为  $16 \mu\text{m}$ , 说明了加工中磨粒发生与工件的周期分离现象. 在相同振动振幅与超声振动频率情况下, 通过改变横向进给速度  $V_x$  的大小, 可以控制切削刃与工件断续性接触和连续性接触两种切削方式, 而利用连续性接触方式进行磨削, 可得到较高质量的加工表面.

通过对超声加工工具与工件间运动学关系的分析研究, 也进一步说明超声波辅助加工机理主要包含的相互作用因素: 超声波固有的高频振动改变了磨粒运动, 使磨粒的切削深度周期性的改变, 并且会与工件发生周期分离的现象, 磨削刃作用时间变短, 磨削温度降低; 同时使磨粒具有很强的冲击作用, 磨削切屑微小

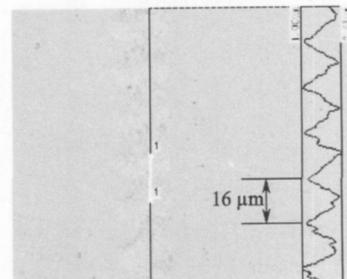


(a) 切削轨迹二维图

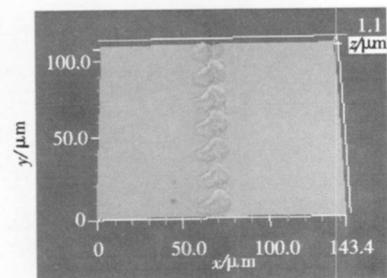


(b) 切削轨迹三维图

图7 无超声辅助加工下的单点切削轨迹



(a) 切削轨迹二维图



(b) 切削轨迹三维图

图8 二维超声辅助加工下的单点切削轨迹

化 表面热损伤以及变质层厚度减小,有利于提高表面质量和加工效率。

### 3 加工实验结果

以表 2 的实验条件进行初步实验,考察不同加工时间和不同加工方式下的加工结果。所用工件样品为外购  $\phi 200$  mm 单晶硅片(晶面 100),其表面经研磨未抛光后表面粗糙度  $R_a$  约  $0.11 \mu\text{m}$ 。考虑加工时间效率,设定加工宽度为 15 mm。为保证表面粗糙度及材料去除深度的准确性,每次实验均选择不同新工件的同一个加工位置,即保证相对线速度一致。对每次测量结果,在工件表面以  $90^\circ$  间隔分别取 4 个测量位置,取平均值。表面粗糙度的测量采用粗糙度仪 Tokyo Surface480A(Tokyo Seimitsu Co., Ltd),材料去除深度采用该仪器的断面曲线测量功能实现。

表 2 加工实验参数

参数名称		数值
施加电压	峰值/V	150
	频率/kHz	15.3
	相位差/ $^\circ$	0, 155, 180
固着微细磨	类型	CeO <sub>2</sub> (质量分数 <40%) #3000
粒砂轮片	尺寸/(mm × mm)	$\phi 6 \times 1$
工件/(mm × mm)		单晶硅片( $\phi 200 \times 0.8$ )
预加压力/N		9
工件转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )		400
加工宽度/mm		15
X 向进给速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		5
加工时间/min		120
磨削液		无(干式磨削)

加工时间与表面粗糙度和材料去除深度的结果如图 9 所示,可以看出,随着时间的增加,表面粗糙度明显改善,同时材料去除量也显著增加。加工时间 180 min 时,最优表面粗糙度  $R_a$  接近 0。这里选择 120 min 作为加工时间,进行无超声 CMG 加工实验,以及在一维超声(相位差  $0^\circ$ )、二维超声(相位差  $155^\circ$ )和一维超声(相位差  $180^\circ$ ) 3 种情况下进行复合加工实验。几种加工方式的加工结果比较如图 10 所示。可以看到,有超声的情况下,表面粗糙度及材料去除较无超声情况下均有较大提高。有超声情况下,加工结果以二维超声辅助加工结果最优,而一维超声(相位差  $0^\circ$ ) 辅助加工结果次之。

根据 CMG 加工原理,也可进一步说明超声辅助加工下,加工结果改善的原因。CMG 材料去除机理仍是

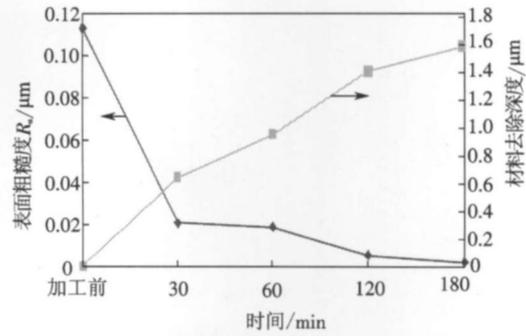


图 9 二维超声下加工时间与加工结果的关系

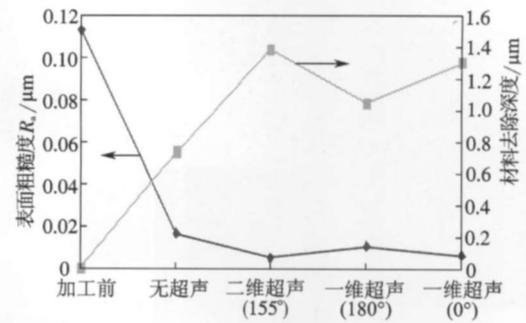


图 10 加工方式与加工结果比较

基于化学和机械的复合作用,主要影响因素为松软钝化层的形成率,也就是 CMG 砂轮片上磨粒突出和添加剂脱落的效率。而引入超声波辅助加工,其带来的高频脉冲振动,使工件和砂轮接触面上的机械作用加强,对添加剂脱落和磨粒突出有一定的促进作用。而二维超声在工件轴向和径向的微振动,有利于反应物排出,可使脱落的添加剂与磨粒和工件表面更好地接触。

进一步采用原子力显微镜 SPA400(Seiko Co., Ltd)观察各加工工件表面微观状况,测量范围  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ,如图 11 所示。这里增加外购 CMP 抛光表面(表面粗糙度  $R_a$  小于  $10 \text{ nm}$ )进行比较。无超声加工情况下,由于材料去除相对较小,表面仍有较明显的材料残留等。有超声情况下,微观表面光滑,接近外购 CMP 抛光的硅片表面质量。从图 10 可以看出,在超声波存在的情况下,表面粗糙度及材料去除均优于无超声情况,其中二维超声辅助加工方式可获得最小表面粗糙度及最大去除深度,即高加工效率。从图 11 可以进一步看出,在高材料去除情况下,二维超声辅助加工的微观表面质量优于无超声情况,表面无明显瑕疵。因此二维超声辅助化学机械复合加工方法可提高加工精度和效率。

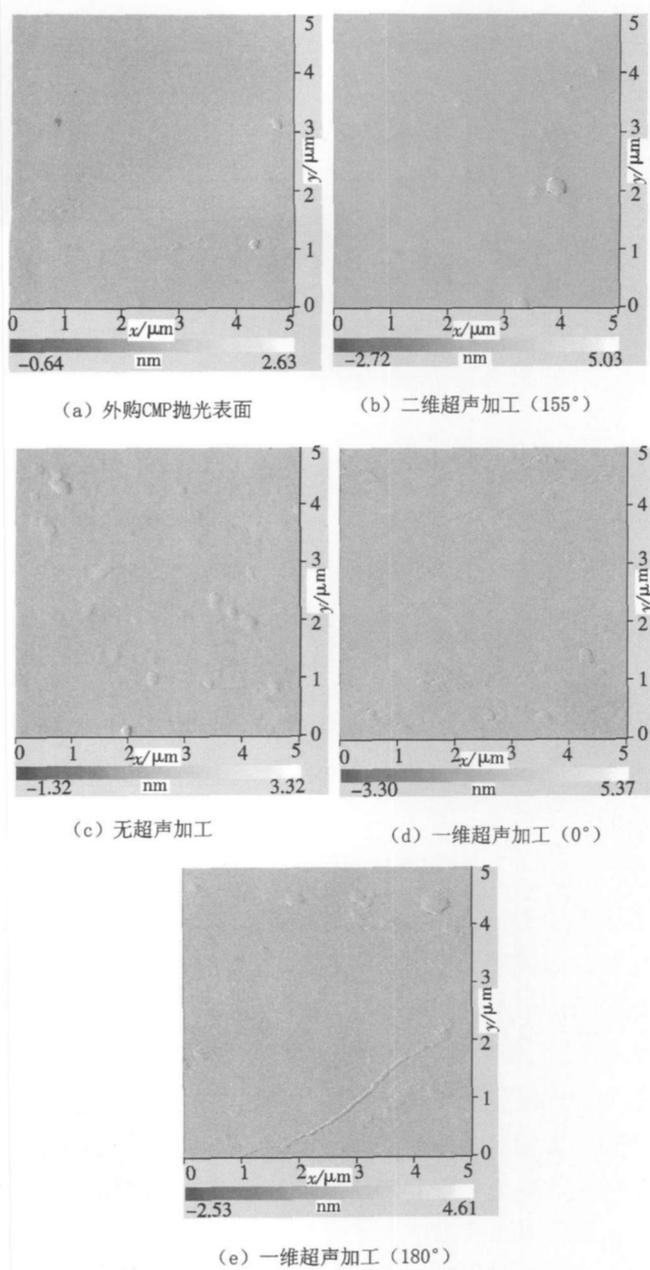


图 11 加工工件表面微观状况

#### 4 结 语

本文基于化学机械磨削砂轮原理,提出二维超声振动辅助化学机械磨削方法,实现实验装置开发及加工轨迹分析,以硅片为加工对象,进行了初步加工实验验证。研究结果表明:通过对无超声加工、一维超声、二

维超声等加工方式的比较实验可以发现,二维超声振动辅助方式加工结果最优;超声波辅助 CMG 加工方式可提高加工精度和材料去除率,同时可以获得良好的微观表面质量。

#### 致 谢

感谢日本秋田県立大学吴勇波教授研究室为论文的研究工作提供了实验条件和支持。

#### 参考文献:

- [1] Moon Y. Mechanical Aspects of the Material Removal Mechanism in Chemical Mechanism Polishing (CMP) [D]. Berkeley: Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, CA, USA, 1999.
- [2] Ramakrishnan S, Janjam S V S B, Patri U B, et al. Comparison of di-carboxylic acids as complexing agents for abrasive-free chemical mechanical planarization of copper [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007 84(1): 80-86.
- [3] Pandija S, Roy D, Babu S V. Chemical mechanical planarization of copper using abrasive-free solutions of oxalic acid and hydrogen peroxide [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007 102(2/3): 144-151.
- [4] Jeong Hee-Won, Aoki T, Hatsuzawa T. High-efficiency fixed abrasive polishing method for quartz crystal blanks [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004 44(2/3): 167-173.
- [5] Kim H, Park B, Lee S, et al. Self-conditioning fixed abrasive pad in CMP [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004 151(12): G858-G862.
- [6] Zhou Libo, 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.
- [7] Tian Y B, Zhou L B, Shimizu J, et al. Elimination of surface scratch/texture on the surface of single crystal Si substrate in chemo-mechanical grinding (CMG) process [J]. *Applied Surface Science*, 2009 255(7): 4205-4211.
- [8] Zhou L, Eda H, Shimizu J, et al. Defect-free fabrication for single crystal silicon substrate by chemo-mechanical grinding [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2006 55(1): 313-316.
- [9] Crawley E F, Anderson E H. Detailed models of piezoceramic actuation of beams [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990 1(1): 4-25.