

# 超声振动辅助单晶硅划片的锯切力研究

李政材, 王江全, 沈剑云

(华侨大学机电及自动化学院, 福建厦门 361021)

**摘要:** 采用金刚石超薄锯片对单晶硅划片的工艺会在划片时产生较大锯切力, 从而导致较大的崩边损伤。而旋转超声辅助加工由于超声振动的作用可以减小加工时所产的切削力, 同时获得较好的加工精度, 越来越广泛地应用于硬脆材料的加工中。为了验证超声辅助对单晶硅划片中锯切力的作用, 在实验中将超声振动添加到锯片上, 使其产生径向的振动来完成对单晶硅的划片。并通过对比有超声振动辅助与无超声振动辅助的单晶硅划片的锯切力, 对超声振动辅助划片中锯切力的特点进行分析。实验结果表明, 超声辅助划片所产生的锯切力比无超声辅助划片所产生的锯切力小, 说明超声振动的添加可以降低锯切力。同时在超声划片中产生的崩边要小于非超声加工条件下的崩边情况, 说明超声振动降低锯切力可抑制硅片的崩边。

**关键词:** 超声辅助加工; 单晶硅; 划片; 锯切力

中图分类号: B845.2 Q62 文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-04-0331-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.04.009

## Study of sawing force in ultrasonic vibration assisted monocrystalline silicon dicing

LI Zheng-cai, WANG Jiang-quan, SHEN Jian-yun

(College of Mechanical Engineering & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

**Abstract:** In the monocrystalline silicon dicing process with ultra-thin diamond blade, a bigger sawing force can be generated, which leads to a big chipping damage. The rotary ultrasonic assisted machining with ultrasonic vibration can reduce cutting force in processing and obtain good machining precision. Thus this machining method has been more and more widely used in hard brittle materials processing. In order to reduce the sawing force in monocrystalline silicon dicing process, ultrasonic vibration is applied to the saw blade, which makes the blade having a radial vibration, to complete the dicing of monocrystalline silicon. The characteristics of ultrasonic sawing force are analyzed through the comparison of sawing force between ultrasonic dicing and non-ultrasonic dicing. The experimental results show that the sawing force generated by the ultrasonic assisted dicing is smaller than that by the non-ultrasonic dicing, and so is the chipping damage. It indicates that chipping of silicon wafer can be inhibited by the smaller force generated in ultrasonic machining.

**Key words:** ultrasonic assisted machining; monocrystalline silicon; dicing; sawing force

## 0 引言

从硅片生产到半导体芯片的制成过程中需要经历一系列的工艺步骤, 其中划片是比较靠后的工艺之一, 在该工艺中产生缺陷将不会被后续的工艺所消除, 而是残留于芯片中, 这使得芯片在使用过程中会产生不稳定的现象。

硅片划片的方法主要有金刚石划片、激光划片

和超薄金刚石砂轮划片。金刚石划片工艺主要取决于金刚石尖端的加工工艺, 而且在加弯曲力矩时会使硅片材料中产生较大的内应力, 迫使硅片产生破碎。激光划片是利用激光的高温迫使照射的局部范围内的硅材料瞬间气化, 完成硅片的分离, 但是由于激光的高温会使切缝周围产生热应力, 温度急剧变化会导致硅片边缘的崩碎。而超薄金刚石砂轮划片工艺具有加工效率高、划切产生的切削力较小等优点, 是目前应用最广的硅片划片工艺。但是由于硅片本身属于硬脆性材料, 在金刚石超薄划片中会产生比较严重的崩边现象, 从而降低产品的质量<sup>[1-4]</sup>。

由于超声振动辅助加工方法对硬脆材料的加工具有加工效率高、加工质量好等优点<sup>[5-6]</sup>, 目前被

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275181)

作者简介: 李政材(1990—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为高效精密加工。

通讯作者: 李政材, E-mail: 1174697344@qq.com

广泛地应用于玻璃、陶瓷等材料的加工<sup>[7-10]</sup>。在加工中可以有效降低切削力，减少因材料受力的作用而引起的崩边等现象<sup>[11-12]</sup>。

因此，本文中采用专用的超声辅助划切设备，该设备使用异形变幅杆，可使超声振动沿着锯片的径向传播来对硅片进行划片。文章对划片的切削过程中产生的切削力进行研究，以探索超声辅助划片的特点。

## 1 超声振动辅助划片模型建立与分析

在超声辅助划片加工中，磨粒对材料进行切除的本质与传统的磨粒加工并无差异，只是磨粒切削的形式发生了变化。超声加工中的磨粒是在有序的振动下完成对材料的切削，如图1所示。

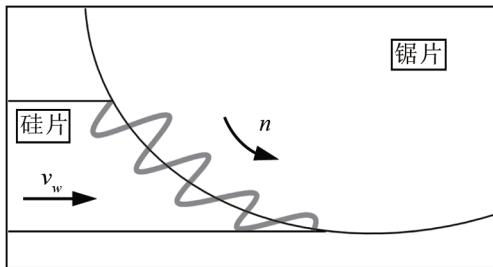


图1 超声辅助划片磨粒切削模型  
Fig.1 The cutting model of grains in ultrasonic dicing

从该模型中可以看出，单颗的磨粒在经过切削弧区这段时间内，其与材料的相互作用为间歇式接触，这种间歇接触使得加工中的容屑空间变大。并且高频的超声振动迫使磨粒对材料表层产生高频的冲击，使得材料表层出现裂纹，磨粒在切入材料表层会变得更容易，同时高频的冲击作用还会使得切屑细化。这些特点都能够有效地改善磨粒切削的效果。

## 2 实验条件与方案

本实验采用超声波锯切专用刀柄，如图2所示。该刀柄是利用超声振动的传导特点，通过异形变幅杆，将超声波振动由轴向的振动方式转变为径向的振动方式，利用LK-H085激光位移传感器，测得一级变幅杆轴向振幅为10 μm，对锯片边缘的径向振动为3 μm。振动传播原理如图3所示。

该刀柄通用于加装BT40刀柄的加工机床。在本实验中将该刀柄装于三轴加工中心，完成对硅片的锯切。实验加工装置系统如图4所示。

本实验中采用的测力仪为瑞士Kistler 9257B

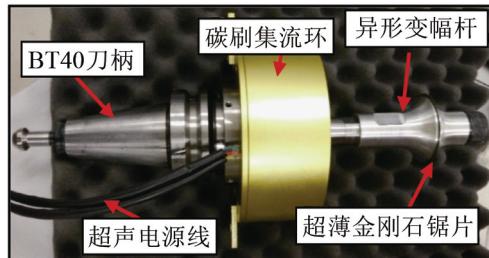


图2 超声波锯切专用刀柄  
Fig.2 The special ultrasonic cutting handle

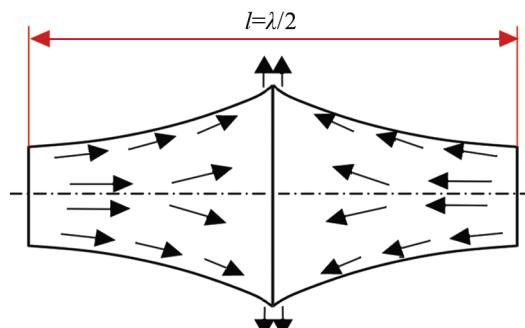


图3 异形变幅杆传递振动原理  
Fig.3 Vibration transmission principle of specially shaped horn

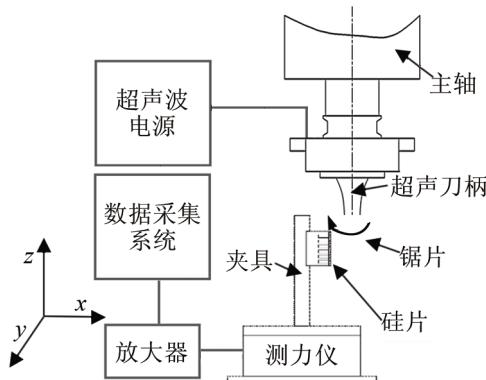


图4 实验加工系统  
Fig.4 The experimental processing system

通用三向测力仪，数据采集系统使用的是DEWESIRIUS-STG8采集系统。观察硅片崩边使用的是基恩士的VHX-100超景深显微镜。实验中采用的金属结合剂超薄金刚石锯片尺寸为50 mm×0.3 mm×25.4 mm；粒度为23 μm；浓度为25%。硅片使用P{100}型双面抛光硅片，其尺寸为10 mm×20 mm×0.5 mm。具体实验加工参数详见表1。

表1 实验加工参数  
Table 1 The experimental processing parameters

项目	参数值
主轴转速 $n/(r/min)$	800, 1300, 1800, 2300
进给速度 $v_w/(mm/min)$	20, 35, 50, 65
切深 $a_p/\mu m$	545
超声频率 $f/Hz$	28000
锯片振幅 $A/\mu m$	3

实验中采用一次切断的方法,使刀具沿着 $y$ 轴负方向对硅片进行锯切,并对不同参数下的数据进行记录与分析。

### 3 实验结果分析与讨论

#### 3.1 锯切力的分析

对于锯切力的研究首先从加工时的受力情况来看,图5为锯切过程中锯片的受力情况。

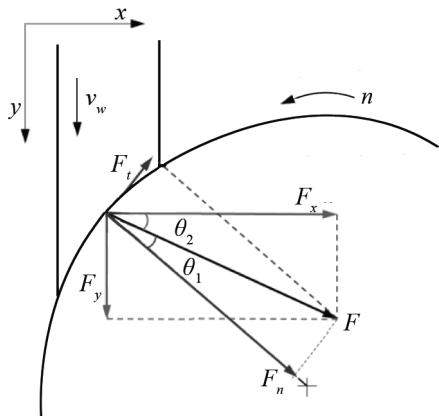


图5 锯片的受力分析  
Fig.5 Force analysis of saw blade

根据实际情况推断,锯片在加工过程中受到的合力大小为 $F$ ,该合力分解到 $x$ 与 $y$ 方向便可以得到这两个方向的分力 $F_x$ 与 $F_y$ ,通过测力仪所测得的力就是 $F_x$ 与 $F_y$ 。而将合力分解到锯片的径向和切向,便可获得法向力 $F_n$ 和切向力 $F_t$ 。又因为锯切材料的厚度与锯片直径相差较大,所以 $F_n$ 、 $F_x$ 与合力 $F$ 之间的夹角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 基本相等,那么可以近似地看作 $F_n$ 与 $F_x$ 在数值上相等, $F_y$ 与 $F_t$ 在数值上相等。

#### 3.2 加工参数与锯切力的关系

图6中表示的是在固定转速 $n=1300\text{ r/min}$ 时,超声加工与普通加工中进给速率与锯切力的关系。

从图6中可以看出,随着锯切速率的增大,锯切力也随之增大。这是因为,在转速与切深不变的情况下,增大进给速率会导致单位时间内材料的去除量增大,从而使得锯切力增加,超声加工的锯切力要小于普通加工产生的锯切力。其中超声加工产生的 $F_n$ 相对于非超声加工产生的 $F_n$ 平均降低18%,超声加工产生的 $F_t$ 比非超声加工产生的 $F_t$ 平均降低15%。这说明添加超声振动后,磨粒对材料表面产生冲击作用,迫使材料更加容易去除,导致了锯切力的降低。

图7中表示在固定的进给速率 $v_w=65\text{ mm/min}$ 时,超声加工与普通加工的主轴转速与锯切力的关

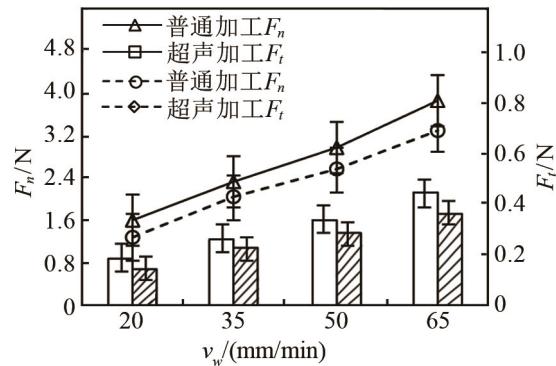


图6 进给速率与锯切力的关系  
Fig.6 The relationship between feed rate and sawing force

系。实验中随着主轴转速的升高,锯切力会不断地降低。其原因是转速的提高会导致单颗磨粒的切削厚度减小,从而使得切削力降低。同时从图7中还可以看出,在超声辅助加工下的锯切力比普通加工的锯切力小,在超声作用下 $F_n$ 与 $F_t$ 分别相较普通加工降低14%与12%。推测其原因为超声振动的添加迫使单颗磨粒切削厚度进一步减小,导致锯切力降低。

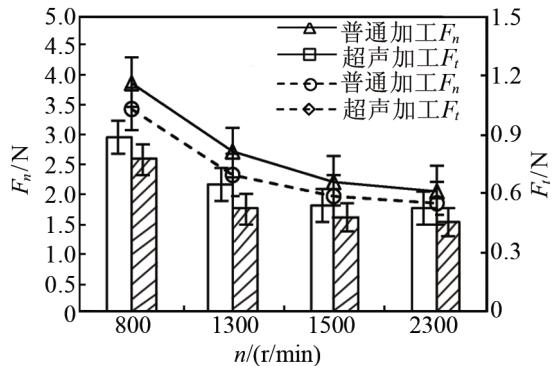


图7 主轴转速与锯切力的关系  
Fig.7 The relationship between spindle speed and sawing force

#### 3.3 材料去除率与锯切力的关系

图8表示在不同的材料去除率 $Q_w$ 以及不同的转速下,超声加工锯切力与普通加工锯切力的对比情况。从图8中可以发现,在较低材料去除率下超声振动对于锯切力的作用并不明显。当去除率增大到一定程度时,超声振动对于锯切力的作用才比较明显。这说明超声振动作用对于较大去除率的加工具有优势,反之也说明超声振动的添加可以提高加工效率。

#### 3.4 超声加工对材料崩边影响

在加工参数 $n=1800\text{ r/min}$ 、 $v_w=50\text{ mm/min}$ 以及超声加工条件与非超声加工条件下的硅片崩边情况如图9所示。从图9中可以看出,超声加工产生

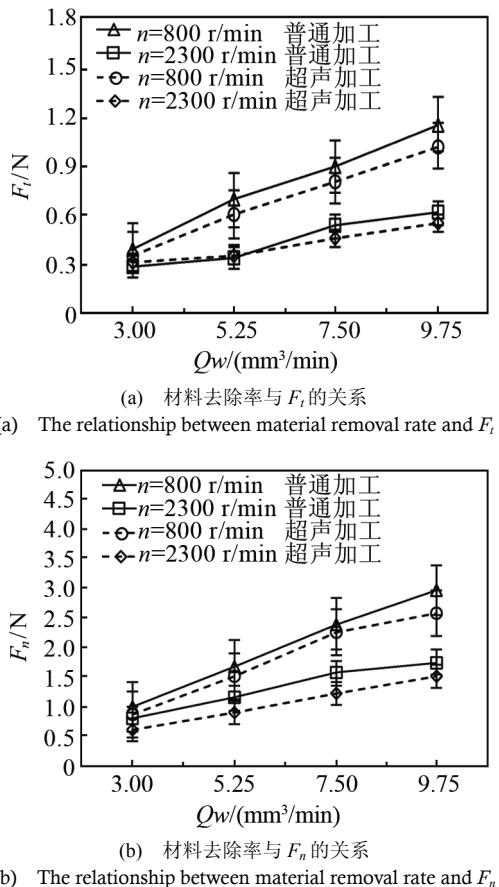
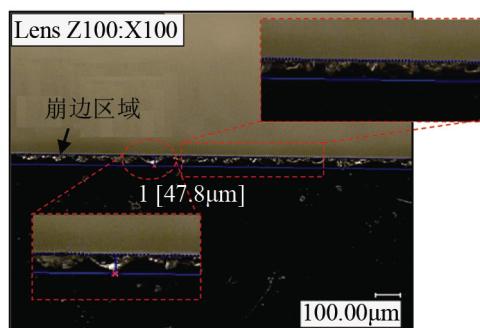
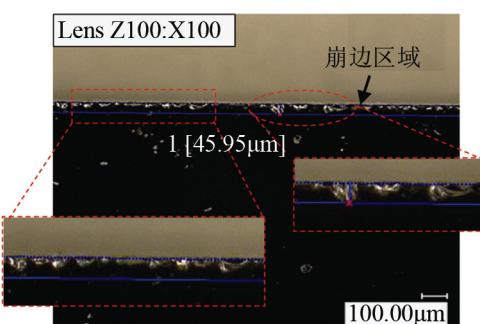


Fig.8 材料去除率与锯切力的关系  
The relationship between material removal rate and sawing force



(a) 非超声切割硅片崩边  
Chipping of silicon wafer in non-ultrasonic sawing



(b) 超声切割硅片崩边  
Chipping of silicon wafer in ultrasonic sawing

图9 不同加工条件下崩边情况  
Chipping under different processing conditions

崩边的最大尺寸为  $45.95\mu\text{m}$ , 非超声加工产生崩边的最大尺寸为  $47.80\mu\text{m}$ 。可见, 超声产生的崩边尺寸要小于非超声加工产生的崩边尺寸。

同时对比图 9(a)与 9(b)中虚线方框里的崩边情况可以发现, 超声加工产生的平均崩碎情况要小于非超声加工产生的崩碎情况。从图 9(b)椭圆虚线框中可以看出, 超声加工产生较大的崩碎还是要小于非超声加工产生的崩碎。同时结合该参数下, 所获得的超声加工的切割力要小于非超声加工产生的切割力, 可以说明切割力的降低会减小硅片的崩边, 超声切割可以在一定程度上抑制崩边的产生。

## 4 结论

本文采用超声辅助划片与普通划片两种方式对硅片进行了锯切, 建立并分析了超声辅助划切的模型, 同时对锯切时的受力情况进行了分析。通过对比超声加工与普通加工得出以下结论:

(1) 随着进给速度和材料去除速率的增大, 超声加工与普通加工所产生的锯切力都会增大, 随主轴转速的增加超声加工与非超声加工产生的锯切力都会降低。但是超声加工所产生的力均要小于普通加工所产生的锯切力, 所以在一定加工参数下超声振动辅助可以降低锯切力。

(2) 通过对超声加工与非超声加工时去除率与锯切力的关系, 在相同去除率下超声加工所产生的锯切力要小于普通加工产生的锯切力。同时在较大去除率的情况下, 超声切割更具优势。

(3) 实验中通过对硅片崩边情况的观察, 发现在超声切割加工下硅片产生的崩边要小于非超声切割, 说明超声切割可以抑制崩边的产生。

## 参 考 文 献

- [1] 马岩, 袁慧珠, 鞠仁忠, 等. 金刚石砂轮刀片划切过程性能分析与三维建模[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009(05): 74-77.  
MA Yan, YUAN Huizhu, JU Renzhong, et al. Research of performance and three-dimensional modeling of the diamond blade[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009(05): 74-77.
- [2] 赵洪浩. 超薄硅晶圆的超窄缝切割试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 15-20.  
ZHAO Honghao. Experimental Investigations on Ultrathin Slit Dicing of Silicon Wafers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 15-20.
- [3] Fuegl M, Mackh G, Meissner E, et al. Analytical stress characterization after different chip separation Methods[J]. Microelectronics Reliability(S0026-2714), 2014, 54(9-10): 1735-1740.
- [4] LIN J, CHENG M. Investigation of chipping and wear of silicon wafer dicing[J]. Journal of Manufacturing Processes (S1526-6125), 2014, 16(3): 373-378.
- [5] QU W, WANG K, Miller M H, et al. Using Vibration-assisted

- Grinding to Reduce Subsurface Damage[J]. Precision Engineering(S1873-2372), 2000, 24(4): 329-337.
- [6] WEI S, ZHAO H, JING J. Investigation on three-dimensional surface roughness evaluation of engineering ceramic for rotary ultrasonic grinding machining[J]. Applied Surface Science(S0169-4332), 2015, 357: 139-146.
- [7] Uhlmann E, Spur G. Surface formation in creep feed grinding of advanced ceramics with and without ultrasonic assistance[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology(S0007-8506), 1998, 47(1): 249-252.
- [8] WANG Y, LIN B, WANG S, et al. Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture(S0890-6955), 2014, 77: 66-73.
- [9] CAO J, WU Y, LU D, et al. Material removal behavior in ultrason-
- ic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture(S0890-6955), 2014, 79: 49-61.
- [10] LV D, HUANG Y, WANG H, et al. Improvement effects of vibration on cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass[J]. Journal of Materials Processing Technology(S1548-1557), 2013, 213(9): 1548-1557.
- [11] ZENG W M, LI Z C, PEI Z J, et al. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture(S1468-1473), 2005, 45(12-13): 1468-1473.
- [12] ZHAO C Y, GONG H, FANG F Z. Experimental study on the cutting force difference between rotary ultrasonic machining and conventional diamond grinding of K9 glass[J]. Machining Science and Technology(S1091-0344), 2013(17): 129-144.

• 简讯 •

中国科学院声学研究所与中广核苏州热工研究院  
成立核电厂安保技术联合实验室

2016年7月15日首届核电厂安保技术研讨会在苏州召开,会议由国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心主办,中广核苏州热工研究院和中国科学院声学研究所(简称声学所)承办。会议期间,中国科学院声学研究所和中广核苏州热工研究院的代表为双方联合成立的核电厂安保技术联合实验室揭牌。

成立联合实验室是面对我国核电行业高速发展、核电基地环境多样和国内外形势复杂的考验与挑战,通过在核电厂水下安保技术领域开展一系列合作研究,加强核电厂安保领域人才培养、技术开发和成果转化,弥补核电厂水下安保领域的空白与不足,提升我国核电厂核安保水平。

联合实验室的成立为核电厂安保技术的发展搭建了从技术到应用的桥梁,将进一步推动声学所科研成果转移转化工作。

中电科南京电子技术研究所贲德院士出席了会议,中国原子能科学研究院、核工程第五研究设计院、深圳市公安局、中广核集团、中广核苏州热工研究院、中国科学院声学研究所等15家单位的20余名代表参加了会议。许枫研究员代表声学所在大会上作了交流报告。

《声学技术》编辑部