

工艺参数对磨削硅晶圆亚表面损伤裂纹的影响

孙敬龙¹, 秦飞¹, 陈沛¹, 安彤¹, 宇慧平¹, 王仲康², 唐亮²

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 北京中电科电子装备有限公司, 北京 100176)

摘要: 为研究粗磨硅晶圆亚表面微裂纹, 采用截面显微镜观测法, 实验研究了粗磨工艺下砂轮进给速率、砂轮转速和硅晶圆转速对晶圆亚表面裂纹的影响。结果表明: 磨削后晶圆亚表面斜线裂纹和折线裂纹占 70%, 中位裂纹、分叉裂纹和横向裂纹占 30%。裂纹形状与工艺参数的关系不大。裂纹深度从晶圆圆心向外逐渐增大, <110> 晶向裂纹深度稍大于 <100> 晶向。裂纹深度随砂轮进给速率增大单调增加, 随砂轮转速增大单调减小。裂纹深度与晶圆转速之间的关系复杂, 晶圆转速增大时, 裂纹深度先是减小, 然后增大。提出了磨削工艺参数的优化措施。

关键词: 硅晶圆; 磨削参数; 裂纹形状; 裂纹深度; 工艺优化

中图分类号: TN 305

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)03-0448-07

doi: 10.11936/bjtuxb2016030057

Effects of Grinding Parameters on the Subsurface Cracks of Ground Wafers

SUN Jinglong¹, QIN Fei¹, CHEN Pei¹, AN Tong¹, YU Huiping¹, WANG Zhongkang², TANG Liang²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. CETE Beijing Electronic Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In this paper, a cross-section microscopy method was used to examine the shape and depth of subsurface cracks of ground wafers under nine sets of rough grinding parameters. Results show that 70% of the cracks are diagonal and chevron crack, and 30% of the cracks are median, fork and lateral cracks. Crack shapes are independent of grinding parameters. The depth of crack increases with increasing distance from the wafer center, and the crack depth in <110> crystal orientation are greater than that in <100> crystal orientation. With the increase of the wheel feed rate, the crack depth increases. With the increase of the wheel rotation speed, the crack depth decreases. With the increase of the wafer rotation speed, the cracks depth decreases first in the range of 150-200 r/min, and then increases in the range of 200-250 r/min. Based on the experimental results, an optimized grinding condition is proposed.

Key words: silicon wafer; grinding parameters; crack shape; crack depth; optimized grinding condition

硅晶圆是集成电路(integrated circuit, IC)制造中广泛应用的基底材料^[1]。随着高密度和小型化电子器件的增加, 对硅晶圆的厚度要求更加严苛。例

如三维封装要求硅晶圆厚度小于 100 μm, 这对减薄技术提出了更高的要求。目前, 基于硅晶圆自旋转的背面磨削减薄是主流的磨削减薄技术。然而, 磨

收稿日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11502005); 国家科技重大专项资助项目(2014ZX02504-001-005)

作者简介: 孙敬龙(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事先进电子封装技术与可靠性方面的研究, E-mail: sunjinglong1989@126.com

削过程不可避免产生亚表面裂纹等损伤^[2-3],这些损伤会降低晶圆强度,甚至导致晶圆翘曲或破碎^[4],大大影响后续抛光效率和封装产品可靠性.因此,研究不同磨削工艺参数下晶圆亚表面裂纹对提高后续加工效率和优化磨削工艺参数均具有重要意义.

为降低损伤,一些学者研究了磨削参数对亚表面裂纹的影响.亚表面裂纹的观测方法主要有截面透射电镜显微法^[5-7]、截面光学显微镜/扫描电镜显微法^[8-9]、激光超声法^[10]和角度抛光法^[11-12].其中,截面光学显微镜/扫描电镜显微法和角度抛光法较为常用. Pei等^[8]采用截面显微法研究了不同磨削工艺参数和取样位置对晶圆亚表面裂纹深度的影响,发现磨削工艺参数和取样位置对裂纹深度几乎没有影响.张银霞等^[9]同样采用截面显微法研究了不同磨削工艺参数和取样位置对晶圆亚表面裂纹深度的影响,发现磨削工艺参数和取样位置对裂纹深度有影响. Young等^[11]采用角度抛光法研究了不同磨削工艺参数对晶圆亚表面裂纹深度的影响,得出了与张银霞等^[9]相似的结论.高尚等^[12]同样采用角度抛光法研究了光磨和无光磨条件对晶圆亚表面裂纹深度的影响,发现光磨可降低晶圆亚表面裂纹深度.这些研究对理解磨削条件对裂纹深度的影响具有重要意义.

然而,目前大多数研究所采用的砂轮转速较低(砂轮转速 $\leq 3\ 000\ \text{r}/\text{min}$),属于普通磨削.这些工作对研究低砂轮转速下晶圆亚表面裂纹十分重要,但还不完整.高速磨削(砂轮转速 $> 3\ 000\ \text{r}/\text{min}$)具有磨削效率高和磨削质量好等优点,成为目前主流的磨削技术.高速磨削下材料的去除机理也会不同.因此,研究高速磨削条件下磨削工艺参数对晶圆亚表面裂纹等损伤的影响十分必要.

关于晶圆亚表面裂纹的实验观测方法,截面透射电镜显微法制样过程烦琐,激光超声法成本较高.角度抛光法虽然可以观测亚表面损伤形貌,但制样时需要专门的夹具.截面显微观测法操作起来方便、快捷,成本低.

本文采用截面显微观测法,通过扫描电子显微镜对不同磨削参数下晶圆亚表面裂纹进行观测,统计分析了裂纹形状、深度及其分布.根据实验结果,提出了磨削工艺参数优化措施.

1 实验过程

1.1 磨削实验

采用国产某型基于晶圆自旋转磨削技术的磨削

机对晶圆进行磨削,晶圆磨削示意图如图1所示.磨削过程中,晶圆被真空吸盘吸附,砂轮和晶圆绕各自的旋转轴旋转,同时砂轮垂直向下进给.磨削所用的砂轮类型为325#树脂结合剂砂轮,砂轮直径为200 mm.晶圆为(100)型单晶裸晶圆,晶圆直径为200 mm,初始厚度约为730 μm ,粗磨目标厚度为300 μm ,磨削采用的工艺参数如表1所示.

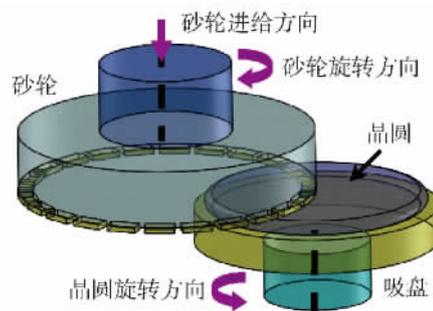


图1 晶圆磨削示意图

Fig.1 Schematic of wafer grinding

表1 粗磨参数

Table 1 Rough grinding parameters

磨削条件	进给速率 $f/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	砂轮转速 $N_s/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	晶圆转速 $N_w/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	2.0	5 000	200
2	1.6	5 000	200
3	1.2	5 000	200
4	0.8	5 000	200
5	0.4	5 000	200
6	0.8	4 000	200
7	0.8	4 500	200
8	0.8	5 000	150
9	0.8	5 000	250

1.2 亚表面裂纹观测

采用截面显微观测法对9种不同磨削工艺条件下得到的晶圆亚表面裂纹进行观测.观测试样的取样位置如图2所示.沿晶圆周向分为8组,第1组位于晶圆定向缺口所在的半径上,然后顺时针方向依次为第2组直至第8组,每组在不同半径位置取3个试样.第1组的3个试样编号为1-1、1-2和1-3,第2组的3个试样编号为2-1、2-2和2-3,其余试样编号依次类推.每组的3个试样,距晶圆圆心的距离分别为10、50、90 mm.对于本实验采用的(100)型单晶硅晶圆,第1、3、5、7组试样位于 $\langle 110 \rangle$ 晶向,

第2、4、6、8组试样位于与〈110〉晶向成45°角的〈100〉晶向。

将晶圆按照取样位置切割,得到尺寸为10 mm × 8 mm的矩形试样,其长边(10 mm)平行于取样半径线,其短边(8 mm)垂直于取样半径线。取试样靠近晶圆圆心的短边截面为观测截面。

将切割后试样通过热熔胶粘贴在薄钢板上,并使观测截面与钢板边缘基本保持平齐,如图3所示。先后用2000#、5000#砂纸打磨,用0.25 μm金刚石抛光液抛光,直至待观测截面无磨痕,即去除了切样

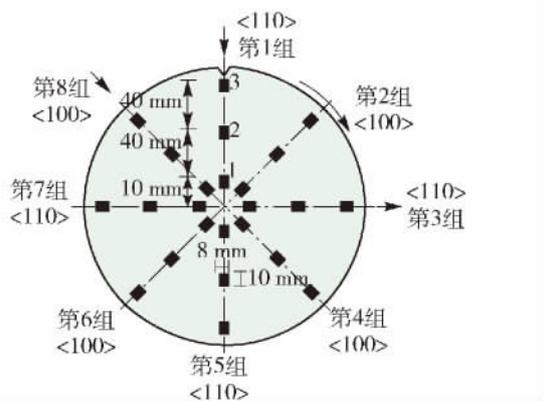


图2 取样位置

Fig. 2 Sample locations

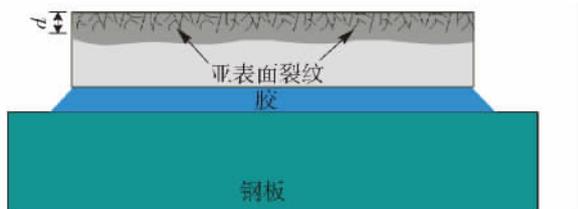


图3 试样制备

Fig. 3 Sample preparation

损伤。采用超声波设备对试样进行清洗,待其自然干燥,采用“杨氏”溶液^[8](H₂O: HF49%: Cr₂O₃ = 500 mL: 500 mL: 75 g)对截面进行腐蚀,然后用清水冲洗并自然干燥。在FEI Quanta 650型扫描电子显微镜下观测,并测量裂纹的最大垂直深度d。

2 结果与讨论

2.1 裂纹形状

为方便统计,图4给出了裂纹形状的定义。裂纹为直线且扩展方向与磨削面夹角小于30°时定义为横向裂纹(I类),大于等于30°小于60°时定义为斜线裂纹(II类),大于等于60°而小于90°时定义为中位裂纹(III类);当裂纹出现分叉时定义为分叉裂纹(IV类),在裂纹扩展方向上出现弯折或破折的裂纹定义为折线裂纹(V类)。

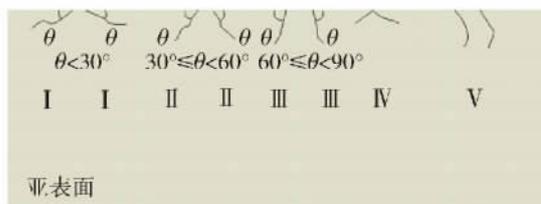


图4 裂纹形状定义

Fig. 4 Crack shapes and definition

由于深度较小的裂纹对优化磨削工艺没有影响,只统计深度≥8 μm的裂纹。选取每个试样的3张图片,并计算某一形状裂纹占裂纹总数的百分比。统计结果列于表2,并选取9种工艺条件下靠近晶圆外缘试样(编号1-3)截面的裂纹图示,如图5所示。

从表2看出,无论哪种磨削工艺参数,II类裂纹(斜线裂纹)比例最高,约为40%;其次为V类裂纹

表2 裂纹形状比例

Table 2 Crack shape percentage

磨削条件	I类/%	II类/%	III类/%	IV类/%	V类/%	试样数
1	4.8	36.7	14.6	12.2	31.7	24
2	5.2	38.4	17.9	12.8	25.7	24
3	5.2	38.4	15.4	7.8	33.2	24
4	4.8	43.9	14.6	9.8	26.9	24
5	6.0	39.4	18.2	9.1	27.3	24
6	5.0	45.0	12.5	10.0	27.5	24
7	5.2	36.8	18.4	10.6	29.0	24
8	5.2	39.5	15.8	10.6	28.9	24
9	6.6	40.0	15.6	8.8	29.0	24

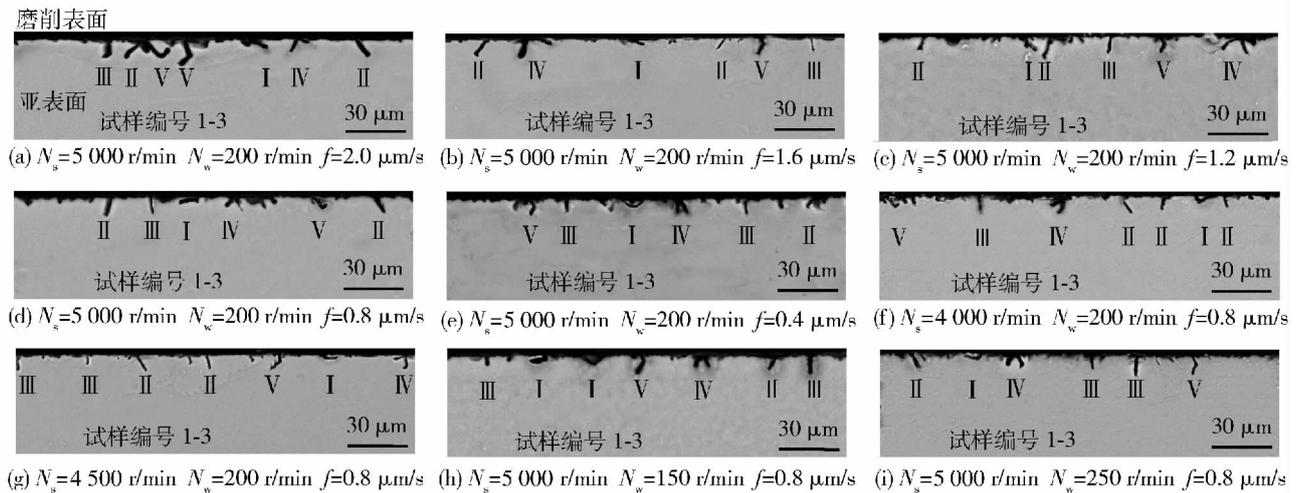


图 5 不同磨削参数下观测到的裂纹形状

Fig.5 Crack shape observed under various grinding parameters

(折线裂纹),占比 30%; III 类(中位裂纹)和 IV 类(分叉裂纹)分别占比 15% 和 10%, I 类(横向裂纹)最少,占比 5% 左右. 斜线裂纹、折线裂纹和分叉裂纹的形成与裂纹扩展的择优取向性有关^[8,13]. 对于单晶硅,(111)晶面与晶圆磨削面的夹角约为 55.23°, (111)晶面的面间距最大,键密度最小,断裂韧性最小,是单晶硅的最易开裂晶面,(110)晶面次之,(100)晶面最难发生断裂. 当裂纹沿(111)晶面扩展时,裂纹平直,不易偏折. 当裂纹不在(111)晶面扩展时往往会出现变向、弯曲或分叉,最终均会偏向(111)晶面. 实验所观测的试样截面均为(110)晶面和(100)晶面,因此出现了较多的斜线裂纹和折线裂纹,同时也伴生分叉裂纹. 横向裂纹和中位裂纹是脆性材料加工通常出现的裂纹形式^[8],而产生横向裂纹的临界载荷较大,因此横向裂纹最少^[14-15].

从表 2 还看出,出现什么形状裂纹与磨削参数的关系不大,这是因为磨削参数改变时,会引起磨削力变化,磨削力大小主要影响裂纹扩展深度^[17],而对裂纹形状的影响较小,裂纹形状主要是由硅晶圆的内在的晶面断裂特性决定^[13],因此磨削参数对裂纹形状几乎没有影响.

2.2 裂纹深度

表 3 给出了 9 种磨削工艺条件下垂直〈110〉、〈100〉晶向截面上的最大裂纹深度值. 表中,〈110〉晶向裂纹深度为 1-3、3-3、5-3、7-3 四组试样最大裂纹深度均值,〈100〉晶向裂纹深度为 2-3、4-3、6-3、8-3 四组试样裂纹最大深度的均值. 可以看到,无论哪种工艺条件,〈110〉晶向裂纹深度稍大于〈100〉晶

向,工艺条件(a)下的裂纹深度最大,为 13.44 μm. 后续分析皆选取工艺条件(a)下的晶圆进行分析.

表 3 裂纹深度

Table 3 Crack depth μm

磨削条件	〈110〉	〈100〉
1	13.44	11.13
2	12.57	10.76
3	12.05	10.50
4	10.81	10.06
5	9.82	9.67
6	12.57	11.57
7	12.11	11.09
8	11.29	10.42
9	12.47	11.37

图 6 为裂纹深度在晶圆表面的等高线分布图. 可以看出,裂纹深度从晶圆圆心到边缘逐渐增大. 〈110〉晶向裂纹深度大于〈100〉晶向,同一晶向上的裂纹深度基本相同. 〈110〉晶向上裂纹深度为 8.00 ~ 14.00 μm, 〈100〉晶向上裂纹深度为 7.00 ~ 12.00 μm. 〈110〉晶向上裂纹深度较大,这是由于〈110〉晶向的断裂强度低于〈100〉晶向,磨削过程产生的裂纹更容易沿着〈110〉晶向扩展^[12],因此〈110〉晶向裂纹深度较大.

图 7 更为清楚地表明了裂纹深度沿径向的变化规律. 〈110〉晶向 1 位置裂纹深度为 1-1、3-1、5-1、7-1 四组试样裂纹深度平均值,其余依次类推. 可以

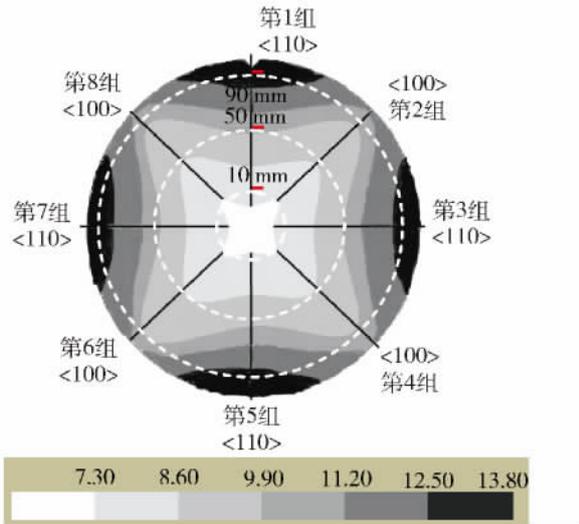


图6 裂纹深度等高线图 (μm)

Fig.6 Distribution of crack depth (μm)

看出,由晶圆圆心到边缘,〈110〉晶向和〈100〉晶向裂纹深度随着距离圆心位置增加单调增大.这是由于砂轮磨粒的磨削深度随着距离圆心位置增加而增大^[7],磨削力随之增大^[16],因此裂纹深度增大.依据上述裂纹深度分布规律,在后续裂纹深度检测时,可以只在〈110〉晶向最外侧位置取样,从而大大减小取样和检测工作量.

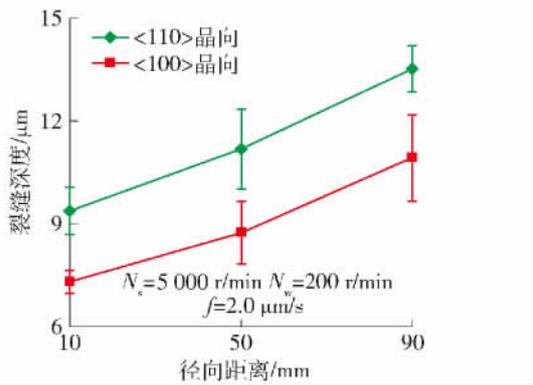


图7 不同径向距离的裂纹深度

Fig.7 Crack depth at different positions

2.3 砂轮进给速率对裂纹深度的影响

裂纹深度与砂轮进给速率之间的关系如图8所示.〈110〉晶向裂纹深度为1-3、3-3、5-3、7-3四组试样裂纹深度均值,〈100〉晶向裂纹深度为2-3、4-3、6-3、8-3四组试样裂纹深度均值.

可以看到,当砂轮进给速率由0.4 μm/s增加到1.2 μm/s时,〈110〉晶向裂纹深度从9.82 μm单调增大到13.44 μm,〈100〉晶向裂纹深度从9.67 μm单调增大到11.13 μm.随着砂轮进给速率的增大,

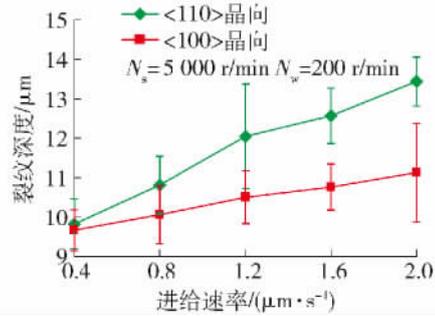


图8 裂纹深度与进给速率的关系

Fig.8 Relationship between crack depth and feed rates

裂纹深度呈单调增加趋势.此外还注意到,在进给速率0.4~1.2 μm/s内,随着进给速率增加裂纹深度增幅较大,而当进给速率大于1.2 μm/s时,裂纹深度增幅趋于减缓.这是因为砂轮进给速率增大时,砂轮与晶圆表面的接触力增大^[16],砂轮的弹性变形增加,导致磨削深度增幅减缓^[17].但总体看来,在其他磨削工艺参数不变的情况下,砂轮进给速率越大,裂纹深度越大.这是因为随砂轮进给速率的增加,磨粒磨削深度增大^[18],材料脆性断裂的趋势增加,裂纹深度也就越大.因此,为了减小晶圆表面裂纹深度,应降低砂轮的进给速率,不过这样会降低磨削除率,延长磨削时间,增加成本.如何平衡上述两方面因素,达到最优磨削效果,还要深入研究磨削参数和裂纹深度之间的内在机理.

2.4 砂轮转速对裂纹深度的影响

保持砂轮进给速率和晶圆转速不变,裂纹深度与砂轮转速的关系如图9所示.

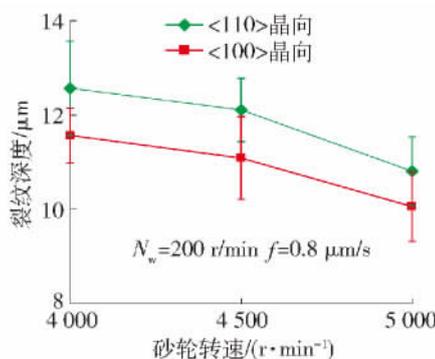


图9 裂纹深度与砂轮转速的关系

Fig.9 Relationship between crack depth and wheel rotation speed

可以看到,〈110〉晶向和〈100〉晶向裂纹深度都随着砂轮转速的增大单调减小.这是因为砂轮转速增大时,砂轮磨粒的磨削深度减小,磨削力随之降

低^[16],从而裂纹深度减小.根据实验结果,磨削过程中可通过增大砂轮转速来减小亚表面裂纹深度,但砂轮转速并不能无限制地增大,砂轮转速过大会降低砂轮主轴性能^[19],从而降低晶圆磨削质量.

2.5 晶圆转速对裂纹深度的影响

保持砂轮进给速率和砂轮转速不变,裂纹深度与晶圆转速的关系如图10所示.

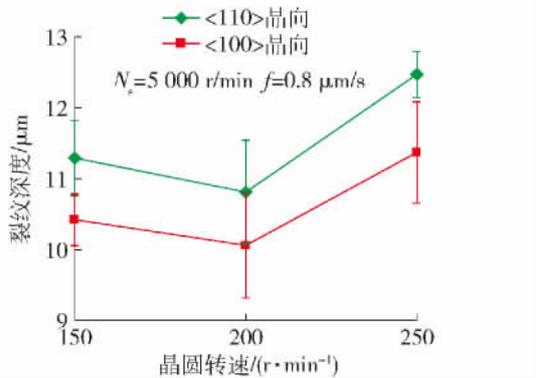


图10 裂纹深度与晶圆转速的关系

Fig. 10 Relationship between cracks depth and wafer rotation speed

根据Zhou等^[7]的磨粒磨削深度模型,随晶圆转速增加,磨粒磨削深度增大,裂纹深度应该增大.本实验结果表明,在转速150~200 r/min内,随晶圆转速增加,裂纹深度减小.但是,在200~250 r/min内,随晶圆转速增加,裂纹深度反而增大.这说明晶圆转速对裂纹深度可能有较复杂的影响.其中一个原因可能是磨削过程中磨削机产生了较大幅度的振动.Chen等^[20]指出磨削机的振动幅度与工件转速有关.工件转速改变时,磨削机的振动幅度变化,振动幅度增大,使得裂纹深度增大,因此实验得到的裂纹深度会与理论预测结果出现偏差.但具体原因,还需进一步研究.

2.6 磨削工艺优化措施

根据实验结果,亚表面裂纹深度随着砂轮进给速率的增加而增大,因此砂轮进给速率越小,磨削质量越好.然而,砂轮进给速率越小,磨削效率越低.裂纹深度随着砂轮转速的增加而减小,因此砂轮转速越高,磨削质量越好.但是,砂轮转速不能无限增大,一方面砂轮转速受到磨削机主轴性能的限制^[19],另一方面砂轮转速也受到砂轮强度的限制.综合考虑磨削效率、磨削机性能和砂轮强度等,可采用分阶段磨削方式,如图11所示.第1阶段,采用较大的砂轮进给速率、砂轮转速和晶圆转速,提高磨削效率,但此阶段会引起较大的裂纹深度.第2阶

段,保持砂轮转速和晶圆转速不变,降低砂轮进给速率,去除第1阶段产生的裂纹,提高磨削质量.第3阶段,保持砂轮转速不变,降低砂轮进给速率和晶圆转速,去除第2阶段产生的裂纹,进一步提高磨削质量.

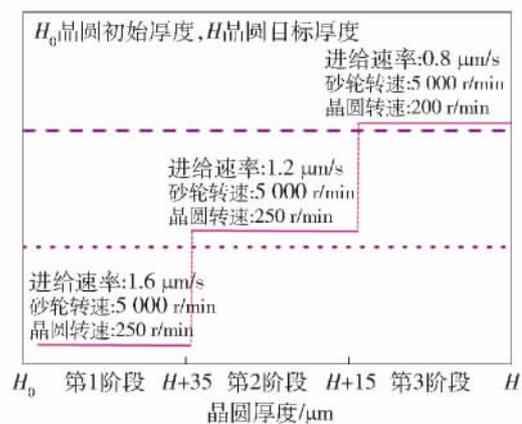


图11 优化的磨削条件

Fig. 11 Optimized grinding condition

3 结论

1) 磨削后晶圆亚表面裂纹形式以斜线裂纹、折线裂纹为主,占70%;中位裂纹、分叉裂纹和横向裂纹占30%.裂纹形状与工艺参数关系不大.

2) 裂纹深度沿径向由晶圆圆心到边缘逐渐增大,<110>晶向裂纹深度稍大于<100>晶向,相同晶向的对称位置上裂纹深度基本相同.

3) 砂轮进给速率越大,裂纹深度越大;砂轮转速越大,裂纹深度越小.

4) 晶圆转速与裂纹深度之间不存在单调变化趋势,随着晶圆转速增大,裂纹深度先减小,后增大.原因需进一步研究.

5) 综合考虑磨削效率、磨削机性能和砂轮强度等因素,提出了分段磨削的方式.

参考文献:

- [1] VAN-ZANT P. Microchip fabrication [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2004: 20-40.
- [2] 吕东喜,王洪祥,黄燕华. 光学材料磨削的亚表面损伤预测[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 680-686.
LÜ D X, WANG H X, HUANG Y H. Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials [J]. Optical Precision Engineering, 2013, 21(3): 680-686. (in Chinese)
- [3] YANG Y, DE MUNCK K, TEIXEIRA R C, et al. Process

- induced sub-surface damage in mechanically ground silicon wafers [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2008, 23(7): 1-10.
- [4] GAO S, DONG Z G, KANG R K, et al. Warping of silicon wafers subjected to back-grinding process [J]. *Precision Engineering*, 2015, 40: 87-93.
- [5] MIZUSHIMA Y, KIM Y, NAKAMURA T, et al. Impact of back-grinding-induced damage on Si wafer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 05GE(4): 1-5.
- [6] NAKAMURA T, MIZUSHIMA Y, KITADA H, et al. Influence of wafer thinning process on backside damage in 3D integration [C]//2013 IEEE International 3D Systems Integration Conference. San Francisco: IEEE Computer Society, 2013: 1-6.
- [7] ZHOU L, TIAN Y B, HUANG H, et al. A study on the diamond grinding of ultra-thin silicon wafers [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(1): 66-75.
- [8] PEI Z J, BILLINGSLEY S R, MIURA S. Grinding induced subsurface cracks in silicon wafers [J]. *Grinding Induced Subsurface Cracks in Silicon Wafers*, 1999, 39(7): 1103-1116.
- [9] 张银霞, 李延民, 郜伟, 等. 硅片自旋转磨削损伤深度的试验研究[J]. *金刚石磨料与磨具*, 2008, 166(4): 47-51.
- ZHANG Y X, LI Y M, GAO W, et al. Experimental investigation on subsurface damage depth of ground silicon wafer in wafer-rotating grinding [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2008, 166(4): 47-51. (in Chinese)
- [10] KARABUTOV A A, PODYMOVA N B. Study on the subsurface damage depth in machined silicon wafers by the laser-ultrasonic method [J]. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014(1): 7-12.
- [11] YOUNG H T, BRENNAN M J, WATERS T P. Surface integrity of silicon wafers in ultra precision machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 29(3/4): 372-378.
- [12] 高尚, 康仁科, 董志刚, 等. 工件旋转法磨削硅片的亚表面损伤分布[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(3): 88-94.
- GAO S, KANG R K, DONG Z G, et al. Subsurface damage distribution in silicon wafers ground with wafer rotation grinding method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3): 88-94. (in Chinese)
- [13] JIAN H, YIN Z M, JIANG F, et al. EBSD analysis of fatigue crack growth of 2124 aluminum alloy for aviation [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(6): 1332-1336.
- [14] LAWN B R, EVANS A G. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1980, 63(9/10): 574-581.
- [15] SURATWALA T, WONG L, MILLER P, et al. Subsurface mechanical damage distributions during grinding of fused silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(52/53/54): 5601-5617.
- [16] WANG D X, GE P Q, BI W B, et al. Grain trajectory and grain workpiece contact analyses for modeling of grinding force and energy partition [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9): 2111-2123.
- [17] AGAWAL S, VENKATESWARA R P. Predictive modeling of undeformed chip thickness in ceramic grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 56: 59-68.
- [18] YOUNG H T, LIAO H T, HUANG H Y. Novel method to investigate the critical depth of cut of ground silicon wafer [J]. *Journal of Materials Process Technology*, 2007, 182(1/2/3): 157-162.
- [19] PEI Z J. A study on surface grinding of 300mm silicon wafers [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42(3): 385-393.
- [20] CHEN J B, FANG Q H, LI P. Effect of grinding wheel spindle vibration on surface roughness and subsurface damage in brittle material grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 91: 12-23.

(责任编辑 杨开英)