

文章编号 1004-924X(2007)07-1084-06

硅晶片的液流悬浮超光滑加工机理与实验

曹志强, 赵继, 陈德祥, 张富

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:建立了基于机器人的液流悬浮超光滑加工系统。配置出了适用的悬浮加工液,通过对硅晶片的大量加工实验研究,得到了加工时间、工具转速和粒子浓度对工件表面质量的影响规律。实验结果表明:当加工时间在60 min、工具转速为6 000 r/min上下、粒子浓度为30 g/L左右时,加工效果最佳。加工后的硅晶片表面粗糙度 R_a 能达到1.55 nm。深入分析了液流悬浮超光滑加工的去机理,硅晶片的液流悬浮超光滑加工是机械冲击作用和化学作用的综合结果,加工液中的磨料颗粒有对工件表面的机械冲击作用和对化学反应的催化作用。理论分析和实验结果表明,通过采用液流悬浮加工新技术,可以实现对半导体材料硅晶片的纳米水平的超光滑加工,获得表面无塑性变形和晶格缺陷的纳米精度表面。

关键词:超光滑加工;液流悬浮;硅晶片;去机理

中图分类号:TN305.2 文献标识码:A

Theory and experiment on hydrodynamic suspension ultra-smooth machining for silicon wafers

CAO Zhi-qiang, ZHAO Ji, CHEN De-xiang, ZHANG Fu

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to realize nano-scale ultra-smooth machining for silicon wafers, a hydrodynamic suspension machining system based on robot was established, and the nanometer SiO_2 suspension liquid with good dispersibility and stability was developed. By conducting experiments, the correlation between the surface roughness of workpiece and the machining time, motor rotate speed, density of abrasive particles were revealed. Experimental results indicate that the machining effects are the best when the machining time, motor rotate speed and density of abrasive particle are 60 min/s, 6 000 r/min and 30 g/L, respectively. The surface roughness after machining can be 1.55 nm. Based on the conducting experiments, the machining mechanism was analyzed. The results show that the hydrodynamic suspension ultra-smooth machining for silicon wafers is the combination of mechanical impacting and chemical function. The nano-scale ultra-smooth surface of silicon wafers can be realized after hydrodynamic suspension machining and high quality surfaces without plastic deformation and damage are achieved.

Key words: ultra-smooth machining; hydrodynamic suspension; silicon wafer; removal mechanism

收稿日期:2006-12-19;修订日期:2007-03-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50175049)

1 引言

半导体基片是大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路或光电元件的主要材料。半导体基片一般均为单晶材料,属于硬脆非金属材料的范畴,加工中对表面粗糙度等级、平面度、平行度等精度的要求很高,对表面质量也要求很高,不能有表面划伤和变质层^[1]。

抛光是制备晶格完整、表面无损伤硅晶片的最后工序,它是半导体器件制造技术中至关重要的一个环节。近年来,抛光技术得到了迅速的发展,其中许多技术已经成熟,如化学机械抛光,磨粒弹性喷射加工,磁流变抛光,离子束抛光,液体喷射抛光等^[2-6]。但由于目前IC器件技术进步很快,对其抛光质量的要求也越来越高,如对抛光片表面的金属杂质污染和颗粒的严格要求和控制等,抛光片表面一旦被颗粒和金属杂质沾污,就会对器件质量产生严重影响(击穿特性、界面态等材料特性和功能,特别是对表面效应型大规模集成电路的影响更大)。因此,可以说抛光硅晶片的表面质量直接关系到集成电路等器件的成品率和产品质量^[7-8]。

本文根据非金属工具与工件自由曲面之间动压作用和弹性发射材料去除原理,构造动压应力场,通过加入适当的母液和纳米磨料,开发一套高效液流悬浮超光滑表面加工系统。通过大量实验,研究各加工参数对工件表面质量的影响规律,并配置出合适的液流悬浮加工液,解决了硅晶片超光滑加工中经常产生的表面划伤、金属离子沾污和保持表面平坦度等问题,获得纳米级的超光滑表面。

2 液流悬浮超光滑加工系统

液流悬浮超光滑加工系统组成为:YR-SV3-J00型机器人、高速电机、聚氨酯加工工具、悬浮加工液、调速装置、计算机、两自由度的XY工作台及硅晶片的夹持装置。高速电机固定在机器人的腕部,电机的转速通过变频调速器进行控制。盛有加工液的容器放置在机床的XY工作台上^[9]。在整个加工过程中工件浸没在悬浮液中,如图1所示。

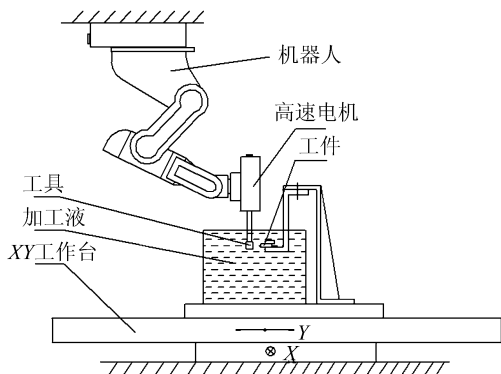


图1 液流悬浮超光滑加工系统示意图

Fig.1 Scheme of hydrodynamic suspension ultra-smooth machining system based on robot

高速电机带动加工工具高速旋转形成加工主运动。XY工作台完成加工时的进给运动,由计算机进行控制。利用与工件表面保持微间隙、且高速旋转的非金属弹性加工工具带动微粒磨料悬浮液高速挤入加工作用微区域,形成液流悬浮应力场,对工件表面产生弹性发射、机械冲击和化学作用等综合作用效应,使工件材料在纳米级超光滑水平。

悬浮液的制备是硅晶片液流悬浮超光滑加工的关键因素之一,它的性能直接决定最终的硅晶片表面质量。液流悬浮加工中的化学作用和机械作用都是由悬浮液提供的。加工硅晶片时对悬浮液的基本要求是:流动性好、不易沉淀和结块、悬浮性能好、无毒、加工速度快、硅晶片表面质量好及利于清洗。

硅晶片中硅为零价,为了有利于材料的去除,需要通过氧化还原反应,用氧化剂将零价硅转化为可溶性的四价化合物,故加工液中应含有氧化剂。氧化剂作用与表面硅原子发生化学反应,首先与表面损伤层部分作用,优先去除损伤层,实现硅晶片表面的光亮。能量粒子的作用是将表面的产物及表面凸处去除,提高硅晶片的平整度,且使化学反应继续进行。为了改善硅晶片表面性能和稳定加工液的颗粒分散性和悬浮性,有时还可掺入一些添加剂,如有机多羟基胺,其羟基的亲水性和胺基的碱性均有利于抛光的速率和质量。由于加工液在存放过程中pH值会发生变化,因此在配制的悬浮液中还需要加入pH稳定剂^[10-11]。

本文实验中的硅晶片液流悬浮超光滑加工,

采用悬浮液由纳米颗粒(SiO_2)、基载液(纯净水)、表面活性剂(烷基醇聚氧乙烯醚 $\text{RO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$)和有机碱(多羟基二胺)等四部分组成,其配制流程如图 2 所示:

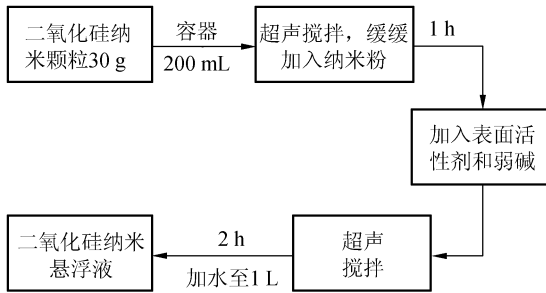


图 2 液流悬浮加工液的配制流程

Fig. 2 Confecting flow of suspension&turbid liquid

3 液流悬浮超光滑加工实验及其结果

在硅晶片液流悬浮加工实验中,加工工具采用直径 $\Phi 40$ mm 的圆柱型聚氨脂轮,由高速电机驱动。工具外表面与工件表面的距离为 $50\ \mu\text{m}$ 左右,硅晶片原始表面粗糙度平均值为 $20\ \text{nm}$ 。电机的最高频率为 $600\ \text{Hz}$,转速可以在 $0\sim 18\ 000\ \text{r/min}$ 的范围内进行变频调节。

在进行大量探索性预实验的基础上,选取最佳的参数,对硅晶片进行液流悬浮加工实验,得到了加工时间、工具转速和粒子浓度与加工效果之间的关系结果。

3.1 加工时间对工件表面质量的影响

实验条件:纳米 SiO_2 颗粒含量为 $30\ \text{g/L}$ 、pH 值为 12 的悬浮液,转速 $6\ 000\ \text{r/min}$ 。测得的表面粗糙度值与加工时间的关系曲线如图 3 所示。从图中可以看出,表面粗糙度随加工时间增加而逐渐降低,但在 $60\ \text{min}$ 以后,表面粗糙度值基本保持不变,也就是达到了液流悬浮加工的极限。这与传统抛光中加工时间对表面粗糙度的影响规律一致。

3.2 工具转速对工件表面质量的影响

实验条件:纳米 SiO_2 颗粒含量为 $30\ \text{g/L}$ 、pH 值为 12 的悬浮液,加工时间 $60\ \text{min}$ 。测得的表面粗糙度值与加工工具转速的关系曲线如图 4 所示。

从图中可以看出,加大电机的转速在一定范

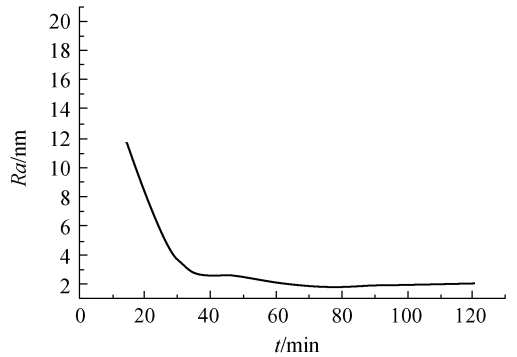


图 3 加工时间对工件表面粗糙度的影响

Fig. 3 Influence of machining time on surface roughness

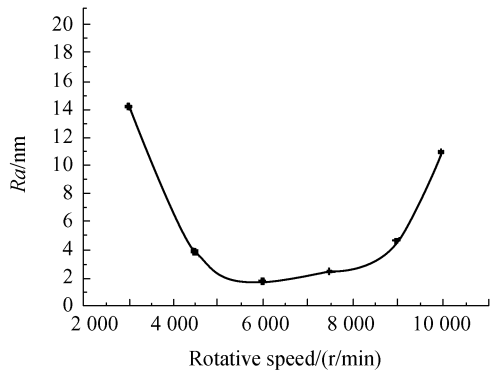


图 4 加工工具转速对工件表面粗糙度的影响

Fig. 4 Influence of motor rotative speed on surface roughness

围内能提高加工能力,但若速度增加过大,会产生两方面的负面影响。一方面,由于加工工具为软质材料,若转速太高,则离心力加大,会使圆柱型聚氨脂工具产生严重变形,致使加工工具与被加工表面直接接触,发生摩擦,出现大量的划痕,破坏工件的表面质量。另一方面,过高的转速会使抛光压力增加,从而使纳米 SiO_2 颗粒具有过大的能量,对工件表面冲击力过大,影响工件表面加工效果。

3.3 粒子浓度对工件表面质量的影响

实验条件:pH 值为 12 的悬浮液,加工时间 $60\ \text{min}$,转速 $6\ 000\ \text{r/min}$ 。通过实验测得的表面粗糙度值与粒子浓度的关系曲线如图 5 所示。

从图中可以看出,随着悬浮液的浓度增加,表面粗糙度降低,因为悬浮液浓度的增加使工件单位面积上受到的剪切力和压力增大,这说明适度增加悬浮液的浓度能够提高表面粗糙度。但并

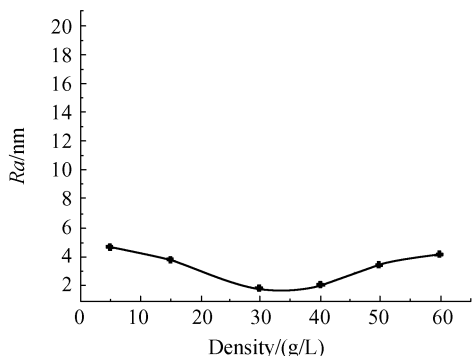


图5 粒子浓度对工件表面粗糙度的影响

Fig. 5 Influence of abrasive density on surface roughness

不是说悬浮液的浓度越高越好,因为浓度增大,悬浮液的流动性变差,甚至会有小的团聚现象产生,因而工件的表面质量不能得到保证,会出现图中显现的现象,浓度超过一定程度时,工件的表面粗糙度反而有下降的趋势,因此选择合适的浓度为30 g/L。

3.4 工件表面的微观形貌

实验条件:pH值为12的悬浮液,加工时间60 min,转速6 000 r/min,工具进给速度90 $\mu\text{m/s}$ 。硅晶片原始表面粗糙度的平均值为22.18 nm,其表面三维形貌如图6所示。加工后的硅晶片表面粗糙度Ra为1.55 nm,其表面三维形貌如图7所示。从图中可以看出,加工后的工件表面与原始表面相比,表面粗糙度有很大提高。

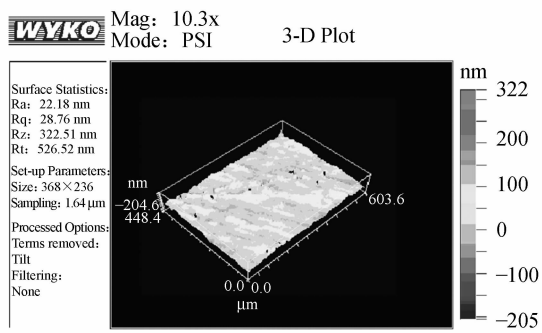


图6 加工前的硅晶片表面三维形貌

Fig. 6 3-dimensional view of original surface

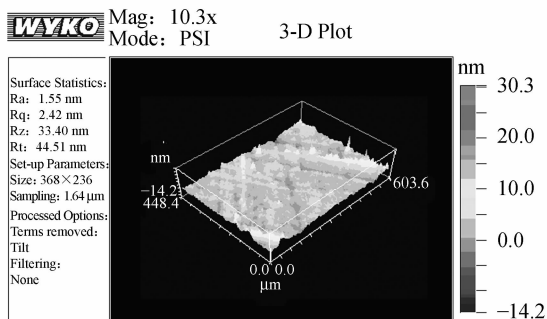
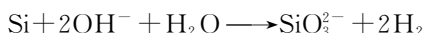


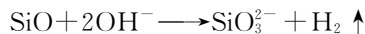
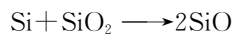
图7 加工后的硅晶片表面三维形貌

Fig. 7 3-dimensional view of processed surface

杂的多相反应,它存在着两个过程:(1)液流悬浮加工首先使吸附在加工液中的氧化剂、催化剂等与硅晶片表面的硅原子在表面进行氧化还原的过程,这是化学作用为主体。(2)加工工件表面反应物脱离硅晶片表面,即解吸过程,使未反应的硅晶重新裸露出来的过程。悬浮加工液在聚胺酯旋转工具的带动下连续流动,硅晶片表面的反应产物被不断地剥离掉,新加工液补充进来,反应产物随加工液被带走。新裸露的硅原子又被氧化,反应产物再被剥离下来循环往复,从而达到超光滑加工的目的。其化学作用主要反应为加工液中碱液对硅晶片表面的腐蚀反应^[12]:



同时,加工液中 SiO_2 纳米颗粒除有冲撞、摩擦作用外还有引发催化的作用, SiO_2 (四价硅)在加工温度下与硅反应生成 SiO (二价硅),生成的 SiO 再与碱进行氧化还原反应,反应方程式如下^[13-14]:



聚氨酯工具的高速旋转使其周围的悬浮加工液在工具的外表面与工件表面之间产生弹性动压流,弹性动压流不断地将悬浮液中的纳米颗粒带入工具与工件之间的微小间隙,此时,弹性动压流一方面给纳米颗粒提供足够的能量使纳米颗粒不断地冲撞工件表面的原子。另一方面,在工件表面与聚氨酯工具外表面之间形成一个梯度动压场,压力场近似与工件表面垂直分布。当纳米颗粒的悬浮液被送到加工位置时,在梯度动压场的作用下发生流变,在加工区域形成软固态凸起,凸起相当于一个柔性的“磨头”,由于“磨头”与工件

4 加工机理分析

硅晶片液流悬浮超光滑表面加工是一个复

表面具有快速的相对运动,产生剪切力。硅晶片表面由于受到弱碱性的腐蚀,表面原子层的结合能减弱,伴随着摩擦和剪切应力的作用,促使硅晶片表面层的晶格变形以及表面的局部去除。

5 结 论

采用本文建立的基于机器人的液流悬浮超光滑加工系统,对半导体材料硅晶片进行了理论和实验研究。加工机理分析表明,硅晶片液流悬浮超光滑表面加工中是一个复杂的多相反应的化学作用,并且悬浮加工液中的磨料颗粒有对工件表面的机械冲击作用和对化学反应的催化作用,实现对工件表面的纳米级去除。通过实验研究,

分别得到了加工时间、工具转速和粒子浓度对材料表面质量的影响规律。结果表明,表面粗糙度随加工时间增加而逐渐降低,但当加工时间在 60 min 以后,由于受加工条件的限制,加工能力达到一定极限,因此表面粗糙度值基本保持不变;工具转速为 6 000 r/min 上下时,既可保证磨粒获得足够的冲击速度,又能避免速度过高造成的负面影响,所以加工效率最好;粒子浓度为 30 g/L 左右时,能保证工件单位面积上所受的作用力,实现材料的去除,加工效果明显,而且不会出现磨粒团聚、划伤工件表面,降低工件表面质量的现象。经过液流悬浮超光滑加工后,得到了表面粗糙度 R_a 为 1.55 nm、表面无塑性变形和晶格缺陷的纳米级精度表面。

参考文献:

- [1] LING Y, ZHANG K L, WANG F, *et al.*. Investigation on the final polishing slurry and technique of silicon substrate in ULSI [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003 (66): 438-444.
- [2] 王亮亮, 路新春. 硅片化学机械抛光中表面形貌问题的研究[J]. *润滑与密封*, 2006(2): 66-68.
WANG L L, LU X CH. Research on surface topography of silicon wafer in chemical-mechanical polishing [J]. *Lubrication Engineering*, 2006(2): 66-68. (in Chinese)
- [3] JEONG-DU K. Motion analysis of powder particles in EEM using cylindrical polyurethane wheel[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002,42: 21-28.
- [4] 张峰, 张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. *光学 精密工程*, 2005,13(1):34-39.
ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 34-39. (in Chinese)
- [5] B S HAN I Z. Deformation and material removal rate in polishing silicon wafers[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003,140(9): 641-645.
- [6] 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析[J]. *光学 精密工程*, 2006,14(2):218-223.
FANG H, GUO P J, YU J CH. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2): 218-223. (in Chinese)
- [7] SANZ-NAVARRO C F, KENNY S D, SMITH R. Atomistic simulations of structural transformations of silicon surfaces under nanoindentation[J]. *Nanotechnology*, 2004(15): 692-697.
- [8] 吴东江, 许媛, 王续跃, 等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分析[J]. *光学 精密工程*, 2006,14(5): 764-770.
WU D J, XU Y, WANG X Y, *et al.*. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al_2O_3 particle on silicon wafer surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5): 764-770. (in Chinese)
- [9] ZHAO J, CAO Z Q, ZHAN J M, *et al.*. Research on hydrodynamic suspension nano-scale polishing for K9 optical glass[C]. *Proceedings of International Conference on Surface Finishing Technology and Surface Engineering*, Dalian, P. R. China: ICSFT, 2006: 273-279.
- [10] 梁治齐, 宗惠娟, 李金华. 功能性表面活性剂[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.
LIANG ZH Q, ZONG H J, LI J H. *Functional Surface Activator* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002. (in Chinese)

- [11] 许珂敬,许煜汾.表面活性剂在制备 ZrO_2 微粉中的作用[J].材料研究学报,1999,13(4): 434-436.
XU K J, XU Y F. Role of surfactant in preparing ZrO_2 ultra fine powders[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1999,13(4): 434-436. (in Chinese)
- [12] COOK L M. Chemical processes in glass polishing[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1990,120:152-171.
- [13] CHARLES R J. Static fatigue of glass. I[J]. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29 (11): 1549-1553.
- [14] CLARK D E. Corrosion of glass surfaces[J]. *Surface Science*, 1980,100: 53-70.

作者简介:曹志强(1980—),男,江西九江人,现在吉林大学攻读博士学位,主要从事智能精密制造和微纳米加工技术方面的研究。E-mail: czqjlu@yahoo.com.cn

赵继(1959—),男,教授,吉林大学机械科学与工程学院博士生导师,研究方向为智能精密制造和生物制造技术。E-mail: Jzhao@jlu.edu.cn