

文章编号:1006-852X(2011)01-0053-05

金刚石线锯切割单晶硅表面缺陷与锯丝磨损分析*

黄波^{1,2} 高玉飞^{1,2} 葛培琪^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061)

(2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

摘要 采用电镀金刚石线锯对单晶硅进行了锯切实验,使用扫描电子显微镜对单晶硅锯切的表面缺陷与锯丝失效机理进行了研究,分析了走丝速度和工件进给速度对锯切单晶硅表面缺陷特征的影响。分析发现:线锯锯切的硅片表面缺陷主要有较长较深的沟槽、较浅的断续划痕、材料脆性去除留下的表面破碎及个别较大较深的凹坑。走丝速度增大,工件进给速度降低,锯切材料的表面缺陷逐渐由以脆性破碎凹坑为主转,变为以材料微切削去除留下的塑性域剪切沟槽为主。锯丝的主要失效形式为金刚石磨粒的脱落,脱落的磨粒在锯切过程中被挤压嵌入加工表面造成较大尺寸较深的凹坑,对材料表面和亚表面质量的损害更为严重。

关键词 金刚石线锯;单晶硅;表面缺陷;磨损

中图分类号 TQ164;TG74 **文献标识码** A **DOI编码** 10.3969/j.issn.1006-852X.2011.01.013

Study on surface defect and wire wear mechanism during single crystal silicon slicing with electroplated diamond wire saw

Huang Bo^{1,2} Gao Yufei^{1,2} Ge Peiqi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture(Shandong University),
Ministry of Education, Jinan 250061, China)

Abstract Based on the experiments of slicing single crystal silicon with electroplated diamond wire saw, the surface defects of sawed silicon crystal and wire failure mechanism were analyzed using the scanning electron microscope (SEM). The influences of wire speed and workpiece feed speed on surface defect features were discussed. The analysis results show that the surface defects include some obvious grooves, intermittent scratch marks, brittle fracture or brittle crash, and some relatively larger and deeper pits. When wire speed increases and workpiece feed speed decreases, the surface defect features change from brittle fracture pits to ductile sheared microgrooves induced by diamond ductile cutting action. The main wear mechanism of electroplated diamond wire is pullout of abrasive grits. These pulled out grits are likely to be then inlaid into the surface of silicon to generate large and deep pits and affect the quality of surface and subsurface.

Keywords diamond wire saw; single crystal silicon; surface defect; wear

* 济南市科技计划资助项目(项目编号:200906031)

0 引言

单晶硅材料广泛地应用于各种微电子领域,如计算机系统、通讯设备、汽车、消费电子系统和工业自动控制系统等。集成电路制造中普遍采用的芯片,其制造工艺流程为:单晶生长→磨外圆→硅晶体切片→平坦化→腐蚀→抛光→清洗→图案制造→背磨→划片→封装^[1]。切片是把单晶硅由硅棒变成硅片的一个重要工序,切片表面质量,直接影响着后续工序的工作量和成本。如切片的表面质量好,亚表面损伤层厚度就小,可减小后续工序的去除量,从而降低成本、提高效率。固结磨料线锯切片技术,以其锯口损耗小、面形精度好和切割环境清洁等优点^[2],有望成为单晶硅等硬脆材料切片的未来发展方向。本文选择电镀金刚石锯丝作为锯切工具,对单晶硅进行了锯切实验,利用扫描电子显微镜对切割的硅片表面进行了观察,系统研究了锯切硅片表面产生的缺陷与锯切工艺参数之间的关系,其结果为获得高质量的锯切工艺,进一步优化工艺参数,提供了实验参考依据。本文观察分析了电镀金刚石锯丝的磨损形式,揭示了锯丝失效机理,并分析了锯丝失效与锯切表面缺陷之间的联系。

1 电镀金刚石线锯锯切实验

1.1 实验方法

锯切试验选用 WXD170 型往复式金刚石线切割机,图 1 为此切割装置的外观。试验装置采用气动装置来调节锯丝的张紧力。冷却液的供液方式采用微型潜水循环泵,通过喷嘴浇注,向锯丝切割区供给冷却液。

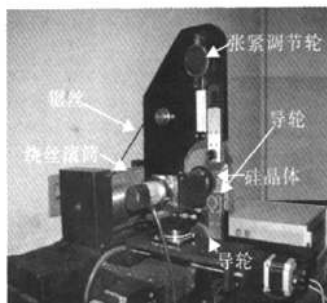


图 1 往复式线锯切片装置

Fig.1 Reciprocating wire saw apparatus for slicing experiments

1.2 实验方案

实验选用电镀金刚石锯丝,锯切的单晶硅棒为 $\phi 45$ mm,锯切方向沿(111)晶面,切片厚度为 0.5 mm,采用水作冷却液。加工参数与锯切条件如表 1 所示。使用日立 S-2500 型扫描电子显微镜(SEM),观察切割的硅片表面缺陷与锯丝的磨损形态。

表 1 锯切条件与加工参数

锯切条件	加工参数
锯丝直径 d/mm	0.28
磨粒尺寸 $S/\mu\text{m}$	30-40
锯丝长度 L/m	50
张紧压力 P/N	30
走丝速度 $v_s/(\text{m/s})$	1, 1.5, 2
工件进给速度 $v_w/(\mu\text{m/s})$	1.0, 2.5, 6.25

2 实验结果与讨论

2.1 锯切单晶硅表面缺陷

图 2 是采用几种不同工艺参数组合锯切的单晶硅表面形貌的 SEM 照片。由图 2 可以看出,电镀金刚石线锯锯切单晶硅的表面缺陷,主要有较长较深的沟槽、较浅的断续划痕、材料脆性去除留下的表面破碎及个别较大较深的凹坑。

锯切过程中锯丝为往复式运转,当锯丝要换向运转时,此时线速为零,而工件依然在进给,锯丝弹性变形增大,使此时的锯切力变大,因此锯切表面容易产生较深沟槽^[3]。锯丝上磨粒凸出高度不均或黏附在锯丝上的切屑随锯丝运动时,在加工表面会产生沟槽和划痕;再就是锯丝随机的振动,会导致金刚石磨粒在材料表面任意地产生断续划痕。一些较浅的划痕也可能是个别出露高度低磨粒进行塑性域切削的结果。工件表面残留大量的破碎凹坑,呈弹坑状的表面形貌,可说明材料主要是在脆性方式下去除,切屑的形成是裂纹扩展交叉的结果,材料最终以微观与宏观破碎的块状去除。显然,破碎凹坑对锯切表面亚表面的损伤程度要大于表面划痕。

硅片切割表面上存在个别较大较深的凹坑,见图 2b,可能是由于在切割过程中,脱落的金刚石磨粒被挤压嵌入加工表面所造成,对材料表面和亚表面质量的损害更为严重。

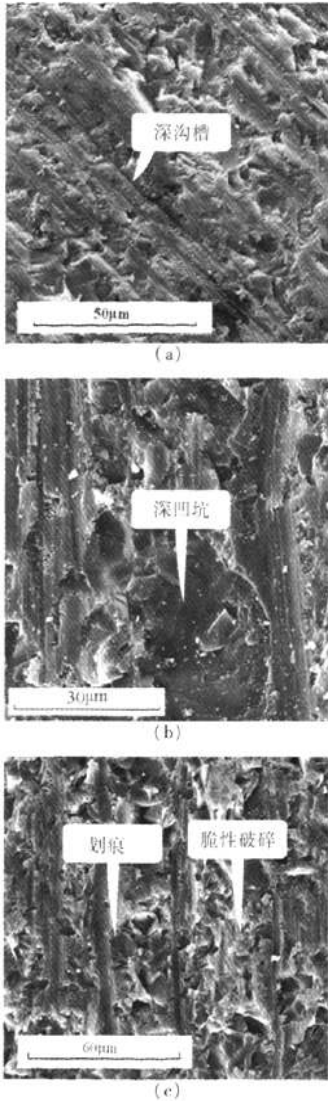


图2 锯切硅片表面缺陷特征
Fig.2 Defect on the sawed surface

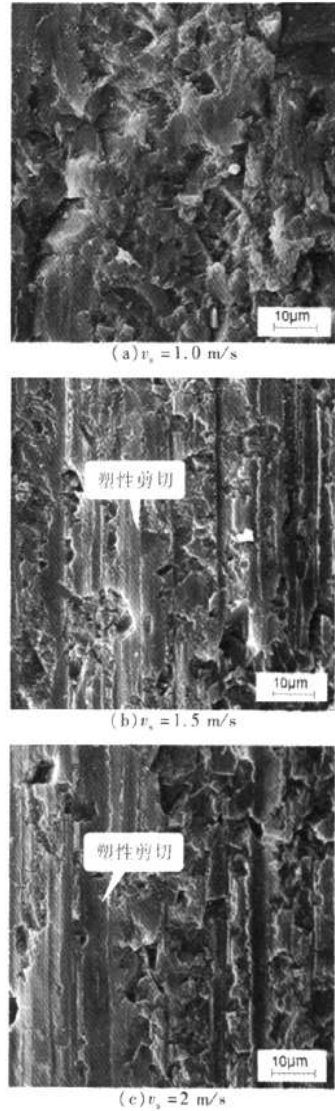


图3 走丝速度对锯切表面缺陷特征的影响
($v_w = 6.25 \mu\text{m/s}$)

Fig.3 Influence of wire speed on characteristics of surface defect

2.2 走丝速度对锯切表面缺陷特征的影响

图3是工件进给速度为 $6.25 \mu\text{m/s}$, 采用不同的走丝速度锯切单晶硅产生的表面缺陷。当走丝速度 1.0 m/s 时, 锯切表面存在明显的脆性断裂、破碎和凹坑, 使表面呈现大量凹坑交错的形貌。加工后晶片的表面, 主要由材料的脆性断裂面构成, 断裂面随机分布, 不具有明显的方向性, 表面比较粗糙。这些现象说明: 在此工艺参数组合下的晶片表面, 是由材料完全脆性去除方式形成的, 在锯切表面留下的缺陷为脆性破碎凹坑, 损伤深度较大。

保持进给速度不变, 当锯丝速度 1.0 m/s 增大到 1.5 m/s 时, 从图3a到3b, 此时锯切表面依然存在大量脆性破碎, 但破碎凹坑的尺寸及深度减小, 锯切表面出现了部分塑性剪切形成的沟槽, 这是因为锯丝速度的提高能增加单位时间内参加切削的磨粒数, 从而使得单颗磨粒单位时间内的平均材料去除率降低。但此时加工表面的材料去除依然以脆性为主, 磨粒塑性剪切或犁耕作用形成的沟槽在加工表面为辅。此时锯切材料的表面缺陷同时存在脆性破碎与塑性划痕, 脆性破碎的深度要大于塑性划痕。锯丝速度由 1.5 m/s 增大到 2 m/s 时, 晶片的表面缺陷并没有明显的变化, 如图3b和3c。