

文章编号 1004-924X(2017)10-2689-08

硅片低损伤磨削砂轮及其磨削性能

王紫光, 高尚, 朱祥龙, 董志刚, 康仁科*

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对传统金刚石砂轮磨削硅片存在的表面/亚表面损伤问题,研制了一种用于硅片化学机械磨削加工的新型常温固化结合剂软磨料砂轮。根据化学机械磨削加工原理和单晶硅的材料特性,设计的软磨料砂轮以氧化铈为磨料,二氧化硅为添加剂,氯氧镁为结合剂。研究了软磨料砂轮的制备工艺,分析了软磨料砂轮的微观组织结构和成分。通过测量加工硅片的表面粗糙度、表面微观形貌和表面/亚表面损伤,进一步研究了软磨料砂轮的磨削性能。最后,与同粒度金刚石砂轮磨削和化学机械抛光(CMP)加工的硅片进行了对比分析。结果表明,采用软磨料砂轮磨削的硅片其表面粗糙度 $R_a < 1$ nm,亚表面损伤仅为深度 < 30 nm 的非晶层,远好于金刚石砂轮磨削硅片,接近于 CMP 的加工水平,实现了硅片的低损伤磨削加工。

关键词:单晶硅;软磨料砂轮;化学机械磨削;表面粗糙度;表面/亚表面损伤

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2689

Grinding wheel for low-damage grinding of silicon wafers and its grinding performance

WANG Zi-guang, GAO Shang, ZHU Xiang-long, DONG Zhi-gang, KANG Ren-ke*

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: Kangrk@dlut.edu.cn

Abstract: A new Soft Abrasive Grinding Wheel (SAGW) was developed for Chemo-mechanical Grinding (CMG) of silicon wafers to overcome the surface/subsurface damage of the silicon wafer machined by traditional ultra-precision grinding. According to the principle of the CMG and the material characteristics of monocrystalline silicon, the SAGW took the cerium oxide (CeO_2) as abrasive, silicon dioxide (SiO_2) as additive, and the chlorine oxide magnesium as binding agent. The preparation process of the SAGW was investigated, and its microstructure and composition were analyzed. By measuring the surface roughness, surface microstructure and the surface/subsurface damage, the grinding performance of the SAGW was further explored. In the end, fabricated silicon wafer with the same particle size by the SAGW, Chemical Mechanical Polishing (CMP) and diamond grinding wheel was compared and analyzed. The results show that the surface roughness of the silicon wafer by the SAGW is less

收稿日期: 2017-04-28; 修订日期: 2017-05-19.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目资助项目(No. 91023019); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(No. 51621064); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51505063); 国家科技重大专项(02 专项)资助项目(No. 2014ZX02504001); 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB1102205)

than 1 nm and its subsurface damage layer is about 30 nm in thickness, which is comparable to that produced by the CMG and much better than that of the diamond wheel. This study demonstrates that the developed SAGW achieves the low-damage grinding of silicon wafers.

Key words: monocrystalline silicon; soft abrasive grinding wheel; chemo-mechanical grinding; surface roughness; surface/subsurface damage

1 引言

单晶硅片是集成电路制造最重要的衬底材料,其加工精度和表面/亚表面质量直接影响器件的使用性能、成品率和使用寿命。随着集成电路特征尺寸的不断减小,对硅片的表面/亚表面质量提出了越来越高的要求。在集成电路制造过程中,基于工件旋转磨削原理的超精密磨削技术是硅片平整化加工和图案硅片背面减薄加工的重要加工方法^[1-2]。然而,目前硅片超精密磨削加工主要采用超硬磨料的金刚石砂轮,即使是超细粒度金刚石砂轮的延性域磨削加工,也不可避免地会在硅片的表面/亚表面产生划痕、位错、非晶层等损伤,还需要后续的化学机械抛光(CMP)去除磨削损伤。也就是说,磨削硅片的表面/亚表面损伤极大地影响了后续工艺的加工效率^[3-7]。

在探索硅片低损伤磨削方法的过程中,Zhou 等^[8]提出了化学机械磨削(CMG)的新方法,其原理是通过降低磨粒的硬度和引入摩擦激发的固相化学反应来弱化传统超硬磨料磨削加工中的机械作用,进而减小磨削产生的损伤,并研制了树脂结合剂软磨料砂轮,利用该砂轮磨削硅片的表面/亚表面质量能够达到了 CMP 的加工效果。Tian 等人^[9]研究了软磨料砂轮化学机械磨削硅片过程中的表面微观形貌变化过程和材料去除率随表面粗糙度的变化关系,并进一步分析了化学机械磨削加工的材料去除机理。Huang 等人^[10]对比了软磨料化学机械磨削和超细金刚石砂轮磨削硅片的亚表面损伤特性,证明了软磨料砂轮化学机械磨削能够实现硅片的低损伤加工。Gao 和 Kang 等^[11]研制了不同磨料的树脂结合剂软磨料砂轮,并通过硅片磨削试验对比了不同磨料软磨料砂轮磨削硅片的表面粗糙度、表面/亚表面损伤和材料去除率等,证明了采用 CeO₂ 和 MgO 作为磨料的软磨料砂轮的磨削性能最好。尽管前期的研究已经证明了使用软磨料砂轮的化学机械磨削技术能

够实现硅片的低损伤磨削加工,然而,目前硅片化学机械磨削加工使用的砂轮均为热压工艺制作的树脂结合剂软磨料砂轮,存在气孔率极低、自锐性差等问题,导致砂轮在磨削过程中极易发生烧伤、堵塞和磨削硅片表面/亚表面质量不稳定等现象^[8,11]。因此,针对化学机械磨削加工使用的软磨料砂轮还需进行深入的研究。

鉴于上述情况,本文在前期研究基础上,根据化学机械磨削加工原理和单晶硅的材料特性,设计了软磨料砂轮的组成成分,研制出一种新型常温固结结合剂软磨料砂轮。通过对硅片进行了软磨料砂轮磨削试验并与金刚石砂轮磨削和化学机械抛光的硅片加工效果进行了对比分析,同时研究了软磨料砂轮的磨削性能。

2 试验研究过程

2.1 软磨料砂轮组织成分设计及其制造方法

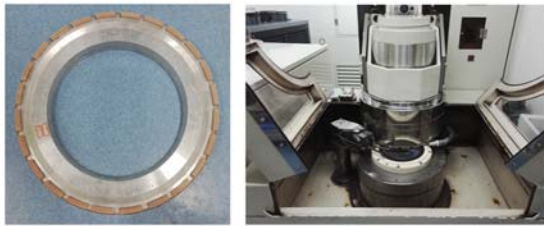
对化学机械磨削技术加工原理的研究表明,要实现硅片的超光滑低损伤磨削加工,研制的软磨料砂轮需满足以下要求:(1)磨料硬度低于单晶硅硬度,还能够与单晶硅发生固相化学反应;(2)添加剂能够改善砂轮特性(如气孔率、硬度等);(3)结合剂能够保证砂轮具有一定的强度和良好的自锐能力。

软磨料砂轮由砂轮块和砂轮基体组成,其中砂轮块的成份选用氯氧镁(MOC)为结合剂,氧化铈(CeO₂)为磨粒,纳米二氧化硅(SiO₂)为添加剂。砂轮基体的材料为比重轻、强度高、可加工性好的锻造铝合金,砂轮块以一定间距黏结在砂轮基体上,形成杯形砂轮结构。由于砂轮块的齿厚和齿高会影响其自身强度、寿命以及磨削过程中的磨削力和磨削热,综合考虑各种因素,设计砂轮块的齿厚和齿高分别为 7.5 mm 和 7 mm。

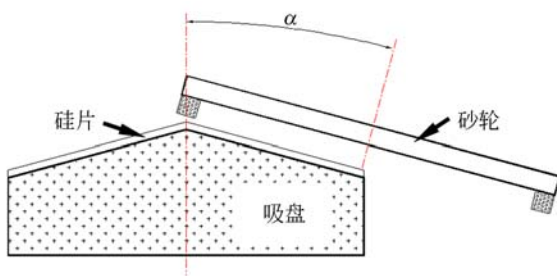
MOC 结合剂主要是由氧化镁(MgO)粉末与不同浓度的氯化镁(MgCl₂)水溶液混合后,在常温条件下固化形成的 5Mg(OH)₂ · MgCl₂ ·



(a) 氯氧镁结合剂砂轮块
(a) MOC bond abrasive segments



(b) 研制的砂轮 (c) 磨削装置
(b) Developed SAGW (c) Grinding set-up



(d) 半接触磨削原理
(d) Principle of half contact grinding

图 1 试验装置和方法

Fig. 1 Grinding set-up and method

$8\text{H}_2\text{O}$ ($5 \cdot 1 \cdot 8$ 相) 或 $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ($3 \cdot 1 \cdot 8$ 相) 结晶相结构, 这种相结构使 MOC 结合剂砂轮块具有一定的硬度和抗弯强度, 同时, MOC 结合剂还能够使砂轮块具有较高的孔隙率、自锐性以及优良的耐热性能, 因此 MOC 结合剂能够满足磨削过程中砂轮的使用要求。MOC 结合剂制备过程中形成的结晶相 ($5 \cdot 1 \cdot 8$ 相或 $3 \cdot 1 \cdot 8$ 相) 由参与水合反应的 MgO 、 MgCl_2 和 H_2O 的含量决定, 由于 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 比 $3 \cdot 1 \cdot 8$ 相具有更好的物理性能和机械性能^[12]。因此, 需要保证 MOC 结合剂在制备过程中能够形成更多的 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 相, 而形成更多 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 相 MOC 结合剂的方法是改变 MgO 与 MgCl_2 的摩尔比, MgO 和 MgCl_2 的摩尔比越大, 越容易形成更多的 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 相。但是, 当 MgO 的含量过多时, MOC 结合剂中可能会生成更多的 Mg

$(\text{OH})_2$, 这会导致 MOC 结合剂自身体积发生膨胀, 使砂轮块内部产生微裂纹, 进而降低砂轮块的强度; 同时, 过多的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 还会使 MOC 结合剂的碱性增强, 因此为了控制 MOC 结合剂中 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 相的含量以及砂轮块的强度和碱性, 需要对 MgO 和 MgCl_2 的摩尔比进行严格控制^[12], 本文采用 MgO 和 MgCl_2 的摩尔比为 7。此外, 在 MOC 结合剂的制备过程中只有活性的 MgO 粉末才能够参与水合反应, 所以 MgO 粉末在使用前必须进行活性度测试, 本试验中使用的 MgO 经测试后确定的活性约为 85%。由于非活性的氧化镁不参与反应, MOC 结合剂体系中, 除了 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 或 $3 \cdot 1 \cdot 8$ 相以及少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的胶凝体外还具有一定量的无活性 MgO 粉末, 该 MgO 粉末在实际磨削过程中将起到一定的磨削作用, 并且 MgO 的硬度的硬度 (努氏硬度为 600 kg/mm^2) 小于单晶硅 (努氏硬度为 1150 kg/mm^2), 不会对单晶硅表面/亚表面造成损伤。选用的 CeO_2 磨粒平均粒径约为 $3 \mu\text{m}$, CeO_2 磨粒的硬度接近单晶硅, 不易造成硅片表面的划伤, 通过 MOC 结合剂提供的弱碱环境和添加剂的促进作用更有利于其与硅之间的固相化学反应。选用的 SiO_2 的平均粒径约为 30 nm , 纳米二氧化硅添加剂的使用会使得 MOC 结合剂中的一些 Cl^- , OH^- 以及 Mg^{2+} 吸附更多 SiO_2 纳米颗粒, 能够在 $5 \cdot 1 \cdot 8$ 相的周围形成凝胶状物质, 从而提高了 MOC 结合剂的耐水性以及强度^[13], 并且在一定条件下 SiO_2 能够与 Si 之间发生摩擦化学反应, 弱化了硅的化学键强度, 而软磨料砂轮加工过程中, 砂轮与硅片之间的闪点温度以及湿度能够满足上述条件, 因此, 加入纳米 SiO_2 添加剂有助于提高硅片表面的化学活性^[14]。在砂轮块制造过程中, 由于 CeO_2 和 SiO_2 的粒径较小, 比表面积很大, 在混料过程前需要额外的水进行润湿, 润湿用水量需要严格计算。为了保证 MOC 结合剂中微观组织结构分布均匀, 同时考虑磨料和添加剂完全分散, 先将配制好的 MgCl_2 溶液和 MgO 拌合, 待结合剂混合均匀后, 再将润湿后的 CeO_2 和 SiO_2 加入结合剂中进一步拌合。为了去除粉料中的大磨粒和水分, 粉料在使用前需要进行过筛和干燥处理。混合好的浆料固化温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 固化时间为 24 h , 然后置于常温固化 7 d , 将硬化后的磨块使用环氧树脂胶水黏结至铝合金基体上,

再对砂轮块组成的杯形磨料层进行端面和内、外圆磨削,保证杯形磨料层的几何尺寸精度。最后,对砂轮进行动平衡测试。制备的砂轮块和杯型砂轮如图 1(a)和(b)所示。

2.2 磨削试验与测试方法

磨削试验在基于工件自旋转磨削原理的 VG 401 MK II 型超精密磨床(Okamoto,日本)上进行,其装置如图 1(c)所示,磨削试样为商用 $\Phi 150 \text{ mm} \times 620 \mu\text{m}$ 的(100)P 型单面抛光硅片。硅片采用真空吸附的方法固定多孔陶瓷吸盘上,通过调整主轴倾角使得杯形砂轮与硅片为半接触方式,如图 1(d)所示。硅片先由 #3000 金刚石砂轮进行精磨,然后由 CMG 砂轮进行磨削加工,由于 CMG 砂轮磨削硅片的总去除量少(小于 $5 \mu\text{m}$)、去除率低,因此采用恒电流磨削方式(调整砂轮主轴进给量控制主轴电流为定值)。金刚石砂轮和 CMG 砂轮磨削试验采用的加工参数如表 1 所示。

表 1 硅片磨削试验参数

Tab. 1 Grinding conditions employed in experiments

磨削参数	金刚石砂轮	CMG 砂轮
砂轮转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 399	399
工件转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	120	20
进给速度/($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	20	-
启动电流/A	6.4	7.9
磨削电流/A	7.1	9.8
冷却水	去离子水	去离子水

磨削硅片和 CMG 砂轮块的表面微观轮廓采用 Quanta Q45 扫面电子显微镜(SEM)(FEI,美国)观测,CMG 砂轮块的成份利用 X 射线衍射仪(XRD)Empyrean(PANalytical,荷兰)和 X 射线能谱仪(EDS)(EDAX,美国)检测,磨削硅片的亚表面损伤采用 Tecnai G220 S-Twin 透射电子显微镜(TEM)(FEI,美国)检测,表面粗糙度值利用 NV5000 5022 白光干涉表面轮廓仪(Zygo,美国)测量。

3 结果与讨论

3.1 CMG 砂轮的表面形貌和组织成份

图 2 和图 3 分别为 CMG 砂轮块表面的 XRD 检测结果和 SEM 观测图像。由图 2 可知,CMG 砂轮块中 MOC 结合剂的结晶相结构主要以 $5 \cdot 1$

8 相为主,砂轮块中还含有大量的 CeO_2 磨料,同时还含有少量的 MgO ,这些 MgO 主要来自砂轮配方中剩余的非活性 MgO ,它们能够与 CeO_2 共同充当砂轮的磨料。此外,在砂轮块中还发现少量的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,能够为磨削过程中砂轮和硅片接触表面提供弱碱环境。纳米 SiO_2 的粒径小,比表面积大,因此在砂轮块中分布多,但 XRD 检测中未发现 SiO_2 的峰值,分析其原因是由于 SiO_2 以无定形态存在,XRD 无法对其进行识别。观测图 3 可知,CMG 砂轮块中含有大量细而短的结晶针状结构,这些针状结晶交织在一起极为紧密,针与针之间的空隙较小,结构致密,该结构使 CMG 砂轮块具有较好的耐水性,并能够增加 CMG 砂轮块的强度。另外,在砂轮块的表面可以观测到一些絮状物质,通过 EDS 能谱分析可知,絮状物质中除包含 MOC 结合剂外,还含有 CeO_2 磨料,实际加工过程中,磨料与单晶硅发生固相化学反应,而絮状物质中其他化学成份会促进固相化学反应,有利于磨削过程的进行。

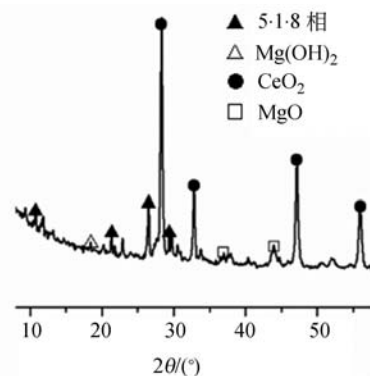


图 2 CMG 砂轮块的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD spectrum of CMG abrasive segment

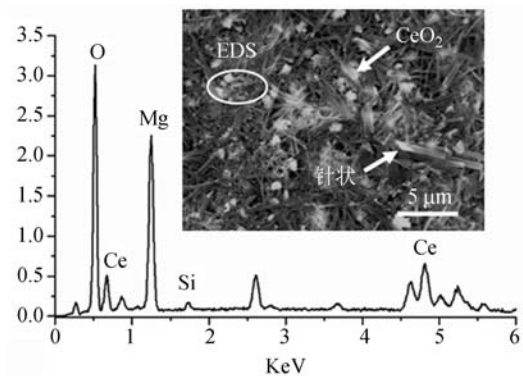
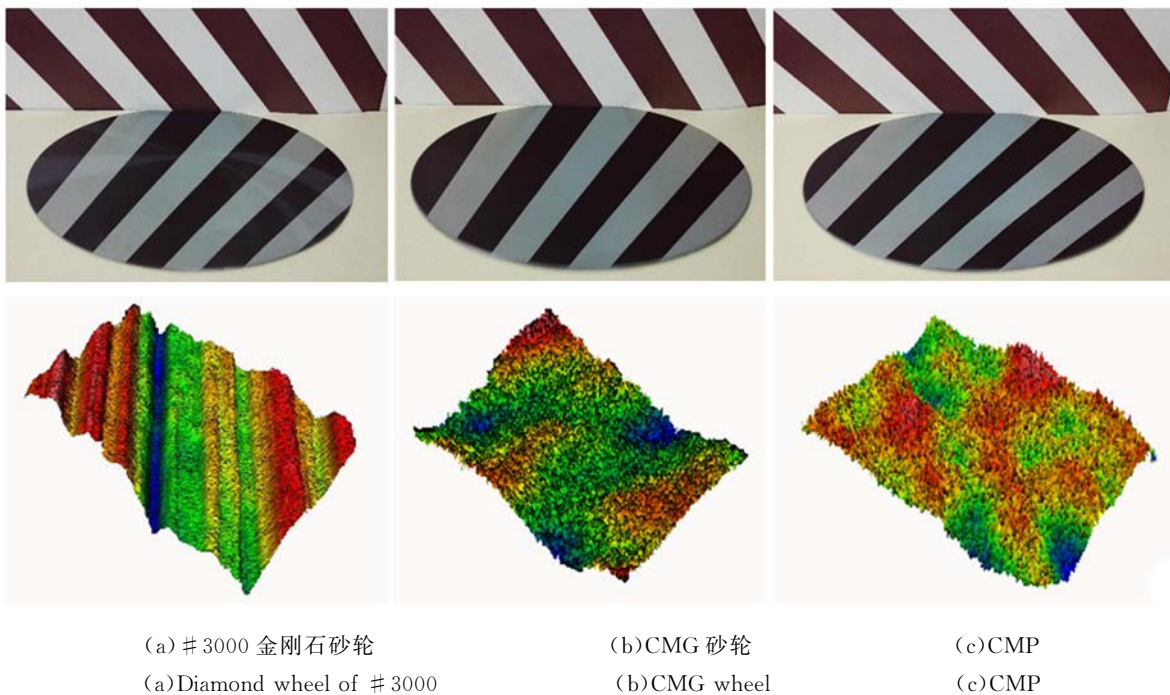


图 3 CMG 砂轮块的表面 SEM 图像和 EDS 图谱
Fig. 3 SEM image and EDS spectrum of CMG abrasive segment

3.2 磨削硅片的表面粗糙度和表面形貌

图 4 为 #3000 金刚石砂轮,研制的 CMG 砂轮和 CMP 加工的硅片表面及其微观形貌。由图 4 可知,金刚石砂轮和 CMG 砂轮以及 CMP 加工的硅片表面均呈现镜面效果,但由图 4(a)还是能够明显看出,#3000 金刚石砂轮磨削硅片的表面具有明显的磨痕,通过三维表面轮廓仪检测的表面微观形貌也能够看到高低起伏的磨痕。CMG 砂轮和 CMP 方法加工的硅片表面都没有明显磨纹,通过三维表面轮廓检测的表面微观形

貌也很难观测到明显的磨痕,如图 4(b)和(c)所示。此外,CMG 砂轮加工的硅片表面微观形貌只呈现“坑”状的交替,并无明显划痕形状,而 CMP 加工表面仅呈现出较浅的起伏交替现象,表明 CMG 砂轮磨削硅片的表面材料去除机理不同于传统金刚石砂轮磨削和 CMP 加工。金刚石砂轮、CMG 砂轮和 CMP 加工硅片的表面粗糙度 R_a 分别为 3.951 nm,0.895 nm 和 0.572 nm,CMG 砂轮加工硅片的表面粗糙度接近于 CMP 加工硅片,远好于金刚石砂轮磨削硅片。



(a) #3000 金刚石砂轮

(b)CMG 砂轮

(c)CMP

(a)Diamond wheel of #3000

(b)CMG wheel

(c)CMP

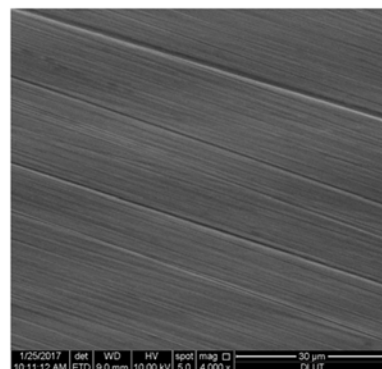
图 4 不同方法加工的硅片表面和微观形貌

Fig. 4 Optical images and surface topographies of wafer surfaces machined by different methods

3.3 磨削硅片表面/亚表面损伤

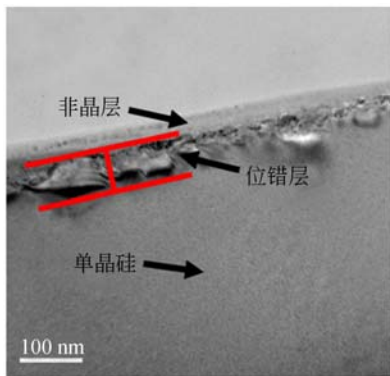
本文首先研究了 #3000 金刚石砂轮磨削硅片的表面 1 亚表面损伤特性,如图 5(a)和(b)所示。从图 5(a)可以明显地看出,磨削硅片表面可以观测到大量的划痕,但划痕周围未发现微观裂纹及脆性的崩碎,而是呈现出类似金属材料的塑形去除特征,表明 #3000 金刚石砂轮磨削硅片的表面材料去除方式主要为塑性域去除。在图 5(b)所示的亚表面损伤检测结果中,通过 TEM 可以观测到 #3000 金刚石砂轮磨削硅片的亚表面最上方明显有一层厚度约为 30 nm 的非晶层,在非晶层的下方还存在厚度约为 90 nm 的位错层,整个亚表面损伤层的深度约为 120 nm。上述现

象产生的原因是采用金刚石砂轮磨削硅片时,表面材料被去除的机制是由于硅片表面材料在金刚



(a)硅片表面的 SEM 观测图

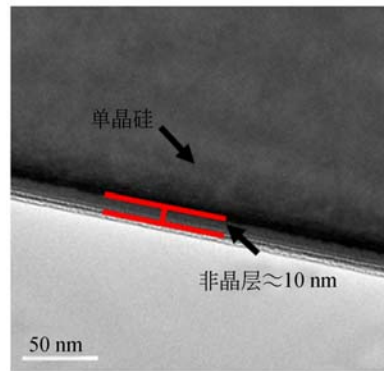
(a)SEM image for wafer surface



(b) 硅片亚表面的 TEM 观测图

(b) TEM image of wafer subsurface

图 5 #3000 金刚石砂轮加工硅片的表面/亚表面损伤
Fig. 5 Surface/subsurface damage of silicon wafer machined by diamond wheel of #3000



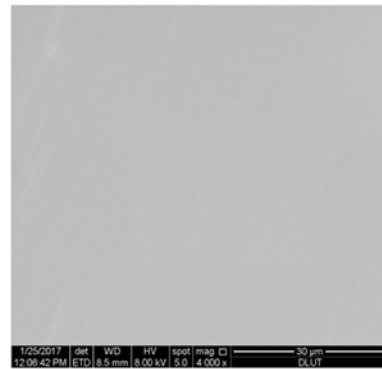
(b) 硅片亚表面的 TEM 观测图

(b) TEM image of wafer subsurface

图 6 CMP 加工硅片的表面/亚表面损伤
Fig. 6 Surface/subsurface damage of silicon wafer machined by CMP

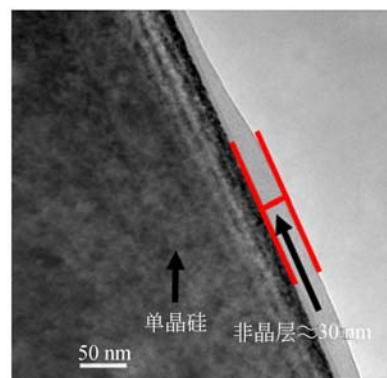
石磨粒的机械压入和划擦作用下达到材料的断裂强度而产生微切屑,同时由于#3000 金刚石砂轮的磨粒粒径小、磨粒出刃高度小,导致其磨削过程中的单颗磨粒切削深度也非常小,硅片表面材料大部分的去除方式是塑形去除,因此,产生的亚表面损伤形式主要以非晶层和位错为主。

图 6(a)和(b)分别为 CMP 加工硅片的表面 SEM 观测图和亚表面 TEM 检测图。由图 6(a)可以明显看出,CMP 加工硅片表面十分光滑,未发现划痕、凹坑、蹦碎、橘皮等表面损伤特征。分析图 6(b)所示的 TEM 观测结果可知,CMP 加工硅片的亚表面损伤只有一层厚度约为 10 nm 的非晶层,未发现位错、层错等其他缺陷。这是因为 CMP 加工硅片过程中,抛光液中的 SiO₂ 粒径一般为几十纳米,同时抛光液呈碱性,硅片表面的材料同时在碱性抛光液的化学腐蚀和磨粒、抛光垫



(a) 硅片表面的 SEM 观测图

(a) SEM image for wafer surface

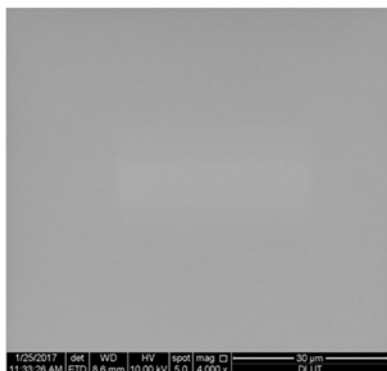


(b) 硅片亚表面的 TEM 观测图

(b) TEM image of wafer subsurface

图 7 CMG 砂轮加工硅片的表面/亚表面损伤

Fig. 7 Surface/subsurface damage of silicon wafer machined by CMG



(a) 硅片表面的 SEM 观测图

(a) SEM image for wafer surface

与硅片之间的机械摩擦两种复合作用下被去除,相比于金刚石砂轮磨削,弱化了加工过程中的机械作用,进而减小了硅片的表面/亚表面损伤。

图 7(a)和(b)分别为 CMG 砂轮加工硅片的表面 SEM 观测图和亚表面 TEM 检测结果。由图 7(a)可以看出,CMG 砂轮加工硅片的表面与 CMP 加工效果相同,表面非常光滑,未发现磨痕、破碎和划痕等缺陷。从图 7(b)中 TEM 观测的硅片亚表面损伤可以发现,采用 CMG 砂轮磨削硅片的亚表面未发现位错、层错等损伤,仅有一层厚度约为 30 nm 的非晶层,但其厚度明显大于 CMP 加工硅片。这可能是由于在 CMG 加工过程中,砂轮成分与硅片表面发生固相化学反应的程度没有 CMP 加工过程抛光液与硅片表面之间液相化学反应的程度剧烈,导致硅片表面生成的反应膜厚度小。此外,CMG 砂轮中的磨粒粒径为微米尺寸,明显大于 CMP 抛光液的中纳米尺寸粒径,导致磨削过程中磨粒与硅片之间的加工应力大于 CMP 加工,因此,CMG 砂轮加工硅片亚表面的非晶层厚度大于 CMP 加工硅片;同时,由于 CMG 加工也是基于砂轮和硅片之间的机械化学复合作用去除硅片表面材料,不会产生位错、层错等较为严重的缺陷。

上述试验结果充分说明了研制的 CMG 砂轮磨削硅片的表面/亚表面质量已接近于 CMP 加工,远远好于纯机械磨削(金刚石等硬质磨粒)作用下产生的硅片表面/亚表面质量。此外,新研制

的 CMG 砂轮具有和传统金刚石砂轮相同的结构和加工方式,可以在不需要增加额外设备条件下,与金刚石砂轮同时安装到两主轴三工位的硅片超精密磨床上,实现单晶硅片一次装夹定位下粗、精磨加工过程的自动化操作。

4 结 论

针对超硬磨料金刚石砂轮磨削硅片产生的表面/亚表面损伤问题,研制了一种用于硅片化学机械磨削加工的新型常温固化结合剂软磨料砂轮。以实现硅片的高效低损伤磨削加工,新研制的砂轮以氯氧镁为结合剂,纳米氧化硅为添加剂,氧化铈为磨料。研究了软磨料砂轮的制备工艺,分析了软磨料砂轮的微观组织结构和成分。通过检测加工硅片的表面和亚表面质量,进一步研究了软磨料砂轮的磨削性能,并与同粒度金刚石砂轮磨削和 CMP 加工的硅片进行了对比分析。得到的主要结论如下:

(1) 软磨料砂轮块的微观组织结构中,氯氧镁结合剂以针状的 $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 结晶相为主, CeO_2 磨料和 SiO_2 添加剂均匀地分散于砂轮块的组织内部;

(2) 软磨料砂轮磨削硅片的表面粗糙度 $R_a < 1 \text{ nm}$,亚表面损伤仅有深度 $< 15 \text{ nm}$ 的非晶层,远好于金刚石砂轮磨削硅片,接近于 CMP 的加工水平,实现了硅片的低损伤磨削加工。

参考文献:

- [1] ALVANOS T, GARANT J, IJIMA Y, *et al.*. A novel methodology for wafer-specific feed-forward management of backside silicon removal by wafer grinding for optimized through silicon via reveal [C]. *Proceedings of the 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2014: 452-458.
- [2] GIAGKA V, SAEIDI N, DEMOSTHENOUS A, *et al.*. Controlled silicon IC thinning on individual die level for active implant integration using a purely mechanical process[C]. *Proceedings of the 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2014: 2213-2219.
- [3] DONG Z G, GAO S, HUANG H, *et al.*. Surface integrity and removal mechanism of chemical mechanical grinding of silicon wafers using a newly developed wheel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 83(5-8): 1231-1239.
- [4] 张银霞, 郜伟, 康仁科, 等. 单晶硅片磨削的表面相变[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1440-1445.
ZHANG Y X, GAO W, KANG R K, *et al.*. Phase transformations of grinding monocrystalline silicon wafer surfaces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1440-1445. (in Chinese)
- [5] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海. 剪切增稠抛光磨料液的制备及其抛光特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2513-2521.
LI M, YUAN J L, LU B H. Preparation of shear

- thickening polishing abrasive slurries and their polishing properties[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2513-2521. (in Chinese)
- [6] ZHONG Z W, TIAN Y B, NG J H, *et al.*. Chemical mechanical polishing (CMP) processes for manufacturing optical silicon substrates with shortened polishing time[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(1): 15-19.
- [7] 许雪峰, 马冰迅, 黄亦申, 等. 利用复合磨粒抛光液的硅片化学机械抛光[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1587-1593.
- XU X F, MA B X, HUANG Y SH, *et al.*. Chemical mechanical polishing for silicon wafer by composite abrasive slurry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1587-1593. (in Chinese)
- [8] ZHOU L B, KAWAI S, HONDA M, *et al.*. Research on chemo-mechanical-grinding (CMG) of Si wafer; 1st report; development of CMG wheel[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2002, 68(12): 1559-1563.
- [9] TIAN Y B, ZHOU L, 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.
- [10] HUANG H, WANG B L, WANG Y, *et al.*. Characteristics of silicon substrates fabricated using nanogrinding and chemo-mechanical-grinding [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 479(1-2): 373-379.
- [11] GAO S, DONG Z G, KANG R K, *et al.*. Design and evaluation of soft abrasive grinding wheels for silicon wafers[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(4): 578-586.
- [12] BA H J, GUAN H. Influence of MgO/MgCl₂ molar ratio on phase stability of magnesium oxychloride cement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2009, 24(3): 476-481.
- [13] LI C D, YU H F. Influence of fly ash and silica fume on water-resistant property of magnesium oxychloride cement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2010, 25(4): 721-724.
- [14] YU J X, CHEN L, QIAN L M, *et al.*. Investigation of humidity-dependent nanotribology behaviors of Si(1 0 0)/SiO₂ pair moving from stick to slip[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265: 192-200.

作者简介:



王紫光(1984—),男,辽宁大连人,博士研究生,2009年于辽宁石油化工大学获得学士学位,2012年于大连交通大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料的精密与超精密加工研究。E-mail: wzg1107@mail.dlut.edu.cn

导师简介:



康仁科(1962—),男,陕西西安人,博士,教授,1984年、1987年、1999年在西北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为超精密加工与特种加工技术、难加工材料高效精密加工技术、半导体制造技术与设备 E-mail: kangrk@dlut.edu.cn