

# CMP 磨削过程中材料去除机理与磨损特性研究

赵国彬

贺利氏信越石英(中国)有限公司, 辽宁 沈阳 110000

**[摘要]**本研究深入探讨了化学机械平坦化(CMP)磨削过程中材料去除机理与磨损特性。通过分析CMP过程中材料去除的微观机理,揭示了磨削过程中物质的磨损特性及其对加工质量的影响。实验结果表明,磨料类型、压力、速度等因素对材料去除效率和磨损过程具有显著影响。本研究对优化CMP工艺,提升精密加工质量具有重要的理论和实践意义。

**[关键词]**CMP磨削;材料去除机理;磨损特性;加工质量;磨料

DOI: 10.33142/aem.v7i1.15216

中图分类号: TN305.1

文献标识码: A

## Research on Material Removal Mechanism and Wear Characteristics in CMP Grinding Process

ZHAO Guobin

Heraeus Shinetsu Quartz (China) Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

**Abstract:** This study delves into the material removal mechanism and wear characteristics during chemical mechanical planarization (CMP) grinding process. By analyzing the microscopic mechanism of material removal during CMP process, the wear characteristics of materials during grinding process and their impact on machining quality were revealed. The experimental results indicate that factors such as abrasive type, pressure, and speed have a significant impact on material removal efficiency and wear process. This study has important theoretical and practical significance for optimizing CMP process and improving precision machining quality.

**Keywords:** CMP grinding; material removal mechanism; wear characteristics; processing quality; abrasive materials

### 引言

化学机械平坦化(CMP)是现代集成电路制造中重要的平坦化加工技术,广泛应用于半导体、光电器件等领域。CMP磨削过程中,材料去除机理的复杂性和磨损特性直接影响加工精度和产品质量。尽管CMP磨削的研究已有一定进展,但其在不同工况下的材料去除机制与磨损特性仍未得到完全揭示。本文通过实验分析与理论推导相结合,研究了CMP磨削过程中材料去除机理的本质特征,探讨了磨损特性对加工效果的影响,为CMP工艺的优化提供理论依据。

### 1 CMP磨削的基本原理与工艺参数

#### 1.1 CMP磨削过程概述

化学机械平坦化(CMP)磨削是一种集机械磨削和化学反应于一体的复合加工技术。其基本原理是在磨盘上施加一定的压力和速度,使得磨料与被加工材料表面发生接触,同时在磨削区域加入化学腐蚀液(通常是化学抛光液),通过化学反应促进材料的去除。CMP磨削的核心在于机械与化学两种方式的协同作用:机械作用通过磨料的物理摩擦去除材料表面,化学作用则通过化学溶解或反应进一步辅助去除材料。在半导体制造中,CMP被广泛应用于晶圆的平坦化、抛光以及去除氧化层等工艺<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 主要工艺参数分析:磨料、压力、速度、温度

在CMP磨削过程中,工艺参数对材料去除效率和表面质量具有决定性影响。磨料类型与颗粒大小直接影响去除效率与表面粗糙度。较硬的磨料适用于坚硬材料,细小颗

粒则实现更精细抛光。压力决定磨料与材料表面接触强度,适当压力提高去除效率,过高或过低的压力均可能导致表面损伤或低效加工。磨盘转速和工件相对速度影响去除速率和表面均匀性。过高转速会导致表面不平整或热损伤,过低则降低效率。温度影响化学反应与磨削性能,高温可加速去除速率,但过高温度可能造成热变形。因此,合理控制各工艺参数有助于提高加工效率和保证表面质量。

#### 1.3 工艺参数对材料去除效率的影响

不同工艺参数的组合显著影响材料去除效率。磨料颗粒大小直接决定去除速率和表面质量,粗颗粒能快速去除材料,但表面粗糙,细颗粒则有助于提高表面质量但去除速率较低。压力对去除效率至关重要,适中的压力能提高效率并保持平滑表面,而过高或过低的压力则会影响加工效果。磨盘转速提升磨料作用频率,增加去除速率,但过快会产生热量,影响表面质量。合理调整这些参数,结合不同材料和加工需求,能够优化加工效果,实现高效且高质量的CMP磨削。

### 2 材料去除机理分析

#### 2.1 机械去除与化学去除的协同作用

在CMP磨削过程中,材料去除依赖机械和化学两种机制的协同作用。磨料通过物理摩擦作用去除工件表面软质薄膜,磨料的类型、粒径和硬度直接影响磨削效果。氧化剂与工件表面反应,形成易于机械去除的软质物质,提高去除效率。pH调节剂通过优化酸碱度调节化学反应条件,

确保反应按预期进行,而抑制剂控制化学侵蚀,提升过程可控性并减少设备损害。表面活性剂保持磨料分散,防止团聚,确保抛光过程一致性和可靠性。机械与化学作用的结合有效提升材料去除效率,改善表面质量<sup>[2]</sup>。

## 2.2 材料去除的微观机理:磨料与材料表面的相互作用

磨料与材料表面的相互作用是 CMP 过程中材料去除的关键。磨料通过与材料表面的物理摩擦,产生压力和切削作用,将材料逐层去除。在这一过程中,磨料的粒径和硬度直接决定了去除效率。较粗的磨料通过较大的切削力去除较多的材料,而较细的磨料则能提供更精细的表面加工效果。磨料的硬度与材料的硬度差异也影响磨削过程,较硬的磨料能够更有效地突破材料表面的强度,使去除过程更加高效。

化学作用则通过氧化剂与材料表面反应,生成软质物质,减少磨料与材料之间的摩擦力。氧化剂与材料表面发生化学腐蚀反应,形成容易被机械力去除的薄层,进一步促进了磨料的切削作用。pH 调节剂和抑制剂的作用则通过优化酸碱度和控制化学反应的程度,增强了表面加工均匀性和稳定性。

## 2.3 材料去除速率的影响因素

材料去除速率(MRR)是评价 CMP 过程效率的重要指标,受到多个因素的影响。首先,磨料的性质对去除速率起着直接作用。硬度较高的磨料能更有效地破坏材料表面,增加去除速率。其次,磨盘转速和工件相对速度的增加会提高磨料与材料表面接触的频率,从而提高去除速率。压力的增大同样能增强磨料的切削作用,提升去除速率。然而,过大的压力可能会导致过度磨削并引发表面损伤,因此需要在控制范围内进行调整。此外,化学腐蚀液的浓度、pH 值以及化学成分也会影响去除速率,合适的化学腐蚀液能够加速材料表面溶解,提高去除效率。

## 2.4 CMP 过程中微观形貌变化与去除效率的关系

CMP 过程中的微观形貌变化是衡量去除效率的重要因素之一。在磨削过程中,材料表面不断被磨料切削和化学腐蚀,表面形貌会发生显著变化,可能表现为表面粗糙度的增加或减少。适当的微观形貌变化有助于提升去除效率,过于粗糙的表面则可能导致磨削力的波动,影响材料去除的均匀性。另一方面,化学反应通常会使得材料表面形成一定的薄膜或溶解层,这一层的存在有助于减少磨削过程中的摩擦,避免表面损伤,从而提高去除效率。因此,CMP 过程中,微观形貌的变化与去除效率密切相关,优化表面形貌可显著提升整体加工效果。

# 3 CMP 磨削中的磨料特性研究

## 3.1 磨料磨削与磨料机制分析

在 CMP 磨削过程中,磨料磨削是影响工艺效果和工具寿命的重要因素。磨料的磨削机制主要包括两种:机械磨削和化学磨削。机械磨削是指磨料颗粒在与材料表面接触

时,由于摩擦力的作用,磨料本身发生物理性磨损,如颗粒的崩裂、脱落等。而化学磨削则发生在磨料与材料表面发生化学反应时,导致磨料表面发生溶解或化学腐蚀。两者通常是交替发生的,磨料的磨削不仅影响其对材料的切削能力,还可能导致加工表面质量的变化。因此,理解磨料的磨削机制,对于提高 CMP 过程中的材料去除效率和表面质量具有重要意义。

## 3.2 磨削的影响因素:磨料类型、硬度、形状等

磨料的类型、硬度、形状和颗粒大小显著影响磨削特性。硬度高的磨料能有效切削材料,但容易磨损,缩短使用寿命。锐利的磨料颗粒更容易刺入材料表面进行切削,而钝化颗粒则增加摩擦力,导致更高的磨损。颗粒大小对磨削影响亦不可忽视,细颗粒提高表面精度但去除速率较低,而大颗粒则提升去除速率,但可能导致较大磨损和粗糙表面。此外,磨料的材料组成也影响磨削效果,不同材料的磨料在不同工件上的表现不同<sup>[3]</sup>。

## 3.3 磨削对表面质量与材料去除的影响

磨料的磨削对表面质量和材料去除效率影响显著。磨料磨削导致颗粒锐利度降低,增加表面粗糙度,可能产生划痕或凹陷,同时降低去除速率。为保持加工效率和精度,需控制磨料磨削,并优化工艺参数和磨料选择,减少磨削对表面质量的影响。此外,磨削导致工具失效可能引起尺寸不稳定,增加不合格率。因此,精确控制磨料磨削,确保磨料始终处于良好工作状态,是提升加工精度的关键。

## 3.4 磨削与工具寿命的关系

磨料磨削与工具寿命之间存在密切关系。随着磨料磨削的逐渐加剧,工具的切削能力会不断下降,进而影响加工精度和表面质量。工具寿命的长短取决于磨料的磨削速率以及磨料与工具之间的相互作用。较高的磨削速率意味着工具寿命较短,因此,需要通过合理控制磨料的使用寿命、磨削参数和工艺环境来延长工具的使用周期。通常,通过选择合适的磨料类型、优化磨削压力与速度,可以有效延缓磨料的磨削,延长工具的使用寿命,从而提高整体加工效率。

# 4 CMP 工艺优化与控制策略

## 4.1 工艺参数优化方法:基于材料去除与磨削特性的优化

CMP 工艺优化需基于材料去除速率(MRR)和磨削特性调整工艺参数。通过调节磨料类型、粒度、压力和速度,可以提高材料去除效率并减少磨料磨削。较高的压力和速度能增加去除速率,但可能引起磨料快速磨削和表面粗糙度增加。因此,优化时需平衡去除效率与磨削,确保加工质量。利用数学模型和实验数据分析,可为不同材料和需求选择最优工艺参数<sup>[4]</sup>。

## 4.2 优化磨料选择与分布策略

磨料的选择与分布策略直接影响到 CMP 过程的材料去除效率与表面质量。首先,磨料的选择应基于被加工材

料的硬度、化学性质和表面质量要求。硬度较高的磨料适用于硬度较高的工件,但也可能增加磨损。其次,磨料的分布策略应确保磨料均匀地分布在整个磨盘上,以避免磨料集中导致局部过度磨削。可以通过优化磨料颗粒的分布密度、颗粒大小以及颗粒形状,来减少磨料对材料表面的不均匀作用,从而实现均匀且高效的材料去除。通过控制磨料的配置和量化分布,可以有效改善表面质量并延长工具使用寿命。

#### 4.3 压力与速度控制策略的提出

压力和速度是 CMP 工艺的关键参数,合理控制可优化去除效率并降低磨损。过高压力可能导致表面损伤,过低则降低去除速率。因此,压力需根据材料特性和加工需求调节。磨盘转速和工件相对速度也影响加工效果,高转速提升去除效率,但可能引起热积聚影响表面质量,低转速则速率较低。通过实验数据和数学模型优化参数控制,可提升工艺稳定性和加工精度。

#### 4.4 CMP 加工过程中的监测与控制技术

CMP 加工过程中,监测与控制技术在确保加工精度和质量中起着至关重要的作用。实时监测磨盘转速、压力、温度等工艺参数,可以及时发现加工过程中出现的异常情况,防止过度磨削或过早磨损的发生。基于传感器的在线监测技术可以动态反馈磨削状态,结合智能控制系统,自动调整工艺参数以维持稳定的加工状态。此外,使用图像处理技术对加工表面进行实时检测,可以获取表面粗糙度、缺陷等信息,为调整工艺参数提供数据支持。借助先进的传感器和数据分析技术,能够有效提升 CMP 过程的自动化与智能化水平,进一步提高加工质量和生产效率。

### 5 实验验证与数据分析

#### 5.1 实验设计与材料选择

实验设计是 CMP 工艺优化与验证中的关键环节,合理的实验设计能够准确评估工艺参数对材料去除与磨损特性的影响。在本实验中,选择了常用于半导体加工的硅晶圆作为测试材料,考虑到其硬度适中且易于加工,同时具有良好的表面反应性。磨料选择上,采用了粒度不同的二氧化硅颗粒,以测试不同粒度对去除速率和表面质量的影响。实验中还设计了不同的磨削压力、速度以及化学液体浓度等工艺参数组合,目的是通过对比分析不同条件下的材料去除效果和磨损特性,寻找最优的工艺组合。

#### 5.2 材料去除速率与磨损率的实验结果

实验结果表明,材料去除速率与磨料粒度、压力、转速等工艺参数密切相关。随着磨料粒度的增大,材料去除速率呈现上升趋势,但同时表面粗糙度也有明显增加。实验数据表明,在较低的压力和适中的转速下,去除速率较高且表面质量较好,而过高的压力会导致材料去除速率过快,但同时磨料的磨损率也大幅增加,导致工具寿命缩短。磨损率的实验结果显示,随着磨料使用时间的增加,磨料

颗粒的表面逐渐钝化,导致磨损速率显著上升,进而影响材料的去除效率和表面质量<sup>[5]</sup>。

#### 5.3 数据分析与结果讨论

实验数据分析显示,工艺参数对 CMP 磨削具有显著的非线性影响。磨料粒度影响去除速率与表面粗糙度,粗磨料提高去除速率但表面质量差,细磨料则反之。适中的压力能提高效率并减少磨料磨损,过低或过高的压力会降低工艺效果。磨料类型与材料相容性也关键,选择合适的磨料能有效减少磨损,延长工具寿命。

#### 5.4 CMP 磨削工艺优化建议

根据实验结果,提出以下 CMP 磨削工艺优化建议:首先,应根据被加工材料的特性选择合适的磨料,粒度选择上应权衡去除速率与表面质量的需求。对于要求高表面质量的加工任务,推荐使用较细的磨料颗粒,尽管去除速率较慢,但可以获得更好的表面光洁度。其次,合理调节压力与转速是提高加工效率的关键。建议在适中的压力和转速条件下进行磨削,以平衡去除速率和表面质量。

### 6 结语

本文通过对 CMP 磨削过程中材料去除机理与磨损特性的深入研究,揭示了磨削过程中的关键因素,尤其是磨料选择、压力与速度对材料去除效率和磨损的影响。通过实验验证和数据分析,提出了有效的工艺优化策略。研究结果为进一步提高 CMP 技术的加工精度、降低成本和提升生产效率提供了理论支持。未来研究可以在不同材料、不同应用场景下继续深入探讨 CMP 磨削的材料去除机理与磨损特性,以推动精密加工技术的发展。

#### [参考文献]

- [1]范磊,王娜,尹国强.基于单颗磨粒磨削的 SiCp/Al 材料去除机理研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024(10):126-131.
- [2]杨震宇,邹平,周亮,等.单颗 CBN 磨粒超声振动辅助磨削 AISI 304 材料去除机理[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(7):1011-1019.
- [3]闫峰.GaSb 单晶片微纳划擦特性与超精密磨削材料去除机理研究[D].辽宁:大连交通大学,2024.
- [4]高腾.超声赋能微量润滑磨削 CFRP 材料去除机理与力模型[D].山东:青岛理工大学,2024.
- [5]段继豪,安佳乐,吴卓繁,等.航发叶片砂碟磨削接触特性及材料去除机理[J].机械工程学报,2023,59(17):349-360.

作者简介:赵国彬(1985.9—),男,毕业院校:沈阳航空工业学院,学历:本科,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前就职单位:贺利氏信越石英(中国)有限公司,职务:工业化工程师,所在职务的年限:2年(包括其他工作单位16年),职称级别:现有中级工程师。