

基于 AFM 的化学机械抛光磨粒模拟研究*

王春安 伟 赵永武

(江南大学机械工程学院 江苏无锡 214122)

摘要: 当前的化学机械抛光 (CMP) 磨损模型中大多数都缺少微观试验数据的支持。为进步揭示 CMP 中纳米磨粒对材料表面的磨损机制, 提出了采用原子力显微镜 (AFM) 来模拟 CMP 中的单个磨粒的试验方案, 并验证该模拟试验方案的可行性。结果表明: 采用 AFM 探针来模拟 CMP 过程中单个磨粒对芯片表面的磨损与相互作用的试验方案是完全可行的; 可以通过 AFM 探针与芯片表面的相互作用与磨损, 模拟得出单个磨粒对芯片表面的作用与磨损状况, 并可以在此微观试验数据的基础上建立起新的 CMP 磨损模型。

关键词: 化学机械抛光 (CMP); 原子力显微镜 (AFM); 磨粒模拟

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254 - 0150 (2006) 11 - 096 - 3

Simulation for an Abrasive Particle of the Chemical Mechanical Polishing with AFM

Wang Chun An Wei Zhao Yongwu

(School of Mechanical Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: To study the micro-wear mechanism of a nano-particle on material surface during the chemical mechanical polishing (CMP), an experiment for using atomic force microscopy (AFM) to simulate a nano-particle was put forward, and its feasibility was validated. The results show that it is feasibility to simulate the wear and interaction of a nano-particle of the CMP on the wafer with AFM. Through the wear and interaction of the AFM's tip on the wafer, the wear and interaction mechanism of a nano-particle of the CMP on the wafer can be simulated and obtained, and the new CMP model can be set up on the basis of micro-wear test data.

Keywords: chemical mechanical polishing; atomic force microscopy (AFM); particle simulation

近年来, 随着集成电路芯片在计算机和手机等多种高科技信息产品中的广泛应用, 集成电路芯片的制造受到越来越多的重视。化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, 简称 CMP) 是集成电路芯片制造过程中被频繁使用的最重要工序, 是保持亚微米集成电路芯片整体和局部平面化的关键技术之一, 但是由于传统的加工理论已经不适用于解释抛光加工中的诸多现象, 并且其机制涉及摩擦学、力学、化学、材料学和表面工程技术等多个学科, 使得到目前为止人们仍然没有完全掌握其抛光过程的磨损机制。本文作者使用 AFM 来模拟 CMP 过程中抛光液内所含的纳米磨粒, 探讨了在 AFM 微观实验数据的基础上来建立 CMP 模型的可能性, 最后利用 AFM 对此方案的可行

性进行了试验研究, 以期通过 AFM 来进一步了解、揭示 CMP 过程中芯片表面材料的去除机制。

1 CMP 的磨损机制

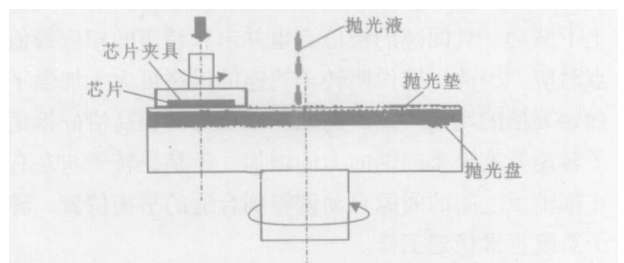


图 1 化学机械抛光原理图

图 1 所示的即为芯片 CMP 的原理示意图, 将待抛光芯片正面向下同橡胶材料制作的抛光盘接触, 抛光盘以等速单向旋转, 以保证芯片表面各点的相对速度一致, 待抛光芯片和抛光盘之间引入连续流动的抛光液, 抛光液含有能同芯片材料发生化学作用的成分以及纳米量级的陶瓷抛光磨粒。

对于 CMP 机制的研究, 国内在该领域主要集中在 CMP 抛光液的研制、CMP 影响参数、CMP 过程的

*基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK2004020); 清华大学国家重点摩擦学实验室基金项目 (SKLT04-06)。

收稿日期: 2006 - 03 - 20

作者简介: 王春, 硕士研究生, 目前主要从事 AFM 探针对于 CMP 中单个磨粒的模拟研究。E-mail: silver430@163.com。

运动分析以及 CMP 电化学行为等宏观实验方面^[1-5], 对于在 CMP 过程中的材料微观磨损机制的研究很少。国外对于 CMP 机制已经进行了深入的理论研究, 并就抛光过程中机械接触作用下的应力、流体膜的作用、纯机械磨削作用、机械磨削与流体膜的协同作用、机械磨削与化学作用等影响因素分别建立了机制模型。如 Andrew 基于赫兹微接触理论所建立的微接触模型^[6], 该模型对 G-W 模型进行改进且考虑到流体膜的压力作用, 但是该模型不能解释抛光液中所含磨粒以及化学作用对抛光效果的巨大的促进作用。Zhao^[7]所建立的弱键原子/分子的去膜模型, 该模型认为 CMP 过程是芯片表面最外层被抛光液中化学作用不断氧化和被抛光液中模拟不断去除的动态平衡过程, 该模型定性分析预测的结果与宏观试验结果完全相同, 并且非常成功地解释了 CMP 过程中机械和化学各自的作用以及两者之间的协同作用, 但是由于模型中引入的氧化概率和去除概率这 2 个微观参数未能确定, 并缺乏微观试验数据的支持, 使得该模型的精度不高。Shi 与 Zhao^[8]建立了镶嵌磨粒的去除机制, 该机制认为在抛光过程中被大量地镶嵌在柔软的抛光垫中的抛光液中的磨粒的犁削作用是去除的主要机制, 该机制可以比较圆满地解释抛光液磨粒、抛光盘粗糙度、速度和压力等因素对抛光速率的影响, 但是, 该机制中所采用的磨粒磨损机制所对应的磨损率应该随着磨粒尺寸的增加而增加, 而且磨粒磨损会在芯片表面留有大量的划痕或犁沟, 但在 M Biehm^[9]与雷红^[4]等的实验中所得到的结果与此机制预测的结果恰好相反, 同样该机制也不能解释抛光液中的化学作用对磨损速率的影响。

由此可见, 根据 CMP 抛光过程中各种参数所建立的磨损模型, 都存在着不完善的地方, 这表明对 CMP 过程中芯片的微观磨损机制尚未完全了解, 而仅从理论分析来进行 CMP 磨损模型的建立也肯定是不够全面的。在 CMP 过程中数以百万计的被夹在抛光盘与芯片之间的磨粒参与芯片表面材料的去除过程, 每个镶嵌磨粒与芯片表面的微观磨损和相互作用过程才有可能反映 CMP 过程最本质的机制, 只有认识此机制, 才有可能应用概率统计等理论导出宏观的 CMP 材料去除模型。

2 AFM 的磨粒模拟

在芯片的 CMP 过程中, 抛光液中一般含有大量的磨粒, 而磨粒与芯片间的相互作用很可能就是 CMP 中材料去除的主要机制, 抛光液中的化学成分则促进了芯片表面材料的去除。为了分析 CMP 过程

中各影响因素的改变对于磨粒与芯片间相互作用的影响, 椭圆仪、STM (扫描电镜)、AFM、AES (俄歇电子能谱) 等大量先进表面分析仪器被广泛地应用在 CMP 过程前后的芯片表面处理上。

AFM 具有分辨率高 ($10^{-9} \sim 10^{-10}$ N)、探测范围广等优点, 具有 TAP、CONTACT 等表面扫描所需要的工作模式。在扫描过程中 AFM 探针可以清楚地得到被扫描样品表面的微观磨损量与相互作用, 所以 AFM 探针可以用来模拟单个磨粒对芯片表面的微观磨损与相互作用, 并可以通过改变受载压力 (即 AFM 中的参考点)、扫描速度 (即 AFM 中的扫描频率) 等参数来考察各种参数对芯片表面的磨损量以及相互作用的影响。

图 2 为基于 AFM 探针的 CMP 中磨粒模拟的示意图, 通过探针模拟对芯片表面磨粒的模拟, 再以探针扫描磨粒前后表面形貌的变化,

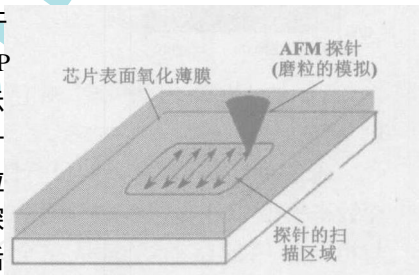


图 2 AFM 探针模拟示意图

可以得到在扫描过程中探针对芯片表面的磨损量, 并可以通过概率统计推导出宏观的 CMP 材料去除模型。

为验证该模拟试验的可行性, 作者采用 CSEPM4000 来验证 AFM 探针模拟的可行性。探针的曲率半径为 10 nm, 样品为单晶硅 (10 mm × 10 mm)。为了尽量减少扫描过程中, 探针对芯片表面非实验目的的磨损, 采用 AFM 的 TAP 模式作为探针模拟磨损前后芯片表面形貌的扫描模式, CONTACT 模式作为探针模拟的扫描方式。同时也为了去除表面杂质对于芯片表面形貌扫描的影响, 将试验样品分别在丙酮、无水乙醇和去离子水中超声波清洗 5 min。

试验方案如下:

- (1) 以参考点为 0.3, 扫描速率为 0.8 Hz, 在 TAP 模式下对样品 500 nm × 500 nm 的区域扫描;
- (2) 以参考点为 1.0, 扫描速率为 0.8 Hz, 在 Contact 的模式下对样品 100 nm × 100 nm 的区域加载扫描;
- (3) 以参考点为 0.3, 扫描速率为 0.8 Hz, 在 TAP 模式下对样品 500 nm × 500 nm 的区域重新进行扫描。

图 3、4 为 AFM 的探针模拟后, 单晶硅表面的扫描图以及相应区域的二维剖面分析图。从图可以看出, 在参考点不同的中间 100 nm × 100 nm 的区域内,

芯片有着明显的磨损,并在这一区域的二维剖面截图上也能得出中间加载参考点为 1.0 的区域内的平均高度明显低于周围加载参考点为 0.3 的区域。对于在二维剖面分析中图中存在的高度波动,可能是探针在芯片表面滑动时推动磨屑造成的结果,即图 3 中呈白色的区域,图 3 的高度表也表明这很可能是探针加载磨损时残留下来的磨屑。

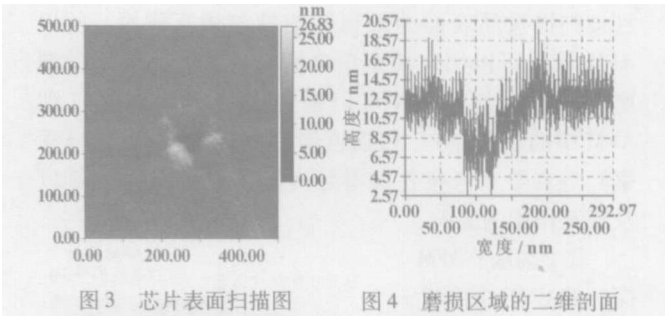


图 3 芯片表面扫描图

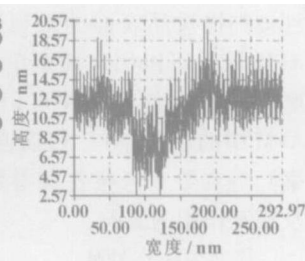


图 4 磨损区域的二维剖面

3 结论

通过在 C5PM4000 上的可行性试验表明,以 AFM 探针来模拟 CMP 过程中单颗磨粒对芯片表面的磨损与相互作用的试验方案是完全可行的。可以通过 AFM 探针针对芯片表面的相互作用与磨损,模拟得出单个磨粒对芯片表面的作用与磨损,并可以在此微观试验数据的基础上建立起新的 CMP 磨损模型。通过此模型的建立,可以为进一步认识 CMP 材料磨损的微观机制,为建立更加完善的 CMP 材料去除模型奠定基础,同时对于光学玻璃和计算机硬盘等精密部件的 CMP 加工也具有一定的借鉴作用。

参考文献

- [1] 王新, 刘玉岭. ULSI 铜互连线 CMP 抛光液的研制 [J]. 半导体学报, 2002, 23 (9): 1006 - 1008.
Wang Xin, Liu Yulin. CMP Slurry of Copper Interconnection for ULSI [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23 (9): 1006 - 1008.
- [2] 何捍卫, 胡岳华, 黄可龙. 铜在氨水铁氰化钾 CMP 抛光液中抛光速率及其影响因素的研究 [J]. 电化学, 2002, 8 (2): 202 - 206.
He Hanwei, Hu Yuehua, Huang Kelong. Polishing Rate and Dependent Factors of Copper in $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Aqueous Solution Containing $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ during CMP [J]. Electrochemistry, 2002, 8 (2): 202 - 206.
- [3] 狄卫国, 杨明, 刘玉岭. 超大规模集成电路制备中硅衬底抛光液研究 [J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16 (4): 38 - 41.
Di Weiguo, Yang Ming, Liu Yuling. Study on Polishing Slurry for Silicon Substrate in ULSI [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2003, 16 (4): 38 - 41.
- [4] 雷红, 雒建斌, 屠锡富, 等. 计算机硬盘基片的亚纳米级抛光技术研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (3): 117 - 122.
Lei Hong, Luo Jianbin, Tu Xifu, et al. Sub-nanometer precision polishing of computer rigid disk substrate [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41 (3): 117 - 122.
- [5] 赵萍, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 智能型纳米级抛光机的运动分析 [J]. 制造技术与机床, 2003, 19 (7): 19 - 22.
Zhao Ping, Lv Binghai, Yuan Julong, et al. Motion Analysis of Intelligent Polishing Machine at Nanometer Level [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2003, 19 (7): 19 - 22.
- [6] Andrew Kin. A Soft Elastohydrodynamic Contact Model for Chemical Mechanical Planarization [D]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2001.
- [7] Y W Zhao, L Chang, S H Kim. A mathematical model for chemical mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species [J]. Wear, 2003, 254: 332 - 339.
- [8] Shi F G, Zhao B. Modeling of chemical mechanical polishing with soft pads [J]. Applied Physics A, 1998, 67: 249 - 252.
- [9] Bielmann M. Effect of particle size during tungsten chemical mechanical polishing [J]. Electrochemical and Solid - State Letters, 1999, 2 (8): 401 - 403.

(上接第 95 页) Bearings [J]. Lubrication Engineering, 2001 (1): 2 - 4.

- [6] 侯予, 林韶宁, 陈纯正, 等. 全动压气体轴承透平膨胀机机械性能的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005 (5).
Hou Yu, Lin Shaoning, Chen Chunzheng, et al. Experimental Study on Mechanical Performance of Expansion Turbine with

Aerodynamic Bearings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005 (5).

- [7] 杨梦辰, 张瑞乾, 孔凌嘉, 等. 平面螺旋槽气体止推轴承的研究 [J]. 机械设计, 1998, 15 (2): 9 - 11.
Yang Mengchen, Zhang Ruiqian, Kong Lingjia, et al. A study on the pneumatic thrust bearing with planar spiral groove [J]. Machine Design, 1998, 15 (2): 9 - 11.