

超精密表面抛光材料去除机理研究进展

徐进 雒建斌 路新春 张朝辉 潘国顺

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084. E-mail: jinxu618@163.com)

摘要 化学机械抛光(Chemical-Mechanical Polishing, 简称CMP)是目前提供全局平面化最理想的技术, 在超精密表面加工领域得到了大量研究和应用. 概述了超大规模集成电路(Ultra-large Scale Integration, 简称 ULSI)多层布线中硅片、介电层和金属材料以及磁头/硬盘片化学机械抛光材料去除机理的研究现状和发展趋势, 重点评述了化学机械抛光过程中抛光液研磨颗粒与抛光片表面间相互作用机制, 并提出了材料去除机理的研究方法.

关键词 CMP 材料去除机理 磨损 ULSI 计算机硬盘

在电子产业中, 起先导作用的两个行业是微电子产品和计算机制造. 它们相辅相成, 相互促进, 使得其高速发展, 呈现出高集成度和高性能化的发展趋势, 从而对许多部件表面提出了前所未有的特殊要求. 如计算机硬盘要实现 77.5~155 Gb/cm² 的存储密度, 要求盘片的表面波纹度 $W_a < 0.1$ nm, 粗糙度 $R_a < 0.05$ nm. 另外, 大规模集成电路的线宽不断下降, 并向结构立体化、布线多层化发展. 根据美国微电子技术发展构图^[1], 特征线宽到 2011 年将减小到 0.05 μ m, 同时将开始使用 450 mm 晶片. 并要求如此大尺寸晶片表面具有纳米级面型精度和亚纳米级表面粗糙度, 同时要保证表面和亚表面无损伤, 已接近表面加工的极限. 要实现如此尖端的技术突破, 必须深入探讨超精密抛光表面加工材料去除机理^[2]. 作为新一代超精密表面制造方法之一——化学机械抛光(CMP)技术是目前最好的实现全局平面化的工艺技术, 在集成电路^[3-5]、计算机磁头/硬磁盘^[6,7]等超精密表面加工领域得到了大量研究和广泛应用. 但由于传统的加工理论已不适用于解释抛光加工中的诸多现象, 人们对加工过程中的材料去除的科学规律仍缺乏深入的了解. 严格来说, CMP 材料去除机理目前仍不完全被认识^[1]. 开展这方面科学问题的研究, 不仅有助于揭示在电子产品极限制造条件下出现的新规律和新机制, 而且对探索制造新原理和新方法有重要理论意义. 本文概述了 ULSI 多层布线中硅片、介电层和金属材料以及磁头/硬盘片化学机械抛光材料去除机理的研究现状, 并重点阐述了化学机械抛光过程中抛光液研磨颗粒与抛光片表面间的相互作用机制,

以期在揭示超精密表面材料去除机理及抛光工艺研究中具有借鉴意义.

1 集成电路(IC)制造中的 CMP

1.1 硅片

硅衬底片 CMP 是获得高平整度、无缺陷和高反射表面的一个基本工艺过程, 抛光质量直接影响击穿特性、界面态和少子寿命, 对后续制造工艺质量起决定作用. 早在 1990 年, Cook^[8]就提出材料的去除是由于随抛光液流动的研磨颗粒压入 Si 片表面的机械犁削作用, 并表明 Si 片 CMP 中化学作用材料去除过程取决于 Si 表面形成的 SiO₂ 层和颗粒与抛光液中的水和化学剂之间的相互作用. 借助于 TEM 分析 Si(100) 片抛光表面和剖面, 可以证实硅表面塑性切削/剪切及表面氧化产物的机械去除, 同时还观察到在抛光过程中抛光表面的非晶态转变^[9]. 在影响去除机理的因素中抛光液颗粒粒径最为关键^[10], 当采用粒径大于 2 μ m 的颗粒对 Si(100) 进行抛光时, 材料通过脆性断裂去除. 当粒径小于 0.3 μ m 时, 发现沿着 {111} 方向形成的位错网和滑移面导致材料发生塑性变形, 呈现从脆性断裂到塑性屈服过渡. 伴随粒径继续减小到 50 nm 时, 在 HRTEM 下没有观察到任何物理损伤(见图 1), 从而间接地说明了发生在原子尺度上的抛光可能占主导作用.

Graf 等人^[11]结合 XPS、高分辨能量损失谱研究了 Si 片表面抛光过程在原子尺度上的去除机理, 提出材料去除过程表现为: 抛光液中的 SiO₂ 颗粒表面局部带有高浓度 OH⁻ 离子, 随抛光液流动的 OH⁻ 离子

1) Moon Y. Mechanical Aspect of the Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing. PhD Thesis, University of California, Berkeley, 2002. 129~133



图1 Si(100)在粒径50 nm的SiO₂抛光液中抛光后剖面HRTEM照片^[10]

转移到硅片表面并发生反应,导致硅片表面的硅反向键断裂,从而实现硅材料的去除。Liu等人的研究^[4,12]表明Si片表面抛光是一个复杂的多相反应,主要包括:抛光时吸附在抛光垫表面上的活性成分与硅原子在表面进行氧化还原反应;高速运动的SiO₂颗粒与抛光垫对硅片表面摩擦,磨去反应产物进入抛光液中被带走,以上两个过程的平衡和综合效应决定了总去除率和抛光质量。

1.2 介电层

目前,在ULSI中通常采用SiO₂作为介质材料,针对二氧化硅抛光机理已得到了大量研究^[13-15]¹⁾。与Si片的抛光相似,抛光液颗粒粒径与材料去除机理密切相关。Mahajan^[13]等人在实验基础上研究了当粒径从0.2 μm增加到1.5 μm时对去除机理的影响,提出随粒径的增加材料的去除从表面积控制模型向颗粒犁削模型过渡,并合理解释了浓度变化对抛光率的影响。可是,针对目前通常采用的小粒径(<100 nm)颗粒,材料去除机理却呈现两种解释。首先,以Tomozawa^[14]和Lei¹⁾等为代表提出抛光过程中研磨颗粒与氧化层间的摩擦作用导致SiO₂层的塑性变形随着温度升高变形加剧,在塑性变形过程中伴随氧化物发生水合作用,较软的水合氧化物层随后因颗粒的犁削作用而去除;其次,Hoshino等人^[15]提出SiO₂层与颗粒反应形成大量化学键连接,在机械作用下晶片表面的化学键Si-O-Si被破坏,导致硅原子离开抛光片表面以实现材料去除。

近年来,因为低介电常数 k 材料良好的机械性能、热稳定性和热传导性能,部分研究者已致力于低介电常数 k 材料代替SiO₂的研究^[16-18],比如聚合物材料、有机/无机混合物,他们发现这些材料的去除机

理具有相似性,即:抛光液中润湿剂和活性成分颗粒接触抛光表面后被表面吸附,并逐渐渗入表面,同时发生化学反应,导致表面钝化或弱化;抛光液的剪切和抛光液颗粒的研磨作用去除表面改性层(钝化或弱化层),去除产物脱离抛光表面随抛光液排出。

1.3 金属层

金属抛光机理与SiO₂抛光不同,金属抛光过程不但受金相/微观结构变形过程影响,而且抛光液成分更为复杂,从而使金属去除机理研究愈加困难。因为在工业和实验条件下有大量可供参考的金属W抛光的数据,并且W的磨损性能与其他塑性金属的磨损行为较相似,所以有关金属W的抛光机理研究最具有代表性^[19]。

Kaufman等人^[20]早在1991年就提出W表面与抛光液间的化学反应生成表面膜,薄膜达到一定厚度后停止增长,形成自息性钝化层,抛光片表面凸出部分与抛光垫接触区之间的机械犁削去除钝化层,被磨除部分从表面附近去除。最近,有关金属抛光机理的大多数分析和模型建立均以此为基础^[21,22]。可是该模型仅基于宏观分析,没有深入微观过程的讨论。Anantha^[23]在蠕变变形动力学基础上进行了金属W-CMP材料去除机理的微观结构研究,观察到抛光过程对金属晶粒结构和取向的影响,外界应力作用诱导表面原子和空穴沿晶界的迁移和扩散控制了薄膜变形,一旦该变形超过材料的临界值,材料脱离抛光表面,从而说明抛光中表面氧化膜形成后,材料的研磨去除主要受原子尺度的微观结构过程控制。与此类似,Kneer^[24]等人还提出化学腐蚀引起的晶内断裂是W抛光材料去除的主导因素。为了验证颗粒犁削和晶内断裂等材料去除机理,Stein²⁾进行了大量的AFM和TEM观察,结果表明晶内断裂和机械研磨都不可能是W抛光过程中的主要去除机理。在考虑颗粒吸附作用基础上,Asare^[25]提出了另一种去除机制,表明在一定条件下纳米尺度的金属氧化物颗粒累积在金属抛光表面形成氧化物膜,颗粒在碰撞过程中与氧化物间发生异质吸附而实现氧化物膜的去除。

近几年来,在ULSI制造中出现W被Cu代替的趋势,相应已有大量相关的Cu抛光机理的研究^[26-30]。钝化层形成理论同样适合于Cu的抛光^[26]。可是,Cu

1) Lei S, Mechanical interactions at the interface of chemical mechanical polishing. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2000. 63~85

2) Stein D. Mechanistic, Kinetic, and Processing Aspects of Tungsten Chemical Mechanical Polishing. PhD Thesis, University of New Mexico, 1998. 119~164

与W的抛光有所不同,它在低pH值抛光液中和非钝化条件下也能进行抛光^[27]. Li^[28]比较了 Al_2O_3 和 SiO_2 颗粒对Cu抛光的行为,发现材料的去除决定于颗粒硬度和抛光表面膜硬度, Al_2O_3 抛光液的抛光率随抛光表面膜硬度而变化,机械磨损占主导因素,而 SiO_2 抛光液却与薄膜的硬度没有直接关系,其去除机理更复杂. Liang等人^[29]进一步对 SiO_2 抛光液抛光的Cu表面分析,推测出基于化学作用的两种抛光机理:第一,在碱性溶液中,表面钝化膜形成,抛光颗粒与抛光垫间的机械能激发了氧化物膜的表面能,破坏了铜氧化物的键连接,部分铜氧化物溶解在抛光液中;第二,抛光过程中形成纯铜表面,表面能受机械作用激发,铜键断裂,铜原子在抛光液中很快被氧化为 Cu_2O ,然后随抛光液排出. Wei^[30]在此基础上进行更深入的分析,提出在低浓度抛光液中,形成了 Cu_2O 表面膜,每个氧原子可以带走2个Cu原子,产生了较快的去除率,而高浓度抛光液中则形成 CuO ,每个氧原子仅带走1个Cu原子,因此降低了去除率.

可以发现,上述Cu-CMP材料去除机理的研究仅涉及某一方面或几方面因素,不能真实反映CMP过程. Gotkis等人^[31]填补了去除率研究方面的一些空白,提出: $RR = k_{\text{chem}} \cdot (RR_{\text{mech}})_0 + k_{\text{mech}} \cdot (RR_{\text{chem}})_0$. 式中RR表示去除率, $(RR_{\text{mech}})_0$ 和 $(RR_{\text{chem}})_0$ 分别表示表面材料在没有任何化学辅助作用下的纯粹研磨磨损和没有研磨作用发生下纯粹的化学溶解, k_{chem} 和 k_{mech} 分别表示抛光表面化学改性和机械作用影响系数, k_{chem} 和 k_{mech} 随着抛光液成分和浓度、抛光工艺参数和抛光材料等因素的变化而变化,材料去除机制也因此不同. 该模型为从不同角度讨论Cu-CMP过程提供了思路,根据 k_{chem} 和 k_{mech} 的变化可以得到不同的抛光区域. Steigerwald^[32]根据抛光率随腐蚀剂浓度和压力的变化将抛光分为两个区域:溶解率饱和区与研磨率饱和区. 在低浓度时,抛光去除率受铜和表面形成的氧化铜的溶解率限制,化学作用占主导因素;而在高浓度时,抛光率受表面研磨率限制,机械摩擦占主导因素. 而Luo^[22]则根据去除率随颗粒质量浓度的变化划分为3个区域:化学腐蚀控制的去除率快速增加区,机械研磨作用控制的线形增长区和饱和区.

因为钽(Ta)在铜互连线IC制造中的较好阻挡效果, Ta的CMP机理已得到越来越多的研究. Ta的去除机理与其他金属材料类似,主要表现为表面钝化层

的形成和去除^[33]. 可是,抛光液pH值的影响尤其显著, pH值的变化可能引起表面钝化膜物理或化学性能变化^[34,35],也可能导致研磨颗粒与Ta表面膜静电相互作用的变化^[36],去除机理也随之改变.

2 计算机磁头/硬盘加工中的CMP

在计算机硬盘中,磁头、磁盘的表面粗糙度、波纹度和纳米划痕不仅影响磁头的飞行稳定性,而且影响表面的抗腐蚀性. 下一代磁头要求表面粗糙度和波纹度达到埃量级时,已接近抛光加工的极限,该方面的研究技术和理论都是国际公认的难题. 同时,该领域研究的保密性极高,有关其表面材料去除机理研究的报道极少. 在硬盘片抛光研究方面,雒建斌^[7,37]和马俊杰¹⁾等人研究了固体颗粒尺寸、抛光液组分对Ni-P合金表面层抛光性能的影响,在AFM观测(见图2)和AES分析基础上推测了材料去除机理:首先Ni-P表面被抛光液中的 Fe^{3+} 氧化剂氧化,表面生成一层氧化膜,使强度降低,盘片表面脆化,然后抛光液中的 SiO_2 颗粒磨去氧化层,如此循环,由于盘片表面的突起部分首先被去除,从而实现表面的全局平面化.

3 CMP过程的理论分析与计算

数值计算的应力偶模型以及分子动力学模拟可以克服实验和测试的局限,在CMP机理研究中得到大量应用,目前已成为一个活跃的领域. 早在1927年, Preston^[38]就提出了第一个机械模型,建立了材料

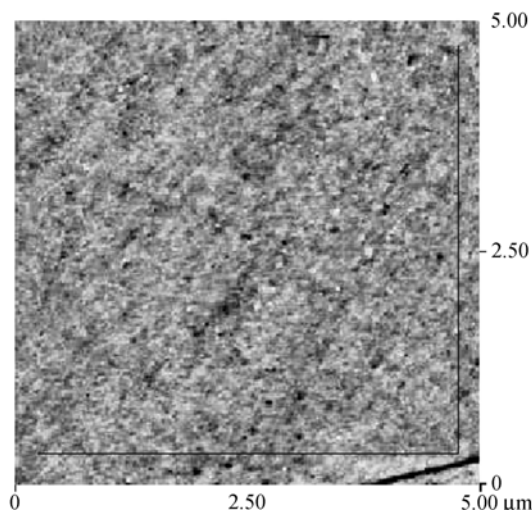


图2 商用抛光液抛光后盘片表面的AFM图象¹⁾

1) 马俊杰. 计算机硬盘片化学机械抛光的实验研究. 清华大学硕士论文, 2003. 61~68

去除率与摩擦功之间的经验关系。Warnock^[39]在此基础上建立可考虑抛光中多种几何特征,其在物理学上是合理的,可是它并未完全揭示磨损机理。Liu等^[40]基于磨粒在抛光垫和硅片之间的滚动运动分析了CMP的磨损机理。Sundararajan等人^[2]在假定抛光液腐蚀为主要的去除机理基础上,计算了CMP过程中的抛光液膜厚度和流体压力,然而它忽略了嵌入抛光垫表面磨粒的机械磨损。Larsen-Basse和Liang^[19]模型指出CMP的主要磨损机理是由抛光液中的颗粒所产生的磨损。Zhang等人^[41,42]提出了描述CMP润滑行为的Reynolds方程的数值求解方法,给出了数值模拟的无量纲载荷、力矩与间隙、旋转角度和倾角等的变化关系,为材料去除机理研究提供了参考信息。

从上述实验和理论研究可以发现,几乎所有材料去除机理的研究首先是研究抛光材料或抛光工艺参数的变化对抛光去除率的影响,然后从中推测出物理或数学模型,最后再将模型应用于有限的实验中验证。采用这些模型对揭示CMP加工过程的本质还存在相当的局限性。迄今为止仍没有能完整描述CMP材料去除机理的模型,这与不能从大量抛光因素中准确提炼出关联机理的信息密切相关。因此,有必要首先对抛光过程中一些本质问题(如颗粒与抛光表面相互作用)进行研究,然后在此基础上展开对抛光机理的探索。

4 CMP过程中颗粒与抛光片表面相互作用

无论集成电路中Si衬底、介电层、金属层,还是计算机磁头/磁盘,尽管它们的抛光机理均未得到清楚的认识,可是,在没有氧化剂条件或没有研磨颗粒条件下的抛光液中进行试验都表明不可能得到要求的抛光去除率,从而说明机械作用在全局平面化中的重要作用。CMP过程中的机械作用通常在两种典型的接触模式^[43,44]下存在,即流体动力学模型和固体/固体接触模型。当抛光表面承受压力较小、相对速度较大时,在抛光垫与抛光片表面间形成一层薄流体膜,抛光液中固体颗粒大小(纳米尺度)比流体膜厚度(微米尺度)小得多,大部分颗粒对材料去除没有贡献,材料去除主要由悬浮在抛光液中颗粒的三体研磨和抛光液的化学腐蚀作用。当压力较大、相对速度较小时,被抛光表面片与抛光垫表面相互接触,两体和三体磨损同时存在。如图3^[45]所示,在两体磨损中,

嵌入抛光垫表面的颗粒的犁削效应实现材料去除,在抛光垫与抛光表面未接触区的凹陷处的颗粒不会嵌入抛光垫,它不起作用或者发生三体磨损,相对于在抛光片/抛光垫接触区发生的两体磨损而言,三体磨损的材料去除量可以忽略。

在这两种接触条件下,抛光高速旋转下的颗粒和抛光垫粗糙峰与抛光表面间的材料去除磨损机制主要包括磨粒磨损、粘着磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损^[44]。在CMP过程中,当抛光件与抛光垫间存在相对速度,镶嵌在抛光垫或片子表面的颗粒沿抛光片表面的移动磨损表面,移动包括滑动和滚动。Liang等人^[45]已观察到颗粒在片子表面滑动和滚动痕迹。提出颗粒在片子表面上滚动时,尽管只有粘着磨损发生,然而粘着磨损和磨粒磨损是CMP过程的主要磨损机制。决定嵌入表面的颗粒是否移动,它取决于诸多因素,包括颗粒和基体的变形、相对速度、粘着力、表面硬度和摩擦系数等。决定颗粒在表面是滚动还是滑动同样是非常重要的,以便于确定CMP过程中发生的磨损机理。并非所有接触抛光片的颗粒都会产生有效的材料去除,当颗粒在表面滚动时出现粘着磨损,因为滚动导致的晶片表面材料去除相对较小;当颗粒是被抛光垫牢固镶嵌至于在抛光片表面滑动时,颗粒与晶片表面间的相互作用变得显著,导致抛光表面明显的物理和化学变化,抛光片表面出现磨粒磨损的材料去除,该滑动条件主要受颗粒/抛光垫和颗粒/晶片之间的表面摩擦来决定,除摩擦系数和接触面积外,还决定于接触界面的法向力,从而引出了达到有效材料去除率的临界力条件模型^[46]。

尽管材料磨损去除机理已得到广泛认可,可是Moon¹⁾、Stein和Cecchi^[47]和Bielman^[48]等人的实验研究却表明在高质量的抛光表面很少有犁削痕迹发现,提出材料的主要去除机理不是颗粒对抛光片表

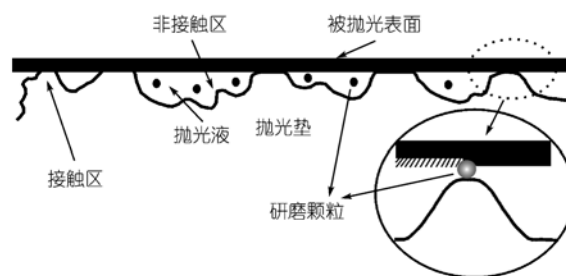


图3 抛光表面与抛光垫接触示意图^[43]

1) 见1700页脚注

面的机械犁削。另外,在理论方面,磨粒磨损要求磨粒先压入表面然后犁削,然而,通过理论计算表明,颗粒压入表面的深度往往在原子量级或更小,如在常见工艺和参数下,Luo和Dornelf^[43]的计算结果为0.07 nm。在这种尺度下,材料不可能在分子甚至更小尺度上发生犁削去除,建立在连续介质力学基础上的犁削去除模型面临挑战。因此,采用非连续介质理论来分析分子/原子大小或纳米尺度化学机械抛光机理可能更为合理。

在考虑表面分子结合能基础上,Pietsch^[49],Hoshino^[15],Vijayakumar^[50]和Zhao^[51]等提出了建立在非连续介质理论基础上的材料去除机理,主要包括:抛光过程中化学反应完全改变了表面原子或分子间的键合能力,使其变成弱键合分子,一旦机械作用传递的能量足以断裂弱键合分子所需的能量,结果表现为表面凸起部分在原子或分子尺度上发生材料去除。

5 结论

CMP过程是发生在微纳米尺度上一个动态过程,是在一定运行条件下诸多因素的综合作用效果。材料去除机理的研究可能涉及到研磨过程、腐蚀过程、电化学、流体动力学等,另外,新材料的层出不穷(如Cu、Cu合金、扩散阻挡层、低 k 介电层聚合物和有机硅玻璃材料等),抛光研究已成为一个非常活跃的领域,这些新材料抛光实质上更加复杂。这与CMP的实际应用水平严重失调。因此,要实现抛光材料去除机理研究的突破,可以从以下几个科学问题开展研究:

(1)抛光表面与单个研磨颗粒间的物理化学行为研究。消除其他因素的耦合效应,独立研究抛光表面与单个颗粒间的相互作用规律,如采用AFM技术研究单个颗粒与抛光表面间的相互作用及其在不同抛光液下对去除率的影响。

(2)抛光表面与研磨颗粒间的粘着和碰撞问题研究。设计模拟CMP过程的强化实验,研究发生在纳米尺度下的粘着和碰撞去除机制。

(3)抛光过程中纳米颗粒运动规律的测试研究。采用先进测试技术,如采用激发荧光技术在线研究抛光液在抛光片表面的流动规律和颗粒与抛光表面间相互作用。

致谢 本工作为“973”计划项目(批准号:2003CB716201)和

国家自然科学基金重大项目(批准号:50390060)资助项目。

参 考 文 献

- 1 Hahn P O. The 300 mm wafer — a cost and technology challenge. *Microelectronic Engineering*, 2001, 56: 3~13[DOI]
- 2 Sundararajan S, Thakurta D. Two-dimensional wafer-scale chemical-mechanical planarization models based on lubrication theory and mass transport. *J of the Electrochemical Society*, 1999, 146(2): 761~766[DOI]
- 3 Liu R C, Pai C S, Martinez E. Interconnect technology trend for microelectronics. *Solid-State Electronic*, 1999, 43: 1003~1009[DOI]
- 4 Liu Y L, Zhang K L, Wang F, et al. Investigation on the final polishing and technique of silicon substrate in ULSI. *Microelectronic Engineering* 2003, 66: 438~444[DOI]
- 5 Swetha T, Arun K S, and Ashok K. Tribological issues and modeling of removal rate of low- k films in CMP. *J Electrochem Soc*, 2004, 151: G205~G211[DOI]
- 6 Luo J B, Gao F, Hu Z M, et al. Surface finish and performances of read/write heads by using ultra-fine diamond slurry in polishing process. *Int J Nonlinear SCI*, 2002, 3 (3~4): 449~454
- 7 Lei H, Luo J B, Pan Guo S, et al. Chemical mechanical polishing of computer hard disk substrate in SiO_2 colloidal slurry, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2002, 3:455~459
- 8 Cook L M. Chemical process in glass polishing. *J Non - Crystalline Solids*, 1990, 120: 152~171[DOI]
- 9 Stefan J S, Jan A S. Surface defects in polished silicon studied by cross-sectional transmission electron microscopy. *J Am Ceram Soc*, 1989, 72(7): 1135~1139
- 10 Kunz R R, Clark H R, Nitishin P M, et al. High resolution studies of crystalline damage induced by lapping and single-point diamond machining of Si (100). *J Mater Res*, 1996, 11(5): 1228~1237
- 11 Graf D, Schnegg A, Schmolke R, et al. Morphology and chemical composition of polishing silicon wafer surfaces. *Electrochemical Society Proceedings*, 2000, 96~22: 186~196
- 12 刘玉岭, 檀柏梅, 张楷亮. 超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 138~177
- 13 Mahajan U, Biemann M and Singh R K. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2000, 566: 27~32
- 14 Tomozawa, Minoru. Oxide CMP Mechanisms. *Solid State Technology*, 1997, 40: 39~53
- 15 Hoshino T, Kurata Y, Terasaki Y, et al. Mechanism of polishing of SiO_2 films by CeO_2 particles. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, 283: 129~136[DOI]
- 16 Borst C L, Gill W N, Gutmann R J. Chemical-mechanical Polishing of Low Dielectric Constant Polymers and Organosilicate Glasses: Fundamental Mechanisms and Application to IC Interconnect Technology. Boston/London: Kluwer/Academic/Publishers, 2002. 71~161
- 17 Dan T, Fury M. Chemical mechanical polishing of polymer films. *Journal of Electronic Materials*, 1998, 27(10): 1088~1094
- 18 Neirynek J M, Yang G R, Murarka S P, et al. Low dielectric con-

- stant materials-synthesis and applications in microelectronics. Materials Research Society Symposium Proceedings, 1995, 381: 229~234
- 19 Larsen-Basse J, Liang H. Probable role of abrasion in chemo-mechanical polishing of tungsten. *Wear*, 1999, 233~235: 647~654[DOI]
- 20 Kaufman F B, Thompson D B, Broabie R E, et al. Chemical-mechanical polishing for fabricating patterned W metal features as chip interconnects. *J Electrochem Soc*, 1991, 138(11): 3460~3464
- 21 Zhao Y, change L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing. *Wear*, 2002, 252: 220~226[DOI]
- 22 Luo J, Dorfled D A. Material removal regions in chemical mechanical planarization for sub-micron integrated circuit fabrication: coupling effects of slurry chemicals, abrasive size distribution and wafer-pad contact area. *IEEE Trans Semiconduct Manuf*, 2003, 16(1): 45~56[DOI]
- 23 Anantha R S, Wang J F. Microstructural and surface phenomena in metal CMP. *Electrochemical Society Proceedings*, 1996, 22: 258~266
- 24 Kneer E A, Raghunath C, Raghavan S, et al. *J Electrochem Soc*, 1996, 143: 4095~4100
- 25 Asare O K, Khan A. Chemical-mechanical polishing of tungsten: an electrophoretic mobility investigation of alumina-tungstate interactions. *Electrochemical Society Proceedings*, 1998, 7: 138~144
- 26 Steigerwald J, Zirpoli R, Myrarka S, et al. Metal dishing and erosion in the chemical-mechanical polishing of copper used for patten delineation. *Mater Res Soc Symp Proc*, ULSI-X, 1995: 55~59
- 27 Oliver M R. CMP fundamentals and challenges. *Mater Res Soc Symp Proc*, 2000, 566: 73~79
- 28 Li Y, Ramarajan S, Hariharaputhiran M, et al. Planarization of Cu and Ta using silicon and alumina abrasives- A comparison. *Mater Res Soc Symp Proc*, 2000, 613: E2.4.1~E2.4.6
- 29 Liang H, Martin J M, Brusie V. Chemical wear of Cu CMP. *Mater Res Soc Symp Proc*, 2000, 613: E2.5.1~E2.5.5
- 30 Wei David, Gotkis Y, Li H, et al. Copper CMP for dual damascene technology: some consideration on the mechanism of removal. *Mater Res Soc Symp Proc*, 2001, 671: E3.3.1~E3.3.6
- 31 Gotkis Y, Kistler R. Cu CMP for dual damascene technology: fundamentals. *Electrochemical Society Proceedings*, 2000, 26: 253~269
- 32 Steigerwald J M, Murarka S P, Ho J, et al. Mechanism of copper removal during chemical mechanical polishing. *J Vac Sci Technol*, 1995, B13(6): 2215~2218[DOI]
- 33 Hariharaputhiran M, Li Y, Ramarajan S, et al. Chemical mechanical polishing of Ta. *Electrochemical and Solid-state Letters*, 2000, 3(2): 95~98[DOI]
- 34 Kuiry S C, Sea I S, Fei W, et al. Effect of pH and H₂O₂ on Ta Chemical Mechanical Planarization. *Journal of The Electrochemical Society*, 2003 150(1): c36~c43[DOI]
- 35 Li Y, Babu S V. Chemical Mechanical Polishing of Copper and Tantalum in Potassium Iodate-Based Slurries. *Electrochemical and Solid-state Letters*, 2001, 4 (2): G20~G22[DOI]
- 36 Ramarajan S, Li Y, Hariharaputhiran M, et al. Effect of PH and Ionic strength on chemical mechanical polishing of Tantalum. *Electrochemical and Solid-state Letters*, 2000, 3 (5): 232~234[DOI]
- 37 雒建斌, 雷红, 潘国顺, 等. 一种用于存储器硬盘的磁盘基片抛光浆料. 中国专利, 2003, No.1 417 278
- 38 Preston F. The theory and design of plate glass polishing machines. *J Soc Glass Technol*, 1927, 11: 214~256
- 39 Warnock. A two-dimensional process model for chemimechanical polish planarization. *Journal of The Electrochemical Society*, 1991, 138(8): 2398~2402
- 40 Liu C, Dai B, Tseng W, et al., Modeling of the wear mechanism during chemical-mechanical polishing. *J. of the Electrochemical Society*, 1996, 143(2): 716~721
- 41 Zhang C H, Luo J B, Wen S Z. Multigrid technique incorporated algorithm for CMP lubrication equations. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3): 81~84
- 42 Zhang, C. H., Luo, J. B., Wen, S. Z., Modeling chemical mechanical polishing with couple stress fluids. *Tsinghua Science and Technology*, 2004, 3
- 43 Luo J F, Dornfeld D A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling. *IEEE Transaction on semiconductor manufacturing*, 2001, 14(2): 112~133[DOI]
- 44 Ahmadi G, Xia X. A model for mechanical wear and abrasive particle adhesion during the chemical mechanical polishing process. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148 (3): G99~G109[DOI]
- 45 Liang H, Kaufman, Sevilla R, et al. Wear phenomena in chemical mechanical polishing. *Wear*, 1997, 211: 271~279[DOI]
- 46 Zhao B, Shi F G. Chemical mechanical polishing: Threshold pressure and mechanism. *Electrochemical and Solid-state Letters*, 1999, 2 (3): 145~147[DOI]
- 47 Stein D J, Cecchi J L. Atomic force microscopy, lateral force microscopy, and transmission electron microscopy investigations and adhesion force measurements for elucidation of tungsten removal mechanisms. *J Mater Res*, 1999, 14(9): 3695~3706.
- 48 Bielman M, Mahajan U, Singh R K. Effect of particles size during tungsten chemical mechanical polishing. *Electrochemical and Solid-state Letters*, 1999, 2 (8): 401~403[DOI]
- 49 Pietsch G J, Chabal Y J, Higashi G S. The atomic-scale removal mechanism during chemo-mechanical polishing of Si (100) and Si (111). *Surface Science*, 1995, 331~333: 395~401[DOI]
- 50 Vijayakumar A, Du T, Sundaram K B, et al. Polishing mechanism of tantalum films by SiO₂ particles. *Microelectronic Engineering*, 2003, 70: 93~101[DOI]
- 51 Zhao Y, Change L., Kim S H. A mathematical model for chemical-mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species. *Wear*, 2003, 254: 332~339[DOI]

(2004-02-23 收稿, 2004-06-07 收修改稿)