

化学机械抛光(CMP)技术的发展、应用及存在问题

雷红 雒建斌 马俊杰

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 在亚微米半导体制造中, 器件互连结构的平坦化正越来越广泛采用化学机械抛光 (CMP) 技术, 这几乎是目前唯一的可以提供在整个硅圆晶片上全面平坦化的工艺技术。本文综述了化学机械抛光的基本工作原理、发展状况及存在问题。

关键词: CMP 设备 研浆 平面化技术

Advances and Problems on Chemical Mechanical Polishing

Lei Hong Luo Jianbin Ma Junjie

(The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University 100084)

Abstract: Chemical mechanical polishing (CMP) has become widely accepted for the planarization of device interconnect structures in deep submicron semiconductor manufacturing. At present, it is the only technique known to provide global planarization within the whole wafers. The progress and problem of CMP are reviewed in the paper.

Keywords: CMP Equipment Slurry Planarization

1 CMP的发展、应用

随着半导体工业沿着摩尔定律的曲线急速下降, 驱使加工工艺向着更高的电流密度、更高的时钟频率和更多的互联层转移。由于器件尺寸的缩小、光学光刻设备焦深的减小, 要求片子表面可接受的分辨率的平整度达到纳米级^[1]。传统的平面化技术如基于淀积技术的选择淀积、溅射玻璃 SOG、低压 CVD、等离子体增强 CVD、偏压溅射和属于结构的溅射后回腐蚀、热回流、淀积—腐蚀—淀积等, 这些技术在 IC 工艺中都曾获得应用。但是, 它们虽然也能提供“光滑”的表面, 却都是局部平面化技术, 不能做到全局平面化。目前, 已被公认的是, 对于最小特征尺寸在 $0.35\mu\text{m}$ 及以下的器件, 必须进行全局平面化, 为此必须发展新全局平面化技术。

90 年代兴起的新型化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, 简称 CMP) 技术则从加工性能和速度上同时满足了圆片图形加工的要求。CMP 技术是机械研磨和化学腐蚀的组合技术, 它借助超微粒子的研磨作用以及浆料的化学腐蚀作用在被研磨的介质表面上形成光洁平坦表面^[2,3]。CMP 技术对于器件制造具有以下优点^[1]:

(1) 片子平面的总体平面度: CMP 工艺可补偿亚微米光刻中步进机大像场的线焦深不足。

(2) 改善金属台阶覆盖及其相关的可靠性: CMP 工艺显著地提高了芯片测试中的圆片成品率。

(3) 使更小的芯片尺寸增加层数成为可能: CMP 技术允许所形成的器件具有更高的纵横比。

因而, 自从 1991 年美国 IBM 公司首先将 CMP 工

艺用于 64Mb DRAM 的生产中之后, 该技术便顺利而迅速地在各种会议和研究报告中传播, 并逐步进入工业化生产^[4,5]。目前美国是 CMP 最大的市场, 它偏重于多层器件, 欧洲正在把 CMP 引入生产线, 而日本和亚太地区将显著增长, 绝大多数的半导体厂家采用了金属 CMP, 而且有能力发展第二代金属 CMP 工艺。据报道^[6], 1996 年日本最大十家 IC 制造厂家中, 有七家在生产 $0.35\mu\text{m}$ 器件时使用了 CMP 平坦化工艺, 韩国和台湾也已开始 CMP 在内的亚微米技术。近年来, CMP 发展迅猛, 在过去三年中, 化学机械抛光设备的需求量已增长了三倍, 并且在今后的几年内, 预计 CMP 设备市场仍将以 60% 的增长幅度上升。CMP 技术成为最好也是唯一的可以提供在整个硅圆晶片上全面平坦化的工艺技术, CMP 技术的进步已直接影响着集成电路技术的发展。

CMP 的研究开发工作已从以美国为主的联合体 SEMATECH 发展到全球, 如欧洲联合体 JESSI, 法国研究公司 LETI 和 CNET, 德国 Fraunhofer 研究所等^[7], 日本和亚洲其它国家和地区如韩国、台湾等也在加速研究与开发, 并呈现出高竞争势头。并且研究从居主导地位的半导体大公司厂家的工艺开发实验室正扩展到设备和材料供应厂家的生产发展实验室。

CMP 技术的应用也将从半导体工业中的层间介质 (ILD), 绝缘体, 导体, 镶嵌金属 W、Al、Cu、Au, 多晶硅, 硅氧化物沟道等的平面化^[8], 拓展到薄膜存储磁盘, 微电子机械系统 (MEMS), 陶瓷, 磁头, 机械磨具, 精密阀门, 光学玻璃, 金属材料等表面加工领域。

2 CMP 技术

CMP 技术的目的是消除芯片表面的高点及波浪形。CMP 的基本原理是将圆晶片在研磨浆（如含有胶体 SiO_2 悬浮颗粒的 KOH 溶液）的存在下相对于一个抛光垫旋转，并施加一定的压力，借助机械磨削及化学腐蚀作用来完成抛光。

CMP 技术^[9~11]所采用的设备及消耗品包括：CMP 设备、研浆、抛光垫、后 CMP 清洗设备、抛光终点检测及工艺控制设备、研浆分布系统、废物处理和检测设备等。其中研浆和抛光垫为消耗品，其余为抛光及辅助设备。CMP 工艺是摩擦学、流体力学和化学的结合，因此会受到来自芯片本身和磨抛机械等因素的影响。一个完整的 CMP 工艺主要由抛光、后清洗和计量测量等操作组成，CMP 工艺中的要素包括以下内容：

(1) 抛光机

如图 1 所示，其基本组成为一个转动的圆盘和一个圆晶片固定装置。两者都可施力于圆晶片并使其旋转，在研浆（如含有胶状 SiO_2 悬浮颗粒的 KOH 溶液）的帮助下完成抛光，用一个自动研浆添加系统就可保证抛光垫湿润程度均匀，适当地送入新研浆及保持其成分不变。



图 1 一种 CMP 设备简图

目前世界上生产这类设备的厂家已达 20 家，12 家在太平洋沿线，两家在欧洲，其余在美国^[12]。如美国 IPEC—Planar 公司生产的 IPEC372 - u、472、672 型 CMP 设备，都是单头、单板抛光工艺。672 - 型有两个抛光模块，生产能力 40 ~ 50 片/h；四个抛光模块，生产能力 80 ~ 100 片/h。英国 Logitech 公司推出 CP3000 CMP 设备，可加工 0.2032 m 圆片，从去胶开始全部由机械手操作，使圆片受损最小。日本东芝机械公司推出 CMS—200 型单元单片式 CMP 设备，可加工 0.1524/0.2032 m 圆片，生产能力 20 片/h，加压具有自动分级功能，在抛光同时会自动清洗，甩干。国内迄今还未有一家公司生产 CMP 设备，随着国内 0.35 μm 工艺的不断推进，多层布线中平坦化工艺的矛盾将日益突出，为此，及早在国内进行 CMP 设备和工艺的开发已成为当务之急。CMP 设备目前正在由单头、双头抛光机向多头抛光机发展，结构逐步由旋转运动结构向轨道抛光方法^[13]和线性抛光方法^[14]方面发展。0.18 μm 技术对 CMP 设备提出了更高的要求，如设备集成、干进干出、抛光头改进、多工序加工、

无研磨膏 CMP、终点检测、自动输送接口、干法清洗圆片等，同时，对于 0.18 μm 或更小图形尺寸的新材料（低、高 k 值绝缘材料和铜）的 CMP 设备还有待开发。

(2) 抛光垫

抛光垫是输送研磨浆的关键部件，它用于将研磨浆中的磨蚀粒子送入片子表面并去除副产品，平坦化的获得是因为圆晶片上那些较高的部分接触抛光垫而被去除。抛光垫的机械性能，如弹性和剪切模量、可压缩性及粗糙度对抛光速度及最终平整度起着重要作用。抛光垫的硬度对抛光均匀性有明显的影响，硬垫可获得较好的模内均匀性（WID）和较大的平面化距离，软垫可改善片内均匀性（WIW），为获得良好的 WID 和 WIW，可组合使用软、硬垫^[15]，在圆片及其固定装置间加一层弹性背膜（backing film），可满足刚性及弹性的双重要求。抛光垫常为含有聚氨酯纤维毡的聚酯纤维毡。抛光垫使用后会逐渐“釉化”，使去除速度下降，用修整的方法可以恢复抛光垫的粗糙面，改善其容纳浆料的能力，从而使去除速度得到维持且延长抛光垫的寿命。因而改进抛光垫、延长其使用寿命从而减小加工损耗是 CMP 技术的主要挑战之一。

(3) 研浆

研浆是 CMP 的关键要素之一，研浆的化学作用在金属 CMP 中起主要作用，研浆的组成、pH 值、颗粒粒度^[16]及浓度、流速、流动途径对去除速度都有影响。研浆一般由研磨剂（ SiO_2 、 Al_2O_3 等）、表面活性剂、稳定剂、氧化剂等组成^[17~19]，最具代表性的抛光浆液由一个 SiO_2 抛光剂和一个碱性组分水溶液组成， SiO_2 粒度范围为 1 ~ 100 nm，且非常均匀， SiO_2 浓度为 1.5 ~ 50%，碱性组成一般使用 KOH 、氨或有机胺，pH 值为 9.5 ~ 11。抛光不同的材料所需的抛光浆液组成均不同，在镶嵌 W CMP 工艺中典型使用铁氰酸盐、磷酸盐和胶体 SiO_2 或悬浮 Al_2O_3 粒子的混合物，溶液的 pH 值在 5.0 ~ 6.5 之间。抛光氧化物的浆料一般以 SiO_2 为磨料，pH 值一般控制在 $\text{pH} > 10$ ，而抛光金属则以 Al_2O_3 作添加剂的基础材料，以便控制粘性和腐蚀及去除副产品，研磨料的性能、分散稳定性对于 CMP 浆都是很重要的。

浆料的研究仍集中于 ILD CMP，最近逐渐转向金属 CMP（如 W CMP 等），随着 IC 工艺的发展，研究的重点已转移到用铜做层间引线的领域上来，铜的 CMP 作为微型器件的主要加工工艺，各国均在加紧工艺研究。浆料研究的最终目标是找到化学作用和机械作用的最佳结合，以正确获得高去除速度、平面度好、膜《润滑与密封》

厚均匀性好及选择性高的浆料,同时还要兼顾易清洗性、对设备的腐蚀性、废料的处理费用及安全性。

(4) CMP 后清洗

圆晶片经 CMP 加工后,会有少量浆料残留在片子上,从而影响其表面的质量及下道工序,因而 CMP 的后清洗是 CMP 加工的重要部分,其目的是把 CMP 中的残留粒子和金属沾污减少到可接受的水平。现在对 $0.35\mu\text{m}$ 及以下的 CMOS 工艺,要求后清洗提供的片子上附着物不多于 $500\text{个}/\text{m}^2 \times 0.12\mu\text{m}$,碱金属粒子数不大于 $5 \times 10^{11}\text{原子}/\text{cm}^2$ ^[20]。CMP 后清洗已成功地使用了湿式化学浴处理、喷射处理、去离子水及 NH_4OH 擦洗、超声及两步抛光等方法,这些方法单用或组合使用^[20~22]。湿式化学处理台、酸处理器、用 PVA 刷加去离子水擦洗对氧化物 CMP 后处理特别有效。稀 HF 作为湿式化学浴处理的一部分可去除大部分粒子和金属沾污,在浸泡时使用超声亦可加强清洗效果。

氧化物 CMP 后处理的新进展是把 PVA 刷擦洗与氧化物腐蚀组合成一台设备,既改善了性能,又降低了处理费用。在 W CMP 后清洗时,由于氧化铝磨料和氧化硅磨料性质上的差别,使用 NH_4OH 机构刷擦洗是最有效的。随着器件特征尺寸的持续减小及 CMP 应用领域的扩大,将会出现新的介质材料,研浆的组成也会出现相应的变化,因而必将给后清洗工艺提出更多的课题^[23]。

(5) 终点检测

CMP 设备开发的难点之一就是如何精确控制和检测被抛去的量^[24],在 CMP 工艺中,必须有性能良好的检测技术,以避免过抛或抛光不足而导致的成品率下降。

对于 W CMP,常常利用底层的 ILD 作为终止的参考,对于 ILD CMP,终点比较难以监测,有一些测量方法如测量 ILD 层电容、动态光学干涉测量、声学膜厚跟踪、电导法等,但都尚未达到可以实用的水平^[23]。目前有两种基本的检测方法可用于 CMP 工艺,即间接地利用一些物理特性或是直接检测片子^[1]。当表面抛光后,下层露出,此时片和抛光垫之间的摩擦就会发生变化,检测由上一层向下一层过渡的简单方法是监测驱动电机的电流。

监测终点最精确的方法是直接测量膜的厚度,但这种测量必须在一枚运动的片子上通过旋转的压盘和使用成份不断变化的研磨膏来完成。目前,许多 CMP 设备制造商已开发了大量的解决这一问题的方式,如 Applied Materials 公司开发了一种在位激光干涉仪,安装在压盘上从片子的背面进行监测,Luxtron 公司则提

供了一种红外线传感器固定在载片台上,通过无线电与系统控制器联络,由多路传感器给出片子上抛光加工的已达范围。

(6) 抛光片的监测

抛光片的监测项目主要有:平整度、表面缺陷及损伤情况。

1) 平整度:抛光片的平整度一般用平整度测试仪测试,表面轮廓仪可用于检测氧化层 CMP 的平面化效果和镶嵌金属 CMP 的蝶形化和侵蚀程度,AFM 用于检查表面微粗糙度也有过报道。

2) 表面缺陷:抛光片的表面宏观缺陷较多,一般有划道、蚀坑、波纹、桔皮、麻点、雾状等,常用激光粒子计数器、TEM、FTIR、TXRF(全反射 X 射线荧光光谱分析技术)、C-V 法等^[8]检测表面缺陷。

3 CMP 技术发展中存在的问题

随着计算机、通信及网络技术的高速发展,对作为其基础的集成电路的性能要求越来越高,集成电路芯片增大而单个晶体管元件减小及多层集成电路芯片是发展的必然趋势,这对 CMP 技术提出了更高的要求。

尽管 CMP 技术发展的速度很快,但它们需要解决的理论及技术问题还很多。如人们对诸如抛光参数(如压力、转速、温度等)对平面度的影响、抛光垫—浆料—片子之间的相互作用、浆料化学性质(如组成、pH 值、颗粒度等)对各种参数的影响等比较基础的基础机理了解甚少,因而定量确定最佳 CMP 工艺,系统地研究 CMP 工艺过程参数,建立完善的 CMP 理论模型,满足各种超大型集成电路生产对 CMP 工艺的不同要求,是研究 CMP 技术的重大课题;由于还缺乏有效的在线终点检测技术,维持稳定的、一次通过性的生产运转过程还存在困难,因而迫切需要开发实用的在线检测手段;CMP 工艺一般在芯片工艺的最后几个阶段才使用,此时每个芯片的价值已达到数千至数十万美元,若要将一个价值很高的、经历了数星期谨慎辛劳制作的芯片送到一个难以清洗的浆料中去加工,是难以下决心的^[25],因而,片子表面残留浆料的清除确实是 CMP 后清洗的主要课题;研制合适的 CMP 工艺、设备及研浆以使去除速度高而稳定、片子的模内均匀性和片内均匀性都理想,而且产生的缺陷不多,是 CMP 技术发展的主要难题。

同时,在下一代器件制造中新材料如铜和低、高 k 值介质材料的抛光加工也对 CMP 技术提出了新的挑战,Cu CMP 在世界范围内仍然处于攻关研究阶段。

参考文献

[1] John Schuler, CMP technology and markets, SEMICON China 99

- Technical Symposium, March 17 ~ 18, 1999, Beijing, China.
- [2] Malik F., Hasan M., Manufacturability of the CMP process, Thin Solid Films, 1995, 270: 612 ~ 615.
- [3] Jairath R., Farkas J., Huang C. K. et al, Chemical-Mechanical Polishing: Process manufacturability, Solid State Technology, 1994, 7: 71 ~ 75.
- [4] Michael A. Fury, The early days of CMP, Solid State Technol., 1997, 40 (5): 81 ~ 86.
- [5] Minoru T., Oxide CMP mechanisms, Solid State Technol., 1997, 40 (7): 170.
- [6] 谢中生, CMP 平坦化工艺技术中的发展应用与设备前景, 电子工业专用设备, 1997, 26 (1): 12 ~ 14.
- [7] Martinez M. A., A year later, CMP market has grown even hotter, Solid State Technol., 1995, 38 (9): 44.
- [8] Fury M. A., Emerging developments in CMP for Semiconductor Planarization, Solid State Technology, 1995, 38 (4): 47.
- [9] Steigermald J. M., Murarka S. P., Gutmann R. J., Chemical mechanical planarization of microelectronic materials, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & sons, Inc., New York, USA, 1996: 324.
- [10] 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.
- [11] Sivaram S., Bath H., Leggett R. et al, Planarizing interlevel dielectrics by chemical-mechanical polishing, Solid State Technology, 1992, 5: 87 ~ 91.
- [12] 董志义, CMP 设备市场及技术现状, 电子工业专用设备, 2000, 29 (4): 11 ~ 18.
- [13] USP 5 554 064.
- [14] Jairath R., Solid State Technology, 1996, 39 (10): 107.
- [15] Ali I., Roy S., Shinn G., Chemical-mechanical polishing of interlayer dielectric: A review, Solid State Technol., 1994, 37 (10): 63.
- [16] Basim G. B., Adler J. J., Mahajan U. et al, Effect of particle size of chemical mechanical polishing slurries for enhanced polishing with minimal defects, Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147 (9): 3523 ~ 3528.
- [17] CN 1244033A.
- [18] CN 1166805A.
- [19] CN 1223308A.
- [20] De Larios J. M., Post-CMP cleaning for oxide and tungsten applications, Semiconductor Int '1, 1996, 19 (5): 121.
- [21] Wang Y. L., Liu C., Feng M. S., Tseng W. T., A modified multi-chemicals spray cleaning process for post-CMP cleaning application, Materials Chemistry and Physics, 1998, 52 (1): 23 ~ 30.
- [22] Myers T. L., Fury M. A., Krusell W. C., Post-tungsten CMP cleaning: Issues and solutions. Solid State Technol., 1995, 38 (6): 109.
- [23] 江瑞生, 集成电路多层结构中的化学机械抛光技术, 半导体技术, 1998, 23 (1): 6 ~ 9.
- [24] Fury M. A., Emerging developments in CMP for semiconductor planarization—part 2, Solid State Technol., 1995, 38 (7): 81.
- [25] Singer P., Chemical-mechanical polishing: A new focus on consumables, Semiconductor Int '1, 1994, 17 (2): 48.

书 讯

1. 《无油润滑压缩机》, 朱圣东等编著, 机械工业出版社, 2001年, 28.00元。该书共分十二章: (1) 概述, (2) 自润滑材料, (3) 塑料的摩擦磨损机理, (4) 活塞压缩机的无油润滑结构与设计, (5) 无油润滑压缩机的常见故障及失效分析, (6) 活塞式无油润滑压缩机的运行操作, (7) 有油润滑压缩机的技术改造, (8) 压缩机的故障诊断, (9) 螺杆式无油润滑压缩机, (10) 隔膜式无油润滑压缩机, (11) 滑片式和斜轴无油润滑压缩机, (12) 迷宫活塞和组合式无油润滑压缩机。

2. 《设备润滑基础》, 胡邦喜编, 冶金工业出版社, 2002年, 89元。该书共分十章: (1) 摩擦磨损与润滑, (2) 润滑材料, (3) 润滑元件和装置, (4) 润滑系统和集中润滑系统的设计计算, (5) 典型零部件润滑, (6) 通用设备的润滑, (7) 润滑设备的安装

及维修, (8) 润滑油的运行状态监测, (9) 液压润滑系统的污染控制, (10) 润滑油脂的质量鉴别方法、贮存、保管、运输及再生。附录: (1) 各种润滑脂性能, (2) 润滑脂对照表。

3. 《新编润滑油品选用手册》, 王先会编, 机械工业出版社, 2001年, 25.00元。该书共分四大部分: (1) 车辆润滑油; (2) 工业设备润滑油; (3) 金属加工油剂; (4) 润滑脂与防锈油脂。

4. 《内燃机润滑油应用原理》, 关子杰编著, 中国石化出版社, 2001年, 17.00元。该书共分五章: (1) 内燃机与内燃机油基础, (2) 内燃机油使用性能, (3) 内燃机质量评定, (4) 内燃机润滑管理, (5) 几种内燃机油。

张怀良

《润滑与密封》