DOI: 10.3901/JME.2014.05.182

300 mm 晶圆化学机械抛光机关键技术研究*^{*}

王同庆 路新春 赵德文 门延武 何永勇

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 在芯片微细化和互连多层化趋势下, 化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)成为集成电路制造的核心技术。针对 300 mm 晶圆 CMP 装备被极少数国外厂家垄断、国内 300 mm 晶圆 CMP 装备水平远远落后的现状, 开展 300 mm 晶圆 CMP 装备关键技术研究。研制出 300 mm 晶圆多区压力抛光头及其压力控制系统, 该抛光头具有多区压力、浮动保持环及真空吸附等功能, 每个腔室均可实现施加正压、抽负压、通大气和泄漏检测; 压力控制系统性能测试结果表明, 该系统可实现 689.5 Pa 的超低压, 其精度和响应速度均能满足常规压力及超低压 CMP 的要求; 开发了 300 mm 晶圆超低压 CMP 样机, 创建出一套比较稳定、可靠的工艺流程, 并利用该样机初步开展铜 CMP 试验研究。试验结果表明: 抛光压力为 15.169 kPa 时, 材料去除率达 671.3 nm/min, 片内非均匀性为 3.93%。

关键词: 300 mm 晶圆; 抛光头; 多区压力; 超低压; 化学机械抛光

中图分类号: TH117

Research and Implementation on Critical Technology of Chemical Mechanical Polishing Tool for 300 mm Wafer

WANG Tongqing LU Xinchun ZHAO Dewen MEN Yanwu HE Yongyong

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

Abstract: As the feature size scales down and the implementation of multilevel metallization, chemical mechanical polishing (CMP) has become one of the most important technologies in the ultra-large-scale integrated circuits manufacturing. However, the 300 mm wafer CMP tool is being increasingly monopolized by only a few foreign companies, and therefore the research level of 300 mm wafer CMP in our country is far behind other countries such as U.S., Japan, and South Korea. The critical technology of the 300 mm wafer CMP tool is studied. Firstly a 300 mm wafer multi-zone polishing head with pressure control system is developed, vacuum chuck and floating retainer ring are also available in the polishing head. And then the static and dynamic performance of the closed-loop pressure control system is tested. Finally a 300 mm wafer CMP tool is developed, and the 300 mm wafer CMP process flow is developed, improved, and optimized, which establishes the foundation for experimental research. The experimental results show that a material removal rate of 671.3 nm/min, and a within wafer non-uniformity of 3.93 % can be realized by the developed 300 mm wafer CMP tool.

Key words: 300 mm wafer; polishing head; multi-zone pressure; ultra-low downforce; chemical mechanical polishing

0 前言

随着集成电路(Integrated circuit, IC)制造技术的不断发展, 芯片特征尺寸越来越小, 互连层数越来越多, 晶圆直径也不断增大。要实现多层布线, 晶圆表面必须具有极高的平整度、光滑度和洁净度,

而化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)是目前最有效的晶圆平坦化技术, 它与光刻、刻蚀、离子注入、PVD/CVD 一起被称为 IC 制造最核心的五大关键技术^[1-2]。CMP 技术的诞生、应用和发展都是在美日等国完成, 而 300 mm 晶圆 CMP 装备更是被极少数国外厂家所垄断, 这些国家在 CMP 等 IC 制造核心装备和技术对中国的出口设置了种种限制, 导致我国在大尺寸特别是 300 mm 晶圆 CMP 研究方面远远落后^[3]。为改变我国长期落后和受制于人的现状, 亟须开展 300 mm 晶圆 CMP

* 创新研究群体科学基金(51021064)、国家自然科学基金(51205226)和中国博士后科学基金(2012M510420)资助项目。20120830 收到初稿, 20131127 收到修改稿

装备关键技术的研究工作。

CMP 装备主要由抛光头、抛光盘、修整器、抛光液输送系统等部分组成, 而抛光头及其压力控制系统是其中最关键、最复杂的部件, 是 CMP 技术实现纳米级平坦化的基础和核心^[4]。目前国外最先进的 300 mm 晶圆抛光头采用气压方式加载, 具有分区压力、真空吸附、浮动保持环及自适应等功能, 十分复杂^[5]。随着特征尺寸不断减小和晶圆直径不断增加, 对 CMP 表面质量的要求也越来越高, 传统的单区压力抛光头已无法满足要求。如果抛光头能够将晶圆分成多个区域进行加载, 通过改变施加压力的大小就可以控制不同区域的材料去除率^[6]。当前国际上高端 300 mm 晶圆 CMP 装备的抛光头通常具有三个压力分区。此外, 在 45 nm 技术节点及以下, 目前的 CMP 装备(抛光压力 ≥ 6.985 kPa)极易造成 Low-k 材料的断裂、划伤以及 Low-k 介质/铜界面剥离等问题^[7], 超低压 CMP(≤ 3.448 kPa)将是未来 CMP 装备和技术的主要发展方向^[8-9]。

因此, 对 300 mm 晶圆 CMP 装备关键技术开展研究, 研制多区、超低压抛光头及其压力控制系统, 建立 300 mm 晶圆超低压 CMP 样机, 对提供国家亟需的 IC 制造装备核心技术, 促进 IC 产业快速发展具有重要的战略意义和应用价值。

1 多区抛光头研制

在 CMP 过程中抛光头主要起以下作用: ① 对晶圆施加压力; ② 带动晶圆旋转并传递转矩; ③ 保证晶圆与抛光垫始终贴合良好, 不掉片、碎片^[10]。此外, 在高端 CMP 装备中抛光头最好能在不借助外界条件的情况下依靠自身结构夹持晶圆, 以提高生产效率。

1.1 分区压力

分区压力抛光头是衡量 CMP 装备技术水平高低的重要因素。其核心思想来自 Preston 模型, 根据该模型, 材料去除率可表示为

$$R = K_p p v \quad (1)$$

式中, K_p 为 Preston 系数, p 和 v 分别为晶圆表面的压力和相对速度。

对于分区压力抛光头, 材料去除率可表示为^[11]

$$R_i = \sum_j K_{p,i,j} p_j v \quad (2)$$

式中, $K_{p,i,j}$ 为抛光头第 j 区的压力对晶圆半径 i 位置材料去除率的 Preston 系数, p_j 为抛光头第 j 区的压力。

根据式(2), 如果抛光头将晶圆沿径向分成多个区域进行加载, 通过改变所施加压力的大小就可以调节晶圆不同径向位置的材料去除率, 实现可控平坦化。

根据 CHEN 等^[12]的研究, 抛光头的分区数量越多, 对材料去除率的调节能力越强。但分区数量越多意味着其结构更复杂、研发难度更大。抛光头各区尺寸划分并无具体要求, 即可等分, 又可根据抛光头的内部实际结构进行划分。本抛光头利用多区气囊以气压方式加载, 具有四个环状分区。基于夹持晶圆功能的要求, 各区划分如下: Z1 为 0~35 mm, Z2 为 35~95 mm, Z3 为 95~135 mm, Z4 为 135~150 mm。

1.2 浮动保持环

为防止晶圆在旋转过程中被甩出, 抛光头必须具有保持环结构。在 CMP 技术的发展历程中出现过两种保持环: 固定保持环和浮动保持环。由于固定保持环无法避免边缘效应, 目前的主流 CMP 装备均采用了浮动保持环, 通过对浮动保持环施加不同的压力可以调节晶圆与抛光垫的接触状态, 从而有效改善边缘效应。本抛光头利用保持环气囊(Z5)对浮动保持环进行加载。

为保证在 CMP 过程中保持环与抛光垫紧密贴合, 由受力分析可得

$$p_r A_r > p_w A_w \quad (3)$$

式中, p_r 和 p_w 分别为保持环和晶圆的压力, A_r 和 A_w 分别为保持环和晶圆的面积。

对于 300 mm 晶圆, 保持环的径向尺寸通常为 150~175 mm(宽度 25 mm)左右, 因此

$$p_r > \frac{A_w}{A_r} p_w \approx 2.77 p_w \quad (4)$$

式(4)表明在 CMP 过程中保持环腔室(Z5)的压力通常大于晶圆各腔室(Z1~Z4)的压力。

由于保持环与抛光垫紧密贴合, 必须在保持环底部设计一系列沟槽以引导抛光液顺利进入晶圆/抛光垫界面^[13]。此外, 为提高寿命, 保持环需选择高强度、耐腐蚀、耐磨损的聚苯硫醚(Polyphenylene sulfide, PPS)或聚醚醚酮(Polyetheretherketone, PEEK)等材料。

1.3 真空吸附

前面提到抛光头很重要的一个功能是夹持晶圆, 实现晶圆在装卸工位与抛光工位之间的快速、可靠传输。在 CMP 技术的发展历程中出现过机械夹持、石蜡粘接、真空吸盘等多种夹持方式, 但以上方式在效率、可靠性、洁净度等方面已无法满足高端 CMP 装备的要求。

多区抛光头采用真空吸附方法夹持晶圆,基本原理如图 1 所示。首先对多区气囊施加正压,将气囊与晶圆之间的空气挤出,然后利用气囊不同分区的正、负压组合控制,在气囊和晶圆之间形成负压区,将晶圆牢固地吸附在抛光头上。该方法充分利用了抛光头自身的多区气囊结构,具有快速、可靠、无污染等优点。

图 1 抛光头真空吸附示意图

1.4 压力控制系统

该系统通过气压方式对抛光头进行压力控制,其主要功能有:① 对晶圆和保持环进行压力加载;② 对抛光头抽负压以夹持晶圆;③ 检测各腔室是否漏气。

多区抛光头的压力控制原理如图 2 所示。抛光头气路的主要元件有气源、减压阀、电气比例阀、真空发生器、真空调压阀、两位三通阀、两位两通阀以及压力传感器等。抛光头共有五个压力腔室(Z1~Z5),每个腔室都具有施加正压、抽负压、通大气和泄漏检测等功能,其中正压采用全闭环控制。

图 2 抛光头气路图

2 压力测试与分析

2.1 静态压力测试

静态压力测试是指抛光头静止不动,将晶圆以不同压力压在抛光垫上,通过气压传感器的输出值来评价闭环压力控制系统的性能。传感器选用日本

SMC 公司的 PSE543 型高精度气压传感器,测量范围 $-100\sim 100\text{ kPa}$,精度 $\pm 1\% \text{ F.S.}$ 。

以 Z1 为例对 $0.690\sim 20.685\text{ kPa}$ 压力范围进行了测试,每个压力值的测试时间都在 180 s 以上,结果见图 3 和表 1。结果显示,在 $6.895\sim 20.685\text{ kPa}$ 的铜 CMP 常规压力范围内,相对误差基本 $\leq 1\%$,对于 $0.690\sim 3.448\text{ kPa}$ 的超低压力,相对误差基本在 $1\%\sim 2\%$ 之间,各压力值的响应时间均小于 1 s 。因此,可认为该系统的精度和响应速度能同时满足常规压力 CMP 和超低压力 CMP 的要求。

图 3 静态压力测试(Z1)

表 1 静态压力测试(Z1)

目标值/kPa	测量值/kPa	误差(%)	响应时间/s
0.690	0.683	2.02	0.3
1.379	1.365	1.52	0.1
2.069	2.103	1.32	0.3
2.758	2.689	1.28	0.3
3.448	3.461	1.20	0.6
6.895	6.923	0.90	0.5
10.343	10.363	0.60	0.4
13.790	13.852	0.80	0.4
17.238	17.341	0.95	0.4
20.685	20.802	1.03	0.5

抛光头五个压力腔室同时施加相同压力时的压力曲线如图 4 所示。结果表明,各腔室的压力值均与目标值相同,且响应曲线的一致性非常好。

图 4 各腔室同时施加相同压力时的压力曲线

抛光头五个压力腔室同时施加不同压力时的压力曲线如图 5 所示。结果显示, 当相邻腔室施加不同压力时, 相邻腔室之间会互相影响、互相耦合, 导致达到目标值所需时间延长。抛光头多区气囊的自身结构决定了相邻腔室的耦合效应无法从根本上消除, 但通过优化控制算法可在一定程度上改善耦合效应^[14]。由于在实际 CMP 工艺中各腔室压力的差值较小, 且 CMP 工艺对压力响应速度要求不高, 耦合效应对 CMP 效果的影响可以忽略^[10-11]。

图 5 各腔室同时施加不同压力时的压力曲线

2.2 全局压力分析

通过气压传感器测得抛光头腔室内的气压值, 并不能直接反映晶圆在真实抛光中所受到的压力, 故使用薄膜压力测量系统(I-Scan 6 010 N, 美国 Tekscan 公司)对晶圆/抛光垫间的压力分布进行了测量。该系统在一层长宽均为 361 mm、厚度<1 mm 的薄膜上集成了 7 744 个压阻压力传感器, 量程为 0~34.475 kPa, 分辨率为 172 Pa。

典型结果如图 6 和图 7 所示, 全部结果见表 2, 表 2 中数值为所测区域的平均压力。结果表明, 作用在晶圆表面的压力分布区域与抛光头各腔室的划分完全对应, 且所测区域的平均压力与腔室内的气压值基本一致。

图 6 全局压力分布(Z1 单独施加不同压力, kPa)

图 7 全局压力分布(Z2 单独施加不同压力, kPa)

表 2 各腔室全局压力分布测量结果 (kPa)

输入压力	全局压力				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
3.448	3.516	3.654	3.654	3.585	—
6.895	7.447	7.033	7.102	6.964	7.240
13.790	14.204	14.342	13.928	14.204	13.928
20.685	20.271	20.754	20.409	20.961	20.409
27.580	—	—	—	—	27.097

3 CMP 样机研制

在成功研制多区抛光头及其压力控制系统的基础上, 建立了 300 mm 晶圆超低压 CMP 样机(图 8)。该样机主要由抛光头及其压力控制系统、抛光盘、修整器、抛光液输送系统、机械驱动系统、温控系统及电控系统等构成。其中, 抛光头及其压力控制系统用于夹持晶圆并对晶圆施加压力, 抛光盘上贴有抛光垫, 修整器用来在 CMP 过程中实时对抛光垫进行修整, 抛光液输送系统用于将一定流量抛光液输送到抛光垫上, 机械驱动系统负责实现抛光头、抛光盘和修整器的旋转、升降及摆动等运动, 温控系统用于调节抛光盘的温度, 电控系统负责整个 CMP 样机的控制和操作。

图 8 CMP 样机照片

CMP 样机研制完成之后, 经过大量的实践、摸

索和检验,建立了一套比较稳定、可靠的工艺流程(图 9)。

图 9 样机工艺流程

CMP 样机的主要设计参数如表 3 所示。

表 3 样机主要设计参数

名称	参数规格
晶圆直径/mm	300
运动形式	旋转式
系统配置	单头单盘
抛光头压力/kPa	0~68.95
抛光头转速/(r/min)	0~120
抛光头垂直行程/mm	200
抛光盘直径/mm	760
抛光盘转速/(r/min)	0~120
修整头压力/kPa	0~20.69
修整头转速/(r/min)	0~120
抛光液流量/(mL/min)	0~300

利用 CMP 样机初步开展了铜 CMP 试验研究,结果如图 10 所示。结果显示,抛光压力为 13.79 kPa 时,材料去除率达 671.3 nm/min,片内非均匀性为 3.93 %。

图 10 材料去除曲线

4 结论

(1) 研制出 300 mm 晶圆多区抛光头及其压力控制系统,利用多区气囊以气压方式加载,具有多区压力、浮动保持环及真空吸附等功能,每个腔室均可实现施加正压、抽负压、通大气和泄漏检测,其中正压采用全闭环控制。

(2) 该系统可实现 698.5 Pa 的超低压,其精度和响应速度均能满足常规压力及超低压 CMP 的要求。作用在晶圆表面的压力分布区域与抛光头各腔室的划分完全对应,且分布区域的平均压力与腔室内的气压值基本一致。

(3) 开发了 300 mm 晶圆超低压 CMP 样机,创建出一套比较稳定、可靠的工艺流程,并利用该样机初步开展了铜 CMP 试验研究。

参 考 文 献

- [1] 雒建斌,何雨,温诗铸,等.微/纳米制造技术的摩擦学挑战[J].摩擦学学报,2005,25(3):283-288.
LUO Jianbin, HE Yu, WEN Shizhu, et al. Challenges to tribology arisen from the development of micro- and nano-manufacturing technology[J]. Tribology, 2005, 25(3): 283-288.
- [2] 郭东明,康仁科,苏建修,等.超大规模集成电路制造中硅片平坦化技术的未来发展[J].机械工程学报,2003,39(10):100-105.
GUO Dongming, KANG Renke, SU Jianxiu, et al. Future development on wafer planarization technology in ULSI fabrication[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 100-105.
- [3] 童志义,葛励冲.国外半导体制造设备市场[J].电子工业专用设备,2005,34(12):6-9.
TONG Zhiyi, GE Maichong. The market of overseas semiconductor equipment[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2005, 34(12): 6-9.

- [4] OLIVER M R. Chemical mechanical planarization of semiconductor materials[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [5] CHEN H C, ZUNIGA S M. Multi-chamber carrier head with a flexible membrane: USA, US7001257[P]. 2005-02-08.
- [6] SHIU S J, YU C C, SHEN S H. Multivariable control of multizone chemical mechanical polishing[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2004, 22 (4): 1679-1687.
- [7] 杜诗文, 李永堂. 化学机械抛光中 Si/Cu/Ta/low-k 界面剥离和断裂特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 26-31.
- DU Shiwen, LI Yongtang. Delamination and fracture characteristic study of Si/Cu/Ta/low-k system during chemical mechanical polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 26-31.
- [8] KONDO S, TOKITOH S, YOON B U, et al. Low-pressure CMP for reliable porous low-k/ Cu integration[C]// IEEE 2003 International Interconnect Technology Conference, Jun. 2-4, 2003, San Francisco, 2003: 86-88.
- [9] 刘海晓, 刘玉岭, 刘效岩, 等. 低压力 Cu 布线 CMP 速率的研究[J]. 半导体技术, 2010, 35(8): 761-763.
- LIU Haixiao, LIU Yuling, LIU Xiaoyan, et al. Study on CMP rate of copper at reduced down pressure[J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(8): 761-763.
- [10] 王同庆. 300 mm 晶圆铜化学机械平坦化基础研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- WANG Tongqing. Fundamental research on copper CMP of 300 mm wafer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [11] WANG Tongqing, LU Xinchun. Numerical and experimental investigation on multi-zone chemical mechanical planarization[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(11): 3327-3332.
- [12] CHEN K S, YE H M, YAN J L, et al. Finite-element analysis on wafer-level CMP contact stress reinvestigated issues and the effects of selected process parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 42(11-12): 1118-1130.
- [13] WEI X M, SAMPURNO Y A, ZHUANG Z, et al. Effect of retaining ring slot design on slurry film thickness during CMP[J]. Electrochemical and Solid-state Letters, 2010, 13(4): H119-H121.
- [14] MEN Yanwu, ZHANG Hui, ZHOU Kai, et al. Wafer back pressure control and optimization in the CMP process[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2011, 32(12): 126002_1-126002_8.
-
- 作者简介: 王同庆, 男, 1983 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为化学机械抛光技术。
E-mail: wtq@tsinghua.edu.cn
- 路新春(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授。主要研究方向为微纳制造和纳米摩擦学。
E-mail: xclu@tsinghua.edu.cn