

## 雾化施液 CMP 工艺优化

朱斌, 李庆忠, 王陈

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 通过改进抛光雾液供液系统, 结合超声波雾化技术对原雾化施液 CMP 实验系统进行优化, 并进行了工艺实验。通过单因素试验研究雾化参数对抛光结果的影响, 利用正交试验得到最优工艺参数组合, 并在相同条件下将雾化抛光与传统抛光进行比较。结果表明: 该实验系统的最佳参数组合为雾化器电压 50 V、抛光压力 8 psi (1 psi = 6 895 Pa)、抛光盘转速为 70 r/min, 此时材料去除速率为 171.853 nm/min, 表面粗糙度为 4.76 nm。与传统抛光相比材料去除速率稍低, 但表面粗糙度要好, 且抛光液消耗量 (1.03 g/min) 约为传统抛光 (10 g/min) 的 1/10。由于雾化器将抛光液中分子结构打散形成大量雾液, 从而减少抛光液中磨粒团聚, 同时雾化液更能均匀分散吸附在抛光垫上, 增加了参与抛光的有效磨粒数, 有利于材料去除和形成高质量表面。

**关键词:** 化学机械抛光 (CMP); 雾化施液; 去除速率; 表面粗糙度; 工艺优化

**中图分类号:** TN305.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2014) 08-0684-05

## Process Optimization of Atomizing Slurry Applied CMP

Zhu Bing, Li Qingzhong, Wang Chen

(The College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The original atomization slurry applied CMP system, which makes use of the technology of ultrasonic atomization, is optimized, by improving its supply system, and the process experiments are conducted as well. The impact of atomization parameters on polishing effects were researched through single factor experiments; the best combination of process parameters via orthogonal experiments was acquired; the atomization CMP with the original one were compared under the same conditions. The results show that the best combination of process parameters are acquired. The voltage of the atomizer is 50 V, polishing pressure is 8 psi, rotating speed of polishing pad is 70 r/min, while the material removal rate (MRR) is 171.853 nm/min, the surface roughness is 4.76 nm. The MRR of atomization CMP is a little lower than that of the original one, but its surface roughness is better to some degree, with its consumption of slurry (1.03 g/min) is 1/10 of that of the original one (10 g/min). The atomizer breaks the molecular structure and produces large amounts of atomization slurry, decreasing the aggregation of abrasive particles. The atomization slurry uniformly attaches to the polishing pad, increasing the number of the effective particles that take part in polishing, which is beneficial to the removal of materials and the acquirement of the high quality surface.

**Key words:** chemical mechanical polishing (CMP); atomizing slurry applied; material removal rate (MRR); surface roughness; process optimization

**EEACC:** 2550E

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175228)

通信作者: 李庆忠, E-mail: qingzhongli@163.com

## 0 引言

近年来, 微电子技术作为通讯技术的基础发展迅速, 对其核心集成电路 IC 的要求越来越高<sup>[1]</sup>。目前, 化学机械抛光 (chemical mechanical polishing) 技术已成为制造主流芯片的核心技术之一, 被公认为是最好的材料全局平坦化方法, 广泛应用于硬脆材料及 IC 制程的表面平坦化处理<sup>[2-3]</sup>。

CMP 技术所采用的设备包括 CMP 抛光设备、后清洗系统和终点检测系统等, 消耗品有抛光液和抛光垫等<sup>[4]</sup>。对于多数制造工艺来说, 设备成本占据总成本的最大百分比。而 CMP 主要消耗的成本为消耗品的使用, 其中仅用于购买抛光液的费用就占整个抛光过程成本的 50%<sup>[5]</sup>, 但利用率只能达到 20%, 抛光液过量使用导致大量废液的排放, 造成环境污染<sup>[6-7]</sup>。T. F. A. Bibby 等人<sup>[8]</sup>和 Y. J. Seo 等人<sup>[5]</sup>通过将使用过的抛光液经过滤提取后再循环使用, 虽取得了一定的成效但仍有不足。所以抛光液的合理利用不仅有助于降低抛光加工的成本, 还有利于 IC 产业向着环保方向发展。鉴于传统 CMP 中遇到的问题, 作者所在研究小组提出了一种雾化施液化学机械抛光方法, 并搭建了实验系统与试验。本文通过改进供液方式, 结合超声波雾化技术对原实验系统进行优化, 提出并进行了雾化施液 CMP 工艺方法和参数研究, 并与传统抛光进行了比较。

## 1 实验系统设计

原实验系统<sup>[9]</sup>雾液的导入采用可移动的喷嘴。该喷嘴采用一个倒立的漏斗装置, 以一定的距离悬浮于抛光垫上方, 能够实现将雾化抛光液输送至抛光垫表面。为了实现喷嘴能够到达抛光区域的任意位置, 在密封玻璃罩内搭建支架, 通过三自由度方向的调整实现喷嘴的定位。但是由于雾化抛光液的流动速度快, 大部分雾化抛光液尚未接触抛光垫表面便被空压机吸出密封装置, 导致真正参与抛光的雾化液极少, 出现了材料去除不均匀、划痕等现象。且原实验系统采用超声波加湿器 (YC - E310B 型) 对抛光液进行雾化, 但其功率过小不能满足实验要求。

针对上述问题和要求, 对实验系统进行改进。将原来固定并加压工件、输送雾化抛光液功能实现

于同一装置上, 雾化抛光液以环状包围被抛工件, 由于抛光盘和摆动臂的运动, 雾化抛光液在附着抛光垫后立刻被带到加工表面参与抛光, 提高了雾化抛光液的利用率, 以获得高质量表面。雾化器采用 402AI 型超声波医用雾化器, 并外接 TPR6005S 型直流稳压电源增大其工作功率, 通过调节直流电源的电压参数来控制雾化器的雾化量。优化后的雾化施液 CMP 实验系统以 UNIPOL - 1502 精密研磨抛光机为核心, 实验系统的示意图见图 1。其工作原理为空压机抽气使密封玻璃罩内压强降低, 经超声波雾化器雾化的抛光雾液进入密封玻璃罩内, 经过导液加压一体装置输送到抛光界面上参与抛光, 通过调节使密封环境的进雾和出雾的速度达到平衡, 稳定的气流有助于提高抛光表面质量。

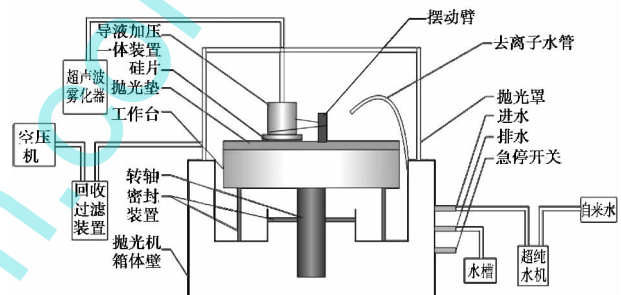


图 1 雾化施液 CMP 实验系统工作原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of the atomizing slurry applied CMP experiment system

## 2 实验

### 2.1 实验材料及制备

实验前将直径 200 mm、厚度 0.7 mm 的研磨硅片切割成大小为 20 mm × 20 mm 的试件作为抛光材料。抛光液采用适于雾化施液 CMP 的 SiO<sub>2</sub> 抛光液<sup>[10]</sup>, 通过正交试验对抛光液组分含量参数进行优化, 得出最优的组分含量为: 磨粒、表面活性剂和氧化剂的质量分数分别为 20%, 0.5% 和 2%, 配制后溶液的 pH 值为 11。将配制好的溶液放置 48 h 后, 不会出现分层或沉淀现象即可进行抛光实验。其中磨料由粒径约 20 nm 的 SiO<sub>2</sub> 溶胶和粒径约 15 nm 的白炭黑组成; pH 值调节剂选用三乙胺; 表面活性剂选用非离子型的烷基酚聚氧乙烯醚; 氧化剂选用质量分数为 30% 的过氧化氢。

### 2.2 实验方法

使用以 UNIPOL - 1502 型抛光机为核心的实验

系统进行实验。实验前后将硅片用超声波清洗机超声加纯水清洗并烘干, 确保硅片洁净称量准确。用石蜡将硅片粘在载样盘上, 将其套入导液加压一体装置并卡入抛光机支架上, 按顺序打开去离子水系统、雾化器和空压机进行抛光, 如图 1 所示。具体实验条件如下: 环境温度为 25 °C; 抛光压力为 8 psi (1 psi = 6 895 Pa), 抛光盘转速为 50 r/min, 去离子水流量为 100 mL/min, 抛光垫材料为聚氨酯 (Ø381), 摆动臂速度为 9 次/min; 抛光时间为 60 min, 抛光结束后用去离子水抛光 1 min。

本实验中, 材料去除速率 ( $v_{MRR}$ ) 以及硅片抛光的表面形貌为主要的评价指标。采用精密电子天平 (精度为 0.01 mg) 称量抛光前后试件的质量, 称量 5 次取平均值计算材料去除速率, 其公式如下<sup>[10]</sup>

$$v_{MRR} = \frac{(M_0 - M_1) \times 10^7}{\rho \times S_1 \times t}$$

式中:  $M_0$  为抛光前硅片质量 (g);  $M_1$  为抛光后硅片质量 (g);  $\rho$  为硅晶片的密度 ( $g/cm^3$ );  $t$  为抛光时间 (min);  $S_1$  为硅晶片的面积 ( $cm^2$ )。用原子力显微镜 (CSPM5000 扫描探针显微镜系统) 观测试件抛光前后的表面形貌和粗糙度, 以图像和数字方式显示。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 雾化参数对材料去除速率和粗糙度的影响

雾化施液化学机械抛光结合了超声雾化技术, 将特种抛光液的组分进行控频雾化, 形成均匀微米级液粒, 再通过密封装置的负压作用将其导入抛光垫表面参与抛光的区域, 微米级雾粒有良好的吸附特性, 可以迅速附着在抛光界面上与硅片表面发生化学反应, 通过机械作用去除反应物, 促成光滑无损伤纳米级表面的形成。雾化器的出雾量是获得高去除速率和低粗糙度表面的关键因素之一。选取电压为雾化参数, 通过调节雾化器的电压来改变出雾量。

图 2 显示了雾化参数电压对硅片材料去除速率和表面粗糙度  $R_a$  的影响, 图 3 显示了抛光液消耗量 ( $n$ ) 随电压的变化趋势。随着抛光液消耗量的增加, 硅片材料去除速率逐渐增加, 而表面粗糙度却不断减小, 但变化幅度不大。当电压较低时, 抛光液的消耗量和材料去除速率低, 表面粗糙度比较

高, 硅片表面不平整。分析认为, 此时超声波雾化器产生的雾液量较少, 使得化学机械抛光中的化学作用降低。本实验中所采用的试件是研磨硅片, 其硬度与强度较好。当在抛光过程中抛光液对其化学反应降低时, 仅依靠磨粒与抛光垫对其进行机械磨削, 得到的材料去除速率偏低, 同时会增加试件表面的粗糙度。而当电压过高时, 抛光液的消耗量有明显的增加, 但材料去除速率变化趋于平稳, 电压的增大已无助于抛光速率的提高。分析认为, 此时抛光垫承载雾化抛光液的能力达到饱和, 雾化器产生的雾液部分未能得到有效的利用, 抛光中的机械作用优于化学作用。实验中也直观地观察到, 部分雾液未能附着在抛光垫上参与抛光而被直接吸走。

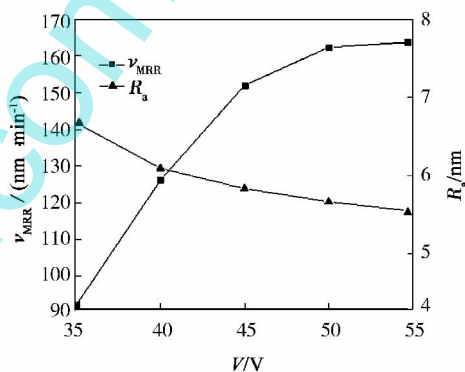


图 2 不同电压下的材料去除速率和表面粗糙度  
Fig. 2  $v_{MRR}$  and  $R_a$  of different voltages

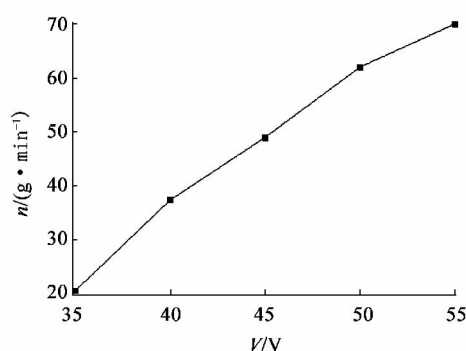


图 3 不同电压下的抛光液消耗量  
Fig. 3 Slurry consumption of different voltages

#### 3.2 正交试验结果及讨论

表 1 为选定的雾化参数电压  $V$ 、抛光转速  $s$  及抛光压力  $p$  优化的正交试验因素水平表。表 2 为正交试验结果, 表 2 中  $T_i$  ( $i = 1 \sim 3$ ) 为水平  $i$  的三次材料去除率之和,  $R$  为极差。

表 1 正交实验设计

Tab. 1 Design of the orthogonal experimental

水平	因素		
	V/V	$s/(r \cdot \min^{-1})$	$p/\text{psi}$
	A	B	C
1	40	50	7
2	45	60	8
3	50	70	9

表 2 正交实验结果

Tab. 2 Results of orthogonal experimental

水平	因素			$v_{\text{MRR}}/(nm \cdot \min^{-1})$
	A	B	C	
1	1	1	1	118.204
2	1	2	2	130.901
3	1	3	3	139.485
4	2	1	2	152.003
5	2	2	3	158.619
6	2	3	1	153.970
7	3	1	3	167.024
8	3	2	1	159.514
9	3	3	2	171.853
$T_1$	388.590	437.231	431.688	
$T_2$	464.592	449.034	454.757	
$T_3$	498.391	465.038	465.128	
R	109.801	28.077	33.440	

从表 2 中可知  $R_A > R_C > R_B$ 。表明雾化电压是影响  $v_{\text{MRR}}$  的主要因素, 其次是抛光压力和抛光转速。从正交试验的水平趋势发现,  $MRR$  均随着雾化电压、抛光压力及抛光转速的增加而升高。在 9 次试验中, 第 9 组试验材料去除速率 171.853 nm/min 最好, 第 7 号试验材料去除速率 167.024 nm/min 次之。而从水平趋势分析  $A_3B_3C_3$  (50 V, 70 r/min, 9 psi) 是较好的组合, 表中未包含此组合, 故需追加试验。按第 10 组  $A_3B_3C_3$  组合设置抛光工艺参数, 结果表明抛光后的材料去除速率达到 178.111 nm/min, 超过了最高的 171.853 nm/min。但从表面粗糙度对比发现, 第 7 组试验和补做的第 10 组试验压力参数均取为 9 psi, 其表面粗糙度分别为 5.87 nm 和 5.52 nm, 明显高于第 9 组的 4.76 nm, 并且硅片表面出现了不同程度的凹坑和划痕, 在试验过程中也出现了硅片碎片的现象。分析认为随着抛光压力的增大, 抛光垫与硅片表面的接触面积开始增加, 使抛光垫与硅片之间的摩擦力增大, 磨粒与硅片表面的机械作用逐渐增强。同时摩擦力增大使 CMP 系统中的加工温度升高, 抛光雾液的化学作用加强, 从而使材料去除速率增加。

但是压力的增加会影响硅片表面的抛光液分布均匀, 导致去除不均匀和抛光垫磨损过快, 从而降低了硅片的表面质量, 容易产生划痕。综合上述考虑, 认为该雾化抛光实验系统的最优工艺参数组合是: 雾化参数电压 50 V、抛光压力 8 psi、抛光盘转速为 70 r/min, 此时得到的材料去除速率为 171.853 nm/min, 表面粗糙度由抛光前约 500 nm 降至 4.76 nm, 图 4 为其抛光前后硅片表面扫描形貌。

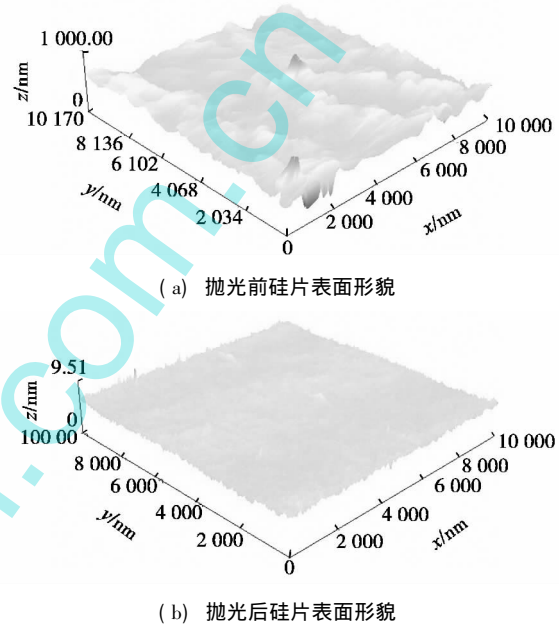


图 4 最优工艺参数下抛光前后硅片表面形貌对比

Fig. 4 Silicon surface topography comparison before and after the polishing under the optimal process parameters

### 3.3 雾化抛光与传统抛光对比分析

在以 UNIPOL-1502 型抛光机为核心的抛光实验系统下, 采用相同的工艺参数 (抛光压力和抛光盘转速) 进行雾化抛光和传统抛光实验, 表 3 对比了两者的抛光结果。其中雾化抛光选用配制的特种抛光液, 雾化电压为 50 V; 传统抛光选用市购的 SSP-L 型悬浮抛光液。从中可知, 雾化抛光的  $v_{\text{MRR}}$  (171.853 nm/min) 低于传统抛光的  $v_{\text{MRR}}$  (189.557 nm/min), 但是其表面粗糙度  $R_a$  (4.76 nm) 好于传统抛光后的硅片表面粗糙度  $R_a$  (5.62 nm), 抛光液消耗量 (1.03 g/min) 约为传统抛光 (10 g/min) 的 1/10。且雾化抛光后的表面更加平整、均匀, 而传统抛光后的表面出现了明显的起伏和不平整的现象。分析原因是由于雾化抛光中, 雾化器通过高频谐振将抛光液中液态分子结构打散形成大量雾液, 从而减少抛光液中磨粒团聚

的现象。在负压的作用下,雾化的抛光液被快速导入到抛光界面,更均匀地吸附在抛光垫上,充分接触硅片表面并与其反应,增加了参与抛光的有效磨粒数,提高了抛光效率。而且市购的 SSP-L 型抛光液磨粒粒径为 50 nm, 粒径偏大; 配制的抛光液采用小粒径磨粒 (20 nm), 不会对硅片形成深层损伤。图 5 为传统抛光后的表面扫描形貌。

表 3 雾化抛光与传统抛光对比实验结果

Tab. 3 Results of the comparison with the atomization CMP and traditional CMP

方法	抛光液	$v_{MRR} /$ ( $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$R_a / \text{nm}$	$n / (\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$
雾化抛光	特种抛光液	171.853	4.76	1.03
传统抛光	SSP-L	189.557	5.62	10

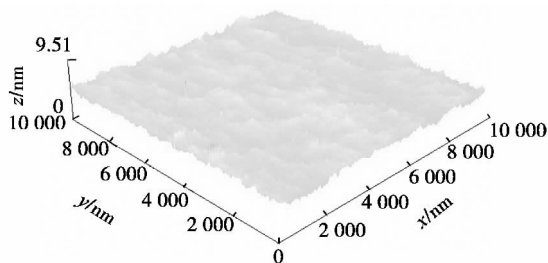


图 5 硅片传统抛光后表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of the silica wafer after the traditional CMP

## 4 结论

优化后的雾化施液 CMP 实验系统有效地解决了原实验系统因雾化液流动速度快,大部分雾化抛光液未能参与抛光的弊端,保证了气流的均匀性,增加雾化抛光液接触抛光工件表面的机会,提高了雾化抛光液的利用效率。通过实验本文得到如下结论:

①抛光液消耗量随着雾化参数电压增大而增加,近似于线性的变化;雾化抛光的材料去除速率也随着电压增大而增加,但电压超过一定范围时,去除速率的变化趋于平缓,说明此时雾化参数电压的增大已无助于抛光速率的提高。②在优化后的实验系统上,通过正交试验方法得到最优工艺参数组合:雾化参数电压 50 V, 抛光压力 8 psi, 抛光盘转速为 70 r/min; 去离子水流量为 100 mL/min, 摆动臂速度为 9 次/min。此时得到的材料去除速率为 171.853 nm/min, 表面粗糙度 4.76 nm。③雾化抛光与传统抛光相比,  $v_{MRR}$  稍小, 但表面粗糙度要好。且雾化施液 CMP 抛光液消耗量 (1.03 g/min) 约为传统 CMP (10 g/min) 的 1/10。因此雾化施液 CMP 可以通过使用微量的抛光液达到与传统

CMP 相近似的抛光效果,大大节省了抛光液消耗量,降低了加工成本。

## 参考文献:

- [1] 李庆忠, 于秀坤, 苏建修. IC 制造中平坦化技术的性能与分析 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2006, 23 (1): 27-31.
- [2] KIM H J, JEONG H D, LEE E, et al. Pad surface characterization and its effect on the tribological state in chemical mechanical polishing [J]. Key Engineering Materials, 2004, 257: 383-388.
- [3] 苏建修, 郭东明, 康仁科, 等. ULSI 制造中硅片化学机械抛光的运动机理 [J]. 半导体学报, 2005, 26 (3): 606-612.
- [4] 雷红, 雒建斌, 马俊杰. 化学机械抛光 (CMP) 技术的发展、应用及存在问题 [J]. 润滑与密封, 2002, (4): 73-76.
- [5] SEO Y J, PARK S W, KIM N H, et al. Chemical mechanical polishing performances by filtering and retreatment of used silica abrasives slurry [J]. Micro-Electronic Engineering, 2005, 77 (3): 358-364.
- [6] WANG Y G, ZHANG L C, BIDDUT A. Chemical effect on the material removal rate in the CMP of silicon wafers [J]. Wear, 2011, 270 (3/4): 312-316.
- [7] WANG C T, CHOU W L, CHEN L S, et al. Silica particles settling characteristics and removal performances of oxide chemical mechanical polishing wastewater treated by electrocoagulation technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162 (1): 344-350.
- [8] BIBBY T F A, ADAMS J A, HOLLAND K, et al. CMP CoO reduction: slurry reprocessing [J]. Thin Solid Films, 1997, 308: 538-542.
- [9] 刘晓鹏. 雾化施液抛光系统设计及雾化参数的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [10] 翟靖, 李庆忠. 一种使用超声波精细雾化施液的 SiO<sub>2</sub> 抛光液 [J]. 半导体技术, 2012, 37 (4): 263-266, 311.

(收稿日期: 2014-04-02)



## 作者简介:

朱允 (1989—), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械制造及其自动化;

李庆忠 (1965—), 男, 吉林长春人, 工学博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事摩擦学、精密及超精密加工等研究。