

# ULSI 制备中铜布线的两步抛光技术\*

王弘英<sup>1</sup> 刘玉岭<sup>2</sup> 郝景晨<sup>1</sup> 魏碧华<sup>1</sup>

(1 中国电子科技集团电子第十三所, 石家庄 050051)

(2 河北工业大学微电子研究所, 天津 300130)

**摘要:** 在超大规模集成电路(ULSI)铜布线工艺中, 采用阻挡层来提高铜与衬底的粘附性, 主要是为了防止铜原子向介质或衬底中扩散。为了达到全局平面化, 就需要克服阻挡层金属与布线金属铜因化学和物理性质的不同而导致其化学机械抛光(CMP)速率的不同。通过研究和一系列试验, 采用两步抛光, 初抛中采用高化学作用, 终抛中采用高机械作用, 达到较好的全局平面化效果, 并提出了初抛的 CMP 模型。

**关键词:** 铜; 阻挡层; 两步抛光; ULSI; 多层布线

**EEACC:** 2220; 2550F; 8620

**中图分类号:** TN 405. 97

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2003)04-0433-05

## 1 引言

随着器件高集成化、高速化和高功能化, 器件的微细化、复杂化和结构的三维化日趋提高。目前器件设计的特征尺寸发展到  $0.10\mu\text{m}$ , RC 延迟对器件性能影响越来越大。要使器件的体积更小、性能更高, 并使集成电路中金属互连结构的 RC 延迟降低, 就需结构多层立体化, 同时研究性能更好的金属作互连线的金属。通常, 铝作为互连结构金属被广泛用于超大规模集成电路(ULSI)设计中。但在 ULSI 中, 由于金属线变得更细, 导致电阻增大、产生的热量增多, 从而铝原子会产生严重的电迁移现象。这将使器件的局部漏电流增大、易使器件断路, 大大影响了器件的性能, 降低了器件的寿命。 $\text{Cu}$  的阻抗低、抗电迁移性好、价格便宜, 因此, 采用铜互连工艺提高了芯片的速度和可靠性, 降低了多层布线的层数, 使工艺简化, 并且还可降低芯片价格。ULSI 多层布线金属正由传统的 Al 向 Cu 转化<sup>[1]</sup>。在多层布线立体结构中, 每层都保证整片平面化是实现多层布线的关键, 而使用化学机械抛光技术是最佳的方法。

由于铜作为互连线金属存在一大缺点, 即铜原子在硅和二氧化硅中的扩散速度很快, 它们将会在

硅的能隙中充当深能级受主杂质的角色而使器件的性能大大降低。因此, 在 ULSI 铜互连线技术中, 必须采取有效措施来防止铜向硅中扩散, 即在介质层和金属铜之间引入一层扩散阻挡层。据文献报道, 铜布线的阻挡层金属一般为钽<sup>[2]</sup>。考虑到在铜布线的 CMP 过程中抛光的材质不是一成不变的, 因此所采用的抛光液和抛光条件也不一样, 铜的 CMP 过程分成两步, 即初抛过程和终抛(又叫二抛)过程。本文将重点对铜布线两步抛光工艺的原理和适用于两步抛光的抛光液进行讨论和研究。

## 2 试验

### 2.1 试验设备

试验采用 C6382I-W/YJ 型二氧化硅抛光机进行金属的 CMP。该抛光机有四个抛光片固定装置, 托盘采用陶瓷铸铝, 压力较大, 抛光质量较好。

图 1 给出了一种抛光机的简图, 其基本组成部分是一个自转的圆盘和一个绕旋转盘中心公转的圆晶片固定装置(圆晶片是被固定在托盘上的), 两者都可施力于晶片并使其旋转, 在含有磨料的碱性浆料的帮助下完成抛光过程。在 CMP 过程中, 浆料通

\* 天津市自然科学基金资助项目(No. 013605911)

2002-05-13 收到, 2002-09-10 定稿

©2003 中国电子学会

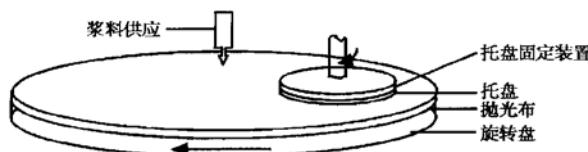


图 1 CMP 设备简图

Fig. 1 Sketch of a kind of CMP equipment

过自动抛光液添加系统均匀流下，并被旋转着的旋转盘借助离心力自抛光布中心向四周散开，从而保证抛光垫湿润程度均匀，适当地送入新浆料及保持其成分不变。这样，固定在托盘上的抛光片接触的是新鲜的抛光液，并且其成分随抛光时间的延长并不发生变化，抛光后的废液从抛光布的边缘甩下。

实际的抛光机有四个对称的托盘固定装置，而试验过程中为了保证压力被均匀地加在托盘上，一般采用在同一直径的两个托盘而不是用一个托盘进行抛光。检测设备为红外线测温仪、电热鼓风箱和千分表。

## 2.2 试验目的

该试验主要探求在铜布线两步抛光过程中，抛光液的组成对抛光速率的影响以及如何通过调整抛光液的组分达到最后全局平面化。

## 2.3 抛光液的配制

碱性抛光液包含磨料、氧化剂、络合剂、pH 值缓冲剂、去离子水及其它附加试剂。由于国际上普遍采用的络合剂为  $\text{NH}_3$ ，而氨气容易挥发，给超净间和操作人员带来伤害，并且氨气的挥发造成浆料的不稳定，因此我们采用有机碱代替无机碱。一方面解决挥发问题，同时也提高了络合剂在浆料中的含量，因为氨气在浆料中的溶解度是有限的，而有机碱和浆料是互溶的。表 1 为几种浆料的配比。

表 1 抛光液的配比

Table 1 Contents of element in slurry

浆料	磨料 /mL	有机碱 /mL	氧化剂 /mL	附加试剂 /mL	去离子水 /mL	pH 值
1	1000	50	100	20	1000	9.8
2	1000	—	—	20	1000	6.5
3	1000	25	—	20	1000	9.5
4	1000	25	10	20	1000	9.8

## 2.4 两步抛光

首先使用浆料 1 对铜表面抛光，抛光过程中，始终是对铜表面进行抛光。试验条件：压力为  $1.9 \times$

$10^5 \text{Pa}$ ，温度为  $25^\circ\text{C}$ ，抛光液加料速度为  $200 \text{ mL/min}$ ，CMP 时间为  $10 \text{ min}$ ，水抛  $1 \text{ min}$ 。实验结果如表 2 所示。

表 2 铜 CMP 结果(浆料 1)

Table 2 Result of Cu CMP using slurry 1#

	1 点	2 点	3 点	4 点
抛光前/ $\mu\text{m}$	68.0	66.0	68.5	69.0
抛光后/ $\mu\text{m}$	58.0	56.5	58.3	60.0
速率/ $(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$	1000	950	1020	900
平均速率/ $(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$				970
试验现象	抛光布为蓝紫色；废料为蓝紫色液体，废料的流动性很好，pH 值为 9.5；抛光片表面细腻			

分别采用浆料 2、浆料 3 和浆料 4 对铜钽表面进行抛光，试验条件：压力为  $1.9 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度为  $25^\circ\text{C}$ ，抛光液加料速度  $450 \text{ mL/min}$ ，CMP 时间为  $1 \text{ min}$ ，水抛  $1 \text{ min}$ 。实验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果

Table 3 Result of experiments

浆料	铜 CMP 速率/ $(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$	钽 CMP 速率/ $(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$
2	100	700
3	500	300
4	800	200

## 3 分析与讨论

### 3.1 两步抛光工艺

目前普遍认为铜是深亚微米集成电路中互连线技术进一步发展的候选材料。然而铜的一大缺点在于铜原子在硅和二氧化硅中的扩散速度很快，它们将会在硅的能隙中充当深能级受主杂质的角色，使得器件的性能大大降低<sup>[2]</sup>。因此，在 ULSI 铜互连线技术中，必须采取有效措施来防止铜原子向硅或二氧化硅中扩散，即在介质层和金属铜之间引入一层扩散阻挡层，如图 2 所示。

扩散阻挡层可分为金属阻挡层和介质阻挡层两种，目前的研究方向主要集中在对金属阻挡层的研究。近年来，人们对金属扩散阻挡层做了大量研究工作<sup>[3~6]</sup>，其中所选材料包括 Ta、W、Ti 以及它们的氮化物（如 TiN、WN、TaN 等）和一些化合物（如 TiW、TaC 等），沉积方法包括溅射、蒸发和 CVD 等。

阻挡层必须既满足对铜的扩散有很好的阻挡效

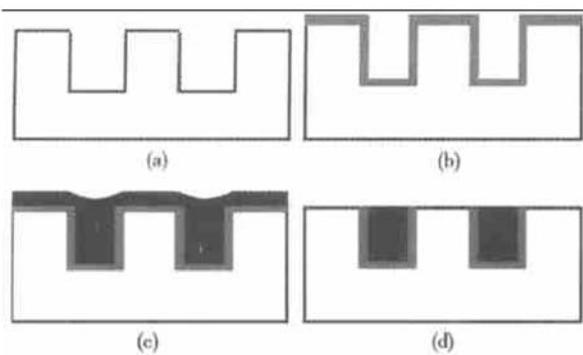


图 2 铜互连技术的“大马士革”工艺 (a) 刻槽; (b) 沉积扩散阻挡层; (c) 沉积铜; (d) CMP

Fig. 2 Damascus in copper multilevel

果,同时还必须对铜有很好的粘附性。据报道,钽能同时满足以上两个条件,因此,目前铜的阻挡层材料一般为钽。在本试验中,也以钽为 ULSI 铜布线的阻挡材料。

由图 2 可以看出,假如使用同一种抛光液和工艺条件,由于铜的 CMP 速率和钽的 CMP 速率相差很大,从而造成碟形坑,如图 3 所示。

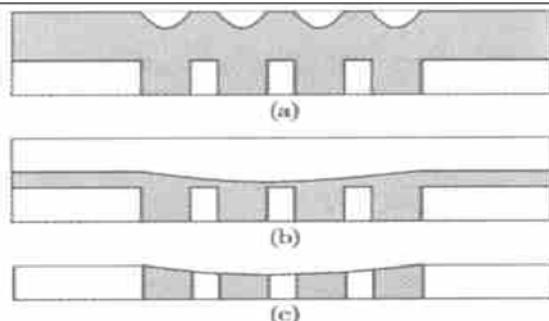


图 3 对不同材质 CMP 的选择可造成碟型坑 (a) 沉积一层铜后,有铜多的地方和铜少的地方; (b) 在对铜的抛光过程中,铜多的地方抛光速率很快,这里的铜首先被抛掉; (c) 抛光结束时,由于二氧化硅比铜硬,则因对其的 CMP 速率不同而造成碟型坑

Fig. 3 Different CMP velocity among different layer yield dish

因此,铜的 CMP 过程分两步进行:第一步为铜层的 CMP,在此过程中不涉及钽层与介质层的 CMP,如图 2(c),只对芯片整个铜表面进行 CMP。在此过程中,要求达到全局平面化;第二步为对铜/钽/介质面进行 CMP。如图 2(d),为了达到最终全局平面化,在此过程中,要求铜:钽:介质的化学机械抛光的速率为 1:1:1。

由于铜、钽、介质的化学性质不同,并且硬度相

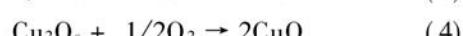
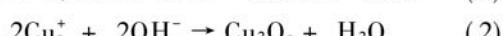
差也很大,因此,如何使铜:钽:介质的化学机械抛光的速率为 1:1:1 是目前研究的关键问题。

### 3.2 初抛与终抛过程中的 CMP 模型

#### 3.2.1 初抛 CMP 模型

初抛过程即铜的 CMP 过程,由目前所了解的化学和机械现象,我们提出了铜的 CMP 四步机理:

(1) 形成表面氧化膜。硅圆片(铜表面)在浆料的作用下被氧化,形成表面氧化膜。反应过程如(1)~(4)式。



由反应式(1)~(4)可以看出,铜表面在浆料的作用下,有一部分被氧化为 CuO 和 Cu<sub>2</sub>O(绝大部分),还有一部分被腐蚀为铜离子而溶解到浆料中。表面膜的组成为氧化铜和氧化亚铜的混合物<sup>[7]</sup>。

(2) 选择性 CMP。使用磨料将铜表面凸起处的氧化膜磨去,低凹处的表面膜依然存在,阻止了浆料中的氧化剂对深层铜的进一步腐蚀,如图 4 所示。

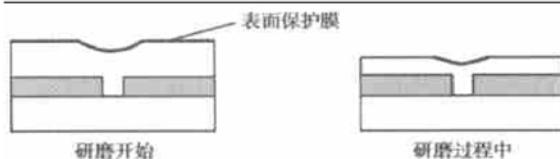
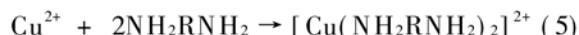


图 4 铜表面在化学和机械共同作用下的抛光示意简图

Fig. 4 Polishing sketch on the role of chemistry and mechanism

(3) 溶解。Cu<sup>2+</sup> 或 Cu<sup>+</sup> 转化为极稳定的可溶络合物进入溶液。此过程加快了氧化反应顺利向右进行,并且有效地控制了铜离子的沾污。化学反应式如下:



(4) 浆料中的铜胺络合物被湍流的浆料带走。

这样新鲜的铜表面在浆料的作用下继续被氧化,机械磨除、络合,反应产物被湍流的浆料带走,周而复始,完成铜的 CMP 过程。

从图 4 观察到的这些化学、机械现象,可以知道:(1)这种抛光不只是通过抛光液与圆晶片表面的摩擦来完成的;(2)圆晶片的表面状态和抛光液溶液对铜的化学作用都影响着抛光效果;(3)抛光

液颗粒的尺寸和成分非常重要。

影响铜 CMP 的化学因素主要有：

(1) 氧化剂的强弱和浓度。碱性抛光液一个缺点就是在碱性环境下，不容易找到氧化势高的氧化剂，在络合充分的情况下，氧化剂的强弱和浓度决定着氧化反应的程度(如(3)~(6)式)，也决定着铜 CMP 过程中化学作用的大小。

(2) 络合剂的强弱和浓度。碱性抛光液的优点，也是使碱性抛光液得以应用于 ULSI 铜布线中 CMP 的原因是，络合剂对铜离子的强络合作用。由化学反应动力学，反应产物的减少有助于反应(氧化反应)向右进行，从而解决了氧化剂氧化势不够高的难题。络合剂浓度越高，络合作用相应也越高，对铜离子的控制作用也越强。

(3) 浆料的 pH 值。浆料的 pH 值是抛光液需要严格控制的一个重要参数。首先，浆料的 pH 值决定着对铜络合作用的程度。其次，碱性越高，其腐蚀性越大。一般情况下，铜的 CMP 抛光液的 pH 值控制在 9~10.5 范围。

(4) 温度。对于化学反应，温度的影响很大。我们使用的国产抛光机，其使用条件是常温，因此，抛光液也是在室温下使用。

(5) 流量。流量的大小也对 CMP 的速率和抛光后的表面状态有很大影响。目前国际上采用大流量、高速率。这样有助于达到全局平面化和提高表面状态。

### 3.2.2 终抛 CMP 模型

由于 Ta 层的质地很硬，要想在铜抛光后继续对阻挡层进行抛光，就必须选用对 Ta 层 CMP 抛光速率高而对 Cu 层抛光速率低的抛光液，从而大概达到 CMP 速率  $v(Ta) : v(Cu) = 1 : 1$  和  $v(\text{介质}) : v(Cu) = 1 : 1$ ，这样就完成布线的全局平面化。

在此过程中，涉及到两个问题，第一，铜与钽的选择性；第二，铜与介质的选择性。

钽是惰性金属，要想通过提高化学作用来提高它的 CMP 速率很不容易。因此，我们通过在初抛浆料的基础上降低化学作用和提高机械作用，来降低铜的 CMP 速率和提高钽的 CMP 速率，使其 CMP 速率比达到  $v(Ta) : v(Cu) = 1 : 1$ 。目前使用的铜的多层布线的介质还是二氧化硅，因此，在终抛的过程中通过提高机械作用和降低对铜的化学作用来平衡铜与二氧化硅的 CMP 速率也是可行的。

由表 3 可以看出，铜的 CMP 速率受化学作用控制，提高对铜的机械作用，如加入络合剂(或氧化剂)能大大提高铜的 CMP 速率。但是对于钽，络合剂或氧化剂都不能加快其 CMP 速率，因此造成与铜的 CMP 速率差。

对浆料的调整思路是，降低络合剂的含量和提高磨料的含量。经过试验证明，此思路可行，基本达到 CMP 速率  $v(Ta) : v(Cu) = 1 : 1$  和  $v(SiO_2) : v(Cu) = 1 : 1$ 。

## 4 结论

在初抛过程中我们采用“高络合、低氧化、小粒径、高浓度”的抛光剂达到 CMP 的低损伤、高速率、高选择、高平整、高洁净；在终抛过程中采用“高机械、低化学”机理模型达到最终的全局平面化。这样，就基本实现了 Cu 布线 CMP 高速率、合适的选择性、低损伤和高平整。

## 参考文献

- [1] Wijekoon Kappila. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 1998: 354
- [2] Zhang Guohai, Qian He, Xia Yang, et al. Electroplating technology for copper interconnection in ULSI. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(8): 1093(in Chinese) [ 张国海, 钱鹤, 夏洋, 等. ULSI 铜互连技术中的电镀工艺. 半导体学报, 2001, 22(8): 1093]
- [3] Ryu Changsup, Lee Haebum, Kwon Kee-Won, et al. Barriers for copper interconnections. Solid State Technology, 1999, 42(4): 53
- [4] Zhang Guohai, Qian He, Gao Wenfang, et al. A novel barrier to copper metallization by implanting nitrogen into SiO<sub>2</sub>. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3): 271
- [5] Ding Peijun, Chen Ling, Fu Jianming, et al. Cu barrier/seed technology development for sub-0.10 micron copper chips. Solid-State and Integrated Circuit Technology Processing, 2001, 1: 405
- [6] Oku Takeo, et al. Diffusion barriers for copper interconnects. 1998 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Processing, 1998: 124
- [7] Wang Hongying, Liu Yuling, Zhang Dechen. A development on copper CMP slurry in ULSI. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(2): 217(in Chinese) [ 王弘英, 刘玉岭, 张德臣. ULSI 中铜的 CMP 抛光液的研究. 半导体学报, 2002, 23(2): 217]

## Technology of Two Steps CMP in ULSI Multilevel<sup>\*</sup>

Wang Hongying<sup>1</sup>, Liu Yuling<sup>2</sup>, Hao Jingchen<sup>1</sup> and Wei Bihua<sup>1</sup>

(1 *The 13th Electronic Research Institute, Shijiazhuang 050051, China*)

(2 *Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

**Abstract:** In the process of copper multilevel in ULSI, barriers are introduced to enhance the adherence between copper and wafer, to mostly prevent copper from diffusing to wafer or medium. There is a difference between copper and medium CMP rates because of their difference in physical and chemical character, which must be reduced to achieve the global planarization. After a series of experiments, two-step CMP in copper multilevel is used, with high chemical role in the first step and high mechanical role in second step. CMP mechanism of first step is also introduced.

**Key word:** copper; barrier; two-step CMP; ULSI; multilayer

**EEACC:** 2220; 2550F; 8620

**Article ID:** 0253-4177(2003)04-0433-05

\* Project supported by Natural Science Foundation of Tianjin(No. 013605911)

Received 13 May 2002, revised manuscript received 10 September 2002

© 2003 The Chinese Institute of Electronics