

# 低 $k$ 材料的化学机械抛光研究

周国安, 种宝春

(中国电子科技集团公司 第四十五研究所, 北京 101601)

**摘要:** 阐述了低  $k$  材料在 IC 电路中的作用及其性质, 以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiOF}$ 、 $\text{SiOCSP}$ 、 $\text{SiOCNSP}$ 、 $\text{SiOCSO}$  五种材料为研究对象, 分析了低  $k$  材料与 Cu 互连工艺的相互联系和作用。在 Sikder 和 Kumar 提供的声发射信号 (AE) 的在线监测图的基础上比较和分析了五种材料的硬度和模数值; 根据 Preston 方程绘制九点测量数据图, 发现前三种材料可满足抛光机理, 而后两种的抛光行为更倾向于表面反应; 根据五种材料抛光前后的实验数据表面形态图表, 判断出抛光后材料粗糙度的走向。最后指出低  $k$  材料需要发展和完善的工艺及对抛光设备的进一步要求。

**关键词:** 化学机械抛光; 声发射信号在线检测; 普莱斯顿方程; 低  $k$  材料; 表面形貌

**中图分类号:** TN305.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2008) 05-0293-05

## Study on CMP of Low- $k$ Materials

Zhou Guoan, Chong Baochun

(The 45<sup>th</sup> Research Institute, CETC, Beijing 101601, China)

**Abstract:** The role and characterizations of low- $k$  materials in IC circuits were introduced, and the interrelation between copper and low- $k$  materials were analyzed to identify five materials including  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiOF}$ ,  $\text{SiOCSP}$ ,  $\text{SiOCNSP}$ ,  $\text{SiOCSO}$  as study objects. Based on AE test online provided by Sikder and Kumar, the hardness and modulus of five materials were compared and analyzed. It is found that the first three materials suit polishing mechanism and the other materials tend to surface reaction by Preston's equation. Based on the experimental data of the unpolished and polished materials, a table of surface morphology results was formed, which could judge a similar trend of polished roughness. The technologies to be improved and further demands for polishing equipments were presented.

**Key words:** chemical-mechanical polishing (CMP); acoustic emission-signal (AE); Preston's equation; low- $k$  material; atomic force microscopy (AFM)

**PACC:** 8160C

## 0 引言

随着半导体微型化技术的发展, 使高速、高集成度、低功耗及低成本特性 ULSI 得以大量生产。减小内连导线的线宽与增加导线的数目, 已成为半导体行业发展的瓶颈。随着导线宽度的减小, 使导线架构中的  $R$  和  $C$  产生寄生效应, 导致严重的  $RC$

传输延迟和线路间的干扰, 成为电路信号传输速度受限的主要因素。引入 Cu 导线降低电阻值, 采用低  $k$  材料降低寄生电容值是减少功耗、提高电路传输速率的有效方法。

低  $k$  材料应该具有以下性质: (1) 良好的热稳定性和低热膨胀系数以避免热处理过程中薄膜的损害和性质改变; (2) 有效介质堆垛层 (介质、覆盖

收稿日期: 2008-01-02

E-mail: zhouguoan@tom.com

2008年5月

微纳电子技术第45卷第5期 293

层、阻挡层)的  $k$  值应低于 3.0; (3) 良好的支撑能力以满足 CMP 工艺条件; (4) 良好的抗腐蚀和剥离能力; (5) 良好的机械强度以避免 CMP 中的分层; (6) 商用价值和低成本。

低  $k$  材料是把  $\text{SiO}_2$  作为基本结构, 再把 O 原子的一部分用 F、H、甲基等进行置换。这些材料的特点为  $k$  值低, 但是绝大多数材料的强度、电学性能、机械性能等远达不到 IC 应用的要求。目前应用潜力较大的低  $k$  材料主要有  $\text{SiOF}$ 、 $\text{SiOCSP}$ 、 $\text{SiOCNSP}$ 、 $\text{SiOCSO}$ , 对这些材料的分析研究十分必要。

### 1 铜互连工艺与低 $k$ 材料

在 Cu 大马士革工艺中, 为避免暴露于 CMP 环境中, 低  $k$  材料被硬膜和介质覆盖层所保护, 如图 1 所示。

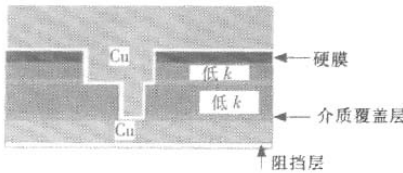


图 1 双大马士革结构  
Fig.1 A dual damascene structure

在双大马士革 Cu 互连线系统中, CMP 工艺步骤为: (1) 用 Cu 选择性抛光液对 Cu 进行抛光, 并用阻挡层对低  $k$  材料进行保护; (2) 用选择性抛光液去除阻挡层, 采用硬无机掩膜/介质覆盖层提供机械支撑, 避免抛光液与低  $k$  材料的直接作用。随着最小化尺寸的减小, 阻挡层和硬膜/覆盖层的厚度对保持介质的性能十分重要。有研究表明, Cu 互连线不用阻挡层和硬膜也可能是可行的<sup>[1]</sup>。对于低  $k$  材料在 CMP 环境中摩擦和腐蚀性质的认识可以归纳为: (1) 评价 Cu 互连线的放缩效应, 改善对抛光液和介质相互作用的认识; (2) 发展新材料和 CMP 设备参数, 以消除对传统阻挡层和低  $k$  材料覆盖层的需要。

### 2 低 $k$ 材料的 CMP 实验

实验设备为美国贝克曼公司的 AVANTI 372M。抛光垫型号为 IC1000B4/suba VI。工艺条件为:

下压力 ( $p$ ): 1~6 psi (1 psi =  $6.89 \times 10^3$  Pa, 全文同);

转盘速度 ( $v$ ): 0.2~1.2 m/s;

浆料体积流量: 氧化物 (klebesol 1501)  
100 mL/min;

时间: 20~80 s;

机械手摆动: 45 mm  $\pm$  5 mm 及速度为 10 mm/s。

A. K. Sikder 等人<sup>[2-3]</sup>运用声发射信号的在线监测, 研究了不同低  $k$  材料的抛光性质。所有样品在不同  $p$  (psi) 和转速  $v$  (m/s) 下, 得到的一化声发射信号 ( $n_{AE}$ ) 值 ( $n_{AE}$ ) 见图 2。

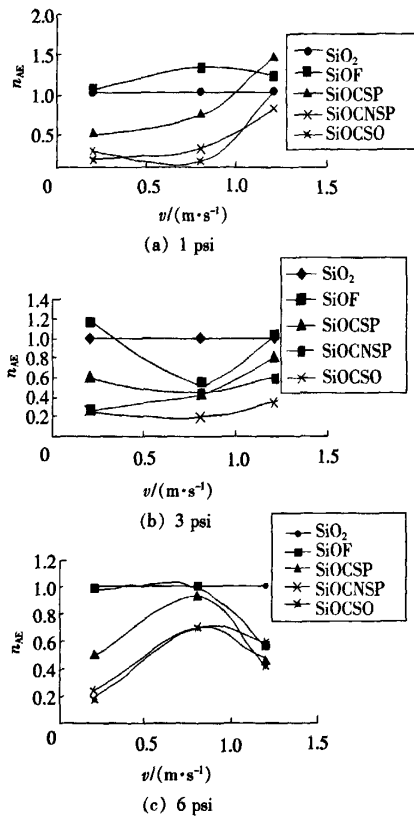


图 2 不同样品在不同压力、转盘速度的抛光过程中归一化的  $n_{AE}$   
Fig.2 Normalized  $n_{AE}$  of different samples during polishing at different  $p, v$

对图 2 数据进行分析可以看到, 对于  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiOF}$  薄膜, AE 信号很相似; 对于  $\text{SiOC}$  薄膜, 该信号减小。一般情况下:  $n_{AE}(\text{SiO}_2) > n_{AE}$

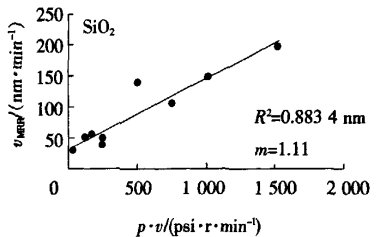
(SiOF) >  $n_{AE}$  (SiOCSP) >  $n_{AE}$  (SiOCNSP) >  $n_{AE}$  (SiOCSSO), 薄膜硬度和模数值越高, 产生的 AE 信号越高。在 1 psi 和 3 psi 下抛光时, 除了 SiOF 薄膜, 其他薄膜的 AE 信号随转速的增加而有所增加, SiOF 薄膜性质异常的原因暂时还不清楚。在 6 psi 下,  $v = 0.8 \text{ m/s}$  时抛光产生的 AE 信号最强。声发射可用于测量抛光强度, 亦即可以测量晶片的表面状况。在 6 psi 下, 转盘速度大于  $0.8 \text{ m/s}$  时 AE 信号下降, 这迥异于 1 psi 和 3 psi 的 AE 信号的变化趋势。AE 信号下降的原因, 是在这种较高的下压力和转速下, 到达抛光垫和晶片接触面之间的抛光液明显减少, 表明在更高的下压力 (超过 6 psi) 下, 须降低抛光速度。

针对以上几种材料, 本文考虑了另一种研究方法, 从抛光去除速率的普莱斯顿方程<sup>[4]</sup>考虑, 则

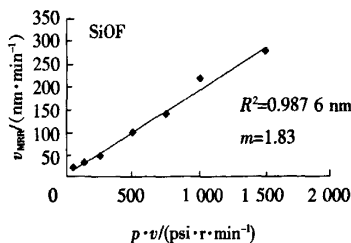
$$v_{MRR} = K p U$$

式中:  $v_{MRR}$  为去除速率;  $p$  为所加的下压力;  $K$  为普莱斯顿方程系数, 单位是压力单位的倒数, 它与被抛光材料的机械强度、抛光液种类和抛光垫等因素有关;  $U$  为晶片与研磨垫之间的相对速度。

· 图 3、4 给出以上五种材料的去除率。



(a) SiO<sub>2</sub> 的  $p \cdot v - v_{MRR}$  关系曲线



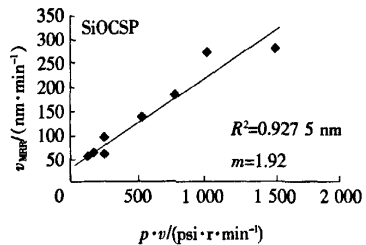
(b) SiOF 的  $p \cdot v - v_{MRR}$  关系曲线

图 3 Preston 方程对 SiO<sub>2</sub> 和 SiOF 薄膜的适用性

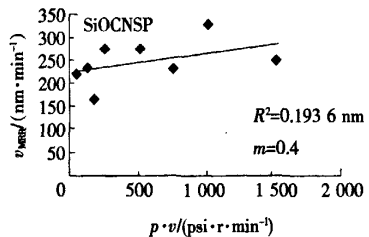
Fig. 3 Validation of Preston's equation for SiO<sub>2</sub> and SiOF films

在图 3、4 中,  $m$  是直线斜率,  $R^2$  是测量时晶片表面平均粗糙度, 横坐标表示为下压力  $p$  与转速  $v$  之积。从图 3 中可以看出 SiO<sub>2</sub> 薄膜的数据比 SiOF 的数据更分散, 可能是 SiOF 薄膜的机械抛光比化学抛光更高, 以及抛光后用九点厚度测量时的不确定性造成的。假定氟 (F) 浓度对氧化物的结构不会造成重大改变, 由于 SiOF 的硬度与 SiO<sub>2</sub> 相当, 可以有把握地说, 两种材料的抛光性质类似, 并且二者都遵守 Preston 方程。因此, 用 SiOF 取代 SiO<sub>2</sub> 是较为可行的。

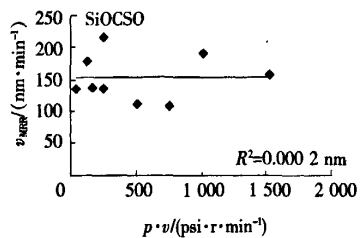
图 4 给出 SiOCSP、SiOCNSP 和 SiOCSSO 的抛光去除速率  $v_{MRR}$  与压力 ( $p$ )、转速 ( $v$ ) 间的关系曲线。



(a) SiOCSP 的  $p \cdot v - v_{MRR}$  关系曲线



(b) SiOCNSP 的  $p \cdot v - v_{MRR}$  关系曲线



(c) SiOCSSO 的  $p \cdot v - v_{MRR}$  关系曲线

图 4 三种不同 SiOC 薄膜材料去除图

Fig. 4 Material removal patterns of three different SiOC films

如图 4 所示, SiOCSP (图 4 (a)) 抛光速率与压力、转速的关系服从 Preston 方程, 而 SiOC-

NSP 和 SiOCSP (分别如图 4 (b) 和 (c) 所示) 并不服从 Preston 方程, 表明其抛光机理与典型 CMP 工艺不同。这种失常的原因可能是不同方法淀积的 SiOC 薄膜的化学结构不同。可以推断, 采用标准淀积得到的薄膜, 与 SiOCNSP 和 SiOCSP 薄膜相比, SiOCSP 更适合用氧化物抛光液抛光。聚合 SiOCSP 薄膜随  $p \cdot v$  的变化表现出很小的变化。在抛光过程中, 碳掺杂样品在与 SiO<sub>2</sub> 和 SiOF 薄膜的亲水性比较时, 发现其具有疏水性<sup>[5]</sup>, 碳掺杂氧化物的疏水性强弱按照下面顺序排列: SiOCSP > SiOCNSP > SiOCSP。

从图 3、4 可以看出, SiO<sub>2</sub>、SiOF 和 SiOCSP 遵循 Preston 方程, 其余两种材料并不与该方程吻合, 这表明抛光液通过与晶片表面反应去除材料, 不仅仅取决于薄膜的硬度, 还取决于它与薄膜表面的反应。选取如表 1 所示的抛光表面实验数据对抛光效果作进一步分析。

表 1 未抛光及在 3 psi 下抛光的表面

Table 1 Summary of AFM results of the unpolished and polished at 3 psi

样品	未抛光及 3 psi 下抛 光	相对速率 /(m·s <sup>-2</sup> )	去除前粗 糙度/nm	去除后粗 糙度/nm	截面分析 垂直距 离/nm
SiO <sub>2</sub>	0	0	2.69	3.42	17.5
	3	0.2	0.42	0.55	2.04
	3	0.8	0.28	0.37	1.51
	3	1.2	0.22	0.28	1.28
SiOF	0	0	0.14	0.18	0.95
	3	0.2	0.30	0.39	2.06
	3	0.8	0.27	0.40	1.80
	3	1.2	0.24	0.31	1.48
SiOCSP	0	0	0.60	0.78	3.73
	3	0.2	0.42	0.54	2.81
	3	0.8	0.35	0.44	2.88
	3	1.2	0.33	0.42	1.99
SiOCNSP	0	0	0.54	0.68	3.48
	3	0.2	0.34	0.43	2.77
	3	0.8	0.42	0.53	2.50
	3	1.2	0.30	0.37	1.93
SiOCSP	0	0	0.45	0.56	2.67
	3	0.2	0.49	0.61	3.63
	3	0.8	0.65	0.79	4.34
	3	1.2	0.34	0.42	2.34

从表 1 可见, 与其他掺杂氧化物薄膜相比, SiO<sub>2</sub> 去除前粗糙度非常高为 2.69 nm, 而 SiOF 薄膜在 CMP 之前具有非常光滑的表面 (0.14 nm), 这与材料形成的工艺有关。在所有的 SiOC 薄膜中, SiOCSP 具有最高的 CMP 前期粗糙度 (0.6 nm), 而 SiOCSP 具有最低的前期粗糙度 (0.45 nm)。CMP 前样品表面的截面分析表明表面粗糙度具有类似的走向, CMP 后所有薄膜的粗糙度均有所增加。SiOF 薄膜粗糙度和最大高度增加的原因, 可能是所使用的抛光垫和抛光液性能所致。SiOF 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜具有类似的粗糙度值变化, 可能是因为这两种材料的性质相似, 抛光机理相似, 而 SiOC 薄膜的粗糙度更高, 表明发生在这些软薄膜上的抛光机理是不同的。SiOCSP 薄膜的粗糙度和最大高度明显增加, 它的机械完整性在三种 SiOC 薄膜中是最小的。SiOCSP 薄膜的材料去除率低主要是因为其更高的机械剪切及该薄膜的表面不规则去除率造成的。

### 3 结 语

当前在 ULSI 中, 无论是同时用在金属互连之间和不同金属层之间, 还是仅用于金属互连之间, 低  $k$  材料完全替代 SiO<sub>2</sub> 仍然还不能实用于大规模工业化生产中。要真正满足实用需要, 则必须从几个方面入手: 必须对材料的机械强度和集成模式进行大的改进, 机械加工强度是工艺集成中非常关键的因素, 通过加工构造低  $k$  介质的界面和厚度, 可改进低  $k$  介质的力学强度以适应包括 CMP 在内的多种工艺; 针对低  $k$  材料的特性, 采用超低的磨头压力、柔性研磨垫和新一代高转速抛光台、研制合适的抛光液将会大幅提高抛光速率和表面状态。扩展现有的 CMP 技术, 结合 ECMP 技术将有效改善抛光工艺。

#### 参考文献:

- [1] 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 [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] SIKDER A K, KUMAR A. Mechanical and tribological properties of interlayer films for the damascene-Cu chemical-

mechanical planarization process [J]. Electron Mater, 2002, 31 (10): 1016-1020.

- [3] SIKDER A K, IRFAN I M, KUMAR A, et al. Nano-indentation studies of xerogel and SiLK low- $k$  dielectric materials [J]. Electron Mater, 2001, 30 (12): 1527-1531.
- [4] PRESTON F. The theory and design of plate glass polishing machines [J]. Soc Glass Tech, 1927, 11: 214-256.
- [5] HARTMANNGRUBER E, ZWICKER G, BEEKMANN K. A selective CMP process for stacked low- $k$  CVD oxide films [J]. Microelectron Eng, 2000, 50 (9): 23-27.



#### 作者简介:

周国安 (1981—), 男, 河南信阳人, 毕业于西南交通大学, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事半导体专用设备研究;

种宝春 (1970—), 男, 天津人, 工程师, 主要从事半导体专用设备研究。

(上接第 270 页)

据报道, 在 100 MHz 时 Au 器件 Q 值为 334, 而 Pt 为 111<sup>[8]</sup>, 因此, 选用电阻率小的电极材料非常有利于器件性能的提高, 相对于 Pt 的电阻率  $10.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , Au 的电阻率较低, 为  $2.35 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 同时 Au 更容易进行半导体工艺的刻蚀加工。

### 3 结论

采用射频磁控溅射法在 Au/Si 基片上制备了  $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$  (BZN) 薄膜, 采用缓冲层, 原位退火处理, 得到立方烧绿石结构、表面平整的薄膜; 采用 Au/BZN/Au/Si 平板电容器结构, 测量其介电性能, 可调率约 20%, 损耗达到 0.002~0.004。

#### 参考文献:

- [1] PYO H Y, SEOK H, YONG L H, et al. RF sputtered BZN pyrochlore thin films for voltage tunable dielectric device applications [C] // Materials Research Society Symposium. Warrendale, PA, USA, 2002, 720: 73-78.
- [2] JAEHOON P, LU J W, SUSANNE S, et al. Microwave planar capacitors employing low loss, high- $k$ , and tunable BZN thin films [C] // International Microwave Symposium Digest. Long Beach, CA, 2005, 77: 607-610.
- [3] WANG H, WANG X L, YAO X. Phase transformation and phase distribution of pyrochlore structure in  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -ZnO-Nb $_2\text{O}_5$  system [C] // International Symposium on Applications of Ferroelectrics. East Brunswick, NJ, USA, 1996, 2: 787-790.
- [4] WEI R, TROLIER-MCKINSTRY S, RANDALL C A, et al. Bismuth zinc niobate pyrochlore dielectric thin films for

capacitive applications [J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89 (1): 767-774.

- [5] LU J W, STEMMER S. Low-loss, tunable bismuth zinc niobate films deposited by RF magnetron sputtering [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83 (12): 2411-2413.
- [6] IM J, AUCIELLO O, BAUMANN P K, et al. Composition-control of magnetron-sputter-deposited ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}$ )  $\text{Ti}_{1+y}\text{O}_{3+z}$  thin films for voltage tunable devices [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76 (5): 625-627.
- [7] 陆清芳, 李言. BST 铁电薄膜压控微波器件 [J]. 电子元件与材料, 2002, 20 (12): 36-38.
- [8] LU J W, STEFFEN S, BOESCH DAMIEN S, et al. Low-loss tunable capacitors fabricated directly on gold bottom electrodes [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88 (11): 112905.



#### 作者简介:

齐增亮 (1981—), 男, 陕西富平人, 硕士研究生, 从事纳米介电薄膜材料方面的研究;



李言 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高温超导薄膜与微波器件、铁电薄膜与应用、纳米介电薄膜生长技术、SiC 外延膜技术等方面的研究。

### 声 明

“高场非对称波形离子迁移谱仪的初步研究”一文刊登于本刊 2008 年 45 (3): 158-161 页, 该文第一作者王志刚是中北大学与清华大学联合培养的研究生。经第一作者本人和清华大学精密仪器与机械学系同意, 编辑部对本文的刊登给予撤销, 由此给读者带来的不便表示道歉。

# 低k材料的化学机械抛光研究

作者: [周国安](#), [种宝春](#), [Zhou Guoan](#), [Chong Baochun](#)  
作者单位: [中国电子科技集团公司, 第四十五研究所, 北京, 101601](#)  
刊名: [微纳电子技术](#) ISTIC PKU  
英文刊名: [MICRONANO ELECTRONIC TECHNOLOGY](#)  
年, 卷(期): 2008, 45(5)  
引用次数: 1次

## 参考文献(5条)

1. [BORST C L](#), [GILL W N](#), [GUTMANN R J](#) [Chemical-me-chemical polishing of low dielectric constant polymers and organosilicate glasses:fundamental mechanisms and application to IC interconnect technology](#) 2002
2. [SIKDER A K](#), [KUMAR A](#) [Mechanical and tnbological properties of interlayer films for the damascene-Cu chemical mechanical planarization process](#) 2002(10)
3. [SIKDER A K](#), [IRFAN I M](#), [KUMAR A](#) [Nano-indentation studies of xerogel and SiLK low-k dielectric materials](#) 2001(12)
4. [PRESTON F](#) [The theory and design of plate glass polishing machines](#) 1927
5. [HARTMANN GRUBER E](#), [ZWICKER G](#), [BEEKMANN K](#) [A selective CMP process for stacked low-k CVD oxide films](#) 2000(09)

## 相似文献(0条)

## 引证文献(1条)

1. [张健](#), [史宝军](#), [杜运东](#), [杨廷毅](#) [化学机械抛光技术研究现状与展望](#)[期刊论文]-[山东建筑大学学报](#) 2009(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wndzjs200805010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wndzjs200805010.aspx)

下载时间: 2010年5月27日