

ULSI 中 Cu 互连线的显微结构及可靠性

王晓冬¹, 吉 元¹, 李志国², 卢振军², 夏 洋³, 刘丹敏¹, 肖卫强¹

(11 北京工业大学材料科学工程学院, 北京 100022; 21 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022;

31 中国科学院微电子中心, 北京 100029)

摘 要: 观察了 ULSI 中大马士革结构的 Cu 互连线的晶粒生长和晶体学取向. 分析了线宽及退火对 Cu 互连线显微结构及电徙动的影响. Cu 互连线的晶粒尺寸随着线宽的变窄而减小. 与平坦 Cu 膜相比, Cu 互连线形成微小的晶粒和较弱的 (111) 织构. 300 e、30min 退火促使 Cu 互连线的晶粒长大、(111) 织构发展, 从而提高了 Cu 互连线抗电徙动的能力. 结果表明, Cu 的扩散涉及晶界扩散与界面扩散, 而对于较窄线宽的 Cu 互连线, 界面扩散成为 Cu 互连线电徙动失效的主要扩散途径.

关键词: Cu 互连线; 晶体学取向; 晶粒尺寸; 电徙动

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 08-1302-03

Microstructure and Reliability of ULSI Copper Interconnects

WANG Xiaodong¹, JI Yuan¹, LI Zhiguo², LU Zhenjun², XIA Yang³, LIU Danmin¹, XIAO Wei2qiang¹

(11 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

21 School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

31 Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The grain growth and crystallographic orientation of the ULSI Cu interconnects within the Damascene architecture were observed. Microstructures of the Cu interconnect depending on linewidths and anneal temperatures and impacts on the electromigration (EM) were analyzed. The grain size of Cu lines shrunk as the linewidth was reduced. The small grains and the weaker (111) texture in Cu lines were formed compared with that in Cu blanket films. The EM resistance of the Cu metallization could be improved via the grain growth and the (111) texture developed during anneal at 300 e for 30min. The results indicate that the Cu diffusion involves interface diffusion and boundary diffusion, while the diffusion along interface plays a dominant role in EM failure for Cu lines with the narrow linewidth.

Key words: Cu interconnect; crystalline orientation; grain size; electromigration

1 引言

Cu 膜与 Al 膜相比具有较低的电阻率和较高的抗电徙动能力. Cu 膜激活能 (Q) 和电徙动中值失效时间 (MTF) 比 Al 膜高数倍. 因此, Cu 可取代 Al 作为 ULSI 亚微米和深亚微米金属化系统^[1]. 从以往对 Al 互连线的研究可知, 互连线的显微结构, 包括晶粒尺寸及晶粒取向, 与薄膜电徙动可靠性密切相关^[2]. 由于 Cu 互连线工艺采用的是不同于 Al 互连线的大马士革镶嵌构造^[3], 因此, 沉积在凹槽中的 Cu 互连线的晶粒形核、生长和取向与铝互连线和平坦的 Cu 膜均有所不同^[4]. 本文观察和分析了沉积态和退火后不同线宽的 Cu 互连线的微观形貌和晶体学取向. 测量了不同线宽、不同退火条件 Cu 互连线的 MTF 和失效激活能. 分析了 Cu 互连线的晶粒尺寸和取向对 Cu 互连线电徙动可靠性的影响, 及电徙动失效机理.

2 实验

Cu 互连线采用大马士革镶嵌工艺制成. 在单晶 Si 衬底上热氧化生长形成 1Lm 厚的 SiO_2 . 通过等离子体干法刻蚀, 在 SiO_2 上刻蚀出 015Lm 深、400Lm 长的凹槽. 采用磁控溅射法在凹槽中连续沉积 5nm 厚的 Ta 阻挡层和 50nm 厚的 Cu 晶种层. 然后, 采用电镀工艺, 使 Cu 充满凹槽. 最后, 采用化学机械抛光除去表面多余的 Cu 膜和 Ta 膜, 如图 1 所示. 部分样品经过 300 e、400 e 和 450 e 退火处理. 图 1 为电镀大马士革 Cu 互连线截面示意图. 电徙动加速寿命实验测定沉积态和 300 e、30min 退火后的 Cu 互连线的电徙动 MTF 和 Q 值. 实验在 10^7 A/cm^2 DC 电流密度和 N_2 气保护下进行. Cu 互连线宽度分别为 1Lm、2Lm 和 4Lm, 长度为 400Lm, 厚度为 015Lm. 测试互连线分别连接到压焊点上, 如图 2 所示.

采用原子力显微镜 (AFM)、扫描电镜 (SEM) 及 X2 射线衍射仪 (XRD) 等方法, 观察和测定了 Cu 互连线的晶粒结构、晶体学取向及电徙动实验后的表面形貌. 作为对比, 还分析了采用相同沉积条件的平坦 Cu 膜的晶粒结构.

3 实验结果与讨论

3.1.1 晶粒尺寸

图 3 和表 1 给出了 Cu 互连线和 Cu 膜的晶粒形貌和尺寸, 图 3 (a) 和 (b) 为沉积态和 300 e、30min 退火的 015Ln2Cu 互连线, (c) 和 (d) 为沉积态和 200 e、1h 退火的 Cu 膜. 沉积态 Cu 膜的晶粒尺寸约为沉积态 015Ln2Cu 互连线的 10 倍; 沉积态 4Ln2Cu 互连线的晶粒尺寸约为沉积态 015Ln2Cu 宽的 3 倍. 退火后, Cu 互连线和 Cu 膜的晶粒均长大, 但 Cu 膜晶粒长大的速率比 Cu 互连线更快. 这可认为是大马士革凹槽侧壁提供了晶粒形核和生长的位置, 凹槽底部形核与侧壁形核相互竞争, 从而对晶粒生长起了约束作用.

3.1.2 晶体学取向

图 4 为采用 XRD 测量的 Cu 互连线和平坦 Cu 膜的 (111) 极图 (上) 和相应的取向分布函数 (ODF) (下). 图 4 (a) 2 (c) 和 (d) 2 (e) 分别为 3Lm 宽 Cu 互连线和 Cu 膜的极图和 $U_2=45^\circ$ 的 ODF 图. 比较 Cu 互连线和 Cu 膜的晶体学取向可看出, 在沉积态的平坦 Cu 膜中形成的 (111) 织构比在 Cu 互连线中的明显增强, ODF 最大强度从 2.56 提高至 7.13, 如图 4 (a) 和 (d) 所示. 互连线凹槽的侧壁可成为 (111) 晶粒形核和生长的位置, 导致 (111) 取向的晶粒沿侧壁和底部产生, 使得相对于膜面的 (111) 织构减弱^[9].

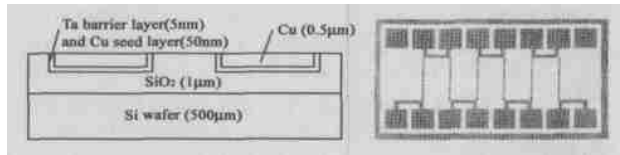


图 1 为电镀大马士革 Cu 互连线截面示意图

图 2 电徙动样品平面示意图

表 1 Cu 互连线和 Cu 膜的晶粒尺寸

deposit	Grain size in Cu line (nm)				Grain size in Cu film (nm)
	015Ln2line	1Ln2line	3Ln2line	4Ln2line	
200 e	30~40	50~60	60~70	80~90	200~300
300 e	2	2	2	2	400~500
450 e	40~60	2	2	90~110	2
	2	2	2	2	800~1000

比较沉积态和退火后的 Cu 互连线的晶体学取向看出 ((图 4 (a) 和 (b), 300 e、30 分钟退火使 (111) 织构明显增强, ODF 强度从 2.56 提高至 8.04. 退火促使表/界面能降低, (111) 织构发展. 而 400 e、30 分钟退火后, (111) 织构强度没有增强 (图 4 (c)), 这与高温退火后晶粒明显长大有关. 晶粒长大和初次再结晶过程都强烈地依赖退火温度 (参见表 1), 并

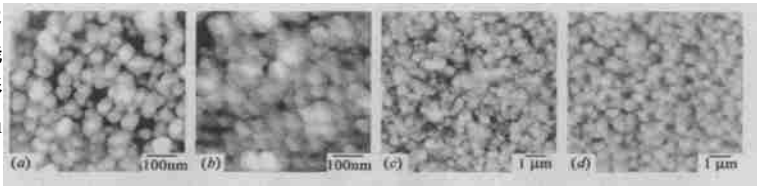


图 3 AFM 图像显示的 Cu 互连线晶粒结构; (a) 和 (b) 分别为沉积态和 300 e、30min 退火后 015Ln2Cu 互连线; (c) 和 (d) 分别为沉积态和 200 e、1h 退火后的平坦 Cu 膜

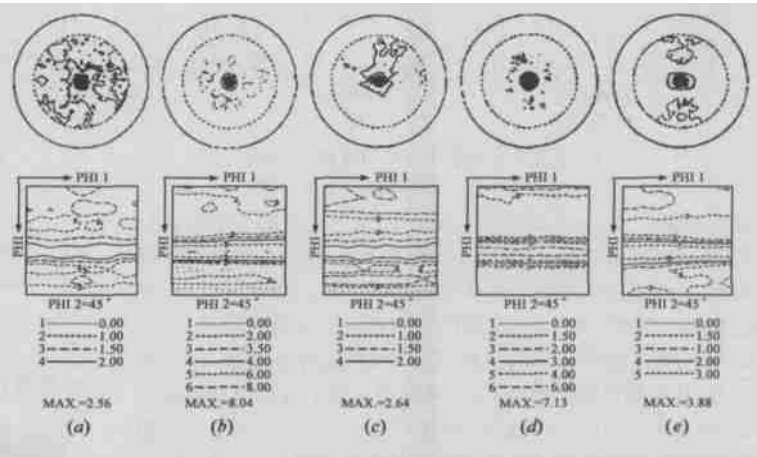


图 4 Cu 互连线和 Cu 膜的 (111) 极图 (上) 和 $U_2=45^\circ$ ODF 截面图 (下): (a) 沉积态; (b) 300 e、30min; (c) 400 e、30min 退火的 3Ln2Cu 互连线; (d) 沉积态; (e) 450 e、1h 的 Cu 膜

可影响晶界两侧晶粒的取向关系. 晶界密度减小、晶界能下降是晶粒长大的一个驱动力. 此外, 对 Cu 互连线和 Cu 膜应力测量结果 (另文发表) 可知, 退火后 Cu 膜及互连线仍然存在应力, 因此储存的应变能可促使初次再结晶过程的发生, 是晶粒长大的另一个驱动力. 在 fcc 晶体中, 杨氏模量在 $\langle 111 \rangle$ 方向存在最大值, (111) 面的应变能最大. 应变能降低促使晶粒中应变能较高的晶面转换为能量较低的晶面. Cu 互连线在 300 e 退火后其表/界面能降低占优, 使 (111) 织构增强; 而 400 e 退火后, 应变能降低占优, 使 (111) 织构减弱^[4,5]. 对比图 4 (d) 和 (e) 看出, Cu 膜 450 e、1h 退火后, (111) 织构也未得到增强, 这与 Cu 互连线的测量结果一致.

3.1.3 电徙动

图 6 为 1Lm、2Lm 和 4Lm Cu 互连线, 退火前后的电徙动加速寿命实验的测试结果. 300 e、30min 退火后, Cu 互连线的 MTF 和 Q 值比沉积态样品增加. 因此, 合理的优化退火条件可促使 Cu 晶粒长大、(111) 织构发展, 提高了 Cu 膜电徙动的可靠性.

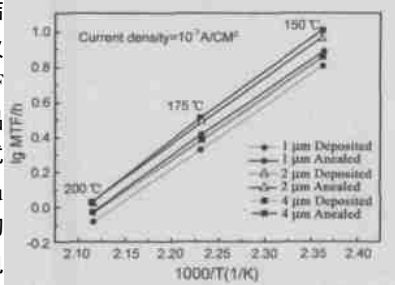


图 5 退火前后不同线宽的 Cu 互连线的 MTF

SEM 观察和统计由电徙动引起的空洞

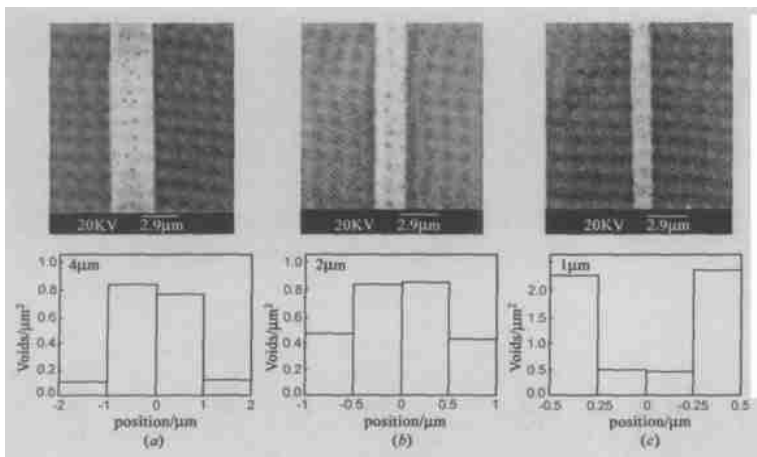


图6 Cu互连线中空洞分布的SEM像(上)和直方图(下):

(a) 4 μm ; (b) 2 μm 和(c) 1 μm Cu互连线

如图6所示,在4 μm 、2 μm 和1 μm 互连线中统计的空洞数目分别为344个、249个和256个。空洞在互连线上的分布随线宽而异:4 μm 互连线中的空洞多分布于线中间;2 μm 中的分布在边缘的空洞密度增加;1 μm 中的空洞则大多分布在边缘。由于Cu互连线并未形成强的(111)织构和形成竹节结构,因此可认为,晶界和界面扩散是Cu互连线电徙动失效的主要扩散途径。但对于较窄的互连线,Cu离子沿界面扩散,尤其是沿凹槽侧壁的扩散,是电徙动失效的主要扩散途径。

4 结论

(1) 受到大马士革凹槽侧壁的约束作用,Cu互连线与平坦Cu膜相比晶粒尺寸较小,且晶粒尺寸随线宽变窄而减小。

(2) 由于大马士革凹槽侧壁可成为(111)取向的晶粒形核和生长位置,使得Cu互连线中形成的相对于膜面的(111)织构比Cu膜弱。

(3) 300 $^{\circ}\text{C}$ 、30分钟退火使Cu晶粒长大和(111)织构增强,从而使其MIF和激活能Q提高。

(4) 电徙动后空洞分析结果表明,随线宽减小,Cu离子沿侧壁界面的扩散比沿晶界扩散对电徙动失效的影响起着更为重要的作用。

参考文献:

- [1] SUN S C. Process technologies for advanced metallization and interconnect systems [A]. IEEE 1997 Intl. Electron Devices Meeting Digest [C]. Hoes Lane, Piscata NJ, USA, 1997. 765 - 769.
- [2] VAIDYA S, et al. Effect of texture and grain structure on electromigration in a201.5% Cu thin films [J]. Thin Solid films, 1981, 75: 253- 259.
- [3] JACKSON R L. Processing and integration of copper interconnects [J]. Solid State Technology, 1998, 41(3): 49- 60.
- [4] RIEGE S P, et al. Modeling of texture evolution in copper interconnects annealed in trenches [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(4): 403- 408.
- [5] THOMPSON C V, Roland Carel. Texture development in polycrystalline thin films [J]. Materials Science and Engineering B, 1995, 32(3): 211- 219.
- [6] Besser P, et al. Optimizing the electromigration performance of copper lines [A]. Technical Digest International Electron Devices Meeting [C]. San Francisco CA USA, Dec. 2000. 119- 121.

作者简介:



王晓冬 男, 1977年11月出生于保定, 1996年9月至2000年6月, 河北大学物理系应用光学专业学习并获理学学士, 2000年9月至2003年6月北京工业大学材料学院硕士研究生, 2003年6月获材料工学硕士学位。



吉元 女, 1949年6月出生于海拉尔, 北京工业大学材料科学与工程学院, 教授, 从事电子材料、复合材料、无机材料的显微分析和测试工作, 目前从事ULSI/VLSI金属化系统的微观特征、失效机理及电、热应力的局域测试方面的研究。