

## Cu 导线表面起伏程度对早期失效的影响

汪 辉<sup>1</sup>, 朱建军<sup>2</sup>, 王国宏<sup>2</sup>, C Bruynseraede<sup>3</sup>, K Maex<sup>3,4</sup>

(1. 上海交通大学微电子学院, 上海 200030; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;

3. IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium; 4. K. U. Leuven, E. E. Department, Kasteelpark 10, B-3001 Leuven, Belgium)

**摘 要:** 使用两种化学机械抛光剂得到的单层大马士革 Cu 导线表面起伏程度不同. 扫描电镜观察到明显的缺陷出现在大起伏的 Cu 导线表面. 这种表面缺陷导致早期失效比率剧增至几乎 100%, 电迁移寿命猛降至早期失效的量子级、失效时间分布从多模变为单模, 其相应的失效机制激活能为  $0.74 \pm 0.02$  eV, 这说明失效主要是由 Cu 原子沿导线表面扩散引起的. 最弱链接近似被用来分析单根 Cu 导线: Cu 导线被适当均分为若干相互串联、失效机制不同的 Cu 块, 任何一个 Cu 块的失效都会使整根 Cu 导线失效. 分析结果表明, 虽然表面缺陷不是最快的失效机制, 但大起伏 Cu 导线的表面缺陷密度是另一种的 10 倍以上, 这是其早期失效比率高和可靠性较低的主要原因.

**关键词:** 电迁移; 早期失效; 表面缺陷; 最弱链接近似

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 08-1516-03

### Impact of Cu-Wire Surface Fluctuations on Early Failures

WANG Hui<sup>1</sup>, ZHU Jian-jun<sup>2</sup>, WANG Guo-hong<sup>2</sup>, C Bruynseraede<sup>3</sup>, K Maex<sup>3,4</sup>

(1. School of Microelectronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China;

3. IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium; 4. K. U. Leuven, E. E. Department, Kasteelpark 10, B-3001 Leuven, Belgium)

**Abstract:** Different Chemical Mechanical Polishing (CMP) slurries are used to obtain single-damascene Cu-wires with different surface fluctuations as well as pre-existing surface defects in the lines with rougher surface. The presence of such pre-existing defects strongly increases the rate of early failures up to almost 100%, reduces electromigration lifetime rapidly to the level of early failures, and changes the multimodal failure distribution into monomodal. The activation energy ( $0.74 \pm 0.02$  eV) for the failure mechanism associated with these pre-existing defects confirms a dominant surface diffusion. We show how a Weakest Link Approximation analysis can be applied to single lines by dividing the lines into relevant segments and assigning different failure mechanisms to the various segments. The analysis confirms that, although surface defects are not the fastest early failure mechanism, the 1-magnitude higher surface-defect-density in the rougher lines is responsible for the observed high early-failure rate and poor reliability performance.

**Key words:** early failure; surface defect; weakest link approximation

## 1 引言

在电迁移 (Electromigration, 简称为 EM) 测试中, 除电迁移导致的本征失效之外, 通常还存在其他的样品失效机制. 这样, 测得的失效时间分布 (累积失效率与失效时间的关系曲线) 不再是理想的单模线性关系, 而经常表现为两个或多个线性模式的叠加, 即双模或多模行为. 早期失效 (Early failures) 发生在单模本征分布预期的器件寿命时间之前, 通常使 Cu 导线的 EM 寿命降低到 Al (Cu) 的量子级或更低<sup>[1,2]</sup>. Al 互连的研究结果<sup>[3,4]</sup>表明, 在 EM 测试开始之前就预先存在的缺陷会使早期失效占总失效的比率略微上升, 而且随着晶粒尺寸的增大, 这些与缺陷有关的早期失效得到显著地抑制. 与 Al 原子不同, Cu 原子主要沿着 Cu/电介质 (Dielectric) 上表面而非晶粒间界 (Grain Boundary) 扩散<sup>[5,6]</sup>, 因此在 Cu 互连中预先存在的表面缺陷对早期失效的影响可能有所不同, 需要进一步的研究.

在 Cu 的大马士革 (Damascene) 制备工艺中, 化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, 简称为 CMP) 用于将电镀的 Cu 导线表面平整化, 不可避免地会引起一定程度的表面起伏 (Surface Fluctuations) 和一定密度的表面缺陷 (Surface Defects). 一种专门的 CMP 抛光剂 (Slurry) 被用来获得大起伏的 Cu 导线表面和随机分布、预先存在的表面缺陷, 而标准的 CMP 抛光剂则作为对比. EM 测试实验和最弱链接近似 (Weakest Link Approximation, 简称为 WLA) 分析被用来研究这种表面起伏/缺陷对 Cu 单层大马士革 (Single Damascene, 简称为 SD) 导线早期失效行为的影响.

## 2 实验和结果

SD Cu 导线 (宽度为  $0.25\mu\text{m}$ , 长度为 2mm) 的制备: 首先在 600nm 深的氧化物沟槽内生长期 10nm TaN/15nm Ta 的 Barrier 材料, 然后不停顿真空, 直接淀积 100nm 厚的 Cu 种子 (Seed) 层, 接着电镀 Cu 来填满沟槽. 在 CMP 步骤中, 对两组样品 (甲

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2005-03-02

基金项目: 上海市科委科研计划项目 (No. 03D214025)

组和乙组)使用不同的 Cu 抛光剂:标准抛光剂甲的 pH 值为 7.5,内含铝土研磨微粒;而专门抛光剂乙的 pH 值为 2.5,内含硅土研磨微粒.完成 CMP 后 Cu 导线的扫描电子显微镜 (SEM) 图像如图 1 所示.当前 SEM 分辨率下,甲组样品的表面基本光滑,只是偶尔观察到一些小的缺陷.抛光剂乙使 Cu 表面的起伏较大,出现类似于孔洞(void)的缺陷.这些 EM 测试前就预先存在的表面缺陷大多为椭圆形,尺寸为 20~200nm,沿 Cu 导线长度方向随机分布.

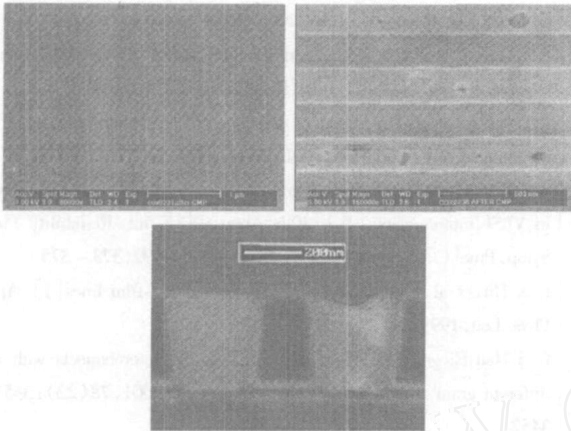


图 1 完成 CMP 后 Cu 导线的扫描电子显微镜 (SEM) 图像. 左图为甲组样品,右图和下图为乙组样品

在 CMP 步骤之后,在 Cu 导线上覆盖 50nm SiC 作为 Hard-mask,330nm SiO<sub>2</sub>/500nm SiN 作为钝化层 (Passivation),以进一步防止样品被侵蚀.甲组样品的平均电阻为 250  $\Omega$ ,而乙组则为 300  $\Omega$ ,说明更大的表面起伏或缺陷密度相当于使 Cu 导线的有效横截面积减少约 17%.经过片测和封装(陶瓷封装,Al-Si 引线),样品被放入 Aetrium 1164 系统中进行 EM 测试,加速条件为 300 和 3 MA/cm<sup>2</sup>,失效标准为 Cu 导线电阻值增加 20%.实验进行到 1027 hours 时被终止.

上述条件下样品的累积失效时间分布 (Cumulative failure distribution, 简称为 CfD) 如图 2 (Symbols) 所示.多模 CfD 分布说明甲组样品的表面起伏可以忽略.早期失效发生在 EM 测试开始后的 400Hours 之内,其比率约为 50%.而 EM 本征失效机制在 1002 Hours 时才被触发,且超

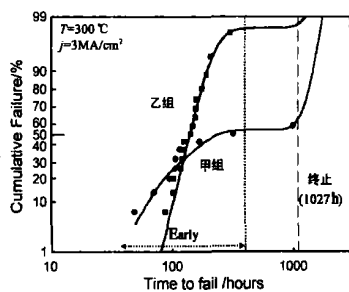


图 2 两组样品的累积失效时间分布 Symbols 是实验结果, Curves 是模拟计算结果

过 40%的甲组样品在测试被终止 (1027 Hours) 时仍然幸存,因此从本征失效分布推算出的中值寿命 (median lifetime)  $t_{50} > 1000$ Hours.同时非本征失效自身也不是单模分布.如果假设由某一类缺陷引起的失效分布近似为 lognormal<sup>[7]</sup>,则说明在甲组样品的 SD Cu 导线中同时存在多种不同的早期失效机制.

除右端有小的 Tail 外,乙组样品 (预先存在表面缺陷) 的

CfD 几乎为单模分布.在上述测试条件下,乙组样品的  $t_{50}$  仅为 145 Hours,形状参量 (Shape Parameter) 也很小 ( $\sigma = 0.24$ ).乙组样品的失效时间全都落在甲组样品的早期失效时间范围内,这表明在乙组样品中早期失效的比率剧增至几乎 100%,而 EM 寿命则被降低到早期失效的量级.有趣的是,当乙组样品中与表面缺陷相关的失效被触发时 (约 90Hours),已经有约 10%的甲组样品失效了.很显然,这是因为还有其他具有更小  $t_{50}$  的快速失效机制存在.在随后的多次测试中再也没有观察到这种快速失效机制,因此我们认为它完全与工艺处理过程有关,并非普遍现象.

乙组样品在不同温度条件下的 CfD 分布如图 3 所示.根据最大似然估计 (Maximum Likelihood Estimate) 得出与表面缺陷相关的失效机制激活能约为 0.74eV,这与沿 Cu/Dielectric 上表面扩散的典型激活能一致,说明失效主要是由 Cu 原子沿导线表面扩散引起的.对失效的乙组样品进行会聚离子束 (FIB) 分析 (图 4) 表明,由于测试条件下 EM 驱动 Cu 原子沿表面扩散,表面缺陷的尺寸逐步扩大,缺陷密度增加,导致电阻逐渐上升;当致命性的表面缺陷出现时,

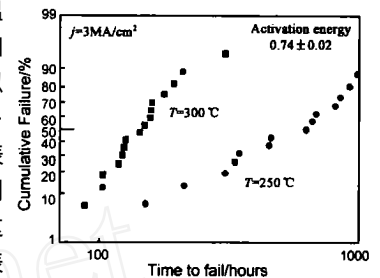


图 3 不同测试温度下的乙组样品累积失效时间分布.表面缺陷相关的失效机制激活能为 0.74±0.02eV

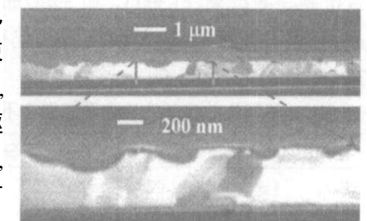


图 4 失效乙组样品的会聚离子束 (FIB) 图像.下图为上图的局部放大

Cu 导线电阻突然剧增,迅速达到增长 20%的失效标准.

### 3 分析与讨论

最弱链近似 (WLA)<sup>[8]</sup> 被用来分析上面的实验结果.根据 WLA,单根 Cu 导线被适当均分为若干相互串联、失效机制不同的 Cu 块 (统计独立元),任何一个 Cu 块的失效都会导致整根 Cu 导线失效.而那些预先存在表面缺陷的 Cu 块 (独立元) 是弱链接,倾向于比其他独立元更快地失效.因此整根 Cu 导线的 CfD 分布可由各独立元的 CfD 分布计算得出<sup>[3,8,9]</sup>:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)] \quad (1)$$

其中  $F(t)$  和  $F_i(t)$  分别是整根 Cu 导线和第  $i$  个独立元在测试时间  $t$  时已经失效的可能性; $n = L/l_e$  是独立元的数量, $L$  和  $l_e$  则分别是 Cu 导线和独立元的长度.进一步,如果第  $i$  个独立元内包含两种统计相互独立的失效模式,该独立元的 CfD 分布是这两种失效模式 CfD 分布的混合<sup>[9]</sup>:

$$F_i(t) = pF^D(t) + (1 - p)F^I(t) \quad (2)$$

其中  $F^D(t)$  是第  $i$  个独立元内与表面缺陷相关的失效分布,而  $F^I(t)$  则是 EM 本征失效分布, $p$  则是该独立元因缺陷而失效的几率.

由于 Cu 互联的短尺寸效应, SD Cu 室温阈产值 (Threshold Product) 约为  $2800 \sim 3500 \text{ A/cm}^{101}$ , 而 EM 测试电流密度为  $3 \text{ MA/cm}^2$ , 所以 WLA 分析要求  $l_E$  应远大于  $10 \mu\text{m}$ . 在这种情况下, 长度为  $2 \text{ mm}$  的 Cu 导线被均分为 12 个独立元. 每个独立元的长度约为  $167 \mu\text{m}$ , 足以避免短尺寸效应.

这里只考虑以下三种失效机制: EM 本征失效机制, 与表面缺陷相关的失效机制, 以及完全与工艺处理有关地快速失效机制. 12 个独立元可按失效机制的不同归为三种类型 (见图 5 中的示意插图): I 型独立元不含任何缺陷, 所以只存在 EM 本征失效

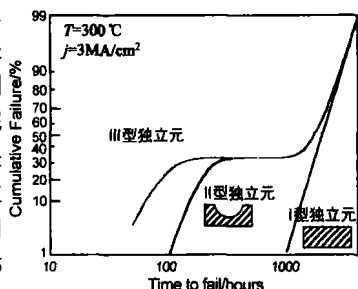


图 5 不同类型独立元的模拟累积失效时间分布. 插图: 不同独立元的示意图

机制; II 型独立元中存在表面缺陷, 因此除本征失效机制外, 还存在与表面缺陷相关的失效机制; 而 III 型独立元则包含快速失效机制和本征失效机制 (见表 1). 由公式 2 模拟计算得出的不同类型独立元 Cf 分布如图 5 所示. 表 1 列出了每个失效机制在测试条件 ( $300^\circ\text{C}$  和  $3 \text{ MA/cm}^2$ ) 下的主要参数 ( $t_{50}$  和  $\omega$ ). 在模拟计算中, 通常假设因缺陷而失效的独立元几率为 33%.

表 1 不同失效机制的参数及它们在不同类型独立元中的权重

Mechanism	Fast	Surface-defect	Intrinsic
$t_{50}$ (hours)	80	180	2100
	0.4	0.3	0.3
I 型独立元			100 %
(Weight) II 型独立元		33 %	67 %
III 型独立元	33 %		67 %

由单个独立元的 Cf 分布可根据公式 1 计算得出整根导线的 Cf 分布. 甲、乙两组样品之间的区别可以简单地归纳为: 乙组样品具有更高的表面缺陷密度, 而甲组样品中存在全部三种失效机制. 在我们的 WLA 模型中, 甲组样品被当作包含 10 个 I 型独立元、1 个 II 型独立元和 1 个 III 型独立元的串联链来处理, 乙组样品则包含 2 个 I 型独立元和 10 个 II 型独立元, 实际上简单地假设乙组样品的表面缺陷密度为甲组样品的 10 倍. 模拟结果如图 2 (Curves) 所示, 与实验数据相当地吻合, 这表明乙组样品大起伏的表面以及相应的 10 倍高的表面缺陷密度是造成早期失效比率剧增和  $t_{50}$  猛降的主要原因. 正在继续进一步的实验, 重点研究 CMP 抛光剂的酸碱度和组分对 Cu 导线表面质量的影响.

#### 4 小结

总之, 使用两种化学机械抛光剂得到的单层大马士革 Cu 导线表面起伏程度不同. 在电迁移测试开始前就预先存在的表面缺陷导致早期失效比率剧增至几乎 100%、电迁移寿命

猛降至早期失效的量级、失效时间分布从多模变为单模, 其相应的失效机制激活能为  $0.74 \pm 0.02 \text{ eV}$ , 这说明失效主要是由 Cu 原子沿导线表面扩散引起的. 对这些 Cu 导线失效时间的最弱链接近似分析表明, 10 倍高的表面缺陷密度是其早期失效比率高和可靠性较低的主要原因.

#### 参考文献:

- [1] A H Fischer, et al. Electromigration failure mechanism studies on copper interconnects [A]. 40th Annu. IEEE Int. Interconnect Technology Conf [C]. San Francisco, USA, 2003. 139 - 141.
- [2] E T Ogawa, et al. Electromigration reliability issues in dual-damascene Cu interconnections [J]. IEEE Trans. Reliability, 2002, 51(4): 403 - 421.
- [3] K G Kemp, et al. The effects of defects on the early failure of metal interconnects [J]. IEEE Trans. Reliability, 1990, 39(1): 26 - 32.
- [4] S S Menon, et al. Influence of grain size on defect-related early failures in VLSI interconnects [A]. 30th Annu. IEEE Int. Reliability Phys. Symp. Proc [C]. Symp. Proc. San Diego, USA, 1992. 373 - 375.
- [5] C K Hu, et al. Electromigration path in Cu thin-film lines [J]. Appl. Phys. Lett. 1999, 74(20): 2945 - 2947.
- [6] C S Haur-Riege, et al. Electromigration in Cu interconnects with very different grain structures [J]. Appl. Phys. Lett. 2001, 78(22): 3451 - 3452.
- [7] J R Lloyd, et al. Electromigration in copper conductors [J]. Thin Solid Films, 1995, 262: 135 - 146.
- [8] E T Ogawa, et al. Statistics of electromigration early failures in Cu/Oxide dual-damascene interconnects [A]. 39th Annu. IEEE Int. Reliability Phys. Symp. Proc [C]. Orlando, USA, 2001. 341 - 343.
- [9] M S Moosa, et al. Simulating IC reliability with emphasis on process-flaw related early failures [J]. IEEE Trans. Reliability, 1995, 44(4): 556 - 561.
- [10] S Thrasher, et al. Blech effect in single-inlaid Cu interconnects [A]. Proc. Int. Interconnect Technology Conf [C]. San Francisco, USA, 2001. 177 - 179.

#### 作者简介:



汪辉男, 2001 年中国科学院半导体研究所获博士学位; 而后赴比利时 IMEC 从事博士后研究工作, 方向为 Cu/Low k 互联系统的可靠性; 2004 年 9 月起在上海交通大学微电子学院工作, 当前研究方向包括 65 纳米工艺互联系统可靠性和 DNA 计算等. E-mail: wanghui @ic. sjtu.edu.cn.



朱建军男, 1998 年中国科学院半导体研究所获博士学位并留所工作至今, 主要从事 III 族氮化物的生长与研究, 承担过自然科学基金、863 计划支持的科研项目, 参加完成中国大陆第一只蓝光激光器的研制, 当前研究方向为 Si 衬底上 GaN 材料的生长以及相关光电器件的研制与开发.