



## CMP 后清洗技术进展

摩尔定律的一个重大副作用就是从不明确地确定半导体产业中的技术问题。对目前制造节点完全适用的材料和工艺可能几年后就不够了。问题出自特征尺寸的不断缩小。极细线条中的性能与大块材料的性质能有极大的差别。

根据下式，减少粗导线的截面积电阻就增加：

$$R=(l*\rho)/A$$

式中， $l$ =导线长度， $\rho$ =电阻率=常数， $A$ =截面积。但是，当线宽在 100nm 以下时，界面处的散射和晶粒边界比块状材料性能更为重要，电阻率呈指数增加。任何铜截面的减少都有双重影响：方块电阻增加和电阻率成倍上升。对于长线，电阻比较重要；对于较短线的性能，电容的影响较大。尽管电阻仍然与截面有关，但较长导线受尺寸效应的双重影响并不太大。其它的电路限制因数使简单地增加导线尺寸不实际。为此，制造商希望采用比较薄的阻挡层，允许在给定的光刻特征图形中容纳更多的铜。

### 新阻挡层-新集成挑战

为了减少阻挡层厚度，要考虑二个重要因素：a)防止铜扩散进入介质，b)确保铜层的牢固粘附。

上述二个要求中工艺的优先考虑存在竞争性。为了防止铜扩散进入介质，阻挡层必须足够厚、保形且没有孔洞。而对于许多 32nm 及以上节点的应用来说，现在已普遍采用多孔低  $k$  介质层。厚阻挡层还增加纯电阻。

为了改善界面处的粘附强度，阻挡层必须一方面要与铜有牢固的界面键合，另一方面要与低  $k$  介质层形成牢固的界面键合。若单一介质层达不到目的，目前的趋势是用双层，如在 Cu 下 Ru 或 Co 或 Mn 的组合（称为胶粘层），然后在胶粘层下用另一层 TaN。与单一阻挡层比较，采用双层某种程度上允许减少阻挡层的厚度。

### 用于 Cu 工艺的 CMP 后新清洗方法

因此，为 Cu 工艺开发 CMP 后清洗配方的复杂性就在于，有图形晶圆中存在多个堆叠在一起的不同界面，当 CMP 工艺后在清洗机中清洗晶圆时，这些界面均暴露在 CMP 后清洗溶液内。溶液中



不同的电耦合产生了不同的腐蚀问题，这也许难以用光晶圆的研究预计。对于 Co 籽晶增强层（SEL）和 Ru 阻挡层，发现一种碱性的 CMP 后清洗溶液是非常理想的选择（见图 1）。

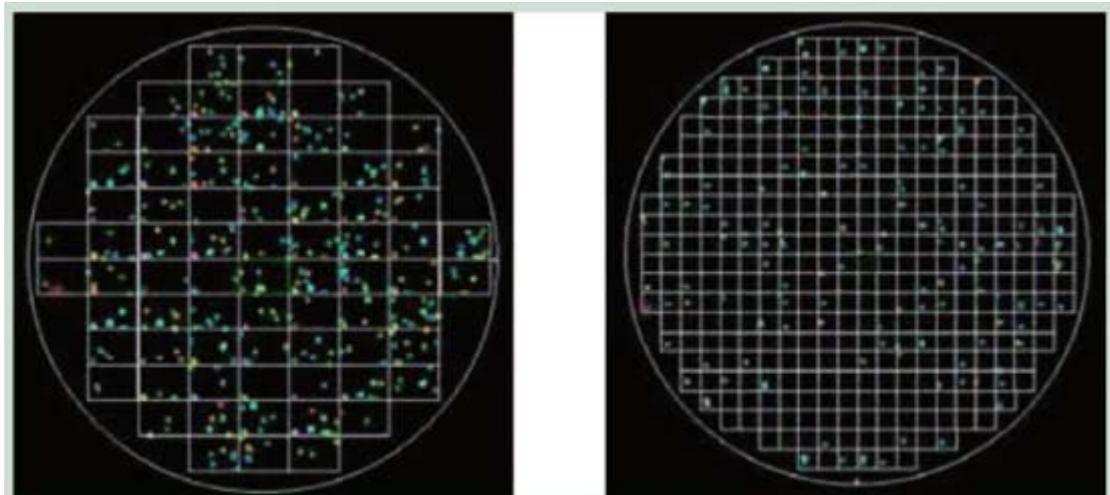


图1. 采用新清洗方法后测试图形晶圆的缺陷图。(a) Ru阻挡层, (b)Co SEL

在各种 CMP 后清洗中，有图形晶圆的高密度铜线条区清洗后有可能形成树突的问题。采用合适的配方可以避免树突的形成，如图 2 所示。

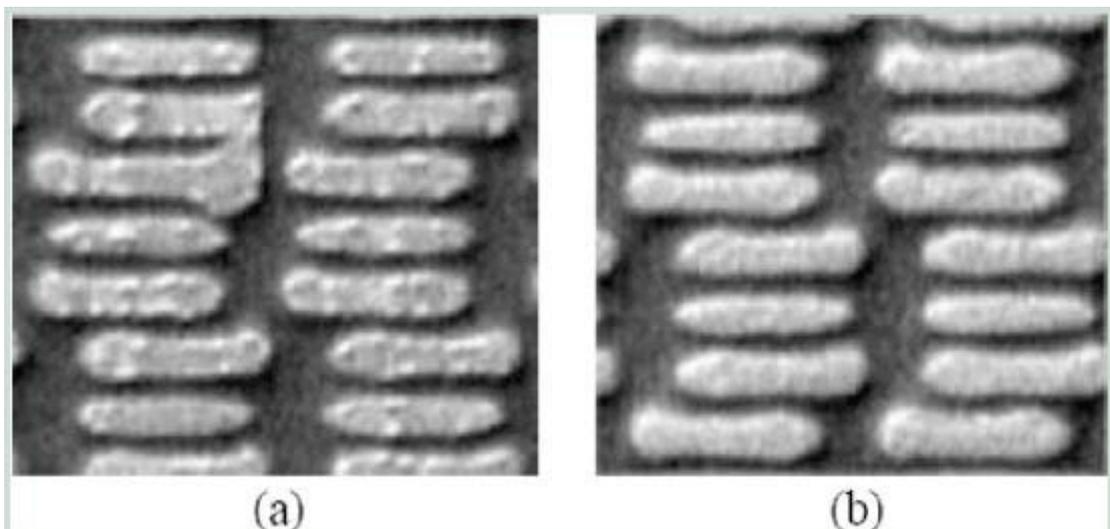


图2. 用非优化配方进行CMP后清洗后见到树突形成(a), 用CoppeReady<sup>®</sup> CP98 7天后就无树突(b)

除了引入不同的金属作为阻挡层或籽晶增强层外，暴露在 CMP 后清洗配方中时，用作介质层的多孔低 k 薄膜也易受 k 值变化的影响。若这种变化是由介质薄膜化学性质的改变引起，那么，就

认为工艺是不稳定的，需要改变清洗液配方。如表 1 所示，CoppeReady? CP98 证明适用于多孔低 k 薄膜。

Cu 互连工艺中与疏

<u>PDEMS 2.2</u>	<u>K</u>	<u>RI</u>
Before treating with CP98	2.32	1.35
After optimized treatment w/CP98	2.32	1.35

表1. PDEMS2.2CMP后清洗对K值的影响

水性超低 k 介质薄膜集成有关的另一问题是，CMP 后清洗工艺以后出现水迹。为了在清洗及干燥后消除晶圆表面的水迹，优化配方无疑是达到该目标的重要一步。但是，这也要求开发优化工艺。优化工艺包括采用基于 Marangoni 原理的 IPA 蒸汽干燥器。

由于几乎所有的阻挡层 CMP 研磨液都包含某种类型的薄膜形成 Cu 腐蚀抑制剂。有必要配方一种清洗溶液，它能在清洗机清洗工艺后从 Cu 表面清除所有的有机薄膜。最常用的 Cu 腐蚀抑制剂之一是苯并三唑，它在 Cu 上形成 Cu(I)-BTA 单分子层。采用适当的清洗配方，此单分子层应被除去，见图 3 给出的 CoppeReady? CP98 清洗性能的 TOF-SIMS 结果。

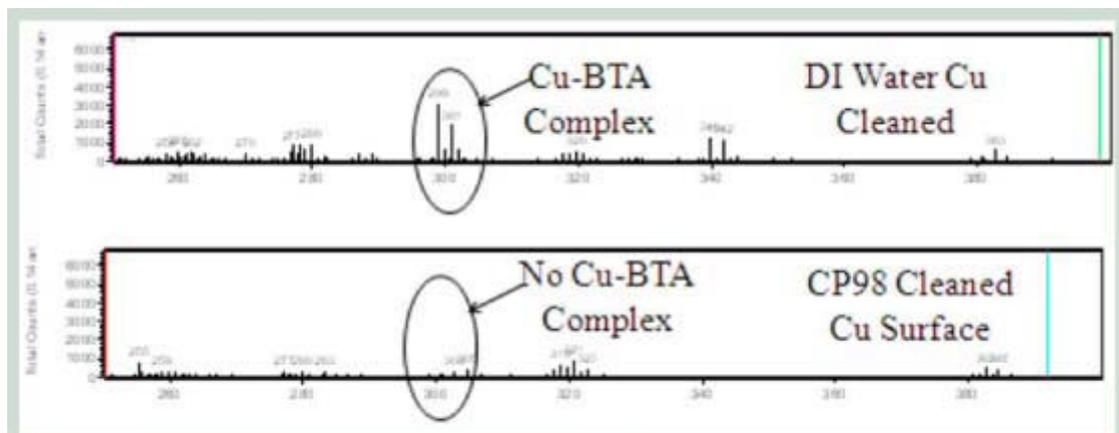


图3. 比较CP98 Cu表面清洗效能的TOF-SIMS结果



## AI 工艺的 CMP 后清洗新方法

除了 Cu CMP 工艺外，特别配方的 CMP 后清洗也正用于 AI-CMP 工艺以及氮化硅/多晶硅 CMP 工艺。对于高 K 金属栅 (HKMG) 应用，AI CMP 工艺现已标准化，因为 Intel 在 45nm 节点执行同一工艺。在整个晶圆上 AI CMP 控制的金属栅高度均匀性和缺陷率，对替代金属栅结构产品的 HKMG 器件和良率性能的影响极其重大。由于金属栅高度仅几百埃，AI CMP 的尺寸容差比常规 CMP 工艺更具挑战性（严格 10 倍以上）。

HKMG 结构的产品良率对缺陷率（包括落下微粒、微划伤和腐蚀缺陷类型）特别敏感。所有这些缺陷类型都会受 CMP 后清洗的影响，因此需要优化清洗工艺和化学配方。对于 AI CMP 后清洗，除了清除微粒外，防止腐蚀是一个巨大挑战。依据集成方案，可以用纯 AI 或 AI-Cu 合金薄膜。若用合金薄膜，微结构中存在电耦合的固有失配，这就是点腐蚀的根源（图 4a）。对于纯 AI 薄膜，虽然传统的点缺陷不可能，但 AI 与下面其它薄膜界面处的电腐蚀是完全可能的，如下面图 4b 所示。

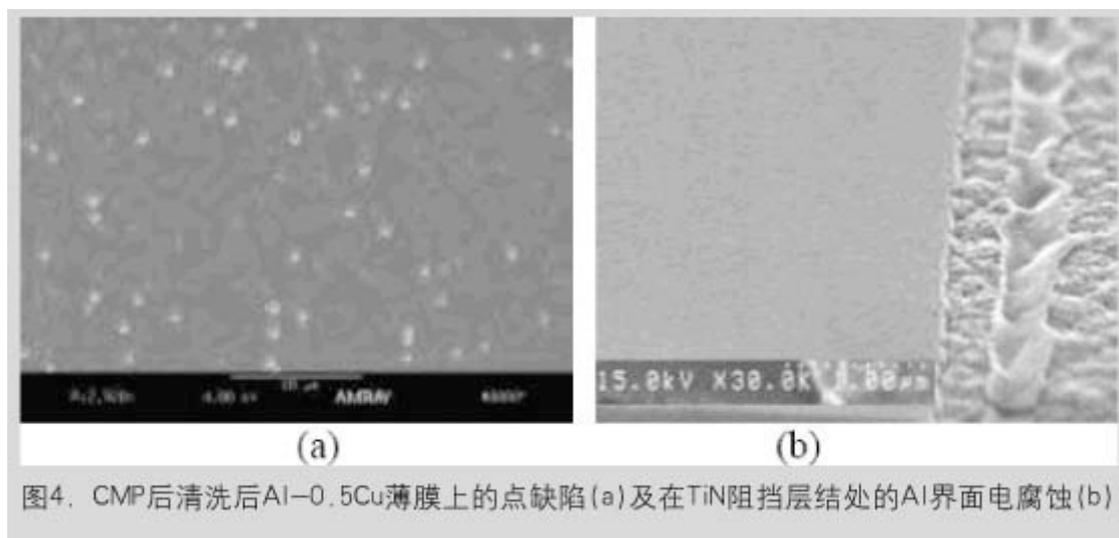


图4. CMP后清洗后AI-0.5Cu薄膜上的点缺陷(a)及在TiN阻挡层结处的AI界面电腐蚀(b)

如上所述，不管是在 AI 和 TiN 界面处的真实界面电腐蚀，或是由于 Cu 周围 AI 的溶解在 AI-0.5Cu 阵列微结构内的点缺陷（它是 AI 和 Cu 电耦合的表述），用 CMP 后清洗配方溶液时都必须防止电腐蚀。图 5 是在 TiN 界面处无任何电腐蚀的 AI 线，图 6 是 CMP 后清洗后的无点缺陷表面。

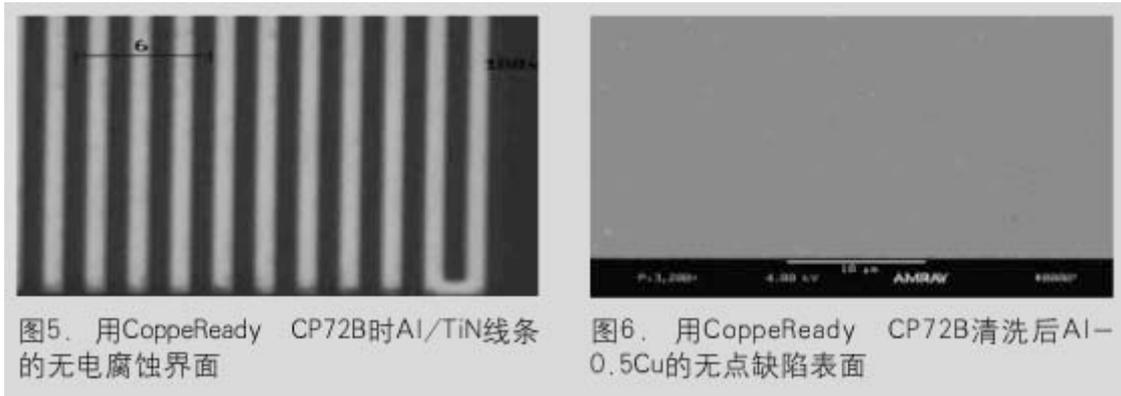


图5. 用CoppeReady CP72B时Al/TiN线条的无电腐蚀界面

图6. 用CoppeReady CP72B清洗后Al-0.5Cu的无点缺陷表面

图7 是用竞争对手的清洗配方的高缺陷计数（左）和用 CoppeReady®CP72B 的较低缺陷计数的 Al 光晶圆 SP2 缺陷图（感谢 Applied Materials Inc., Santa Clara, CA, USA 提供图像）。

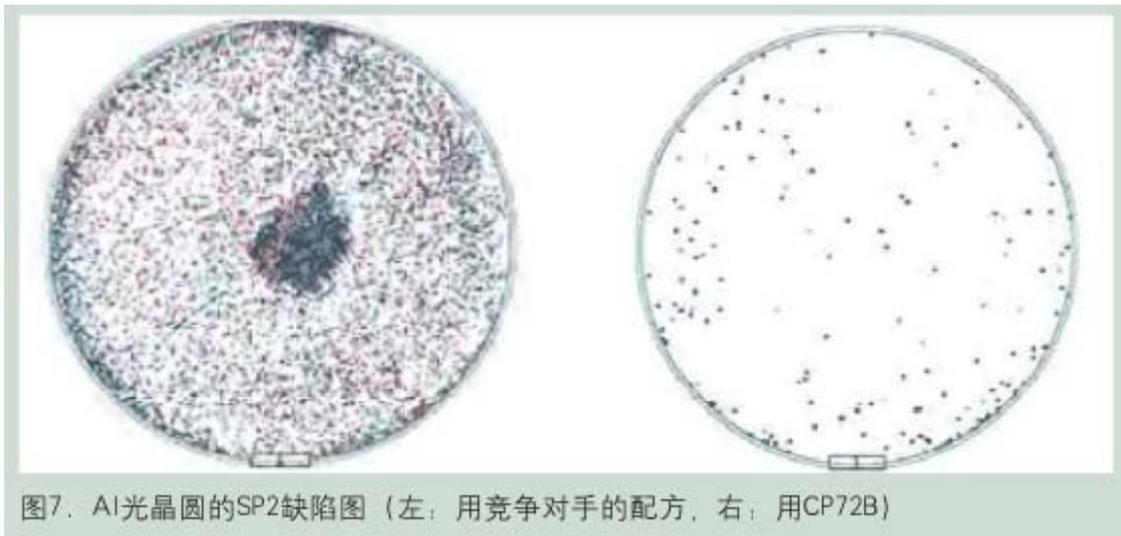


图7. Al光晶圆的SP2缺陷图（左：用竞争对手的配方，右：用CP72B）

### GST 工艺用的 CMP 后清洗新方法

除了上述各类 CMP 后清洗需求外，另一新兴领域是 CMP 后清洗 GST 薄膜 ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  或 GST)。GST 是应用于相变存储器 (PCM) 非常有前途的材料，这是因为它能多位操作、有可量测性和极快的开关速度。对于 GST CMP 工艺的第一个挑战是缺陷率控制。如表 2 所示，GST 合金比 Cu 金属软得多，且更脆。



	GST	Cu
Young's Modulus, GPa	120	130
Sheer Modulus, GPa	46	48
Hardness, GPa (10nm in thickness)	2.7	6.5

表2. GST合金与Cu薄膜的物理性质

结果，要想平坦化 GST 而又不划伤表面或不引起局部区域薄膜分层就更加困难。GST 合金是 IV-V-VI 三元化合物，Ge、Sb 和 Te 的 Pauling scale 负电性值分别为 2.01、2.05 和 2.1。因此，它们在像 CMP 后清洗溶液这样的电化学活性溶液中有不一样的化学反应，若清洗配方没有对合金稳定性优化，一个合金元素与另一个比较有可能显示腐蚀/过滤出去的情况。与 GST CMP 工艺的 CMP 研磨液配方优化的同时，也要求优化 CMP 后清洗配方以防止 GST 薄膜的去合金化，以及 P CM 应用必须的 GST 薄膜材料性质。图 8 显示 GST 晶圆在 CMP 后清洗以后发现的典型缺陷。

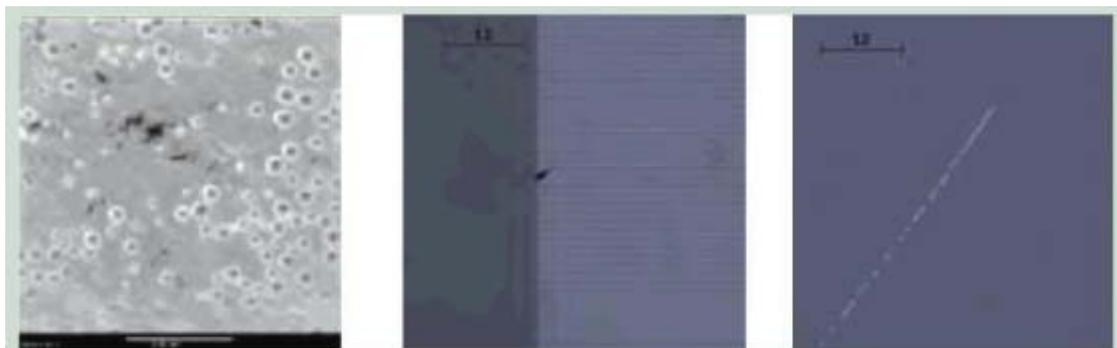


图8. CMP后清洗以后GST上发现的各种缺陷

## 总结

CMP 已是一种能用于晶圆平坦化的成熟技术，其应用范围正持续地扩展到各种不同的新型薄膜。这就有必要为特定的 CMP 后清洗溶液配方，以在不同薄膜上达到最少缺陷，且不损伤堆叠中暴露的薄膜。学术界与工业界的研究人员正不断取得重大进展，解决各种技术挑战。本文给出的一些例子说明了由 Air Products 公司取得的成就，以对付与新互连集成有关的 CMP 后清洗应用面临的一些技术挑战。