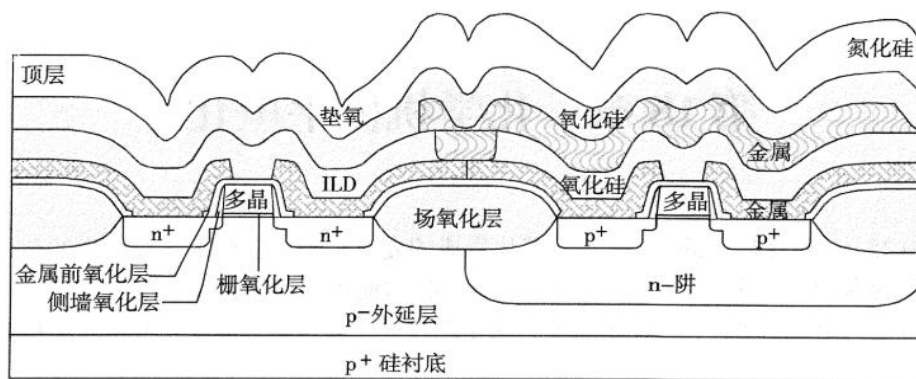

化学机械平坦化

引言

20世纪80年代后期，IBM开发了**化学机械平坦化(chemical mechanical planarization, CMP)**的全局平坦化方法。没有CMP，进行甚大规模集成电路(ULSI)芯片生产就不可能。硅片制造设计薄膜的淀积和生长工艺，以及之后形成器件和内部互连结构所需的多次图形制作。**先进的IC需要至少6层或更多的金属布线层，每层之间由层间介质 (ILD) 隔开。建立器件结构和多层内连线会很自然地在层之间形成台阶。表面起伏描述了这种生产过程中出现不平整的硅片表面。层数增加时，硅片的表面起伏将更加显著，一个可接受的台阶覆盖和间隙填充对于芯片的成品率和长期可靠性是至关重要的。**



20世纪70年代的单层金属IC

表1.硅片平坦化术语

平坦化类型	描述
平滑	台阶角度圆滑和侧壁倾斜, 但高度没有显著减小
部分平坦化	平滑且台阶高度局部减小
局部平坦化	完全填充较小缝隙(1~10 μm) 或一个芯片内的局部区域。硅片上相对于平整区域的总的台阶高度没有显著减小
全局平坦化	局部平坦化并且整个硅片表面总的台阶高度显著减小, 又称为均匀性

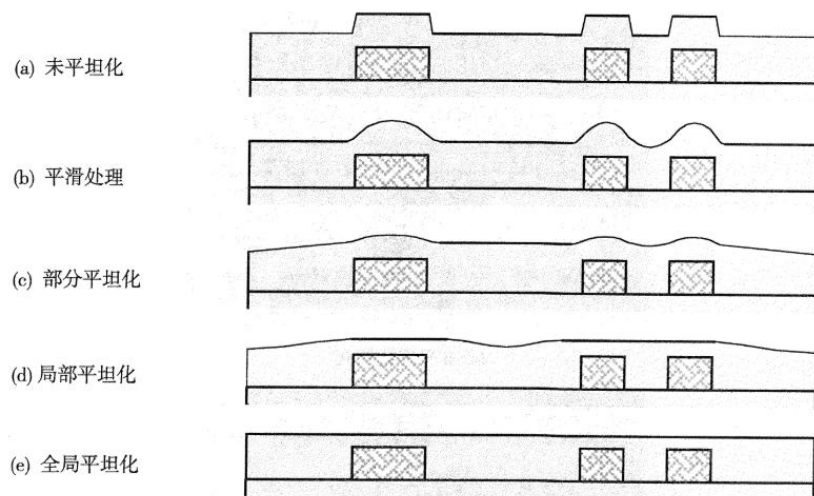


图1.平坦化的定性说明

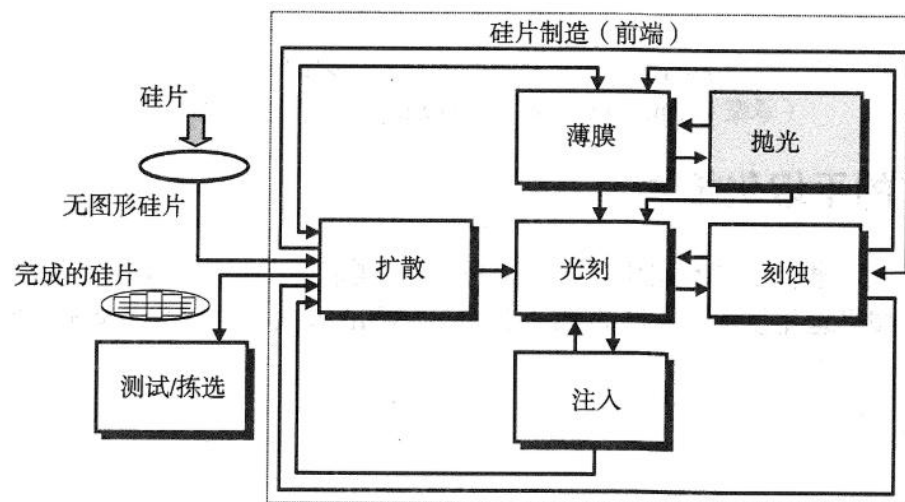


图2.包含CMP的硅片制造工艺流程

传统的平坦化技术

传统的平坦化方法有

- 反刻
- 玻璃回流
- 旋涂膜层

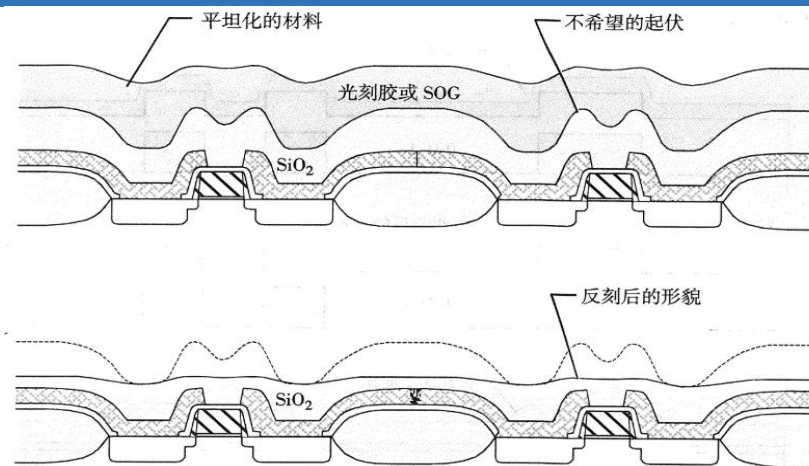


图1.反刻平坦化

反刻:

由表面图形形成的表面起伏可以用**一层厚的介质或其他材料作为平坦化的牺牲层**（如光刻胶或SOG）来进行平坦化，这一层牺牲材料**填充空洞和表面的低处**。然后用**干法刻蚀技术刻蚀这一层牺牲层**，通过用比低处图形快的刻蚀速率刻蚀掉高处的图形来使**表面平坦化**。这一工艺被称为反刻平坦化。刻蚀过程一直进行，直到被刻蚀的介质层达到一个最后的厚度，同时平坦化材料仍然填充着表面的低处。有不同的反刻工艺，着取决于图形、金属层次等。把表面相近的台阶变得平滑是一种**局部平坦化**。**反刻不能实现全局的平坦化**。

玻璃回流

玻璃回流：

硼磷硅玻璃（BPSG）和其他掺杂氧化硅早已被用作层间介质，是采用常压化学气相淀积法淀积的。玻璃回流是升高温度的情况下给掺杂氧化硅加热，使它发生流动。BPSG在图形覆盖处的回流能获得**部分平坦化**，但**不足以满足深亚微米IC中的多层金属布线技术的要求**。

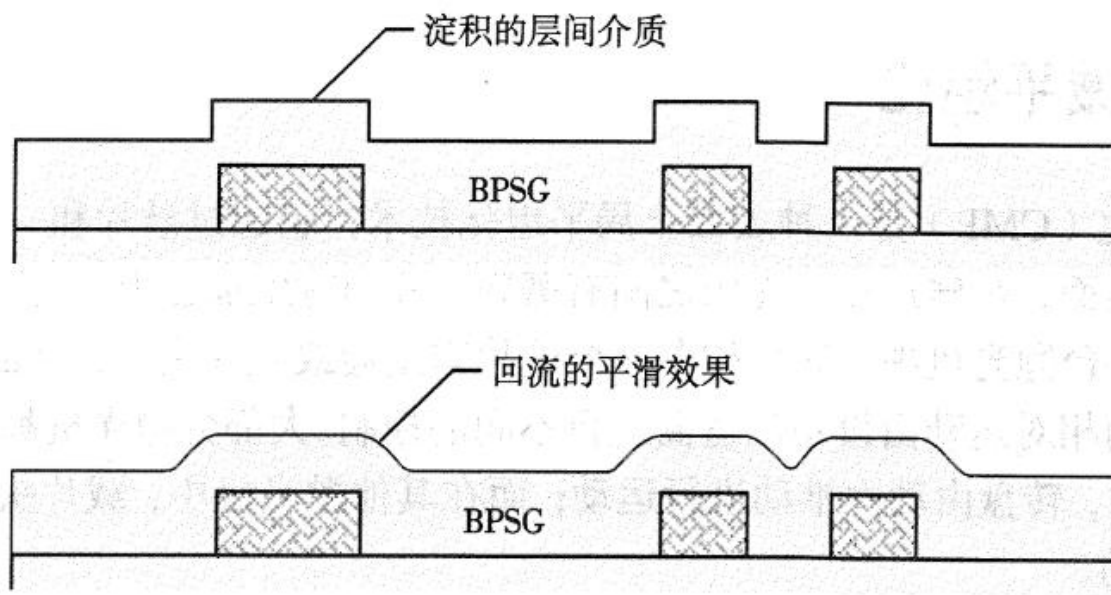


图1.BPSG回流平坦化

旋涂膜层

旋涂膜层是在硅片表面上旋涂不同液体材料以获得平坦化的一种技术，主要用作层间介质。这项技术在 $0.35\mu\text{m}$ 及以上器件的制造中常普遍应用于平坦化和填充缝隙。旋涂利用离心力来填充图形低处，获得表面形貌的平滑效果。这种旋涂法的平坦化能力与许多因素有关，如溶液的化学组分、分子重量以及粘滞度（流动倾向）。旋涂后的烘烤蒸发掉溶剂，留下氧化硅填充低处的间隙。

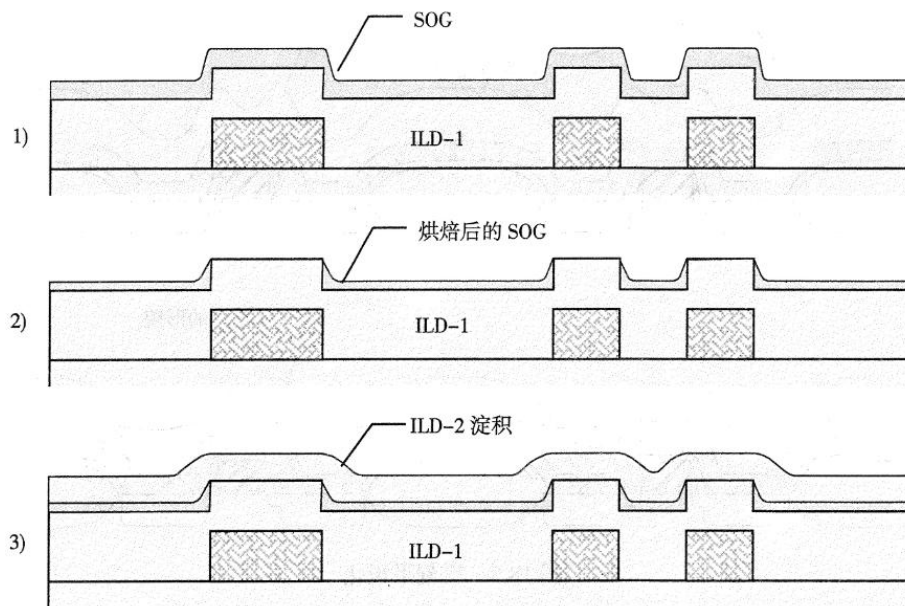


图1淀积了ILD-2氧化层的旋涂膜层

化学机械化平坦

化学机械平坦化(CMP)是一种**表面全局平坦化技术**，它通过硅片和一个抛光头之间的相对运动来平坦化硅片表面，在硅片和抛光头之间有磨料，并同时施加压力（图1）。CMP设备也常称为抛光机。

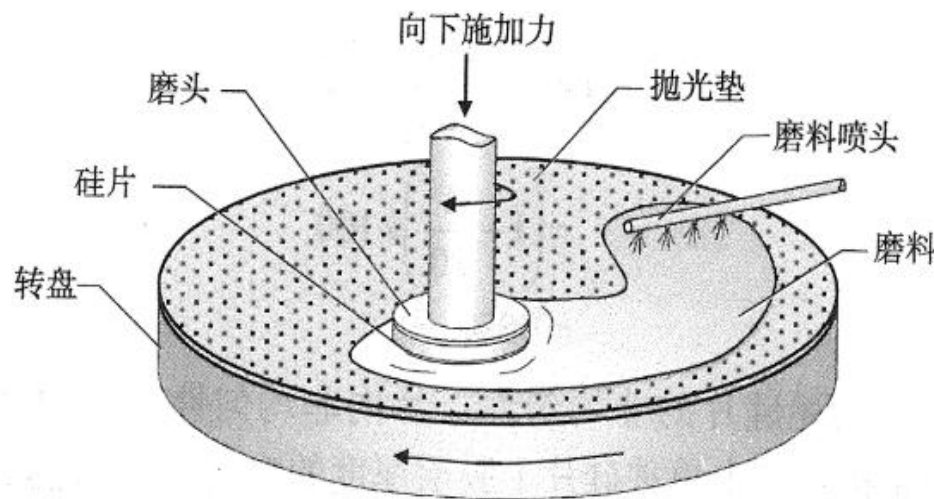


图1.化学机械平坦化原理图

CMP通过比去除低处图形快的速度去除高处图形来获得均匀的硅片表面。它能**精确并均匀的把硅片抛光为需要的厚度和平坦度**，已成为一种最广泛采用的技术。CMP的独特方面之一是它能**用适当设计的磨料和抛光垫来抛光多层金属化互连结构中的介质和金属层**。

CMP的平整度

CMP在制造中用来减小硅片厚度的变化和表面形貌的影响。**硅片的平整度和均匀性的概念在描述CMP的作用方面很重要。**平整度描述从微米到毫米范围内硅片表面的起伏变化。均匀性是在毫米到厘米尺度下测量的，反映整个硅片上膜层厚度的变化。因此一个硅片可以是平整的，但不是均匀的，反之亦然。**平整度(DP)指的是，相对于CMP之前的某处台阶高度，在做完CMP之后，这个特殊台阶位置处硅片表面的平整程度。**因此，DP与某一特殊图形有关，可通过下式计算：

$$DP(\%) = \left(1 - \frac{SH_{post}}{SH_{pre}} \right) \times 100$$

有两种表达方法可以描述硅片的非均匀性：片内非均匀性 (WIWNU) 和片间非均匀性 (WTWNU)。WIWNU用来衡量一个单独硅片上膜层厚度的变化量，通过测量硅片上的多个点而获得。WTWNU描述多个硅片之间膜层厚度的变化。这两个术语常用来描述全局平整性。

CMP技术的优缺点

表1.CMP技术的优点

优点	说明
1. 平坦化	能获得全局平坦化
2. 平坦化不同的材料	各种各样的硅片表面能被平坦化
3. 平坦化多层材料表面	在同一次抛光过程中对平坦化多层材料有用
4. 减小严重的表面起伏	能减小表面起伏使得在制造中采用更严格的设计规则并采用更多的互连层
5. 制作金属图形的另一种方法	提供制作金属图形的一种方法（如大马士革工艺），使得不需要对难以刻蚀的金属和合金等离子体刻蚀
6. 改善金属台阶覆盖	由于减小了表面起伏，从而能改善金属台阶覆盖
7. 增加 IC 可靠性	能提高亚 0.5 μm 器件和电路的可靠性、速度和成品率（降低缺陷密度）
8. 减少缺陷	CMP 是一种减薄表层材料的工艺并能去除表面缺陷
9. 不使用危险气体	不使用在干法刻蚀工艺中常用的危险气体

表1.CMP技术的缺点

缺点	说明
1. 新技术	CMP技术是一种用于硅片平坦化的新技术,对工艺变量控制相对较差,并且工艺窗口窄
2. 引入新的缺陷	CMP技术引入的新的缺陷将影响芯片成品率,这些缺陷对亚0.25 μm 特征图形更关键
3. 必须发展别的配套工艺技术	CMP技术需要开发额外的技术来进行工艺控制和测量。例如,CMP技术的终点检测难于控制一个想要的厚度
4. 昂贵的设备费用	采用CMP技术是昂贵的,因为设备和消耗品昂贵。用CMP技术来处理材料要求高的维护费用,并需要经常更换化学品和零部件

CMP的机理

CMP机理：

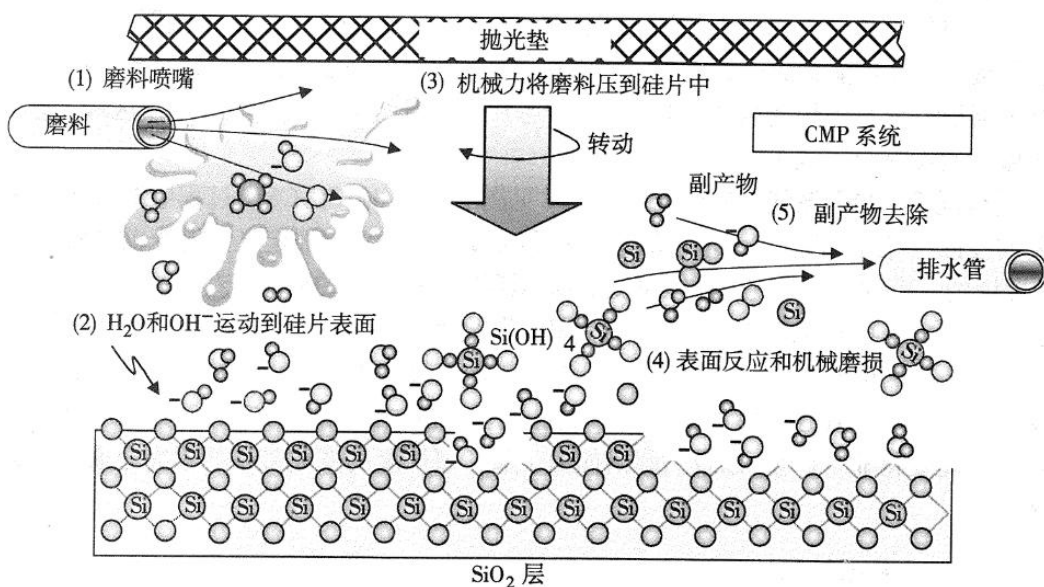
(1)表面材料与磨料发生化学反应生成一层相对容易去除的表面层

(2)这一反应生成的硅片表面层通过磨料中，研磨剂、研磨压力、抛光垫的相对运动被机械地磨去。

用来平坦化硅片的CMP的微观作用是化学和机械作用的结合。

•**氧化硅抛光：**氧化硅抛光是半导体硅片制造中最先和最广泛使用的
CMP平坦化工艺。氧化硅抛光速率用下式(Preston方程)表示

$$R = kPv$$



其中R=抛光速率，P=所加的压力，v=硅片和抛光垫的相对速度，k=与设备和工艺有关的常数，包括氧化硅的硬度、抛光液和抛光垫等

图1.CMP氧化硅的机理

- **金属抛光：**磨料与金属表面接触。金属表面的氧化物被磨料中的颗粒机械地磨掉，一旦这层氧化物去掉，磨料中的化学成分就氧化新露出的金属表面，然后又被机械地磨掉，这一过程重复进行。

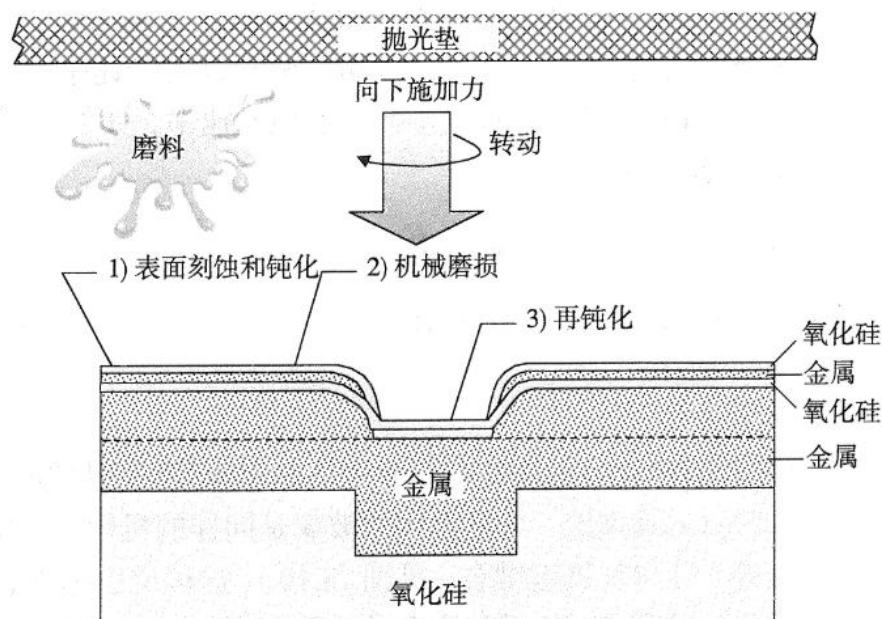


图1.金属CMP的机理

- **图形密度效应**：能用CMP技术获得的**平整度主要受这种平坦化技术对图形敏感的特性影响**。图形间距窄的区域，即高图形密度区域，通常比宽图形间距区域的抛光速度快。小而孤立凸出的图形在平坦化过程中承受着较大的压力，抛光速度快。

在一些情况下，当金属线紧密地挤在一起时，在CMP中对金属结构可能产生不必要的侵蚀。**侵蚀是指在图形区域氧化物和金属被减薄，它被定义为抛光前后氧化层厚度的差**。产生侵蚀的一个原因是当抛光一层覆盖的金属层时，对下面的 SiO_2 产生轻微的过抛光。

另一个不希望的CMP效果是凹陷，凹陷是指图形中央位置材料厚度的减小。它被定义为金属线条中心（凹陷处的最低点）和 SiO_2 层最高点的高度差。凹陷的多少与被抛光的线条宽度有关，线条越宽，凹陷就可能越多。抛光垫的硬度也对凹陷有影响。

CMP磨料

磨料和抛光垫在CMP工艺中不断被使用和更换，被称为消耗品，对CMP很关键，必须仔细控制

- 磨料

磨料是精细研磨颗粒和化学品的混合物，在CMP中用来磨掉硅片表面的特殊材料。它是CMP重要的消耗品，因为它包含平坦化所需的化学成分和抛光颗粒。磨料有时通过转盘上的磨料喷嘴喷出。磨料的精确混合和批次之间的一致对获得硅片与硅片、批与批以及天天必需的可重复性是非常关键的。在抛光过程中，磨料均匀地分布在硅片表面也非常重要。磨料的质量是避免在抛光过程中产生表面擦痕的一个因素。

- 氧化物磨料：用于氧化物介质的一种通用磨料是含超精细硅胶颗粒的碱性氢氧化钾或氢氧化铵溶液。氢氧化钾类磨料由于它稳定的胶粒悬浮特性，是氧化物CMP中用的最广的一种磨料。

- **金属钨磨料：**钨金属CMP的磨料是以精细氧化铝粉末或硅胶作为研磨颗粒的，硅胶粉末比氧化铝要软，对表面不太可能产生擦伤，因为被普遍采用。在抛光过程中， H_2O_2 分解成 H_2O 和溶于水的 O_2 ， O_2 与钨反应生成氧化钨。氧化钨比钨软，因而氧化钨被抛光移除了。
- **金属铜磨料：**至于良好的铜金属磨料，目前业界尚无共识。一种磨料是采用 NH_4OH 与铜反应生成氧化铜，然后再用研磨颗粒去除氧化铜。
- **特殊应用磨料：**适合特殊硅片表面材料的不同磨料有时在同一台CMP设备上使用。

CMP抛光垫

抛光垫粘附在转盘的上表面，是在CMP中决定抛光速率和平坦化能力的一个重要部件。为了能控制磨料，抛光垫通常由聚亚胺脂做成，因为聚亚胺脂有像海绵一样的机械特性和多孔吸水特性。抛光垫中的小孔能帮助传输磨料和提高抛光均匀性。

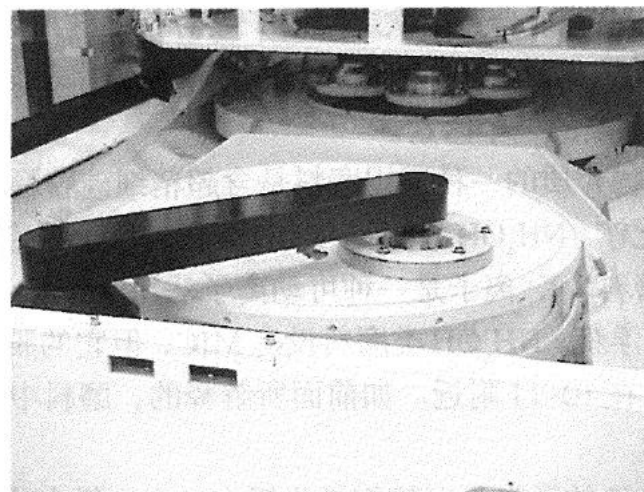
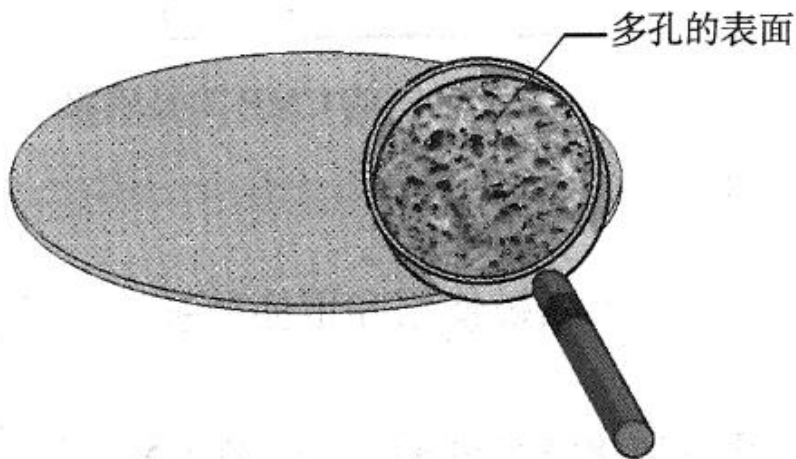


图1.CMP抛光垫

■ 抛光速率和均匀性：

抛光速率是在平坦化过程中材料被去除的速度，单位通常为nm/min或μm/min。

硬的抛光垫一般能通过把致密图形处的侵蚀减到最小，均匀地在抛光硅片表面来提高硅片的局部平整性。它跨过硅片表面的低处，而把高处的材料磨掉，使得硅片表面在特殊的地方非常平整。然而硬的抛光垫一般有较大的片内非均匀性（WTWNU）。软的抛光垫能减少表面的擦痕。

较大的压力（向下力）和旋转速度将提高抛光速率，但可能以牺牲均匀性为代价。在采用硬的抛光垫的时候，较大的压力也带来更严重的表面损伤和沾污。小的压力可能改善平整性，但片与片之间的非均匀性（WTWNU）会增大。

在抛光过程中磨料的运动影响抛光速率。在做旋转运动的设备中，磨料主要通过旋转力沿着抛光垫的表面做运动，硅片的边沿可能比中间有更多的磨料，使边沿抛光速率比中间快。

选择比：在CMP中不同材料的抛光速率是影响硅片平整性和均匀性的一个重要因素。选择比定义

$$\text{选择比} = \frac{\text{材料1的抛光速率}}{\text{材料2的抛光速率}}$$

抛光时间和膜层厚度：抛光一层膜所需要的时间直接与要磨掉的材料数量有关

■ 抛光速率和均匀性:

抛光速率是在平坦化过程中材料被去除的速度，单位通常为nm/min或 $\mu\text{m}/\text{min}$

硬的抛光垫一般能通过把致密图形处的侵蚀减到最小，均匀地在抛光硅片表面来提高硅片的局部平整性。它跨过硅片表面的低处，而把高处的材料磨掉，使得硅片表面在特殊的地方非常平整。然而硬的抛光垫一般有较大的片内非均匀性。软的抛光垫能减少表面的擦痕。

较大的压力（向下力）和旋转速度将提高抛光速率，但可能以牺牲均匀性为代价。在采用硬的抛光垫的时候，较大的压力也带来更严重的表面损伤和沾污。小的压力可能改善平整性，但片与片之间的非均匀性会增大。

在抛光过程中磨料的运动影响抛光速率。在做旋转运动的设备中，磨料主要通过旋转力沿着抛光垫的表面做运动，硅片的边沿可能比中间有更多的磨料，使边沿抛光速率比中间快。

■ CMP变量:

控制CMP工艺室困难的，因为影响平整性和均匀性的许多不同参数之间的相互影响和相互作用。对不同的应用场合，需要对CMP进行优化。

表1.CMP参数

参数	硅片上的平坦化结果
抛光时间	● 磨掉材料的数量 ● 平整性
磨头压力（向下压力）	● 抛光速率 ● 平坦化和非均匀性
转盘速度	● 抛光速率 ● 非均匀性
磨头速度	● 非均匀性
磨料化学成分	● 材料选择比 ● 抛光速率
磨料流速	● 影响抛光垫上的磨料数量和设备的润滑性能
抛光垫修整	● 抛光速率 ● 非均匀性 ● CMP 工艺的稳定性
硅片 / 磨料温度	● 抛光速率
硅片背压	● 中央变慢 / 非均匀性 ● 碎片

CMP设备

CMP设备是采用把一个抛光垫粘在转盘的表面来进行平坦化的（图1）。在抛光的时候，一个磨头装有一个硅片。大多数的生产性抛光机都有多个转盘和抛光垫，以适应抛光不同材料的需要。多个转盘在 multi-step 工艺中用不同的磨料同时工作。抛光的最后一步常常是一步磨掉几百埃材料的缓冲抛光。

由于金属层材料数目的增加和光刻焦深灵敏度的提高，CMP设备的平坦化能力很关键。**CMO设备的重要一点是当磨掉了合适的材料时它的检测能力，也就是终点检测。**

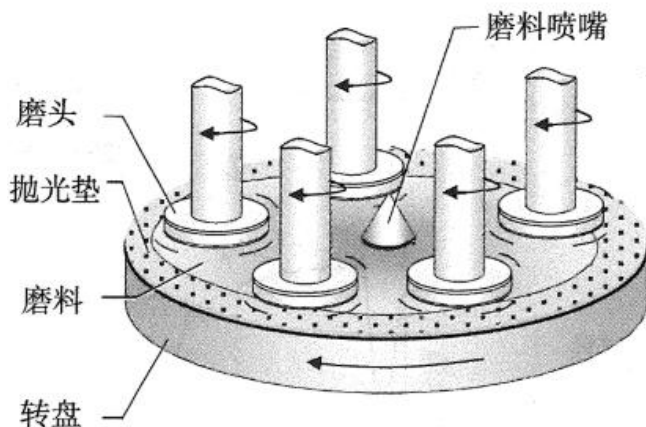


图1.带多个磨头的CMP设备

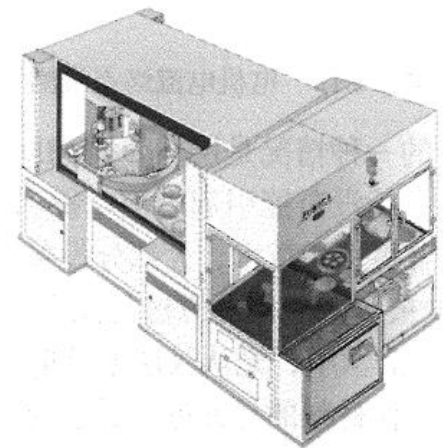
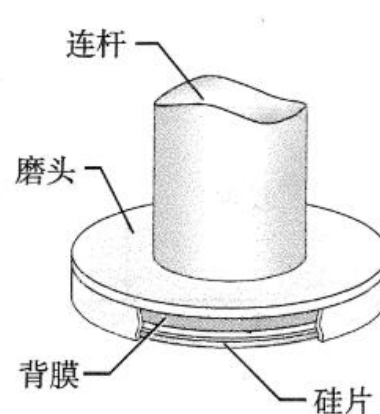


图2. CMP设备

终点检测：

终点检测是指CMP设备中检测到平坦化工艺把材料磨到一个正确厚度的能力。有些CMP应用的终点检测简单，如抛光钨覆盖层时由于高的选择比，抛光会在下面的介质氧化层上停下来。但对其他的应用带来挑战，CMP工艺变量之多也为精确估计抛光时间带来了困难。

电机电流终点检测：

电机电流终点检测技术是检测磨头电机或转盘电机中的电流。磨头是以不变的速度旋转运动的，以补偿电机负载的变化。电机驱动电流也是变化的，因此电机电流对硅片表面上的摩擦或粗糙程度的变化是敏感的。当抛光机磨完一种材料，露出另一种具有不同抛光和摩擦特性的材料后，摩擦就会发生变化。

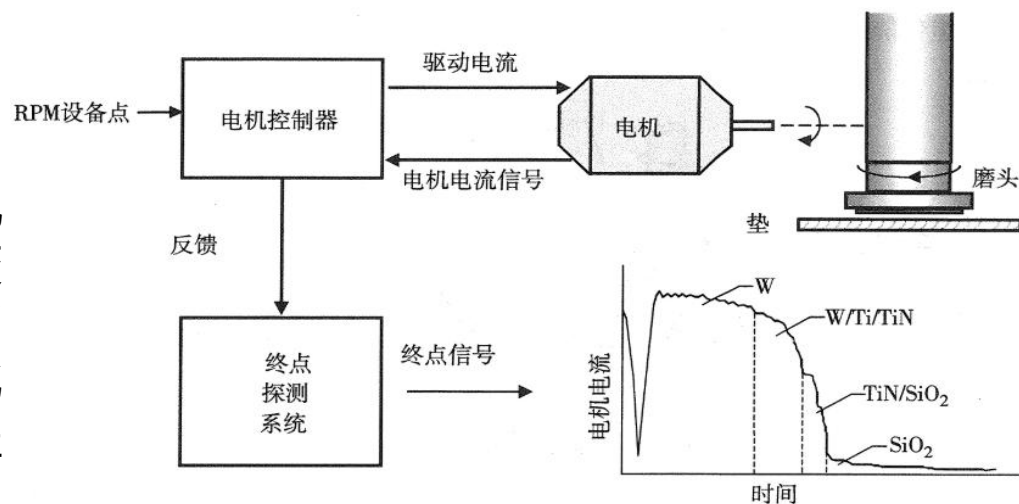


图1.电机电流终点检测

光学终点检测：在CMP设备中被广泛采用的是光学干涉终点检测。这项技术是基于光的反射系数的。光从膜层上反射的不同角度与膜层材料和厚度有关。当膜层从一种材料的界面变化到另一种材料的界面处时，光学终点检测测量到从抛光膜层反射过来的紫外光或可见光之间的干涉。通过连续地测量抛光中膜层厚度的变化，这项技术能测定抛光速率（图1）。

磨头（抛光头）：磨头使硅片保持在转盘表面抛光垫的上方。磨头向下的力和相对于转盘的旋转运动能影响均匀性。一些磨头在硅片和磨头之间装有多层结构的衬膜，用来适应硅片的背面，补偿硅片背面和颗粒带来的不平整性。衬膜像海绵，有抽真空的小孔。磨头的设计影响硅片边沿不均匀的数量。

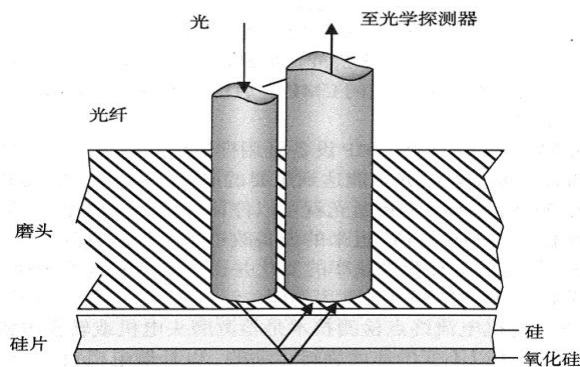


图1.终点检测的光学干涉

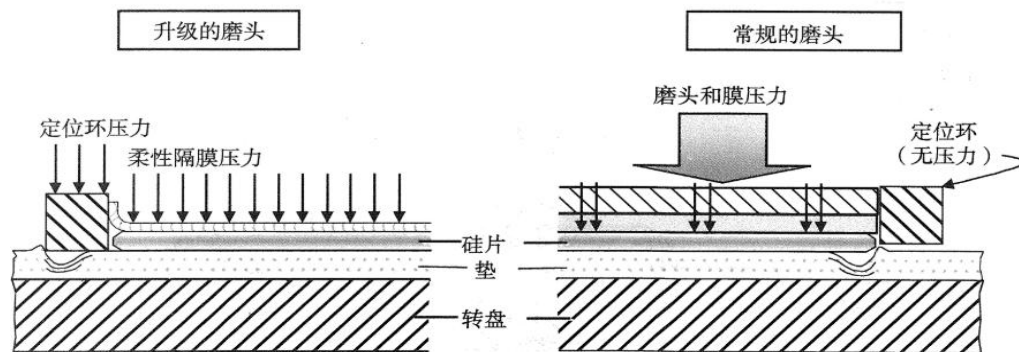


图2.CMP磨头设计和硅片边沿的非均匀性

CMP清洗

CMP清洗的重点是去除抛光工艺中带来的所有沾污物。步骤包括氧化硅CMP后清洗、STI（浅沟槽隔离）CMP后清洗、多晶硅CMP后清洗、钨CMP后清洗和铜CMP后清洗。

- **CMP后清洗：** CMP后清洗从最初的用去离子水进行兆声波清洗，发展到用双面洗擦毛刷（DSS）和去离子水对硅片进行物理洗擦。**CMP后清洗通常使用带有稀释的氢氧化铵毛刷**，这些氢氧化铵会流过毛刷中心，对毛刷进行清洗（图2）。这些液体向外流过毛刷杆，从而不断带走颗粒

	具有兆声的湿法清洗机	双面刷洗机 DSS+DI水	DSS + NH ₄ OH	DSS + NH ₄ OH和 HF	DSS +添加的 化学物质
氧化硅CMP	✓	✓	✓	✓	
钨CMP			✓	✓	
铜CMP					✓

图1.CMP后清洗的发展

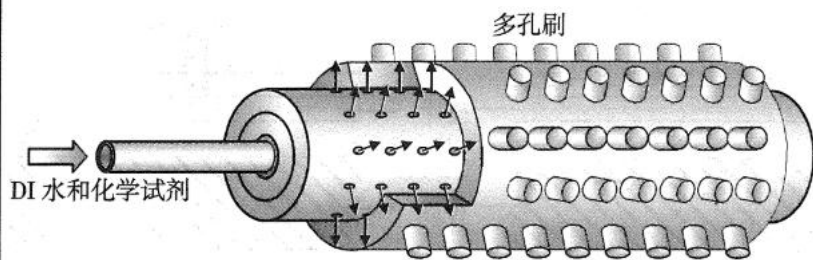


图2.CMP后清洗中通过毛刷的化学药品传输

- **CMP后清洗：**一些情况在CMP后清洗溶液中会加入过氧化氢，用来控制pH值，从而控制Zeta势，以至于这些颗粒和硅片表面是静电排斥的。
- 除此外还有不同的CMP后清洗工艺。在稀氢氟酸中的短时间清洗常用来腐蚀掉几个埃的表面材料，从而去掉金属颗粒沾污物，对清洗氧化硅表面尤其有效。
- **铜CMP后清洗：**氢氧化铵清洗液对铜的清洗不适用，因为它对铜引起非均匀性的腐蚀，导致表面局部变得粗糙。由此可得，对铜的清洗需要新的化学试剂，这种试剂不仅能控制产生排斥颗粒的静电力，同时也能防止铜的腐蚀。这种溶液正在研究中。
- **干进/干出：**CMP设备的最新发展趋势是把CMP工艺和清洗工艺集成在一起，通常称为干进/干出工艺。这一方法通过缩短抛光和清洗所需时间而提高效率。硅的平坦化、清洗、干燥、测量以及装到片架里，都在单一的设备中完成。

CMP应用

CMP技术已成为亚0.25 μ m ULSI技术中用于多层金属化的主要平坦化技术。CMP的应用涉及许多材料。对一些主要的应用做一个简单的论述。

- **STI氧化硅抛光**
- **LI氧化硅抛光**
- **LI钨抛光**
- **ILD氧化硅抛光**
- **钨塞抛光**
- **双大马士革铜抛光**

CMP质量测量

CMP带来的一个显著的质量问题是表面微擦痕。小而难以发现的微擦痕导致淀积的金属中存在隐藏区，可能引起同一层金属之间的短路（图1）。主要磨料中不受欢迎的颗粒沾污引起微擦痕。

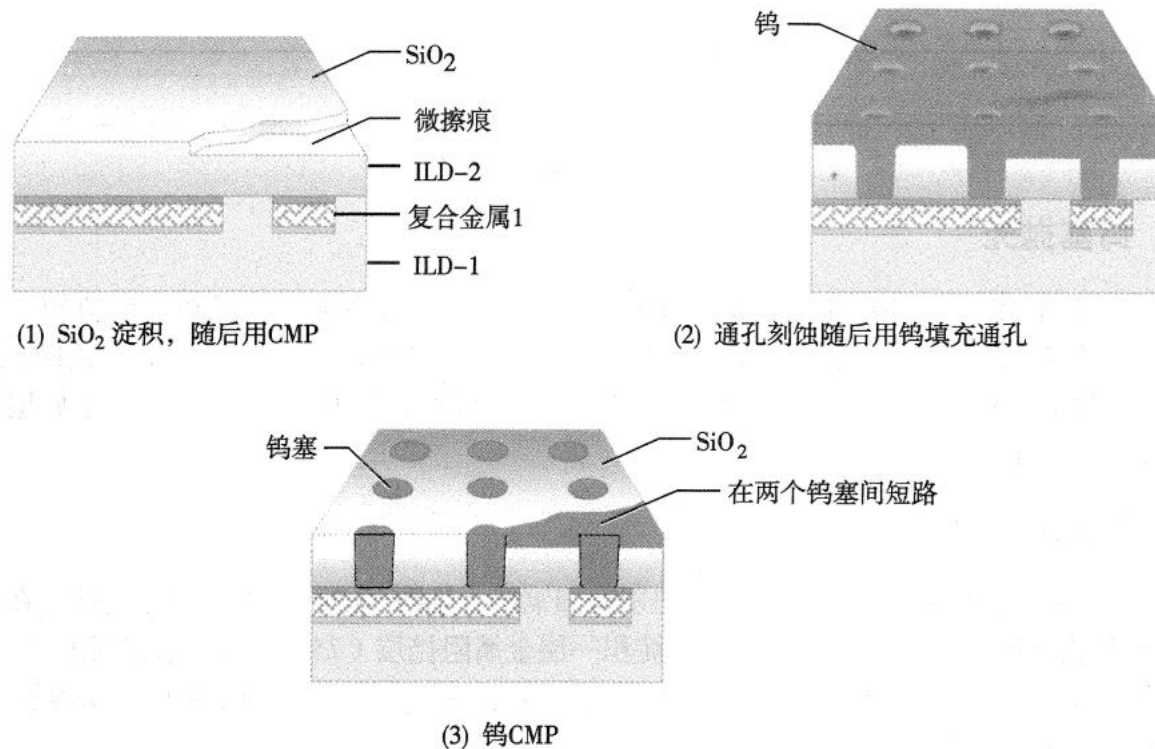


图1.CMP中的微擦痕

CMP质量测量

表1.CMP关键质量测量

质量参数	缺陷类型	备注
1. 硅片表面上的擦痕或沟	A. 金属内短路（金属层与金属层之间）	微擦痕非常难以用观察的方法检测到。产生的可能原因有： <ul style="list-style-type: none">● 磨料中颗粒尺寸分布控制不好● 储存时间太长或使用不当导致磨料颗粒沉积而生成较大的颗粒● 磨料中的微粒污染● 工艺未优化或没有进行减少微擦痕的二次缓冲抛光
2. 凹陷	A. 高抛光速率材料处下陷	<ul style="list-style-type: none">● 凹陷通常发生在高抛光速率材料处（如STI氧化物）低抛光速率材料周围（如用做抛光停止层的氮化硅）● 更多的凹陷发生在高抛光速率材料的较大表面区域● 增加抛光垫的硬度可减少凹陷（抛光垫向凹处弯曲较小）● 作为一种临时办法，一些设计者用假图形支撑抛光垫来防止更大图形处产生凹陷（如压点）。这种方法只有在表面积允许的情况下使用● 对铜来说，硬的抛光垫和高度采用化学抛光的磨料（只用于高处）应该把凹陷减到最小**

CMP质量测量

表1.CMP关键质量测量（续）

质量参数	缺陷类型	备注
3. 侵蚀	A. 低抛光速率处下陷或抛去太多	<ul style="list-style-type: none">● 低抛光速率材料的侵蚀（如氮化硅）● 当金属图形密度增加（线条间距小）时最为明显，如钨互连中采用氮化硅阻挡层● 可导致通孔不能被完全刻通，从而不能与底层金属接触● 研究可调的抛光垫来进行局部压缩和最合适的磨料运动方式
4. 残留物	A. 沿图形边沿的细长条状残留物	<p>CMP是一种相对干净的工艺（与RIE反刻工艺相比）。合适的CMP工艺应该减少沿图形边缘的细长线条。细长线条能引起短路或降低芯片的可靠性。引起细长线条的可能原因有：</p> <ul style="list-style-type: none">● 不同的材料都有可能产生细长线条，如钨或多晶硅细长线条● 通过优化抛光垫、磨料的化学成分等来获得更加均匀的抛光，从而使产生的细长线条最少

CMP检查及故障排除

表1.CMP中的常见问题解决办法

问题	可能的原因	纠正措施
1. 磨料中颗粒太大	A. 磨料在传送设备内壁变干并掉入磨料混合物中 B. 在引入的磨料中研磨颗粒结块 C. 磨料供给设备没有充分搅拌磨料	● 采用磨料在使用点（POU）过滤的方法 ● 最优化磨料制造和传输 ● 用表面活性剂和稳定装置提高磨料的稳定性
2. 硅片表面的非均匀性抛光	A. 中间快（中间抛光比硅片上其他地方要快） B. 中间慢（中间抛光比硅片上其他地方要慢）	● 转盘上的抛光垫不平将导致中间快、中间慢或一些边缘问题。检查是否有过度的磨损 ● 磨头的压力（向下的压力）设置得不正确 ● 检查抛光垫修整臂是否调节到恰当位置，是否破旧（没有平滑面出现） ● 磨料流量不够或粘滞度不正确（流动的能力） ● 磨头上的垫膜破损，硅片不能保持成一个平面 ● 转盘转速设置得不对 ● 硅片的背压设置得不合适
3. CMP 铜后清洁硅片时的颗粒	A. 在硅片上发现过多的颗粒（对于 0.18 μm 的关键尺寸，要求大于 0.08 μm 的缺陷每个硅片上要小于 20 个* B. 在深图形中残留磨料结垢，如光刻对准标记和压点区 C. 残留的铜从介质区域或有图形硅片上的线条间移动	对 CMP 要主要关注的是硅片在清洗后表面的颗粒级数。可能的纠正措施是： ● 检查是否做了有图形硅片上残留铜的清洗。对于高图形密度来说这是很难的 ● 检查双面洗擦毛刷是否污染 ● 确认是否用了最合适的清洗化学药品，特别是对清洗铜残留物而言 ● 确保从硅片表面上不同材料的曝露到毛刷和清洗化学试剂没有产生化学药品的交叉污染
4. 抛光垫变得平滑（导致抛光速率降低）	A. 修整臂调节得不合适 B. 抛光垫太旧	为了获得一致的抛光性能，抛光垫的磨合和修整是必要的。对于表面光滑的抛光垫，可能要做： ● 确认是否进行了合适的抛光垫磨合（如在做产品硅片时，先做样片） ● 调解修整向下的压力或改变修整表面 ● 更换抛光垫