

---

# 氧化 及 高温炉

# 引言

硅片上的氧化物可以通过**热生长**或者**淀积**的方法产生。

在升温环境里，通过外部供给高纯氧气使之与硅衬底反应，可以在硅片上得到一层热生长的氧化层。高温氧化工艺发生在硅片制造厂的扩散区域，是硅片进入制造过程的第一步工艺(见下图)。

淀积的氧化层可以通过外部供给氧气和硅源，使它们在腔体中反应，从而在硅片表面形成一层薄膜。

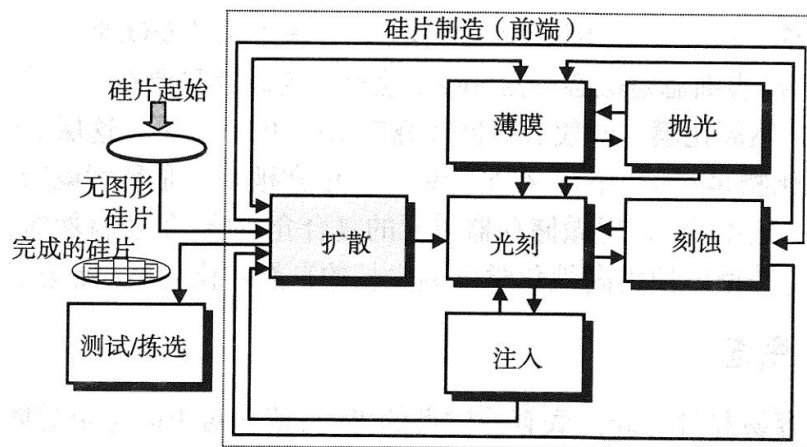


图1 硅片制造厂的扩散区

# 氧化膜—氧化膜的性质

$\text{SiO}_2$ 是具有熔点温度 $1732^\circ\text{C}$ 的本征（纯）玻璃体，属于一种介质材料，不导电。这种 $\text{SiO}_2$ 膜的原子结构(见下图)是由一个硅原子被四个氧原子包围着的四面体单元组成的。无定形的 $\text{SiO}_2$ 在原子水平上没有长程有序的晶格周期，这是因为四面体单元在晶体内没有以规则的三维形式排列。

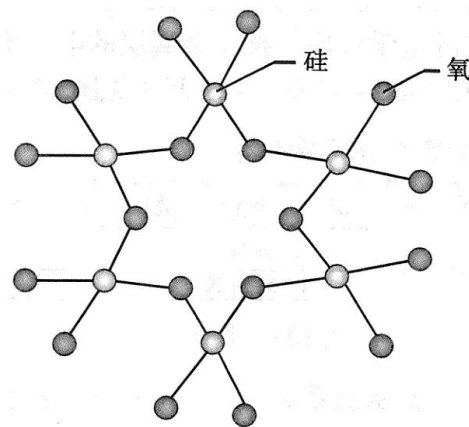


图2 二氧化硅的原子结构

即使长时间曝露在 $25^\circ\text{C}$ 的室温下，这层氧化膜的厚度也只能达到 $40\text{\AA}$ 左右。这种氧化物是不均匀的，在半导体工艺中常被认为是污染物。自然氧化物在硅基半导体工艺中仍有一些用途，如用作存储器单元的复合介质层。

# 氧化膜—氧化膜的用途

氧化层在制造微型芯片中的应用有以下几个方面:

■器件保护和隔离 硅片表面上生长的 $\text{SiO}_2$ 可以作为一种有效阻挡层，用来隔离和保护硅内的灵敏器件。这是因为 $\text{SiO}_2$ 是种坚硬和无孔(致密)的材料，可用来有效隔离硅表面的有源器件。坚硬的 $\text{SiO}_2$ 层将保护硅片免受在制造工艺中可能发生的划伤和损害

■表面钝化 热生长 $\text{SiO}_2$ 的一个主要优点是可以通过束缚硅的悬挂键，从而降低它的表面态密度，这种效果称为表面钝化，它能防止电性能退化并减少由潮湿、离子或其他外部沾污物引起的漏电流的通路。 $\text{SiO}_2$ 层可以将Si表面的电活性污染物(可动离子沾污)束缚在其中。钝化对于控制结器件的漏电流和生长稳定的栅氧化物也很重要。

用氧化层做Si表面钝化层的另一个要素是氧化层的厚度。必须有足够的氧化层厚度以防止由于在硅表面电荷积累引起的金属层充电。这种充电会导致短路和其他一些不受欢迎的电学效应。抑止金属层的电荷堆积的厚氧化层称为场氧化物层（场氧化层）。

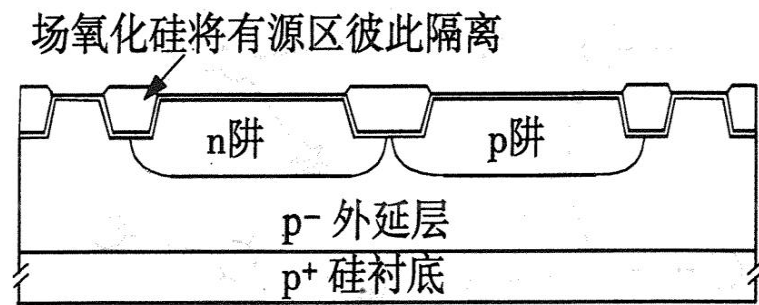


图3 场氧化层

■ **栅氧电介质** 对于MOS技术中常用的重要栅氧结构(见图4), 用极薄的氧化层做介质材料。因为栅氧与其下的Si具有高质量和稳定性的特点, 栅氧一般通过热生长获得。 $\text{SiO}_2$ 具有高的电介质强度( $10^7\text{V/cm}$ )和高的电阻率(约 $10^{17}\ \Omega\cdot\text{cm}$ )。

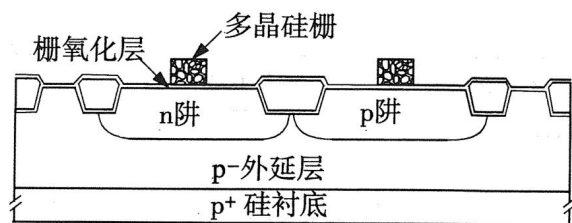


图4 栅氧化介质

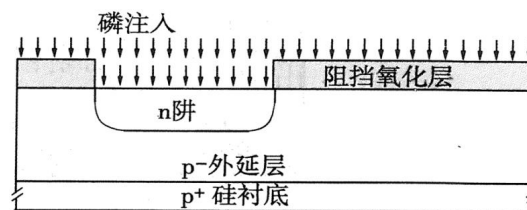


图5 氧化层掺杂阻挡层

■ **掺杂阻挡** 二氧化硅可做为硅表面选择性掺杂的有效掩蔽层(见图5)。一旦硅表面形成氧化层, 那么可用掩膜形成窗口, 掺杂材料可以通过此窗口进入硅片, 从而实现选择性杂质注入。薄氧化层也可以用于需要离子注入的区域, 它可用来减小对硅表面的损伤, 还可通过减小沟道效应, 获得对杂质注入时结深的更好控制。

■ **金属层间的介质层**  $\text{SiO}_2$ 是微芯片金属层间有效的绝缘体,  $\text{SiO}_2$ 能防止上层金属和下层金属间短路。氧化物质量要求无针孔和空隙。通常用化学气相淀积方法获得。

# 热氧化生长

热生长氧化物的各种运用对厚度有不同的要求。在半导体制造中，氧化层的一些重要质量参数有厚度、均匀性、针孔和空隙。

表1 各种要求下的氧化物厚度范围

半导体应用	典型的氧化物厚度 (Å)
栅氧 (0.18um工艺)	20~60
电容器的电介质	5~100
掺杂掩蔽的氧化物	400~1200 (依赖于掺杂剂、注入能量、时间和温度)
浅槽隔离氧化物	150
局部氧化的垫氧	200~500
场氧	2500~15000

# 热氧化生长—关于氧化的化学反应

热氧化物依靠硅和氧之间的化学反应生长。可通过把硅曝露在高纯氧的高温气氛里完成均匀氧化层的生长。

■干氧化 如果生长发生有干氧，也就是没有水汽的氛围里，则化学反应方程式为

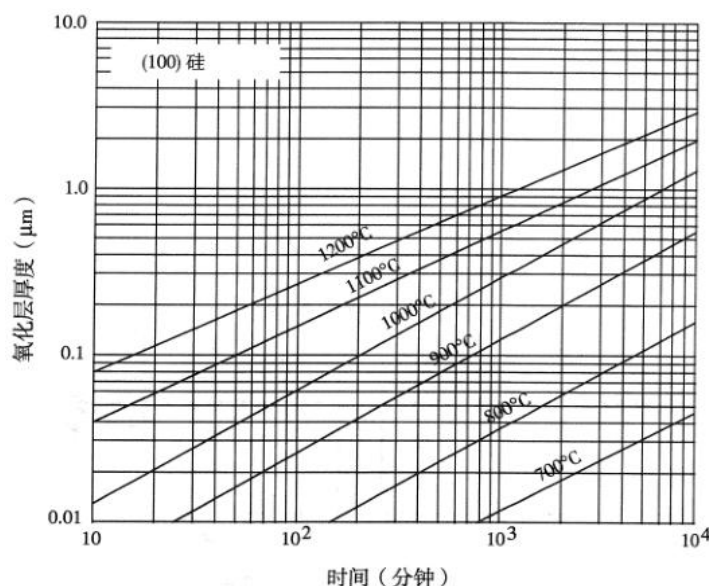
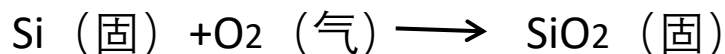
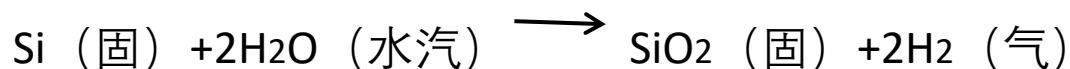


图6 干氧氧化时间

该反应受硅片表面氧气的纯度和反应温度影响。反应速率会随着温度增加而增快。硅片制造过程中，硅的氧化温度通常在750°C~1100°C之间，而且在不同的氧化工艺步骤中是可变的。与温度和时间相对应的干氧化物厚度速率显示在下图中。

■湿氧氧化 当反应中有水汽参与，即湿氧化时，氧化反应速率会大大加快。

湿氧的化学反应方程式为



对于湿氧氧化，用携带水蒸气的氧气代替干氧作为氧化气体。水蒸气也常由蒸汽供给，称为热蒸汽(见下图)。在氧化生长中，湿氧反应会产生一层二氧化硅膜和氢气。**潮湿环境有更快的生长速率是由于水蒸气比氧气在二氧化硅中扩散更快、溶解度更高**。然而反应生成的氢分子会束缚在固态的二氧化硅层内，这使得氧化层的密度比干氧要小。这种情况可以通过在惰性气体中加热氧化来改善，以得到与干氧化生长相类似的氧化膜结构和性能。

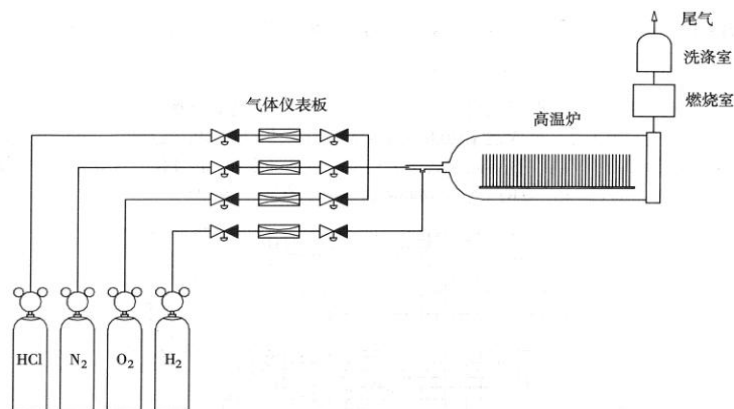


图7 湿法制氧



# 热氧化生长—氧化生长模式

无论是干氧或者湿氧工艺，二氧化硅的生长都要消耗硅，如下图所示。硅消耗的厚度占氧化物总厚度的0.46，意味着每生长1000 Å的氧化物，就有460 Å的硅被消耗。

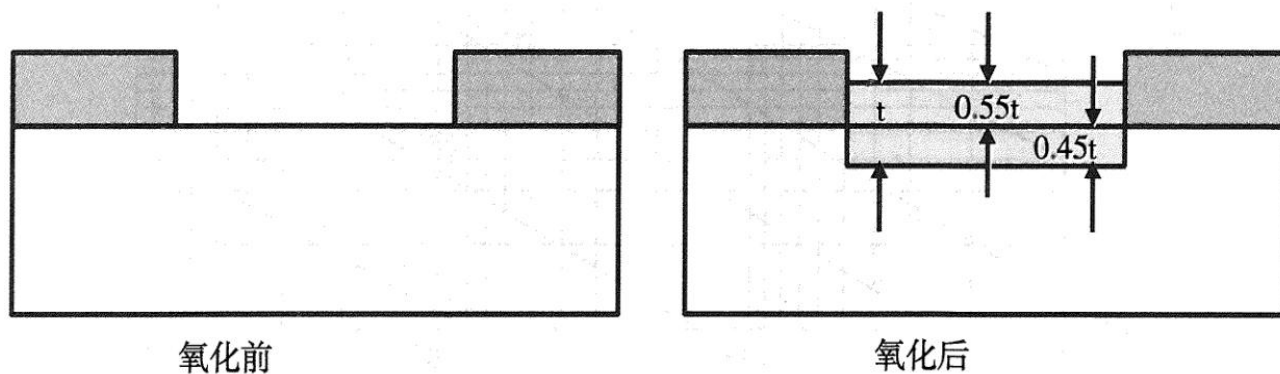


图8 在氧化中硅的消耗

在硅片和氧化物的界面处，通过氧化物的氧气运动控制并限制氧化层的生长。对于连续生长氧化层，氧气必须进去和硅片接触紧密。然而， $\text{SiO}_2$ 将隔离开氧气和硅片。氧化物生长发生在氧分子通过已生成的 $\text{SiO}_2$ 层运动进入硅片的过程中。这种运动称为扩散。对于固体、液体或者气体，原子是从高浓度区域向低浓度区域扩散的，而且热能会促进这种扩散。

■ **SiO<sub>2</sub>-Si界面** 在单晶硅到无定形SiO<sub>2</sub>间的Si/SiO<sub>2</sub>界面上存在着突变。在SiO<sub>2</sub>分子中，每个硅原子和四个氧原子键合，每个氧原子和两个硅原子键合。但在Si/SiO<sub>2</sub>界面上有些硅原子并没有和氧原子键合(见下图)。距Si/SiO<sub>2</sub>界面2nm以内的硅的不完全氧化是带正电的固定氧化物电荷区。界面处积累的其他一些电荷包括界面陷阱电荷、可移动氧化物电荷。前者由结构缺陷、氧化诱生缺陷或者金属杂质引起的正的或负的电荷组成，后者是由于可动离子沾污(MIC)引起的。对于器件的正常工作，界面处的电荷堆积会导致MOS器件的开启电压值变得无法接受。

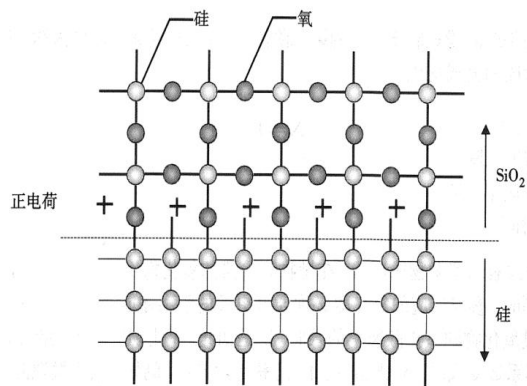


图9 在Si/SiO<sub>2</sub>界面的电荷积累

**氯化物在氧化中的作用** 在氧化工艺中用含氯气体可以中和界面处的电荷堆积。氯离子能扩散进入正电荷层，并形成中性层。氯化物浓度保持在3%以下，否则过多的氯化物离子将引起器件的不稳定。在热氧化工艺中加入氯化物离子的另一重要优点是它们能使氧化速率提升10%~15%。进而，氯的存在实际上能固定(称为俘获)来自炉体、工艺原材料和处理的可动离子沾污。

■ **氧化物生长速率** 氧化物生长速率用于描述氧化物在硅片上生长的快慢。影响它的参数有温度、压力、氧化方式(干氧或湿氧)、硅的晶向和掺杂水平。硅片上的氧化物生长模型是由迪尔(Deal)和格罗夫( Grove)发展的线性-抛物线性模型，一种能在较宽厚度范围内精确描绘氧化物生长的模型。

**氧化物由两个生成阶段描述：线性阶段和抛物线阶段。** 用线性等式描述为：

二氧化硅生长的最初阶段是线性阶段，硅片表面上硅的消耗与时间呈线性关系。这就意味着，在硅内氧化层是随时间消逝以线性速率生长的。氧化物生长线性阶段的有效性是氧化物的厚度大约生长到150Å左右

$$X = \left( \frac{B}{A} \right) t$$

其中，X=氧化物生长厚度  
(B/A) =线性速率系数  
t=生长时间

在线性阶段，氧化随时间线性变化。氧化在线性区域是反应速率控制的，这是因为对于氧化生长，其制约因素是发生在Si/SiO<sub>2</sub>界面上的反应。我们注意到线性速率系数B/A是这种线性关系的斜率，所以才能控制反应速率。温度升高，B/A值会增加，这意味着氧化速率也会增大。

**氧化生长的抛物线阶段**是氧化生长的第二阶段，而且是在**氧化物厚度大约150Å以后才**开始的。用于描述抛物线阶段的公式是：

$$X = (Bt)^{\frac{1}{2}}$$

其中，X=氧化物生长厚度；B=抛物线速率系数；t=生长时间。

在抛物线阶段的氧化物生长要比在线性阶段慢得多。这是因为当氧化层变厚时，参与反应的氧扩散必须通过更长的距离才能达到Si/SiO<sub>2</sub>界面(见图10)，所以反应受到通过氧化物的氧扩散速率的限制。正是如此，氧化物生长的抛物线阶段被称为扩散控制。在图11中的曲线显示了线性和抛物线两个阶段。

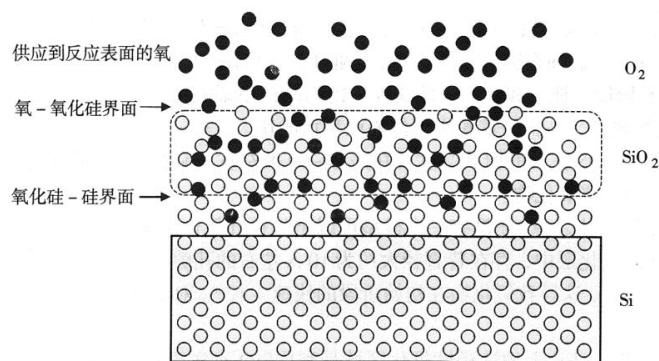


图10 穿过氧化层的氧扩散

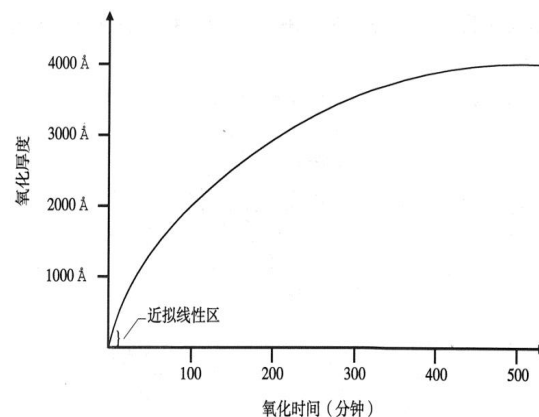


图11 在1100°C干氧氧化生长的线性和抛物线阶段

■影响氧化物生长的因素 除了温度和水的存在，还有其他一些因素能影响氧化物的生长速率。

①掺杂效应 重掺杂的硅要比轻掺杂的氧化速率快。在抛物线阶段，硼掺杂比磷掺杂氧化得快。氧化膜中硼趋向混合，这将减弱它的键结构，使通过它的氧扩散随之增大。硼掺杂和磷掺杂的线性速率系数相差不大。

②晶向 线性氧化速率依赖于晶向的原因是(111)面的硅原子密度比(100)面的大。因此，在线性阶段，(111)硅单晶的氧化速率将比(100)稍快，但是(111)的电荷堆积要多。在抛物线阶段，抛物线速率系数 $B$ 不依赖于硅衬底的晶向。这是因为氧化生长的抛物线速率由通过已生成的 $\text{SiO}_2$ 的氧扩散决定，而且它对 $\text{Si}/\text{SiO}_2$ 界面处的反应没有影响。

③压力效应 由于氧化层的生长速率依赖于氧化剂从气相运动到硅界面的速度，所以生长速率将随着压力增大而增大。高压强迫氧原子更快地穿越正在生长的氧化层，这对线性和抛物线速率系数的增加很重要。氧化生长的经验法则表明，每增加一个大气压的压力，相当于炉体温度降低 $30^\circ\text{C}$ 。这个比率可用来降低热预算。

④等离子增强 等离子增强氧化是另一种可在低温下提高氧化速率的方法，这也将减少热预算。通常在产生等离子中采用的技术是RF源。给硅施以比等离子区低的偏压，这可收集硅片上等离子区内的电离氧。这种行为导致硅的快速氧化，并且允许氧化物生长在低于 $600^\circ\text{C}$ 的温度下进行。



■ **初始生长阶段** 迪尔和格罗夫的线性-抛物线性模型能精确预计超过 $300\text{\AA}$ 的氧化生长厚度。在这厚度之下，我们发现干氧化要比预计的快。这是一段很重要的氧化生长范围，因为对于 $0.25\mu\text{m}$ 以下MOS技术的栅氧厚度现在是 $20\sim 60\text{\AA}$ 左右。由于栅氧变得如此之薄，还没有一个模型可以精确预计氧化速率。一个特殊模型的发现，在干氧生长的非常薄的氧化层中，存在着直径大约为 $10\text{\AA}$ 左右的孔隙。这些孔隙允许氧化剂在早期生长阶段与硅直接接触，这导致氧化物在初始阶段的快速生长。

■ **二氧化硅的应力** 二氧化硅的应力会使硅片翘曲并且有可能在硅片内产生层状缺陷。测量热氧化膜的应力发现，它是收缩的并且有着相对较小的数值。氧化膜的应力是由于Si和 $\text{SiO}_2$ 的热胀冷缩系数不同造成的。氧化膜的应力会导致硅片翘曲，氧化表面呈凸起状。曲率的光学测量可用于应力的量化。

■ **氧化诱生堆垛层错** 无论湿氧或干氧都会在Si和 $\text{SiO}_2$ 之间的界面处形成氧化诱生堆垛层错(OISF)。我们知道堆垛层错是由于层之间堆垛错误形成的晶胞位错。我们相信氧化诱生堆垛层错是造成Si/ $\text{SiO}_2$ 界面氧化不完全的原因，这将导致此区域中过多的硅空隙。如果堆垛层错在pn结附近，将会导致漏电流的增加。由于氯气在硅表面将提供空位形成，所以掺氯的热氧化会大大减少氧化诱生堆垛层错，这就提供了一种清除过多硅空隙的手段。

■ **选择性氧化** 硅片上的选择性氧化区域是利用 $\text{SiO}_2$ 来实现对硅表面相邻器件间的电隔离。因为淀积在硅上的氮化物**不能被氧化**，所以刻蚀后的区域可用来选择性氧化生长(见右图)。

当氧扩散穿越已生长的氧化物时，它是在各个方向上扩散的。一些氧原子纵向扩散进入硅，另一些氧原子横向扩散。这意味着在氮化物掩膜下有着轻微的侧面氧化生长。由于氧化层比消耗的硅更厚，所以在氮化物掩膜下的氧化生长将抬高氮化物的边缘。我们称之为“**鸟嘴效应**”。为了减小氮化物掩膜和硅之间的应力，在它们之间热生长一层薄氧化层，称之为**垫氧**（见右图）。

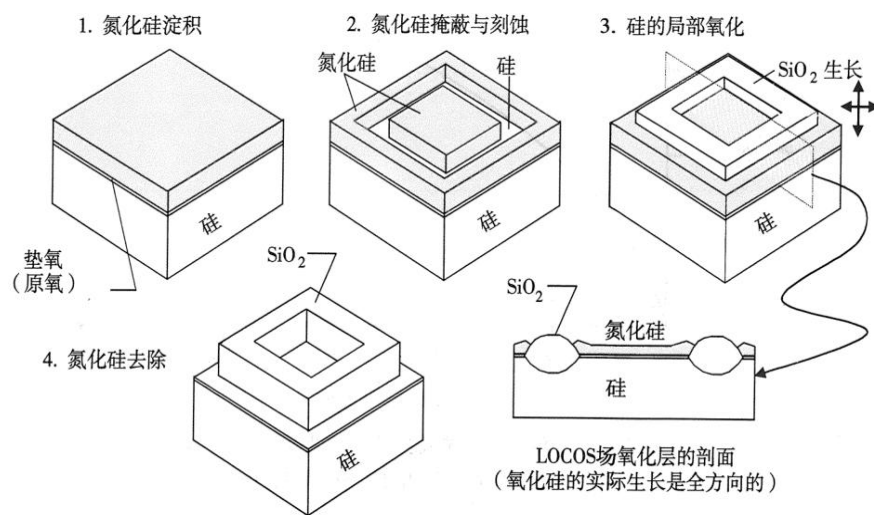


图12 硅的局部氧化(LOCOS)工艺

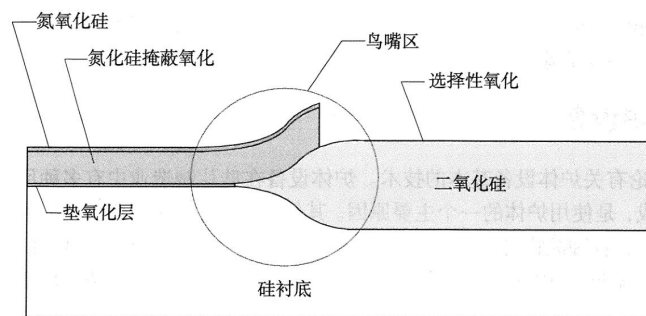


图13 选择性氧化和鸟嘴效应

**浅槽隔离** 用于亚 $0.25\mu\text{m}$ 工艺的选择性氧化的主要技术是**浅槽隔离(STI)**。STI技术中的主要绝缘材料是**淀积氧化物**。选择性氧化利用掩膜来完成，通常是氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )。掩膜经过淀积、图形化、刻蚀硅后形成槽。在掩膜图形暴露的区域，热氧化 $150\text{-}200\text{\AA}$ 厚的氧化层之后，才能蚀硅形成槽(见右图)。这种**热生长的氧化物使硅表面钝化**，并且可以使浅槽填充的淀积氧化物与硅相互隔离。它还能**作为有效的阻挡层，避免器件中的侧墙漏电流产生**。

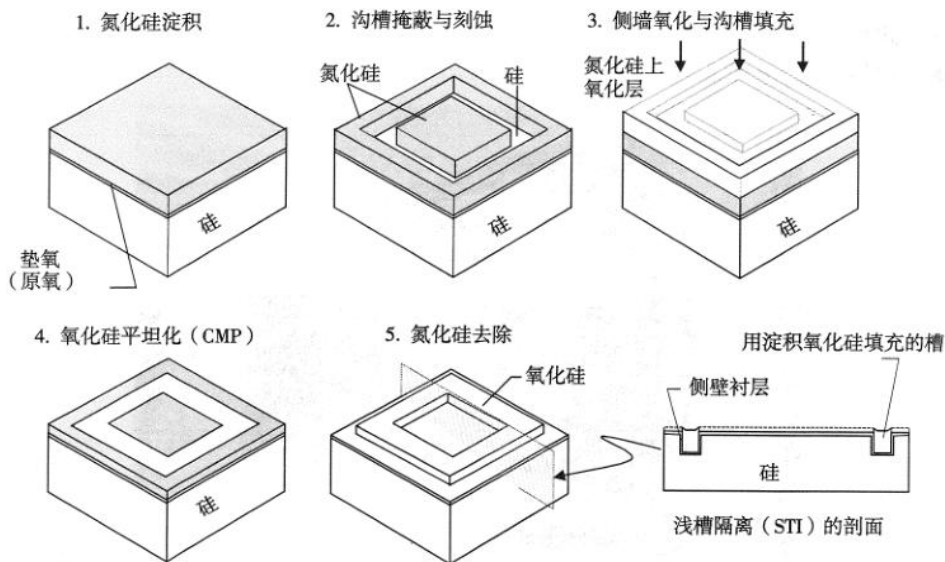


图14 STI氧化硅衬层



# 高温炉设备

炉体设备在硅片制造业中有多种用途，例如：热生长氧化物、离子注入后硅片表面的热退火、各种淀积膜、硅化物膜的形成等。**用于热工艺的基本设备有三种：卧式炉、立式炉和快速热处理（RTP）。**

**卧式炉**是在硅片热处理中被广泛应用的设备。它的命名来自石英管的水平位置，石英管是用来放置和加热硅片的。在上世纪90年代初期，这种炉大部分被**立式炉**取代，这主要是因为**立式炉更易自动化、可改善操作者的安全以及减少颗粒沾污**。立式炉也称做立式扩散炉或VDF，与卧式炉相比可更好地控制温度和均匀性。

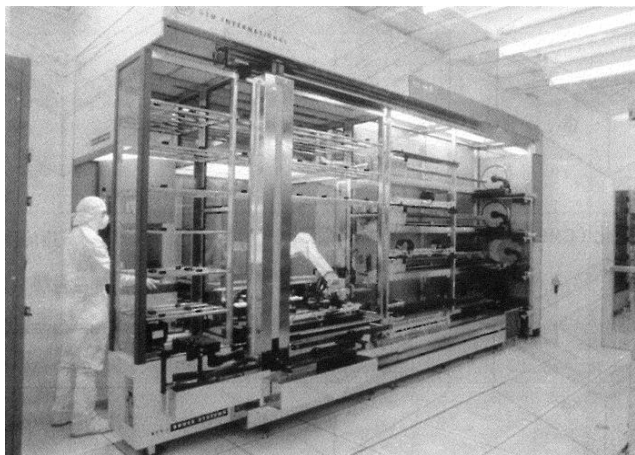


图15 卧式扩散炉



图16 立式扩散炉

下表给出了常规的卧式和立式炉的性能参数对比。

表2 卧式炉和立式炉系统性能比较

性能参数	性能目标	卧式炉	立式炉
常规装载硅片数量	小，利于工艺灵活性	200片/炉	100片/炉
净化室占地面积	小，节约空间	较大，而且拥有4根工艺管道	较小（单管工艺管道）
并行处理	工艺灵活性	无	工艺中的装卸舟，可提高产量
气流动力学（GFD）	在一致性方面最优化	较差，这源于舟、铲子等硬件。浮力和重力导致气流分布不均	较高的GFD和气流分布均匀，一致
舟旋转，提高膜均匀性	理想的状态	不可能设计	很容易包括在内
硅片温度梯度	相当小	大，叶片阴影的辐射	小
装/卸硅片过程中的颗粒控制	颗粒最小化	相对差	通过上下装片方式，改善颗粒控制
石英更换	短时间内容易完成	涉及更多而且慢	更容易和更快，导致停机时间缩短
装载硅片技术	自动化	自动化困难	使用机械人技术使自动化更容易
工艺前后炉管气氛的控制	控制令人满意	较难控制	极好的控制，真空或中性气氛

# 卧式与立式炉—立式炉

立式炉最早出现在上世纪90年代初期。它出现的主要原因是利用立式炉减少净化室的占地面积并提高自动化处理程度。为了解基本的炉体工艺，我们将对常规的立式炉进行分析。立式炉的主要控制系统分为五部分：工艺腔、硅片传输系统、气体分配系统、尾气系统和温控系统。示意图如下。

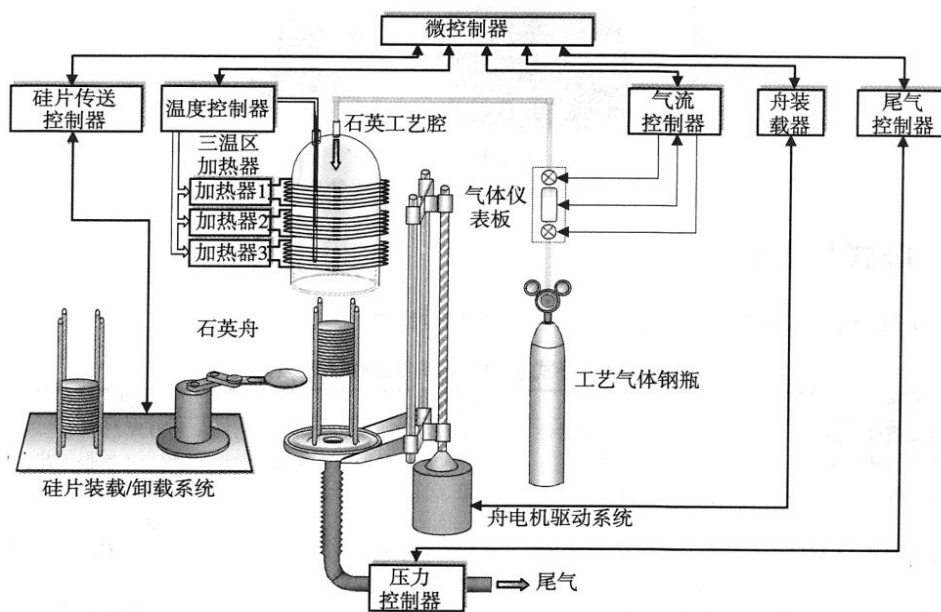


图17 立式炉系统示意图

## ■工艺腔

工艺腔或炉管是对硅片加热的场所。它由垂直的石英钟罩、多区加热电阻丝和加热管套(见右图)组成。炉管必须移动方便，在必要时方便清洗。

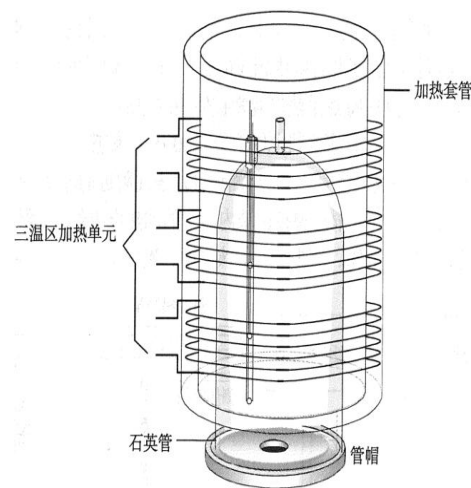


图18 立式炉炉管

**炉管材料** 硅片在炉管中水平放置于垂直的硅舟上。舟和其他炉管元件是用耐高温的无定形石英做成的。炉管容器通常称为石英器皿，炉管中放置硅片用的支撑结构称为石英载物台。然而在镀膜工艺中，膜淀积在垂直的硅舟上，同时也淀积在炉管的内壁上。有时仅几个循环之后，这种淀积膜将破裂和剥落。这些颗粒将随空气运动并停留在硅片上，导致缺陷和成品率降低。这就要求炉子部件(如炉管)取下并清洗以减少颗粒。减少膜剥落的另一种选择是用碳化硅(SiC)来制造炉子的元件，这是因为SiC提高了淀积薄膜的粘附性。

**加热区** 每根石英处理管都被电热丝围绕，可用来控制多个加热区。**加热区的数目很重要**，因为这使得在热反应发生的地方获得一个恒温区更加便利。恒温区两端的加温区使硅片升降工艺温度最优化。

先进的立式炉的一个重要特征是炉管内围绕硅片的气流控制，这种气流称为气氛。一些炉子用真空锁保持炉管里的气氛，避免曝露在大气中，另一些用纯氮冲洗加工完一批硅片后的残留气体。有些设计也包括额外的、围绕在硅片周围的石英罩，可以提高对气氛温度的控制。

**加热单元** 立式炉里的加热单元是缠绕在炉管外部的金属电阻丝。加热时，通过加热区，它可提供均匀的热量。右图给出的是三区的加热单元图。开、关加热器的响应来自于温度控制信号，温控由可控硅整流器(SCR)组成的交换系统完成。交换系统决定着输送给加热器功率的多少。

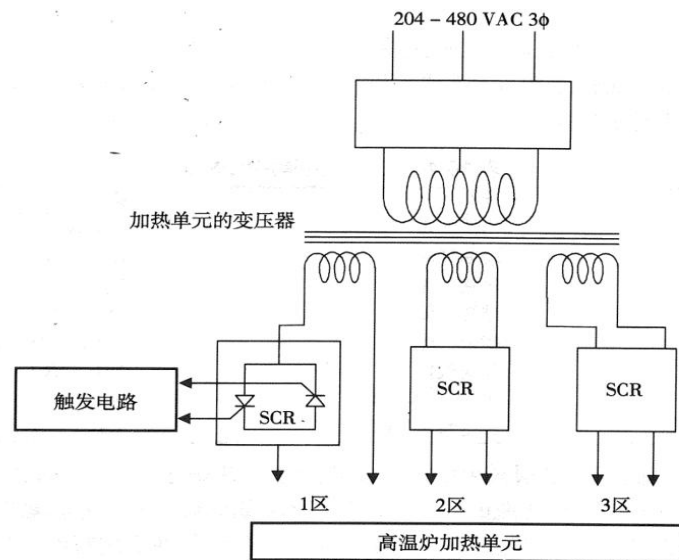


图19 加热单元的功率分布





# 卧式与立式炉—立式炉

**温度控制** 精确控制炉管温度的能力对炉体是非常关键的。温控的一个重要部分是传感器，我们熟知的**热电偶(TC)**可以探测温度并且提供相应的毫伏信号给炉子的控制器。稳定、精确、便宜、可在较宽的温度区域里工作。

对于工艺腔的每一个**加热区**都有**多支热电偶**(见右图)。侧热电偶置于工艺腔的内部，与硅片相邻近，每一加热区各有一支，可**测量硅片表面附近的温度**。控温热电偶置于工艺腔外部，**靠近温控区域内缠绕的加热电阻丝**，可**测量加热器的温度**。另外，在控温热电偶附近有**过温热电偶**，监视最大加热温度，确保炉体不在过温下工作

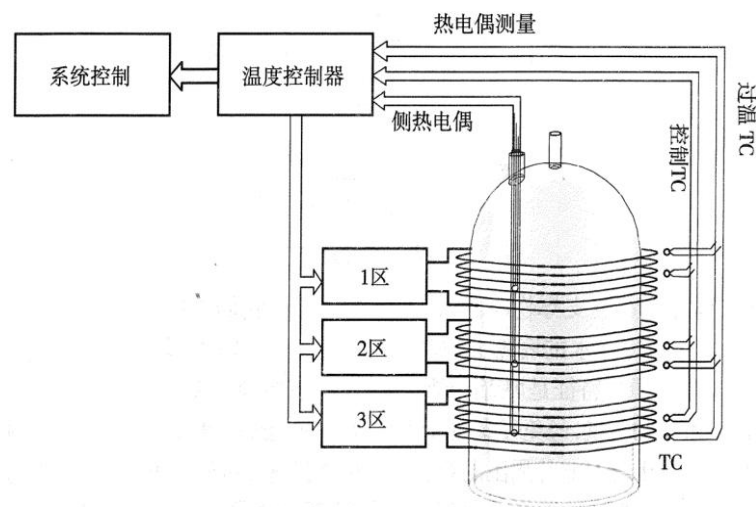


图20 高温炉中热电偶的位置

■**硅片传输系统** 立式炉中硅片传输系统的主要功能是在工艺腔中装卸硅片。所有的装卸硅片都由自动机械完成。自动机械在以下4个位置之间运动：片架台、炉台、装片台、冷却台。硅片传输中，装片台保持在10级(或更好)。

■**气体分配系统** 气体分配系统是通过将正确的气流传送到炉管来维持炉内的气氛。对于不同工艺，通过分配系统输送给炉管的气体有不同的通用和特种气体。下表列出了常见的用于氧化和其他工艺的气体。

表3 工艺中的常用气体

气体	分类	实例
通用	惰性气体	Ar、N2
	还原气体	H2
	氧化气体	O2
特种	硅源气体	SiO2、DCS（二氯硅烷）、H2SiCl2
	掺杂气体	AsH3、PH3、B2H6
	反应气体	NH3、HCl
	大气/净化气体	N2、He
	其他特殊气体	WF6

彻底清除气体及其副产物是很重要的。在立式炉中，这是通过位于立式炉管一端的通孔完成的。气体进入排气管以控制各种气流的方向。**易燃气体在被称为燃烧室的腔体中燃烧**，燃烧是在远离工艺腔的下风口处，空气存在的条件下进行的，**将易燃气体减少成几乎无害的副产物**(见右图)。专用颗粒过滤器用于清除固体。气体通过一罐式洗涤器吸收有毒气体。大多数炉子的尾气使用湿式洗涤器，即用水吸收气体。

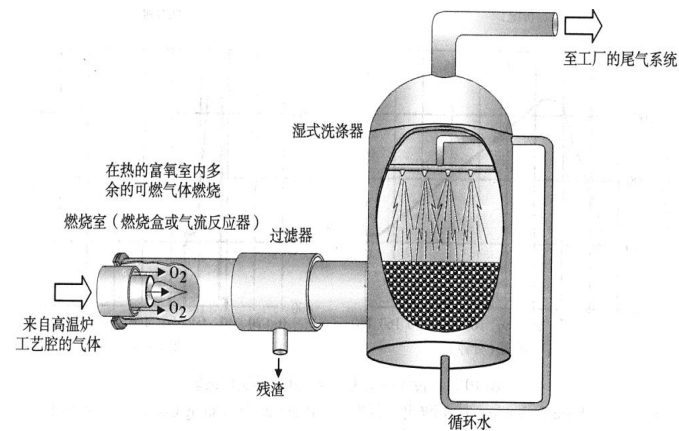


图21 燃烧尾气的燃烧室

■控制系统 炉子微控制器控制着炉子的所有操作，如工艺时间和温度控制、工艺步骤的顺序、气体种类、气流速率、升降温的速率和装卸硅片。升降温的速率是硅片曝露在升温或冷却时温度变化的比率，测量单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 。立式炉通常的升降温速率是 $10^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ，恒温区的温度维持在 $0.6^{\circ}\text{C}$ 以内。其他功能如诊断技术和数据收集也由微处理器执行。



# 快速升温立式炉

在炉子性能(和硅片产量)中，关键的问题是炉子需要的加热和冷却时间。快速升温炉能迅速将一批硅片温度升到加工温度，减少工艺稳定需要的时间，工艺结束后快速冷却。右图显示的是快速升温立式炉和传统立式炉的热过程的对比。

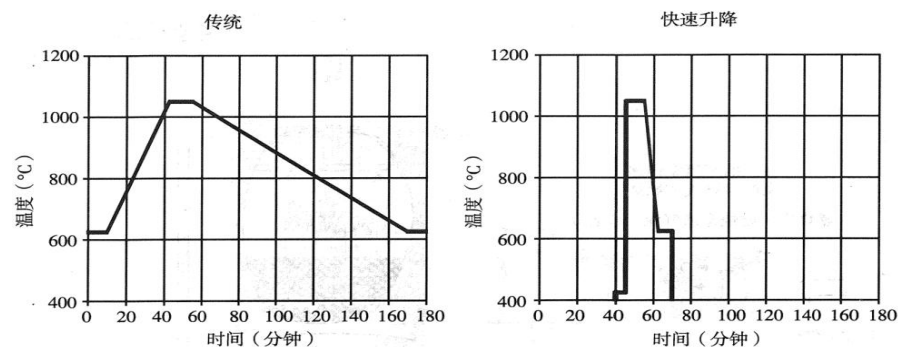


图22 传统和快速升温立式炉的温度曲线

立式炉体被认为是常规的热壁炉体，这是因为硅片和炉壁都需要加热，并且可同时处理大量的硅片(100~200片)。快速热处理(RTP)是种小型的快速加热系统，带着辐射热和冷却源，通常一次处理一片硅片。当RTP用在Si衬底的热退火时，称为RTA。由于RTP具有非常快的、局域化的加热时间，它只对硅片进行加热(不对炉壁加热)。

■先进的温度控制 改善热处理的温度控制和硅片上热均匀性，是减少硅片制造中热预算的关键因素。典型的快速升温炉在80°C/分升温循环中，所有硅片上维持 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，能把工艺温度的一致性控制在 $\pm 0^{\circ}\text{C}$ 以内。快速升温炉的主要差别在于其快速升温元件、特殊的硅片装载装置、强迫空气冷却以及更好的温度控制器。

快速热处理(RTP)是在非常短的时间内(经常是几分之一秒)，将单个硅片加热至400~1300°C温度范围内的一种方法。相对于传统的立式炉，**RTP的主要优点有：**

- 减少热预算
- 硅中杂质运动最小
- 减少沾污
- 较小的腔体体积可达清洁气氛
- 更短的加工时间

表4 传统立式炉和RTP间的对比

立式炉	RTP
一批	单片
热壁	冷壁
长时间加热和冷却炉子	短时间加热和冷却硅片
硅片较小热梯度	硅片较大热梯度
长周期	短周期
测量气氛温度	测量硅片气氛
结果： 大的热预算 颗粒 气氛控制	结果： 温度均匀性 杂质运动最小 硅片间的重复性 产量 由于快速加热产生应力 绝对的温度测量

## ■ RTP设计

右图是快速热处理(RTP)的示意图。在常压或低压下，单个硅片在腔体内被快速加热，通常称这种腔体为反应腔。**大多数的RTP采用多盏卤钨灯组装在一起作为热源。**卤钨灯通常安在硅片的顶部和底部，它们被置于多个区域里，这可使硅片上温度等高。这种等高温度分布可以补偿可能发生在冷壁系统升降温过程中的加热和冷却的不均匀性。**卤钨灯将产生短波长辐射，硅片加热依靠选择性吸收卤钨灯的辐射。**

这种方式使得RTP在辐射热源和硅片间传输能量，不会对反应腔壁加热。这也是使用“冷壁”一词的原因。注意有些系统使用灯或电阻加热器对基座加热，然后通过热接触对硅片加热。这种情况下，RTP是暖或热壁加热。**RTP的温度控制依靠热电偶或光学高温计完成。**热电偶和硅片直接接触，确定硅片的真实温度。光学高温计可以测量远处的温度，其响应时间快。它是通过对硅片加热，探测其红外辐射来完成的。

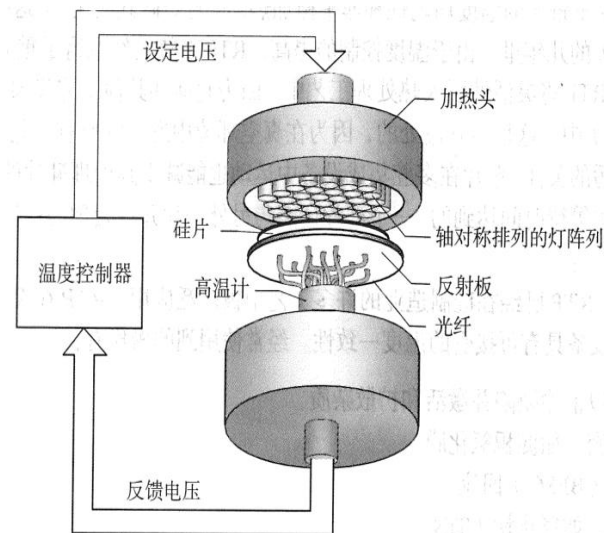


图23 RTP

■ **RTP应用** RTP已经在硅制造业的许多工艺中被广泛应用。RTP在腔体设计和温度均匀性方面的进展使该设备具有可接受的温度一致性。经常使用到的操作有：

- 注入退火，以消除缺陷并激活和扩散杂质
- 淀积膜的致密，如淀积氧化膜
- 硼磷硅玻璃(BPSG)回流
- 阻挡层退火，如氮化钛(TiN)
- 硅化物形成，如硅化钛(TiSi<sub>2</sub>)
- 接触合金

RTP工艺中应用最广泛的是离子注入后的退火。与传统扩散炉相比，RTP的优点是缩短了加热时间，这就意味着减少了热预算。

# 氧化工艺—氧化前的清洗

热氧化的目标是按厚度要求生长无缺陷、均匀的 $\text{SiO}_2$ 膜。用于特定硅片制造步骤的氧化工艺条件的类型取决于氧化层的厚度和性能要求。下图给出了热氧化工艺的典型步骤

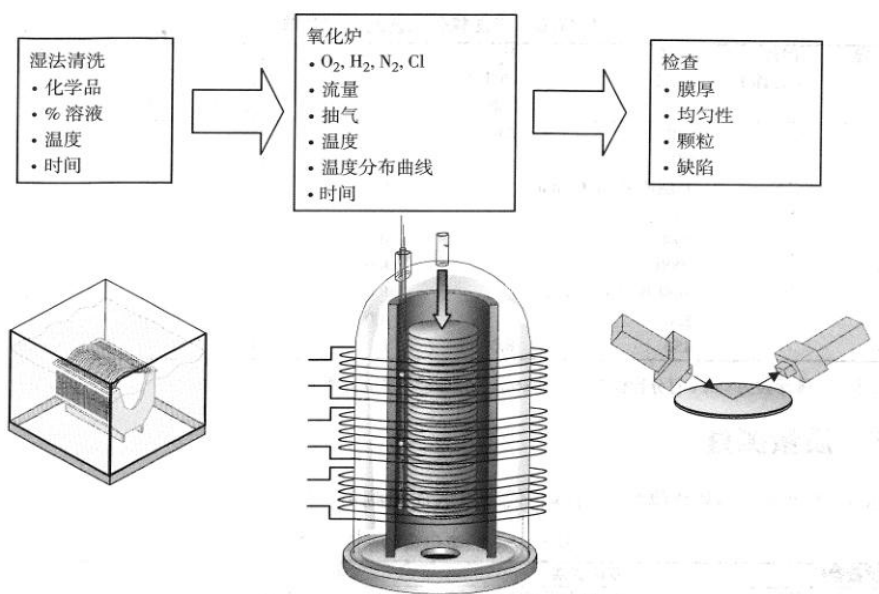


图24 热氧化工艺流程表

要获得高质量的氧化，硅片的清洗至关重要。诸如颗粒和可动离子沾污(MIC)等污染物对器件的性能和成品率有严重影响。对热氧化工艺，避免可动离子沾污和颗粒，要依靠维持系统处于高度清洁状态。以下内容对于尽量减少沾污非常重要：

- 炉体及其相关设备的清洗维护
- 氧化气氛的纯度
- 工艺中化学物品的纯度
- 硅片清洗和操作实践

# 氧化工艺—氧化工艺菜单

为使热氧化发生,氧化炉设备中的某些工艺条件要遵循一定的特殊格式,这就是**工艺菜单**。对于硅片制造,普遍是将工艺菜单参数存储在一软件数据库中并且将其下载至为特别硅片批的工具软件中。下面将以干法氧化为例讨论工艺菜单。

■**干法热氧化** 干法热氧化最常见的应用是生长用于栅氧的薄氧化膜。用干法氧化生长的高质量氧化物具有均匀的密度、无针孔、可重复的特点。对于栅氧而言在清洁的、无钠离子的系统中生长非常重要。这个系统要求非常干燥,因为即使25ppm的水也将改变氧化物的生长速率和性能。

# 氧化工艺—氧化工艺菜单

■工艺菜单 表中给出的是栅氧化物的干法氧化的一个实例。在待机状态，工艺菜单显示出工艺腔中有纯氮(N<sub>2</sub>)，直到工艺开始才关闭保压氮气，打开加工用氮气。一旦炉管装好硅片，炉温将从待机状态的850℃以20℃/分的升温速率上升到1000℃。硅片在1000℃有5分钟的稳定时间。由于这是干法氧化，氧气束流以2.5slm进入工艺腔。HCl的流量为67sccm，用来减少界面电荷和MIC。在使电荷积累最小化的退火阶段，O<sub>2</sub>和HCl被关闭，N<sub>2</sub>被打开。即使氧源被关闭，氧化物中仍然存在着氧扩散，这将影响二氧化硅的化学计量配比。在卸片阶段有5分钟的时间。

表5 干法氧化工艺的工艺菜单

步骤	时间 (分钟)	温度 (°C)	N2 净化气 (slm)	N2 (slm)	工艺气体 O2 (slm)	HCl (sccm)	注释
0		850	8.0	0	0	0	待机状态
1	5	850		8.0	0	0	装片
2	7.5	升温速率20°C/min		8.0	0	0	升温
3	5	1000		8.0	0	0	温度稳定
4	30	1000		0	2.5	67	干法氧化
5	30	1000		8.0	0	0	退火
6	30	降温速率5°C/min		8.0	0	0	降温
7	5	850		8.0	0	0	卸片
8		850	8.0	0	0	0	待机状态

注意：气流单位为slm（每单位标准压）和sccm（每分钟标准立方厘米）

# 质量测试

表中列出了热氧化物生长的具有代表性的质量检测方法。

表6 热氧化膜的质量检测

质量参数	缺陷类型	备注
1.氧化物厚度	A.超出规范的栅氧厚度(典型的栅氧化物厚度在 $20\pm1.5\text{\AA}$ )	出现问题可能的原因是： ● 错误的气流(如MFC校不当)；检查HCl与O <sub>2</sub> 比率是否正确，因为HCl会提高氧化速率 ● 用裸硅样片检测片全面检验炉子O <sub>2</sub> 的泄漏 ● 测量氧化物厚度，与标准厚度的硅片相对比，核对度量衡设备 ● 硅片在正常氧化之前或后在空气中过度曝露，导致过度的自然氧化物生长
2.栅氧化物完整性	A.栅氧化物击穿 B.膜内可动离子沾污(MIC)	栅氧化物缺陷常常与工艺条件有关： ● 用无图形检测片做C-V测试，检测栅氧化物的完整性 ● 用表面电荷分析仪在检测片上做氧化物电荷分析 ● 回顾预氧清洗步骤，推测沾污源(如颗粒或MIC等) ● 确认没有来自进气管或有故障的过滤器
3.氧化膜内的颗粒	A.沾污的石英器皿 B.炉内的硅片破损 C.沾污的装卸台 D.沾污的气体过滤器或气管	对在氧化工艺过程中加入的颗粒来源的改正： ● 检查石英器皿和装卸台的清洁 ● 检查自动处理系统的对准 ● 检查进气的过滤器
4.氧化膜下的颗粒	A.预氧化清洗沾污	氧化步骤之前的颗粒源： ● 验证预氧化清洗步骤的正确设立和执行 ● 检查石英器皿和装卸台的清洁



# 氧化检查及故障排除

下表给出了热氧化中常见的问题和改正措施。

表7 常见氧化问题

问题	可能的原因	纠正措施
1.进入炉体的错误气流	A.不正确的工艺菜单 B.MFC故障 C.错误的H <sub>2</sub> 和O <sub>2</sub> 比率(O <sub>2</sub> 缺乏)	对此问题可能采取的纠正措施： ● 确认从炉子软件中调入的是正确的工艺菜单 ● 检查工艺气体MFC(O <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> 、Cl)，以确认进行校准并操作正常 ● 确认气阀功能正常(如不漏气等) ● 检查是否有空气从石英或炉门的密封圈外漏入炉管内
2.立式炉工艺腔内错误的温度均匀性	A.错误的工艺菜单 B.热电偶工作方式不正确	可能的措施： ● 确认正确的工艺菜单被调入 ● 估计在升降温及恒温过程中温度是否不均匀 ● 检查所有热电偶的工作方式。确认没有因过度受热和腐蚀而退化。替换有问题的热电偶。确认热电偶参考点的温度没有漂移
3.RTP内不恰当的温度均匀性	A.加热系统故障(如卤钨灯等) B.确认温度测量传感器工作正确	可能的措施： ● 确认加热灯正在工作并且光强正确 ● 确认光学高温计测量传感器的正确校准和温度测量。通过对硅表面反射率测量，检查硅片的发射率有无变化