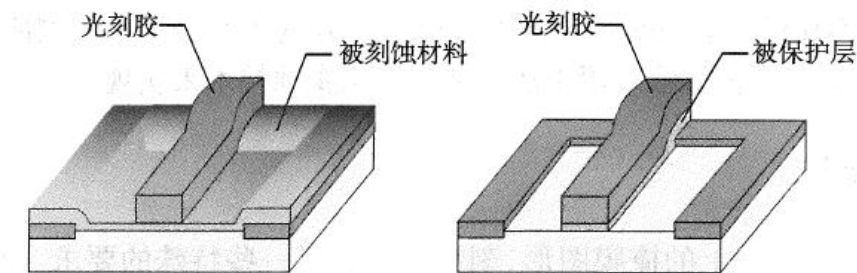

刻 蚀

引言

刻蚀：用化学或物理方法有选择地从硅片表面去除不需要的材料的过程。

基本目标：在涂胶的硅片上正确地复制掩膜图形。

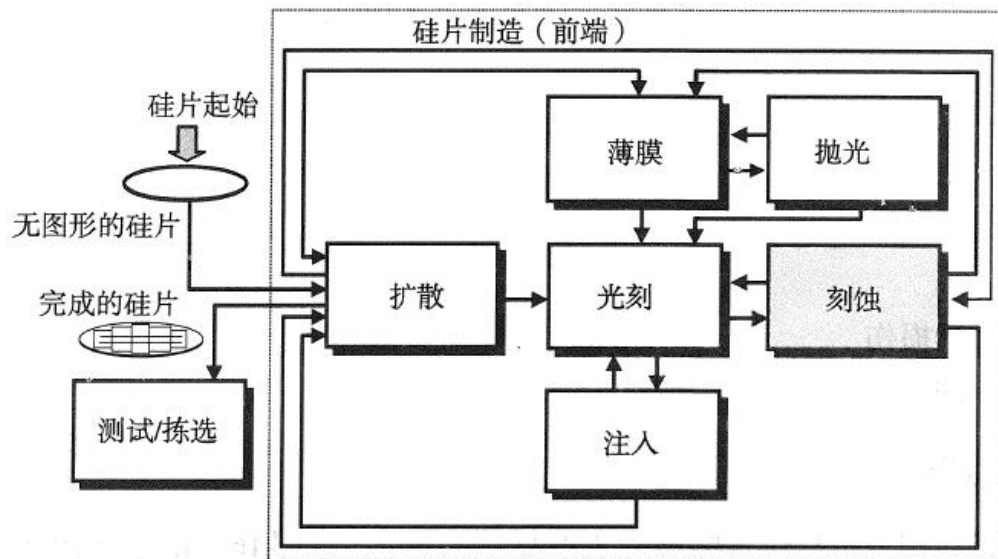
有图形的光刻胶层在刻蚀中不受到腐蚀源显著的侵蚀。这层掩蔽膜用来在刻蚀中保护硅片上的特殊区域而选择性地刻蚀掉未被光刻胶保护的区域。



(a) 有光刻胶图形的衬底

(b) 刻蚀后的衬底

刻蚀在 CMOS 技术中的应用



通常的 CMOS 工艺流程

刻蚀工艺

两种基本的刻蚀工艺：**干法刻蚀**和**湿法刻蚀**

干法刻蚀：硅片表面曝露于气态中产生的等离子体，等离子体通过光刻胶中开出的窗口，与硅片发生物理或化学反应。（干法刻蚀是亚微米尺寸下刻蚀器件的最主要方法）

湿法刻蚀：液体化学试剂（如酸、碱和溶剂等）以化学方式除去硅片表面的材料。

●干法刻蚀的分类：

按材料分类：**金属刻蚀**、**介质刻蚀**、**硅刻蚀**

金属刻蚀：主要是在金属层上去掉铝合金复合层，制作出互连线

介质刻蚀：用于介质材料的刻蚀，如二氧化硅。

硅刻蚀：应用于需要去除硅的场合

●刻蚀也可以分为：**有图形刻蚀**、**无图形刻蚀**

有图形刻蚀：采用掩蔽层（有图形的光刻胶）来定义要刻蚀掉的表面材料区域，只有硅片上被选择的这一部分在刻蚀过程中刻掉。有图形的刻蚀可用来在硅片上制作多种不同的特征图形，包括栅、金属互连线、通孔、接触孔和沟槽。

无图形刻蚀：在整个硅片没有掩膜的情况下进行。

刻蚀参数

重要刻蚀参数：

●刻蚀速率 ●刻蚀剖面 ●刻蚀偏差 ●选择比 ●均匀性 ●残留物
●聚合物 ●等离子体诱导损伤

刻蚀速率

定义：刻蚀过程中去除硅片表面材料的速度

单位：Å/min

台阶高度：刻蚀窗口的深度

公式：刻蚀速率 = $\Delta T / t$ (Å/min)

其中， ΔT = 去掉的材料厚度 (Å 或 μm)

t = 刻蚀所用的时间 (分)

影响因素：刻蚀速率通常正比于刻蚀剂的浓度。硅片表面几何形状等因素都能影响硅片与硅片之间的刻蚀速率。

负载效应：要刻蚀硅片表面的大面积区域，则会耗尽刻蚀剂浓度使刻蚀速率慢下来；如果刻蚀的面积比较小，则刻蚀就会快些。

刻蚀速率的减小原因：等离子体刻蚀反应过程中会消耗大部分的气相刻蚀基。

刻蚀剖面

定义：被刻蚀图形的侧壁形状

两种基本的刻蚀剖面：各向同性和各向异性刻蚀剖面

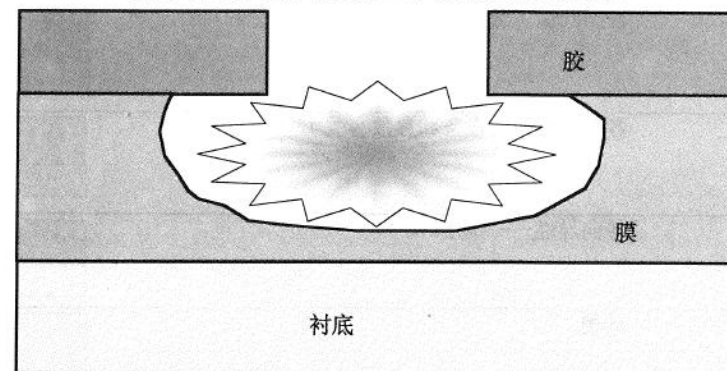
各向同性：刻蚀剖面在所有方向上（横向和垂直方向）以相同的刻蚀速率进行刻蚀，导致被刻蚀材料在掩膜下面产生钻蚀而形成，这样会带来不希望的线宽损失。

各向异性：适度（较小的侧壁倾角）或高各向异性（垂直的侧壁）

亚微米尺寸图形希望刻蚀剖面是各向异性的，即刻蚀只在垂直于硅片表面的方向进行。

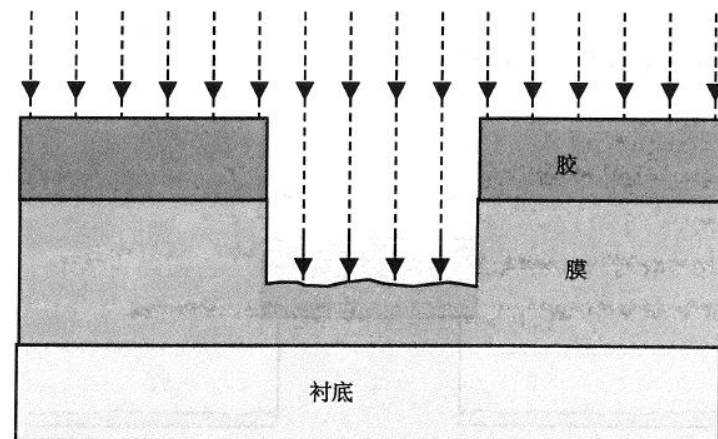
刻蚀剖面：被刻蚀薄膜侧壁的形状。

各向同性刻蚀是在各方向上以同样的速率进行刻蚀



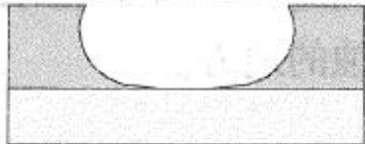

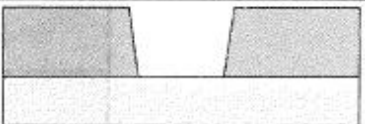
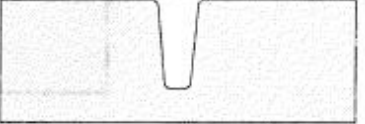
湿法各向同性化学腐蚀

各向异性刻蚀是仅在一个方向刻蚀



具有垂直刻蚀剖面的各向异性刻蚀

湿法腐蚀和干法刻蚀的侧壁剖面

刻蚀类型	侧壁剖面	示意图
湿法腐蚀	各向同性	
干法刻蚀	各向同性（与设备和参数有关）	
	各向异性（与设备和参数有关）	
	各向异性——锥形	
	硅槽	

刻蚀偏差

定义：刻蚀以后线宽或关键尺寸间距的变化。

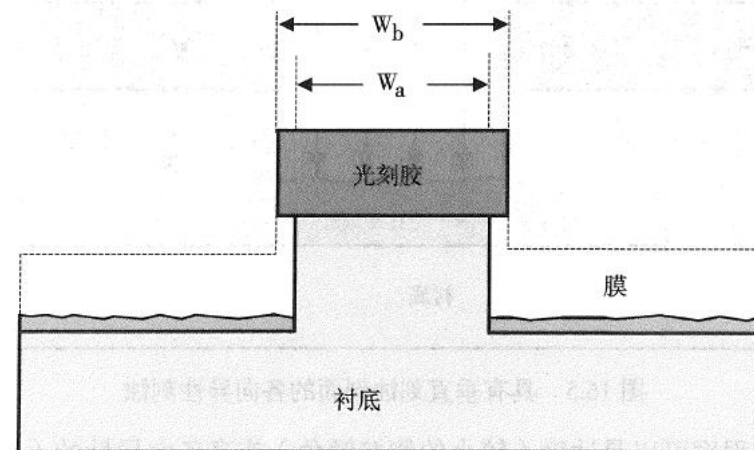
成因：通常由于横向钻蚀引起，但也能由刻蚀剖面引起。

当刻蚀中要去除掩膜下过量的材料时，会引起被刻蚀材料的上表面向光刻胶边缘凹进去，这样就会产生横向钻蚀。计算刻蚀偏差的公式如下：

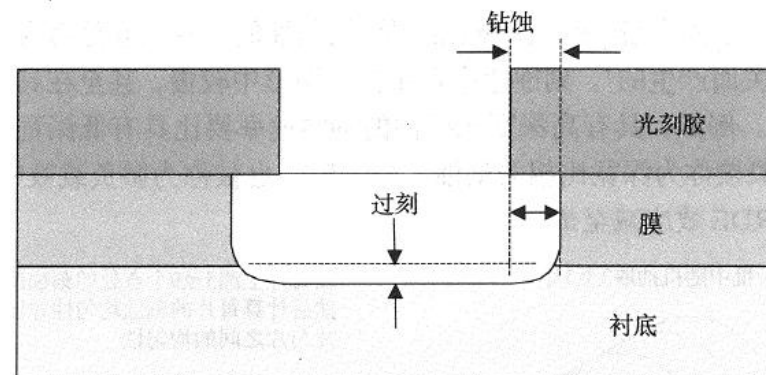
$$\text{刻蚀偏差} = W_b - W_a$$

其中， W_b =刻蚀前光刻胶的线宽

W_a =光刻胶去掉后被刻蚀材料的线宽



刻蚀偏差



刻蚀中的横向钻蚀和倾斜

选择比

定义：被刻蚀材料的刻蚀速率与另一种材料的刻蚀速率的比。指的是在同一刻蚀条件下一种材料与另一种材料相比刻蚀速率快多少。

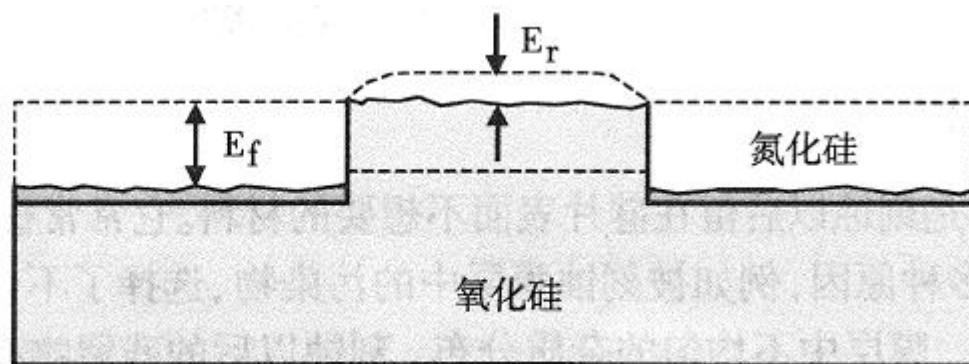
高选择比意味着只刻除想要刻去的那一层材料。

公式： $S_R = \frac{E_f}{E_r}$

其中， E_f =被刻蚀材料的刻蚀速率

E_r =掩蔽层材料的刻蚀速率（如光刻胶）

$$S = \frac{E_f}{E_r}$$



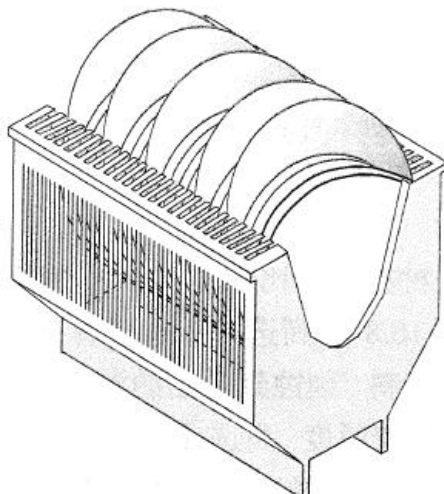
刻蚀选择比

均匀性

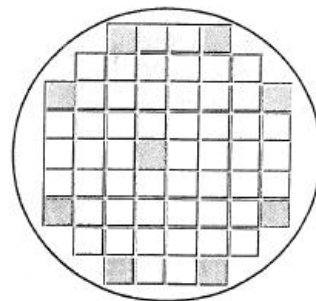
定义：一种衡量刻蚀工艺在整个硅片上，或整个一批，或批与批之间刻蚀能力的参数。

非均匀性刻蚀会产生额外的过刻蚀。保持硅片的均匀性是保证制造性能一致的关键。难点在于刻蚀工艺必须在刻蚀具有不同图形密度的硅片上保证均匀性。

在一批中随机抽取3至5片



在每片上测5至9个点处的刻蚀速率，然后计算每片的刻蚀均匀性并比较片与片之间的均匀性



刻蚀均匀性

深宽比相关刻蚀（ARDE）：

具有高深宽比硅槽的刻蚀速率要比具有低深宽比硅槽的刻蚀速率慢。这一现象也被称为微负载效应。为了提高均匀性，必须把硅片表面的ARDE效应减至最小。

残留物

刻蚀残留物是刻蚀以后留在硅片表面不想要的材料。它常常覆盖在腔体内壁或被刻蚀图形的底部。它的产生有多种原因，例如被刻蚀膜层中的污染物、选择了不合适的化学刻蚀剂（如刻蚀太快）、腔体中的污染物、膜层中不均匀的杂质分布。刻蚀以后的残留物有不同的名称，包括长细线条、遮蔽物、冠状物和栅条。长细线条是一些没有完全去除干净的细小的被刻蚀材料残留物，具有电活性，能在图形之间形成不希望的短路。刻蚀残留物是IC制造过程中的硅片污染源，并能在去除光刻胶过程中带来一些问题。为了去除刻蚀残留物，有时在刻蚀完成后会进行过刻蚀。在一些情况下，刻蚀残留物可以在去除光刻胶的过程中或用湿法化学腐蚀去掉。

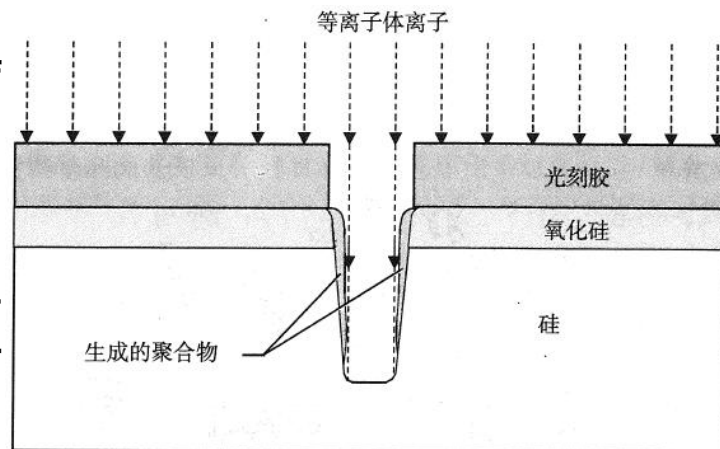
聚合物

聚合物的形成有时是有意的,是为了在刻蚀图形的侧壁上形成抗腐蚀膜从而防止横向刻蚀。这样做能形成高的各向异性图形,因为聚合物能阻挡对侧壁的刻蚀,增强刻蚀的方向性,从而实现对图形关键尺寸的良好控制。这些聚合物是在刻蚀过程中由光刻胶中的碳转化而来并与刻蚀气体(如 C_2F_4)和刻蚀生成物结合在一起而形成的。能否形成侧壁聚合物取决于所使用的刻蚀气体类型。

这些侧壁聚合物很复杂,包括刻蚀剂和反应的生成物,例如,铝、阻挡层的钛、氧化物以及其他无机材料。聚合物链有很强的难以氧化和去除的碳氟键。然而,这些聚合物又必须在刻蚀完成以后去除,否则器件的成品率和可靠性都会受到影响。

这些侧壁的清洗常常需要在等离子体清洗工艺中使用特殊的化学气体,或者有可能用强溶剂进行湿法清洗后再用去离子水进行清洗。

非常遗憾,聚合物淀积的一个不希望的副作用是工艺腔中的内部部件也被聚合物覆盖刻蚀工艺腔需要定期的清洗来去除聚合物或替换掉不能清洗的部件。



聚合物侧壁钝化来提高各向异性

等离子体诱导损伤

包含带能离子、电子和激发分子的等离子体可引起对硅片上的敏感器件引起等离子体诱导损伤。一种主要的损伤是非均匀等离子体在晶体管栅电极产生陷阱电荷，引起薄栅氧化硅的击穿。另一种器件损伤是能量离子对曝露的栅氧化层的轰击。在刻蚀过程中，这种损伤在刻蚀的时候能在栅电极的边缘发生。等离子体损伤有时可以通过退火或湿法化学腐蚀消除。

颗粒沾污

等离子体带来的硅片损伤有时也由硅片表面附近的等离子体产生的颗粒沾污而引起。研究表明，由于电势的差异，颗粒产生在等离子体和壳层的界面处。当没有了等离子体时，这些颗粒就会掉到硅片表面。氟基化学气体等离子体比氯基或溴基等离子体产生较少的颗粒，因为氟产生的刻蚀生成物具有较高的蒸气压。颗粒沾污的控制可通过优化刻蚀设备，合适的操作和关机，对被刻蚀的膜层选用合适的化学气体。

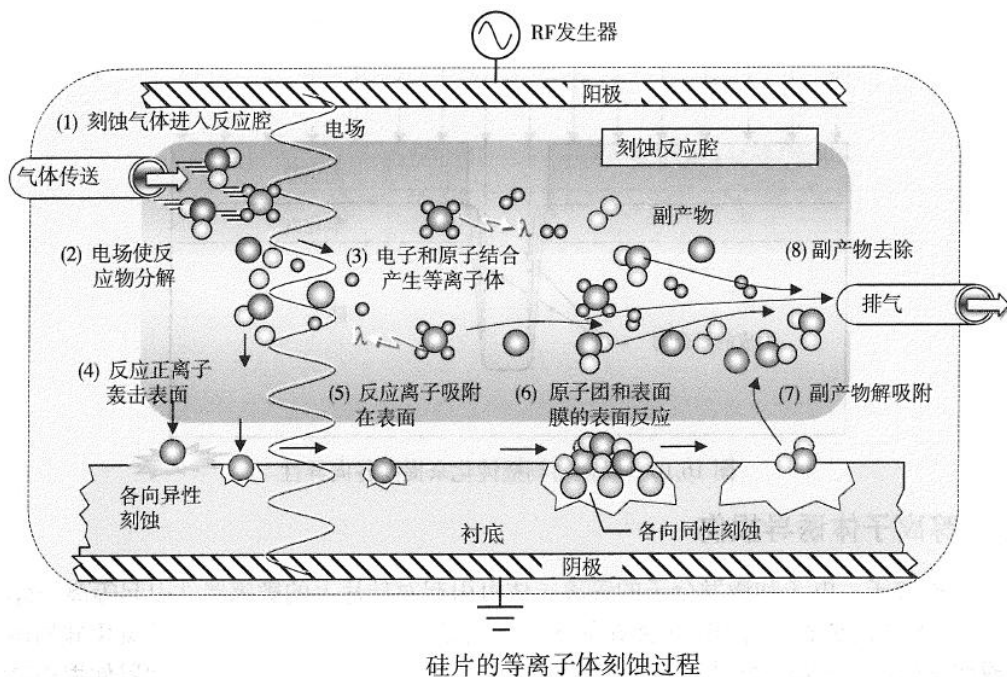
干法刻蚀

干法刻蚀是**最主要的**用来去除表面材料的刻蚀方法。

干法刻蚀主要**目的**：完整地把掩膜图形复制到硅片表面上。

干法刻蚀的**缺点**：对下层材料的刻蚀选择比较差、等离子体带来的器件损伤和昂贵的设备。

在干法刻蚀中，用低压等离子体放电来去除集成电路中小尺寸图形里的材料。等离子体与硅片表面发生反应，然后去除表面材料。



干法刻蚀与湿法腐蚀相比的优点

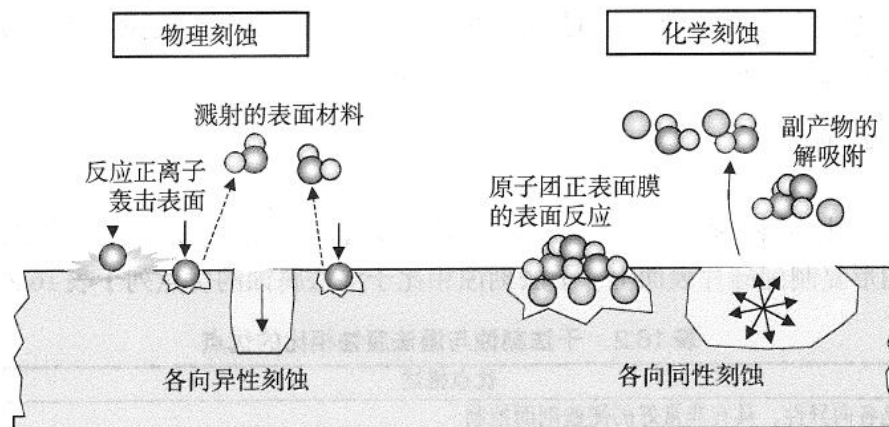
优点描述

1. 刻蚀剖面是各向异性，具有非常好的侧壁剖面控制
2. 好的 CD 控制
3. 最小的光刻胶脱落或粘附问题
4. 好的片内、片间、批次间的刻蚀均匀性
5. 较低的化学制品使用和处理费用

刻蚀作用

干法刻蚀系统中，刻蚀作用是通过化学作用或物理作用，或者是化学和物理作用的共同作用来实现的。

纯化学机理：等离子体产生的反应元素（自由基和反应原子）与硅片表面的物质发生反应。



化学和物理的干法刻蚀机理

纯物理机理：等离子体产生的带能粒子（轰击的正离子）在强电场下朝硅片表面加速，这些离子通过溅射刻蚀作用去除未被保护的硅片表面材料。常用气体：氩

优点：刻蚀方向性强，从而可以获得高的各向异性刻蚀剖面，以达到好的线宽控制目的。刻蚀速率高。

缺点：选择比差

物理化学混合作用机理：离子轰击改善化学刻蚀作用。刻蚀剖面可以通过调节等离子体条件和气体组分从各向同性向各向异性改变。

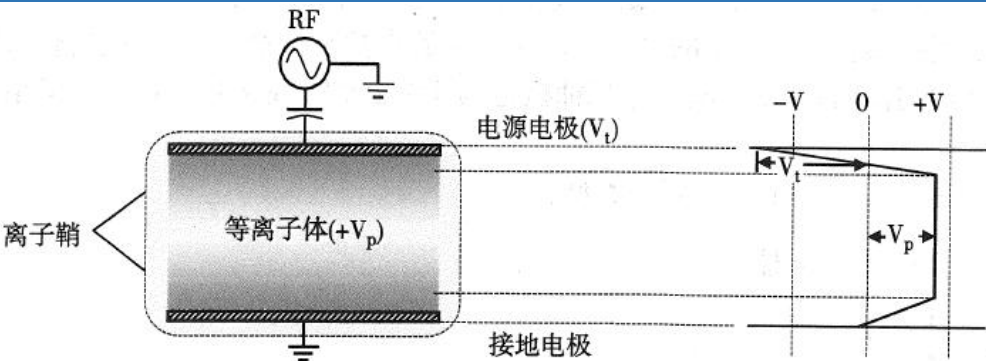
优点：能获得好的线宽控制并有不错的选择比，因而在大多数干法刻蚀工艺中被采用。

化学干法等离子体刻蚀和物理干法等离子体刻蚀

刻蚀参数	物理刻蚀 (RF 电场 垂直于硅片表面)	物理刻蚀 (RF 电场 平行于硅片表面)	化学刻蚀	物理和化学刻蚀
刻蚀机理	物理离子溅射	等离子体中的活性基 与硅片表面反应 *	液体中的活性基 与硅片表面反应	在干法刻蚀中, 刻 蚀包括离子溅射和 活性元素与硅片表 面的反应
侧壁剖面 选择比	各向异性 差 / 难以提高 (1: 1)	各向同性 一般 / 好 (5: 1 至 100: 1)	各向同性 高 / 很高 (高于 500: 1)	各向同性至各向异性 一般 / 高 (5: 1 至 100: 1)
刻蚀速率	快	适中	慢	适中
线宽控制	一般 / 好	差	非常差	好 / 非常好

电势分布

等离子体辉光放电区域中的等离子体电势分布对刻蚀系统的刻蚀能力有很大的影响。这是因为轰击被刻蚀表面的颗粒能量的数量与电势分布有关。



刻蚀机辉光放电区域原理图和电势分布

改变等离子体刻蚀参数的影响

刻蚀参数的增加 (↑) 或减小 (↓)		离子能量	直流偏置	刻蚀速率	选择比	物理刻蚀
RF 频率	↑	↓	↓	↓	↑	↓
	↓	↑	↑	↑	↓	↑
RF 功率	↑	↑	↑	↑	↓	↑
	↓	↓	↓	↓	↑	↓
直流偏置	↑	↑	↑	↑	↓	↑
	↓	↓	↓	↓	↑	↓
电极尺寸	↑	↓	↓	↓	↑	↓
	↓	↑	↑	↑	↓	↑

等离子体刻蚀反应器

一个等离子体干法刻蚀系统的**基本部件**：发生刻蚀反应的反应腔、一个产生等离子体的射频电源、气体流量控制系统、去除刻蚀生成物和气体的真空系统。

刻蚀系统包括传感器、气体流量控制单元和终点触发探测器。

刻蚀中用到大量**化学气体**：氟刻蚀二氧化硅，氯和氟刻蚀铝，氯、氟和溴刻蚀硅，氧去除光刻胶。

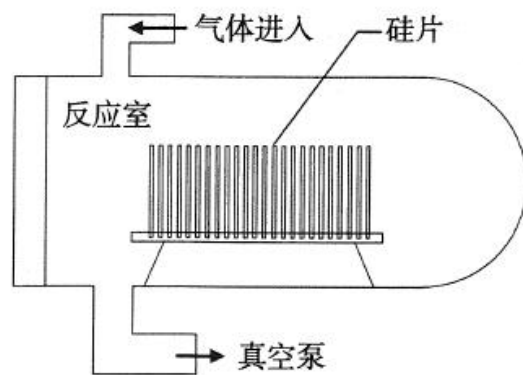
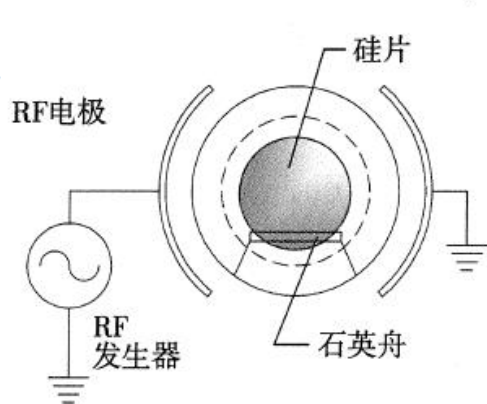
干法等离子体刻蚀中不同的**控制参数**：真空度、气体混合组分、气流流速、温度、射频功率和硅片相对于等离子体的位置。

干法等离子体**反应器的类型**：

- 圆桶式等离子体反应器
- 平板（平面）反应器
- 顺流刻蚀系统
- 三极平面反应器
- 离子铣
- 反应离子刻蚀（RIE）
- 高密度等离子体刻蚀机

圆桶式等离子体刻蚀机

圆桶式反应器是圆柱形的，在0.1-1托压力下具有几乎完全的化学各向同性刻蚀。硅片垂直、小间距地装在一个石英舟上。射频功率加在圆柱两边的电极上。通常有一个打孔的金属圆柱形刻蚀隧道，它把等离子体限制在刻蚀隧道和腔体壁之间的外部区域。硅片与电场平行放置使物理刻蚀最小。

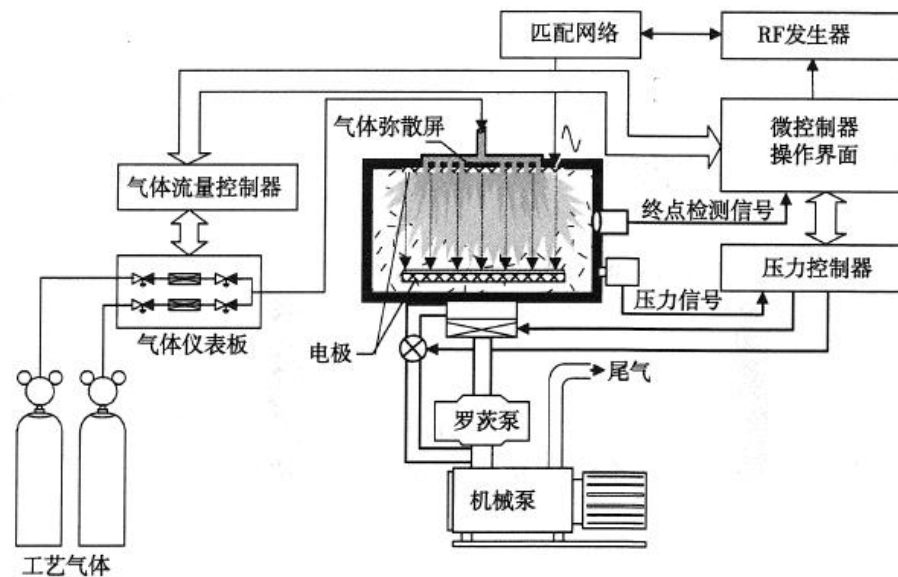


典型的圆桶式反应器结构

等离子体中的刻蚀基扩散到刻蚀隧道内，而等离子体中的带能离子和电子没有进入这一区域。这种刻蚀是具有各向同性和高选择比的纯化学过程。因为硅片表面没有物理的轰击，因而它具有最小的等离子体诱导损伤。圆桶式等离子体反应器主要用于硅片表面的去胶。氧是去胶的主要刻蚀剂。

平板（平面）反应器

平板(平面)反应器有两个大小和位置对称的平行金属板，一个硅片背面朝下放置于接地的阴极上面，RF信号加在反应器的上电极。由于等离子体电势总是高于地电势，因而这是一种带能离子进行轰击的等离子体刻蚀模式

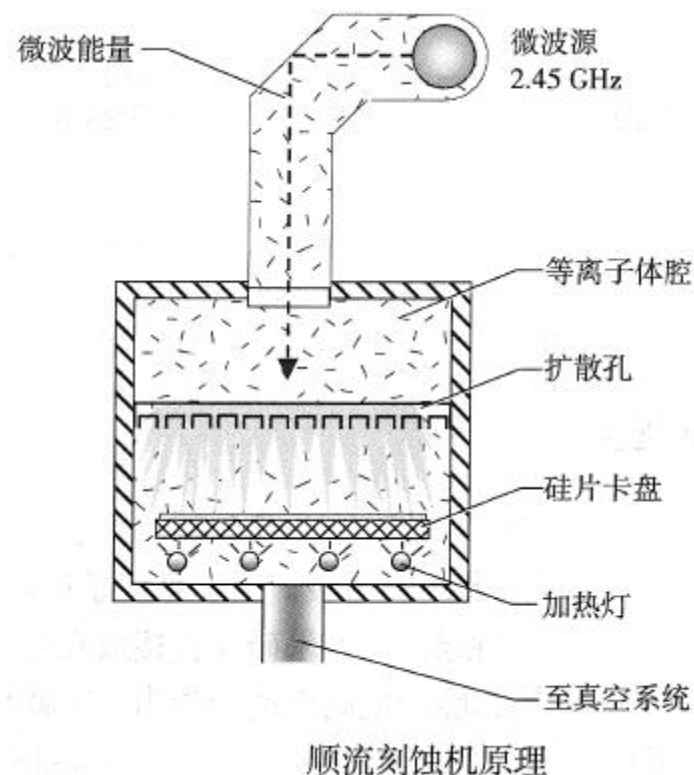


平板等离子体刻蚀

如果硅片直接放在加RF功率的电极上，硅片与等离子体和带能离子就直接接触，这种接触能产生高能离子轰击，这就是所说的反应离子刻蚀模式。在等离子体刻蚀和反应离子刻蚀模式中，物理和化学刻蚀两种机理都存在，只不过在反应离子刻蚀模式中轰击离子的能量要高约10倍。必须有诸如 F_2 和 O_2 之类的反应气体来产生等离子体。反应器在大约0.1-1托的压力下工作，并用高的RF功率来控制刻蚀速率。单片的平板刻蚀机在今天被普遍采用。

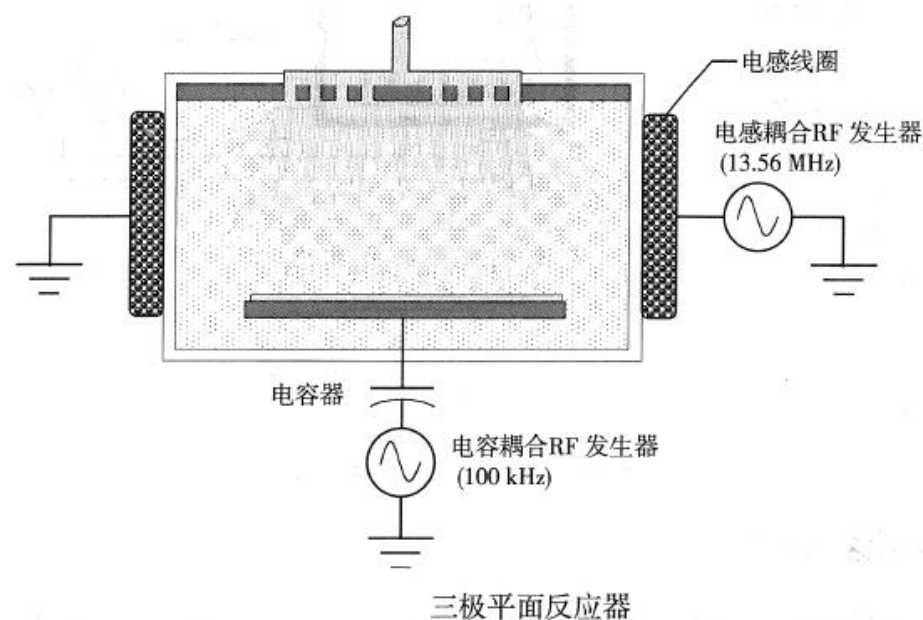
顺流刻蚀系统

硅片表面反复地曝露于离子轰击中增加了器件损伤的可能性。在顺流刻蚀机中，一种减少由于离子轰击产生的对硅片表面损伤和热量增长的方法是**限制硅片刻蚀区远离等离子体**。等离子体是在大约0.1-1托的压力下，在一个独立的源中产生的，被传输到工艺腔中，并均匀地分布于加热的硅片表面。由于没有离子进行方向性的刻蚀，因而顺流刻蚀机采用的是化学刻蚀，是各向同性的，通常用于去胶或去除别的非关键层。在顺流刻蚀中用于激发等离子体的微波源普遍使用，因为它能产生最大的氧原子浓度和最低的氧离子浓度，能产生最小的器件损伤和高的刻蚀速率。



三极平面反应器

三极平面反应器增加第三个电极来达到控制离子轰击数量的目的。其中电感耦合的RF源在大约 10^{-3} 托产生离子和反应基。低频发生器控制离子的轰击。这种反应器的典型应用是单晶硅槽刻蚀。



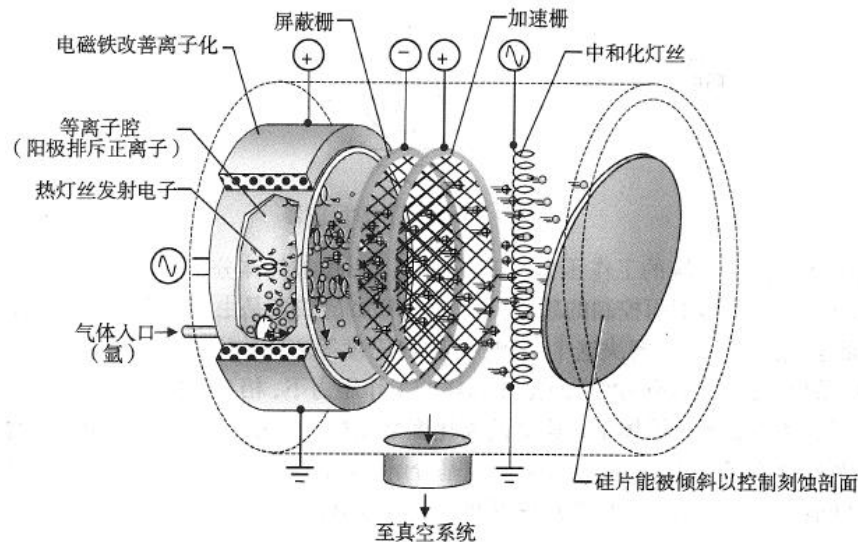
离子铣

定义：离子铣，也称为离子束刻蚀(IBE)，是具有强方向性等离子体的一种物理刻蚀机理。它对小尺寸图形产生各向异性刻蚀。等离子体通常是由电感耦合RF源或微波源产生的。

热灯丝发射快速运动的电子。氩原子通过扩散进入等离子体腔内。电磁场环绕等离子体腔，磁场使电子在圆形轨道上运动，这种循环

运动使得电子与氩原子产生多次碰撞，从而产生大量的正氩离子，正氩离子被从带格栅电极的等离子体源中引出并用一套校准的电极来形成高密度束流。一个高压加速格栅把离子能量加至2.5keV。

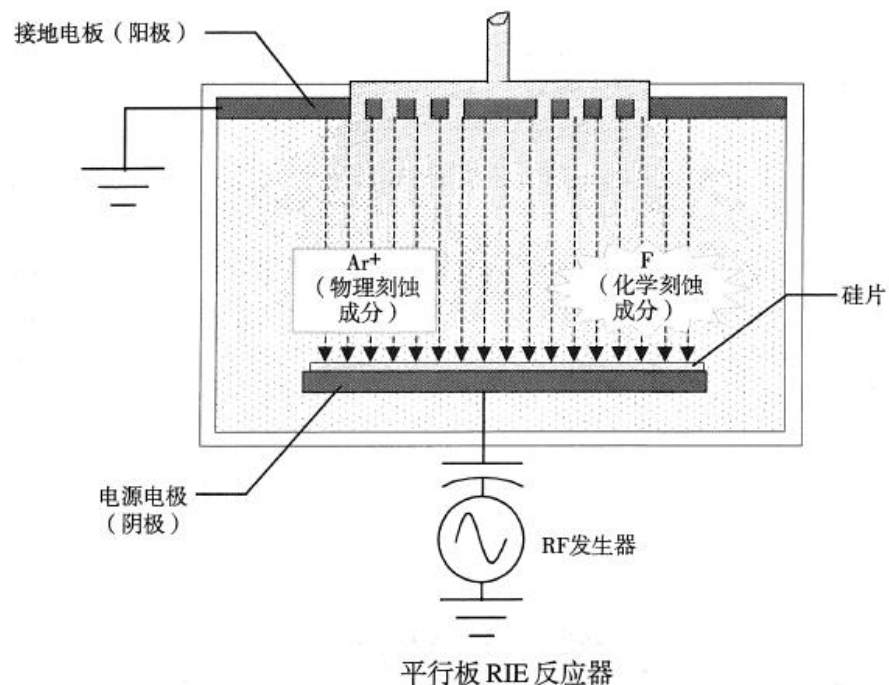
离子束刻蚀用于刻蚀金、铂和铜等难刻蚀的材料。硅片可以倾斜以获得不同的侧壁形状。限制离子束刻蚀机在半导体工艺中广泛使用的主要问题是它的低选择比(通常低于3:1)和低产能的刻蚀速率。



离子束刻蚀机的原理

反应离子刻蚀

反应离子刻蚀(RIE)是种采用化学反应和物理离子轰击去除硅片表面材料的技术。除了硅片是放置于加RF源的电极(阴极)上以及该电极比接地电极尺寸大大减小以外, RIE与标准的平行板等离子体刻蚀机是类似的。在这种方式下, 在阴极产生个直流自偏置电压, 使得硅片与等离子体有一个大的电压差。这使朝硅片运动的离化基具有方向性, 因而可以获得较好的各向异性侧壁图形。在阳板上没有溅射, 工作压力低于0.1托。



高密度等离子体刻蚀机

用于刻蚀关键层最主要的刻蚀方法：单片处理的高密度等离子体刻蚀技术。

高密度指的是在同样的工作压力下，相对于传统等离子体的等离子体中活性基的数目。在传统等离子体中，典型的离化度是在0.01%-0.1%。高密度等离子体技术更有效地使输入功率耦合等离子体，产生较大的刻蚀基分解，从而获得高达10%的离化率。这种技术产生高方向性的低能离子，在高深宽比图形中获得各向异性刻蚀。

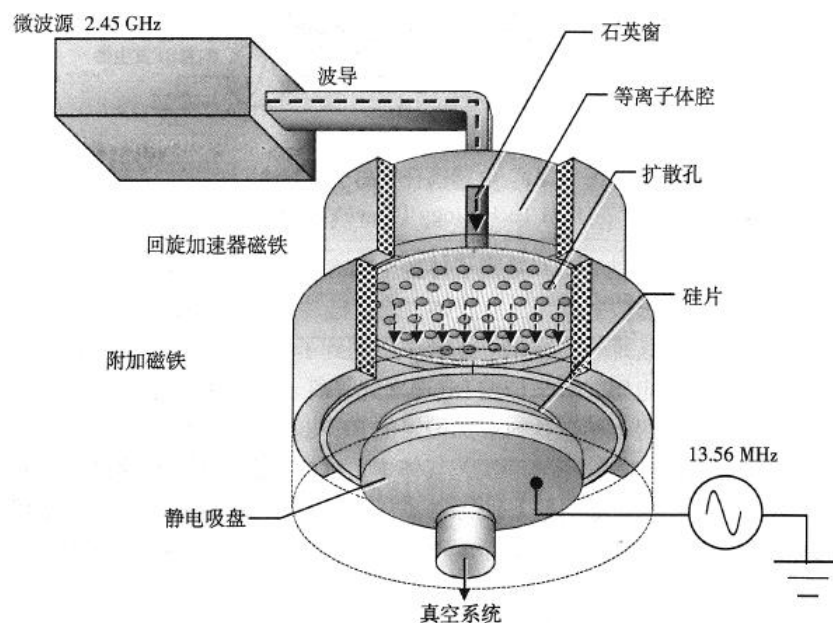
高密度等离子体刻蚀机中等离子体通常处于磁场中的理由是：

- (1) 更有效地获得进入高深宽比窗口的高方向性低能离子，以及较少的硅片损伤；
- (2) 等离子体密度较大，有更多的反应基和带电粒子以增大刻蚀速率；
- (3) 能减小硅片上的直流偏置电压，从而减少粒子轰击（或损伤）。

■电子回旋加速震荡（ECR）

工作原理：ECR反应器在1~10毫托的工作压力下产生很密的等离子体。它在磁场环境中采用2.45GHz微波激励源来产生高密度等离子体。

ECR反应器的一个关键点是磁场平行于反应剂的流动方向，这使自由电子由于磁力的作用做螺旋形运动。当电子的回旋频率（电子回旋加速震荡频率）等于所加的微波电场频率时，能有效地把电能转移到等离子体中的电子上。



电子回旋加速反应器的原理图

这种震荡增加了电子碰撞的可能性，从而产生高密度的等离子体，获得大的离子流。这些反应离子朝硅片表面运动并与表面层反应而引起刻蚀反应。

一个低功率的RF偏置（13.56MHz）或直流偏置能加到装有硅片的电极上，用来控制轰击硅片表面的离子能量。这使得ECR工作于混合的物理和化学刻蚀机理。

优点：产生高的各向异性刻蚀图形

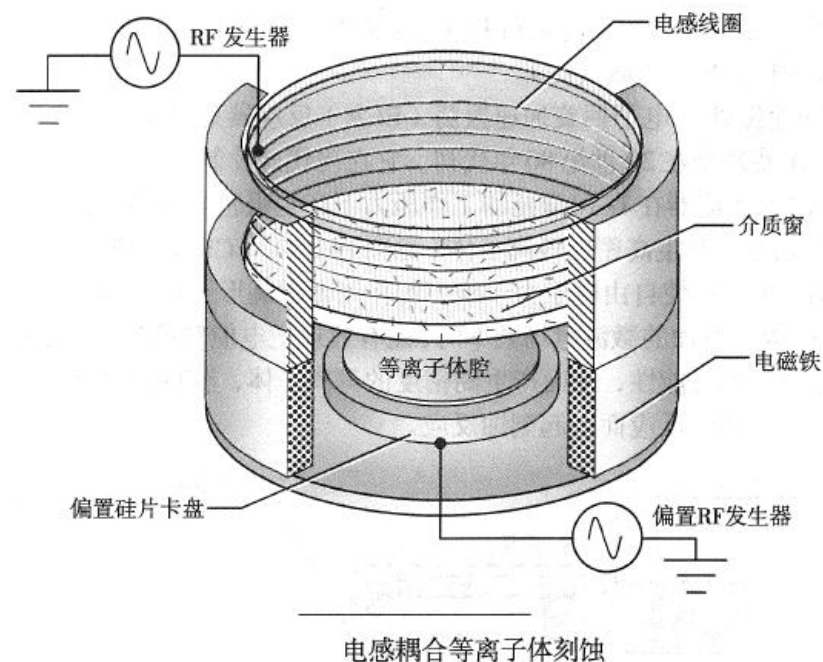
缺点：设备复杂度高

■ 电感耦合等离子体 (ICP)

另一种能减弱硅片上等离子体耦合的**高密度、低压刻蚀反应器**是电感耦合等离子体反应器 (ICP)。

优势：同ECR相比，它**简单并且便宜**，在美国被**广泛使用**。

工作原理：ICP通过用绝缘板或石英管与等离子体隔开的螺旋线圈产生等离子体。由于硅片是放在远离线圈的地方，因而它不受电磁场的影响。硅片能加偏置来获得化学和物理刻蚀。这种反应器能在高深宽比窗口中获得**各向异性**的侧壁剖面。

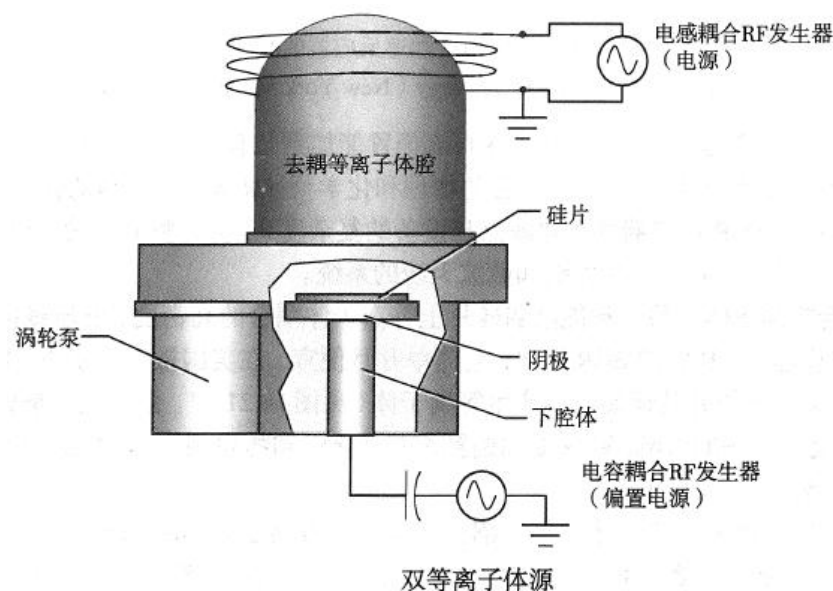


■双等离子体源

双等离子体源的4个主要部分：源功率单元、上腔体、放置硅片的下腔体、一个可移动的电极。

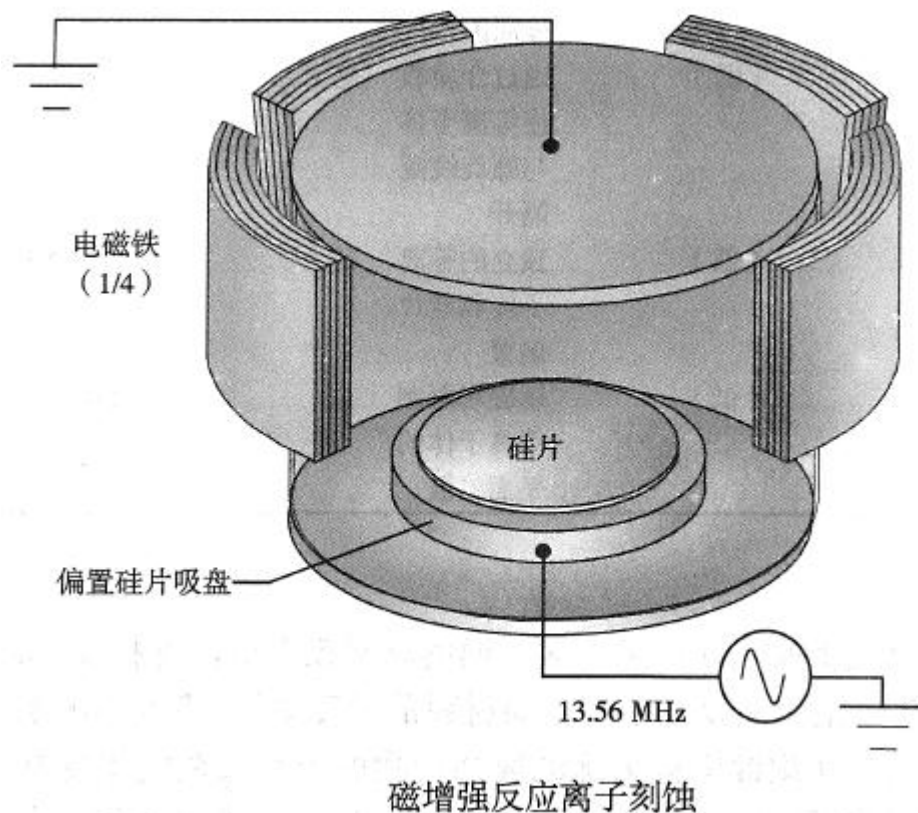
在这一系统中也用到了两个RF功率源。为了产生反应离子和中性基，源功率单元中有一个电感线圈来传输RF功率到等离子体，这称为**源功率**。源功率单元有一个温度控制系统。加在硅片电极上给硅片衬底加偏置的RF功率称为偏置功率。硅片阴极是沿垂直方向可移动的。只有上腔体曝露在等离子体和工艺气体中，这样能保持下腔体干净并使其易于维护。

这种 DPS等离子体的一个**关键问题**是：使源等离子体功率从偏置功率去耦，这种设计可以更好地控制离子密度和离子能量，从而对化学和物理刻蚀有一个更大的工艺窗口。改善了关键尺寸的控制并产生较少的残留物。



■磁增强反应离子刻蚀(MERIE)

磁增强反应离子刻蚀(MERIE)反应器(也称磁电管)是种物理作用和化学作用混合的刻蚀系统。在这种系统中除了有一个使等离子体远离腔体壁并在硅片附近增加电子和离子浓度从而产生高密度等离子体的磁场外,其余部分都与反应离子刻蚀反应器相同。这一磁场能通过三相交流电源来旋转或在偶极环形磁系统中自然地旋转。用磁场来限制等离子体以产生高密度等离子体并容许低压工作,有效地保证持刻蚀的方向性和均匀性,特别是在刻蚀高深宽比图形时更有效。



刻蚀系统评价

干法刻蚀机比较							
类型	刻蚀机理	压力（托）	结构设置	是否是高密度等离子体	偏置	偏置源	图形剖面
圆桶式	化学	10 ⁻¹ ~1	线圈或电极在容器外	否	在盒子中	RF	各向同性
平行板（平面）式	物理和化学	10 ⁻¹ ~1	平面二极管（两电极）	否	在加功率的电极上（阳极或地电极）	RF	各向异性 和各向同性
顺流等离子体	化学	10 ⁻¹ ~1	线圈或电极在容器外	否	在顺流等离子体盒子中	RF或微波	各向同性
平面三极	物理	10 ⁻³	三极（三个电极）	否	在加功率的电极上		各向异性
离子铣	物理和化学	10 ⁻⁴	平面三极	否	在加功率的电极上（阳极）		各向异性
反应离子刻蚀（RIE）	物理	<0.1	平面或圆柱形二极	否	在阴极上		各向异性

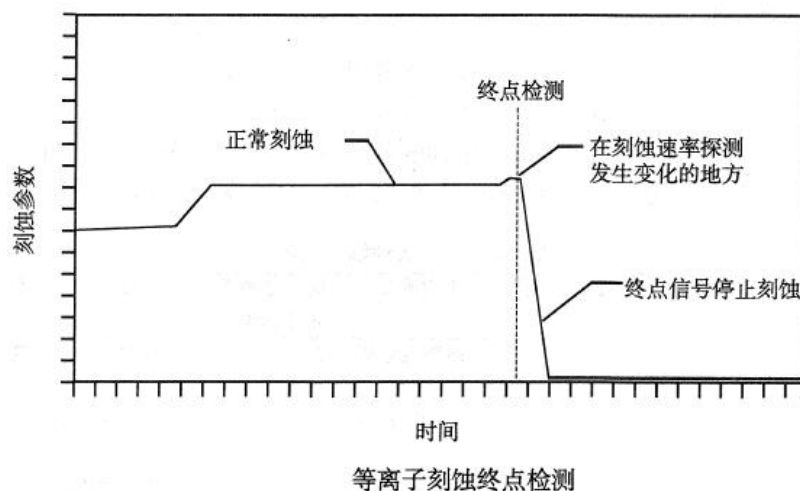
类型	刻蚀机理	压力（托）	结构设置	是否是高密度等离子体	偏置	偏置源	图形剖面
电子回旋加速振荡（ECR）	物理	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³ （低）	磁场平行与等离子体流动方向	是	在阴极上	RF或直流	各向异性
分布式ECR	物理	（低）	磁铁分布于中心等离子体周围	是	在阴极上	RF或直流	各向异性
感应耦合等离子体（ICP）	物理	（低）	通过介质板使等离子体与螺旋线圈隔开	是	在阴极上	RF或直流	各向异性
双等离子体源	物理	（低）	独立的等离子体和硅片偏置	是	在阴极上	RF或直流	各向异性
磁增强反应离子刻蚀（MERIE）	物理	（低）	用磁场限制等离子体的平面二极	是	在阴极上	RF或直流	各向异性

终点检测

终点检测原因：干法刻蚀不同于湿法腐蚀之处在于它对下面的材料没有好的选择比。所以需要终点检测来监测刻蚀工艺并停止刻蚀以减小对下面材料的过度刻蚀。

参数：刻蚀速率的变化、刻蚀中被去除的腐蚀产物的类型、在气体放电中活性反应剂的变化 等

方法：光发射谱



■光发射谱

在气体辉光放电中被激发的原子或分子所发出的光可用光发射谱来分析，从而鉴别出该元素。发射的光通过一个带有允许特殊波长的光通过的带过滤器的探测器，从而鉴别出被刻蚀的材料。在等离子体中，发射光的强度与相关元素的相对浓度有关。根据这一点，**终点检测器能够检测出什么时候刻蚀材料已被刻完并进行下层材料的刻蚀。**光发射谱是终点检测中最常用的一种方法,因为它易于获得高的灵敏度。

在等离子体刻蚀中被激发的基团的特征波长

材料	刻蚀气体的发射基团	反应产物	波长 (纳米)
硅	CF_4/O_2	SiF	440; 777
	Cl_2	SiCl	287
二氧化硅	CHF_3	CO	484
铝	Cl_2	Al	391; 394; 396
	BCl_3	AlCl	261
光刻胶	O_2	CO	484
		OH	309
		H	656
氮气	N_2 (用于刻蚀前后的净化气体)	N_2	337
		NO	248

等离子体刻蚀反应器

刻蚀腔体的真空

在刻蚀过程中真空系统是很关键的,因为它影响一些与气体流量和压力有关的等离子体参数。用于刻蚀的一个典型的高密度等离子体真空系统,在硅片表面的气体流量高达800 scem下能获得1毫托范围内或以下的腔体压力。真空部件必须有能力处理在刻蚀中产生的具有腐蚀性的刻蚀产物。用于刻蚀工艺的真空泵一般是采用涡轮泵、罗茨泵和干泵。涡轮泵一般放在离腔体最近的地方以便获得最大的硅片表面抽速,而其他泵放置于别处。

用于刻蚀的氟气、氧气和溴气由于它们的反应特性,可有效去除硅片表面的膜层。无用的反应剂和刻蚀生成物被高速抽走。刻蚀生成物的高反应性会腐蚀真空系统部件,因而需要特殊的设计,如轴承的氦气清洗等。

干法刻蚀的应用

一个成功的干法刻蚀**要求**:

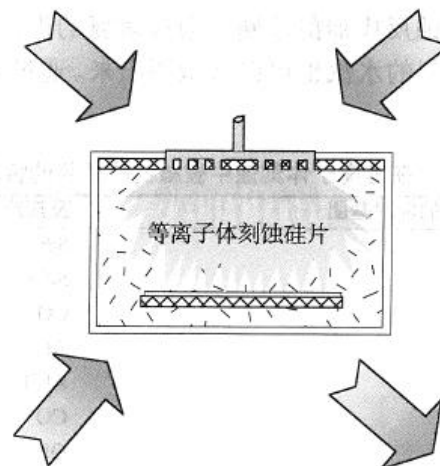
- 1.对不需要刻蚀的材料(主要是光刻胶和下层材料)的高选择比。
- 2.获得可接受的产能的刻蚀速率。
- 3.好的侧壁剖面控制。
- 4.好的片内均匀性。
- 5.低的器件损伤。
- 6.宽的工艺制造窗口。

设备参数:

- 设备设计
- 电源
- 电源频率
- 压力
- 温度
- 气流速率
- 真空状况
- 工艺菜单

工艺参数:

- 等离子体 - 表面相互作用
 - 表面材料
 - 复合金属的不同层
 - 表面温度
 - 表面电荷
 - 表面形貌
- 化学和物理要求
- 时间



其他相关因素:

- 净化间规范
- 操作过程
- 维护过程
- 预防维护计划

质量指标:

- 刻蚀速率
- 选择比
- 均匀性
- 特性曲线
- 关键尺寸
- 残留物

干法刻蚀中的关键参数

介质的干法刻蚀

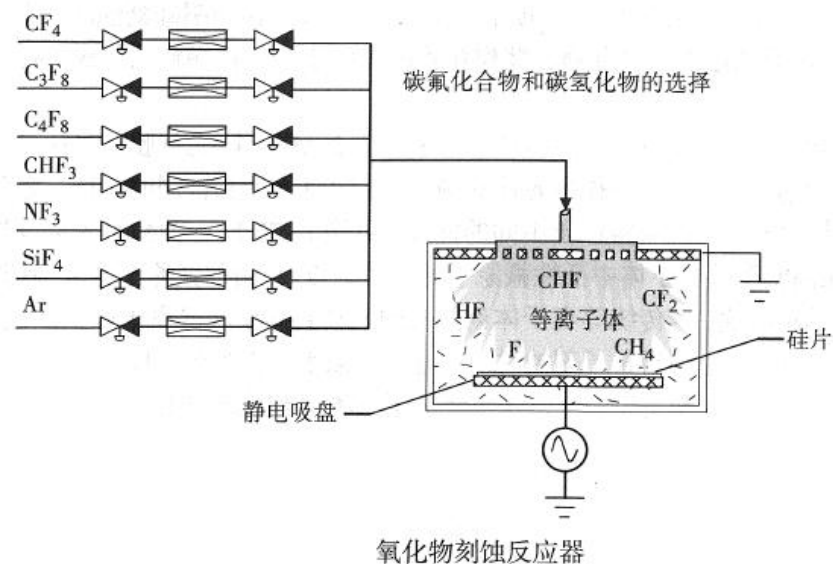
■ 氧化物

刻蚀氧化物目的：制作接触孔和通孔

要求：在氧化物中刻蚀出具有高深宽比的窗口

常用气体：氟碳化合物→氟化的碳氢化合物，在碳氢化合物中有一个或几个氢原子被氟原子替代。常用气体为 CF_4 ，它有高的刻蚀速率但对多晶硅的选择比不好。

缓冲气体：Ar、He等，加入到刻蚀气体中。



下层材料的选择比

氧化物刻蚀的主要困难之一：获得对下一层材料（通常是硅、氮化硅或一层抗反射涂层）的高选择比

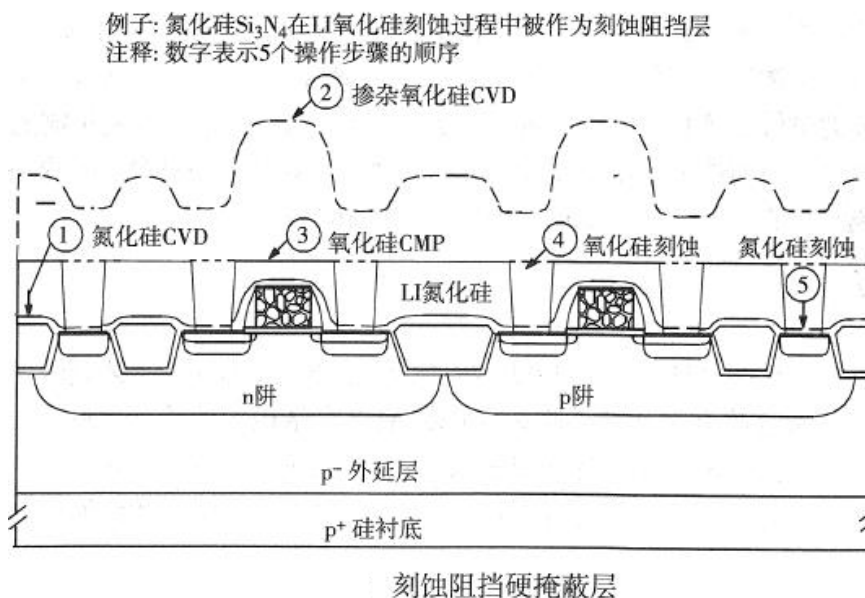
获得对硅的高选择比的方法：

①在化学气体中加入氧气来控制氧化物和硅之间的选择比。少量氧气能改善氧化物刻蚀和硅刻蚀的速率。当氧气浓度大至大约20%时，氧化物刻蚀比硅刻蚀快，增大了选择比，减少了对下层硅的刻蚀。

②在气体混合物中加入氢气，减少硅的刻蚀速率。当氢气浓度达到约40%时，硅刻蚀速率几乎为零。

③通过增加一层硬的“刻蚀阻挡层”氮化硅。这需要好的氧化物/氮化硅选择比。由于此种方法要增加工艺步骤，只在必要时使用。

氧化硅/硅的选择比可以通过在硅表面形成一层钝化聚合物来获得。但此种方法在刻蚀过程中聚合物会淀积在腔体表面形成一种颗粒沾污源，因此需要经常清洗刻蚀系统。



光刻胶选择比

为了防止形成倾斜的侧墙，获得高的氧化硅/光刻胶选择比是很重要的。

减小光刻胶选择比的因素（不利因素）：高密度等离子体中活性氟原子的有效生成。自由的氟原子会刻蚀掉有机光刻胶，这降低了光刻胶的选择比。

另外，需要刻蚀抗反射涂层，这延长了刻蚀时间，进一步减小了光刻胶厚度。

侧壁剖面

影响高度各向异性的垂直侧壁剖面形成的重要因素：

- ①高密度等离子体中高方向性的离子轰击
- ②光刻胶的选择比

■氮化硅

硅片制造过程中用到的两种基本氮化硅：

- ①在700~800°C下用LPCVD淀积的，产生按 Si_3N_4 组分比的氮化硅膜
- ②在低于350°C下用PECVD淀积的氮化硅。它的低密度，此种氮化硅膜刻蚀速率较快。

常用的刻蚀氮化硅所用气体： CF_4 ，并与 O_2 和 N_2 混合使用。

增加 O_2/N_2 的含量来稀释氟基的浓度并降低对氧化物的高选择比。

硅的干法刻蚀

用等离子体刻蚀的两个主要硅层：

1. 制作MOS栅结构的多晶硅栅
2. 制作器件隔离或DRAM电容结构中的单晶硅槽

多晶硅等离子刻蚀**常用气体**：氧气、溴气或氟气、氯气。

氯气(Cl_2)能产生各向异性的硅侧壁剖面并对氧化硅具有好的选择比(对多晶硅/氧化硅和多晶硅/氮化硅的选择比大于10:1)。

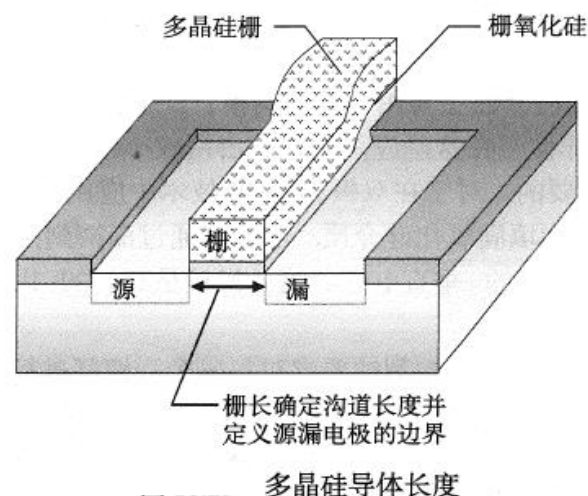
用溴基气体(如 Br_2 或 HBr)来刻蚀硅是各向异性的并对氧化硅和氮化硅的选择比很高(大于100),这对栅氧化层上多晶硅栅的刻蚀很重要。对光刻胶的选择比,溴气比氯气要好。

另一种硅刻蚀气体是氯气和溴气的混合气体,如 HBr 和 Cl_2 加 O_2 。加 O_2 是为了**提高刻蚀速率**和**对氧化硅的选择比**。用氟气和氟气刻蚀时产生的聚合物淀积在侧壁上,从而可以**控制侧壁形状**。

用氟气、氯气和溴气刻蚀时产生的 SiF_4 、 SiCl_4 和 SiBr_4 都是挥发性的**刻蚀生成物**。

■ 多晶硅栅刻蚀

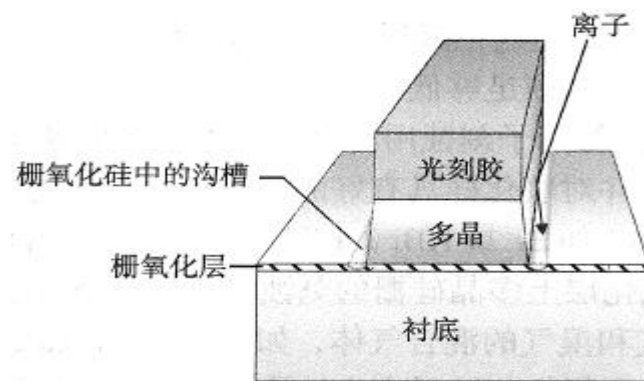
多晶硅栅的刻蚀工艺必须对下层栅氧化层有高的选择比并具有非常好的均匀性和可重复性。同时也要求高度的各向异性，因为多晶硅栅在源/漏的注入过程中起阻挡层的作用。倾斜的侧壁会引起多晶硅栅结构下面部分的掺杂。



刻蚀多晶硅(硅)通常是一个三步工艺过程:

1. **预刻蚀**。用于去除自然氧化层、硬的掩藏层(如SiON)和表面污染物来获得均匀的刻蚀(这减少了刻蚀中作为微掩蔽层的污染物带来的表面缺陷)。
2. **刻至终点的主刻蚀**。这一步用来刻蚀掉大部分的多晶硅膜，并不损伤栅氧化层和获得理想的各向异性的侧壁剖面。
3. **过刻蚀**。用于去除刻蚀残留物和剩余多晶硅，并保证对栅氧化层的高选择比。这一步应避免在多晶硅周围的栅氧化层形成微槽(小槽形成)。

多晶硅刻蚀气体传统上是氟基气体，包括 CF_4 、 CF_4/O_2 、 SF_6 、 $\text{C}_2\text{F}_6/\text{O}_2$ 和 NF_3 。在刻蚀硅的过程中氟原子起作用，然而，这种化学气体产生的刻蚀是各向同性的。这可以通过减少氟原子数量和增加离子能量来改善，但也降低了多晶硅对二氧化硅的选择比。为了避免溅射掉栅氧化层，轰击离子的能量必须足够低。为了解决这些问题，多晶硅等离子体刻蚀气体常常包含溴和氯。氯产生各项异性的多晶硅刻蚀并对氧化硅有好的选择比。另一种通用的化学气体是溴，因为它对氧化硅的选择比比氯还要高。对于氟、氯、溴化学气体的挥发性刻蚀生成物是 SiF_4 、 SiCl_4 和 SiBr_4 ，所有这些生成物都在刻蚀以后从腔体中抽走。



在多晶硅栅刻蚀中不期望的微槽

■单晶硅的刻蚀

用途：制作沟槽。如器件隔离沟槽或高密度DRAM IC中的垂直电容的制作。

硅槽的刻蚀

在集成电路中硅槽的刻蚀要求对每一个沟槽都进行精确的控制，要求对每一个沟槽要求一致的光洁度、接近的垂直侧壁、正确的深度和圆滑的沟槽顶角和底角。因而需要一种上面提到的多步工艺，并对最后一步进行优化，用沟槽的底角圆滑去除硅的损伤。

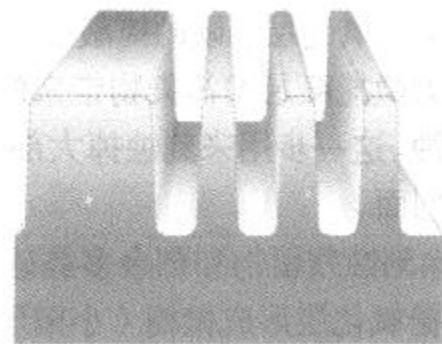
通过对侧壁进行钝化，防止侧壁被横向侵蚀。侧壁的形状与硅片的温度有关，增加温度则侧壁钝化较少，而横向刻蚀增加。硅片的温度可通过氦气背冷来控制。

对于浅槽等离子体干法刻蚀：使用氟气

对于深槽等离子体干法刻蚀：使用氯基或溴基气体

这些气体有高的硅刻蚀速率和对于氧化硅的高选择比。在高密度等离子体刻蚀中，**溴气**越来越常用，因为溴气是一种不需要广泛使用碳来对侧壁进行钝化的刻蚀剂（这减少了污染问题）。

使用溴气的主要问题：它对气体传送系统和反应器有很大的腐蚀作用。



硅槽的刻蚀

金属的干法刻蚀

金属刻蚀的主要**应用**：作为金属互连线的铝合金刻蚀

金属刻蚀的**要求**：

- 1.高刻蚀速率(大于100 nm/min) 。
- 2对下面层的高选择比，对掩蔽层(大于4:1)和层间介质层(大于20:1)
- 3.高的均匀性，且关键尺寸控制很好，没有微负载效应。
- 4.没有等离子体诱导充电带来的器件损伤。
- 5.残留物污染少(如铜硅残留物、显影液侵蚀和表面缺陷)。
- 6.快速去胶，通常是在一个专用的去胶腔体中进行， 不会带来残留物污染。
- 7.不会腐蚀金属。

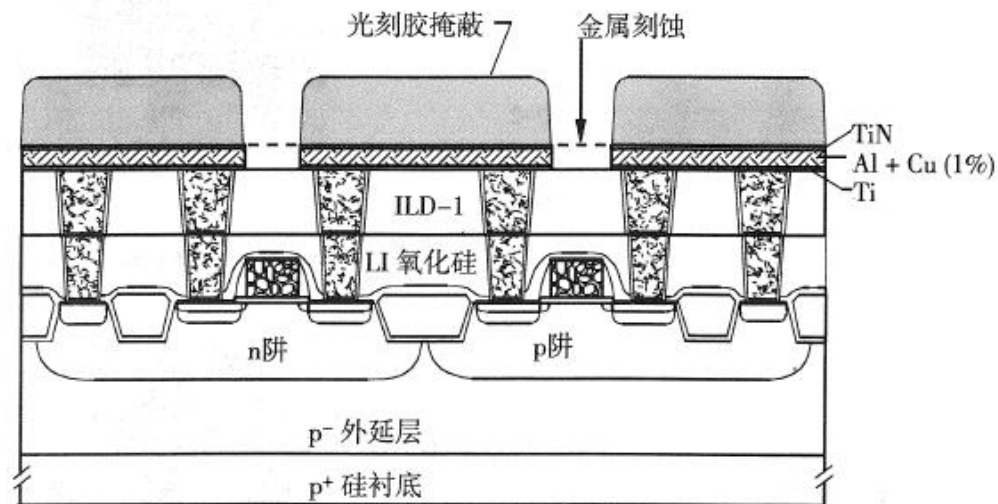
■ 铝和金属复合层

通常用氯基气体来刻蚀铝。纯氯刻蚀铝是各向同性的。为了获得各向异性的刻蚀工艺，必须在可是气体中加入聚合物来对侧壁进行钝化，如加入 CHF_3 或从光刻胶中获得的碳。在铝的刻蚀中也用到 BCl_3 ，它具有用于物理刻蚀的大分子量并能很好地控制侧壁剖面。为了减少微负载效应并有助于侧壁钝化，通常也加入少量的 N_2 。

互连线金属刻蚀中的难点：VLSI/ULSI技术中常用的多层金属复合膜的复杂性。

问题：

1. TiN或其他材料层（ARC）和下面的粘附阻挡层（如Ti）增加了工艺的复杂性
2. 曝露于空气中的铝的氧化产生氧化铝抑制了氯的刻蚀反应。



VLSI/ULSI 技术中的复合金属层

多步刻蚀工艺技术刻蚀这种金属复合膜结构步骤：

1. 去除自然氧化层的**预刻蚀**
2. **刻蚀TiN或其他材料层层**
3. 刻铝的**主刻蚀**
4. 去除残留物的**过刻蚀**（它可能是主刻蚀的延续）
5. **阻挡层的刻蚀**
6. 为防止**侵蚀残留物的选择性去除**
7. **去除光刻胶**

铝刻蚀的主要腐蚀生成物： AlCl_3 或 AlBr_3

刻蚀工艺中需要注意的问题：

1. 要控制水蒸气和氧气的含量
2. 要采用去胶工艺，在去胶过程中把腐蚀性化合物去除，从而减少它们的侵蚀的可能性

■ 钨

钨是在多层金属结构中常用的一种用于通孔填充的重要金属。可以用氟基或氯基气体来刻蚀钨。常常在刻蚀气体中加入 N_2 来获得对光刻胶的好的选择比。有时加入 O_2 来减小碳的沉积。氯基气体（如 Cl_2 或 CCl_4 ）能用来刻蚀钨并改善各向异性特性和选择比。

钨的反刻

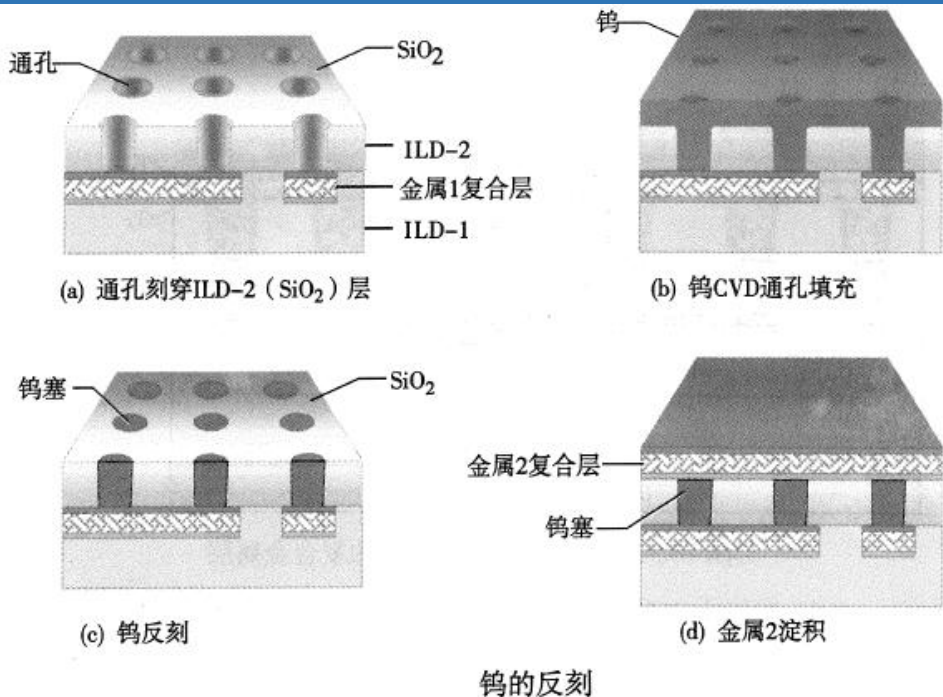
钨的反刻：制作钨塞工艺中的一步

反刻的两步：

1. 第一步以高速均匀地刻掉90%的钨
2. 第二步降低刻蚀速率，并使用对 TiN 阻挡层有高选择比的化学气体来进行刻蚀。

减小气体压力和硅片温度使得刻蚀速率降低从而减弱负载效应，这一效应有可能在钨塞中产生凹坑。

关键点：将残留物和钨塞损失减至最小



■ 接触金属刻蚀

在硅片制造中，难熔金属与硅合金通常用来制作硅化物，包括 CoSi_2 、 WSi_2 、 TaSi_2 和 TiSi_2 。多晶硅硅化物是掺杂多晶硅与难熔金属的合成物。在MOS器件制造中，接触金属的刻蚀是很关键的，因为尺寸的控制会影响到器件的沟道长度。接触金属等离子体刻蚀可以采尺寸控制特性而被使用用氟基或氯基气体。氟基气体(如 NF_3 和 SF_6)，由于它们在增大的刻蚀速率的情况下所具有的良好尺寸控制特性而被使用。由于形成接触是一个自对准工艺，因此在接触金属刻蚀中不需要光刻胶做掩蔽层。

湿法腐蚀

虽然湿法腐蚀已经大部分被干法刻蚀所取代，但它在漂去氧化硅、去除残留物、表层剥离以及大尺寸图形腐蚀应用方面仍然起着重要的作用。

优点：与干法刻蚀相比，湿法腐蚀的好处在于对下层材料具有高的选择比，对器件不会带来等离子体损伤，并且设备简单。

缺点：横向钻蚀、湿法化学腐蚀槽的安全性、可能带来光刻胶脱落和起泡、难以控制腐蚀槽的参数以保证均匀性、化学试剂的处理费用昂贵等

湿法腐蚀参数

参数	说明	控制难度
浓度	溶液浓度（例如：腐蚀氧化硅的溶液 NH_4F 与 HF 的比）	最难控制的参数，因为槽内溶液的浓度一直在变
时间	硅片浸在湿法化学腐蚀槽中的时间	相对容易控制
温度	湿法化学腐蚀槽的温度	相对容易控制
搅动	溶液槽的搅动	适当控制有一定难度
批数	为了减少颗粒并确保适当的溶液强度，一定批次后必须更换溶液	相对容易控制

湿法腐蚀的种类

■ 湿法腐蚀氧化硅

* 25°C 在 BHF^a 溶液中近似的氧化硅腐蚀速率

氧化硅类型	密度 (g/cm ³)	腐蚀速率 (nm/s)
干氧氧化生长	2.24 至 2.27	1
湿法氧化生长	2.18 至 2.21	1.5
CVD 淀积	< 2.00	1.5 ^b 至 5 ^c
溅射	< 2.00	10 至 20

氧化硅能够用氢氟酸 (HF) 来进行湿法腐蚀，常用被氟化铵缓冲的稀氢氟酸(称为缓冲氧化硅腐蚀液BOE或缓冲氢氟酸BHF) 喷射或浸泡来有选择地去除氧化硅。化学缓冲剂是加入少量的强酸或元素而又防止pH值变化的一种溶剂。用NH₄F来缓冲HF可使得腐蚀能被更好地控制，这种腐蚀液减慢并稳定腐蚀过程，并不对光刻胶产生影响。硅片上的BOE是用去离子水和快倾泄或喷流清洗设备来清洗掉。快倾泄清洗速度快并用水少，而且喷流清洗能显著地减少颗粒沾污程度。氧化硅的腐蚀速率：因为干氧要比湿氧致密，所以干氧腐蚀速率较慢。且通常掺杂的氧化硅腐蚀速率要快。

■ 湿法化学剥离

由于湿法腐蚀的高选择比特性，湿法化学剥离有时用于去除包括光刻胶和掩蔽层的表面层材料。在硅片制造过程中氮化硅(Si_3N_4)被广泛用做掩蔽层材料。这层氮化硅掩蔽层是用热磷酸(H_3PO_4)进行湿法化学剥离掉的。这种酸槽一般始终维持在 160°C 左右并对露出的氧化硅具有所希望的高选择比。用热磷酸去除氮化硅是难以控制的，通过使用检控样片来进行定时操作(没有终点检测)。在曝露的氮化硅上常常会形成一层氮氧化硅，因此在去除氮化硅之前，需要在HF酸中进行短时间的处理。如果这一层氮氧化硅没有去掉，或许就不能均匀地去除氮化硅。另一种常用湿法化学剥离去除的材料是在接触中用做硅化物的钛。这一步工艺是用氨氧化铵(NH_4OH)和过氧化氢(H_2O_2)加去离子水稀释来进行的。

刻蚀技术的发展历程

多晶硅刻蚀技术的发展

尺寸要求	年代和反应器设计	化学药品	主要特点	局限性和存在的问题	控制方法
4~5 μm 各向同性刻蚀	1977 年以前: 湿法腐蚀	用乙酸或 H_2O 缓冲的 HF/HNO_3	批处理工艺	光刻胶脱落, 酸槽老化, 温度敏感	操作员判断终点
3 μm	1977 年: 圆桶式刻蚀机	CF_4/O_2	批处理工艺	非均匀性, 各向同性刻蚀, 大的钻蚀	压力计和定时器
2 μm	1981 年: 单片刻蚀	CF_4/O_2	单硅片, 单独的终点检测, 改进的重复性	对氧化硅低的选择比, 各向同性工艺	终点检测
1.5 μm	1982 年: 单片 RIE	SF_6 /氟利昂 11, SF_6/He	MFC, 独立的压力和气体流量控制, 改进的可重复性	低氧化硅选择比, 剖面控制	MFC, 气体流量和压力控制分开
~0.5 μm	1983 年: 可变电极间距, 带真空锁	CCl_4/He , C_{12}/He , C_{12}/HBr	带真空锁腔体, 可变电极间距, 改进的可重复性	高深宽比图形的微负载效应, 剖面控制	电极间距控制, 计算机控制
~0.25 μm 及以下	1991 年: 电感耦合等离子体 (ICP)	Cl_2 , HBr	高密度等离子体, 低压, 简单的气体混合; 改进的重复性	设备复杂, 多变量	独立的产生等离子体的 RF 控制和硅片偏置的 RF 控制

去除光刻胶

刻蚀以后的步骤之一是去除光刻胶，光刻胶用来作为从光刻掩膜版到硅片表面的图形转移媒介以及被刻蚀区域或被离子注入区域的阻挡层。一旦刻蚀或注入完成，光刻胶在硅片表面就不再有用，必须完全去除。

基本方法：

1. 剥离光刻胶→湿法去除光刻胶的基本方法

干法刻蚀之前，光刻胶的表面必须在氟基或氯基气体中进行加固处理，这使得光刻胶在大部分湿法去胶液中不溶解。所以此种方法不合算。

2. 干法等离子体去胶

主要困难：

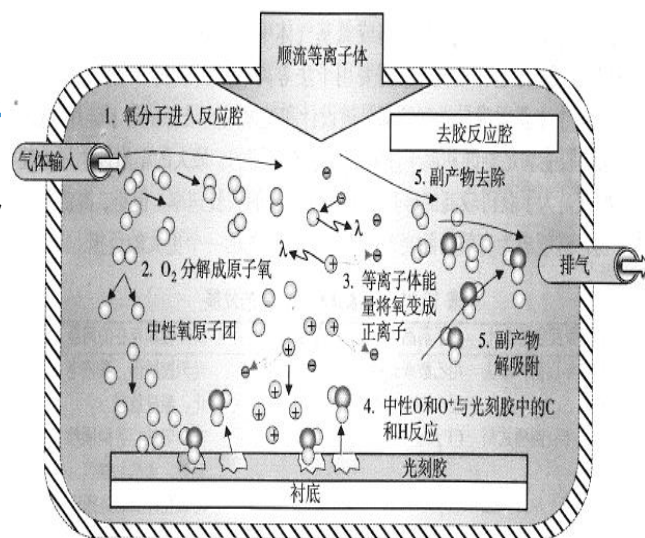
1. 光刻胶都是被设计和处理成能最好粘附于硅片表面的，粘附性大，难以去除
2. 为了获得较高的硅片产能需要有高的去胶速率，但是，高的去胶速率会留下更多光刻胶残留物

■去胶机概述

去胶机是通过氧原子与光刻胶在等离子体环境中发生反应来去除光刻胶的。原子氧(O)通过微波或RF能量分解氧分子而产生，也常常加入N₂或H₂来提高去胶性能并加强对残留聚合物的去除。因而典型的去胶机气体使用的是O₂/N₂。光刻胶的基本成分是碳氢聚合物。氧原子很快与光刻胶反应生成挥发性的一氧化碳、二氧化碳和水等主要生成物。这些生成物被真空系统抽走。

■等离子体损伤

在去胶工艺中值得关注的一点是由于离子轰击和硅片充电所带来的对硅片上器件的等离子体损伤。等离子体对硅片造成的损伤已大大被采用顺流去胶机补救了，顺流去胶机把硅片放在远离带来损伤的等离子体离子的地方，只允许化学反应基到达硅片表面。在顺流系统中通常使用微波(2.45 GHz)频率来产生等离子体。这是因为微波辉光放电能产生更多的原子氧反应基和少量的离子这就能减少离子诱导损伤。



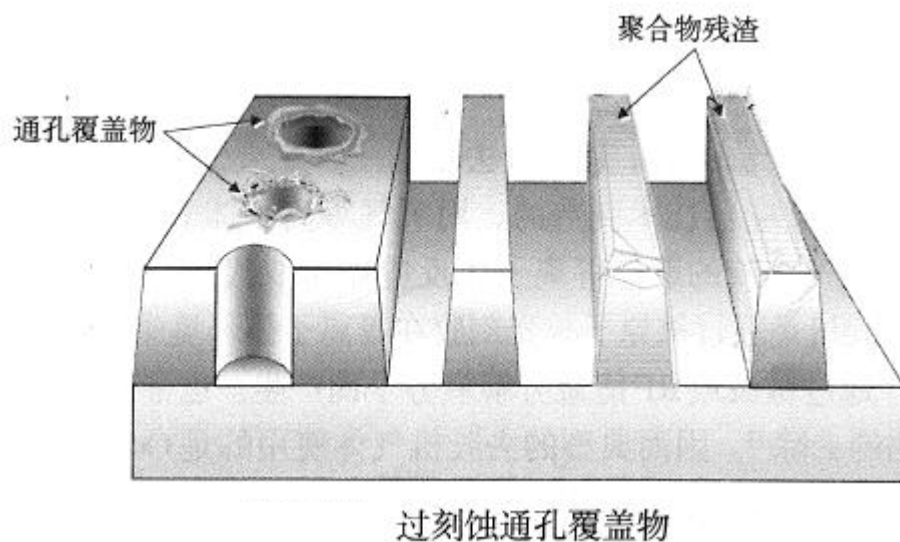
去胶机中氧原子与光刻胶的反应

■ 去除残留物

标准的去胶工艺已发展到包括用过刻蚀来去除残留物。这些残留物是复杂的，可能包括：等离子体刻蚀和去胶的副产物铝、钛、氧化硅、硅。去胶的高温环境使残留物变硬而难以去除，如果不去除，这些残留物就会成为增加硅片表面缺陷密度的颗粒和污染物源。

解决方法：

1. 为了去除刻蚀无机残留物，一些去胶机用可选择的化学气体来代替氧气（如NO或N₂O）
2. 一些去胶机加入CF₄或NF₃的形式在化学气体中引入少量的氟来更有效地去除包含氧化硅和硅在内的残留物，使其更易溶于水。
3. 某些情况下，用强硫酸与过氧化氢混合液来完全清楚残留的光刻胶最近去除残留物的湿法化学试剂是羟胺化合物，这种新方式在低温下能无腐蚀地溶解无机残留物。



刻蚀检查

刻蚀工艺的最后一步是进行刻蚀检查以确保刻蚀质量。这种检查是在有图形的硅片上刻蚀和去胶全部完成以后进行的，**传统上是用白光或紫外光手动显微镜来检查缺陷，如检查污点和大的颗粒沾污。**手动显微镜已大量被自动监测系统所取代，特别是对有深亚微米图形的关键层的检查。先进的测量仪器能够自动检测带图形硅片的图形缺陷和形变。最重要的检查之一是最后对特殊掩蔽层的检查，以确保关键的尺寸正确。刻蚀工艺的质量也是通过对刻蚀问题的检测来进行校验的，例如是否存在过刻蚀、欠刻蚀或钻蚀等。

除了没有光刻胶以及产生缺陷后无法返工以外，刻蚀检查与显影检查几乎类似。任何缺陷(如果数量足够)都可能使硅片报废。这一准则的一个例外是可以清洗掉的表面颗粒沾污。

刻蚀质量测量

表 16.10 用于刻蚀最终检测的质量测量方法

质量参数	缺陷类型	备注
1. 关键尺寸偏差	A. 线宽变化: 光刻胶线宽与刻蚀后的图形线宽存在过大的差别	<ul style="list-style-type: none"> ● 通过比较硅片上刻蚀之前的光刻胶线条宽度和刻蚀之后同样图形的线宽来检察关键尺寸的偏差, 可以用 SEM 来测量 ● 过度的关键尺寸偏差需要针对横向钻蚀或倾斜角度来优化刻蚀工艺 ● 光刻胶剖面对关键尺寸偏差有影响, 陡直的光刻剖面会产生最好的关键尺寸偏差
2. 金属腐蚀	A. 刻蚀后金属膜的侵蚀	<ul style="list-style-type: none"> ● 侵蚀是由于硅片上残留的 HCl 曝露于空气中的水汽中而产生的 ● 可以看到沿金属线条边缘因为侵蚀而产生的小泡泡, 这种缺陷可以用光学显微镜或 SEM 找到
3. 刻蚀后的侧壁污染物	A. 刻蚀后残留的侧壁钝化物, 包括残留的光刻胶 B. 污染物反溅到金属线条或通孔的侧壁上	<ul style="list-style-type: none"> ● 通过优化金属刻蚀之前的坚膜烘烤工艺来最大限度地减小这种缺陷 ● 残留物通常可以用过刻蚀或稀的缓冲氢氟酸来去除 * ● 用来钝化侧壁的聚合物能够产生回溅, 留下一层覆盖物 (覆盖在金属线条上或通孔侧壁上薄膜)
4. 负载效应	A. 显微镜可见的刻蚀工艺的不均匀性	<ul style="list-style-type: none"> ● 由于反应离子在小窗口中的密度减少而使其刻蚀速率比大窗口的刻蚀速率要小 ● 折中刻蚀工艺的压力和功率 **
5. 金属刻蚀后的短路	A. 刻蚀后金属线条的桥接导致短路	● 由于微负载效应引起图形密度效应的减弱
6. 刻蚀后过多的残留物	A. 刻蚀后可能存在下列种类的残留物: <ul style="list-style-type: none"> ● 残留物细线条 ● 悬挂的薄的残留物 ● 冠状残留物 ● 栏杆状残留物 ● 刻蚀后的侵蚀残留物 	引起刻蚀残留物的原因有: <ul style="list-style-type: none"> ● 刻蚀工艺的不均匀性 ● 淀积的薄膜形貌 ● 薄膜中的非均匀性杂质分布 ● 薄膜中的污染物 (除了有意在硅中加入的铜等合金外) ● 气体或腔体中的污染物, 检查过滤系统或清洗系统 ● 不合适的工艺参数, 如高的刻蚀速率

干法刻蚀检查及故障排除

表 16.11 常见的干法刻蚀检查及故障排除方法

问题	可能的原因	纠正措施
1. 刻蚀速率不对	A. RF 功率发生变化 B. 温度不对 C. 压力有问题 D. 终点检测不能正常工作 E. 硅片间距不合适 F. 气体流量不合适 G. 维护不当 H. 刻蚀程序不对	<ul style="list-style-type: none"> ● 检查和修复 RF 发生器和匹配单元 ● 检查硅片背冷系统 ● 校准真空计（如电容压力计）和压力控制系统 ● 检查终点检测系统 ● 检查硅片与电极的间距 ● 校验气体输送系统 ● 湿法清洗腔体 ● 校验工艺程序和参数
2. 选择比不够	A. 刻蚀速率太快 B. 不合适的气体流量或压力 C. 终点检测有问题 D. 错误的硅片温度 E. 工艺程序不对	<ul style="list-style-type: none"> ● 校验刻蚀速率 ● 校正 MFC 和真空计 ● 检查 / 校正终点检测 ● 检查硅片冷却系统 ● 确认工艺程序和参数
3. 侧壁角度不合适	A. 侧壁沾污 B. 硅片温度 C. 系统压力 D. 工艺程序不对（工艺错误）	<ul style="list-style-type: none"> ● 检查腔体中的聚合物生成 ● 硅片的背面沾污引起加热不均匀 ● 检查 / 校正 MFC 和检漏以检查有否沾污
4. 片内刻蚀不均匀	A. 由于 ARDE 带来的刻蚀气体浓度的损耗 B. 不合适的气体流量 C. 硅片的温度 D. 硅片在腔体中位置不合适 E. 腔体结构 F. 膜厚不合适 G. 维护不当	<ul style="list-style-type: none"> ● 校验硅片上密的和不密区域的设计 ● 检查 / 校正气体输送系统 ● 检查热电偶和硅片冷却系统 ● 检查硅片自动传送系统和真空卡盘 ● 检查反应器电极平板间距 ● 测量和校验膜厚 ● 湿法清洗腔体
5. 等离子体损伤	A. 等离子体不均匀 B. 栅氧化层过量的离子轰击 C. RF 功率过大 D. 维护不当	<ul style="list-style-type: none"> ● 等离子体设备设计和维护差 ● 不是最佳的工艺条件 ● 检查程序和 RF 发生器
6. 颗粒沾污	A. 气体管道的泄漏和沾污 B. 操作问题 C. 不合适的化学气体	<ul style="list-style-type: none"> ● MFC 漏气或有问题 ● 不恰当的关机、操作或维护 ● 错误的工艺程序 ● 进行湿法清洗
7. 金属侵蚀	A. 潮湿 B. 气流 C. 刻蚀工艺带来的沾污 D. 错误地维护程序	<ul style="list-style-type: none"> ● 刻蚀后清除残留物时间太长 ● 检查 MFC，使用正确的工艺气体 ● 控制去胶的时间 ● 检查维护程序