



微纳加工技术

现代工程与应用科学学院

2020-6-3

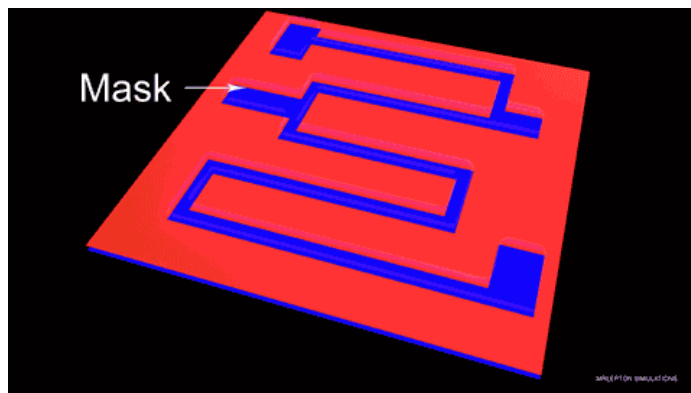


刻蚀法图形转移技术



刻蚀

- 刻蚀（Etch），它是半导体制造工艺，微电子IC制造工艺以及微纳制造工艺中的一种相当重要的步骤。是与光刻相联系的图形化（**pattern**）处理的一种主要工艺。
- 刻蚀是用化学或物理方法有选择地从晶圆表面去除不需要的材料的过程，从而正确地复制掩模图形。





刻蚀法图形转移技术



刻蚀方法分类

湿法腐蚀
干法刻蚀
其他

湿法刻蚀：是指利用溶液与预刻蚀材料之间的化学反应来去除未被掩蔽膜材料掩蔽的部分而达到刻蚀目的，是一个纯化学过程。

干法刻蚀：应用最为广泛的是基于等离子体的刻蚀，通过气体放电，产生活性粒子和带电离子，对刻蚀材料产生物理和化学反应，从而达到去除材料的目的。



刻蚀法图形转移技术



基本参数

抗刻蚀比：刻蚀衬底材料过程中掩模材料的消耗程度

方向性或各向异性度：在衬底不同方向刻蚀速率的比



各向同性：速率相同

各向异性：某一方向最大，其他方向最小

部分各向异性：介于两者之间



刻蚀法图形转移技术

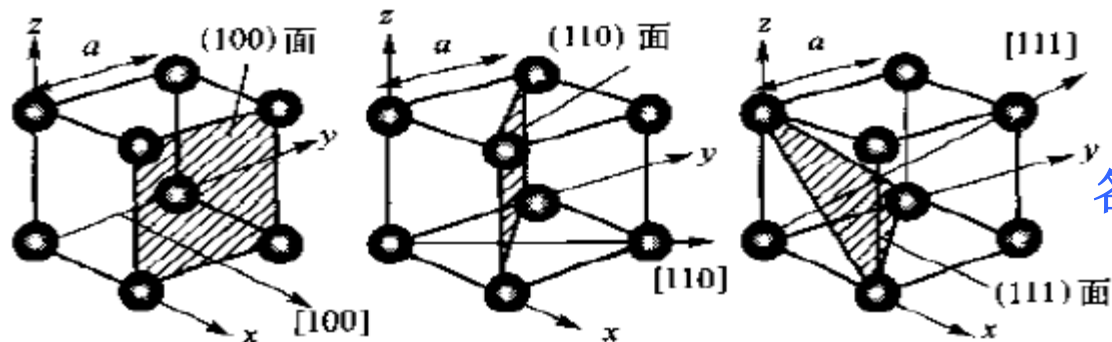
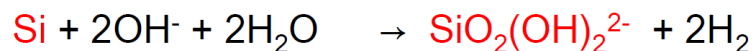


化学湿法刻蚀

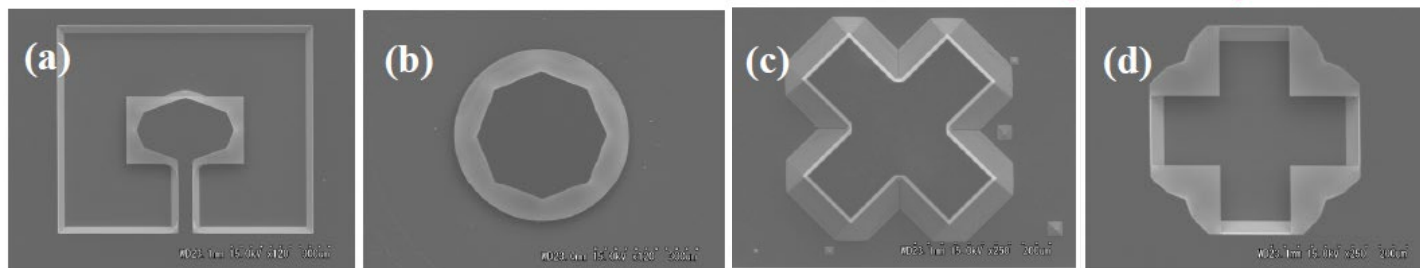
硅各向异性刻蚀

KOH

应用化学腐蚀液体腐蚀的方法。是最早应用于半导体工业的图形转移技术



单晶硅的硅片的 3 个常见晶面及其原子排列



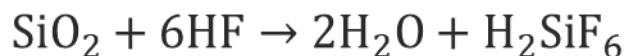
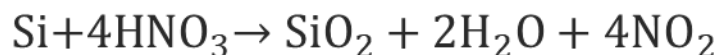


刻蚀法图形转移技术



硅各向同性湿法刻蚀

单晶硅和多晶硅的刻蚀都是通过与硝酸和氢氟酸的混合溶剂（HNA）反应来完成。其过程是硝酸先将硅氧化成二氧化硅，再利用氢氟酸溶解掉产生的二氧化硅。这种情况下氧化硅与光刻胶均不适合作为掩模层。



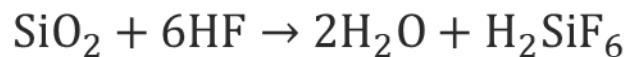


刻蚀法图形转移技术



二氧化硅的湿法刻蚀

通常采用氢氟酸溶液完成，实际使用一般会添加氟化铵溶液来缓冲稀释，从而控制反应速率。



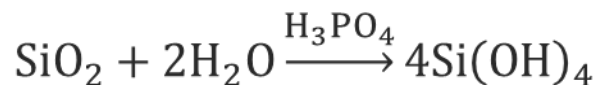
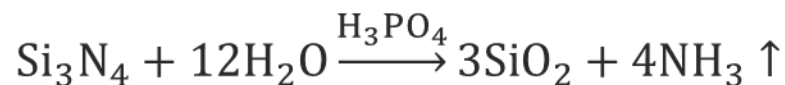


刻蚀法图形转移技术



氮化硅的湿法刻蚀

采用高温磷酸溶液进行刻蚀，光刻胶在高温下容易剥落，一般采用氧化硅作为掩模材料。





刻蚀法图形转移技术



金属铝的湿法刻蚀

采用经过加热的磷酸、硝酸、醋酸以及水的混合溶液进行刻蚀，硝酸的主要作用是提高刻蚀速率，醋酸和用来提高刻蚀均匀性的。





刻蚀法图形转移技术



湿法刻蚀总结

优点：

选择性好；

重复性好；

生产效率高；

设备简单；

成本低。

缺点：

钻刻严重；

对图形的控制性较差，不能用于小的特征尺寸；

会产生大量的化学废液。



刻蚀法图形转移技术



干法刻蚀

所有不涉及化学腐蚀液体的刻蚀技术或材料加工技术都是干法刻蚀

干法刻蚀的优点

1. 刻蚀剖面是各向异性，具有非常好的侧壁抛面控制
2. 最小的光刻胶脱离或粘附问题
3. 好的片内、片间、批次间的刻蚀均匀性

干法刻蚀的缺点

差的刻蚀选择比、等离子体带来的器件损伤和昂贵的设备



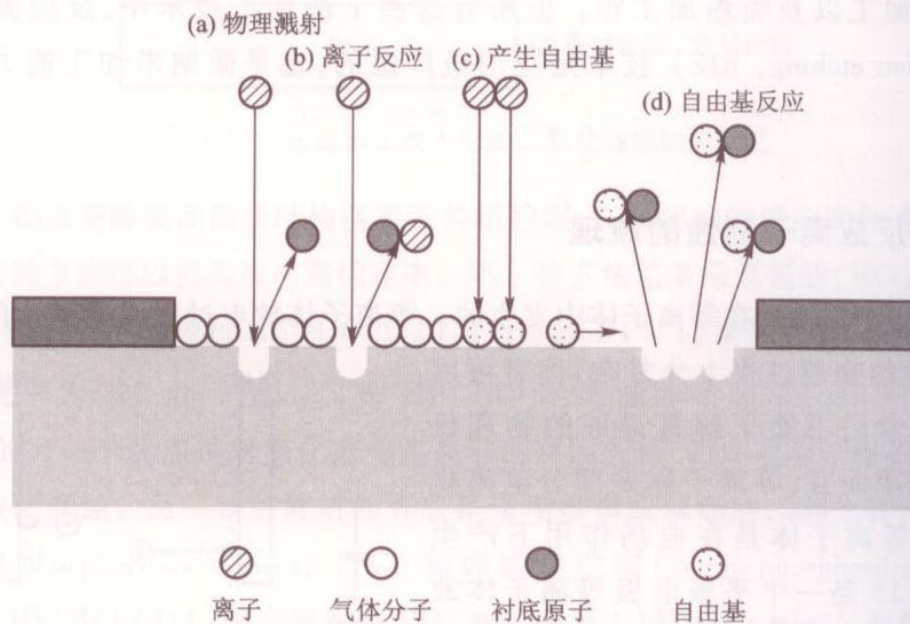
刻蚀法图形转移技术



干法刻蚀

反应离子刻蚀 (Reactive ion etching, RIE):

采用化学反应和物理离子轰击去除基片表面材料的技术



反应离子刻蚀的 4 种基本过程



刻蚀法图形转移技术



干法刻蚀

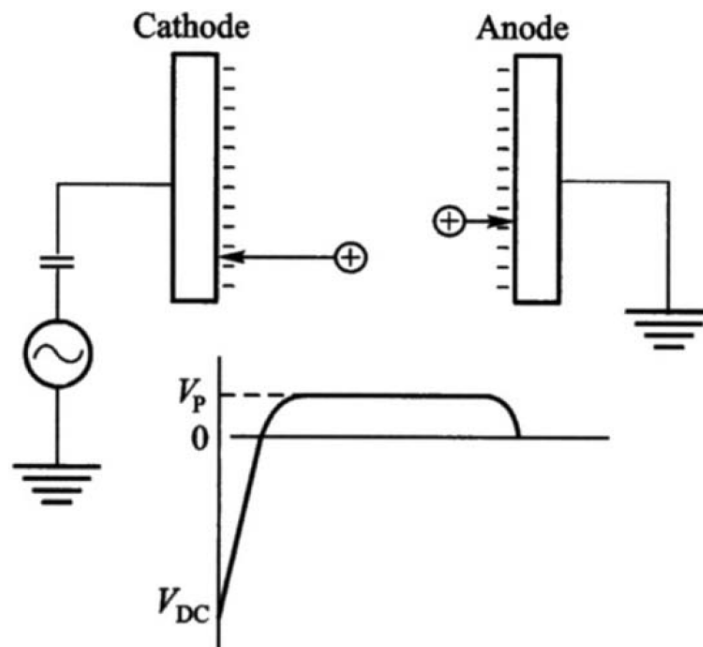
RIE 刻蚀原理

射频辉光放电过程：

- 分子在电场作用下发生电离，产生自由电子；
- 自由电子与分子碰撞，产生正负离子和活性自由基，在电场作用下，带电粒子加速向两级移动；
- 正离子轰击阴极产生二次电子，并加速冲向阳极，与气体分子碰撞，进一步发生电离；
- 电子经过碰撞跃迁到能量更高的轨道上。此状态不能稳定存在，会迅速回落到低能级，产生辉光；

优点：

- 放电过程可以一直持续下去；
- 由于电子的来回振荡，气体分子的电离率大大增加；
- 可以降低电极的工作电压；





刻蚀法图形转移技术



干法刻蚀
反应离子刻蚀

刻蚀气体

表 8.2 反应离子刻蚀化学气体与被刻蚀的材料

被刻蚀材料	化学气体（多种选择）
单晶硅	CF_3Br 、 HBr/NF_3 、 SF_6/O_2
多晶硅	$\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2$ 、 BCl_3/Cl_2 、 $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ 、 HBr/O_2 、 Br_2/SF_6
Al	$\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2$ 、 BCl_3/Cl_2 、 HBr/Cl_2
Al-Si-Cu、Al-Cu	$\text{BCl}_3/\text{Cl}_2 + \text{N}_2$
W	SF_6 、 NF_3/Cl_2
TiW	SF_6
WSi_2 、 TiSi_2 、 CoSi_2	$\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{NF}_3$ 、 CF_4/Cl_2
SiO_2	CCl_2F_2 、 CHF_3/CF_4 、 CHF_3/O_2 、 CH_3CHF_2
Si_3N_4	CF_4/O_2 、 CF_4/H_2 、 CHF_3 、 CH_3CHF_2
GaAs	$\text{SiCl}_4/\text{SF}_6$ 、 $\text{SiCl}_4/\text{NF}_3$ 、 $\text{SiCl}_4/\text{CF}_4$
InP	CH_4/H_2
光刻胶	O_2

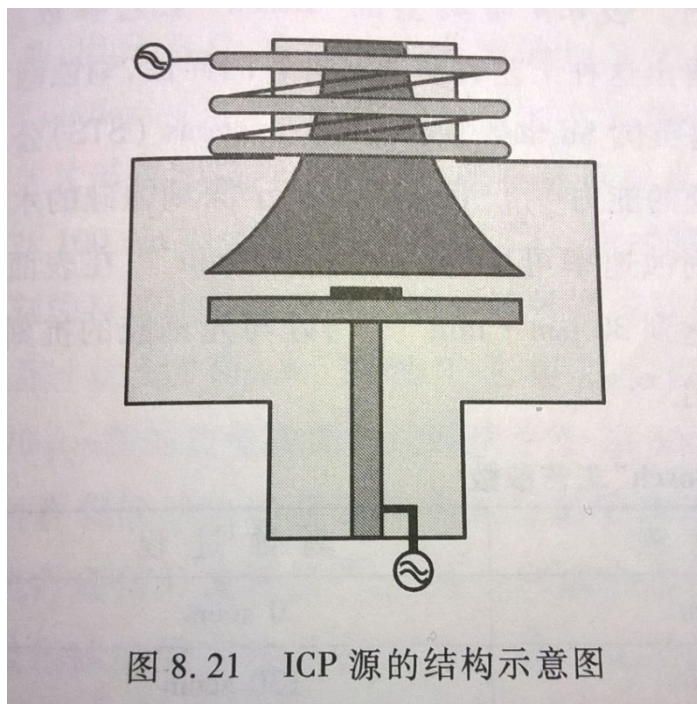
硅及其硅化物的刻蚀气体主要以氟化物气体为主
三五族化合物材料的刻蚀气体以氯化物为主



刻蚀法图形转移技术



电感耦合等离子体刻蚀系统（ICP）



- ICP源的优点：
- (1) 等离子体产生区与刻蚀区分开；
 - (2) 等离子体密度更高，刻蚀速度更快；
 - (3) 独立控制偏压，独立控制轰击能量；



刻蚀法图形转移技术



Bosch 工艺

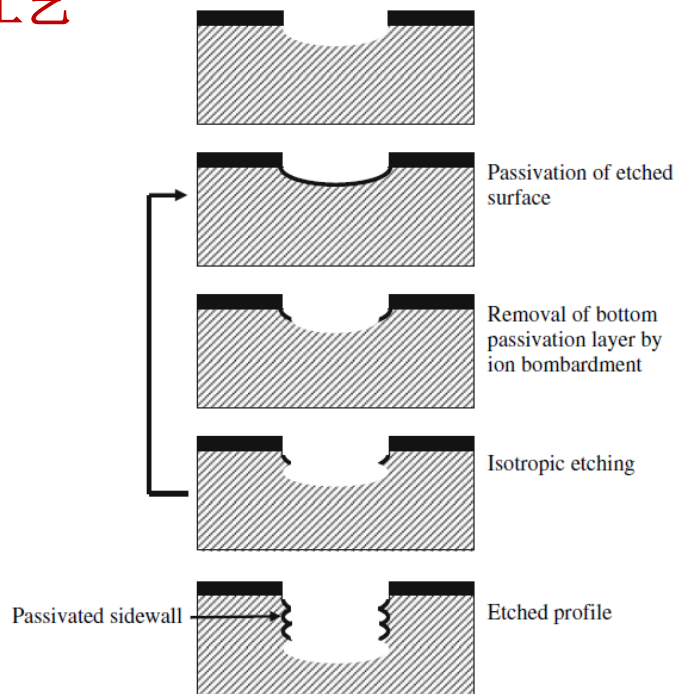


Table 6.4 Typical “Bosch” process conditions

Process parameters	Passivation	Etching
C_4F_8	85 sccm	0 sccm
SF_6	0 sccm	130 sccm
RF power at stage	0 W	12 W
RF power from coil	600 W	600 W
Cycle time	7.0 s	9.0 s
Delay time	0.5 s	0.5 s
Etch rate		$1.5\text{--}3\ \mu\text{m min}^{-1}$

sccm: standard cubic centimeter per minute

“Bosch” 工艺过程

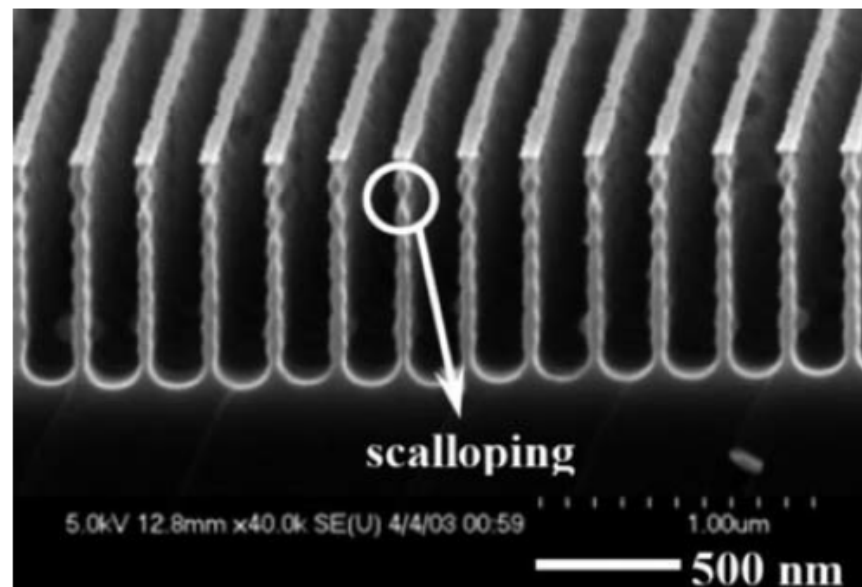
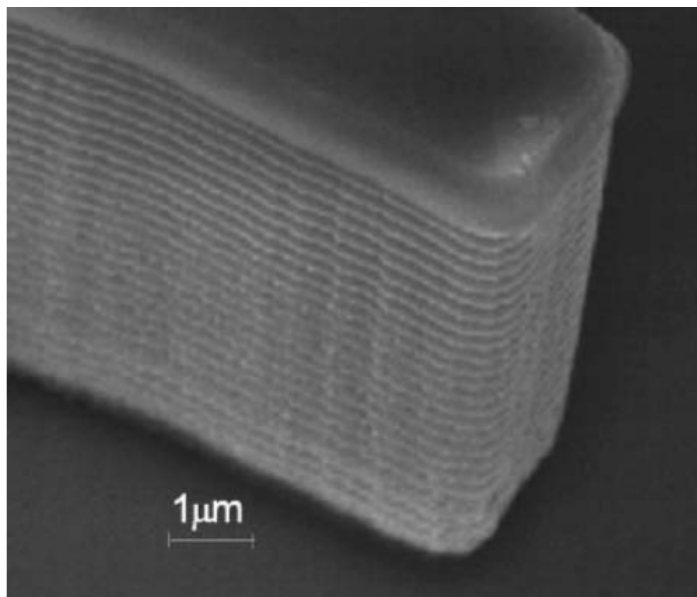
所谓的“Bosch”工艺，就是在反应离子刻蚀的过程中不断在边壁上沉积抗刻蚀层，或边壁钝化层。



刻蚀法图形转移技术



Bosch 工艺



边壁波纹

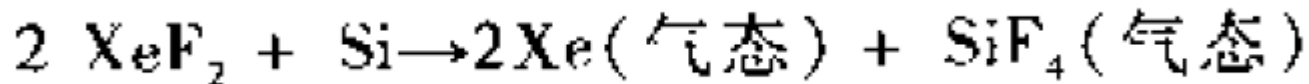


刻蚀法图形转移技术



反应气体刻蚀

不需要任何形式的等离子体



XeF_2 在常温常压下呈白色固体粉末状态，但蒸气压很低（约3.8 Torr， 25摄氏度），在1~4 Torr 的低真空下升华为气态。

边壁波纹



刻蚀法图形转移技术



离子溅射刻蚀

纯粹的物理刻蚀过程，最常用的离子源气体是氩气。

1. 选择性较差，刻蚀深度有限
2. 刻蚀过程不能形成挥发性产物，产物会再次溅射到其他地方



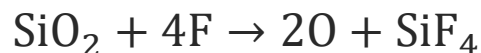
刻蚀法图形转移技术



常用材料的干法刻蚀

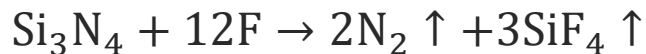
氧化硅干法刻蚀：

大多采用含有氟碳化合物的其他进行刻蚀。如 CF_4 、 CHF_3 、 C_4F_8 等，氟碳气体电离产生活性氟自由基，与氧化硅反应生成 SiF_4 气体被抽离。



氮化硅干法刻蚀：

采用含有氟碳化合物的其他进行刻蚀。





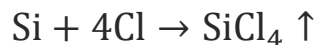
刻蚀法图形转移技术



常用材料的干法刻蚀

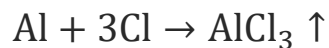
多晶硅干法刻蚀:

卤素气体（氯气或溴化氢），原因是Cl基对氧化硅有较高的选择性，F基气体的选择性较低



金属铝干法刻蚀:

采用气体 Cl_2





刻蚀法图形转移技术



干法刻蚀

等离子体刻蚀:可应用光刻胶的清洗

...



刻蚀法图形转移技术



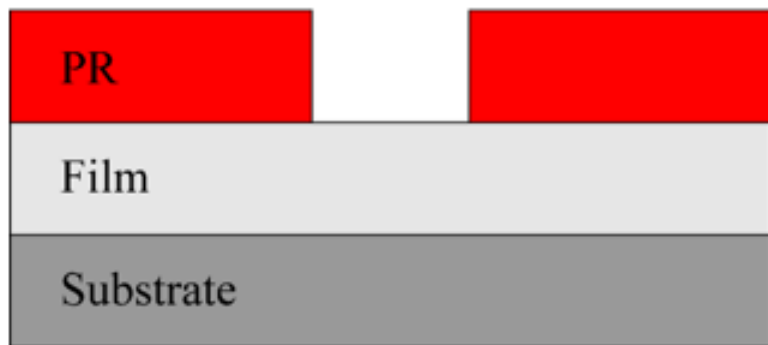
刻蚀参数

刻蚀速率

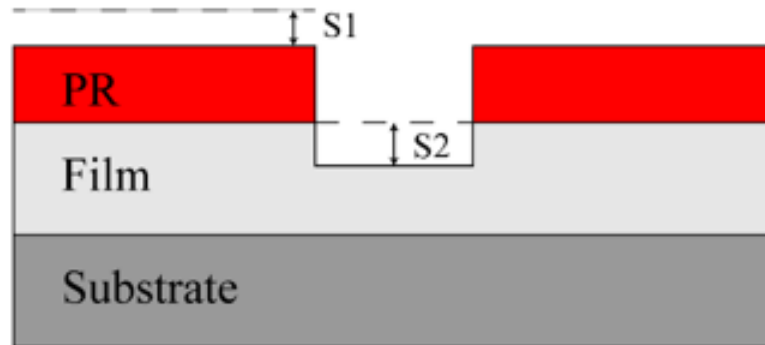
被刻蚀材料去除的速度

$$\text{刻蚀速率} = S_2 / t$$

其中 S_2 是去除的材料厚度
 t 是刻蚀时间



Before etching



After etching



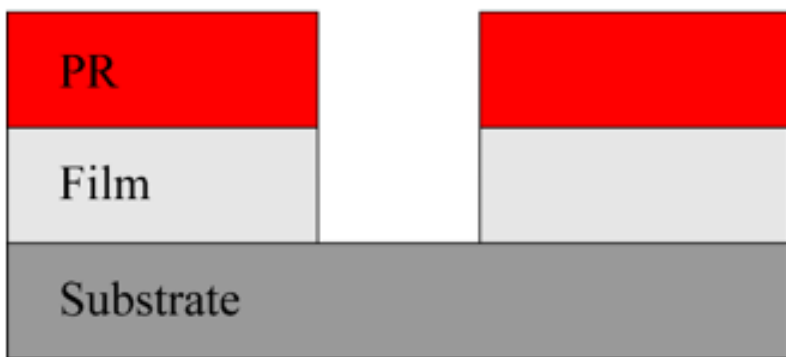
刻蚀法图形转移技术



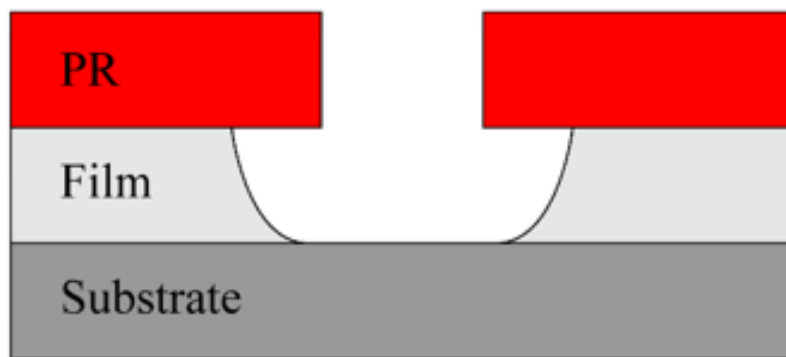
刻蚀参数

刻蚀剖面

被刻蚀图形的侧壁形貌，有两种最基本的刻蚀剖面：各向异性和各向同性



各向异性



各向同性



刻蚀法图形转移技术

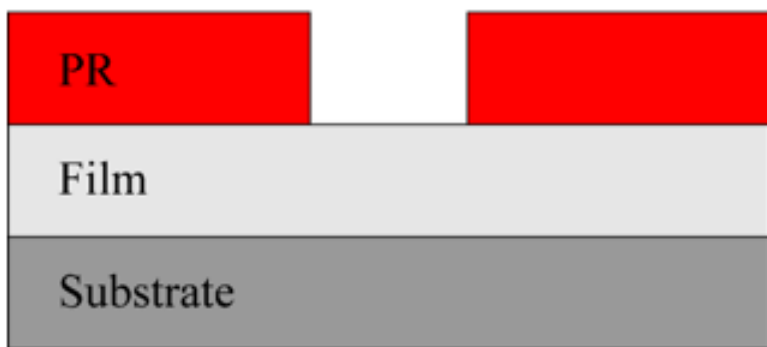


刻蚀参数

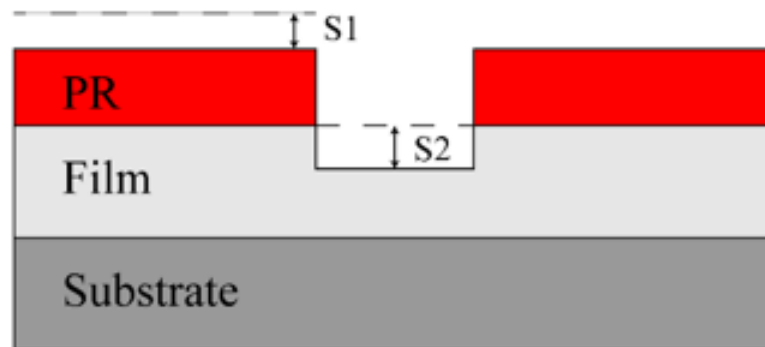
选择比

同一刻蚀条件下，刻蚀一种材料对另一种材料的刻蚀速率之比，通常指掩模层对被刻蚀材料层

$$\text{选择比} = S_2/S_1$$



Before etching



After etching



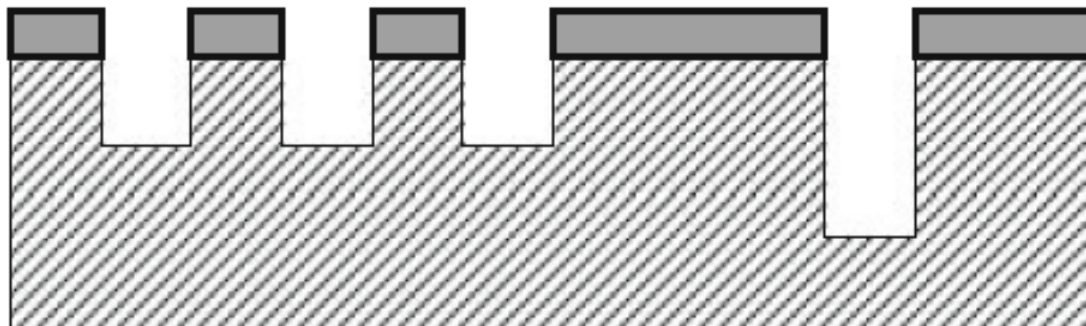
刻蚀法图形转移技术



均匀性

指整块晶圆在刻蚀速率上的一致性

负载效应





谢谢