

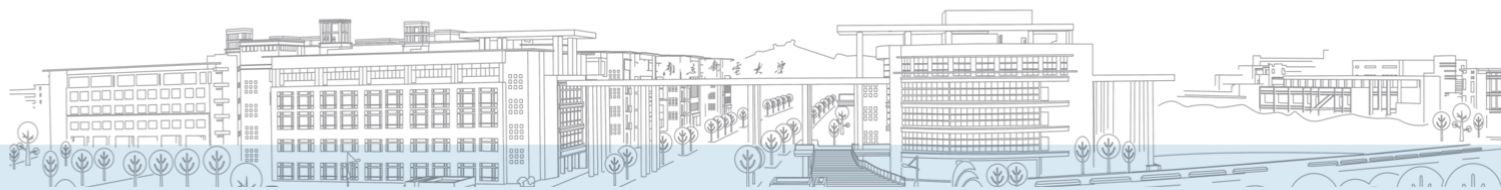
薄膜物理与技术

主讲：宋春元

教5-311

E-mail: iamcysong@njupt.edu.cn

材料科学与工程学院



第二章 薄膜制备的物理方法（Ⅱ）

□ 2.3 溅射镀膜

2.3.1 概述

2.3.2 辉光放电

2.3.3 表征溅射特征的基本参数

2.3.4 溅射机理

2.3.5 主要溅射镀膜方式

2.3.1 概述

■ 溅射法

利用带电离子在电磁场的作用下获得足够的能量，轰击固体（靶）物质，从靶材表面被溅射出来的原子以一定的动能射向衬底，在衬底上形成薄膜。

溅射出的粒子大多呈原子状态，常称为溅射原子。用于轰击靶的荷能粒子可以是电子、离子或中性粒子，

因离子在电场下易于加速并获得所需动能，故大多采用离子作为轰击粒子。该离子又称入射离子，这种镀膜技术又称为离子溅射镀膜或淀积。



与真空蒸发镀膜相比，溅射镀膜有如下的**优点**：

- (1) 任何物质(只要是**固体**)均可以溅射，尤其是高熔点、低蒸气压元素和化合物。
- (2) 溅射膜与基板之间的附着性好。
- (3) 溅射镀膜密度高，针孔少，且膜层的纯度较高。
- (4) 膜层可控性和重复性好。

缺点：

- (1) 溅射设备复杂、需要高压装置；
- (2) 溅射淀积的成膜速度低，真空蒸镀淀积速率为 **$0.1 \sim 5 \mu\text{m}/\text{min}$** ，而溅射速率为 **$0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}/\text{min}$** ；
- (3) 基板温度较高和易受杂质气体影响。

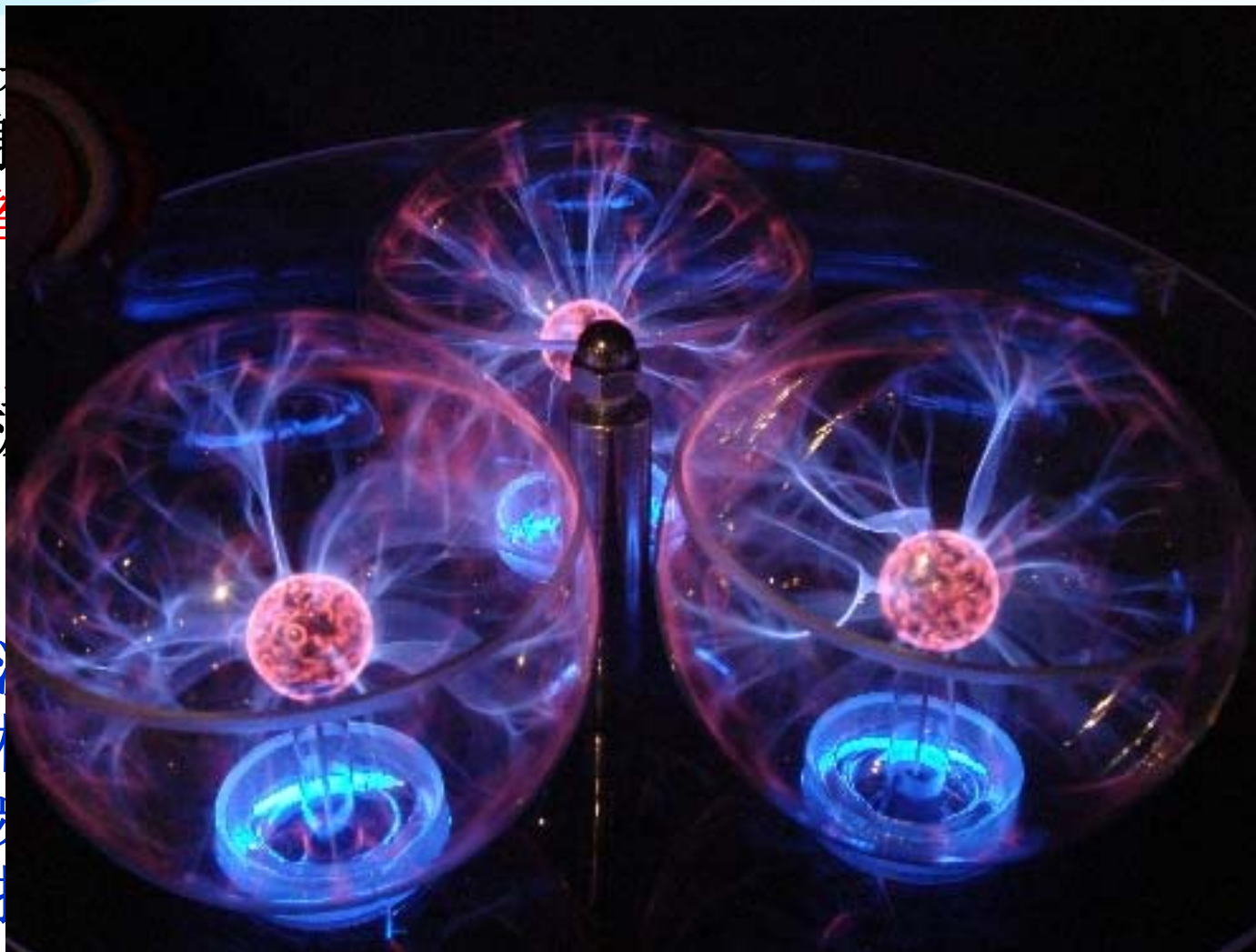


2.3.2 辉光放电

溅射
个溅射
离子轰

辉
个电极

不
(1)直
(2)三
(3)射
(4)磁

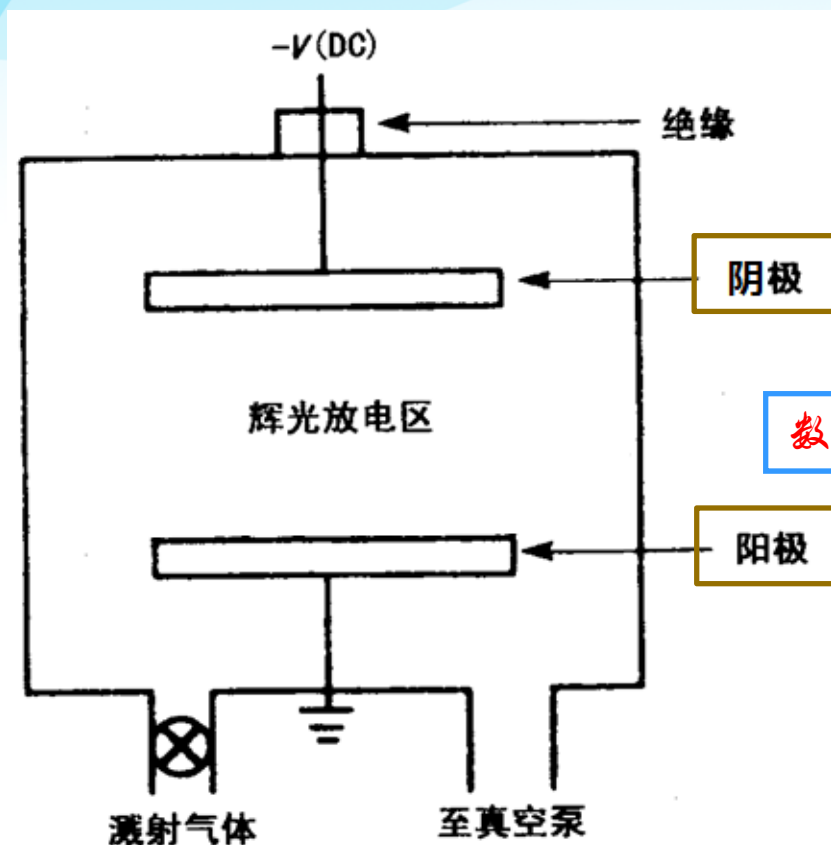


整
溅射

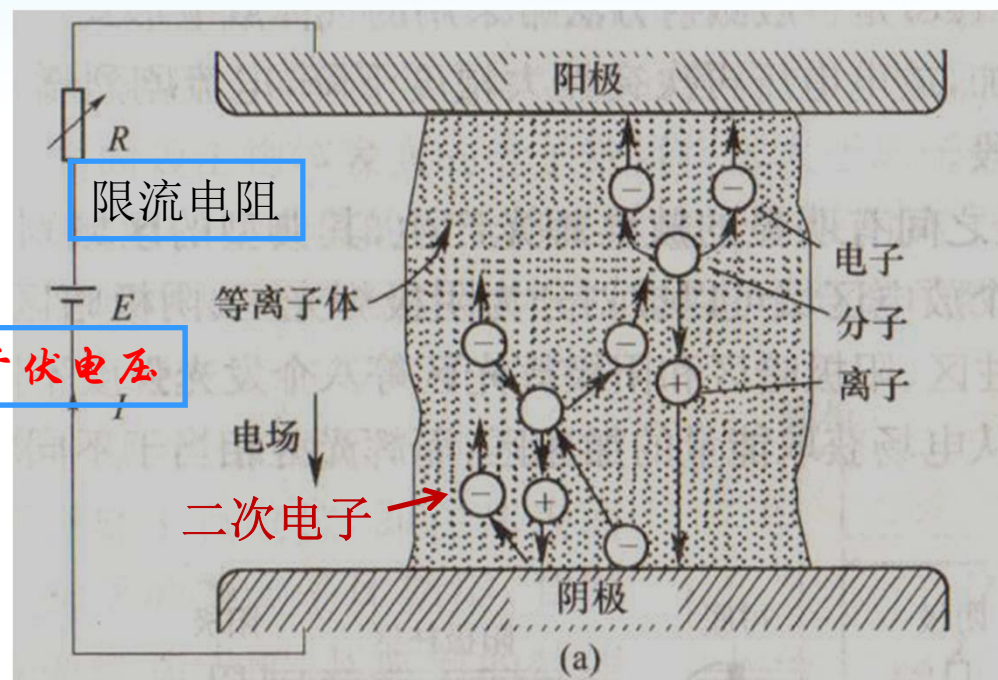
两



1. 直流二极辉光放电

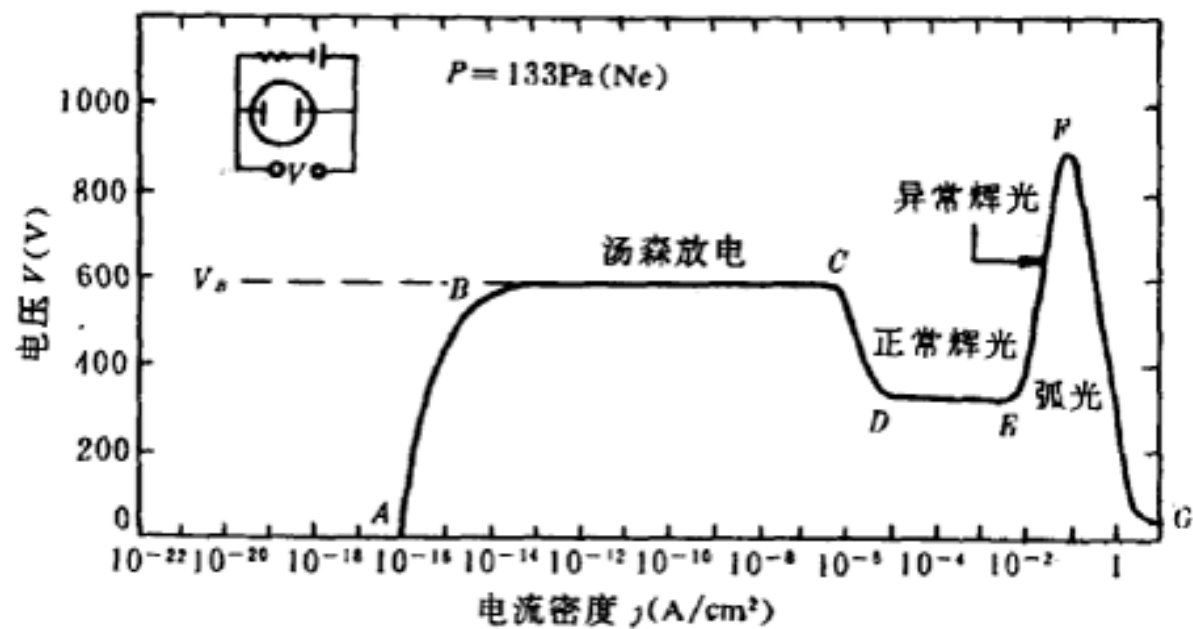
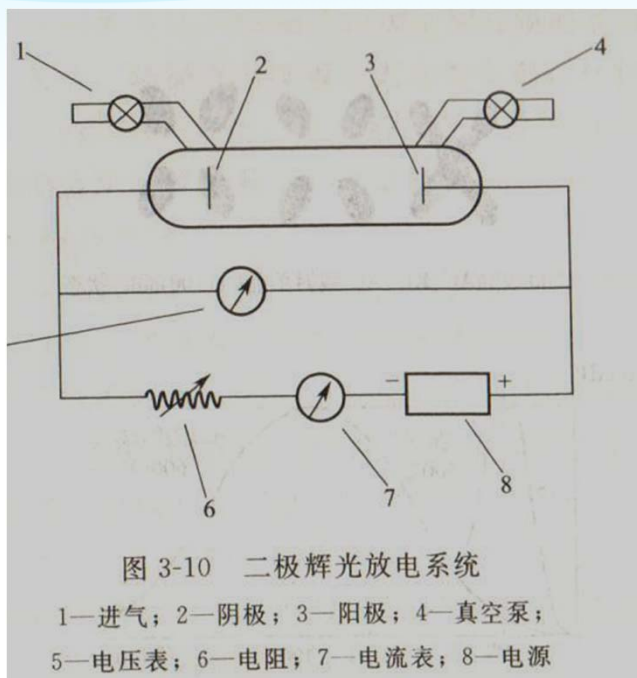


惰性气体(Ar)
压力0.1-10 Pa



极间气体原子被大量电离,
 $\text{Ar} \longrightarrow \text{Ar}^+$ 和电子

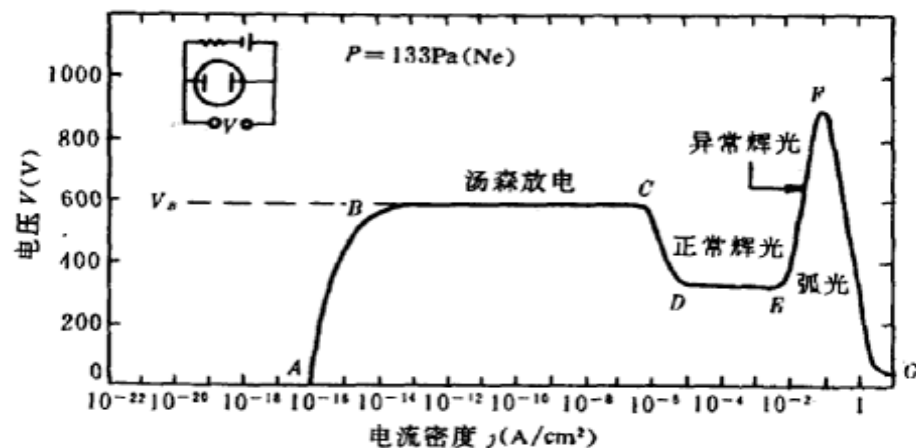
直流溅射沉积装置示意图



直流辉光放电的形成过程，
两电极之间的电压随电流的变化曲线。

(1) 无光放电 (AB区域)

当两电极加上直流电压时, 由于宇宙线产生的游离离子和电子是很有限的 (这些少量的正离子和电子在电场下运动, 形成电流), 所以开始时电流非常小, 仅有 $10^{-16} \sim 10^{-14}$ 安培左右。此区是导电而不发光, 无光放电区。



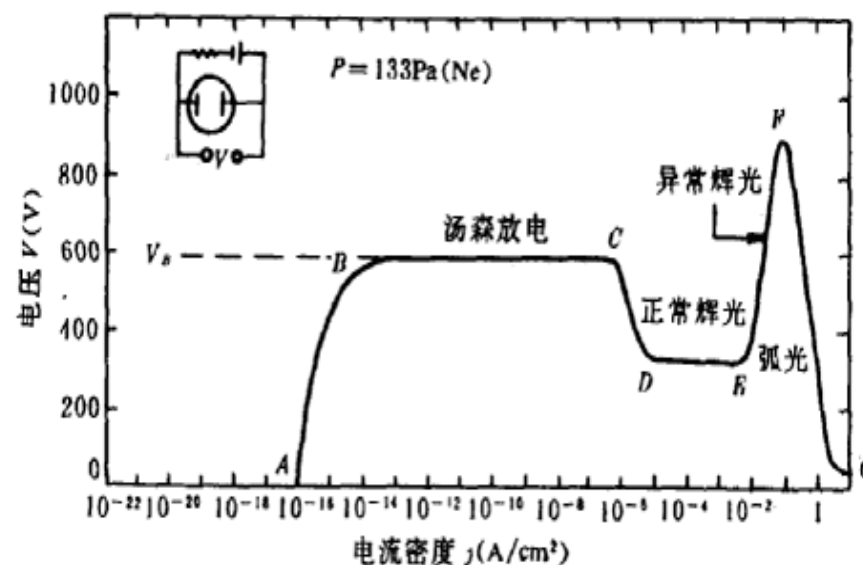
(2) 汤森放电区 (BC区)

随着电压升高, 带电离子和电子获得了足够能量, 运动速度逐渐加快, 与中性气体分子碰撞产生电离, 使电流平稳增加, 但电压却受到电源的高输出阻抗限制而呈一常数。

上述两种放电, 都以有自然电离源为前提, 如果没有游离的电子和正离子存在, 则放电不会发生。这种放电方式又称为非自持放电。

(3) 过渡区 (CD区域)

离子轰击阴极，释放出二次电子，二次电子与中性气体分子碰撞，产生更多的离子，这些离子再轰击阴极，又产生新的更多的二次电子。一旦产生了足够多的离子和电子后，放电达到自持，发生“**雪崩点火**”，气体开始起辉，两极间电流剧增，电压迅速下降。



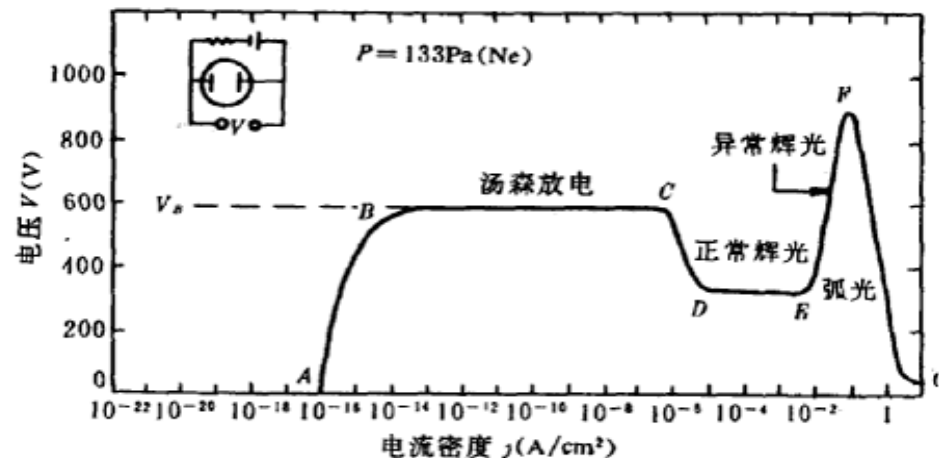
当电流增至C点时，极板两端电压突然降低，电流突然增大，并同时出现带有颜色的辉光，此过程称为气体的击穿，图中电压 V_B 称为**击穿电压**。击穿后气体的发光放电称为**辉光放电**。

(4) 正常辉光放电区 (DE区域)

在D点以后，电流与电压无关，即增大电源功率时，电压维持不变，而电流平稳增加。在这一区域，随电流的增加，轰击阴极的区域逐渐扩大。

(5) 非正常辉光放电区 (EF区域)

E点以后，离子轰击覆盖整个阴极表面，继续增加电源功率，会使两极间的电流随着电压的增大而增大，进入非正常辉光放电状态。该区域，电流可通过电压来控制，这一区域为溅射所选择的**工作区域**。



(6) 弧光放电区 (FG区域)

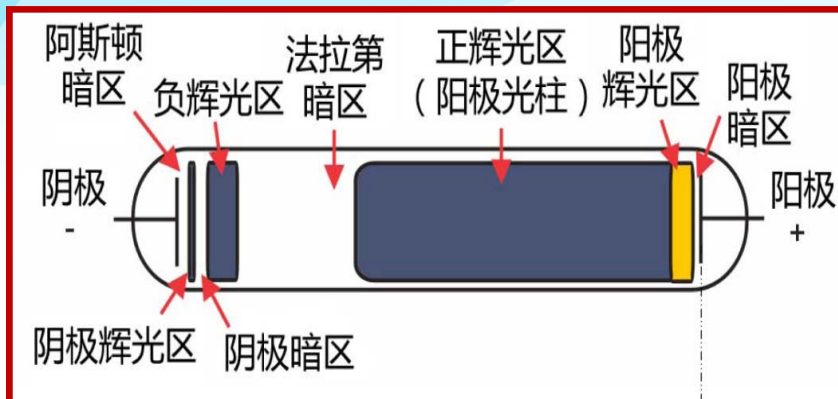
两极间电压降至很小的数值，而且电流越大，极间电压越小。

危害：

- (1) 极间电压陡降，电流突然增大，相当于极间短路；
- (2) 放电集中在阴极的局部地区，致使电流密度过大而将阴极烧毁；
- (3) 骤然增大的电流有损坏电源的危险；



直流辉光放电区域划分



(1) **阿斯顿暗区**- 靠近阴极的一层极薄区域，由于从阴极发射的电子能量只有 1eV 左右，不能发生激发和电离。

(2) **阴极辉光区**- 紧靠阿斯顿暗区，电子加速足够与气体分子碰撞使之电离，由于离化后的离子与电子复合而放出光子。

(3) **克鲁克斯暗区**- 从阴极辉光区出来的电子，不具有足够的能量与气体分子碰撞使之电离，从而出现另一个暗区。

(4) **负辉光区**- 通过克鲁克斯暗区后，电子又会获得足够高的能量与气体分子碰撞并使之电离，离化后的离子与电子复合后又产生大量的光子，形成**负辉光区**。正离子质量大，向阴极运动慢，形成高浓度的正离子，使区域电位升高，与阴极形成很大的电位差。此电位差称为阴极辉光放电的**阴极压降**。

(5) **法拉第暗区** 和 **阳极光柱**- 大部分电子已在负辉区中经历多次碰撞损失了能量，不足以引起电离和激发，少数电子穿越负辉光区，在负辉光区与阳极之间是法拉第暗区和阳极光柱，其作用是连接负辉光区和阳极。

只是一种比较典型的划分情况，实际具体放电情况可根据放电容器的尺寸、气体种类、气压、电极的布置、电极材料的不同有所不同。

实际溅射镀膜中，基片通常置于负辉光区，阴极和基片距离至少应是克鲁克斯暗区宽度的**3~4倍**。



2.3.3 溅射特性

表征溅射特性的参量主要有溅射阈值、溅射率以及溅射粒子的速度和能量等。

1. 溅射阈值

溅射阈值指使靶材原子发生溅射的入射离子所必须具有的最小能量。溅射阈值主要取决于靶材料，与离子质量无明显依赖关系。

对于同周期元素，溅射阈值随靶材原子序数增加而减小。

绝大多数金属的溅射阈值为20~40eV，相当于升华热的4倍。

2. 溅射率

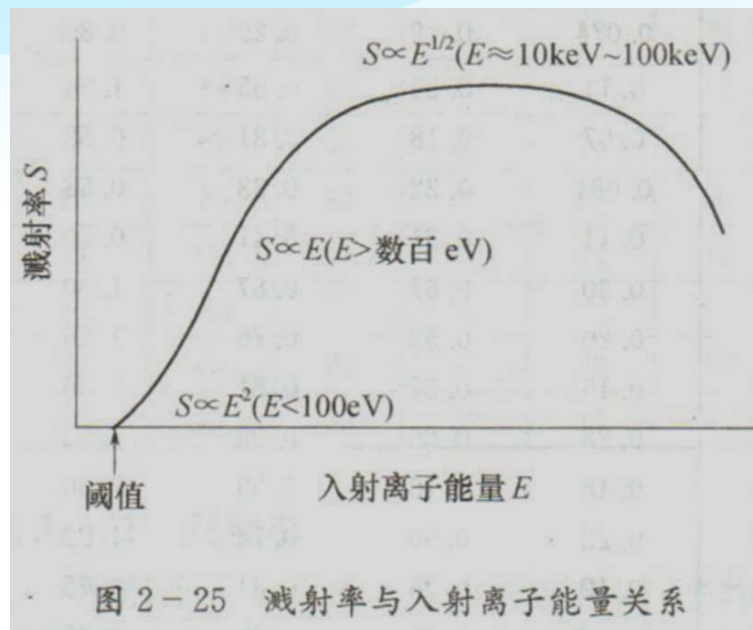
溅射率表示正离子轰击靶阴极时，平均每个正离子能从阴极上打出的原子数。又称**溅射产额**或**溅射系数**，常用**S**表示。

溅射率与**入射离子**种类、能量、角度及**靶材**的类型、晶格结构、表面状态、升华热大小等因素有关。

(1) 靶材料与溅射率的关系

- a. 溅射率**S** 随靶材元素原子序数增加而增大（相同条件，同一种离子轰击不同元素的靶材料）。
- b. 晶格结构不同，**S**不同。
- c. 与表面清洁度有关，清洁度高，**S**大。
- d. 升华热大，**S**小。

(2) 入射离子能量与溅射率的关系



当入射离子能量较小时，溅射率随入射离子能量的增加而呈指数上升；

其后，随入射离子能量的增加出现一个线性增大区；

之后，逐渐达到一个平坦的最大值而呈饱和状态。

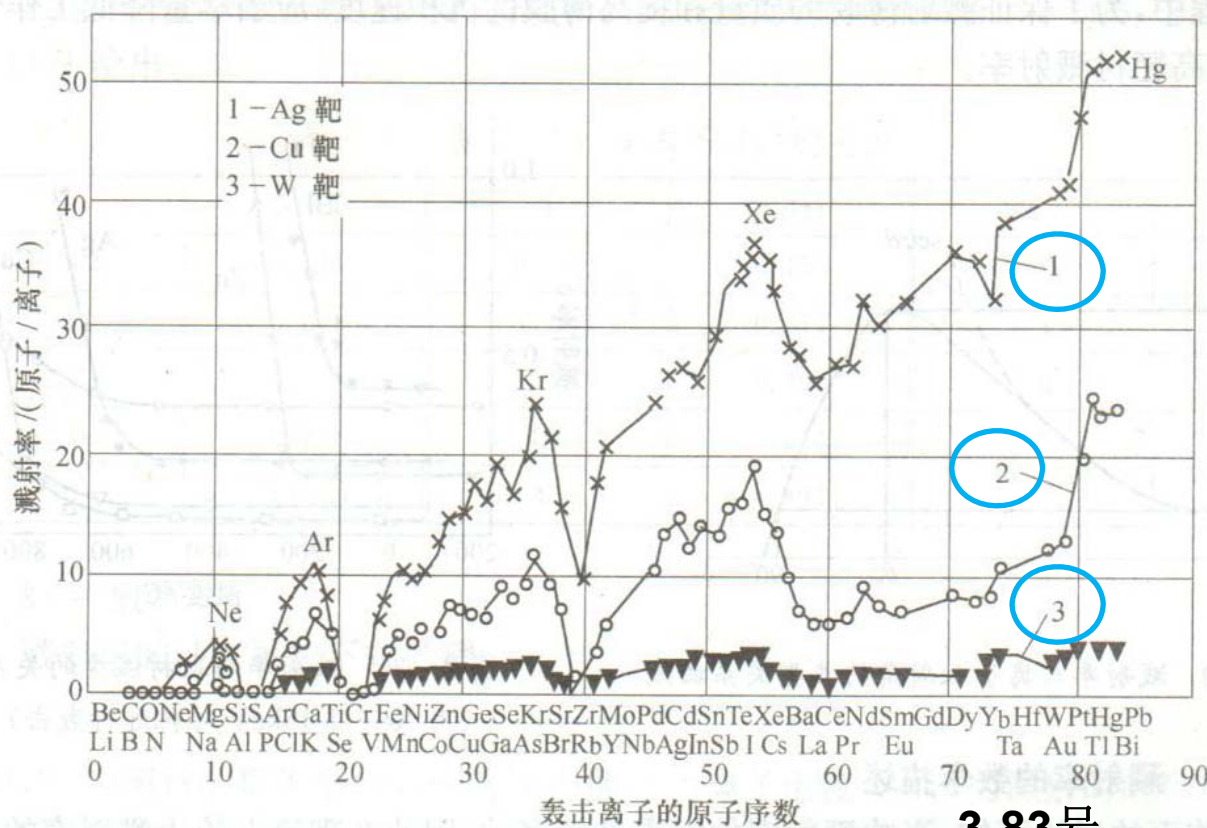
如果再增大E，则因离子注入效应反而使S值开始下降。

图 2-25 中的曲线可分为三个区域：

$S \propto E^2$	$E_r < E < 500\text{eV}$ (E_r 为溅射阈值)
$S \propto E$	$500\text{eV} < E < 1000\text{eV}$
$S \propto E^{1/2}$	$100\text{eV} < E < 5000\text{eV}$

(3) 入射离子种类与溅射率的关系

入射离子的原子量越大，溅射率越高；溅射率也与入射离子的原子序数呈现周期性变化的关系。



在周期表每一排中，凡电子壳层填满的元素就有最大溅射率；位于周期表每一排中间部位的元素的溅射率低。

(如惰性气体，经济、不与靶材反应)。

但：用不同的入射离子溅射同一靶材时，所呈现的溅射率的差异，大大低于用同一种离子去轰击不同靶材所得到的溅射率的差异。

图 2-27 溅射率与入射离子原子序数的关系

(4) 入射离子的入射角 与溅射率的关系

入射角是指离子入射方向与被溅射靶材表面法线之间的夹角。不同入射角 θ 的溅射率值 $S(\theta)$ ，垂直入射时的溅射率值 $S(0)$ 。

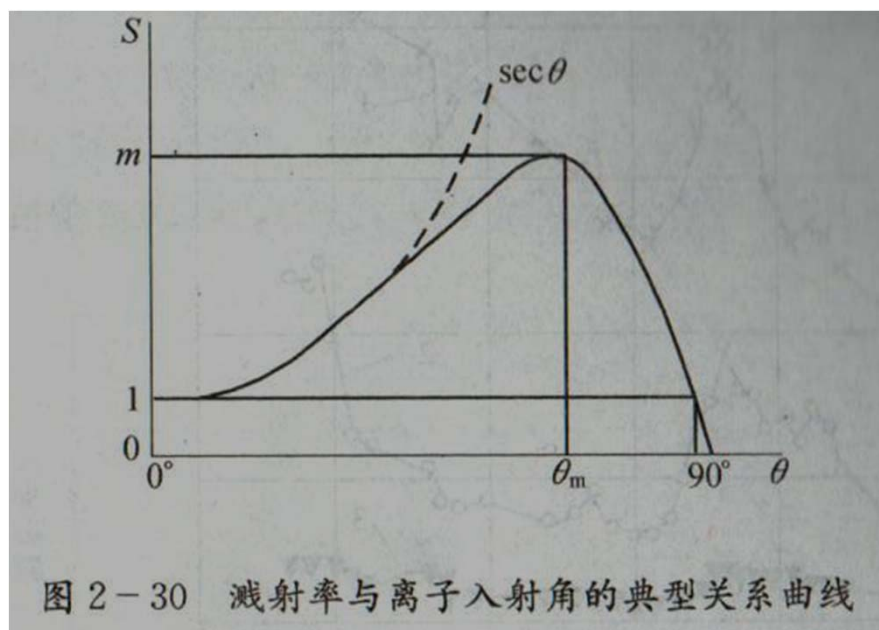


图 2-30 溅射率与离子入射角的典型关系曲线

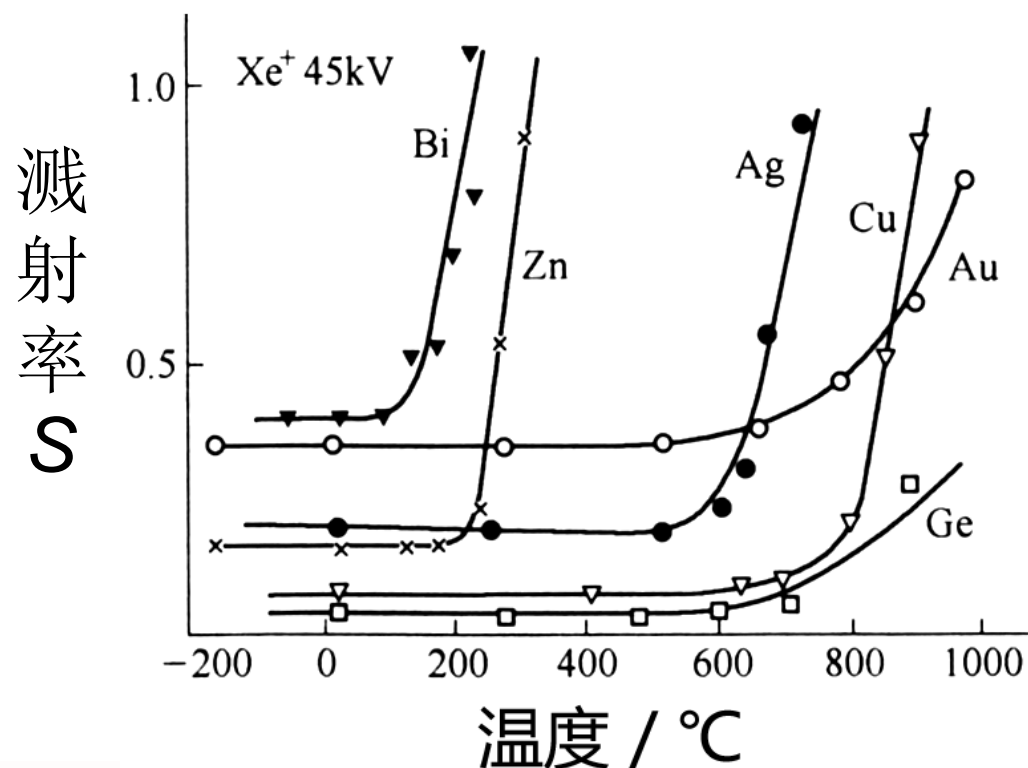
随入射角增大，溅射率逐渐增大，在 $0-60^\circ$ 之间的相对溅射率基本上服从 $1/\cos(\theta)$ 的规律，即 $S(\theta)/S(0) = 1/\cos(\theta)$ 。 $\theta=60^\circ$ 时， S 约为垂直入射时的2倍。当入射角为 $60^\circ-80^\circ$ 时，溅射率最大，入射角再增大时，溅射率急剧减小，当 $\theta=90^\circ$ 时，溅射率为0。

对于不同的靶材和不同的入射离子，对应于最大溅射率的 S 值有一个最佳的入射角 θ_m 。



(5) 靶材温度与入射率的关系

溅射率与靶材温度的依赖关系，主要与靶材物质的升华能相关的某温度值有关，在低于此温度时，溅射率几乎不变。但是，超过此温度时，溅射率将急剧增大。





3. 溅射原子的能量和速度

(1) 溅射原子的能量比蒸发原子的能量大:

一般由蒸发源蒸发出来的原子的能量为 0.1ev 左右。

溅射中, 一般认为, 溅射原子的能量比热蒸发原子能量大 $1-2$ 个数量级, 约 $1-10\text{ev}$ 。

(2) 影响溅射原子的能量的因素:

溅射原子的能量与靶材料、入射离子的种类和能量以及溅射原子的方向性有关。

同一离子轰击不同材料时，溅射原子平均逸出能量和平均逸出速度如 [图2-36](#)和 [图2-37](#)所示。原子序数 $Z > 20$ 时，各元素的平均逸出能量差别增大，而平均速度差别较小。

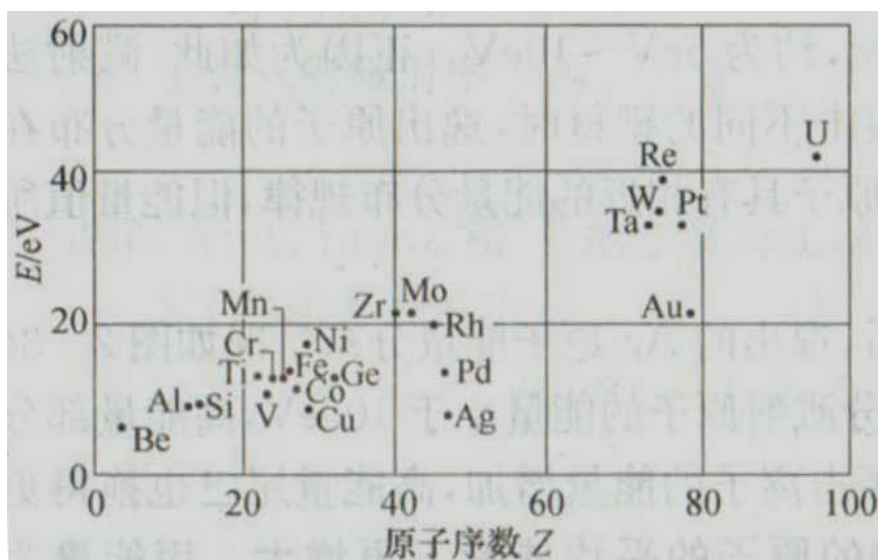


图 2-36 1200eV 的 Kr^+ 离子轰击不同的靶材时溅射原子的平均逸出能量

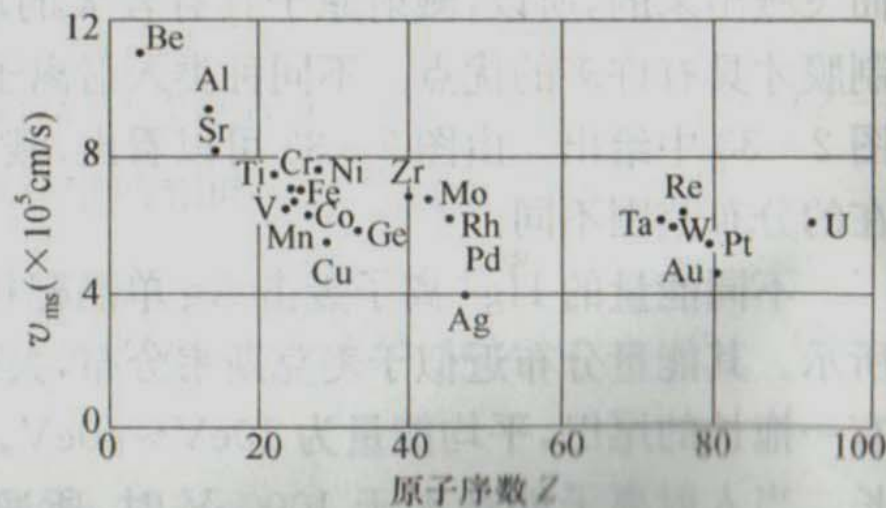


图 2-37 1200eV 的 Kr^+ 离子轰击不同的靶材时溅射原子的平均逸出速度



溅射原子的**能量**和**速度**具有以下几个特点：

- (1) **重元素靶材**被溅射出来的原子有**较高的逸出能量**，而 **轻元素靶材**则有**高的原子逸出速度**；
- (2) 不同靶材料，具有不相同的原子逸出能量。溅射率高的靶材料，通常有较低的平均原子逸出能量；
- (3) 在相同的轰击能量下，原子逸出能量随入射离子质量线性增加，**轻入射离子**溅射出的原子其逸出能量较低，约为 **10 eV** ，而**重入射离子**溅射出的原子其逸出能量较大，平均达到 **$30-40\text{ eV}$** 。
- (4) 溅射原子的平均逸出能量，随入射离子能量 增加而增大，当入射离子能量达到某一较高值（如 **1 keV** ）以上时， 平均逸出能量逐渐趋于恒定值。



4. 溅射原子的角度分布

早期的溅射理论（溅射的热峰蒸发理论）认为：

溅射的发生是由于高能量的轰击离子产生了局部高温区，从而导致靶材料的蒸发，逸出原子呈现余弦分布规律，并且与入射离子的方向性无关（参见图 2-38 中虚线部分）。

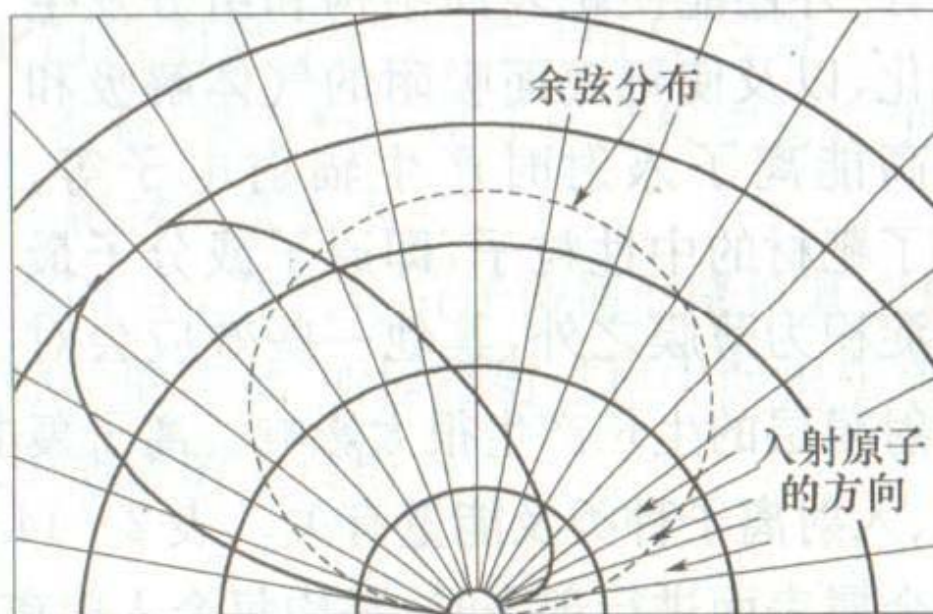
进一步研究发现

（1）用低能离子轰击靶表面方向性（图 2-38）；

（2）对于不同

（3）改变轰击角增加（图 2-38）；

（4）溅射原子



分布定律。垂直方向的逸出原子数

；
反射方向显著增

图 2-38 倾斜轰击时溅射原子的角度



2.3.4 溅射

溅射过程
在基板上成

1. 靶材的溅射

当入射离子轰击靶材时，使其获得动能，从而发生溅射。这是靶材的迁移和

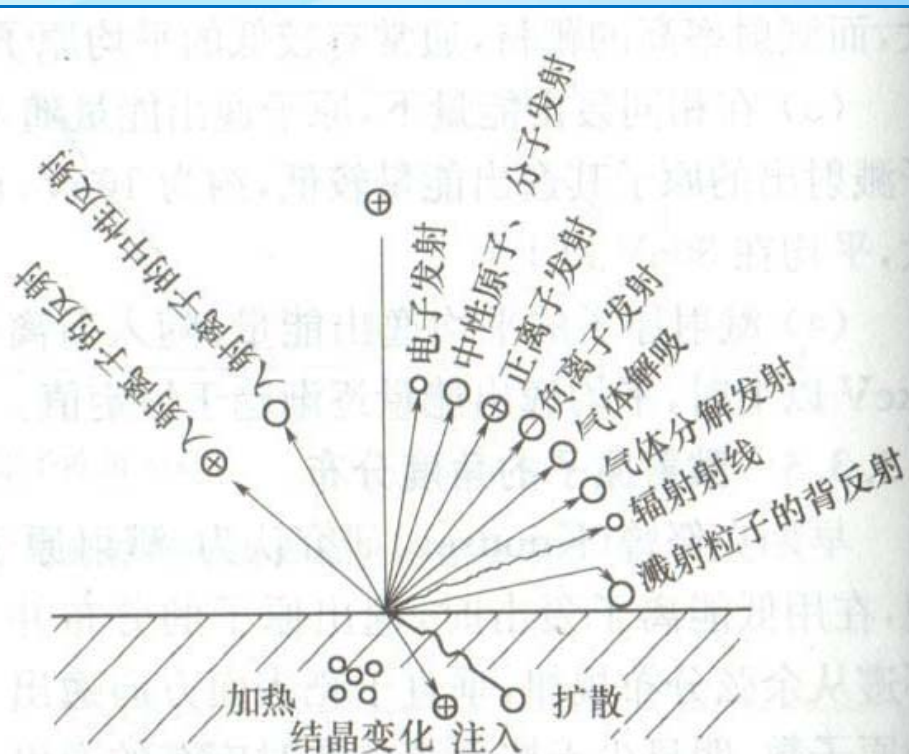


图 2-40 入射离子轰击固体表面所引起的各种效应

实际上，**溅射过程十分复杂**，当高能入射离子轰击固体表面时，会产生如**图 2-40**所示的**许多效应**。除了靶材的中性粒子，即原子或分子最终淀积为薄膜之外，其他一些效应对溅射膜层的生长产生很大的影响。



能量为**10 eV~100eV**的**Ar⁺**离子对某些金属表面进行轰击时，平均每个入射离子所产生各种效应及其发生概率：

表 2-14 离子轰击固体表面所产生各种效应及其发生概率

效 应	名 称	发 生 概 率
溅 射	溅射率 S	$S=0.1\sim 10$
离子溅射	一次离子反射系数 ρ	$\rho=10^{-4}\sim 10^{-2}$
离子溅射	被中和的一次离子反射系数 ρ_m	$\rho_m=10^{-3}\sim 10^{-2}$
离子注入	离子注入系数 a	$a=1-(\rho+\rho_m)$
离子注入	离子注入深度 d	$d=1\text{nm}\sim 10\text{nm}$
二次电子发射	二次电子发射系数 r	$r=0.1\sim 1$
二次电子发射	二次电子发射系数 k	$k=10^{-5}\sim 10^{-4}$

2. 溅射粒子的迁移过程

靶材受到轰击所逸出的粒子中，正离子由于反向电场的作用不能到达基片表面，其余的粒子均会向基片迁移。

溅射镀膜的气体压力为 $10^1 \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ ，此时溅射粒子的平均自由程为 $1 \sim 10 \text{ cm}$ ，因此，靶与基片的距离应与该值大致相等。否则，溅射粒子在迁移过程中将发生多次碰撞，这样，既降低了靶材原子的动能，又增加靶材的散射损失。

尽管溅射原子在向基片的迁移运输过程中，会因与工作气体分子碰撞而降低其能量，但是，由于溅射出的靶材原子能量远远高于蒸发原子的能量，所以溅射过程中淀积在基片上靶材原子的能量仍比较大，其值相当于蒸发原子能量的几十至上百倍。



3. 溅射粒子的成膜过程

薄膜的生长过程将在第五章中介绍，这里主要叙述靶材粒子入射到基片上在沉积成膜过程中应当考虑的几个问题。

(1) 淀积速率 Q

淀积速率 Q 是指从靶材上溅射出来的物质，在单位时间内淀积到基片上的厚度。

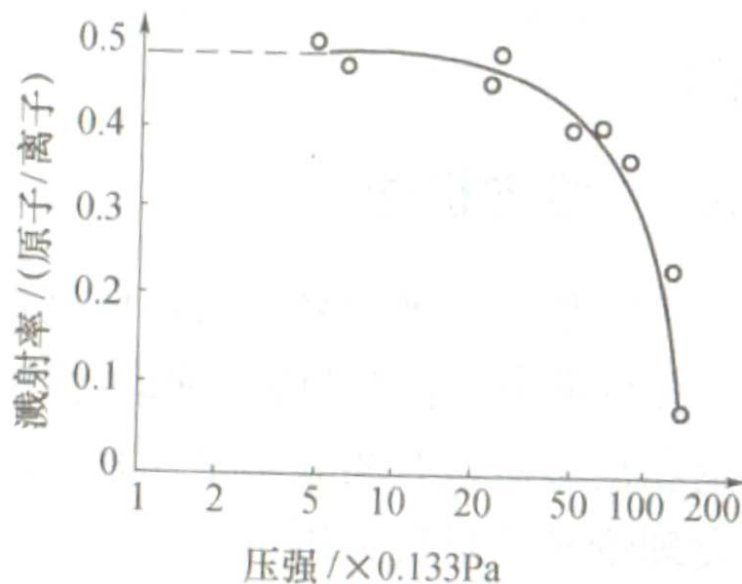
$$Q = CIS \quad (2-53)$$

C - 与溅射装置有关的特征常数， I - 离子流， S - 溅射率

对于一定的溅射装置（即 C 确定值）和一定的工作气体，该淀积速率 Q 与溅射率 S 与离子电流 I 的乘积成正比。提高淀积速率的有效办法是提高离子电流 I 。在不增高电压的条件下，增加 I 就只有增高工作气体的压力，但较多地增加气体压力反而会降低溅射率。

图2-41示出了气体压力与溅射率的关系曲线。

当压力增高到一定值时，溅射率将开始明显下降。这是由于靶材粒子的背反射和散射增大所引起的。事实上，在大约 **10Pa** 的气压下，从阴极靶溅射出来的粒子中，只有 **10%** 左右才能够穿越阴极暗区。所以，由溅射率来选择气压的最佳值是比较恰当的。



当溅射气体压力高时，轰击靶的气体离子多，溅射出的粒子数也多，使溅射速率增大。但是溅射粒子（浓度增大）的平均自由程减小，与碰撞的几率增大，使沉积速率减小。溅射气压所产生的这两种效果互相制约，随着溅射气压的增加，最初沉积速率不断增大，当溅射气压增大到一定程度时，沉积速率达到最大值，之后随着溅射气压的增大又不断减小。



(2) 淀积薄膜的纯度

为了提高淀积薄膜的纯度，必须尽量减少淀积到基片上杂质的量（杂质主要指真空室的残余气体）。因为，通常有约百分之几的溅射气体分子注入淀积薄膜中，特别在基片加偏压时。若真空室容积为 V ，残余气体分压为 P_c ，氩气分压为 P_{Ar} ，送入真空室的残余气体量为 Q_c ，氩气量为 Q_{Ar} ，则有

$$\begin{aligned} Q_c &= P_c V & Q_{Ar} &= P_{Ar} V \\ P_c &= P_{Ar} Q_c / Q_{Ar} \end{aligned} \quad (2-54)$$

由此可见，欲降低残余气体压力 P_c ，提高薄膜的纯度，可采取提高本底真空度和增加送氩量这两项有效措施。本底真空度为 $10^{-3} \sim 10^{-4} Pa$ 较合适。

(3) 淀积过程中的污染

在通入溅射气体之前，把真空室内的压强降低到高真空区内（ $10^{-4} Pa$ ）是很必要的。即便如此，仍可存在许多污染源存在：

a. 真空壁和真空室中的其他零件可能会有吸附气体、水汽和二氧化碳。由于辉光中电子和离子的轰击作用，这些气体可能重新释出。因此，可能接触辉光的一切表面都必须在淀积过程中适当冷却，以便使其在淀积的最初几分钟内达到热平衡，也可在抽气过程中进行高温烘烤。

b. 在溅射气压下，扩散泵抽气效力很低，扩散泵油的回流现象可能十分严重。



- c. 基片表面的颗粒物质对薄膜的影响是会产生针孔和形成淀积污染。因此，淀积前应对基片进行彻底的清洗，尽可能保证基片不受污染或携带微粒状污物。

（4）成膜过程中的溅射条件控制：

应选择溅射率高、对靶材呈惰性、价廉、高纯的溅射气体或工作气体。

应注意溅射电压及基片电位（接地、悬浮或偏压）对薄膜特性的严重影响。溅射电压不仅影响淀积速率，而且还严重影响薄膜的结构；基片电位则直接影响入射的电子流或离子流。



- **基片温度**直接影响膜层的生长及特性。靶材中杂质和表面氧化物等不纯物质，是污染薄膜的重要因素。必须注意靶材的 高纯和保持清洁的靶表面。

通常在溅 射淀积之前对靶进行**预溅射**是使靶表面净化的有效方法。

- **此外**，在溅射过程中，还应注意溅射设备中存在的诸如**电场、磁场、气氛、靶材、基片温度、几何结构、真空度**等参数间的相互影响。

2.3.5 溅射机理

解释溅射现象的两种较为成熟的理论：

1. 热蒸发理论

早期认为：溅射现象是被电离气体的荷能正离子，在电场的加速下轰击靶表面，而将能量传递给碰撞处的原子，结果导致表面碰撞处很小区域内，发生瞬间强烈的局部高温，从而使这个区域的靶材料熔化，发生热蒸发。

* 在一定程度上**解释**了溅射的某些规律和溅射现象，如溅射率与靶材料的蒸发热和轰击离子的能量关系等。

* **不能解释**溅射率与离子入射角的关系、单晶材料溅射时，溅射原子的角分布的非余弦分布规律、以及溅射率与入射离子质量的关系等。



2. 动量转移理论

低能离子碰撞靶时，不能从固体表面直接溅射出原子，而是把动量转移给被碰撞的原子，引起晶格点阵上原子的链锁式碰撞。这种碰撞将沿着晶体点阵的各个方向进行。同时，碰撞因在原子最紧密排列的点阵方向上最为有效，结果晶体表面的原子从邻近原子那里得到愈来愈大的能量，如果这个能量大于原子的结合能，原子就从固体表面被溅射出来。

* 能很好地解释热蒸发理论所不能说明的：如溅射率与离子入射角的关系，溅射原子的角分布规律等规律。

2.3.6 溅射镀膜类型

溅射镀膜的方式较多：

- ◆ 电极结构上可分为：二极溅射、三或四极溅射和磁控溅射；
- ◆ 射频溅射制备绝缘薄膜而研制的；
- ◆ 反应溅射可制备化合物薄膜；
- ◆ 为了提高薄膜纯度而分别研究出偏压溅射、非对称交流溅射和吸气溅射等；
- ◆ 近年来为进行磁性薄膜的高速低温制备，还研究开发成功对向靶溅射装置。

表2—15列出了各种溅射镀膜类型并进行了比较。



表 2-15 溅射镀膜类型的比较

序号	溅射方式	溅射电源	Ar 压强/Pa	特征
1	二极溅射	DC 1kV~7kV 0.1mA/cm ² ~1.5mA/cm ² RF 0.3kV~10kV 1W/cm ² ~10W/cm ²	1	构造简单,在大面积基板上可制取均匀薄膜,放电电流随压强和电压的改变而变化
2	偏压溅射	在 0~500V 范围内,使基片对阳极处于正或负的电位	1	镀膜过程中同时清除基片上轻质量的带电粒子,从而使基板中不含有不纯气体(H ₂ O、N ₂ 等)
3	三极或四极溅射	DC 0~2kV RF 0~1kV	$6.7 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1}$	可实现低气压、低电压溅射,可独立控制放电电流和轰击靶的离子能量。可控制靶电流,也可进行射频溅射
4	射频溅射	RF 0.3kW~10kW 0~2kW	1	为制取绝缘薄膜,如 SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、玻璃膜等而研制,也可溅射金属



2.3.6 溅射镀膜类型

(续)

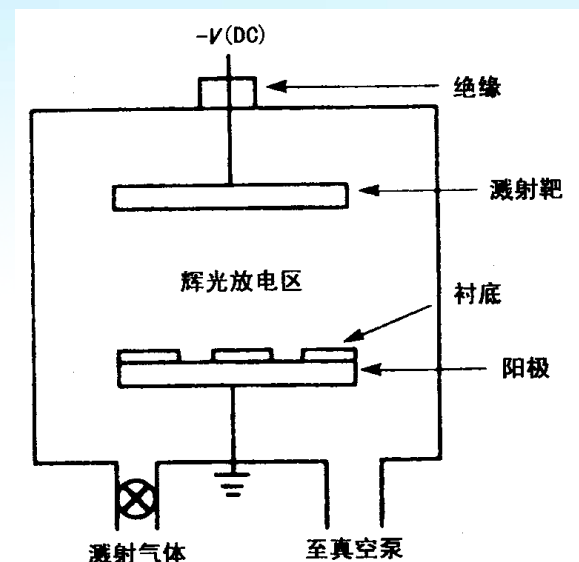
序号	溅射方式	溅射电源	Ar 压强/Pa	特征
5	磁控溅射(高速低温溅射)	0.2kV~1kV(高速低温) 3W/cm ² ~30W/cm ²	~10 ⁻¹	在与靶表面平行的方向上施加磁场,利用电场与磁场正交的磁控管原理,减少电子对基板轰击,实现高速低温溅射
6	对向靶溅射	DC RF	~10 ⁻¹	两个靶对向放置,在垂直于靶的表面方向加磁场,可以对磁性材料进行高速低温溅射
7	反应溅射	DC 1kV~7kV RF 0.3kV~10kW	在氩中混入适量活性反应气体,如 O ₂ 、N ₂ 等	制作阴极物质的化合物薄膜,如 TiN、SiC、AlN、Al ₂ O ₃ 等
8	离子束溅射	DC	1.3×10 ⁻³	在高真空下,利用离子束溅射镀膜,是非等离子体状态下的成膜过程。靶接地电位也可

注:DC—直流;RF—射频

1、直流二极溅射:

*待镀靶材连接到电源阴极（阴极靶，接负高压）；与靶相对的基片则连接到电源的阳极。

为了在辉光放电过程中使靶表面保持可控的负高压，靶材必须是导体。



*工作时，先将真空室预抽到高真空（如 10^{-3} Pa），然后，通入氩气使真空室内压力维持在 $1\sim 10$ Pa时，接通电源（1-5 KV）使在阴极和阳极间产生异常辉光放电，并建立起等离子区，其中带正电的氩离子受到电场加速而轰击阴极靶，从而使靶材产生溅射。

* 气体放电产生的正离子飞向阴极靶，一次电子飞向阳极。正离子轰击阴极进所产生的二次电子，经加速后去补充被消耗的一次电子来维持持续放电（辉光放电达到自持）。

* 直流二极溅射的工作参数为溅射功率、放电电压、气体压力和电极间距。

优点：结构简单，可获得大面积膜厚均匀的薄膜。

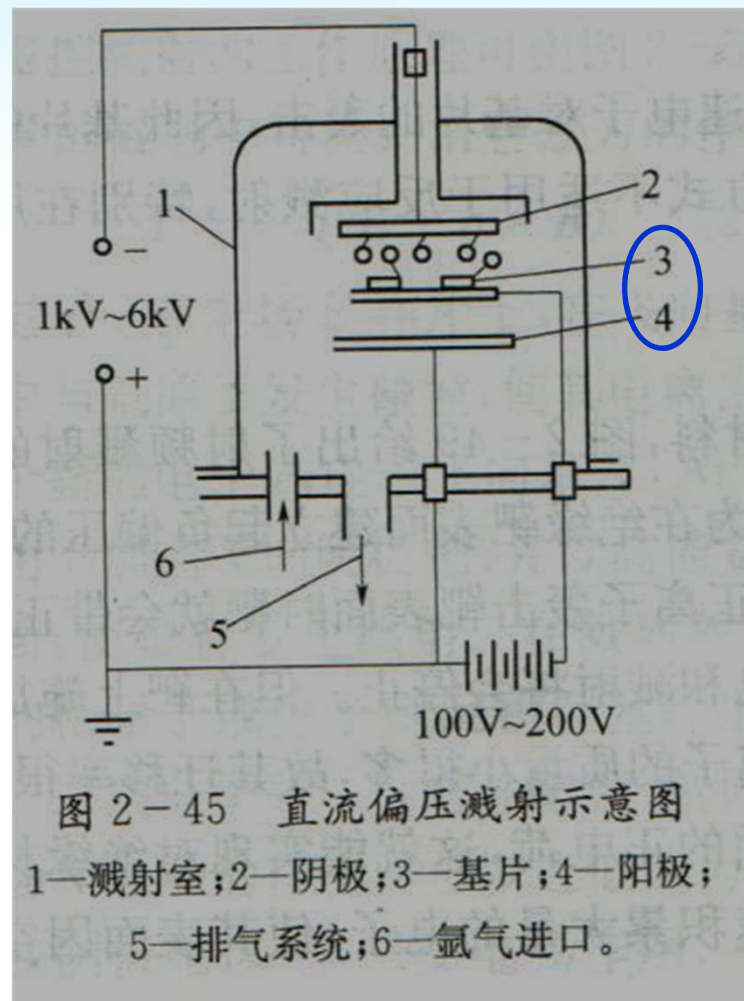
缺点：

- (1) 溅射参数不易独立控制，放电电流易随电压和气压变化，工艺重复性差；
- (2) 用于产生放电的残留气体对膜层有污染；
- (3) 基片温度高（达数百度左右）、沉积速率低；
- (4) 靶材必须是良导体。

2. 偏压溅射

特点：它与直流二极溅射的区别在于基片上施加一固定直流偏压。

原理：若施加的是负偏压，则在薄膜淀积过程中，基片表面都将受到气体离子的稳定轰击，随时清除可能进入薄膜表面的气体，有利于提高薄膜的纯度。并且也可除掉粘附力弱的淀积粒子，加之在淀积之前可对基片进行轰击清洗，使表面净化，从而提高了薄膜的附着力。



偏压溅射中施加不同的偏压有可能改变所制备薄膜的结构。

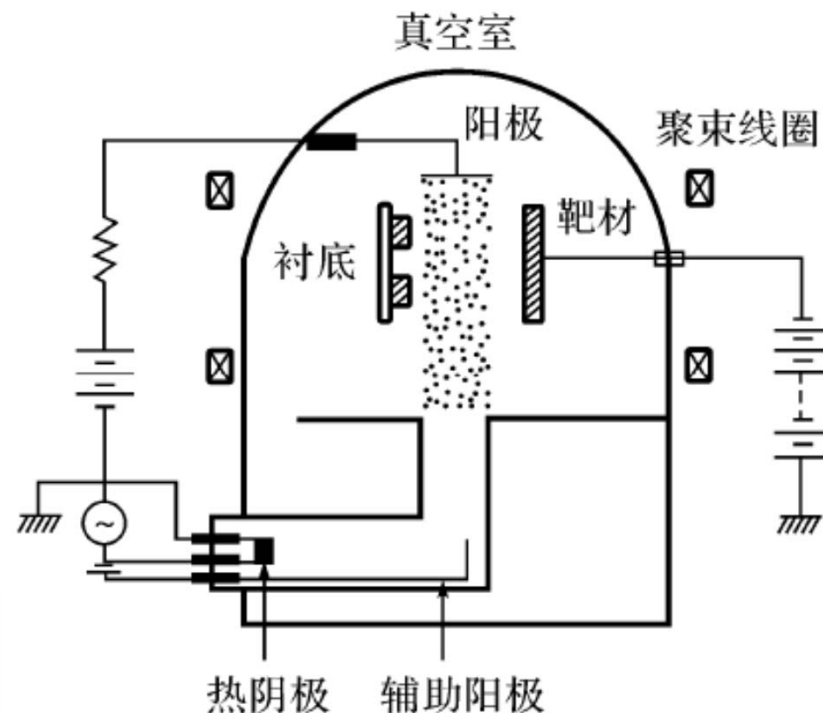
3. 三极溅射

原理：在真空室内附加一个热阴极，由它发射电子并和阳极产生等离子体。同时使靶相对于该等离子体为负电位，用等离子体中的正离子轰击靶材而进行溅射。

优点：

1) 克服了二极直流溅射只能在较高气压下进行的缺点，因为它是依赖离子轰击阴极所发射的次级电子来维持辉光放电。

2) 三极溅射的进行不再依赖于阴极所发射的二次电子，溅射速率可以由热阴极的发射电流控制，提高了溅射参数的可控性和工艺重复性。

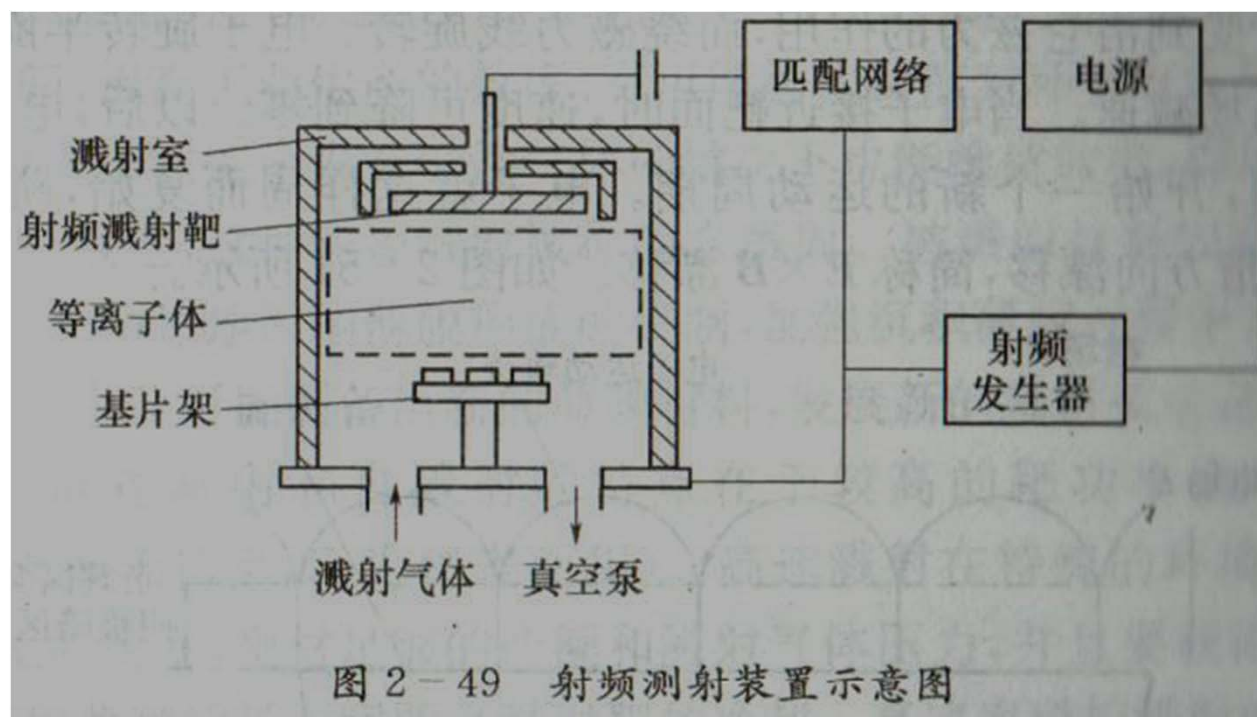


缺点:

- (1) 三极溅射还不能抑制由靶产生的高速电子对基板的轰击，特别在高速溅射的情况下，基板的温升较高；
- (2) 灯丝寿命短，也还存在灯丝的不纯物使膜层沾污等问题。
- (3) 这种溅射方式并不适用于反应溅射，特别在用氧作反应气体的情况下，灯丝的寿命将显著缩短。

4. 射频溅射

射频溅射装置如图所示。相当于直流溅射装置中的直流电源部分改由射频发生器、匹配网络和电源所代替，利用射频辉光放电产生溅射所需正离子。





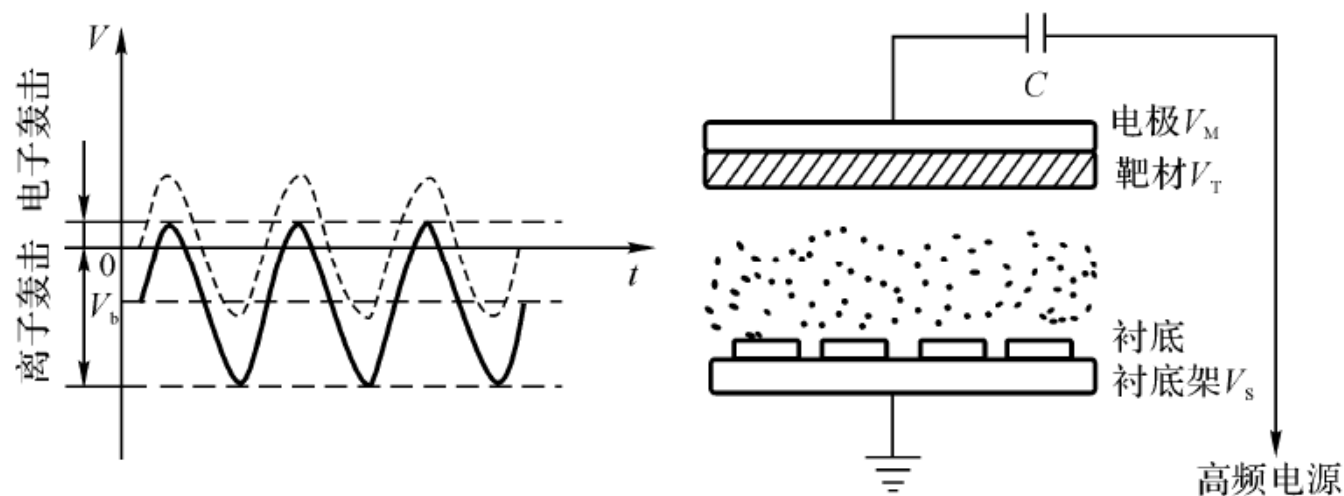
问题：

对于直流溅射来说，如果靶材不是良导体材料，而是绝缘材料，正离子轰击靶面时靶就会带正电，使其电位上升，离子加速电场就要逐渐变小，使离子溅射靶材不可能，以至辉光放电和溅射停止。

机理:

可溅射绝缘体。

高频范围: $5\sim 30\text{MHz}$ (一般 $Rf=13.56\text{MHz}$)



射频电势加在位于绝缘靶下面的金属电极上。在射频电势作用下，在交变电场中振荡的电子具有足够高的能量产生离化碰撞，放电达到自持。

如果在靶上施加的是**射频电压**，当溅射靶处于**正半周期**时，由于**电子**的质量比离子的质量小得多，故其迁移率很高仅用很短时间就可以飞向靶面，**中和其表面积累的正电荷**，并且在靶面又迅速积累大量的电子，使其表面因空间电荷呈现负电位，导致在射频电压的正半周期时也吸引离子轰击靶材。从而实现了在正、负半周期均可产生溅射。

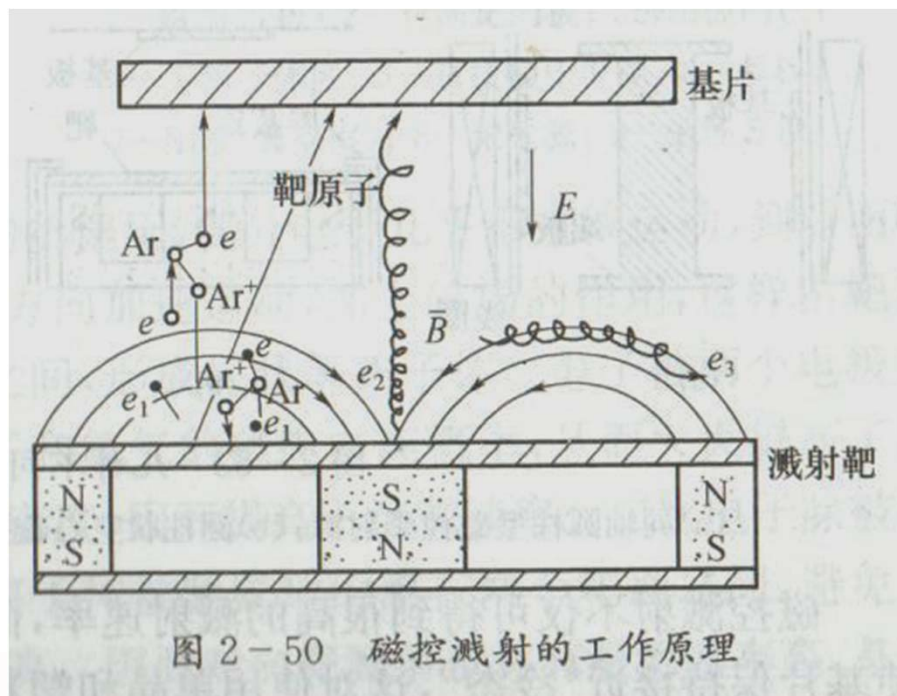
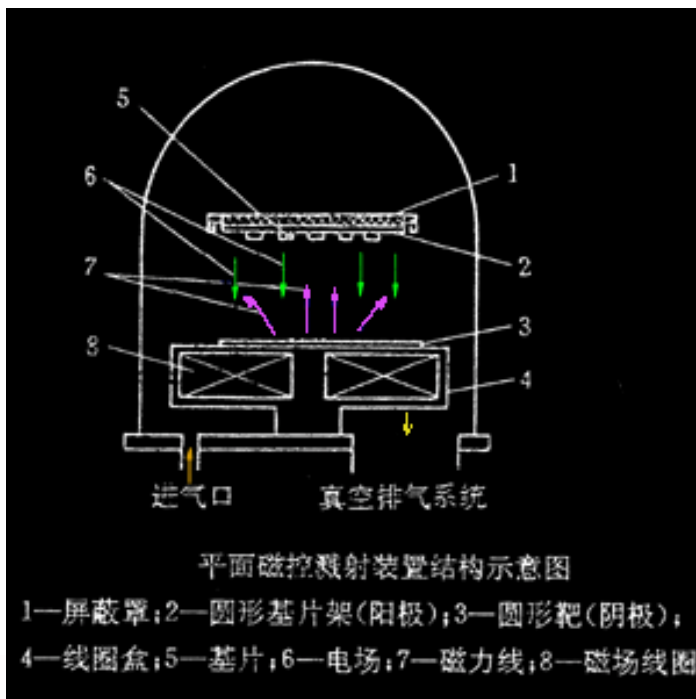


5. 磁控溅射—低温高速溅射

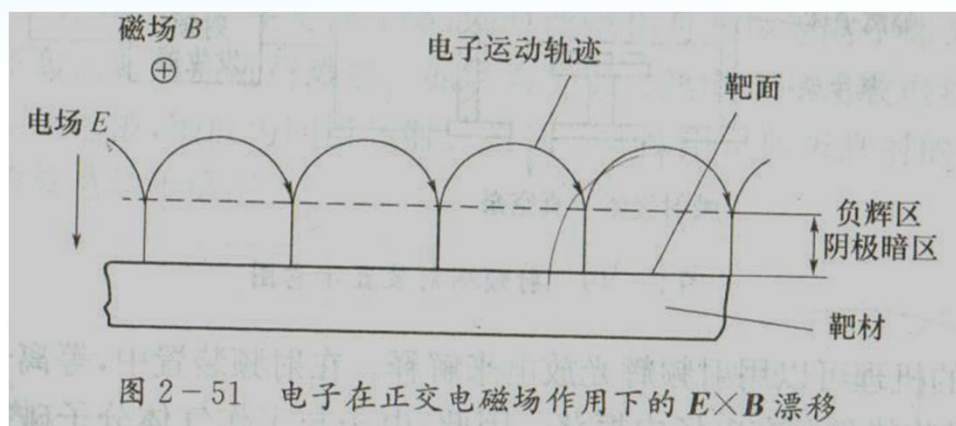
溅射沉积方法缺点：沉积速度低、工作气压较高引起污染。

磁控溅射：提高沉积速率，降低工作气体压力。

磁控溅射中引入了正交电磁场，使**离化率提高**了5~6%，于是溅射速率可比三极溅射提高10倍左右。对许多材料，溅射速率达到了电子束蒸发的水平。



磁控溅射的工作原理



二次电子一旦离开靶面，就同时受到电场和磁场的作用。近似认为，二次电子在阴极暗区只受电场作用，一旦进入辉光区就只受磁场作用。

- (1) 阴极暗区：受电场力一直线运动。
- (2) 辉光区：受磁场力一旋转。
- (3) 半周后一进入阴极暗区，减速，到靶面时，降为0。

往复运动。

以磁场来改变电子的运动方向，并束缚和延长电子的运动轨迹，从而提高了电子对工作气体的电离几率和有效地利用了电子的能量。因此，使正离子对靶材轰击所引起的靶材溅射更加有效（高速）。同时，受正交电磁场束缚的电子，又只能在其能量要耗尽时才沉积在基片上（低温）。这就是磁控溅射具有“低温”、“高速”两大特点的道理。



6. 对向靶溅射

对于Fe、Co、Ni、 Fe_2O_3 、坡莫合金等磁性材料，要实现低温、高速溅射镀膜，有特殊的要求。采用前述几种磁控方式都受到很大的限制。（由于靶的磁阻很低，磁场几乎完全从靶中通过，不可能形成平行于靶表面的使二次电子作圆摆线运动的强磁场。若采用三极溅射和射频溅射时，基板温升非常严重。）而采用对向靶溅射法，即使用强磁性靶能实现低温高速溅射镀膜。

优点：

溅射速率高，基板温度低，
可淀积磁性薄膜等。

原理:

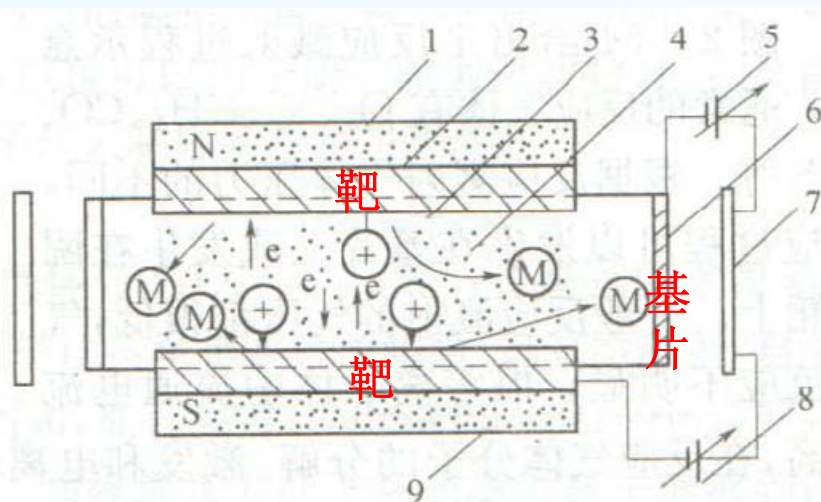


图 2-53 对向靶溅射原理图

- 1—磁场 N 极；2—对向靶阴极；3—阴极暗区；
4—等离子体区；5—基板偏压电源；6—基板；
7—阳极(真空室)；8—靶电源；9—磁场 S 极。

- ◆ 两个靶相对放置，所加磁场和靶表面垂直。阳极放置在于靶面垂直部位，和磁场一起起到约束等离子体作用。二次电子飞出靶面后，被垂直靶的阴极电位下降区的电场加速。电子在向阳极运动过程中受到磁场作用。由于在两靶上加有较高的负偏压，部分电子几乎沿着直线运动，到对面靶的阴极电位下降区被减速，然后又被向相反方向加速运动，加上磁场作用，这样由靶产生的二次电子就被有效封闭在两个靶材之前，形成柱状等离子体。
- ◆ 电子被两个电极来回反射，大大加长了电子运动的路程，增加了和氩气的碰撞电离概率，从而大大提高了两个靶之前气体的电离化程度，增加了氩离子密度，因而提高了沉积速率（高速）。二次电子被磁场约束外，还受到很强的静电反射作用，等离子体被紧紧约束在两个靶之前，避免了高能电子对基片的轰击，使基片温度不会升高（低温）。



7. 反应溅射

利用溅射技术制备介质薄膜除可采用射频溅射法外，另一种方法是采用反应溅射法。即在溅射镀膜时，引入某些活性反应气体，来改变或控制淀积特性。可获得不同靶材的新物质薄膜。

例如在 O_2 中溅射反应而获得氧化物，在 N_2 或 NH_3 中获得氮化物，在 $O_2 + N_2$ 混合气体中得到氮氧化合物，在 C_2H_2 或 CH_4 中得到碳化物，在硅烷中得到硅化物和 在 HF 或 CF_4 中得到氟化物等。



8. 离子束溅射

又称离子束沉积，它是在离子束技术基础上发展起来的新的成膜技术。

按用于薄膜淀积的离子束功能不同，可分为两类：

(1) 一次离子束沉积，这时离子束由需要淀积的薄膜组分材料的离子组成，离子能量较低，它们在到达基片后就沉积成膜，又称低能离子束沉积。

(2) 二次离子束淀积，离子束系由惰性气体或反应气体的离子组成，离子的能量较高，它们打到由需要沉积的材料组成的靶上，引起靶原子溅射，再淀积到基片上形成薄膜。因此，又称离子束溅射。

离子束溅射淀积原理如图所示，由大口径离子束发生源（**1#离子源**）引出惰性气体离子（ Ar^+ 、 Xe^+ 等），使其照射在靶上产生溅射作用，利用溅射出的粒子淀积在基片上制得薄膜。

在大多数情况下，淀积过程中还要采用第二个离子源（**2#离子源**）使其发出的第二个离子束对形成的薄膜进行照射，以便在更广范围**控制淀积膜的性质**。上述第二种方法又称双离子束溅射法。

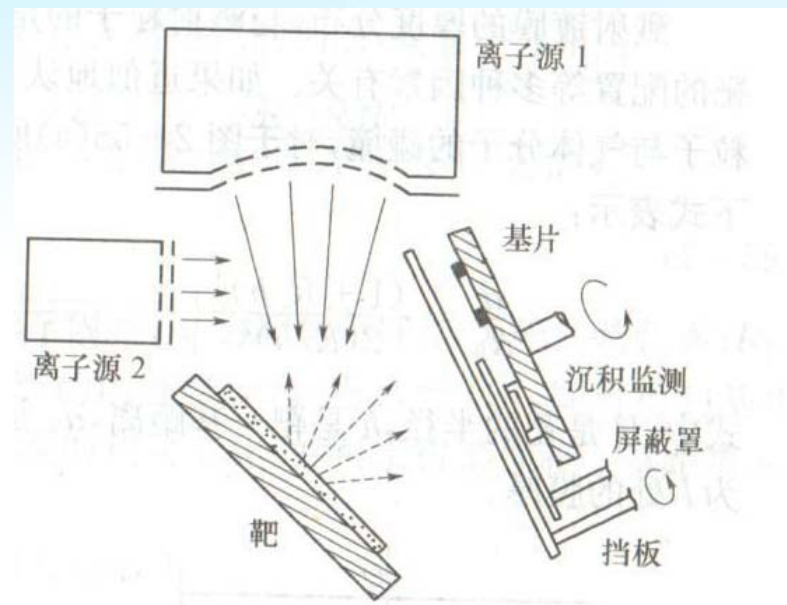


图 2-55 离子束溅射原理示意图

通常，第一个离子源多用考夫曼源，第二个离子源可用考夫曼源或自交叉场型离子源等。

缺点：

离子束溅射，简称**IBS**是一种新的制膜技术，和等离子溅射镀膜相比，装置较复杂，成膜速率低。

优点:

- (1) 在 10^{-3}Pa 的高真空下, 在非等离子状态下成膜, 淀积的薄膜很少掺有气体杂质, 所以纯度较高;
- (2) 淀积发生在无场区域, 基片不再是电路的一部分, 不会由于快速电子轰击使基片引起过热, 所以基片的温升低;
- (3) 可以对制膜条件进行独立的严格的控制, 重复性较好;
- (4) 适用于制备多成分膜的多层膜;
- (5) 许多材料都可以用离子束溅射, 其中包括各种粉末、介质材料、金属材料 and 化合物等。特别是对于饱和蒸气压低的金属和化合物以及高熔点物质的淀积等, 用IBS比较适合。

缺点:

- (1) 轰击到的靶面积太小, 沉积率一般较低;
- (2) 不适宜沉积厚度均匀的大面积的薄膜。

作业 (6-11题任选3个)

1. 溅射镀膜概念及其与真空蒸发镀膜相比的优点与缺点
2. 辉光放电概念
3. 表征溅射特性的参量主要有哪些？
4. 溅射镀膜包括哪几个过程？
5. 描述溅射的动量转移理论
6. 二极溅射的原理
7. 偏压溅射的原理及优点
8. 三极溅射的原理及优点
9. 射频溅射的原理及优点
10. 磁控溅射的原理，为什么说磁控溅射 可实现低温高速溅射
11. 对向靶溅射的原理及优点