

## 磁控溅射

### 百科名片

磁控溅射是为了在低气压下进行高速溅射，必须有效地提高气体的离化率。通过在靶阴极表面引入磁场，利用磁场对带电粒子的约束来提高等离子体密度以增加溅射率的方法。

### 工作原理

磁控溅射的工作原理是指电子在电场E的作用下，在飞向基片过程中与氩原子发生碰撞，使其电离产生出Ar正离子和新的电子；新电子飞向基片，Ar离子在电场作用下加速飞向阴极靶，并以高能量轰击靶表面，使靶材发生溅射。在溅射粒子中，中性的靶原子或分子沉积在基片上形成薄膜，而产生的二次电子会受到电场和磁场作用，产生 $E \times B$ （电场） $\times$  B（磁场）所指的方向漂移，简称 $E \times B$ 漂移，其运动轨迹近似于一条摆线。若为环形磁场，则电子就以近似摆线形式在靶表面做圆周运动，它们的运动路径不仅很长，而且被束缚在靠近靶表面的等离子体区域内，并且在该区域中电离出大量的Ar来轰击靶材，从而实现了高的沉积速率。随着碰撞次数的增加，二次电子的能量消耗殆尽，逐渐远离靶表面，并在电场E的作用下最终沉积在基片上。由于该电子的能量很低，传递给基片的能量很小，致使基片温升较低。

磁控溅射是入射粒子和靶的碰撞过程。入射粒子在靶中经历复杂的散射过程，和靶原子碰撞，把部分动量传给靶原子，此靶原子又和其他靶原子碰撞，形成级联过程。在这种级联过程中某些表面附近的靶原子获得向外运动的足够动量，离开靶被溅射出来。

### 种类

磁控溅射包括很多种类。各有不同工作原理和应用对象。但有一共同点：利用磁场与电场交互作用，使电子在靶表面附近成螺旋状运行，从而增大电子撞击氩气产生离子的概率。所产生的离子在电场作用下撞向靶面从而溅射出靶材。

靶源分平衡和非平衡式，平衡式靶源镀膜均匀，非平衡式靶源镀膜膜层和基体结合力强。平衡靶源多用于半导体光学膜，非平衡多用于磨损装饰膜。磁控阴极按照磁场位形分布不同，大致可分为平衡态和非平衡磁控阴极。平衡态磁控阴极内外磁钢的磁通量大致相等，两极磁力线闭合于靶面，很好地将电子/等离子体约束在靶面附近，增加碰撞几率，提高了离化效率，因而在较低的工作气压和电压下就能起辉并维持辉光放电，靶材利用率相对较高，但由于电子沿磁力线运动主要闭合于靶面，基片区域所受离子轰击较小。非平衡磁控溅射技术概念，即让磁控阴极外磁极磁通大于内磁极，两极磁力线在靶面不完全闭合，部分磁力线可沿靶的边缘延伸到基片区域，从而部分电子可以沿着磁力线扩展到基片，增加基片区域的等离子体密度和气体电离率。不管平衡非平衡，若磁铁静止，其磁场特性决定一般靶材利用率小于30%。为增大靶材利用率，可采用旋转磁场。但旋转磁场需要旋转机构，同时溅射速率要减小。旋转磁场多用于大型或贵重靶。如半导体膜溅射。对于小型设备和一般工业设备，多用磁场静止靶源。

用磁控靶源溅射金属和合金很容易，点火和溅射很方便。这是因为靶（阴极），等离子体，和被溅零件/真空腔体可形成回路。但若溅射绝缘体如陶瓷则回路断了。于是人们采用高频电源，回路中加入很强的电容。这样在绝缘回路中靶材成了一个电容。但高频磁控溅射电源昂贵，溅射速率很小，同时接地技术很复杂，因而难大规模采用。为解决此问题，发明了磁控反应溅射。就是用金属靶，加入氩气和反应气体如氮气或氧气。当金属靶材撞向零件时由于能量转化，与反应气体化合生成氮化物或氧化物。

磁控反应溅射绝缘体看似容易，而实际操作困难。主要问题是反应不光发生在零件表面，也发生在阳极，真空腔体表面，以及靶源表面。从而引起灭火，靶源和工件表面起弧等。德国莱宝发明的孪生靶源技术，很好的解决了这个问题。其原理是一对靶源互相为阴阳极，从而消除阳极表面氧化或氮化。

冷却是一切源（磁控，多弧，离子）所必需，因为能量很大一部分转为热量，若无冷却或冷却不足，这种热量将使靶源温度达一千度以上从而溶化整个靶源。

### 技术分类

可以分为直流磁控溅射法和射频磁控溅射法。

直流溅射法要求靶材能够将离子轰击过程中得到的正电荷传递给与其紧密接触的阴极，从而该方法只能溅射导体材料，不适于绝缘材料，因为轰击绝缘靶材时表面的离子电荷无法中和，这将导致靶面电位升高，外加电压几乎都加在靶上，两极间的离子加速与电离的机会将变小，甚至不能电离，导致不能连续放电甚至放电停止，溅射停止。故对于绝缘靶材或导电性很差的非金属靶材，须用射频溅射法（RF）。

溅射过程中涉及到复杂的散射过程和多种能量传递过程：首先，入射粒子与靶材原子发生弹性碰撞，入射粒子的一部分动能会传给靶材原子，某些靶材原子的动能超过由其周围存在的其它原子所形成的势垒（对于金属是5-10eV），从而从晶格点阵中被碰撞出来，产生离位原子，并进一步和附近的原子依次反复碰撞，产生碰撞级联。当这种碰撞级联到达靶材表面时，如果靠近靶材表面的原子的动能大于表面结合能（对于金属是1-6eV），这些原子就会从靶材表面脱离从而进入真空。

溅射镀膜就是在真空中利用荷能粒子轰击靶表面，使被轰击出的粒子沉积在基片上的技术。通常，利用低压惰性气体辉光放电来产生入射离子。阴极靶由镀膜材料制成，基片作为阳极，真空室中通入0.1-10Pa的氩气或其它惰性气体，在阴极（靶）1-3KV直流负高压或13.56MHz的射频电压作用下产生辉光放电。电离出的氩离子轰击靶表面，使得靶原子溅出并沉积在基片上，形成薄膜。目前溅射方法很多，主要有二级溅射、三级或四级溅射、磁控溅射、对靶溅射、射频溅射、偏压溅射、非对称交流射频溅射、离子束溅射以及反应溅射等。

由于被溅射原子是与具有数十电子伏特能量的正离子交换动能后飞溅出来的，因而溅射出来的原子能量高，有利于提高沉积时原子的扩散能力，提高沉积组织的致密程度，使制出的薄膜与基片具有强的附着力。

溅射时，气体被电离之后，气体离子在电场作用下飞向接阴极的靶材，电子则飞向接地的壁腔和基片。这样在低电压和低气压下，产生的离子数目少，靶材溅射效率低；而在高电压和高气压下，尽管可以产生较多的离子，但飞向基片的电子携带的能量高，容易使基片发热甚至发生二次溅射，影响制膜质量。另外，靶材原子在飞向基片的过程中与气体分子的碰撞几率也大为增加，因而被散射到整个腔体，既会造成靶材浪费，又会在制备多层膜时造成各层的污染。

为了解决上述缺陷，人们在20世纪70年代开发出了直流磁控溅射技术，它有效地克服了阴极溅射速率低和电子使基片温度升高的弱点，因而获得了迅速发展 and 广泛应用。

其原理是：在磁控溅射中，由于运动电子在磁场中受到洛伦兹力，它们的运动轨迹会发生弯曲甚至产生螺旋运动，其运动路径变长，因而增加了与工作气体分子碰撞的次数，使等离子体密度增大，从而磁控溅射速率得到很大的提高，而且可以在较低的溅射电压和气压下工作，降低薄膜污染的倾向；另一方面也提高了入射到衬底表面的原子的能量，因而可以在很大程度上改善薄膜的质量。同时，经过多次碰撞而丧失能量的电子到达阳极时，已变成低能电子，从而不会使基片过热。因此磁控溅射法具有“高速”、“低温”的优点。该方法的缺点是不能制备绝缘体膜，而且磁控电极中采用的不均匀磁场会使靶材产生显著的不均匀刻蚀，导致靶材利用率低，一般仅为20%-30%。

## 利用率

磁控溅射靶材的利用率可成为磁控溅射源的工程设计和生产工艺成本核算的一个参数。目前没有见到对磁控溅射靶材利用率专门或系统研究的报道，而从理论上对磁控溅射靶材利用率近似计算的探讨具有实际意义。对于静态直冷矩形平面靶，即靶材与磁体之间无相对运动且靶材直接与冷却水接触的靶，靶材利用率（最大值）数据多在20%~30%左右（间冷靶相对要高一些，但其被刻蚀过程与直冷靶相同，不作专门讨论），且多为估计值。为了提高靶材利用率，研究出来了不同形式的动态靶，其中以旋转磁场圆柱靶最著名且在工业上被广泛应用，据称这种靶材的利用率最高可超过70%，但缺少足够数据或理论证明。常见的磁控溅射靶材从几何形状上看有三种类型：矩形平面、圆形平面和圆柱管

如何提高利用率是真空磁控溅射镀膜行业的重点，圆柱管靶利用高，但在有些产业是不适用。

## 特点

利用外加磁场捕捉电子，延长和束缚电子的运动路径，搞高离化率，增加镀膜速率。

1) 溅射粒子（主要是原子，还有少量离子等）的平均能量达几个电子伏，比蒸发粒子的平均动能kT高得多（3000K蒸发时平均动能仅0.26eV），溅射粒子的角分布与入射离子的方向有关。（2）入射离子能量增大（在几千电子伏范围内），溅射率（溅射出来的粒子数与入射离子数之比）增大。入射离子能量再增大，溅射率达到极值；能量增大到几万电子伏，

离子注入效应增强，溅射率下降。(3)入射离子质量增大，溅射率增大。(4)入射离子方向与靶面法线方向的夹角增大，溅射率增大(倾斜入射比垂直入射时溅射率大)。(5)单晶靶由于焦距碰撞(级联过程中传递的动量愈来愈接近原子列方向)，在密排方向上发生优先溅射。(6)不同靶材的溅射率很不相同。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/baike/2536.html>