

磁控溅射原理及工艺

Principle and technology of magnetron sputtering

季幼章¹, 刘佳琪²

¹ 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031

² 苏州博睿新材料科技有限公司 苏州 215200

摘要: 磁控溅射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。

关键词: 磁控溅射, 制备, 压敏电阻, 电极

1 引言

真空镀膜技术作为一种产生特定膜层的技术, 在生产生活中有着广泛的应用。真空镀膜技术有三种形式, 即蒸发镀膜、溅射镀膜和离子镀。这里主要讲一下由溅射镀膜技术发展来的磁控溅射镀膜的原理及相应工艺的研究。

磁控溅射是物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 的一种。一般的溅射法可被用于制备金属、半导体、绝缘体等多材料, 且具有设备简单、易于控制、镀膜面积大和附着力强等优点, 而上世纪 70 年代发展起来的磁控溅射法更是实现了高速、低温、低损伤。因为是在低气压下进行高速溅射, 必须有效地提高气体的离化率。磁控溅射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。

2 控溅射定义

2.1 二极溅射

溅射现象于 1870 年开始用于镀膜技术, 1930 年以后由于提高了沉积速率而逐渐用于工业生产。常用二极溅射设备如图 1 所示。

通常将欲沉积的材料制成板材一靶, 固定在阴极上。基片置于正对靶面的阳极上, 距靶一定距离。系统抽至高真空后充入 (10^{-1}) 帕的气体 (通常为氩气), 在阴极和阳极间加几千伏电压, 两极间即产生辉光放电。放电产生的正离子在电场作用下飞向阴极, 与靶表面原子碰撞, 受碰撞从靶面逸出的靶原子称为溅射原子, 其能量在 1 至几十电子伏范围内。溅射原子在基片表面沉积成膜。

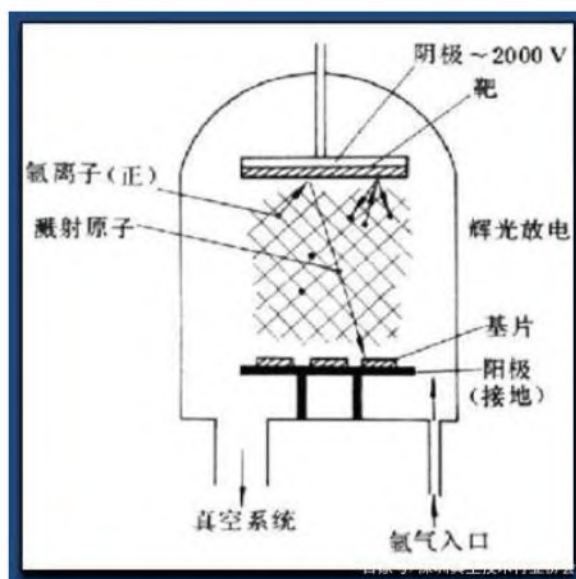


图 1 二极溅射设备

2.2 磁控溅射

因为是在低气压下进行高速溅射, 必须有效地提高气体的离化率。磁控溅射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。

其中磁控溅射可以被认为是镀膜技术中最突出的成就之一。

它以溅射率高、基片温升低、膜-基结合力好、装置性能稳定、操作控制方便等优点, 成为镀膜工业应用领域 (特别是建筑镀膜玻璃、透明导电膜玻璃、柔性基材卷绕镀

小丫智能 您的专属方案设计师



锂电保护

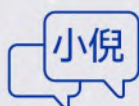
多串 主动均衡等

个人护理

剃须刀 理发剪 高速风筒 补水仪 美白仪等

电机控制

电扳手 角磨机 割草机 吸尘器 跑步机 水泵等无刷有感和无刷无感



联系电话:

138 6182 9873

||||| 扫一扫，了解详情 |||||

等对大面积的均匀性有特别苛刻要求的连续镀膜场合)的首选方案。

3 磁控溅射原理

溅射属于 PDV (物理气相沉积) 三种基本方法: 真空蒸发、溅射、离子镀 (空心阴极离子镀、热阴极离子镀、电弧离子镀、活性反应离子镀、射频离子镀、直流放电离子镀) 中的一种。

在二极溅射中增加一个平行于靶表面的封闭磁场, 借助于靶表面上形成的正交电磁场, 把二次电子束缚在靶表面特定区域来增强电离效率, 增加离子密度和能量, 从而实现高速率溅射过程。

磁控溅射的工作原理是指:

- (1) 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;
- (2) 新电子飞向基片, Ar^+ 正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。图 2 示出磁控溅射原理图。

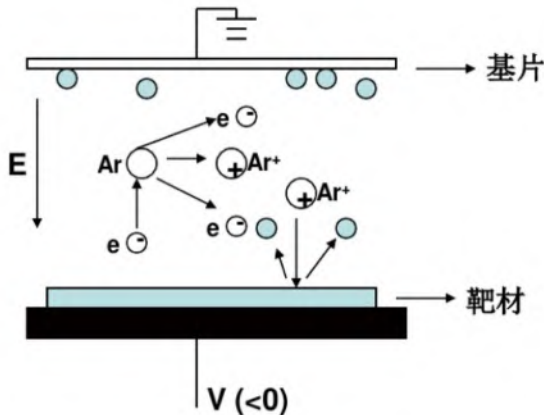


图 2 磁控溅射原理图

(3) 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;

(4) 而产生的二次电子会受到电场和磁场作用, 产生 E (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。

(5) 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;

(6) 并且在该区域中电离出大量的 Ar^+ 正离子来轰击

靶材, 从而实现了高的沉积速率。

(7) 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。

(8) 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。

图 3 示出磁控溅射示意图。

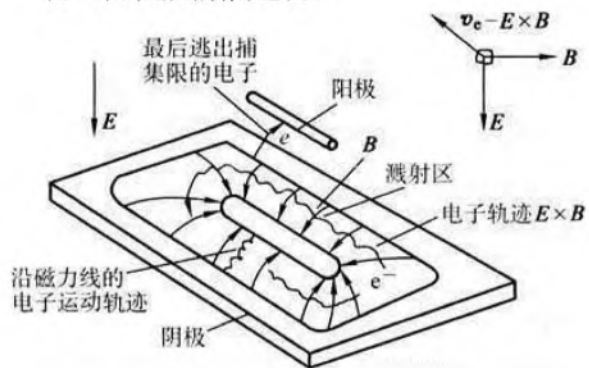


图 3 磁控溅射示意图

4 磁控溅射技术分类

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。

磁控溅射在技术上可以分为直流 (DC) 磁控溅射、中频 (MF) 磁控溅射、射频 (RF) 磁控溅射。表 1 列出三种磁控溅射分类的主要对比。

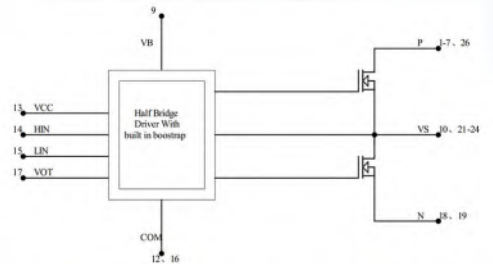
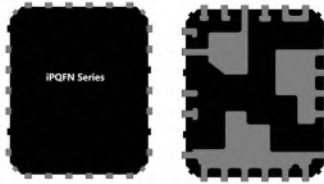
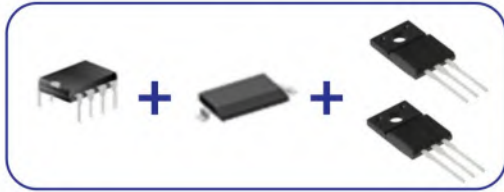
表 1 三种磁控溅射分类的主要对比表

项目	直流 (DC) 磁控溅射	中频 (MF) 磁控溅射	射频 (RF) 磁控溅射
电源价格	便宜	一般	昂贵
靶材	圆靶 / 矩形靶	平面靶 / 旋转靶	实验室一般用圆平面靶
靶材材质要求	导体	无限止	无限止
抵御靶中毒能力	弱	强	强
应用	金属	金属 / 化合物	工业上不采用此法
可靠性	好	较好	较好

深圳市鑫宇微科技有限公司成立于2018年，是一家专注于无刷电机驱动智能功率模块的企业。公司团队从业IPM行业十余年，致力于智能功率模块的高集成化、小型化，为无刷电机行业提供高性价比、高集成化的功率器件。

iPQFN功能结构

PQFN系列二合一，内部集成单颗驱动、上下功率管的单相半桥IPM。

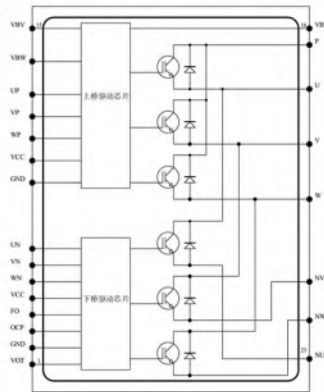
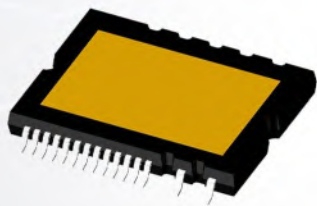


- 小型化封装： intelligent PQFN封装尺寸5mm*6mm
- 高集成化： HVIC、BSD和MOS集于一体，最大限度简化外围电路
- 灵活应用于单相和三相电机
- 可根据客户不同PCB形状Layout，简化PCB走线
- 内置精确的温度输出，与功率器件实际温度相差5°C以内，可在140°C以内精确监测IPM工作温度

iPQFN应用市场： • EC风机 • 高速吹风管 • 吊扇



vSOP23的特点



- 双列贴片封装，铝基板/陶瓷基板衬底
- 符合EN-60355-1标准污染等级2爬电间距要求
- 集成上下桥驱动芯片
- 集成BSD
- 具有温度输出信号及过温保护
- 具有VCC、VB欠压保护
- 母线过流保护
- 故障输出信号
- 编带包装

vSOP23应用市场： • 空调室内 • 室外风机 • 冰箱 • 洗衣机 • 洗碗机 • 抽油烟机 • 吊扇 • 落地风扇 • 水泵



5 磁控溅射工艺研究

5.1 溅射变量

5.1.1 电压和功率

在气体可以电离的压强范围内如果改变施加的电压，电路中等离子体的阻抗会随之改变，引起气体中的电流发生变化。改变气体中的电流可以产生更多或更少的离子，这些离子碰撞靶体就可以控制溅射速率。

一般来说：提高电压可以提高离化率。这样电流会增加，所以会引起阻抗的下降。提高电压时，阻抗的降低会大幅度地提高电流，即大幅度提高了功率。如果气体压强不变，溅射源下的基片的移动速度也是恒定的，那么沉积到基片上的材料的量则决定于施加在电路上的功率。在VONARDENNE 镀膜产品中所采用的范围内，功率的提高与溅射速率的提高是一种线性的关系。

5.1.2 气体环境

真空系统和工艺气体系统共同控制着气体环境。

首先，真空泵将室体抽到一个高真空（大约为 10^{-6} torr）。然后，由工艺气体系统（包括压强和流量控制调节器）充入工艺气体，将气体压强降低到大约 2×10^{-3} torr。为了确保得到适当质量的同一膜层，工艺气体必须使用纯度为 99.995 % 的高纯气体。在反应溅射中，在反应气体中混合少量的惰性气体（如氩）可以提高溅射速率。

5.1.3 气体压强

将气体压强降低到某一点可以提高离子的平均自由程，进而使更多的离子具有足够的能量去撞击阴极以便将粒子轰击出来，也就是提高溅射速率。超过该点之后，由于参与碰撞的分子过少则会导致离化量减少，使得溅射速率发生下降。如果气压过低，等离子体就会熄灭同时溅射停止。提高气体压强可提高离化率，但是也就降低了溅射原子的平均自由程，这也可以降低溅射速率。能够得到最大沉积速率的气体压强范围非常狭窄。如果进行的是反应溅射，由于它会不断消耗，所以为了维持均匀的沉积速率，必须按照适当的速度补充新的反应气体。

5.1.4 传动速度

玻璃基片在阴极下的移动是通过传动来进行的。低传动速度使玻璃在阴极范围内经过的时间更长，这样就可以沉积出更厚的膜层。不过，为了保证膜层的均匀性，传动速度必须保持恒定。

镀膜区内一般的传动速度 范围为每分钟 0 ~ 600 英

寸（大约为 0 ~ 15.24 米）之间。根据镀膜材料、功率、阴极的数量以及膜层的种类的不同，通常的运行范围是每分钟 90 ~ 400 英寸（大约为 2.286 ~ 10.16 米）之间。

5.1.5 距离与速度及附着力

为了得到最大的沉积速率并提高膜层的附着力，在保证不会破坏辉光放电自身的前提下，基片应当尽可能放置在离阴极最近的地方。溅射粒子和气体分子（及离子）的平均自由程也会在其中发挥作用。当增加基片与阴极之间的距离，碰撞的几率也会增加，这样溅射粒子到达基片时所具有的能力就会减少。所以，为了得到最大的沉积速率和最好的附着力，基片必须尽可能地放置在靠近阴极的位置上。

5.2 系统参数

工艺会受到很多参数的影响。其中，一些是可以在工艺运行期间改变和控制的；而另外一些则虽然是固定的，但是一般在工艺运行前可以在一定范围内进行控制。两个重要的固定参数是：靶结构和磁场。

5.2.1 靶结构

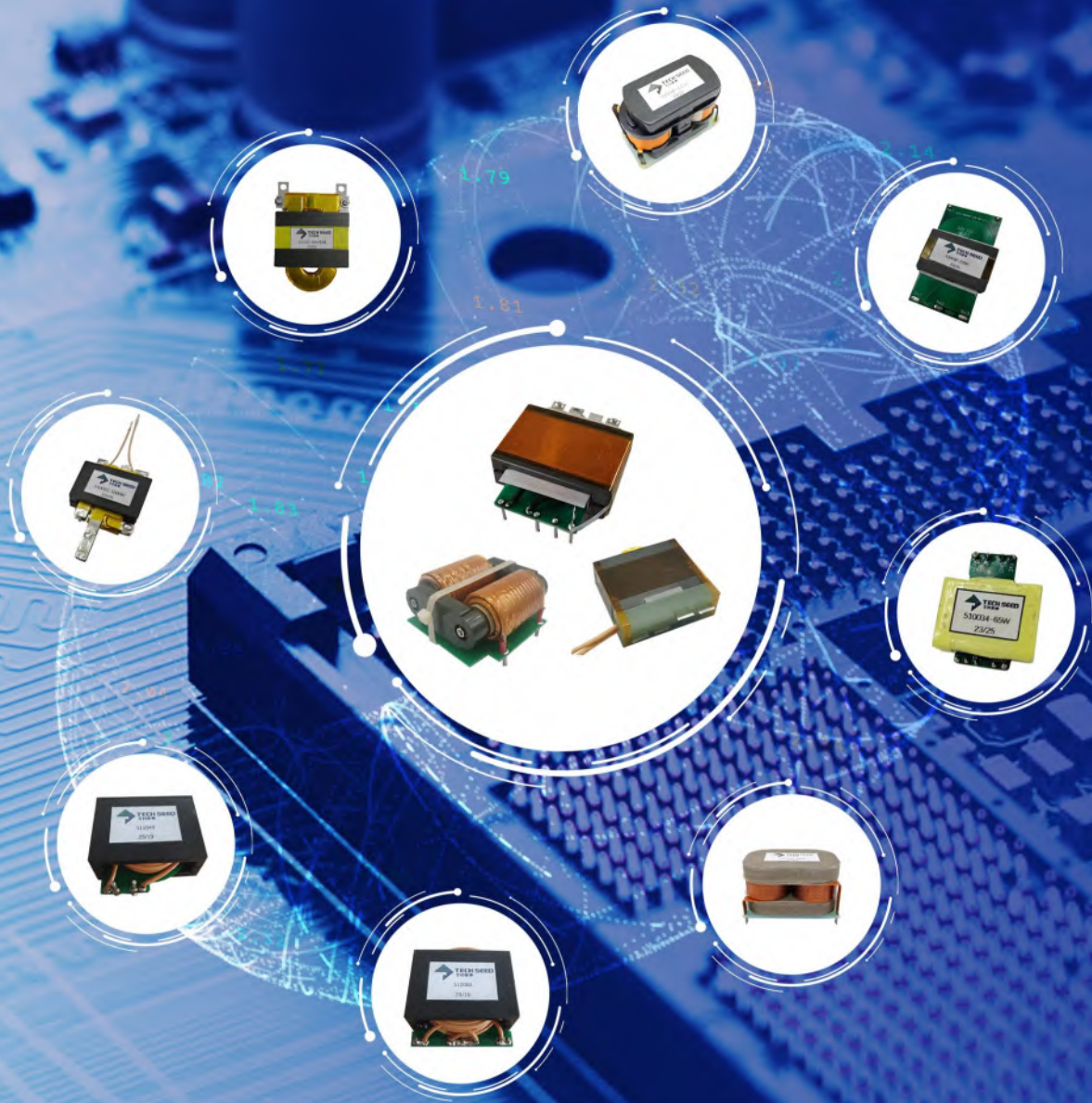
每个单独的靶都具有其自身的内部结构和颗粒方向。由于内部结构的不同，两个看起来完全相同的靶材可能会出现迥然不同的溅射速率。在镀膜操作中，如果采用了新的或不同的靶，应当特别注意这一点。如果所有的靶材块在加工期间具有相似的结构，调节电源，根据需要提高或降低功率可以对它进行补偿。在一套靶中，由于颗粒结构不同，也会产生不同的溅射速率。加工过程会造成靶材内部结构的差异，所以即使是相同合金成分的靶材也会存在溅射速率的差异。

同样，靶材块的晶体结构、颗粒结构、硬度、应力以及杂质等参数也会影响到溅射速率，而这些则可能会在产品上形成条状的缺陷。这也需要在镀膜期间加以注意。不过，这种情况只有通过更换靶材才能得到解决。

靶材损耗区自身也会造成比较低下的溅射速率。这时候，为了得到优良的膜层，必须重新调整功率或传动速度。因为速度对于产品是至关重要的，所以标准而且适当的调整方法是提高功率。

5.2.2 磁场

用来捕获二次电子的磁场必须在整个靶面上保持一致，而且磁场强度应当合适。磁场不均匀就会产生不均匀的膜层。磁场强度如果不适当（比如过低），那么即使磁场强度



北京泰科斯德技术有限公司是一家专业为新型电子产品提供核心电子器件的研发制造公司。主要提供平面变压器的设计、工艺以及生产，提供Payton大功率高频变压器、电感、dc/dc电源模块、磁性元器件、车载电源和第三代半导体适配服务，为功率变换的各个环节提供关键的器件产品。

EFFICIENCY
高效化

HIGH FREQUENCY
高频化

MINIATURIZATION
小型化

一致也会导致膜层沉积速率低下，而且可能在螺栓头处发生溅射。这就会使膜层受到污染。如果磁场强度过高，可能在开始的时候沉积速率会非常高，但是由于刻蚀区的关系，这个速率会迅速下降到一个非常低的水平。同样，这个刻蚀区也会造成靶的利用率比较低。

5.3 可变参数

在溅射过程中，通过改变改变这些参数可以进行工艺的动态控制。这些可变参数包括：功率、速度、气体的种类和压强。

5.3.1 功率

每一个阴极都具有自己的电源。根据阴极的尺寸和系统设计，功率可以在 0 ~ 150 kW（标称值）之间变化。电源是一个恒流源。在功率控制模式下，功率固定同时监控电压，通过改变输出电流来维持恒定的功率。在电流控制模式下，固定并监控输出电流，这时可以调节电压。施加的功率越高，沉积速率就越大。

5.3.2 速度

另一个变量是速度。对于单端镀膜机，镀膜区的传动速度可以在每分钟 0 ~ 600 英寸（大约为 0 ~ 15.24 米）之间选择。对于双端镀膜机，镀膜区的传动速度可以在每分钟 0 ~ 200 英寸（大约为 0 ~ 5.08 米）之间选择。在给定的溅射速率下，传动速度越低则表示沉积的膜层越厚。

5.3.3 气体

最后一个变量是气体。可以在三种气体中选择两种作为主气体和辅气体来进行使用。它们之间，任何两种的比率也可以进行调节。气体压强可以在 $(1 \sim 5) \times 10^{-3}$ torr 之间进行控制。

5.3.4 阴极 / 基片之间的关系

在曲面玻璃镀膜机中，还有一个可以调节的参数就是阴极与基片之间的距离。平板玻璃镀膜机中没有可以调节的阴极。

6 试验

6.1 试验目的

- ① 熟悉真空镀膜的操作过程和方法。
- ② 了解磁控溅射镀膜的原理及方法。
- ③ 学会使用磁控溅射镀膜技术。
- ④ 研究不同工作气压对镀膜影响。

6.2 试验设备

SAJ-500 超高真空磁控溅射镀膜机（配有纯铜靶材）；氩气瓶；陶瓷基片：擦镜纸。

6.3 试验原理

磁控溅射沉积镀膜机理

磁控溅射系统是在基本的二极溅射系统发展而来，解决二极溅射镀膜速度比蒸镀慢很多、等离子体的离子率低和基片的热效应明显的问题。磁控溅射系统在阴极靶材的背后放置强力磁铁，真空室充入 0.1 ~ 10 Pa 压力的惰性气体 (Ar)，作为气体放电的载体。

在高压作用下 Ar 原子电离成为 Ar⁺ 离子和电子，产生等离子辉光放电，电子在加速飞向基片的过程中，受到垂直于电场的磁场影响，使电子产生偏转，被束缚在靠近靶表面的等离子体区域内，电子以摆线的方式沿着靶表面前进，在运动过程中不断与 Ar 原子发生碰撞，电离出大量的 Ar⁺ 离子，与没有磁控管的结构的溅射相比，离子率迅速增加 10 ~ 100 倍，因此该区域内等离子体密度很高。

经过多次碰撞后电子的能量逐渐降低，摆脱磁力线的束缚，最终落在基片、真空室内壁及靶源阳极上。而 Ar⁺ 离子在高压电场加速作用下，与靶材的撞击并释放出能量，导致靶材表面的原子吸收 Ar⁺ 离子的动能而脱离原晶格束缚，呈中性的靶原子逸出靶材的表面飞向基片，并在基片上沉积形成薄膜。

6.4 试验过程

6.4.1 准备过程

(1) 动手操作前认真学习操作规程及有关资料，熟悉镀膜机和有关仪器的结构及功能、操作程序与注意事项，保证安全操作。

(2) 清洗基片。用无水酒精清洗基片，使基片镀膜面清洁无脏污后用擦镜纸包好，放在干燥器内备用。

(3) 镀膜室的清理与准备。先向真空腔内充气一段时间，然后升钟罩，装好基片，清理镀膜室，降下钟罩。

6.4.2 试验主要流程

(1) 打开总电源，启动总控电，升降机上升，真空腔打开后，放入需要的基片，确定基片位置 (A、B、C、D) 确定靶位置 (1、2、3、4，其中 4 为清洗靶)。

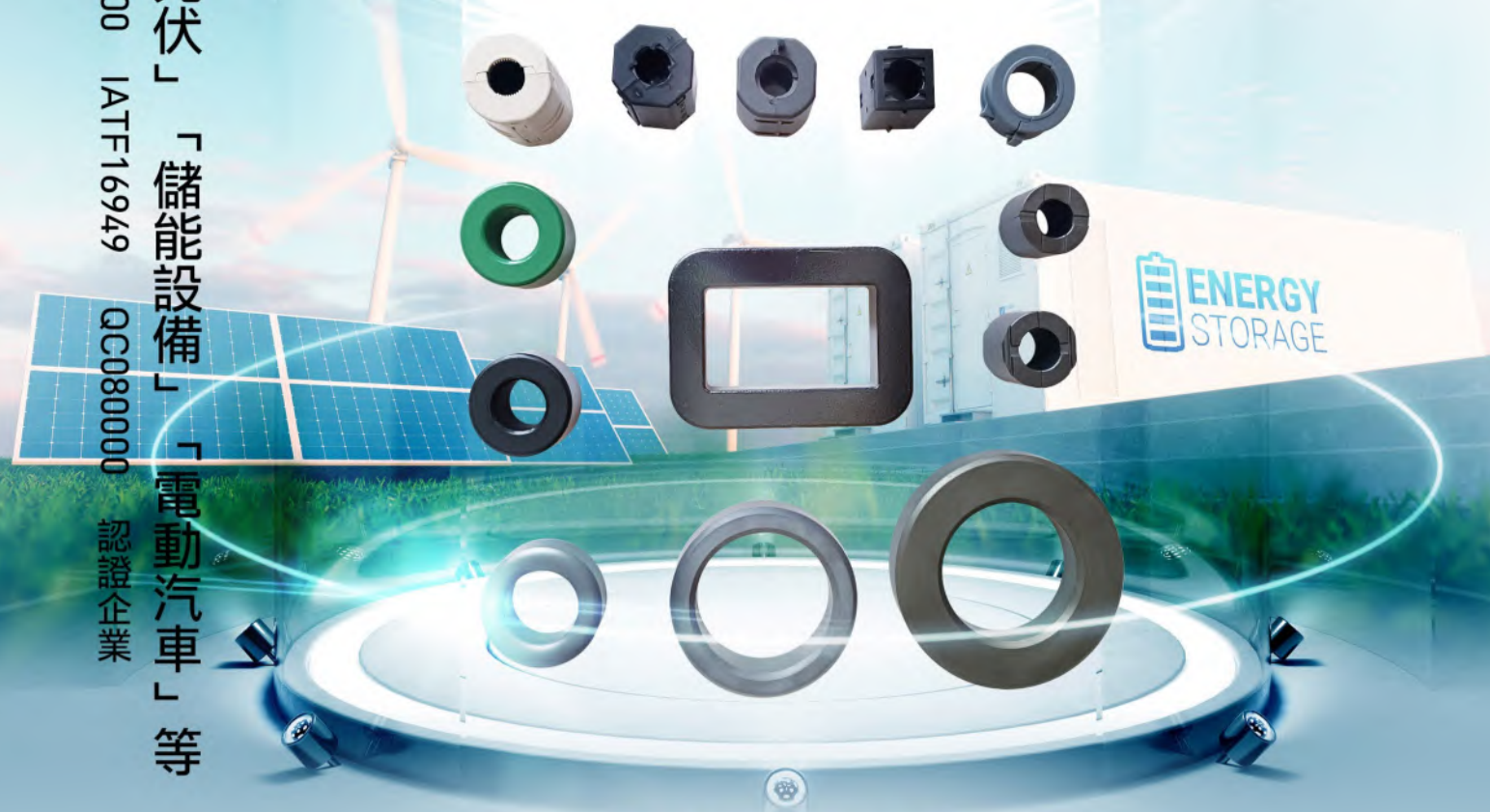
(2) 基片和靶准备好后，升降机下降至真空腔密封（注意：关闭真空腔时用手扶着顶盖，以控制顶盖与强磁的相对位置，过程中注意安全，小心挤压到手指）。



科峰集團
CAREFUL GROUP

鎳鋅系列 規格齊全

適用「光伏」「儲能設備」「電動汽車」等
ISO9001-2000 IATF16949 QC080000 認證企業



ENERGY STORAGE

EMI/EMC

D102 D96 D85 D60 D50 D155



EMI 磁芯事業部湖州公司 業務: +86-572-367 0006 / 367 2766
郵箱: info@careful.cn
嘉興公司 業務: +86-573-8867 1616
郵箱: sales@careful.cn

華南辦事處總部: TEL: +86-755-28695779 / 28696779
地址: 深圳市龍崗區五聯朱古石愛聯工業區1號韓天科技園
湖州外貿部: TEL: +86-572-209 3272
地址: 湖州市麗陽大廈901-905 郵箱: overseasales@careful.cn

(3) 启动机械泵，抽一分钟左右之后，打开复合真空计，当示数约为 $10E-1$ 量级时，启动分子泵，频率为 400 Hz (默认)，同时预热离子清洗打开直流或射流电源及流量显示仪。

(4) (选择操作) 打开加热控温电源。启动急停控制，报警至于通位置，功能选则为烘烤。

(5) 当真空度达到 5×10^{-4} Pa 时，关闭复合真空计，开启电离真空计，通氩气 (流量 20 L/min)，打开气路阀，将流量计 I 拨至阀控档，稳定后打开离子源，依次调节加速至 200V ~ 250V，中和到 12A 左右，阳极 80V；阴极 10V，阳极 300V。从监控程序中调出工艺设置文件，启动开始清洗。

(6) 清洗完成后，按离子源参数调节相反的顺序将各参数归零，关闭离子源，将流量计 II 置于关闭档。

(7) 流量计 I 置于阀控档 (看是否有读数，一般为 30。否则查明原因)，调节控制电离真空计示数约 1Pa，调节直流或射频电源到所需功率，开始镀膜。

(8) 镀膜过程中注意设备工作状态，若工艺参数有异常变化应及时纠正或停止镀膜，问题解决后方可重新镀膜。

(9) 镀膜完毕后，关闭直流或射频电源，关闭氩气阀门。将挡板逆时针旋至最大通路。当气罐流量变为零后，关闭流量计 I，继续抽半个小时到两个小时。

(10) 关闭流量显示仪和电离真空计，停止分子泵，频率降至 100 Hz 后关闭机械泵，5 分钟后关闭分子泵，关闭总电源。

6.5 不同工作气压下所得试验结果

6.5.1 试验结果

表 2 列出不同工作气压与沉积率的关系。

图 3 示出不同工作气压与沉积率的关系。

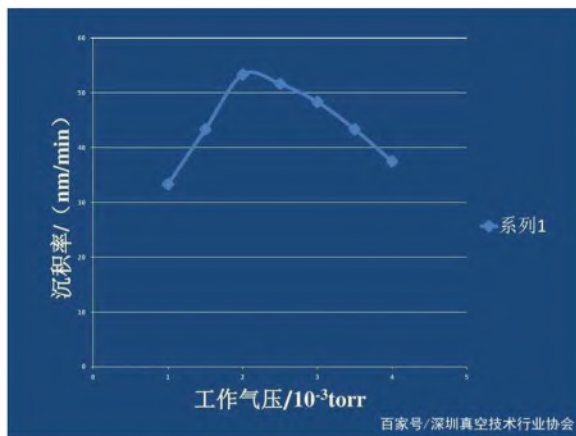


图 3 工作气压与沉积率的关系

6.5.2 试验结果分析

气体分子平均自由程与压强有如下关系

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (1)$$

其中为气体分子平均自由程，k 为玻耳兹曼常数，T 为气体温度，d 为气体分子直径，p 为气体压强。由此可知，在保持气体分子直径和气体温度不变的条件下，如果工作压力增大，则气体分子平均自由程将减小，溅射原子与气体分子相互碰撞次数将增加，二次电子发射将增强。

而当工作气压过大时，沉积速率会减小，原因有如下两点：

(1) 由于气体分子平均自由程减小，溅射原子的背反射和受气体分子散射的几率增大，而且这一影响已经超过了放电增强的影响。溅射原子经多次碰撞后会有部分逃离沉

表 2 不同工作气压与沉积率的关系

靶材	基底	负偏压 (V)	工作气压 (10^{-3} tor)	传动速度 (m/min)	时间 (min)	厚度 (nm)	沉积率 (nm/min)
纯铜	陶瓷	70	1.0	3	6	200	33.3
纯铜	陶瓷	70	1.5	3	6	260	43.3
纯铜	陶瓷	70	2.0	3	6	320	53.3
纯铜	陶瓷	70	2.5	3	6	310	51.7
纯铜	陶瓷	70	3.0	3	6	290	48.3
纯铜	陶瓷	70	3.5	3	6	260	43.3
纯铜	陶瓷	70	4.0	3	6	225	37.5

备注：纯铜含铜率 $\geq 99.99\%$



能源回收式直流电子负载 63700 系列

- ✓ 6kW/12kW/18kW
- ✓ 600V/1200V/1800V
- ✓ 自动负载时序功能
- ✓ 电池放电测试
- ✓ 高精度度量测



能源回收式交流电子负载 63800R 系列

- ✓ 9kVA/12kVA/15kVA
- ✓ 30Vrms-350Vrms
- ✓ 单相/三相双应用
- ✓ 3U/15kVA高功率密度
- ✓ 电感性/电容性负载模拟