

⑦

25-28

# 真空镀膜技术中的电子束加热式蒸发源

程开富  
(重庆光电技术研究所)

TB43

0484.1

**摘要:**本文介绍了真空镀膜技术中电子束加热式蒸发源的结构、电子束加热原理、特点、优点和工作原理以及电子束加热源中电子枪坩埚的处理和电子枪冷却系统的供水问题。

**关键词:**真空镀膜、电子束蒸发、加热式

电子束加热式, 蒸发源

## 一、引言

利用电子束加热使膜材料汽化蒸发后凝结在基片表面上成膜是真空镀膜技术中一种重要的加热方法。这种装置种类较多。随着薄膜技术的广泛应用,不但对膜的种类要求繁多,而且对膜的质量要求也更加严格。为了适应这种技术要求,只采用电阻加热式蒸发源已不能满足蒸镀某些金属和非金属材料的需要。电子束作为蒸镀膜材料的热源就是在这种情况下发展起来的。

电子束加热式蒸发源现已得到广泛应用,对于高熔点(2000℃左右)的氧化物特别合适,它由一个提供电子的热阴极,加速电子的加速极和阳极(膜料)所组成。其特点是:能量高度集中,能使膜料源的局部表面获得极高的温度(最高达3000~6000℃,能量密度为 $10^4 \sim 10^9$ 瓦/厘米<sup>2</sup>);通过电参量的调节,便能准确而方便地控制汽化温度,且可调节的温度范围很大,即对高低熔点的膜料都能加热汽化,不需直接加热坩埚,又可通水冷却,避免了坩埚材料对膜料的沾污。其缺点是多数化合物材料受到电子轰击会部分分解;残余气体分子和膜料蒸汽会部分被电子所电离。

电子束加热式蒸发源在蒸发镀膜技术中已更加完善。因此,目前具有可编程序的磁偏转电子束加热式蒸发源,可以认为是最理想的蒸发源。它包括蒸发源,高压供电系统和光电学控制系统。

电子束加热式蒸发源的出现,是薄膜技术的一个重大进展,可以说没有电子束蒸发源,光学仪器的宽带减反射膜、激光硬膜反射镜以金属硅化物(Pd<sub>2</sub>Si、PtSi、IrSi)肖特基势垒红外 CCD 研制中硅化物薄膜、SiO<sub>2</sub>、SiO 增透膜,铝薄膜以及大规模集成电路中的铝硅合金膜等都是不可设想的。

## 二、电子束加热原理

电子束加热原理是基于电子在位差为  $u$  的电场作用下,获得动能打到膜材料上,使膜材料加热汽化,而实现蒸发镀膜。根据物理学的基本知识,可得出如下关系式:

$$eu = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2\eta u} \quad (2)$$

式中  $\eta = \frac{e}{m}$  (荷质比),  $m = 9.1 \times 10^{-31}$  Kg,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C。将荷质比  $\eta$  代入式(1),则:

$$v = 6 \times 10^5 \sqrt{u} \left( \frac{m}{S} \right) \quad (3)$$

因为  $eu = \frac{1}{2}mv^2$ , 所以加速电场的能量可用电子伏(eV)来表示。一个电子伏为  $1.602 \times 10^{-19}$  J, 因此, 电子束的热效应  $Q_e$  为:

$$Q_e = neu = Iut \quad (4)$$

式中 I—电子束的束流(A); t—束流的作用时间(S)

当加速电压很高压, 式(3)所产生的热能即可促使膜材汽化蒸发, 从而为真空镀膜技术提供一个良好的热源。

电子束加热式热源的优点在于:

(1)能获得远比电阻热源更大的能量密度, 数值可达到  $10^4 \sim 10^9 \frac{W}{cm^2}$ , 因此, 可以将膜材表面加热到  $3000 \sim 6000^\circ C$ 。这就为蒸镀难熔金属和非金属材料如钨、钼、锆、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  等提供了较好热源。而且由于被蒸镀的材料是放在水冷坩埚内, 因而可以避免容器材料的蒸发以及容器材料与膜材料之间的反应, 这对提高膜的纯度是极为重要的。

(2)热量可直接加到膜材料表面上, 因此, 热效率高, 热传导和热辐射损失少。

电子束加热的缺点是电子枪结构较复杂, 而且加速电压较高, 当电压过高时所产生的 X 射线对人有害。此外, 由于电子轰击, 对多数化合物易产生分解作用, 因此不宜蒸镀化合物薄膜。

### 三、磁偏转式电子束蒸发源

电子束做为熔化膜材料的热源, 其种类较多, 目前常用的电子束蒸发源, 根据电子束的聚焦方式可分自聚焦枪, 环枪和磁偏转枪三种形式。由于熔滴式, 直枪式、环式等热源在用于真空镀膜设备上均存在许多缺点, 因此, 近年来已被磁偏转式电子束热源所代替。

#### 3.1 磁偏转式电子束蒸发源的工作原理

磁偏转式电子束蒸发源所发射的电子轨迹

与“e”相似。故有 e 型电子束源之称。简称 e 型枪。图 1 给出了 e 型磁偏转电子束蒸发源结构图。

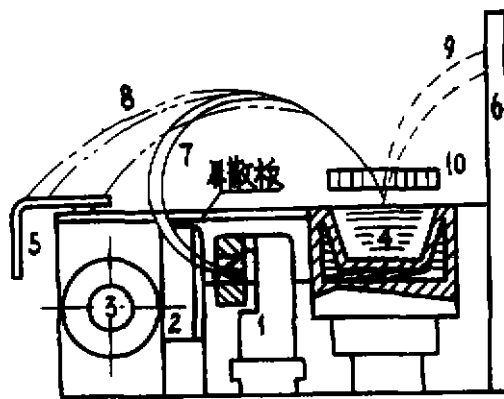


图 1. e 型枪的工作原理

1—发射体; 2—阳极; 3—电磁线圈; 4—水冷坩埚; 5—收集板; 6—吸收板; 7—电子轨迹; 8—正离子轨迹; 9—散射电子轨迹; 10—等离子体

这种蒸发源就是利用磁场对电子束的偏转作用,使来自蒸发空间之外的电子束打在放在坩埚内的蒸镀材料上,使之加热蒸发,再蒸镀到基底材料上。

热阴极发射的电子,处在电场和磁场的作用下。适用于这种蒸发源的电场,既不是旋转对称场或二维平面对称场,而是一个边界条件相当复杂的三维电场。从工作参数可以算得电子束的导电系数  $K = (5 \times 10^{-7} \text{A/V}^{3/2}) > 1 \times 10^{-8}$ , 系强流电子束。其空间电荷对电场分布的影响已不可忽略。这些因素的存在,使我们难以精确地分析,模拟电场和电子轨迹。

根据电场的边界条件,电子飞越的空间可分为两部分。第一部分是电子束发生器区域。它是非均匀场。电子一方面被加速到 10KV 相应的速度,另一方面又受到不均匀电场的偏转作用。同时又存在着特定方向的横向磁场,电子还受到偏向坩埚的洛伦兹力。电子所受的力为:

$$\vec{F} = e \nabla \varphi - \frac{e}{c} [\vec{V} \times \vec{H}] \quad (5)$$

式中,  $\varphi$ —电位;  $\vec{V}$ —电子速度;  $\vec{H}$ —磁场强度;  $c$ —光速;  $e$ —电子电荷;  $\nabla$ —对空间坐标一次微商所形成的向量。

第二部分是电子束发生器以外的空间。它是等电位空间。电子不受电场力的作用,而是以恒定的,与 10KV 相应的速度飞行。若横向磁场是均匀的,则电子沿圆的弧线飞行;若横向磁场不均匀,电子将画出特殊曲线的轨迹。其上各点的半径取决于该点的磁场强度。

$$R = \frac{3.37 \sqrt{V}}{B} \text{ (厘米)} \quad (6)$$

式中  $B$ —磁场强度(高斯);  $V$ —电子速电压(伏特)。

高速电子以不同的入射角打到坩埚内被蒸镀的材料。电子动能大部分消耗在振动被蒸材料的晶格上即热能,只有一小部分引起原子内电子跃迁,导致  $x$  射线和二次电子的发射。电子束电压越高,  $x$  射线就越硬,对基片晶格和人体的损害也越大。由于磁偏转电子枪的工作电压较直枪的低,故它的  $x$  射线损伤也较小。

#### 四、电子枪坩埚的处理问题

$e$  型电子枪通常采用水冷铜坩埚,清洁处理较简单。若是新坩埚,表面会有氧化层存在,使用之前,须用细砂纸打磨干净,或用稀酸擦洗,然后用丙酮无水乙醇擦净。

#### 五、电子枪冷却系统的供水问题

$e$  型电子枪整个枪头均放置在散热条件差的真空室中,因此,加大电子枪的水冷热传导效果和尽可能加大枪体的热容量是十分必要的。特别是因为电子枪主要是用来蒸镀诸如钨、钽、钼、金、银、铜、铝等高熔点或热传导性性好的低熔点材料,因此,在枪的设计和使用时应更突出冷却问题。

电子枪水冷主要是冷却坩埚,散射电子吸收极及磁极等部分,有的枪对高压电极也是采用水冷,这时要把两水冷回路分开。铜坩埚的水冷,在电子枪功率小于 5KW 以下时,每分钟水流量大约在 5~6 升。外接的水冷管内径为  $\Phi 5 \sim \Phi 6 \text{mm}$ 。电子枪功率每提高 1KW,冷却水量应增加 0.8~1 升。当枪的输出功率为 10KW 时,水流量应达到 10~12 升/min,外接水冷管内径相应增加到  $\Phi 8 \sim \Phi 9 \text{mm}$ 。

高压电极的水冷,应考虑水电阻的大小问题,应要求冷却水管有足够的长度,以保证出水口电

位大大降低并趋于零电位。同时冷却水管不能与其它处于地电位的金属件相碰,水管外壁应保持干燥,对冷却水的质量也应有所要求。表 1. 给出了各种水质的电阻率。一般来说,选用饮用水即可满足枪的冷却要求。

表 1. 各种水的电阻率

水 质	电 阻 率
海水	$10^1 \sim 10^2$
劣等自来水	$10^3$
优质自来水	$10^4 \sim 10^5$
蒸馏水	$10^6$
超净水	$10^7 \sim 10^8$

## 六、结 论

具有电子束加热式蒸发源的高真空镀膜设备,不但用于金属膜(Pt、Pd、Ir、Ti、Cr 等),介质膜(如:SiO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的制备,而且还可以用来制备 YBaCuO 高温超导薄膜等。因此,电子束加热式蒸发源在高真空镀膜技术中是一种新颖的蒸镀材料的热源,已广泛地用于半导体器件、半导体光电器件以及超导薄膜器件的研制中。由于该加热式蒸发源蒸镀的薄膜纯度高,加热源本身不污染真空镀膜设备,很受镀膜工作者和器件研制者的欢迎。