



高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

磁性薄膜与磁性粉体

过璧君 冯则坤 邓龙江

CIXING

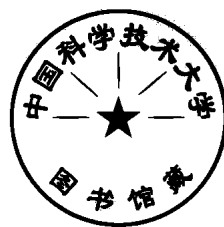
BAOMO

YU CIXINGFENTI

电子科技大学出版社

磁性薄膜与磁性粉体

过璧君 冯则坤 邓龙江



电子科技大学出版社

• 1994 •

[川]新登字 016 号

磁性薄膜与磁性粉体
过璧君 冯则坤 邓龙江

*

电子科技大学出版社出版
(成都建设北路二段四号) 邮编 610054
电子科技大学出版社印刷厂印刷
新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 330 千字
版次 1994 年 11 月第一版 印次 1994 年 11 月第一次印刷
印数 1—1000 册
中国标准书号 ISBN 7-81043-152-8/TN·17
定价(压膜):8.60 元

TM27
3471K

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从 1978~1990 年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了 1991~1995 年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约 300 多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

EA097/03

序 言

磁性材料及器件的种类繁多,应用广泛。它是通讯、广播电视、计算机、雷达、电子对抗、自动控制以及仪器仪表中不可缺少的组成部分。多年来一直持续发展,产值不断增加,品种不断增多。当今,为了适应电子设备小型化、多功能化等要求,磁性材料正沿着薄膜化、微粉化的方向发展。

利用磁性薄膜的微波特性、光电特性、信息存储特性以及磁电阻特性,可以分别制成静磁波器件、线性和非线性磁光器件以及各类磁阻传感器件。利用磁性粉体的磁记录特性、电磁波吸收特性、永磁及软磁特性,可以分别制成磁记录介质、吸波材料、各类永磁体以及高可靠性的软磁器件。

由磁性薄膜及磁性粉体制成的产品不仅已经形成了庞大的产业,而且是一个朝气蓬勃、充满活力的领域,不少跨世纪材料,如多层薄膜、纳米材料等均属于这一范畴。

本书由电子科技大学过璧君教授主编,上海科技大学阚敏高级工程师主审。

全书共分两篇。第一篇为磁性薄膜,共五章,由华中理工大学冯则坤讲师编写;第二篇为磁性粉体,共四章,由电子科技大学邓龙江讲师编写。

在本书编写过程中得到了何华辉教授、李世堃副教授的鼓励、支持和帮助,在此表示衷心感谢。

由于时间仓促,加上编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,欢迎广大读者提出批评指正。

编 者

1994年3月

内 容 提 要

本书在系统介绍磁性薄膜及磁性粉体基本物理特性及制备技术的基础上,重点讨论了它们的功能及应用技术。全书分为两篇:磁性薄膜篇和磁性粉体篇。磁性薄膜篇重点介绍薄膜的微波特性、光电特性、信息存储特性和磁电阻特性,以及利用这些特性制成的各类薄膜器件;磁性粉体篇重点介绍粉体的磁记录特性、电磁波吸收特性、永磁特性和软磁特性,及其应用技术。

本书是在总结多年来的教学、科研的基础上撰写而成的,在介绍作者成果的同时,汇集了国外最新研究成果。可作为高校电子材料和元器件专业的教材,并可以作为从事磁性材料与器件、磁记录、信息工程、自动控制、电子计测等科技人员的参考书。

目 录

第一篇 磁性薄膜

第一章 磁性薄膜的制备方法	(1)
§ 1.1 真空镀膜法	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 基本公式	(1)
1.1.3 蒸发材料的基本加热装置——蒸发源	(4)
1.1.4 真空蒸发设备	(7)
§ 1.2 溅射法	(8)
1.2.1 溅射的基本原理	(9)
1.2.2 基本溅射装置——两极直流溅射法	(11)
1.2.3 高频溅射法	(12)
§ 1.3 液相外延生长法	(14)
1.3.1 化学组分和相关关系	(14)
1.3.2 液相外延工艺	(16)
1.3.3 影响外延膜性能的因素及其控制方法	(18)
第二章 磁性薄膜的微波特性	(20)
§ 2.1 磁性薄膜的静磁波传输特性	(20)
2.1.1 概述	(20)
2.1.2 任意方向磁化的磁性薄膜的色散方程	(22)
2.1.3 三种模式的静磁波色散方程	(26)
§ 2.2 静磁波的延迟线	(27)
2.2.1 简单结构的静磁波延迟线的色散特性	(27)
2.2.2 静磁波延迟线色散特性的控制方法	(28)
§ 2.3 静磁波振荡器	(31)
§ 2.4 静磁波信噪比增强器	(33)
2.4.1 对称槽线型静磁波 S/N 增强器结构及工作原理	(33)
2.4.2 增强量	(33)
2.4.3 工作频带及特性	(35)
§ 2.5 YIG 薄膜微波滤波器	(36)
第三章 磁性薄膜的光电特性	(41)
§ 3.1 磁性介质的磁光特性	(41)
3.1.1 偏振光的数学表示法	(41)
3.1.2 介电张量、磁导率张量和磁光效应	(42)

3.1.3	法拉第效应和瓦格特效应	(44)
3.1.4	克尔效应	(46)
§ 3.2	磁光隔离器	(48)
3.2.1	概述	(48)
3.2.2	磁光隔离器的基本原理及分类	(49)
3.2.3	比法拉第旋转角 θ_r 温度特性的改善	(51)
§ 3.3	YIG 薄膜磁场(电流)传感器	(55)
3.3.1	光纤型磁场(电流)传感器的原理	(55)
3.3.2	光纤型磁场(电流)传感器的性能	(57)
3.3.3	双光束方式的不平衡误差	(58)
3.3.4	光纤型磁场(电流)传感器的特点及其应用	(59)
第四章	磁性薄膜的信息存储特性	(61)
§ 4.1	水平记录用磁性薄膜	(61)
4.1.1	电镀磁性膜	(61)
4.1.2	溅射磁性膜	(64)
4.1.3	真空蒸镀磁性膜	(65)
§ 4.2	垂直磁记录薄膜	(66)
4.2.1	概述	(66)
4.2.2	垂直磁化膜的磁特性和显微结构	(67)
4.2.3	Co-Cr 薄膜磁特性与制备工艺的关系	(70)
§ 4.3	光磁记录薄膜	(74)
4.3.1	光热磁记录原理	(74)
4.3.2	光热磁记录用介质材料	(76)
4.3.3	多层介质结构	(77)
4.3.4	非晶 TbFeCo 薄膜的磁特性	(78)
4.3.5	带有干涉层结构的 TbFe 薄膜的光磁特性	(80)
§ 4.4	磁泡	(82)
4.4.1	磁泡稳定存在的条件	(83)
4.4.2	磁泡材料的基本参数	(84)
4.4.3	磁泡材料	(85)
第五章	磁性薄膜的磁电阻特性	(86)
§ 5.1	各向异性磁电阻效应	(86)
§ 5.2	磁各向异性的数学方程式	(88)
5.2.1	晶体对称性的一般规律	(88)
5.2.2	$m\ 3\ m$ 点群晶体物理性质的张量元的对称规律	(88)
5.2.3	单晶材料的电阻率 ρ 的一般表达式	(90)
5.2.4	多晶材料的电阻率	(91)
§ 5.3	巨大磁阻(GMR)效应	(92)

5.3.1 各向异性磁电阻效应和巨大磁阻效应的比较	(93)
5.3.2 多层膜中磁阻效应的起源	(94)
§ 5.4 磁性薄膜 MR 传感器	(98)
5.4.1 三端 MR 传感元件	(98)
5.4.2 四端 MR 传感元件	(98)
5.4.3 能辨别方向的四端 MR 元件	(99)
§ 5.5 磁编码器	(101)
5.5.1 磁编码器原理和 MR 元件结构	(101)
5.5.2 MR 元件的有关问题	(102)
§ 5.6 薄膜工艺条件对性能的影响	(105)

第二篇 磁性粉体

第六章 铁磁性粉体的基本特性	(109)
§ 6.1 铁磁性粉体的磁畴结构和磁特性	(109)
6.1.1 磁畴结构	(109)
6.1.2 单畴临界尺寸的计算	(109)
6.1.3 粉体颗粒的磁特性	(110)
§ 6.2 铁磁性粉体材料的磁化过程	(111)
6.2.1 单畴颗粒的矫顽力 H_c	(111)
6.2.2 单畴颗粒的起始磁化率 χ_i	(113)
6.2.3 单畴颗粒的磁滞回线	(114)
§ 6.3 多晶铁磁性粉体的饱和磁化强度和剩余磁化强度	(115)
6.3.1 单轴晶系多晶体的磁化强度	(116)
6.3.2 立方晶系中的三易磁化轴多晶体($K_1 > 0$)的磁化强度	(116)
6.3.3 立方晶系中的四易磁化轴多晶体($K_1 < 0$)的磁化强度	(118)
§ 6.4 铁磁性粉体集合体的特性	(120)
6.4.1 不考虑颗粒间相互作用时的特性	(120)
6.4.2 考虑磁粉颗粒间相互作用时的特性	(120)
6.4.3 非一致转动模式	(121)
6.4.4 畴壁的成核及反磁化过程	(124)
6.4.5 普利沙赫(Preisach)图形	(125)
第七章 磁性粉体的永磁特性及软磁特性	(129)
§ 7.1 永磁粉体磁性参数对永磁体特性的影响	(129)
7.1.1 对永磁粉体的基本要求	(129)
7.1.2 永磁粉体矫顽力理论概述	(129)
7.1.3 永磁粉体取向度对永磁体特性的影响	(132)
7.1.4 永磁粉体堆积密度对永磁体特性的影响	(133)
§ 7.2 稀土永磁粉体	(135)

7.2.1	稀土永磁粉体的成分、结构和性能	(135)
7.2.2	稀土永磁粉体的制造技术	(138)
§ 7.3	永磁铁氧体粉体的制备技术	(142)
7.3.1	干法工艺概述	(142)
7.3.2	湿法工艺概述	(144)
§ 7.4	永磁粉体的取向技术	(147)
7.4.1	概述	(147)
7.4.2	评估取向度的方法	(147)
7.4.3	稀土永磁粉体的取向技术	(148)
7.4.4	铁氧体永磁粉体的取向技术	(150)
§ 7.5	金属软磁铁粉芯	(153)
7.5.1	磁芯的电磁特性	(154)
7.5.2	磁芯的损耗特性	(156)
7.5.3	压粉磁芯的种类	(156)
7.5.4	钼坡莫合金压粉磁芯	(157)
7.5.5	铝硅铁合金压粉磁芯	(158)
7.5.6	羰基铁磁芯	(159)
第八章	磁粉的电磁波吸收特性	(161)
§ 8.1	电磁波吸收剂主要技术指标	(161)
§ 8.2	磁粉的吸收机理分析	(162)
8.2.1	复数磁导率 $\bar{\mu}$	(162)
8.2.2	磁粉的磁损耗和储能	(163)
8.2.3	铁氧体磁谱	(163)
8.2.4	铁氧体的自然共振吸收	(164)
8.2.5	磁晶各向异性与形状对 ω_r 的影响	(167)
8.2.6	畴结构对 ω_r 的影响	(171)
§ 8.3	磁粉的介电损耗机理分析	(171)
§ 8.4	微波吸收剂用磁粉的温度稳定性	(173)
§ 8.5	W型六角晶系铁氧体微波吸收剂	(174)
8.5.1	W型六角晶体结构与特性	(175)
8.5.2	$(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ 的制备和测试小样制作	(177)
8.5.3	Co^{2+} 对 $(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ 的电磁参数影响	(177)
8.5.4	吸收剂含量对电磁参数影响	(178)
8.5.5	吸收剂复合对电磁参数影响	(179)
8.5.6	$(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ 的温度稳定性	(181)
8.5.7	$(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ 吸波材料的 $R-f$ 特性	(182)
§ 8.6	Ba-M型六角晶系铁氧体微波吸收剂	(183)
8.6.1	Co^{2+} 、 Ti^{4+} 对 Ba-M 磁粉磁性的影响	(183)

8.6.2 Ba-M 磁粉的温度稳定性	(184)
8.6.3 Ba-M 型吸波材料的 $R-f$ 特性	(186)
§ 8.7 其他类型磁性微波吸收剂	(187)
8.7.1 Z 型六角晶体吸收剂	(188)
8.7.2 Y 型六角晶体吸收剂	(188)
8.7.3 尖晶石铁氧体吸收剂	(189)
§ 8.8 RAM 技术的发展趋势	(191)
第九章 磁粉的信息存储特性	(193)
§ 9.1 磁记录介质对磁粉的要求	(193)
§ 9.2 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉	(193)
9.2.1 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 晶体结构与性质	(193)
9.2.2 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉的制备	(194)
9.2.3 钴改性氧化铁磁粉 ($\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)	(201)
9.2.4 外包金属层氧化铁磁粉	(204)
§ 9.3 CrO_2 磁粉	(204)
9.3.1 CrO_2 的晶体结构与特性	(204)
9.3.2 CrO_2 磁粉的制备	(205)
9.3.3 CrO_2 磁粉性能改进	(206)
§ 9.4 金属磁粉	(207)
9.4.1 金属磁粉的结构与特性	(207)
9.4.2 金属磁粉的制备	(208)
9.4.3 抗氧化处理	(210)
9.4.4 氮化铁磁粉	(210)
9.4.5 碳化铁磁粉	(211)
§ 9.5 Ba-M 型磁粉	(212)
9.5.1 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 晶体结构与特性	(212)
9.5.2 Ba-M 型磁粉的制备工艺	(213)
9.5.3 影响 Ba-M 型磁粉性能的因素	(214)
参考文献	(217)

第一篇 磁性薄膜

第一章 磁性薄膜的制备方法

§ 1.1 真空镀膜法

1.1.1 概 述

真空镀膜法是一种最常见且较简便的薄膜制作方法。它的工作原理简单,只要在真空中把制造薄膜的物质加热蒸发并使其蒸气沉积在合适的基片上就可以了。其主要优点是:

- (1)镀膜设备比较简单;
- (2)成膜速度快;
- (3)适用面较广;
- (4)既能制作与主体材料不同成分比的化合物,也能制作与主体材料不同晶体结构的物质。

真空镀膜法也存在如下缺点:

- (1)薄膜与基片的附着力一般比较弱;
- (2)对高熔点物质很难进行真空蒸发;
- (3)制作工艺的重复性较差;
- (4)不易保证合金膜的准确成分。

1.1.2 基本公式

在真空镀膜技术中,下面的几个基本公式是经常碰到的。这些公式是在假定气体分子的速度分布符合麦克斯韦尔-玻尔兹曼分布的条件下,从经典热力学和气体分子运动论推导出来的。

(1)气体分子的算术平均速度

气态物质分子的速度分布主要决定于温度,分子的算术平均速度 $\bar{v}$ 可由下式确定

$$\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (1.1.1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, m 为分子的质量。各种分子的 $\bar{v}$ 的计算结果列于表 1.1.1 中, 表中所列举的分子有的是常留在真空室中的残余气体分子, 有的是真空镀膜常用元素的分子。

表 1.1.1 各种分子在 300K 及 2000K 的算术平均速度 $\bar{v}$ 的计算值

	分子的质量 $\times 10^{-23}(\text{g})$	$\bar{v}(300\text{K}) \times 10^2 \text{ m/s}$	$\bar{v}(2000\text{K}) \times 10^3 \text{ m/s}$
H ₂	0.335	17.8	4.58
N ₂	4.65	4.76	1.23
O ₂	5.31	4.46	1.15
H ₂ O	2.99	5.94	1.53
CO	6.65	3.98	1.03
CO ₂	9.30	3.37	0.869
Al	8.96	3.43	0.886
Si	9.93	3.36	0.868
Fe	18.5	2.38	0.674
Ga	23.2	2.13	0.551
Ag	35.8	1.72	0.443
Au	65.4	1.27	0.328

由于 $\bar{v}$ 是随 T 和 m 的平方根变化的, 所以 $\bar{v}$ 对于 T 和 m 的依赖关系不强。除了氢气分子以外, 一般分子速度分布为 100 m/s 到 1000 m/s。

(2) 气体的密度与压力

如果温度一定, 气体压力 P 与气体密度 n 之间符合下列关系式, 该式与气体种类无关, 严格地讲, 该式只对理想气体成立, 但通常认为它近似适用于一切气体,

$$P = nkT \quad (1.1.2)$$

从该式可以知道, 在标准状态下, 任何气体的密度都约等于 3×10^{19} 个/cm³。

(3) 气体分子的流量

设单位时间内穿过 s 的气体分子数为 J , 则

$$J = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (1.1.3)$$

该式也叫做赫兹-克努曾(Hertz-Knudsen)公式, 是描述气体流动的重要公式。如果代入压力 P 和分子量 M , 则该式可改写成

$$J = 3.52 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{MT}} (\text{Torr/cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (1.1.4)$$

在固体中, 分子间隔大约是 $(2 \sim 5) \times 10^{-8} \text{cm}$ 。因此, 每平方厘米固体表面原子数约为 $10^{14} \sim 10^{15}$ 个, 于是当固体处于 10^{-5}Torr 的真空中时, 在一秒钟内, 就有约等于固体表面原子数的残余气体撞击固体表面, 如果这些残余气体分子全部吸附在固体表面上, 那么大约

在 1 秒钟内就能形成残余气体的单原子层。

(4) 平均自由程

从蒸发源蒸发的分子, 在前进过程中不断与杂乱运动着的残余气体分子碰撞。我们把分子不产生碰撞而能直线前进到达目标的平均距离叫做平均自由程, 它具有长度的量纲, 用符号 λ 表示。

假定有 N_0 个蒸发分子形成一束直线前进, 在前进中有些分子就会因碰撞引起散射而飞出分子团, 蒸发分子前进距离 x 时所剩余的分子数 N 为

$$N = N_0 e^{-x/\lambda} \quad (1.1.5)$$

设蒸发分子的半径为 r , 残余气体分子的半径为 r' , 残余气体分子的密度为 n_r 。为了简化, 假定所有分子的温度都一样, 设为 T , 则可得出下式

$$\lambda = \frac{1}{n_r \pi (r + r')^2} \quad (1.1.6)$$

设残余气体的压力为 P_r , 则 $P_r = n_r kT$ 。如果 P_r 的单位用 Torr 表示, r, r' 的单位用 $\text{\AA}$ 表示, λ 的单位 cm 表示, 则

$$\lambda = 3.31 \times 10^{-4} \frac{T}{P_r (r + r')^2} \quad (1.1.7)$$

当蒸发分子为 Ag 分子, 残余气体为 O_2 时, 则

$$\lambda \approx \frac{10^{-2}}{P_r} (\text{cm}) \quad (1.1.8)$$

设计真空镀膜设备时, 首先应该考虑的问题是要使大部分蒸发分子能不与别的分子碰撞, 直线前进到达基片上。例如, 假定要设计真空度为 10^{-4} Torr 的真空镀膜设备, 从式 (1.1.8) 可知蒸发分子的平均自由程 λ 约为 1m。而由式 (1.1.5) 可知, λ 这个量的意义是: 蒸发分子每前进一个 λ 距离, 能不碰撞而直线前进的分子数量就减少到原来的 $1/e$ 。综合考虑平均自由程和成膜速率后, 必须将蒸发源与基片之间的距离设计成平均自由程的 $1/5 \sim 1/10$ 左右。

(5) 蒸发分子在基片上的附着情况

基片设置在蒸发源的上方, 讨论向平面状态基片蒸发的分子的附着情况。如果限定蒸发源的大小, 则在蒸发源正上方的部分附着得多, 离蒸发源远的地方相对附着较少。下面来定量讨论这个问题。

首先讨论如图 1.1.1 所示的蒸发源的情况。设在某段时间内蒸发的镀膜质量为 M_s , 则在某规定方向的立体角 $d\omega$ 中, 蒸发的镀膜质量 dM_s 为

$$dM_s = \frac{M_s d\omega}{4\pi} \quad (1.1.9)$$

设离蒸发源的距离为 r , 蒸发分子方向与基片表面法线之间的夹角为 θ 的平面上, 每单位面积的附着量 M_s 可由下式确定

$$M_s = S \frac{M_s \cos \theta}{4\pi r^2} \quad (1.1.10)$$

式中 S 为附着系数, 它表示蒸发后冲撞到基片上的分子中, 不被反射而遗留于基片上的比率 (化学吸附比率)。

如图 1.1.2 所示,盒子内温度均匀,蒸发分子从盒子表面的小孔飞出。这种形状的蒸发源称为克努曾盒(Knudsen Cell)。

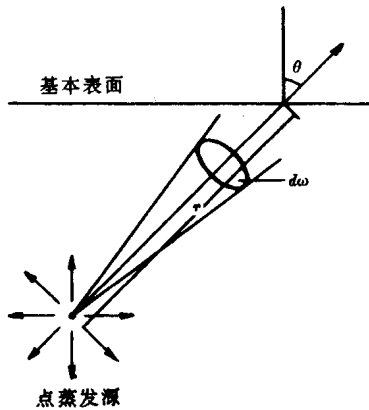


图 1.1.1 点蒸发源的蒸发

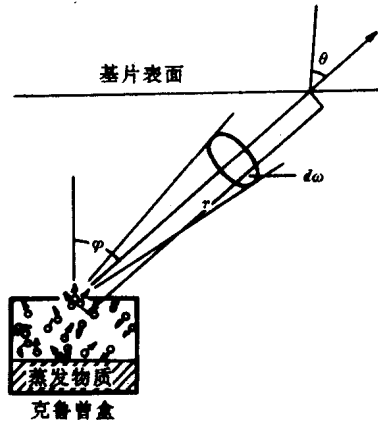


图 1.1.2 微小的面蒸发源(克努曾盒)的蒸发

将小孔看作平面,假如在规定的时间内从这个孔蒸发的全部质量为 M'_s ,那么在与这个孔所在平面的法线成 φ 角方向的立体角 $d\omega$ 中,蒸发的镀料质量 dM'_s 与前述的一致

$$dM'_s = \frac{M'_s \cos \varphi d\omega}{\pi} \quad (1.1.11)$$

在离蒸发源的距离为 r ,蒸发分子的方向与基片法线的夹角为 θ 的平面上,每单位面积附着的镀料物质 m'_s 为

$$m'_s = S \frac{M'_s \cos \varphi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (1.1.12)$$

如果在大的基片上蒸镀,膜的厚度就要随位置而明显变化。假如把若干个小的基片设置在蒸发源的周围,一次蒸镀制造多片薄膜,就能知道附着量随基片位置的不同而变化的规律。

1.1.3 蒸发材料的基本加热装置——蒸发源

如前所述,所谓真空镀膜就是在真空中把镀料加热,使其蒸发,让蒸发物在某个表面上沉积的过程。因此,它所需要的基本装置就是真空装置、加热装置(蒸发源)及附着面(基片)。图 1.1.3 示出了真空镀膜设备的基本结构。真空蒸镀法离不开蒸镀材料的加热装置,下面对蒸镀材料的各种加热装置(蒸发源)进行分析。

1. 电阻加热法

由于电阻加热法很简单,所以用得很普遍。把薄片状或线状的高熔点金属(通常是钨、钼、钽)做成适当形状的蒸发源,装上蒸镀材料,让电流通过蒸发源加热蒸镀材料使其蒸发,这就是电阻加热法。

采用电阻加热法时主要考虑的问题是怎样选择蒸发源的材料及其形状。

选择蒸发源材料所要考虑的三个问题是:蒸发源材料的熔点和蒸气压,蒸发源材料与薄膜材料的反应以及由薄膜材料引起的湿润性。

薄膜材料的蒸发温度(平衡蒸气压为 10^{-2} Torr 时的温度)一般在 $1000\sim 2000\text{K}$ 之间,所以蒸发源材料的熔点必须高于这一温度。然而,只满足这个条件还是不够的。在选择蒸发源材料时还必须考虑蒸发源材料随着蒸发而成为杂质进入薄膜的量的问题。

还必须了解有关蒸发源常用材料的蒸气压。表 1.1.2 列出了电阻加热法中常用金属材料的熔点和达到规定的平衡蒸气压时的温度,以便通过蒸发温度来控制蒸镀。为了抑制蒸发源材料的分子参与蒸发,应该选择薄膜材料的蒸发温度低于如表 1.1.2 所示蒸发源材料当平衡蒸气压为 10^{-8}Torr 时的温度。在杂质较多而不受什么影响的情况下,也可采用 10^{-5}Torr 对应的温度,这里仅作定性解释,要定量的求出杂质原子数的比值,可根据式(1.1.3)进行计算。

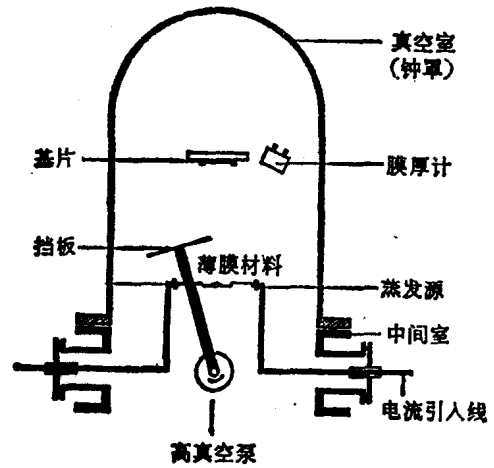


图 1.1.3 真空蒸镀设备实例

表 1.1.2 用于电阻加热法的蒸发源材料的熔点和对应于平衡蒸气压的温度

蒸发源材料	熔点(K)	平衡温度(K)		
		蒸气压(托) 10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}
W	3683	2390	2840	3500
Ta	3269	2230	2680	3330
Mo	2890	1865	2230	2800
Nb	2741	2035	2400	2930
Pt	2045	1565	1885	2180
Fe	1808	1165	1400	1750
Ni	1726	1200	1430	1800

该表最右一列是蒸发温度。

根据蒸气压来选择蒸发源材料只是一个必要条件。电阻加热法中比较麻烦的问题是高温时某些蒸发源材料会与薄膜材料发生反应或扩散而形成化合物或合金。其中形成合金是个更加突出的问题,例如钽和金高温时形成合金就是一例。此外,在高温时,铝、铁、镍、钴等也会与钨、钼、钽等一般的蒸发源材料形成合金。一旦形成合金,蒸发源熔点下降,也就容易烧断。因此,应该选择不会与薄膜材料形成合金的材料作蒸发源材料。如果这一点不能保证,那么必须降低蒸发源的温度或者使蒸发源材料的量大大地多于薄膜材料的量,以弥补蒸发源的消耗。

另一个必须考虑的问题就是薄膜材料对蒸发源材料“湿润性”问题。湿润性与材料表面的能量有关。高温熔化的薄膜材料在蒸发源材料上有扩散倾向时可以说是容易湿润的;

反之,有凝集而接近于形成球形的倾向时,就可以认为是难于湿润的。图 1.1.4 示出了湿润状态的几种情况。在湿润情况下,由于薄膜材料的蒸发是从大的表面上发生的,所以一般可认为是面蒸发源的蒸发;湿润小的时候,一般可认为是点蒸发源。另外,如果容易发生湿润,那么薄膜材料与蒸发源十分亲合,因而蒸发状态稳定,如果难以湿润的,则蒸发材料就容易从蒸发源上掉下来。

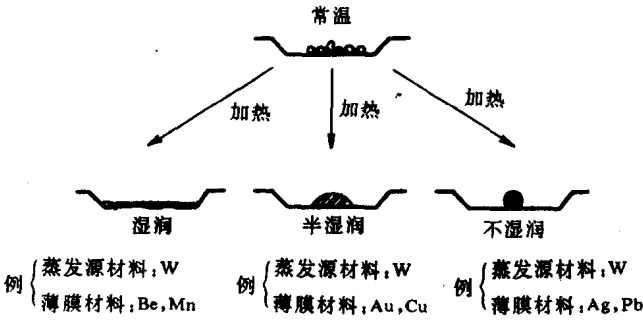


图 1.1.4 蒸发源材料和薄膜材料润湿状态的几个例子

另一个重要问题就是把蒸发源做成什么形状。蒸发源的形态一般有螺旋形、舟形、盒形等。螺旋形是线状蒸发源所采用的形状,如图 1.1.5 所示,把直径为 0.3~0.5mm 的金属线或多股金属线(钨是最硬的材料,容易整形但质脆;而钽是非常容易加工的材料)卷在木螺丝之类的模子上,做成螺旋状的笼形线圈。这种蒸发源容易制作。假如薄膜材料是金属,则在通电加热螺旋线时,在螺旋线上存在金属薄膜材料的部分就会发生电短路,尽管如此,由热辐射和热传导也能够蒸镀普通的物质。

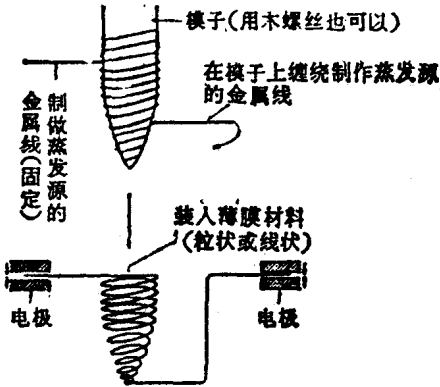


图 1.1.5 螺旋形蒸发源的制作方法

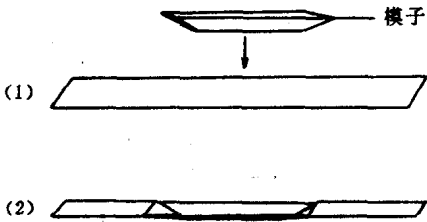


图 1.1.6 舟形蒸发源的实例

因为在螺旋形蒸发源中薄膜材料是在整个空间蒸发的,所以薄膜材料的损耗大,而且存在粉末状薄膜材料不能装在螺旋线中的问题。与此相反,舟形蒸发源的蒸发方向被限制在半个空间中,而且不管何种形态的薄膜材料都可以装入舟形蒸发源中,这是因为舟形蒸发源是通过使金属片变形而做成的,它可制成各种各样的形状。图 1.1.6 示出了舟形蒸发源的实例。这种形式的蒸发源,除了薄膜材料容易湿润蒸发源材料外,薄膜材料只能从下向