

● 主 编 张 力

● 副主编 戴本忠

近代物理 实验



本书由国家基金委“云南大学数理基地”人才培养基金资助

近代物理实验

主 编 张 力
副主编 戴本忠

云南大学出版社
样 书

图书在版编目 (CIP) 数据

近代物理实验/张力主编. —昆明: 云南大学出版社,
2008

ISBN 978 - 7 - 81112 - 660 - 0

I. 近… II. 张… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. O41 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 098977 号

近代物理实验

主 编 张 力

副主编 戴本忠

策划编辑: 徐 曼

责任编辑: 徐 曼 朱光辉

封面设计: 刘 雨

出版发行: 云南大学出版社

印 装: 昆明市五华区教育委员会印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 9.5

字 数: 231 千

版 次: 2008 年 7 月第 1 版

印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 81112 - 660 - 0

定 价: 18.00 元

社 址: 云南省昆明市一二·一大街 182 号
云南大学英华园内 (邮编: 650091)

发行电话: 0871 - 5033244 5031071

网 址: <http://www.ynup.com>

E - mail: market @ ynup.com

前 言

实验教学在高校培养综合素质高、实践能力强,具有探索精神、科学思维能力和创新能力人才的教学中,具有其他教学环节不可替代的功能和作用。现代物理实验教学的改革思路是:以培养学生实践能力和创新精神为目的,突破传统的实验教学模式,构建体现实验技能训练与实践能力、创新能力培养相结合的三大层次的物理实验教学新体系。

近代物理实验是一门物理系各专业学生都必须学习的重要的实验课程,具有较强的综合性和技术性,在实验教学体系中属于第二层次,即综合提高型实验。课程的主要目的是通过近代物理实验进一步活跃学生的物理思想,培养对物理现象的观察能力和分析能力,了解实验物理在物理概念的产生、形成和发展过程中的作用,了解近代物理实验在物理学及相关学科发展过程中所起的重要作用,学习近代物理中的一些常用方法、技术、仪器和知识。通过本层次的教学,使学生在掌握近代物理实验理论、方法和现代技术的同时,培养正确、良好的实验习惯以及严谨的科学作风,提高学生综合运用所学知识和技能分析问题、解决问题的能力,为进一步开展研究型实验奠定良好的基础。

本教材在1997年、2005年编写的《近代物理实验》讲义的基础上重新修订编写,修订了原讲义中一些印刷错误,并根据新的实验设备补充了大量新的实验内容,覆盖了原子物理、核探测技术、激光、光电子学与光信息处理、X射线和电子衍射、光谱学、电子技术、真空物理、低温物理等学科,使近代物理实验教学体系更趋于完善。

本实验教材在多年实验教学基础上编写完成。参与本实验教材编写的有戴本忠(实验十四、十五)、何俊(实验七、八、九、十、十一、十二、十三)、葛茂茂(实验一、二、三、四、五、六)、姜泽军(实验十六、十七、十八、十九、二十、二十一)。在编写本书时参考了大量兄弟院校的有关教材,在此一并表示衷心感谢!本书由国家基金委“云南大学数理基地”人才培养基金(项目编号:J0530177)资助。鉴于编者知识水平有限,书中难免存在不足之处,望读者批评指正。

编 者
2008年6月

目 录

实验一 真空的获得与测量 真空蒸发镀膜	(1)
实验二 弗兰克—赫兹实验	(11)
实验三 盖革—米勒计数管的特性及放射性衰变的统计规律	(16)
实验四 闪烁探测器及 γ 能谱的测量	(25)
实验五 电子衍射实验	(33)
实验六 用 X 射线衍射仪进行物相分析	(38)
实验七 单光子计数	(47)
实验八 光磁共振	(54)
实验九 脉冲核磁共振	(61)
实验十 气体放电中等离子体的研究	(71)
实验十一 椭偏法测薄膜厚度和折射率	(78)
实验十二 微波电子顺磁共振	(84)
实验十三 微波反射式速调管的工作状态和工作特性	(93)
实验十四 塞曼效应	(103)
实验十五 密立根油滴实验	(111)
实验十六 氢原子光谱	(116)
实验十七 钠原子光谱	(122)
实验十八 光电管特性研究	(126)
实验十九 光电效应及普朗克常数的测量	(131)
实验二十 光拍频波和光速测量	(136)
实验二十一 全息照相	(142)

实验一 真空的获得与测量 真空蒸发镀膜

一、实验目的

1. 了解真空获得与测量的方法原理。
2. 熟悉高真空机组和复合真空计的结构组成，掌握它们的性能及操作方法。
3. 了解抽气过程中真空容器内压强随抽气时间的变化。
4. 学会用高频火花探漏器检漏，并进行预真空的粗略估计。
5. 了解镀膜机真空部件的原理、功能。
6. 初步了解真空蒸发镀膜技术。

二、实验原理

真空技术在工业生产和科学研究中有广泛的应用。真空技术主要包括真空的获得、测量和检查漏气等方面的内容，其中真空的获得和测量是最重要的两个方面。目前常用的真空获得设备主要有旋片式机械真空泵、油扩散泵、涡轮分子泵、低温吸附泵、离子泵、钛升华泵等。真空测量仪器主要有 U 型真空计、热电偶真空计、电离真空计等。随着电子技术和计算机技术的发展，各种真空获得设备向高抽速、高极限真空、无污染方向发展。各种真空测量设备与微型计算机相结合，具有数字显示、数据打印、自动监控和自动切换量程等功能。

在应用方面，低真空主要涉及真空输送、真空过滤、真空成型、真空装卸、真空干燥及真空浓缩等。高真空、超高真空主要涉及高纯度材料制备、薄膜科学与技术、电子材料制造和加工、表面科学、纳米科学等领域。在纺织、粮食加工、冶金、铸造、医药、精密加工、电子等工业部门及科学领域有着广泛的应用。关于真空的一些基础知识请参看附录。

（一）高真空的获得

获得真空用真空泵。真空泵按工作条件的不同分为两类：能够在大气压下工作的真空泵称为初级泵（如机器泵），用来产生预备真空，需要在预备条件下才能工作的真空泵称为次级泵（如扩散泵），次级泵用来进一步提高真空度，获得高真空。

1. 机器泵 其结构如图 1-1 所示。径向开有槽的圆柱形转子（图中 1）偏心地安置在圆筒形定子（图中 2）之内，并与定子空腔内壁切于过 D 点的母线；一对旋片（图中 3）可滑动地嵌入转子槽中，由于弹簧（图中 4）的

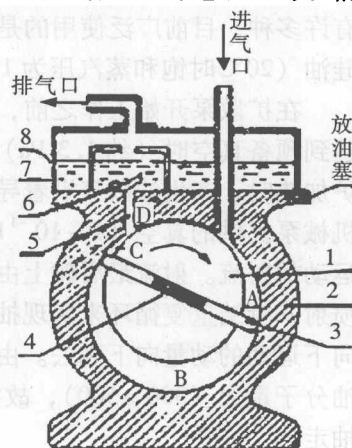


图 1-1 机械泵

伸张作用，使旋片紧贴在空腔的内壁上；排气口（图中5）上设置一单向阀门（图中6），以防排出的气体再度进入泵腔。

旋片将定子空腔分成三个部分：吸气空间（图中A），封闭空间（图中B），及排气空间（图中C）；当转子沿箭头所示方向旋转时，A室体积增大、压强降低，于是，被抽容器内的气体由进气管流入泵腔；B室原已吸入的气体被封闭在其内；而C室则因体积减小、压力增大而最终顶开排气阀门，将气体排出泵外。

为了润滑并封闭摩擦面，排气阀及其下部的泵体空腔用密封油密封，密封油置于油箱（图中7）内。油面高度由油标（图中8）指示。机械泵的密封油即机械泵油，它是一种矿物油，要求在泵的工作温度下有较小的饱和蒸汽压（20℃时约为 10^{-3} Pa）及合适的粘度。另外，机械泵油还有对泵芯降温的作用。

每一种泵机都有其极限真空，当单位时间内从外界漏入系统的气体量等于泵机抽出的气体量时就达到了泵机的极限真空。机械泵的极限真空受到下述因素的影响：油的饱和蒸汽压，被抽气体在泵油中的溶解及解吸，D至排气口之间的“死空间”，滑动密封面的微漏及泵壁本身的放气等，因而它被限制在 5×10^{-3} Pa左右。机械泵的出口耐压略大于大气压强，因而可以作为前级泵（辅泵）使用。

使用机械泵时应注意：

①应经常保持油位在油标线附近，以保持其良好的密封性。

②开启机械泵时，应保证电源之三相均有良好的电接触，应使转子转动方向与箭头方向一致（顺时针），不得反转！

③保持泵内清洁，防止异物落入。

④泵运转过程中，操作者不得离开，一旦电源发生故障应及时处理。

⑤机械泵停止工作时，必须保持其进气口与大气相通，防止返油事故的发生！

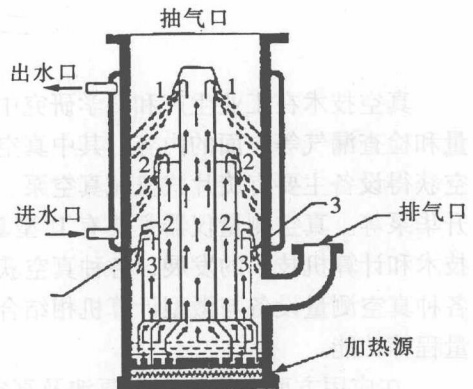


图 1-2 扩散泵

2. 扩散泵 一般多采用油扩散泵，其结构如图1-2所示。油扩散泵使用的工作液体有许多种，目前广泛使用的是274号硅油（20℃时饱和蒸汽压为 1.3×10^7 Pa）和275号硅油（20℃时饱和蒸汽压为 1.3×10^8 Pa）。

在扩散泵开始工作之前，必须先开动机器泵抽气（图1-2中排气口接机械泵），等达到预备真空时（约1.3Pa），便可以用电炉对蒸发器中的硅油进行加热。当硅油被电炉加热时，产生油蒸气沿着导流管经伞形喷嘴（图中1、2、3）向下喷出。因喷嘴外面有机械泵提供的真空（ $1 \sim 10^{-1}$ Pa），故油蒸气流可喷出较远距离，构成一个向出气口方向运动的射流。射流最后碰上由冷却水冷却的泵壁凝结为液体流回蒸发器，即靠油的蒸发—喷射—凝结重复循环来实现抽气。由进气口进入泵内的气体分子一旦落入蒸气流中便获得向下运动的动量向下飞去。由于射流具有高流速（约200m/s），高的蒸气密度，且扩散泵油分子量大（300~500），故能有效地带走气体分子。气体分子被带往出口处再由机械泵抽走。

使用扩散泵的时候必须注意：

①由流体连续性原理可知，其前置机械泵的抽速必须保证能够及时排走扩散泵所排出的气体。若扩散泵及机械泵入口压强分别为 p_D 及 p_M ，抽速分别为 s_D 及 s_M ，则应满足 $p_D s_D = p_M s_M$ 。

②扩散泵工作时，冷却水必须畅通（流量约 $0.2 \sim 0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$ ），以确保泵壁的冷凝效果。

③启动前，必须满足扩散泵的预真空条件。

④扩散泵的加热功率应适当，否则，将影响其抽速及极限真空。

⑤扩散泵运转过程中，如遇到漏气、停电等，应及时妥善处理，顺序为：关闭电离规管灯丝，关断高真空阀，切断加热电源，移开加热电炉及强迫风冷等。

⑥扩散泵停止工作时，必须待油冷却（ $\leq 60^\circ\text{C}$ ），约需 30 分钟 ~ 1 小时后，方可关掉前级泵及冷却水，但仍需保持一定的真空状态。

（二）真空的测量

真空计是测量真空系统中气体压强的仪器，种类很多，这里介绍的复合真空计是常见的一种，复合真空计是由温差电偶真空计与热阴极电离真空计组合而成。

1. 温差电偶真空计的原理

温差电偶真空规管由玻璃制成，通过小管 8 和真空系统相接，如图 1-3 所示，在规管内的两根引线上装有热丝 3，另外两根引线上焊着一对温差电偶 4，温差电偶的另一端与热丝在 A 点焊接。

由于在低压下，气体的热传导系数与压强成正比，所以在通过热丝的电流一定的条件下，热丝的温度随着规管内真空度的提高而升高，温差电偶电动势也就随之而增大。因此，通过测量温差电偶电动势，就可确定出被测系统的真空度，温差电偶真空计就是根据这个原理制成的。温差电偶真空计的测量范围为： $13 \sim 0.13 \text{ Pa}$ 。

2. 热阴极电离真空计的原理

如图 1-4 所示，图示的部分封在玻璃管中，其上端的开口与真空系统相接，使用时，在灯丝电路中通以电流，灯丝受热后便发射电子，由于栅极加上正电压，便吸引电子使电子加速，中途与气体分子相碰，气体的密度越大，碰撞机会越大，产生的正离子也越多。另外，由于板极电压为负，便吸引正离子在板极电路中形成板极电流 I_p ，气体分子密度越大（即压强越大），板极电流也越大。所以，通过测量板极电流便可以确定气体的压强，热阴极电离真空计就是根据这个原理制成的。热阴极电离真空计是测量极高真空的仪器，测量范围为 $0.1 \sim 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

3. 复合真空计的使用

复合真空计由上述两种真空计组合而成，现在常用的型号有 WVK 系列和 FZH 系列，使用方法类似。现介绍较典型的 FZH-2B 型复合真空计。图 1-5 是 FZH-2B 型的板面图， K_1 为电源开关，

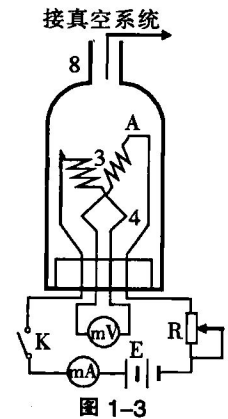


图 1-3

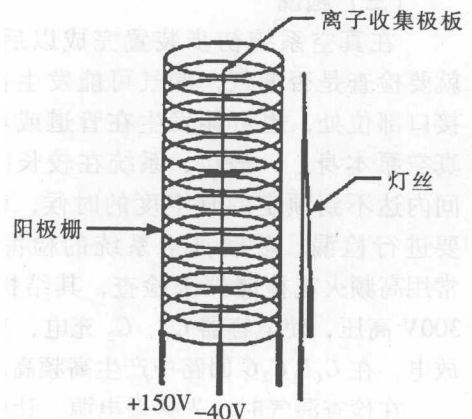


图 1-4 电离计的中间部分

开关 K_2 、 K_3 及电表 CB_1 属于温差电偶真空计部分， K_2 、 K_3 各控制一路规管，但示数均从 CB_1 读取。其余均属于热阴极电离真空计部分，其中 K_4 为电离真空计量程调节旋钮， K_5 为电离真空规管灯丝除气开关， K_6 为电离规管开关。读数时，读出 CB_2 上的示数再乘以相应量程即为电离真空计读数。温差电偶真空规管和电离真空规管已经焊接在真空系统上，测量时，各用一根电缆线与复合真空计相接，在使用前或停止使用时，应该使面板上的所有开关都处于关闭状态。

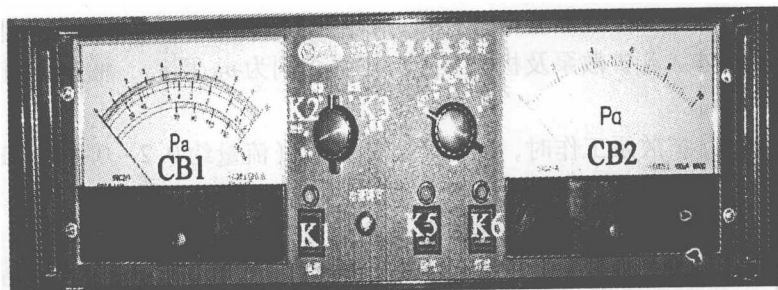


图 1-5 复合真空计面板

(1) 温差电偶真空计的使用：接通电流，预热 10 分钟，使 K_2 放在（加热电流）位置，调节电流调节旋钮使 CB_1 表的指针在下面一行刻度（mA）上达到加热电流的规定值（记在每只温差电偶真空管的管座上或按说明书规定），然后使 K_2 放在（测量）位置，从 CB_1 表的上面一行刻度（Pa）可读出所测气体压强。

(2) 电离真空计的使用：当被测系统的真空度低于 0.1 Pa 时，不能接通电离真空计，否则会烧坏电离真空规管，必须在温差电偶真空计 CB_1 表的指针达到满偏转刻度时，才能使用电离计，电离真空计暂时不用时，需断开电离计电源，否则会影响电离真空规管的寿命。具体事项如下：

①发射电源的调节：在未接通电源时，采用五芯电缆线把电离真空规管与仪器联接，带鳄鱼夹的接线与电离真空规管板极联接，有香蕉插头一端与仪器背面接线柱连接，接通电源，预热 10 分钟，即可读数。

②零点调整：直接调整表盘前的旋钮即可。

③满偏转刻度调整：直接调整表盘前的旋钮即可。

④测量压强（真空度）：完成上一步后，将 K_4 转到量程 10^3 ， $10^2 \dots$ 由电表指示的数值乘以量程开关所指示的数值，即所测量真空度之值。

（三）检漏

在真空系统初步装置完成以后，就要检查是否漏气，漏气可能发生在接口部位处，也可能发生在管道或者真空泵本身。一般讲，系统在较长时间内达不到预定的真空度的时候，就要进行检漏。玻璃真空系统的检漏，

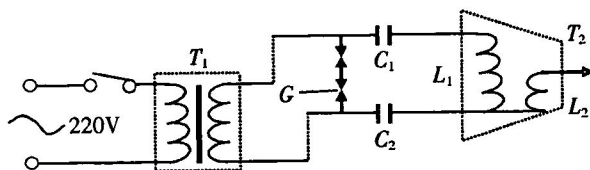


图 1-6

常用高频火花检漏器来检查，其结构如图 1-6 所示。 T_1 为电源的升压变压器，输出 300V 高压，使电容器 C_1 、 C_2 充电，当电容器两端电压升到足够高时，就通过火花间隙 G 放电，在 $C_1 L_1 C_2 G$ 回路中产生高频高压使附近空气电离，而激起很强的放电现象。

在检查漏气时，先接通电源，让检漏端接在玻璃壁附近（离开约 0.5 ~ 1cm）来回移动，当检漏端接近不漏气的部位时，检漏端产生的火花束在玻璃表面上不规则地跳动，当

检漏端接近漏气部位时，则分散的火花立即变为一束很细很亮的火花，对准漏气处向系统里钻。在检漏的时候应该注意不要把检漏端在一个地点停留过久，否则容易造成新漏洞。

有时也可用涂擦酒精、汽油的方法检查漏气部位，当涂抹酒精、汽油的部位漏气时，电离计的指针会立即偏转，此时若用高频火花检漏计检查，系统内会出现淡蓝色的辉光。当知道漏气的部位后，用火焰密封胶接或用真空封蜡封闭即可。

(四) 高真空系统简介

如图 1-7 所示为实验用的真空系统装置图，在活栓 K_3 外端为一段封闭的小管，管端 L 处有一微小的漏气孔，打开 K_3 使小孔漏气，可供学生观察用高频火花检漏器检查漏气时的现象。 E 为储存器，它有一定的容积，当偶然停电时来不及打开活栓 K_2 使机械泵与大气相通时，它可防止机械泵油被吸入真空系统。

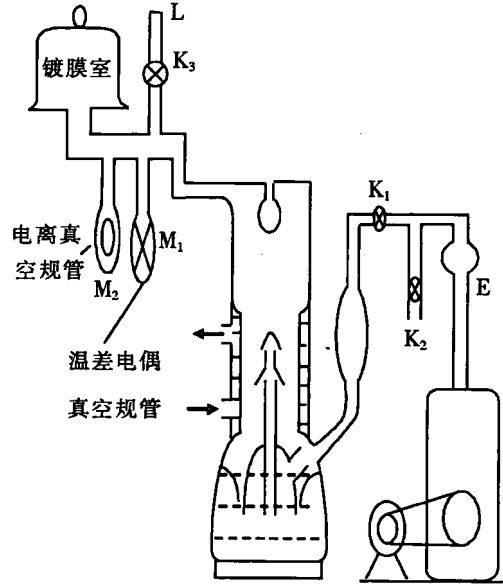


图 1-7

(五) 真空蒸发镀膜

真空镀膜是将固体材料置于镀膜室内，在真空条件下，将固体材料加热蒸发，蒸发出来的原子或分子能自由地弥布到容器的器壁上。当把一些加工好的基板材料放在其中时，蒸发出来的原子或分子就会吸附在基板上逐渐形成一层薄膜。真空镀膜有两种方法，一是蒸发，一是溅射。本次实验采用蒸发方法。在真空中把制作薄膜的材料用蒸发源加热蒸发，使其淀积在适当的表面上。

蒸发源的形状如图 1-8 所示，大致有螺旋式 (a)、篮式 (b)、发叉式 (c) 和浅舟式 (d) 等。

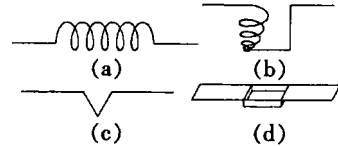


图 1-8

蒸发源选取应遵循以下几个原则：

1. 有良好的热稳定性，化学性质不活泼，达到蒸发温度时加热器本身的蒸汽压要足够低。
2. 蒸发源的熔点要高于被蒸发物的蒸发温度。加热器要有足够大的热容量。
3. 蒸发物质和蒸发源材料的互溶性必须很低，不易形成合金。
4. 要求线圈状蒸发源所用材料能与蒸发材料有良好的浸润，有较大的表面张力。
5. 对于不易制成丝状、或蒸发材料与丝状蒸发源的表面张力较小时，可采用舟状蒸发源。

常见的材料有钨、钼及它们的合金。

蒸发镀膜要求从蒸发源出来的蒸汽分子或原子，到达被镀膜基片的距离要小于镀膜室内残余气体分子的平均自由程，这样才能保证蒸发物的蒸汽分子能无碰撞地到达基片表面。保证薄膜纯净和牢固，蒸发物也不至于氧化。气体分子运动平均自由程公式：

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \approx \frac{3.76 \times 10^{-3}}{p} \quad (\text{米}) \quad (1-1)$$

式中： d 为分子直径， T 为环境温度 (K)， p 为气体压强 (Pa)。对于蒸发源到基片

的距离为 0.15 ~ 0.25m 的镀膜装置, 镀膜室的真空度须在 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ Pa 之间才能满足要求。根据克拉贝龙方程

$$\lg p_v = A - \frac{B}{T} \quad (\text{式中 } A \text{ 和 } B \text{ 是与物质有关的常数})$$

物质的蒸气压 p_v 是温度 T 的函数。对于质量为 M 的物质, 其蒸发率可用下式表示:

$$G = p_v \left(\frac{M}{2\pi kT} \right)^{1/2} \approx 4.37 \times 10^{-4} p_v \left(\frac{M}{T} \right)^{1/2} \quad (\text{克} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1}) \quad (1-2)$$

上式中 M 的单位是分子量, 蒸气压 p_v 单位为 Pa。由上式可知, 蒸发物的温度决定蒸发率的大小。一些金属的蒸发温度见附录表三, 蒸发物在加热蒸发过程中会释放气体, 将使镀膜室内压强上升, 影响镀膜质量, 故镀膜机构抽速要配备适当, 使镀膜室内维持所需真空度; 相应地要把加热蒸发过程分成两步进行, 先用挡板遮住被镀基片, 进行预熔蒸发一段时间, 然后再适当提高加热温度, 移开挡板正式蒸镀。基片的表面状态对薄膜的结构也有影响, 如果基片光洁度高, 表面清洁, 则所获得的膜层结构致密, 容易结晶, 附着力也强, 否则相反。

根据用途不同, 蒸镀的材料也不同, 在半导体工艺中常见的蒸镀材料有铝、银、金、铜等, 蒸镀后与基片形成欧姆接触, 作为导线层使用。

基片温度对薄膜结构有较大影响, 基片温度高, 使吸附原子的动能增大, 跨越表面势垒的几率增多, 容易结晶化, 并使薄膜缺陷减少, 同时薄膜内应力也会减少, 基片温度低, 则易形成无定形结构膜。基片温度的选择要视具体情况而定, 一般说来, 如果蒸发的膜层较薄, 当基片温度比较低时, 蒸发室内的金属原子很快失去动能, 并在基片表面凝结。这时的膜层比较均匀致密, 当基片温度过高时反而会出现大颗粒晶粒, 使膜层表面粗糙。如果蒸镀比较厚的膜层, 一般要求基片温度适当高一些, 可以减少薄膜内应力。

常见的基片有玻璃、聚甲基丙烯酸甲酯 (有机玻璃)、硅、锗、砷化镓等。

(六) 薄膜质量

制备薄膜, 一般都要求膜厚均匀, 组分纯净、性能稳定、附着牢固等。关于薄膜厚度一般可通过调节蒸发物的数量和时间以及基片和蒸发物的相对位置来控制。

三、实验仪器

高真空装置, 镀膜机, 机器泵, 扩散泵, 复合真空计, 检漏仪。

四、实验内容

首先检查各活栓是否都在“关”的位置, 复合真空计的开关是否都在起始位置, 机械泵的油面是否在规定标线处。

(一) 低真空的获得与测量

1. 关闭机械泵连通大气的活栓 K_2 及 K_3 , 开动机械泵。
2. 打开 K_3 用高频火花检漏器检查 L 处的漏气情况, 观察后将 K_3 关闭。
3. 接通复合真空计的总电源, 接通并预热温差电偶真空计, 用温差电偶真空计测量

系统的真空度，每二分钟做一次记录，压强测量和记录要在整个实验过程中进行。

(二) 高真空的获得与测量

1. 当真空系统的压强到 1.3Pa 以下时，接通油扩散泵的冷却水，接通加热电源，使扩散泵开始工作。

测量压强的工作要继续进行，要注意扩散泵加热后压强的变化。

2. 当温差电偶真空计显示的系统的压强达到 0.13Pa 时，打开电离真空计电源，预热 10 分钟后，再使用电离真空计继续测量。

3. 当真空度达到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa 数量级时，就可结束实验。

4. 结束实验时，首先断开电离真空计和复合真空计的总电源开关，然后断开扩散泵的加热电源，大约过 20 分钟后，关闭 K_1 使被抽容器和扩散泵保持真空，最后切断机械泵电源，并立即打开活栓 K_2 使机械泵的内部与外界大气相通，同时关闭扩散泵的冷却水。

(三) 真空蒸发镀膜

1. 按照内容 (一)、(二) 的方法获得高真空，抽真空的时候同时进行以下步骤：

(1) 基片清洗

对玻璃基片，可用水洗灰尘，再用 10% NaOH 液煮沸数分钟，然后用纯水及超声波清洗，最后用酒精乙醚棉球轻拭。对金属基片可先用水洗，再用酸或碱洗，然后用纯水洗。也可先用水洗，再用超声波清洗干净，取出用高纯氮吹干备用（或在 100℃ 烘箱中烘半小时）。对于洗净的基片，一定要用金属镊子夹着，切不可用手去拿或摸。

(2) 清洗蒸镀材料

将要蒸镀的金属材料投入 10% NaOH 溶液中煮沸约一分钟，可见到发生剧烈反应，材料表面氧化层脱落，接着倒掉 NaOH 溶液，用去离子水冲洗两遍，然后用镊子取出，置于无水乙醇中暂存。

2. 蒸镀

将洗净的基片和要蒸镀的金属材料放在指定位置、盖好钟罩、抽真空。具体操作步骤见实验室说明书。如果蒸镀介质膜或多层膜，可按同样方法一层一层地蒸镀。

3. 膜厚测量

应用光学干涉法测量薄膜厚度时，先用刻蚀法制作薄膜台阶，然后用干涉显微镜测量薄膜厚度。

(四) 实验注意事项

1. 如果真空装置为玻璃系统，实验时要特别注意安全，转动活栓时一定要用一只手扶住活塞，另一只手去转动活塞。

2. 实验中，如系统出现破裂或大量漏气时，应立即关闭电离计电源和，然后再依次关闭有电源。

3. 开始通冷却水时要慢慢增加，并注意冷却水是否畅通。

4. 突然停电时，要立即打开 K_2 使机械泵的内部与外界大气相通并断开各个电源开关。

5. 不能长时间使用机械泵抽气，否则会损坏泵和电机以及降低机械泵内部的密封油质量。

6. 在夏季工作时，要注意机械泵的温度，一般工作时机械泵内部的温度介于 60℃ 到

90℃之间而机械泵外部应该是以不会烫手为准，否则要采用内冷降温，以避免降低泵的抽气速率和极限真空度。

五、数据处理

测量数据按下表格式：

次 量	1	2	3	4	5	6	7	...	n
t (分)									
p (Pa)									
lgp									

由以上数据做出 $\lg p \sim t$ 图线，分析其变化规律。

六、习题

1. 使用温差电偶真空计测量时的步骤是什么？
2. 在什么条件下才可以给扩散泵加热？在什么条件下可以使用电离真空计进行测量？为什么要注意这些条件？
3. 使用电离真空计测量时的步骤是什么？
4. 突然停电、断水时应采取什么措施？
5. 为何机械泵和扩散泵用油（特别是扩散泵）的饱和蒸汽压要小？

附录

真空技术基础

一个标准大气压为 1.0133×10^5 帕。“真空”是指气压低于一个大气压的气体状态。在真空状态下，单位体积中的气体分子数大大减少，分子平均自由程增大，气体分子之间、气体分子与其它粒子之间的相互碰撞也随之减少。这些特点被应用于科研、生产的许多部门中。例如：加速器，电子器件，大规模集成电路，热核反应，空间环境模拟，真空冶炼等。在高真空中，由于材料中易挥发物的损失，表面吸附层的变化，物体表面特性也随之改变。20 世纪 70 年代以来，表面科学的研究一直十分活跃，它不仅有很强的理论性，还有重大的应用价值。随着科研、生产的发展，获得并保持真空已形成一门相应的技术——真空技术。它包括：真空的获得、真空测量、检漏、真空系统的设计等。依据真空概念，低于一个大气压的气体状态称为真空。真空度愈高，压强愈低，故用气体压强表示真空度。我国采用国际单位——帕（Pascal，简记为 Pa），以前曾长期使用另一真空度单位托（Torr）。压强换算关系见表一。

表一 压强单位换算表

	标准大气压	Torr	Pa
1 标准大气压 (atm)	1	760	$1.013\ 3 \times 10^5$
1Torr (1 毫米汞柱)	$1.315\ 8 \times 10^{-3}$	1	133.32
1Pa (1N/m ²)	$9.869\ 2 \times 10^{-6}$	$7.500\ 3 \times 10^{-3}$	1

目前真空度可达 10^{-12} 帕, 从一个标准大气压到 10^{-12} 帕, 几乎有 17 个数量级这样宽的压强范围。因此通常将真空范围划分为几个区域, 不同的真空区域必须用不同的抽气设备和测量仪器, 见表二。

表二 真空区域的划分及其特点和应用

真空区域	粗真空	低真空	高真空	超高真空
压强 (Pa)	$10^5 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-12}$
抽气系统	机械泵	机械泵	扩散泵 分子泵 吸附泵	超高真空机组 分子泵 吸附泵 低温泵
测量仪器	U 形管压差计	麦克劳压强计 电阻真空计 热偶真空计	麦克劳压强计 电离真空计 皮刺尼真空计	超高真空电离计
物理现象 分子密度 n (1/cm ³) 平均自由程 $\bar{\lambda}$ (cm) 容器线性尺度 d	能实现气体放电 $10^{19} \sim 10^{16}$ $10^{-6} \sim 10^{-3}$ $\bar{\lambda} \ll d$	能实现气体放电 $10^{16} \sim 10^{13}$ $10^{-3} \sim 5$ $\bar{\lambda} \approx d$	能实现气体放电 $10^{13} \sim 10^9$ $5 \sim 10^4$ $\bar{\lambda} > d$	能实现气体放电 $< 10^9$ $> 10^4$ $\bar{\lambda} \gg d$
主要应用举例	真空成形 真空运输 真空浓缩	真空蒸馏 干燥冷冻 真空绝热 真空焊接	真空冶金 真空镀膜 电真空器件 粒子加速器	表面物理 热核反应 等离子体物理 超导技术 宇航技术

真空镀膜实验中, 蒸发物的温度决定蒸发率的大小。一些金属的蒸发温度见表三。

表三 部分金属的蒸发温度 (蒸汽压为 10Pa)

金属	熔点 (单位:℃)	沸点 (单位:℃)	蒸发温度 (单位:℃)
碳 (C)	3 550	4 827	2 681
钨 (W)	3 410	5 660	3 309
钛 (Ti)	1 650 ~ 1 670	3 287	1 546
钼 (Mo)	2 617	4 612	2 533
铂 (Pt)	1 772	3 727 ~ 3 927	2 090
铁 (Fe)	1 535	2 750	1 447
镍 (Ni)	1 453	2 732	1 566

续表三

金属	熔点 (单位:℃)	沸点 (单位:℃)	蒸发温度 (单位:℃)
硅 (Si)	1 410	2 355	1 343
铜 (Cu)	1 083. 4	2 567	1 273
金 (Au)	1 064. 43	2 807	1 465
银 (Ag)	961. 93	2 212	1 049
铝 (Al)	660. 37	2 467	1 148
镁 (Mg)	648. 8	1 090	433 (升华)
锑 (Sb)	630. 74	1 750	678
铅 (Pb)	327. 50	1 740	718
锡 (Sn)	231. 97	2 270	1 189
铟 (In)	156. 61	2 080	952
镓 (Ga)	29. 78	2 403	1 093

实验二 弗兰克—赫兹实验

一、实验目的

1. 了解弗兰克—赫兹实验的原理和方法，测定汞的第一激发电位，验证原子能级的存在；
2. 练习使用微机控制的实验数据采集处理系统。

二、实验原理

20 世纪初，在原子光谱的研究中确立了原子能级的存在。原子光谱中的每根谱线就是原子从某个较高能级向较低能级跃迁时的辐射形成的。原子能级的存在，除了可由光谱研究证实外，还可以利用慢电子轰击稀薄气体原子的方法来证明。1914 年，即玻尔理论发表后的第二年，弗兰克（F. Franck）和赫兹（G. Hertz）采用这种方法研究了电子与原子碰撞前后电子能量改变的情况，测定了汞原子的第一激发电位，令人信服地证明了原子内部量子化能级的存在，给玻尔理论提供了除光谱研究方法以外的直接实验证据。后来他们又观测了实验中被激发的原子回到正常态时所辐射的光，测出的辐射光的频率很好地满足了玻尔假设中的频率定则。为此，他们获得了 1925 年度诺贝尔物理学奖。

通过这一实验，学习弗兰克和赫兹为揭示原子内部量子化能级所作的巧妙构想以及采用的实验方法，了解气体放电现象中低能电子与原子间相互作用的机理，电子与原子碰撞的微观过程是怎样与实验中的宏观量相联系的，并可用于研究原子内部的能量状态与能量交换的微观过程。

根据玻尔的原子模型理论，原子是由原子核和以核为中心沿各种不同轨道运动的一些电子构成的。对于不同的原子，这些轨道上的电子数分布各不相同。一定轨道上的电子具有一定的能量，能量最低的状态称为基态，能量较高的状态称为激发态，能量最低的激发态称第一激发态。当同一原子的电子从低能量的轨道跃迁到较高能量的轨道时，原子就处于受激状态。但是原子所处的能量状态并不是任意的，而是受到玻尔理论的两个基本假设的制约：

（一）定态假设

原子只能处在一些稳定状态中，其中每一状态具有一定的能量值 E_i ($i=1, 2, 3, \dots$)，这些能量值是彼此分立、不连续的，称为能级。

（二）频率定则

当原子从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态时，即从一个能级跃迁到另一个能级，就发射或吸收一定频率的电磁辐射，电磁辐射的频率 ν 由下式决定：

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (2-1)$$

式中, h 为普朗克常数, 1986 年推荐值为 $h = (6.626\,075\,5 \pm 0.000\,004\,0) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

原子状态的改变通常在两种情况下发生, 一是当原子本身吸收或放出电磁辐射时, 二是当原子与其它粒子发生碰撞而交换能量时。本实验就是利用具有一定能量的电子与氩或汞原子相碰撞而发生能量交换来实现原子状态的改变。

由玻尔理论可知, 处于基态的原子发生状态改变时, 其所需的能量不能小于该原子从基态跃迁到第一激发态时所需的能量, 这一能量称为临界能量。当电子与原子碰撞时, 如果电子能量小于临界能量, 则发生弹性碰撞; 若电子能量大于临界能量, 则发生非弹性碰撞。这时, 电子给予原子以跃迁到第一激发态时所需要的能量, 其余的能量仍由电子保留。

一般情况下原子在激发态所处的时间不会太长, 短时间后会回到基态, 并以电磁辐射的形式释放出所获得的能量。电磁辐射的频率 ν 满足下式:

$$h\nu = eU_0 \quad (2-2)$$

式中 U_0 为原子的第一激发电位。所以当电子的能量等于或大于第一激发能时, 原子就开始发光。

弗兰克-赫兹实验的原理可用图 2-1 来说明, 其核心是弗兰克-赫兹管 (简称 F-H 管), 它是一个具有双栅极结构的柱面型充汞或氩等惰性气体的四极管。灯丝 F 通电后炽热, 使旁热式阴极 K 受热而发射慢电子。第一栅极 G_1 和阴极 K 之间的电位差由电源 U_c 提供, 有一个较小正向电压, 其作用主要是消除空间电荷对阴极电子发射的影响, 即让灯丝上发射出来的电子迅速离开灯丝, 以免在灯丝周围形成负电荷密集区域, 阻碍电子的进一步发射。

扫描电源 U_a 加在第二栅极 G_2 和阴极 K 之

间, 建立一个加速电场, 使得从阴极发出的电子在 U_a 的加速下, 以动能 eU_a 穿过第二栅极 G_2 而飞向板极 P。由于阴极 K 到栅极 G_2 之间的距离比较大, 在适当的汞蒸气压下, 这些电子与气体原子可以发生多次碰撞。电源 U_R 在 G_2 与板极 P 之间形成一个减速电场。在穿越 G_2 的电子中, 只有能量大于 eU_R 的电子才能到达板极 P 而形成板极电流 I_p 。板极电流 I_p 用微电流测试仪 A 测量, 其值大小反应了从阴极到达板极的电子数。在保持 U_R 和 U_c 不变的情况下, 改变加速电压 U_a 的大小, 测出相应的板极电流 I_p , 将得到如图 2-2 所示的 $I_p \sim U_a$ 特性曲线。

当加速电压 U_a 从零开始增大时, 板极电流 I_p 也随之增大, 表示电子动能增加, 到达板极的电子数目必随之增多。这说明电子在飞行途中尽管会与管内的汞原子碰撞, 但不损失能量, 是弹性碰撞。

当 U_a 增大到汞原子的第一激发电位 U_0 时, 这时在栅极 G_2 附近的电子与汞原子发生

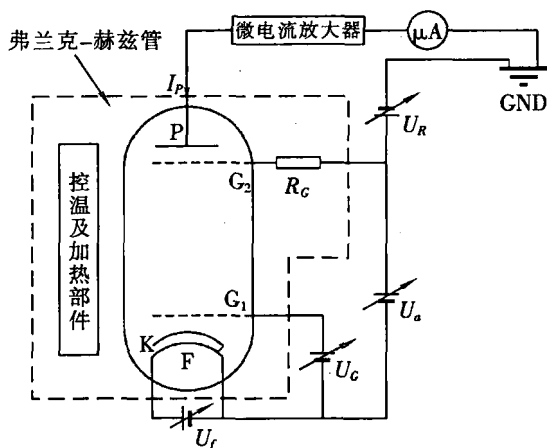


图 2-1 弗兰克-赫兹管电路原理图