

八 观测铁磁材料的磁滞回线

【实验简介】

磁性材料应用广泛，从常用的永久磁铁、变压器的铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用磁性材料。铁磁材料是最常见和最常用的磁性材料。它分为硬磁和软磁两大类，其根本区别在于矫顽力的大小不同。硬磁材料的剩磁和矫顽力大，因而磁化后，其磁感应强度可长久保持，适宜做永久磁铁。软磁材料的矫顽力小，但磁导率和饱和磁感应强度大，容易磁化和去磁，故广泛用于电机、变压器、电器和仪表制造等工业部门。磁滞回线和磁化曲线反映了铁磁材料的主要特征。本实验将对铁磁材料的动态磁滞回线和（准）静态磁滞回线进行测量。

【实验目的】

1. 掌握利用示波器测量铁磁材料动态磁滞回线的方法；
2. 掌握利用霍尔传感器测量铁磁材料（准）静态磁滞回线的方法；
3. 了解铁磁性材料的磁化特性；
4. 了解磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念，加深对饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力等物理量的理解。

【实验仪器与用具】

1、DH4516 磁特性综合测量实验仪（包括正弦波信号源，待测样品及绕组，积分电路所用的电阻和电容）。双踪示波器，直流电源，电感，数字多用表。

磁特性综合测量实验仪主要技术指标如下：

1) 样品 1：锰锌铁氧体，圆形罗兰环，磁滞损耗较小。平均磁路长度 $l=0.130\text{ m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.24\times 10^{-4}\text{ m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

2) 样品 2：EI 型硅钢片，磁滞损耗较大。平均磁路长度 $l=0.075\text{ m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.20\times 10^{-4}\text{ m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

3) 信号源的频率在 $20\sim 200\text{ Hz}$ 间可调；可调标准电阻 R_1 、 R_2 均为无感交流电阻， R_1 的调节范围为 $0.1\sim 11\ \Omega$ ； R_2 的调节范围为 $1\sim 110\text{ k}\Omega$ 。标准电容有 $0.1\ \mu\text{F}\sim 11\ \mu\text{F}$ 可选。

2、FD-BH-I 磁性材料磁滞回线和磁化曲线测定仪（包括数字式特斯拉计、恒流源、磁性材料样品、磁化线圈、双刀双掷开关、霍耳探头移动架、双叉头连接线、箱式实验平台）。

其主要技术指标如下：

- 1) 数字式特斯拉计：四位半 LED 显示，量程 2.000T；分辨率 0.1mT；带霍耳探头。
- 2) 恒流源：四位半 LED 显示，可调恒定电流 0-600.0mA。
- 3) 磁性材料样品：条状矩形结构，截面长 2.00cm；宽 2.00cm；隔隙 2.00mm；平均磁路长度 $\bar{l}=0.240\text{m}$ （样品与固定螺丝为同种材料）。
- 4) 磁化线圈总匝数 $N=2000$ 。

【实验原理】

1. 铁磁材料的磁化特性

把物体放在外磁场 H 中，物体就会被磁化。其内部产生磁场。设其内部磁化强度为 M ，磁感应强度为 B ，可以定义磁化率 χ_m 和相对磁导率 μ_r 表示物质被磁化的难易程度：

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$

其中， μ_0 是真空磁导率（ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ ）。由于 $B = \mu_0(M + H)$ ，因此 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 。物质的磁性按磁化率可以分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三种。抗磁性物质的磁化率为负值，通常在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的量级，且几乎不随温度变化；顺磁性物质的磁化率通常为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 之间，且随温度线性增大；而铁磁性物质的磁化率通常大于 1，且随温度增高而变小。铁磁性材料主要是铁、钴、镍及他们的合金和氧化物，以及稀土与过渡族元素组成的合金等。由于铁磁材料的磁导率很高，常被用作电感、电磁铁、变压器的铁芯材料，以增大线圈中的磁通量。

除了磁导率高以外，铁磁材料还具有特殊的磁化规律。对于一个处于磁中性状态（ $H = 0$ ，且 $B = 0$ ）的铁磁材料加上由小变大的磁场 H 进行磁化时，磁感应强度 B 随 H 的变化曲线称为起始磁化曲线，它大致分为三个阶段：（1）可逆磁化阶段，当 H 很小时， B 随 H 变化可逆，见图 1 中的 OA 段，若减小 H ， B 会沿 AO 返回至原点；（2）不可逆磁化阶段，见图 1 中 AS 段，若减小 H ， B 不会沿 SA 返回（比如当磁场从 D 点的 H_D 减小到 $H_D - \Delta H$ ，再从 $H_D - \Delta H$ 增大到 H_D ， $B-H$ 轨迹会是图中点线所示的回线样式）；（3）饱和磁化阶段，见图 1 中 SC 段，在 S 点材料已经被磁化至饱和状态，继续增大 H ，磁化强度 M 不再增大，由于 $B = \mu_0(M + H)$ ， B 会随 H 线形增大，但增量极小。图中 H_S 和 B_S 表示 M 刚刚达到饱和值时的 H 和 B 的值，分别称为饱和磁场强度和饱和磁感应强度。

如果将铁磁材料磁化到饱和状态（图 1 中 S 点）后再减小磁场 H ，那么磁感应强度 B 会随

H 减小而减小,但并不沿起始磁化曲线 SAO 减小,而是沿着 SP 这条更缓慢的曲线减小。当 H 减小到 0 时, B 并不为 0, H 称为矫顽力 H_C 。当反向磁场达到 $-H_S$, 铁磁材料达到反向饱和磁化状态 S' 。而若 H 从反向饱和值 $-H_S$ 变到 0, 再增大至正向饱和值 H_S 时, B 会沿曲线 $S'P'Q'S$ 返回至正向饱和值 B_S 。曲线 $S'P'Q'S$ 与 $SPQS'$ 以原点 O 成中心对称, 它们形成的闭合曲线 $SPQS'P'Q'S$ 叫做饱和磁滞回线。饱和磁滞回线反映了磁化场由 H_S 变到 $-H_S$ 再变回到 H_S 往复一周的变化过程中, B 随 H 的往复变化情况。

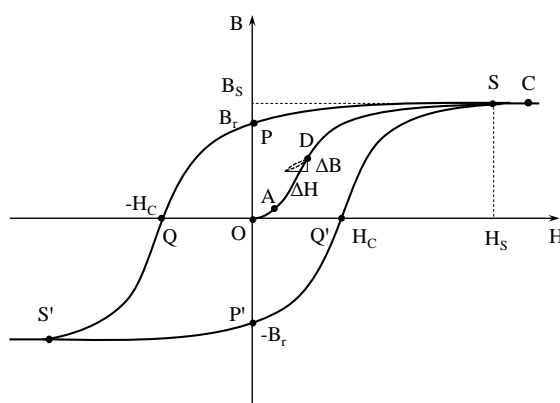


图 1 铁磁材料的起始磁化曲线和饱和磁滞回线示意图

由于铁磁材料加上磁场 H 后产生的 B 不仅与 H 有关, 也与磁化历史有关, 所以在研究铁磁材料的起始磁化性质时, 通常先对铁磁材料进行退磁处理, 使之达到磁中性状态, 一种较为简便易行的方法是交流退磁。具体做法是, 对材料加交变磁化场, 先用大幅度励磁电流使它饱和磁化, 再在不断改变磁场方向的过程中逐渐减小励磁电流幅度至 0 使它退磁。

如果磁场在任意 $[-H_m, H_m]$ 范围内作循环变化, 那么 B 也会做循环变化, 形成一个闭合的磁滞回线。磁滞回线的面积对应于循环磁化一周所发生的能量损耗。对材料进行准静态磁化时, 损耗来自于磁滞损耗。对材料进行交流动态磁化时, 除了有磁滞损耗外, 还会有涡流损耗和剩余损耗。一般由金属和合金所组成的金属磁性材料电阻率低, 在高频磁化时其涡流损耗大, 而由金属氧化物组成的铁氧体磁性材料电阻率高, 高频条件下其涡流损耗很小。

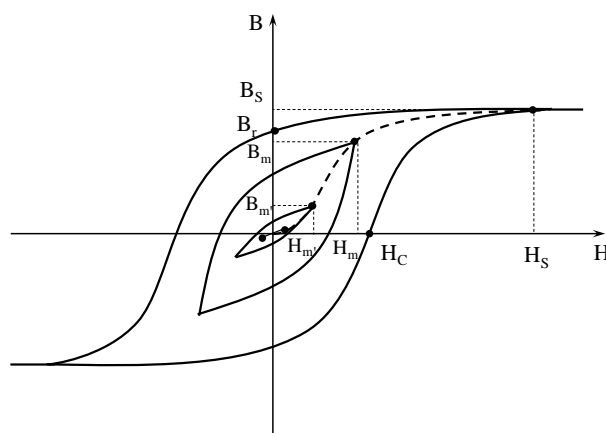


图 2 铁磁材料的动态磁滞回线和动态磁化曲线示意图

动态磁滞回线形状与磁化场频率和幅度都有关。在同一频率下，交变磁场幅度不同时，动态磁滞回线也会不同。将磁场幅值从 0 增到 H_s ，这些动态磁滞回线的顶点 (H_m, B_m) 的连线称为动态磁化曲线（见图 2）。在这条线上任意一点的 B_m 和对应 H_m 的比值 $\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$ 称为振幅磁导率。对于工作在幅度较大的交变磁场下的电感铁芯，比如变压器铁芯，振幅磁导率是衡量其性能的一个重要指标。

当交流磁化场幅度很小时，铁磁材料的磁化过程是可逆的，磁滞回线退化成一条斜线（见图 2 中原点附近的小线段）。对于没有直流偏置磁场的情况，这个过程对应于起始磁化曲线起始的可逆阶段（图 1 中的 OA 段），可以定义起始磁导率为 $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$ ，它表征了起始可逆磁化阶段的磁化性能。用于弱磁场中的材料，例如通讯器件上应用的软磁材料，其磁化性能主要由 μ_i 来表征。

有的电感铁芯工作在既有直流偏置又有交流弱磁场的情况下，比如在图 1 中的 D 点附近以弱交变磁场循环磁化，当磁场足够弱时回线会退化成一条斜线，此时，交流弱磁场引起的磁感应强度变化 ΔB 与磁场强度变化值 ΔH （ ΔH 趋于 0）之比决定了电感性能，相关的磁导率称为可逆磁导率，定义为 $\mu_R = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}$ 。直流偏置磁场可以影响 μ_R 的大小，这一原理被应用在磁放大器的设计中。

2. 动态磁滞回线的测量

测量动态磁滞回线的原理电路如图 3 所示。

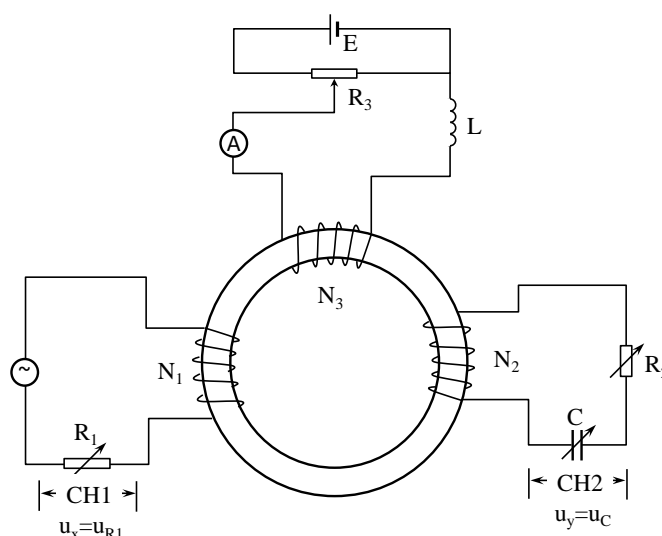


图 3 用示波器测量动态磁滞回线电路图

环形铁芯上绕有三组线圈，线圈 1 为交流励磁线圈，线圈 2 为感应线圈，线圈 3 为直流励磁线圈。线圈 1 接交流正弦信号源，根据安培环路定理，磁场强度正比于线圈中的电流，因此也正比于电阻 R_1 上的电压 u_{R_1} 。线圈 2 接 RC 积分电路，磁感应强度正比于线圈 2 上感应电压 u_2 的时间积分，因此也正比于积分电容 C 上的电压 u_C 。将 u_{R_1} 和 u_C 从示波器两通道输入，在示波器 X-Y 显示模式下，就可以看到动态磁滞回线。测有直流偏置磁场下的可逆磁导率时，需要将线圈 3 接直流电源，用电表测量电流计算磁场强度，要能有效调节励磁电流；为了减小交流磁场在线圈 3 中产生的感应信号对直流稳定性的影响，需要在回路中串入一只大电感 L 。

交流磁场强度 H 的测量原理。由安培环路定理，磁场强度 H 正比于励磁电流 i_1 ：

$$H = \frac{N_1}{l} i_1$$

其中 N_1 是线圈 1 的匝数， l 是磁环的等效磁路长度。由于 $i_1 = u_{R_1} / R_1$ ，因此 H 也与 u_{R_1} 成正比

$$H = \frac{N_1}{l R_1} u_{R_1} \quad (1)$$

交流磁感应强度 B 的测量原理。由法拉第电磁感应定律，线圈 2 上的感应电压 u_2 来源于线圈 2 中的全磁通的变化

$$u_2 = - \frac{N_2 d\Phi}{dt} = - \frac{N_2 S dB}{dt}$$

其中 N_2 是线圈 2 的匝数， Φ 是单匝线圈中的磁通量， S 是单匝线圈环绕的面积（对绕在磁芯上的线圈相当于磁芯的横截面积）。如果 $R_2 C \gg T$ （ T 是外磁场周期），那么电容 C 上的电压远小于总电压 u_2 ，电阻 R_2 上的电压 u_{R_2} 近似等于总电压 u_2 ，电容 C 上的电压为：

$$u_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C R_2} \int u_{R_2} dt \approx \frac{1}{C R_2} \int u_2 dt$$

其中 Q 是电容器极板上的电荷量， i_2 是线圈 2 中的电流。交流磁感应强度 B 正比于 u_C

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_C \quad (2)$$

3 （准）静态磁化曲线和磁滞回线的测量

如果对绕上磁化线圈的铁磁材料样品施加直流激励，便会在样品中产生稳定的磁场。当直流激励的大小发生变化， H 与 B 也随之改变，形成磁化曲线和磁滞回线。如果在样品的磁路中开一极窄均匀气隙，在对磁化线圈中的磁化电流最大值 I_m 磁锻炼的基础上，对应每个磁化电流 I_k 值，用数字式特斯拉计，测量气隙均匀磁场区中间部位的磁感应强度 B ，便能得到该磁性

材料的磁滞回线。如图 4 左图中的 $ARA'R'A$ ，组成的曲线为磁滞回线， OA 曲线为材料的初始磁化曲线。对于一定大小的回线，磁化电流最大值设为 I_m ，对于每个不同的 I_k 值，使样品反复的磁化，可以得到一族磁滞回线，如图 4 右图所示。把每个磁滞回线的顶点以及坐标原点 O 连接起来，得到的曲线称基本磁化曲线。

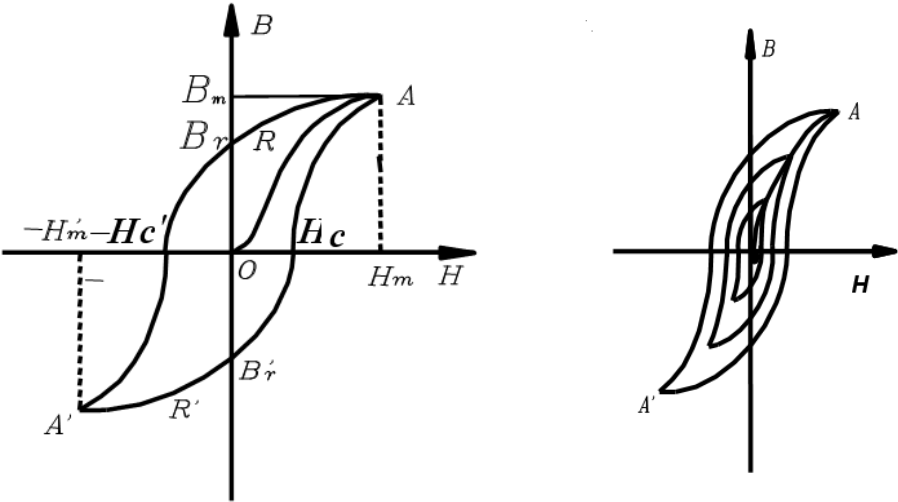


图 4 （左）磁化曲线和磁滞回线，（右）基本磁化曲线。

用霍尔传感器测量（准）静态磁滞回线的原理电路如图 5 所示。条状矩形结构待测材料的磁化线圈与直流稳流电源相连，利用电流表可以读出磁化电流的大小，在材料的缝隙中插入霍尔传感器，并与数字式特斯拉仪连接，从数字式特斯拉仪可以获得测试点 B 的大小，换向开关可以改变材料中电流的方向，从而改变 H 的方向。

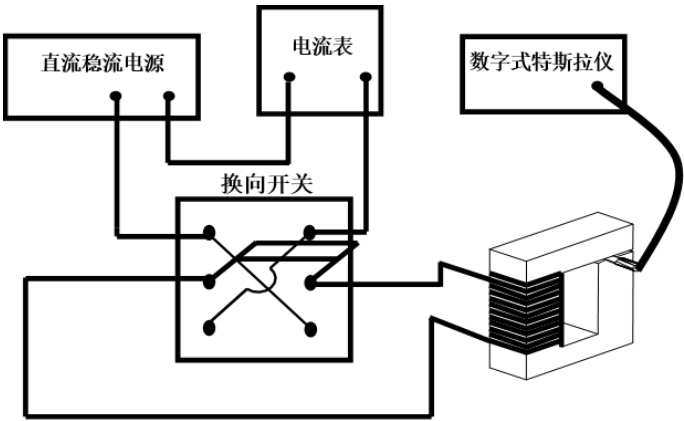


图 5 磁滞回线和磁化曲线测量装置

测量初始磁化曲线或基本磁化曲线都必须由原始状态 $H = 0$ ， $B = 0$ 开始，因此测量前必须对待测量样品进行退磁，以消除剩磁。为了得到一个对称而稳定的磁滞回线，必须对样品进行反复磁化，即“磁锻炼”。这可以采取保持最大磁化电流大小不变，利用电路中的换向开关使电流方向不断改变。在环形样品的磁化线圈中通过的电流为 I ，则磁化场的磁场强度 H 为

$$H = \frac{N}{\bar{l}} I \quad (3)$$

N 为磁化线圈的匝数， \bar{l} 为样品平均磁路长度， H 的单位为 A/m

为了从间隙中间部位测得样品的磁感应强度 B 值，根据一般经验，截面方形样品的长和宽的线度应大于或等于间隙宽度 8—10 倍，且铁芯的平均磁路长度 \bar{l} 远大于间隙宽度 ℓ_g ，这样才能保证间隙中有一个较大区域的磁场是均匀的，测到的磁感应强度 B 的值，才能真正代表样品中磁场在中间部位实际值。

在实际测量中，由于缝隙的存在，往往需要对 (3) 式计算出的 H 进行修正。若铁芯磁路中有一个小平行间隙 ℓ_g ，铁芯中平均磁路长度为 \bar{l} ，而铁芯线圈匝数为 N ，通过电流为 I ，那么由安培回路定律：

$$H\bar{l} + H_g \ell_g = NI \quad (4)$$

(4) 式中， H_g 为间隙中的磁场强度。一般来说，铁芯中的磁感应强度不同于缝隙中的磁感应强度。但是在缝很窄的情况下，即正方形铁芯截面的长和宽 $\gg \ell_g$ ，且铁芯中平均磁路长度 $\bar{l} \gg \ell_g$ 情况，此时

$$B_g \cdot S_g = BS \quad (5)$$

(5) 式中 S_g 是缝隙中磁路截面， S 为铁芯中磁路截面，在上述条件下， $S_g \approx S$ ，所以 $B = B_g$ 。即霍尔传感器在间隙中间部位测出的磁感应强度 B_g ，就是铁芯中间部位磁感应强度 B 。又在缝隙中

$$B_g = \mu_0 \mu_r H_g \quad (6)$$

(6) 式中， μ_0 为真空磁导率， μ_r 为相对磁导率，在间隙中， $\mu_r = 1$ 。所以 $H_g = B / \mu_0$ ，这样，铁芯中磁场强度 H 与铁芯中磁感应强度 B 及线圈安培匝数 NI 满足：

$$H\bar{l} + \frac{1}{\mu_0} B \ell_g = NI \quad (7)$$

在实际科研测量时，应使待测样品满足 $H\bar{l} \gg \frac{1}{\mu_0} B \ell_g$ 条件，即线圈的安培匝数 NI 保持不变时，平均磁路总长度 \bar{l} 须足够大，间隙 ℓ_g 尽可能小，这样， $H \bar{l} \approx NI$ 。如果 $\frac{1}{\mu_0} B \ell_g$ 对

H \bar{I} 不可忽略时, 可利用(7)式对磁化曲线中的 H 值进行修正, 得出 H 值准确的结果。

【实验内容】

第一部分 用示波器观测动态磁滞回线

1. 观测样品 1 (铁氧体) 的饱和动态磁滞回线

(1) 测量频率 $f=100\text{ Hz}$ 时的饱和磁滞回线。取 $R_1=2.0\ \Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。示波器选择 X-Y 模式。调节励磁电流大小及示波器的垂直、水平位移旋钮, 在示波器显示屏上调出一个相对于坐标原点对称的饱和磁滞回线。测量并画出饱和磁滞回线的 $B-H$ 图。上半支各选取 9 个以上的测量点。测量 B_s , B_r , H_c 。可通过示波器光标 (cursor) 来读数。

(2) 保持信号源幅度不变, 在仪器频率可调范围内, 观测不同频率时的饱和磁滞回线。用不同频率时, 磁滞回线有何变化? 为什么? 保持 R_1 , R_2C 不变, 测量并比较 $f=95\text{ Hz}$ 和 150 Hz 时的 B_r 和 H_c 。

(3) 在频率 $f=50\text{ Hz}$ 下, 比较不同积分常量取值对李萨如图的影响。固定励磁电流幅度 $I_m=0.1\text{ A}$, $R_1=2.0\ \Omega$, 改变积分常量 R_2C 。调节 R_2C 分别为 0.01 s 、 0.05 s 、 0.5 s , 观察并粗略画出不同积分常量下 $u_{R_1}-u_C$ 李萨如图形的示意图。请思考为什么积分常量会影响 $u_{R_1}-u_C$ 李萨如图形的形状? 积分常量是否会影响真实的 $B-H$ 磁滞回线的形状?

2. 测量样品 1 (铁氧体) 的动态磁滞回线。(测量前需要对样品进行退磁。)

(1) 在 $f=100\text{ Hz}$ 时, 调出不同幅度的动态磁滞回线, 测量并画出动态磁化曲线。取 $R_1=2.0\ \Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。磁场幅度 H_m 从 0 到 H_s 单调增加, 要求至少 20 个测量点。

(2) 根据测量数据计算并画出 μ_m-H_m 曲线。

(3) 测定起始磁导率 μ_i 。

3. 观察不同频率下样品 2 (硅钢) 的动态磁滞回线。

取 $R_1=2.0\ \Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。在给定交变磁场幅度 $H_m=400\text{ A/m}$ 下, 测量 $f=20\text{ Hz}$, 40 Hz , 60 Hz 的 B_m , B_r , H_c 。

***4. 测量样品 1（铁氧体）在不同直流偏置磁场 H 下的可逆磁导率。**（测量前需要先对样品进行退磁。）

交流磁场频率取 $f=100\text{ Hz}$ 。电路参数设置为： $R_1=2.0\ \Omega$ ， $R_2=20\text{ k}\Omega$ ， $C=2.0\ \mu\text{F}$ 。直流偏置磁场必须从 0 到 H_g 单调增加。测量时，为保证精度，需调交流信号源幅度使交流磁场 ΔH 足够小，并调节示波器，使李萨如图充分放大，以观测磁化是否可逆。画出 μ_r-H 曲线（至少 10 个点）。

第二部分 用霍尔传感器测量铁磁材料（准）静态磁滞回线

1. 测量模具钢样品的起始磁化曲线

1) 选择合适的电流与磁感应强度 B ，用数字式特斯拉计测量样品间隙中剩磁的磁感应强度 B 与位置 X 的关系， X 从 -10mm 到 10mm，间隔 1mm 测一组数据，求得间隙中磁感应强度 B 的均匀区范围 ΔX 值，将霍尔传感器放在测出的均匀区的中央。

2) 对样品进行退磁处理。其方法是利用双刀开关使磁化电流不断反向，且幅值由最大值逐渐减小至零，最终使样品的剩磁 B 为零。例如将电流值由 0 增至 600mA 再逐渐减小至 0，然后双刀开关换为反向电流由 0 增至 500mA，再由 500mA 调至零，这样磁化电流不断反向，最大电流值每次减小 100mA，当剩磁减小到 100mT，每次最大电流减小量还需小些，最后将剩磁消除。然后测量 $B-H$ 关系曲线。至少获取 20 个采样点的实验数值。

2. 测量模具钢的磁滞回线

1) 测量模具钢的磁滞回线前的磁锻炼。由初始磁化曲线可以得到 B 增加得十分缓慢时，磁化线圈通过的电流值 I_m ，然后保持此电流 I_m 不变，把双刀换向开关来回拨动 8-10 次，进行磁锻炼。（开关拉动时，应使触点从接触到断开的时间长些，这是为什么？磁锻炼的作用是什么？）

2) 测量模具钢的磁滞回线。通过磁化线圈的电流从饱和电流 I_m 开始逐步减小到 0，然后双刀换向开关将电流换向，电流又从 0 增加到 $-I_m$ ，重复上述过程，即 $(H_m, B_m) \rightarrow (-H_m, -B_m)$ ，再从 $(-H_m, -B_m) \rightarrow (H_m, B_m)$ 。每隔 50mA 测一组 (I_i, B_i) 值。

3. 数据处理及绘图

由公式(3)求出 H_i 值。测量模具钢的样品平均磁路长度 $\bar{\ell}$ 和间隙宽度 ℓ_g ，用公式(7)对 H_i 进行修正。用作图纸作模具钢材料的起始磁化曲线和磁滞回线，记录模具钢的饱和磁感应强度

B_m 、饱和磁场强度 H_m 和矫顽力 H_c 。

附：样品结构示意图。

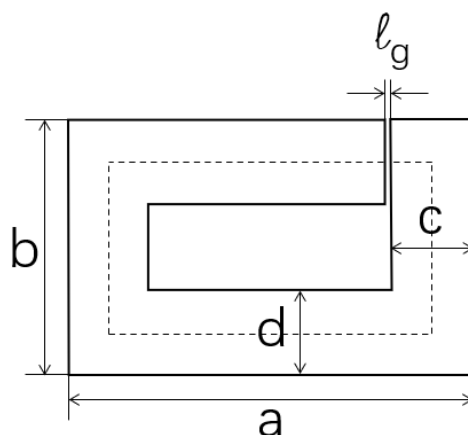


图 6：待测样品结构示意图

$a=10.00\text{cm}$; $b=6.00\text{cm}$; $c=d=2.00\text{cm}$; \bar{l} 为样品平均长度（即样品中央轴线长度，如图中虚线所示）； l_g 为平行间隙长度, $l_g=0.20\text{ cm}$ 。

【思考题】

1. 铁磁材料的动态磁滞回线与（准）静态磁滞回线在概念上有什么区别？铁磁材料动态磁滞回线的形状和面积受那些因素影响？
2. 什么叫做基本磁化曲线？它和起始磁化曲线间有何区别？
3. 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？
4. 动态磁滞回线测量实验中，电路参量应怎样设置才能保证 $u_{R_1} - u_C$ 所形成的李萨如图形正确反映材料动态磁滞回线的形状？
5. 准静态磁滞回线测量实验中，为什么要对样品进行磁锻炼才能获得稳定的饱和磁滞回线？

【参考文献】

- [1] 吕斯骅，段家祗，张朝晖。新编基础物理实验（第二版），北京：高等教育出版社，2013。
- [2] FD-BH-I 磁性材料磁滞回线和磁化曲线测定仪使用说明。

九 微波布拉格衍射

【目的要求】

1. 了解与学习微波产生的基本原理以及传播和接收等基本特性。
2. 观测微波衍射、干涉等实验现象。
3. 观测模拟晶体的微波布拉格衍射现象。
4. 通过迈克耳逊实验测量微波波长。

【实验简介】

微波波长从 1m 到 0.1mm，其频率范围从 300MHz~3000GHz，是无线电波中波长最短的电磁波。微波波长介于一般无线电波与光波之间，因此微波有似光性，它不仅具有无线电波的性质，还具有光波的性质，即具有光的直线传播、反射、折射、衍射、干涉等现象。微波的波长比普通的电磁波要短得多，因此，其反射、辐射、传播与接收器件都有自己的特殊性。它的波长又比 X 射线和光波长得多，如果用微波来仿真“晶格”衍射，发生明显衍射效应的“晶格”可以放大到宏观的尺度。

微波通常由能够使电子产生高频集体振荡的器件（如调速管或固态微波信号发生器等）产生。微波的检测可用检波二极管将微波信号转变为直流信号并直接由电表指示。由于微波的波长与测量、传输设备的线度有相同的数量级，传统的电阻、电容、电感等元件由于辐射效应和趋肤效应都不再适用，必须用专门设计的微波元件如波导管、波导元件、谐振腔等来代替。这些专门设计的波导器件用来传输和存储特定波长范围和偏振特性一定的微波。

本实验的重点是观察微波照射到人工制作的晶体模型时的衍射，用来模拟 X 射线在真实晶体上的衍射现象，并验证布拉格衍射公式。为了加深对微波干涉、衍射和偏振等现象的了解，我们还安排了如下的选做实验：微波的单缝衍射、双缝干涉和迈克尔孙干涉三个实验。

【实验仪器与用具】

DHMS-1 型微波光学综合实验仪一套（图 1），包括：X 波段微波信号源、微波发生器、发射喇叭、接收喇叭、微波检波器、检波信号数字显示器、可旋转载物平台和支架，以及实验用附件（反射板、分束板、单缝板、双缝板、晶体模型、读数机构等）。



图 1 微波光学综合实验仪

- | | | | | |
|-------------|---------------|--------------|-----------|------------|
| 1. X 波段信号源 | 2. 固定臂 | 3. 长支柱 | 4. 紧固蝶形螺丝 | 5. 信号源传输电缆 |
| 6. 频率调节旋钮 | 7. 功率调节旋钮 | 8. 发射器喇叭 | 9. 指针 | |
| 10. 载物圆台 | 11. 圆形支架 | 12. 短支柱 | 13. 接收器喇叭 | |
| 14. 接收旋转部件 | 15. 接收器信号输出插座 | 16. 检流计调零电位器 | | |
| 17. 检流计电源开关 | 18. 检流计信号输入插座 | 19. 转动臂 | 20. 紧固螺杆 | |
| 21. 移动装置 | 22. 圆形底盘 | 23. 水平调节机脚 | 24. 模拟晶格 | |
| 25. 玻璃板 | 26. 反射板 | 27. 单缝板 | 28. 双缝板 | |

【实验原理】

1. 微波的产生和接收

本实验使用的微波发生器是采用电调制方法实现的，优点是应用灵活，参数调配方便，适用于多种微波实验，其工作原理框图见图 2。微波发生器内部有一个电压可调控制的 VCO，用于产生一个 4.4GHz-5.2GHz 的信号，它的输出频率可以随输入电压的不同作相应改变，经过滤波器后取二次谐波 8.8GHz-9.8GHz，经过衰减器作适当的衰减后，再放大，经过隔离器后，通过探

针输出至波导口，再通过 E 面天线发射出去。

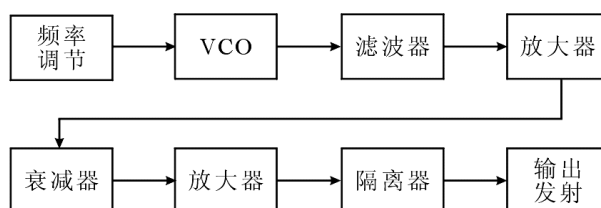


图 1 微波产生的原理框图

接收部分采用检波/数显一体化设计。由 E 面喇叭天线接收微波信号，传给高灵敏度的检波管后转化为电信号，通过穿心电容送出检波电压，再通过 A/D 转换，由液晶显示器显示微波相对强度。

2. 微波布拉格衍射实验

1. 晶体结构

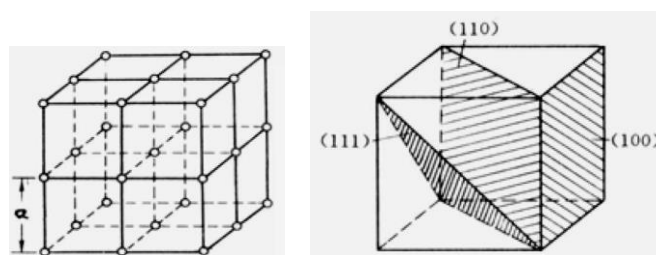


图 3 (a) 立方晶格模型，(b) 晶面指数。

组成晶体的原子或分子按一定规律在空间周期性排列。其中最简单的结构，是组成晶体的原子在直角坐标中沿 x 、 y 、 z 三个方向，按固定的距离 a 在空间依序重复排列，形成简单的立方点阵，如图 3 所示，原子间距 a 称为晶格常数。组成晶体的原子可以看成分别作处在一系列相互平行而且间距一定的平面族上，这些平面称为晶面。当然，晶面有许多不同的取法，其中最重要也是最常用的有三种，如图 3 (b) 所示，这些晶面分别称为 (100) 面、(110) 面、(111) 面，圆括号中的三个数字称为晶面指数。其中 (100) 面的法线方向指向坐标轴方向，相邻两个 (100) 面的间距等于晶格常数 a ；(110) 面的法线方向沿坐标平面中正方形的对角线方向，相邻两个 (110) 面的间距为 $a/\sqrt{2}$ ；(111) 面的法线沿正立方体的体对角线方向，相邻两个 (111) 面的间距为 $a/\sqrt{3}$ 。当然，还有许许多多更复杂的取法形成其他取向的晶面族。一般而言，晶面指数为 (n_1, n_2, n_3) 的晶面族，其相邻的两个晶面间距 $d = a / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$ 。

2. 布拉格衍射

如同光波入射到二维的平面光栅要受到光栅的衍射，电磁波入射到晶体也要受到晶体的

衍射。二维光栅对光的衍射实质上是平面上各个小孔的衍射波相干叠加的结果。如今，取代平面上小孔的是三维空间中原子组成的格点，可看作是一个三维的光栅网络。晶体对电子波衍射的实质是每个格点上的原子产生的散射波的相干叠加。它们的相干叠加的第一步可看作是同一晶面上各个原子发出的散射波的相干叠加，形成每一个晶面的衍射波；第二步是同一晶面族的不同晶面的衍射波之间的相干叠加。

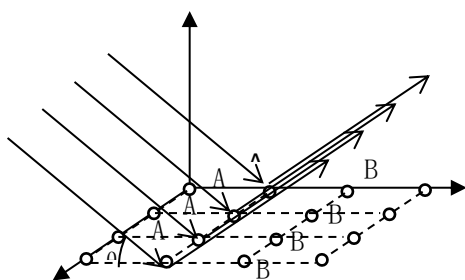


图 4 同一个晶面的散射波示意图。

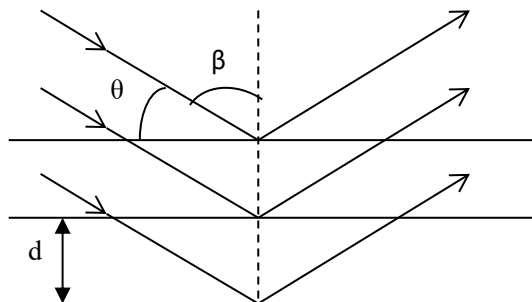


图 5 不同晶面的散射波示意图。

处在同一平面上的和原子组成一个晶面，它们的散射波相干叠加的结果遵从反射定律，反射角等于入射角，如图 4 所示；而从间隔为 d 的相邻两个晶面反射的两束波的程差为 $2d\sin\theta$ ， θ 为入射角与晶面的夹角，如图 5 所示。显然只有满足

$$2d \sin \theta = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

时，才能形成干涉极大。方程 (1) 称为晶体衍射的布拉格条件，如果改成通常习惯使用的入射角 β 表示，布拉格条件可写为：

$$2d \cos \beta = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

布拉格条件给出观察到衍射极大的入射角与衍射角方向，如果布拉格条件得到满足，每一个晶面族在特定方向产生一个衍射极大，从实验上测得衍射极大的方向角 β ，并且知道波长 λ ，从布拉格条件可求出晶面间距 d ，通过进一步分析可以确定晶格常数 a 。反之，若已知晶格常数 a ，可求出波长 λ 。

实际晶体的晶格常数为 10^{-10}m 数量级，为了观察到晶体对电磁波的衍射，晶格常数与电磁波的波长必须是同一数量级，这正是 X 射线的波长范围，因此通常用 X 射线在晶体上的衍射来研究晶体的结构。由于 X 射线衍射仪价格昂贵，实际晶体衍射结果的分析处理也比较复杂，因此本实验用比较简单而且直观的晶体模型代替看不见的实际晶体的复杂结构，用比较便宜而且直观的晶体模型代替看不见的实际晶体的复杂结构，用比较便宜的微波分光仪代替昂贵的 X 射线衍射仪模拟晶体对 X 射线的衍射，学习 X 射线衍射的原理和方法。

由于不同晶面族的曲线不同，晶面间隔也不相同，因此当入射波的方向及波长固定、晶体的取向也固定时，不同取向的晶面不能同时满足布拉格条件，甚至没有一族晶面能够满足布拉格条件。为了观察到尽可能多的衍射极大，得到尽可能多的关于晶体结构的信息，在研究晶体结构的实际工作中，采用不同的办法：转动晶体，采用多晶或粉末样品（二者都包含大量取向不同的微小晶体）代替单晶、采用包含波长连续变化的 X 射线代替波长单一的 X 射线。在本模拟实验中，使用入射方向固定、波长单一的微波及单晶模型，从而采用转动晶体模型和接收喇叭的方向，类似布拉格父子当初（1913 年）采用的方法。

因微波的波长可在几厘米，所以可用一些铝制的小球模拟微观原子，制作晶体模型。具体方法是将金属小球用细线串联在空间有规律地排列，形成如同晶体的简单立方点阵。各小球间距 d 设置为 4cm（与微波波长同数量级）左右。此时就可以用微波与晶体模型进行布拉格衍射的实验，验证公式（1）和（2）。

3. 微波的单缝衍射实验

当一平面微波入射到一宽度和微波波长可比拟的一狭缝时，在缝后就要发生如光波一般的衍射现象。同样中央零级最强，也最宽，在中央的两侧衍射波强度将迅速减小，如图 6 和图 7 所示。

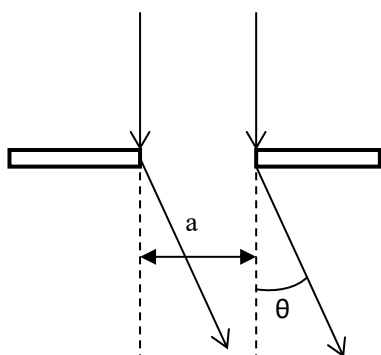


图 6 单缝衍射示意图

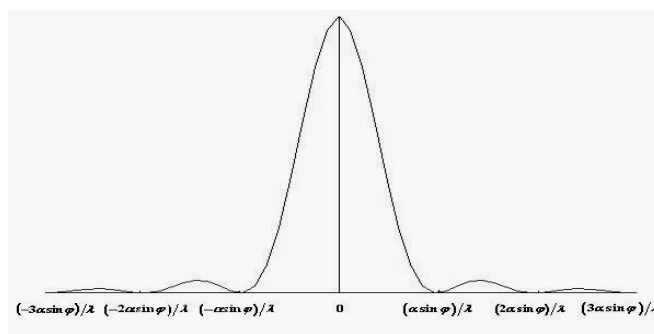


图 7 单缝衍射强度分布

根据光的单缝衍射公式推导可知，如为一维衍射，微波单缝衍射图样的强度分布规律也为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \mu}{\mu^2} \quad \mu = \frac{\pi \alpha \sin \varphi}{\lambda} \quad (3)$$

式中 I_0 是中央主极大中心的微波强度， α 为单缝的宽度， λ 是微波的波长， φ 为衍射角，

$\sin \mu^2 / \mu^2$ 常叫做单缝衍射因子，表征衍射场内任一点微波相对强度的大小。一般可通过测量衍射屏上从中央向两边微波强度变化来验证公式（3）。同时与光的单缝衍射一样，当

$$\alpha \sin \varphi = \pm \kappa \lambda \quad \kappa = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4)$$

时，相应的 φ 角位置衍射强度为零。如测出衍射强度分布如图 7 则可依据第一级衍射最小值所对应的 φ 角度，利用公式 (4)，求出微波波长 λ 。

4. 微波的双缝干涉实验

当一平面波垂直入射到一金属板的两条狭缝上，狭缝就成为次级波波源。由两缝发出的次级波是相干波，因此在金属板的背后面空间中，将产生干涉现象。当然，波通过每个缝都有衍射现象。因此实验将是衍射和干涉两者结合的结果。为了只研究主要来自两缝中央衍射波相互干涉的结果，令双缝的缝宽 α 接近 λ ，例如： $\lambda = 3.2\text{cm}$ 。 $\alpha = 4\text{cm}$ 。当两缝之间的间隔 b 较大时，干涉强度受单缝衍射的影响小，当 b 较小时，干涉强度受单缝衍射影响大。干涉加强的角度为：

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{k \cdot \lambda}{\alpha + b} \right) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

干涉减弱的角度为：

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{\alpha + b} \right) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

5. 微波的迈克尔逊干涉实验

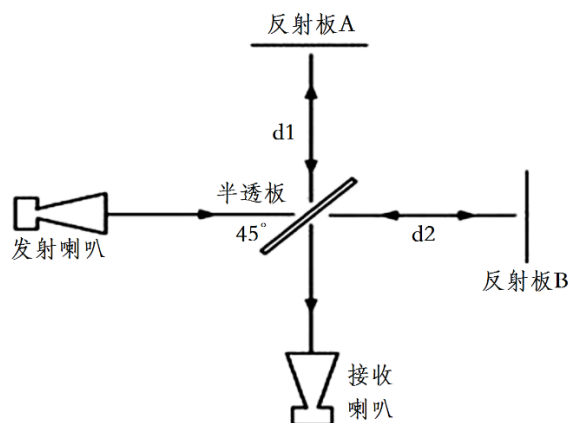


图 8 迈克尔逊干涉原理示意图

在微波前进的方向上放置一个与波传播方向成 45° 角的半透射半反射的分束板 (如图 8)。将入射波分成一束向金属板 A 传播，另一束向金属板 B 传播。由于 A、B 金属板的全反射作用，两列波再回到半透射半反射的分束板，回合后到达微波接收器处。这两束微波同频率，在接收器处将发生干涉，干涉叠加的强度由两束波的程差 (即位相差) 决定。当两波的相位差为

$2k\pi, (k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$ 时, 干涉加强; 当两波的相位差为 $(2k+1)\pi$ 时, 则干涉最弱。当 A、B 板中的一块板固定, 另一块板可沿着微波传播方向前后移动, 当微波接收信号从极小 (或极大) 值到又一次极小 (或极大) 值, 则反射板移动了 $\lambda/2$ 距离。由这个距离就可求得微波波长。

【可在“磁致伸缩效应实验”中观看光学迈克尔逊干涉仪结构】

6. 微波的偏振实验

电磁波是横波, 它的电场强度矢量 E 和波的传播方向垂直。如果 E 始终在垂直于传播方向的平面内某一确定方向变化, 这样的横电磁波叫线极化波, 在光学中也叫偏振光。如一线极化电磁波以能量强度 I_0 发射, 而由于接收器的方向性较强 (只能吸收某一方向的线极化电磁波, 相当于一光学偏振片, 如图 9。发射的微波电场强度矢量 E 如在 P_1 方向, 经接收方向为 P_2 的接收器后 (发射器与接收器类似起偏器和检偏器), 其强度 $I = I_0 \cos^2 \alpha$, 其中 α 为 P_1 和 P_2 的夹角。这就是光学中的马吕斯 (Malus) 定律, 在微波测量中同样适用。

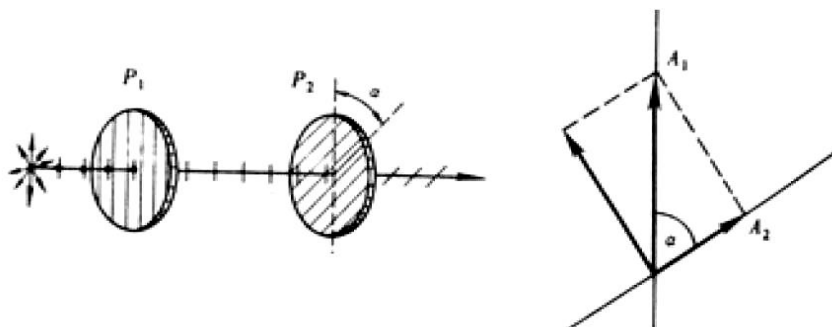


图 9 光学中的马吕斯定律

【实验内容】

1. 测量微波的双缝干涉, 计算微波的波长, 并与频谱分析仪测量的波长结果相比较;
2. 观察布拉格衍射, 测量晶面 (100) 面和 (110) 面的布拉格衍射。利用测量得到的布拉格角度和晶格常数, 估算相应的微波波长, 并与频谱分析仪测量的波长结果相比较;
3. 迈克尔逊干涉实验, 观察干涉现象, 计算微波的波长, 并与频谱分析仪测量的波长结果相比较。

实验准备: 将实验仪器放置在水平桌面上, 调整底座四只脚使底盘保持水平。调节保持发射喇叭、接收喇叭、接收臂、活动臂为直线对直状态, 并且调节发射喇叭, 接收喇叭的高度相同。连接好 X 波段微波信号源、微波发生器间的专用导线, 将微波发生器的功率调节旋钮逆时针调到底, 即微波功率调至最小, 通电并预热 10 分钟。

具体的实验内容如下:

1. 微波的单缝衍射

仪器连接时，按需要先调整单缝衍射板的缝宽，转动载物台，使其上的 180° 刻线与发射臂的指针一致，然后把单缝衍射板放到载物台，并使狭缝所在平面与入射方向垂直，利用弹簧压片把单缝的底座固定在载物台上。

转动接收臂使其指针指向载物台的 0° 刻线，打开振荡器的电源，并调节衰减器，使接收电表的指示在 $100\text{--}150\text{mV}$ 之间。然后转动接收臂，每隔 2° 记下一次接收信号的大小。为了准确测量波长，要仔细寻找衍射极小的位置。当接收臂已转到衍射极小附近时，可把衰减器转到零的位置，以增大发射信号提高测量的灵敏度。

根据记录数据，画出单缝衍射强度与衍射角度的关系曲线。并根据微波衍射强度一级极小角度和缝宽 α ，计算微波波长 λ 和其百分误差（表中 $U_{\text{左}}$ 、 $U_{\text{右}}$ 是相对于 0 刻度两边对应角度的电压值）。

数据记录：

φ ($^\circ$)	0	3	6	9	12	15
$U_{\text{左}}$ (mV)							
$U_{\text{右}}$ (mV)							

2. 微波的双缝干涉

按需要调整双缝干涉板的缝宽。将双缝干涉板安置在支座上时，应使双缝板平面与载物圆台上 90° 指示线一致。转动小平台使固定臂的指针在小平台的 180° 处。此时相当于微波从双缝干涉板法线方向入射。这时让活动臂置小平台 0° 处，调整信号使液晶显示器显示较大，然后在 0° 线的两侧，每改变 2 度读取一次液晶显示器的读数，并记录下来，然后就可以画出双缝干涉强度与角度的关系曲线。在曲线对应的一级极大、零级极小、一级极小处开展间隔 1° 的精细扫描，并根据微波衍射强度一级极大、零级极小、一级极小的角度和缝宽 α ，计算微波波长 λ 和其百分误差。

数据记录：

φ ($^\circ$)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	...	80
U(mv)	左侧										
	右侧										

3. 布拉格衍射

实验时将支架从载物台上取下，模拟铝球要调节，使上下应成为一方形点阵，各金属球点阵间距相同（ 4mm ）。由已知的晶格常数 a 和微波波长 λ ，并根据公式可以算出（100）面和（110）面衍射极大的入射角 β ，测量估算值附近且满足入射角等于反射角条件 β 与衍射强度 I 的关系曲

线，写出衍射极大的入射角与理论结果进行比较、分析与讨论。由布拉格衍射测量结果和晶格常数 a ，计算微波波长 λ ，并与已知微波波长比较与讨论。

下面以 (100) 面时的实验为例，详细说明实验步骤如下：将模拟晶体架插在载物平台上的四颗螺柱上，这样便使所研究的晶面 (100) 法线正对小平台上的 0° 线，固定臂指针对准一侧的 0° 线，接收臂指针对准另一侧 180° 线。顺时针转动载物台一定刻度（如 30° ），此时固定臂指针指向负方向 30° ，即入射角为负方向 30° ，同时把接收臂顺时针转动到正方向 30° ，这样便满足入射角和发射角相等且关于晶面法向量对称，都为 30° 。实验时每隔 2° 记录一次，在估计发生衍射极大处可适当增加测试点。为了避免两喇叭之间波的直接入射，入射角 β 取值范围最好在 30° 到 80° 之间，寻找一级衍射最大。

数据记录：

入射角 ($^\circ$)	30	33	36	39	42	45	48	80
反射角									
U(mV)									

4. 迈克尔逊干涉实验

在微波前进的方向上放置一玻璃板，使玻璃板面与载物圆台 45° 线在统一面上，固定臂指针指向 90° 刻度线，接收臂指针指向 0° 刻度线（如图 3）。按实验要求如图安置固定反射板、可移动反射板、接收喇叭。使固定反射板固定在大平台上，并使其法线与接收喇叭的轴线一致。可移动反射板装在一旋转读数机构上后，然后移动旋转读数机构上的手柄，使可移反射板移动，测出 $n+1$ 个微波极小值。并同时从读数机构上读出可移反射板的移动距离 L （注意：旋转手柄要慢，并注意回程差的影响）。波长满足： $\lambda = 2L/n$

数据记录：

最小点读数 (mm)							
---------------	--	--	--	--	--	--	--

5. 微波偏振实验（选做）

按实验要求调整喇叭口面相互平行正对共轴。调整信号使显示器接近满度，然后旋转接收喇叭短波导的轴承环（相当于偏转接收器方向），每隔 5° 记录检流计的读数。直至 90° 。就可得到一组微波强度与偏振角度关系数据，验证马吕斯定律。注意，做实验时应尽量减少周围环境的影响。

数据记录：

转角	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
----	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

理论	200	193.97	176.6	150.0	117.4	82.64	50.0	23.4	6.03	0
实验										

【注意事项】

1. 实验前要先检查电源线是否连接正确。
2. 电源连接无误后，打开电源使微波源预热 10 分钟左右。
3. 实验时，先要使两喇叭口正对，可从接收显示器看出（正对时示数最大）。
4. 为减少接收部分电池消耗，在不需要观测数据或实验结束时，要把显示开关关闭。
5. 如发射器/接收器与支柱内杆松动，需先松开蝶形螺丝后拧紧支杆调整方位后再度拧紧蝶形螺丝。

【思考题】

1. 各实验内容误差主要影响是什么？
2. 金属是一种良好的微波反射器。其它物质的反射特性如何？是否有部分能量透过这些物质还是被吸收了？比较导体与非导体的反射特性。
3. 为避免每台仪器微波间的干扰，使用吸波材料对每套设备进行了微波屏蔽，请问吸波材料的工作机理是什么？与屏蔽微波波长的关系是什么？
4. 假如预先不知道晶体中晶面的方向，是否会增加实验的复杂性？又该如何定位这些晶面？

【参考文献】

- [1] 吕斯骅，段家祗。新编基础物理实验，北京：高等教育出版社，2006。
- [2] DHMS-1A 微波光学综合实验仪说明书

【附录 1】扩展：迈克尔逊干涉仪与激光干涉引力波天文台 (LIGO)

迈克尔逊干涉仪的双臂光程差的变化将引起干涉条纹的改变，利用这个原理可以测量微小位移或薄膜厚度（材料折射率已知）。

测量引力波的装置 LIGO（激光干涉引力波天文台）就是一台大型迈克尔逊干涉仪。引力会

影响空间，一定波长的引力波会导致干涉仪两臂光程差改变而引起干涉条纹的微弱变化。为了增加光程差，双臂的激光是多次折返的。



图 1 a)美国“激光干涉引力波天文台”(LIGO)的外观；b)LIGO 的光路结构示意图