

## 实验十二 微波与铁磁共振

受目前可得到的磁感应强度的限制,磁共振所涉及的共振频率一般处于射频与微波频段。通常,当材料的磁化强度较小(比如核磁共振)或者当所用的磁场较弱时(比如光泵磁共振),常用射频电磁波做磁共振的激励信号;但在铁磁和电子顺磁共振中,由于它们的磁矩较大,磁效应比较显著,一般采用频率较高的微波来观测其磁共振效应。因为在微波波段,其能量量子大约是  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  eV,许多原子和分子发射和吸收的电磁波的能量正好处在这个波段,所以,微波与物质相互作用时可以发生共振现象。

通过本实验主要让学生了解微波体效应振荡器的工作原理,了解微波传输的基本原理、方法和元件,掌握传输式谐振腔的工作特性,了解用谐振腔观察铁磁共振的基本原理和实验条件。

### 一、微波

#### (一) 微波的性质

微波是频率非常高、波长非常短的电磁波,其频率范围的划分并无统一的规定,通常将波长范围在 0.1cm–100cm 之间(相应的频率从  $3 \times 10^8$  Hz 到  $3 \times 10^{11}$  Hz)的电磁波划为微波波段。如表 1 所示,根据微波波长的不同,微波可分为四个分波段:

表 1 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围/GHz	波段名称
分米波	1m – 10cm	0.3 – 3	超高频 UHF
厘米波	10cm – 1cm	3 – 30	特高频 SHF
毫米波	1cm – 1mm	30 – 300	极高频 EHF
亚毫米波	1mm – 0.1mm	300 – 3000	超极高频

在本实验中采用的微波是波长在 3 厘米左右的厘米波。

在电磁波波谱中,微波在其低频段与普通的无线电波相连,而在其高频端与远红外线毗邻,但微波的波长决定了它的性质既不同于无线电波,也不同于光波。微波的应用领域、研究方法和所用的传输元件、测量装置都与其它波段的电磁波不同而自成体系,成为一门独立的学科。

微波的独特性质主要表现在以下四个方面:

#### 1. 高频特性

微波的振荡频率极高(在  $3 \times 10^8$  Hz 以上),这样许多在低频波段可以忽略的物理效应在微波波段会变得非常的明显,比如,真空电子管中的“电子渡越时间”约为  $10^{-10}$  秒,这比无线电波的振荡周期要小得多,可以忽略不计,可对微波振荡来说,时间就太长了,电子的惯性就必须加以考虑,因此传统的电子器件在微波波段不能正常使用,而是被建立在新原理基础上的微波电子管、微波固体器件和量子器件所代替。

另外,由于微波的频率高,在不大的相对带宽下,其可用的带宽很宽,所以增加了信息的容量,使得微波具有巨大的信息传输潜力。

#### 2. 短波性

微波的波长比一般的宏观物体,如建筑物、舰船、飞机的尺寸要小得多,所以遇到这些物体时,微波会产生明显的反射。另一方面,微波波长可以和一般电子元件的大小相比拟,每段导线、每个元件都可以成为微波发射天线,不断辐射能量,因而微波不可能在一般的电路中传输。它的传输线将是波导管、谐振腔等。在一般电路里,有电压,电流的概念,采用

集中参数，如电阻、电感、电容来分析电路。而在微波波段，这种概念已失去意义，元件的参数是沿空间分布的，常用分布参数来描述微波电路的特性。

### 3. 似光性

微波传播方向性很强，具有类似于光的直线传播特性。遇到障碍物也会发生吸收、反射和折射。微波能畅通无阻地穿过地球上空的电离层，成为电磁波谱中的“宇宙窗口”。这样就使微波在雷达通讯、定向导航、卫星通讯、射电天文学等领域有着广泛的应用，它使得地球任何角落之间的直接通讯成为可能。不过，正是由于微波不能被电离层所反射，所以利用微波进行远距离通讯时需要中继站接力。

### 4. 量子特性

微波还显示出较强的量子特性，微波量子的能量在  $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{eV}$  数量级，这正适合研究许多原子、分子的振动—转动能级和磁能级。微波技术的应用促进了微波波谱学和量子电子学的发展，研制了低噪声的量子放大器和精度极高的分子钟、原子钟。

二次世界大战对雷达的需求促进了微波技术的发展，在战后相当长的时期内，微波主要应用在军事领域，不过近几十年来，微波技术已经逐步走进了我们的日常生活。如今，微波技术被更广泛地应用在通讯、雷达、导航、遥感、天文、气象、工业、农业、医疗以及科学研究等各个领域。

## （二）微波的产生

目前，产生微波的主要方法有微波固体振荡器（比如微波晶体管振荡器、体效应管振荡器、雪崩二极管振荡器）和一些特殊的微波电子管（比如反射式速调管、磁控管和行波管等）。常用的小功率微波振荡器有反射式速调管和体效应管振荡器。体效应管振荡器是利用具有双能谷结构的半导体材料中的负阻特性而形成的电流振荡输出微波的，它具有体积小、重量轻、工作电压低的特点，自 20 世纪六十年代诞生以后，已经逐步代替了速调管。大功率的微波输出通常采用晶体管振荡器（最大功率可达几十瓦）和磁控管（功率可达数十千瓦到几兆瓦）。

### 1. 微波体效应振荡器的工作原理

微波体效应振荡器（也叫耿氏二极管振荡器），其工作原理主要是利用具有多能谷能带结构的半导体材料的负阻特性来产生微波振荡，比如，砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)、碲化镉(CdTe)、硒化锌(ZnSn)、砷化铟(InAs)等，但用的最多的是 GaAs，下面就以 GaAs 为例来说明体效应振荡器的工作原理。

#### 1). GaAs 的能带结构

GaAs 的能带结构中具有多个最小值，其中最重要的是位于中心位置、能量最低的主能谷（也称为低能谷）和其邻近的一个子能谷（也叫高能谷），如图 1 所示，其主能谷和子能谷之间的能量差约为 0.36eV。通常，电子在主能谷处的迁移率远远

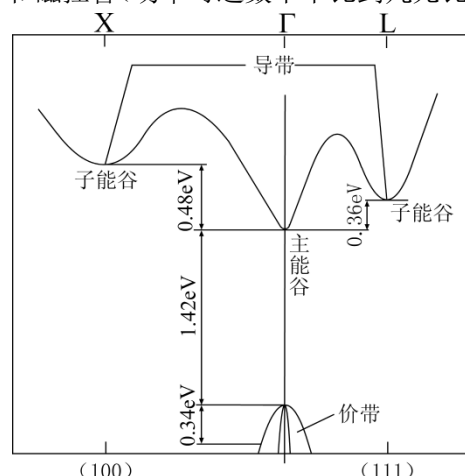


图 1 GaAs 的能带结构（300K）

大于在子能谷处的迁移率。在常温和没有外加电场的情况下，电子的平均动能大约为  $kT=0.025\text{eV}$ ，此时电子没有足够的能量从主能谷跃迁到子能谷，因而可认为电子几乎全部处于低能态的主能谷中，高能态的子能谷是空的。加上外加电场后，电子在外电场中获得附加的能量，当外加电场超过阈值电场  $E_{th}$  后，电子获得的总能量大于 0.36eV，此时电子就会被激发到子能谷中，此时由于电子的迁移率降低，半导体表现出负阻特性，也就是说，随着电压的增加，半导体中的电流反而下降。当所加的电场足够高，电子全部被激发到子能谷中后，

这种负阻效应才会结束。

## 2). 高场畴的形成以及 GaAs 的电流-电压特性

假设在晶体管的阴极附近较大的接触电阻和分布不均匀的杂质，使得阴极附近有一阻值较大的区域。很显然，加上电压之后，此区域的电场将高于别处，随着电压的增加，此区域中的电场将首先超过阈值电场  $E_{th}$  进入负阻状态，如图 2a 所示。由于此区域中的电子迁移率较别的区域低，因此在其左侧会因电子堆积产生负离子区，在其右侧由于电子被“抽空”而形成正离子区，如图 2b 所示，由于区内正负电荷产生的电场与外电场的方向一致，所以区内的总电场高于区外电场，所以常称此区域为高场畴。在外加电场一定，器件的长度  $L$  一定时，畴内电场升高，必然导致畴外电场的降低，所以在体效应管中通常只形成一个高场畴。

高场畴在电场的作用下从阴极向阳极运动，并在运动中逐渐加大，畴内电场进一步增加，当畴内电子的迁移率与畴外电子的迁移率相等时，畴就不再增大了，成为成熟畴。图 2c 表示成熟畴以一定速度向阳极渡越，到达阳极后，畴被阳极吸收，产生脉冲电流，而后一个畴在阴极附近又形成了，如图 2d 所示。

GaAs 的电流-电压特性如图 3 所示。当端电压由零开始上升时，电流大致与电压成正比，当电压上升到 A 点时，即  $V=V_{th}$ ，高场畴形成，畴外电场下降，电流从 A 点陡降到 B 点；过 C 点电压继续增加时，电流便沿着 CD 曲线随电压升高略有上升。反之，当外加电压由高降低时，在到达 B 点以前，电流仍按原路变化；B 点之后随着电压继续下降，就可观察到电流滞后效应，即电流不再按 BA 曲线而是沿 BE 曲线经 E 点跳到 F 点，这就意味着外加电场虽然低于阈值电压，但此时畴已经形成，畴内电场仍高于阈值，畴仍然维持，电流基本不增大；到达 E 点之后，电压为  $V_s$  时，电场已经小到不能维持畴的存在，畴便消失，电流跃变到 F 点。故称  $V_s$  为畴的维持电压。

## 3. 体效应管中的微波振荡

体效应管与适当的外电路配合即可构成振荡器。当直流偏压大于阈值电压后，体效应管上产生的脉冲电流激发外电路产生高频振荡，反过来，高频振荡又可影响体效应管内的电子迁移效应。在耿氏二极管中，振荡器的偏置电压超过阈值电压时，谐振电路是低 Q 值电路，交流电压的幅度较小，以保证总的合成电压的最小值依然超过阈值电压，以保证前一个畴刚

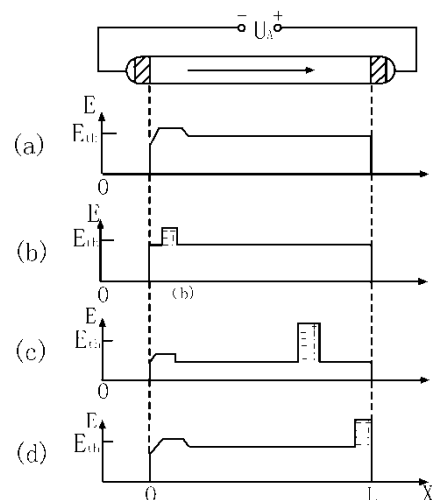


图 2 体效应管中高场畴的形成、渡越和消失过程。(a) 畴产生前的电场分布；(b) 畴在阴极附近成核；(c) 已成熟的畴向阳极渡越；(d) 畴到达阳极消失

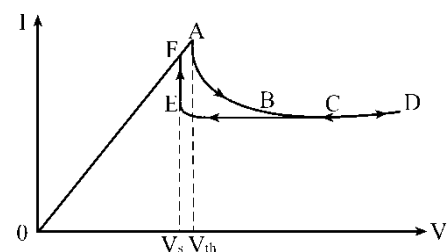


图 3 体效应管中的电流-电压特性

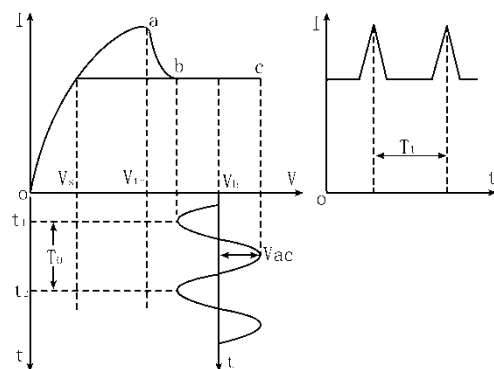


图 4 体效应二极管的工作原理图

达到阳极消失时，下一个畴立即在阴极附近成核，这样，高场畴从阴极到阳极的渡越时间就是器件的振荡周期。

图 4 展示了耿氏二极管的工作原理。器件的偏压  $V_b > V_{th}$ ，交流电压的振幅为  $V_{ac}$ ，器件上的总电压为  $V(t) = V_b + V_{ac} \cos \omega_b t$ 。在  $t_1$  时刻，总电压的最小值仍大于阈值，在器件内形成高场畴，电流从 a 点降到 b 点；此后在  $t_1 \sim t_2$  时间内，高场畴从阴极渡越到阳极；在  $t_2$  时刻，畴在阳极消失，电流又上升，同时另一个畴在阴极附近形成，电流有跃降，如此反复就形成一系列的电流脉冲。

### (三) 微波的传输与测量

#### 1. 微波的传输——波导管

如前所述，微波的传输要用“波导管”，其理论基础实际上就是电动力学中的麦克斯韦方程加边界条件，在这里我们只做简要的介绍，有兴趣的同学可以参见有关的书籍。

“波导管”实际上就是空心的金属管。其截面有圆形与矩形两种。理论分析证明，在此类波导管中不存在电场纵向分量与磁场纵向分量同时为零的电磁波。在波导管中能够传播的电磁波可以归纳成两大类：a、横电波(或磁波)，简写为 TE(或 H 波)，磁场可以有纵向和横向的分量，但电场只有横向分量。b、横磁波(或电波)简写为 TM 波(或 E 波)，电场可以有纵向和横向分量，但磁场只有横向分量。至于电场和磁场的纵向分量都不为零的电磁波，则看成由横电波和横磁波迭加而成。在实际应用中，总是把波导管设计成只能传输单一波型。现在使用的标准矩形波导管中，都只能传播 TE 波(H 波)。

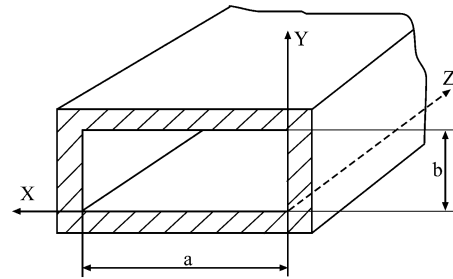


图 5 矩形波导管

在横截面为  $a \times b$  的矩形无限长金属波导管(图 5)中，管内充以介电常数为  $\epsilon$ 、磁导率为  $\mu$  的均匀介质(一般为空气)。如果在开口端输入角频率为  $\omega$  的电磁波，使它沿着 Z 轴传播，则管内电磁场分布由麦克斯韦方程组和边界条件决定。

在无耗、均匀和无限长的矩形波导管中，波的电磁场分量为：

$$\left. \begin{aligned} E_y &= E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \exp[i(\omega t - \beta z)] \\ E_x &= E_z = 0 \\ H_x &= -\frac{\beta}{\omega \mu} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \exp[i(\omega t - \beta z)] \\ H_y &= 0 \\ H_z &= i \frac{\pi}{\omega \mu a} \cdot E_0 \cos \frac{\pi x}{a} \exp[i(\omega t - \beta z)] \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \text{相位常数 } \beta &= 2\pi/\lambda_g \\ \text{波导波长 } \lambda_g &= \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_0)^2} \\ \text{临界波长(截止波长) } \lambda_0 &= 2a \\ \text{自由空间波长 } \lambda &= c/f \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

TE<sub>10</sub> 波具有如下特性：

- 1) 存在一个临界波长  $\lambda_0 = 2a$ ，只有  $\lambda < \lambda_0$  的电磁波才能在波导管中传播。

2) 波导波长  $\lambda_g >$  自由空间波长  $\lambda$ 。

3) 电场矢量垂直于波导宽壁(只有  $E_y$  分量)，而磁场矢量在平行于波导宽壁的平面内(只有  $H_x$ 、 $H_z$  分量)。

4) 在宽壁中点， $x=a/2$  处， $E_y$  有最大值。而在两侧， $x=0$  与  $x=a$  处， $E_y=0$  即电场在  $x$  方向形成一个驻立半波，而沿  $y$  方向是均匀的。电磁场振幅随  $x$ 、 $y$  的分布如图 6。

5) 电磁场在波导的纵方向( $z$ )上形成行波。 $E_y$  和  $H_x$  的分布规律相同，也就是说， $E_y$  最大处  $H_x$  也最大， $E_y$  为零处  $H_x$  也为零，但它们之间的相位相差  $\pi$ 。磁场的这种结构是行波的特点。

从以上分析可以看出“TE<sub>10</sub>”波的含义，其中“TE”表明电场没有纵向分量，即  $E_z=0$ ；TE<sub>10</sub> 的第一脚标“1”表明电场沿波导的宽边方向有一个最大值，或者说有一个驻立半波；第二个脚标“0”表明电场沿波导窄边方向没有变化。

电场只有横向分量，而磁场既有横向分量，也有纵向分量，这是和自由电磁波不同的。自由电磁波的电场和磁场都只有横向分量。产生这一情况的原因是由于波导中的电磁波实际上是在两个面对面的导体壁之间来回反射，以“之”字形方式来回前进，同一频率、具有一定夹角的两束波的叠加形成场的纵向分量。

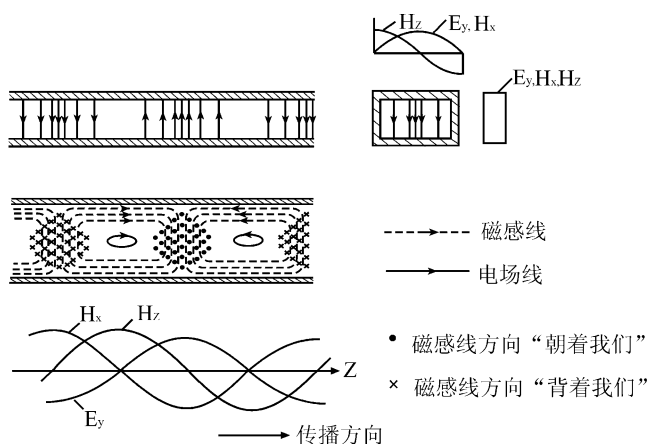


图 6 TE<sub>10</sub> 波的电磁场结构

## 2. 微波测量

对微波各种特性的测量，主要是利用各种部件对微波的吸收效应。微波测量最基本的是频率测量、功率测量和驻波测量。其它参量，如 Q 值、衰减、介电常数、阻抗、铁磁共振线宽等的测量，都可以归结到用前面的三种基本参量的测量加以解决。

### 1) 频率测量——谐振式频率计

微波频率测量中应用最多的是谐振腔法。

谐振腔法应用的主要仪器是谐振腔频率计。在我们的实验中使用吸收式频率计。其结构如图 7 所示。它是一个长度  $L$  可改变的谐振腔，有耦合孔与波导宽边相连。

如前述，谐振腔有其固有频率，当移动活塞，使长度  $L$  变化时，其固有频率也随之变化。若此频率与微波频率相同，将发生谐振，即腔体对微波功率发生强烈的共振吸收。于是微波的功率监测指示将突然变小，记下此时谐振腔长度，查该频率计频率校正表，即可得到微波的频率，再由  $\lambda_0 = c/f$  可算得微波在自由空间真空中的波长。

### 2) 功率测量——晶体检波器

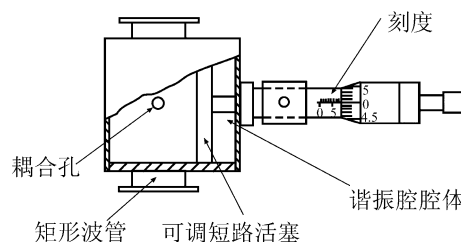


图 7 谐振式频率计的结构原理图

微波功率的测量分为绝对测量和相对测量两种。绝对测量通常是把微波功率转换成热能，利用传感器，比如热敏电阻、热电偶等，随热量改变的变化来测量微波的功率。

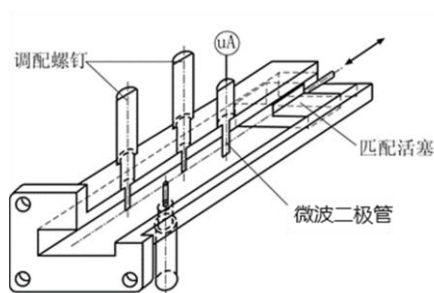


图 8 晶体检波器

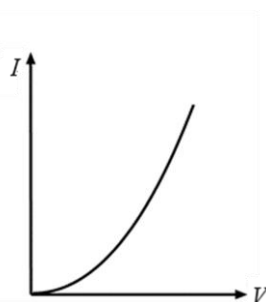


图 9 微波检波二极管的 I-V 曲线

很多时候，我们不需要知道微波的绝对功率，只需要测量其相对值，此时就可使用晶体检波器进行测量，其整体结构如图 8。晶体检波器的核心就是一个微波二极管，可将微波信号转换成直流电信号。调节匹配活塞和调配螺钉使二极管获得的功率最大。检波后，可用灵敏检流计或微安表显示其直流电流的大小。

由于微波信号很弱，检波二极管通常工作在线性区域，其特性曲线如图 9 所示，大致有  $I = kV^\alpha$  的关系， $\alpha = 2$  时称为平方律检波。如果实验中使用的微波检波电流  $I$  不超过  $5-10 \mu A$ ，二极管的端电压  $V$  与检波电流  $I$  的关系大致为  $I \propto V^2$ ，即平方律检波。由于  $V$  是正比于微波电场强度  $E$  的，所以  $I \propto E^2$ ，即  $I$  与微波功率  $P$  成正比：

$$I = KP. \quad (3)$$

因此  $I$  就成了  $P$  的相对指示值。在精密测量时需先对  $\alpha$  进行测量。

### 3) 驻波比测量——测量线

“驻波比”是微波测量中的一个基本量，通过它可以了解微波波导管传输系统的匹配状态，电场分布，波导波长，阻抗，介电常数等等。

测量“驻波比”的精密仪器是测量线，其结构简图如图 10。其实它就是一段波导管，在宽壁中线上沿着微波传输方向开了一个狭槽，其长度一般为几个波长；有一个探针可在槽中来回移动，并将一部分功率耦合出来，送到一个晶体检波器上进行显示，从而测量出沿槽线方向电场的相对强度分布。在使用测量线时，首先应通过调谐装置使测量线调谐，目的是消除探针插入槽中引起的不匹配，并使探针感应的功率能有效地输送到晶体检波器管中；其次，探针插入波导的深度应尽可能的小，通常调节探针的深度到仪表有足够指示即可，太深会引起波导中场的畸变；第三，要注意测量信号是否满足晶体检波器的平方检波律。

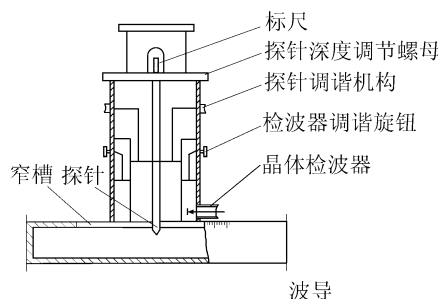


图 10 测量线结构原理简图。

## 二、铁磁共振原理

铁磁共振是指铁磁体材料在受到相互垂直的稳恒磁场和交变磁场的共同作用时发生的共振现象，它可以用于测定铁磁体材料的  $g$  因子、共振线宽、弛豫时间等性质。

## 1. 铁磁共振原理

在铁磁体材料中，有许多自发磁化的小区域——磁畴，磁畴内的磁矩是有序排列的，一个磁畴内自发磁化强度的平均值可用  $\mathbf{M}_s$  表示，不同磁畴的  $\mathbf{M}_s$  方向是不一致的。由于铁磁体具有很大的磁化率（其  $\chi$  值可达  $10^{-10^6}$  量级），所以，只需加很小的外加磁场，就能够调整磁畴  $\mathbf{M}_s$  的取向，使其饱和磁化。

当铁磁体同时受到两个相互垂直的磁场即恒定磁场  $\mathbf{H}_0$ （沿 Z 轴）和微波交变磁场  $\mathbf{h}$  的作用时，恒定磁场  $\mathbf{H}_0$  使铁磁体饱和磁化，当磁化强度矢量  $\mathbf{M}_s$  原来的平衡方向与  $\mathbf{H}_0$  有夹角  $\theta$  时， $\mathbf{M}_s$  将围绕  $\mathbf{H}_0$  进动，其频率为：

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (5)$$

其中  $\gamma$  为铁磁体材料的旋磁比，即

$$\gamma = g \frac{\mu_0 e}{2m} \quad (6)$$

式中  $g$  为朗德因子， $\mu_0$  为真空磁导率， $e$  和  $m$  分别为电子电量和电子质量。在进动的过程中，磁矩必然受到阻尼作用而使进动的振幅衰减，最后， $\mathbf{M}_s$  将指向  $\mathbf{H}_0$  的方向。而微波磁场  $\mathbf{h}$  能够不断地为进动的磁矩补充能量。当微波磁场的频率  $\omega$  不等于  $\omega_0$  时，由微波磁场耦合到磁矩的能量，不足以平衡磁矩在进动时受阻尼所消耗的能量，磁矩的进动很快衰减并趋于  $\mathbf{H}_0$  的方向。但当  $\omega = \omega_0$  时， $\mathbf{M}_s$  吸收的微波能量刚好弥补磁矩在进动时受阻尼所消耗的能量，从而维持稳定的进动，即发生共振吸收现象。此时，铁磁体的磁导张量可表示为：

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

它的元素是复数，其中  $\mu = \mu' - i\mu''$ ， $\kappa = \kappa' - i\kappa''$ ， $\mu_z = \mu'_z - i\mu''_z$ 。各元素的实部表示材料的色散特性，而虚部表示损耗特性。固定铁磁体所处微波磁场的频率为  $\omega_0$ ，改变稳恒磁场  $H$  的大小，当  $H$  满足(5)式即发生所谓的铁磁共振现象，设此时  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_r$ 。发生共振时，磁导率张量对角元  $\mu$  的虚部  $\mu''$  与稳恒磁场  $H$  的关系曲线上将出现共振峰（如图 11 所示）， $\mu''$  的最大值  $\mu''_r$  所对应的磁场  $H_r$  称为共振磁场， $\mu'' = \mu''_r / 2$  所对应的两点间的磁场间隔  $|H_1 - H_2|$  称为铁磁共振线宽，记作  $\Delta H$ 。 $\Delta H$  是描述微波铁磁体材料性能的一个重要参量，它标志着磁损耗的大小。通常，铁磁体的共振线宽  $\Delta H$  和铁磁体的弛豫时间  $\tau$  之间的关系可用下式表示：

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H} \quad (8)$$

一般铁磁体材料对应的弛豫时间  $\tau$  约为  $10^{-6} - 10^{-9}$  s 的数量级。至于弛豫现象的微观机制，有兴趣的同学可参阅核磁共振的相关内容。

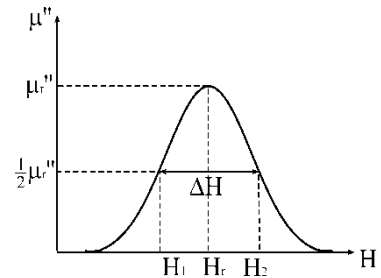


图 11 铁磁共振曲线

## 2. 传输式谐振腔

谐振腔是微波系统中的重要元件，它可将特定频率的微波限制在一定的几何空间内，也就是说，谐振腔具有储蓄电磁能量和实现频率选择的功能。微波波段的谐振腔按几何形状分类，有矩形谐振腔、圆形谐振腔、同轴谐振腔等，而按所使用的材料分类则有金属谐振腔、介质谐振腔等。本实验中采用的是传输式金属矩形谐振腔，它实际上就是一段矩形波导管，并在两端加上带耦合孔的短路金属板。在谐振腔中，由于导体壁可防止电磁波辐射，使电磁

场局限在空腔内部并在腔内连续反射，如果波型和频率合适，就会产生驻波，即发生谐振现象。

#### 1) 谐振的谐振条件

谐振腔发生谐振时，腔长  $l$  必须是半个波导波长的整数倍，即：

$$l = p \cdot \frac{\lambda_g}{2}, \quad p \text{ 为整数} \quad (9)$$

其中  $\lambda_g$  为微波的波导波长；对于  $\text{TE}_{10}$  波有

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

这里， $\lambda$  和  $f$  分别为谐振腔的谐振波长和谐振频率， $a$  为谐振腔宽边长度。

#### 2) 振荡模式

在实验室使用的矩型波导内传输的电磁场通常为  $\text{TE}_{10}$  波，产生谐振时，腔内的电磁场分布必须用三个脚标来描述，记为  $\text{TE}_{10p}$ ，称为振荡模式。脚标  $p$  表示场沿谐振腔长度上的半波数。

#### 3) 品质因数

谐振腔的固有品质因数  $Q_o$  的定义为：

$$Q_o = \omega_o \frac{\text{谐振时总的储能}}{\text{损耗功率}} \quad (11)$$

$Q_o$  值的高低表示谐振效率的高低和频率选择性的好坏，相对谐振腔所储蓄的能量来说， $Q$  值越大，功率的消耗越少；反之， $Q$  值越小，功率的消耗越多。公式 (11) 中定义的品质因数没有考虑负载的影响，因此也称之为无载品质因数，它表征的是谐振回路本身的特性。在实际应用中，谐振回路总是与外电路相耦合的，负载和外电路的引入通常会导致系统品质因数的下降。此时需用有载品质因数  $Q_L$  来描述谐振回路的性质，通常  $Q_L$  可定义为：

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_e} \quad (12)$$

其中  $Q_e$  为谐振腔的外观品质因数，它表示外电路与谐振回路之间耦合的强弱。通常  $Q_e$  越小耦合越强，有载  $Q_L$  就会越低。

#### 4) 谐振曲线

谐振腔的传输系数与频率的关系曲线  $T(f)$  称为谐振腔的谐振曲线（如图 12 所示），谐振曲线越窄，谐振腔的频率选择性越好。此时，其有载品质因数  $Q_L$  可表示为：

$$Q_L = \frac{f_o}{|f_1 - f_2|} \quad (13)$$

式中  $f_o$  为腔的谐振频率， $|f_1 - f_2|$  为传输系数为  $T(f_o)/2$  的两点所对应的频率间隔。

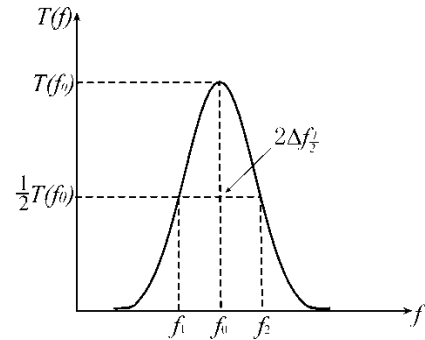


图 12 传输式谐振腔的谐振曲线。

### 3. 用传输式谐振腔测量铁磁共振线宽的原理

#### 1) 谐振腔的微扰公式

当把铁磁体样品放入谐振腔中时，会引起谐振腔的谐振频率和品质因数的变化。如果样



品很小，可以看成是一个微扰，此时可假设：

(a) 放入样品后所引起的谐振频率的相对变化很小。

(b) 放入样品后，只有样品所在地方的电磁场发生变化外，腔内其他地方的电磁场的变化可忽略不计。只要把样品放在腔内适当的位置，以  $TE_{10P}$  型谐振腔为例，经有关计算可得到以下结果：

$$\frac{f-f_0}{f_0} = -A(\mu' - 1), \quad \Delta\left(\frac{1}{Q_L}\right) = 2A\mu'' \quad (14)$$

式中  $\Delta(1/Q_L)$  为放进样品前后谐振腔的有载品质因数  $Q_L$  的倒数的变化， $\mu'$  和  $\mu''$  分别为磁导率张量对角元  $\mu$  的实部和虚部，而  $A$  是与谐振腔的振荡模式、体积以及样品体积有关的常数，通常

$$A = \frac{2}{\left[1 + \left(\frac{l}{ap}\right)^2\right]} \cdot \frac{V_s}{V_0}, \quad (15)$$

其中  $V_s$  和  $V_0$  分别为样品和谐振腔的体积。

## 2) 用传输式谐振腔测量铁磁共振

如图 14 所示，用传输式谐振腔测量铁磁共振时，谐振腔应置放在均匀的外磁场中，外磁场的方向应与微波磁场分量垂直，由于本实验采用的谐振腔的谐振模式主要为  $TE_{10P}$ ，腔内磁场位于  $XZ$  平面上（参见图 6），若外磁场平行于  $Y$  方向，则自动满足两磁场相互垂直的条件。

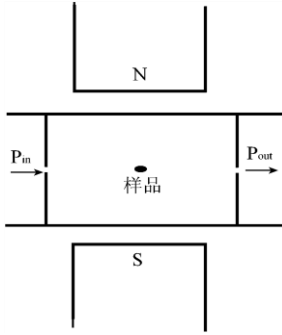


图 13 用传输式谐振腔测量铁磁体样品的共振线宽的示意图

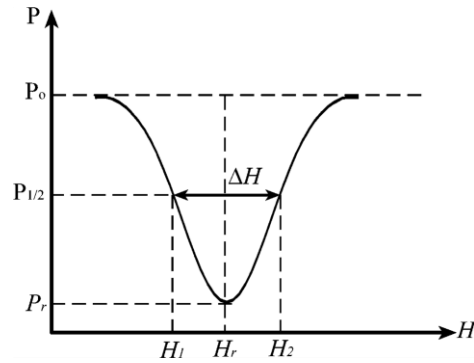


图 14 传输式谐振腔的输出功率  $P$  与磁场强度  $H$  的关系曲线

若置入谐振腔内的铁氧体小球体积很小，并放在腔内磁场最大处，而且谐振腔始终保持谐振，微波输入功率保持恒定，则谐振腔的传输系数可写为：

$$T(f_0) = \frac{P_{\text{出}}(f_0)}{P_{\text{入}}(f_0)} = \frac{4Q_L^2}{Q_{e1}Q_{e2}}, \quad (16)$$

式中  $Q_{e1}$ 、 $Q_{e2}$  分别为输入孔和输出孔的外观品质因数。因此

$$P_{\text{出}}(f_0) = \frac{4P_{\text{入}}(f_0)}{Q_{e1}Q_{e2}} Q_L^2, \quad (17)$$

即在谐振腔的输入功率  $P_{\text{入}}$  不变和微扰条件下， $P_{\text{出}}$  正比于  $Q_L^2$ 。因此，若要测量铁磁共振的线宽  $\Delta H$ ，就需测量  $\mu''$ ，由(14)式可知，只要测量腔的  $Q_L$  的变化即可。而  $Q_L$  的变化可以通过腔的输出功率  $P_{\text{出}}$  的变化来测量，这就是用传输式谐振腔测  $\Delta H$  的基本思路。

通过测量谐振时的输出功率  $P$  与恒定磁场  $H$  的关系曲线（见图 14），再按一定的公式就定出  $\Delta H$ 。若  $P_0$  和  $P_r$  分别为远离铁磁共振时和共振时的输出功率， $P_{1/2}$  为半共振点（相当于  $\mu'' = \mu_r''/2$  处）的输出功率。利用公式（14）-（17）可以得到（有兴趣的同学可以自己推导）：

$$P_{1/2} = \frac{4P_0}{(\sqrt{P_0/P_r} + 1)^2} \quad (18)$$

算出  $P_{1/2}$  的值，就可以从 P-H 曲线上测量出  $\Delta H$ 。

应该注意的是，在进行铁磁共振线宽的测量时，样品的  $\mu'$  必然要影响谐振腔的谐振频率（频散效应），要得到准确的共振曲线和线宽，必须在测量时消除频散，使装有样品的谐振腔的谐振频率始终与输入的微波频率相同。因此，在逐点测量共振曲线时，每加一个共振磁场，都需要稍微改变微波的频率使之调谐，这样用式（18）计算的  $\Delta H$  才正确。

如果不逐点调谐测量， $\Delta H$  的值就应用下式进行修正（见参考文献 1）：

$$P_{1/2} = \frac{2P_r P_0}{P_0 + P_r} \quad (19)$$

### 三、实验装置和内容

#### 1、体效应微波振荡器工作曲线测量及性能测量

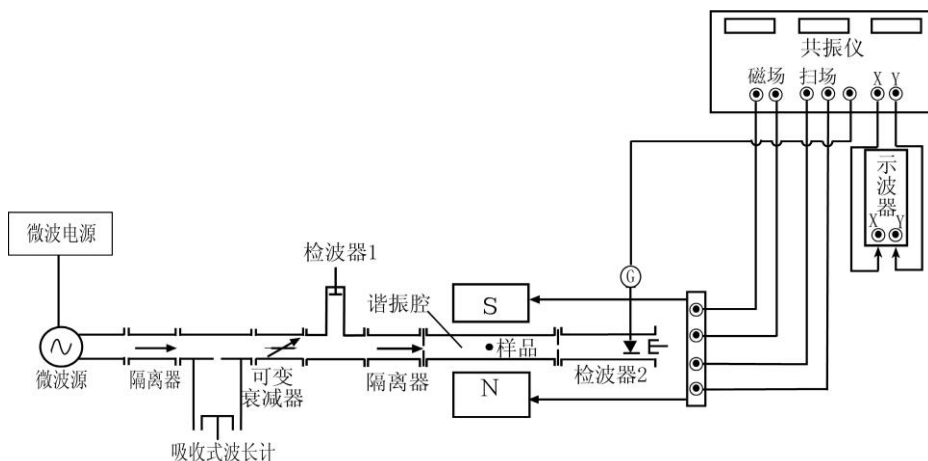


图 15 传输式谐振腔铁磁共振实验光路图

（1）打开体效应微波振荡器，调节“频率”旋钮使频率读数在 9.000GHz 左右电源预热至少 30 分钟。按图 15 所示光路图连接光路。

（2）按下微波源信号的“等幅”和“教学”工作钮，在 0-13V 的电压范围内连续改变体效应管的工作电压，记录相应的工作电流值，画出体效应管在 0-13V 区间电流-电压曲线。利用光路中的吸收式波长计和检波器 1 测量工作电压在 10-13V 区间频率-电压曲线，分析体效应管的负阻区和微波工作区的电压范围。

（3）弹起“教学”工作钮，此时体效应管工作在标准电压 12.0V 左右。调节体效应管功率钮和微波衰减器，使与检波器 1 连接的微安表的示数合适，调节频率旋钮，改变微波的频率范围（8.9GHz-9.2GHz），测量不同频率下的微波输出功率。注意，每次改变频率后，检波器要调谐。

#### 2、铁磁共振实验

（1）检查传输式谐振腔中的金属耦合片是否装上。

（2）本实验是在 3 厘米微波波段进行的，传输式谐振腔采用  $TE_{10p}$  矩型谐振腔（本实验中  $p=8$ ， $a=2.295\text{cm}$ ， $l=19.30\text{cm}$ ），样品采用直径大约为 0.5-1mm 的多晶或单晶铁氧体小球。电

磁铁提供的外磁场强度为 0~0.5T。根据讲义公式 (9) 和 (10) 估算谐振腔的谐振频率。

(3) **检测电磁铁电钮旋钮是否为最小**，然后打开共振仪电源，工作方式设为检波。根据预习中对理论谐振频率的计算结果，在该频率附近连续调节微波频率，观察共振仪上的检波示数的变化，当表头示数发生变化时，及时调整检波器 2 的调谐活塞和灵敏度，使检波指针示数合适。观察示数随微波频率的变化关系。

(4) 仔细调节微波频率观察谐振腔的输出功率，找到其谐振频率  $f_0$ ，将检波器 2 连接到微安电流表上，调节衰减器，使微安表示数合适，在此频率左右单调、逐点测量传输式谐振腔的谐振曲线，并计算其品质因素。

(5) 将微波频率设置为  $f_0$ ，工作方式设为扫场，放入铁磁样品，调节磁场电流扫场为最大，调节磁场电流，直到在示波器 (x-y 扫描方式) 观察到共振曲线，调节相移钮，使左右信号重合，调节各参数 (**哪些参数会影响共振曲线的形状?**)，使共振曲线接近理想图形。

(6) 分别观察不同铁氧体样品的共振线宽。

(a) 在谐振腔中放入不同的铁氧体样品，观察共振信号的变化，记录共振曲线的图像，分析不同样品共振信号的差异与成因。

(b) 用逐点法测量样品的共振曲线：(a) 将待测样品放入谐振腔，铁磁共振仪设为扫场方式，调节磁场电流，在示波器上观察样品的共振特征，(b) 铁磁共振仪设为检波，将检波器 2 连接到微安表上，从小到大调节磁场电流，用逐点法测量样品的共振曲线，注意合理设置测量点的步长，测量前一定要使谐振腔调谐，使曲线左右远离共振时的信号功率尽量相等 (如果共振曲线左右功率不等，该如何调节?)，绘制 P-B 图，测量多晶样品的共振线宽  $\Delta B$ 。

(7) 用高斯计测量电磁铁电流与磁场强度的关系。

(8) 计算样品的旋磁比  $\gamma$  ( $\omega_0 = \gamma B_0$ )、g 因子和弛豫时间  $\tau$ 。

(9) 比较分析不同样品的弛豫时间不同的原因。

3. 关机：**将铁磁共振仪的电磁铁电流调至最小**，关仪器电源开关。

## 四、思考题

1. 微波有哪些特性？晶体检波器和吸收式频率计的工作原理是什么？
2. 体效应微波振荡器中的负阻效应是如何形成？微波信号又是如何产生的？
3. 实验中，若采用的传输式谐振腔的  $a=2.270\text{cm}$ ,  $l=19.340\text{cm}$ ,  $p=8$ , 则谐振腔的理论谐振频率应该是多少？
4. 在如图 15 所示的实验装置中，有那些因素会影响谐振腔的输出信号？如何解决？
5. 根据实验结果，分析造成单晶铁磁材料和多晶铁磁材料的共振曲线的原因。

## 参考文献

- [1] 吴思成, 王祖铨. 近代物理实验 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2005
- [2] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理. 成都: 电子科技大学出版社, 1994
- [3] 李绪益. 电磁场与微波技术. 广州: 华南理工大学出版社, 2004
- [4] 顾继慧. 微波技术. 北京: 科学出版社, 2004
- [5] 王子宇. 微波技术基础. 北京: 北京大学出版社, 2003
- [6] 何元金, 马兴坤. 近代物理实验. 北京: 清华大学出版社, 2003