

铁磁共振实验（1335 实验室）

实验须知

1.预习阶段

- (1)认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。
- (2)预习后不需要写预习报告，课前在平台上完成预习思考题。

2.实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯、饮料等放在实验台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

3.数据处理

本实验不要求写实验报告，但要求按讲义进行数据处理及思考题 4，下周交来。

4. 注意事项：

- (1) 铁磁共振实验需要用到示波器，预习时可以回顾一级实验相关内容；
- (2) 注意实验中的正确接线方式，接线错误可能会导致仪器配件严重损坏，影响实验进程。

铁磁共振实验

实验简介

在微波波段，只有铁氧体对微波吸收最小。当满足一定条件时，磁性物质从微波磁场中强烈吸收能量的现象称为铁磁共振，它和核磁共振、顺磁共振一样也是研究物质宏观性能和微观结构的有效手段。它能测量微波铁氧体的许多重要参数，因此，广泛应用于微波铁氧体器件的制造、设计，对雷达和微波技术的发展做出了重要贡献。

实验原理

铁磁共振一般是在微波频率下进行（波长为 3cm 左右）。将铁磁物质置于微波磁场中，它的微波磁感应强度 B_m 可表示为

$$B_m = \mu_0 \mu_{ij} \cdot H_m \quad (1)$$

μ_0 为真空中的磁导率， μ_{ij} 称为张量磁导率。

$$\mu_{ij} = \begin{bmatrix} \mu & -jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

μ 、 k 称为张量磁导率的元素

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (3)$$

$$k = k' - jk'' \quad (4)$$

当外加稳恒磁场 B 时， μ 、 k 的实部和虚部随 B 的变化曲线如图 2.3.2-1。 μ' 、 k' 在 $B_r = \omega_0 / \gamma$ 处数值和符号都剧烈变化，称为色散。 μ'' 、 k'' 在 $B_r = \omega_0 / \gamma$ 处达到极大值，称为共振吸收，此现象即为铁磁共振。这里 ω_0 为微波磁场的角频率， γ 为铁磁物质的旋磁比。

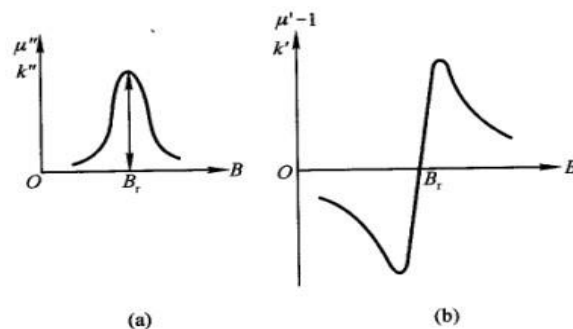


图 2.3.2-1 铁磁共振 μ 、 k 曲线

μ'' 决定铁磁物质磁能的损耗，当 $B = B_0 = \omega_0 / \gamma$ 时，磁损耗最大，常用共振吸收线宽 ΔB 来描述铁磁物质的磁损耗大小。 ΔB 的定义如图 2.3.2-2，它是 $\mu''/2$ 处对应的磁场间隔，即半高宽度，它是磁性材料性能的一个重要参数。研究它，对于研究铁磁共振的机理和磁性材料的性能有重要意义。

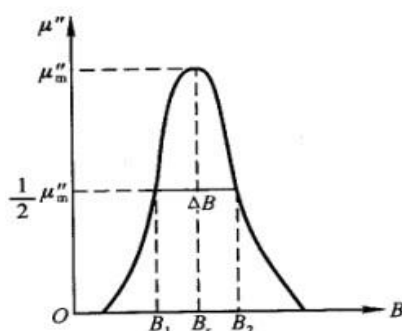


图 2.3.2-2 共振线宽

铁磁共振的宏观唯象理论的解释是，认为铁磁性物质总磁矩 M 在稳恒磁场 B 的作用下，绕 B 进行，进动角频率 $\omega = \gamma B$ ，由于内部存在阻尼作用， M 的进动角会逐渐减小，逐渐趋于平衡方向，即 B 的方向而被磁化。当进动频率等于外加微波磁场 H_m 的角频率 ω_0 时， M 吸收微波磁场能量，用以克服阻尼并维持进动，此时即发生铁磁共振。

铁磁物质在 $B_r = \omega_0 / \gamma$ 处呈现共振吸收。

铁磁共振实验通常采用谐振腔法，该法灵敏度较高，但测量的频率较窄。谐振法中，可采用传输式腔，其传输系数与样品共振吸收的关系简单，便于计算 ΔB ，但难以提高灵敏度。若采用反射式腔，其反射系数与共振吸收关系复杂，计算 ΔB 麻烦，但可提高灵敏度。本实验用传输式谐振腔测量直径约 1 mm 的多晶铁氧体小球 μ'' 与 B 的关系曲线，计算 ΔB 和 g 因子。

实验仪器

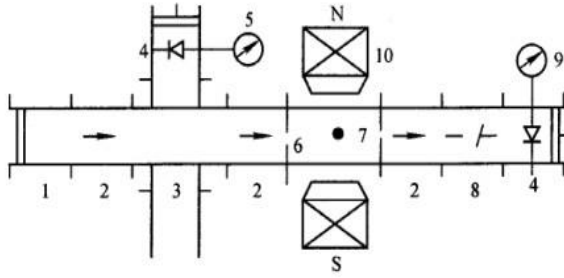


图 2.3.2-3 铁磁共振装置原理图

1—微波发生器;2—隔离器;3—定向耦合器;4—晶体检波器;5—微安计;6—TE₁₀₈谐振腔;
7—铁氧体小球;8—精密衰减器;9—微安计;10—磁铁

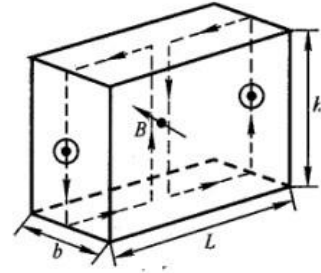


图 2.3.2-4 样品放置示意图

图 2.3.2-3 为实验装置图。实验的测量原理是将铁氧体小球置于谐振腔微波磁场的最大处，使其处于相互垂直的稳恒磁场 B 和微波磁场 H_m 中，如图 2.3.2-4，则样品与谐振腔构成一个谐振系统，保持微波发生器输出功率恒定，调节谐振腔（若使用可调谐振腔时），或微波发生器（当用固定式谐振腔时），使谐振腔谐振频率 ω 与微波磁场频率 ω_0 相等，当改变 B 的大小时，由于铁磁共振， μ 相应的发生变化，因而影响谐振腔的谐振频率和腔的有载品质因数 Q_L ，在样品很小，磁导率变化引起系统参量的变化不大的条件下，根据腔的微扰理论，有

$$\begin{cases} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -A(\mu' - 1) \\ \Delta\left(\frac{1}{Q_L}\right) = 4A\mu'' \end{cases} \quad (6)$$

(7)

A 是一个常数，与谐振腔尺寸和样品大小有关。对于传输式谐振腔，在谐振腔始终调谐时，在输入功率 $P_{in}(\omega_0)$ 不变的情况下，输出功率为

$$P_{out}(\omega_0) = \frac{4P_{in}(\omega_0)}{Q_{e1}Q_{e2}} \cdot Q_L^2 \quad (8)$$

即 $P_{out}(\omega_0) \propto Q_L^2$ 。式中 Q_L 为腔的品质因数。因而可通过测量 Q_L 的变化来测量 μ'' ，而 Q_L 的变化可以通过腔的输出功率 P_{out} 的变化来测量，这就是测量 ΔB 的基本思想。必须注意的是，当 B 改变时，磁导率的变化会引起谐振腔谐振频率的变化（频散效应），故实验时，每改变一次 B 都要调节谐振腔（或微波发生器频率），使它与输入微波磁场的频率调谐，以满足式（8）的关系，这种测量称逐点调谐，

可以获得真实的共振吸收曲线，如图 2.3.2-5，此时，对应于 B_1 、 B_2 的输出功率为

$$P_{1/2} = \frac{4P_0}{(\sqrt{P_0/P_r} + 1)^2} \quad (9)$$

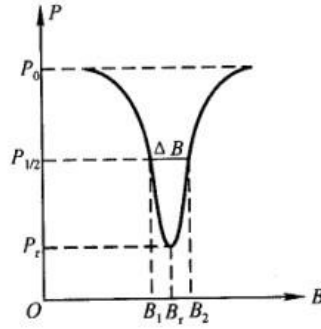


图 2.3.2-5 输出功率与 B 的关系

式中 P_0 、 P_r 和 $P_{1/2}$ 分别是远离共振点、共振点和共振幅度半高处对应的输出功率。因此根据测得曲线，计算出 $P_{1/2}$ ，既能确定出 ΔB 。

为简化测量过程，往往采用非逐点调谐，即在远离共振区时，先调节谐振腔，使之与入射微波磁场频率调谐，测量过程中则不再调谐，则计算 $P_{1/2}$ 的关系式为

$$P_{1/2} = \frac{2P_0P_r}{P_0 + P_r} \quad (10)$$

此式是考虑了频散影响修正后计算 $P_{1/2}$ 的公式。

实验时，直接测量的不是功率，而是检波电流 I ，为此，必须控制输入功率的大小，使之在测量范围内，微波检波二极管遵从平方律关系，则 I 与入射到检波器的微波功率 P_{out} 成正比，则

$$I_{1/2} = \frac{2I_0I_r}{I_0 + I_r} \quad (11)$$

因此，只要测出 I - B 曲线，即可算得 ΔB 和 B 。

实验内容

1. 用仪器的波长表测微波信号频率。

- 打开三厘米固态信号发生器电源预热半小时。
- 将微波谐振腔的信号输入端接入信号发生器。
- 将微波谐振腔的信号输出端接入微安表。
- 调节衰减器，使微安表有一定的读数。
- 调节波长表使微安表读数达最小值，读取波长表的刻度值，由**刻度值和频率对照表**求得谐振腔的协振频率。

- f. 调节波长表到任一值，使微安表读数回到原值。
2. 用非逐点调谐法测出 $I - B$ 曲线，磁场由小到大，由大到小测二条曲线，并求 ΔB 及 g 因子（用多晶样品）。
- 将样品放入谐振腔（注意要小心轻放）。
 - 将谐振腔有样品的部分放入磁场中心位置。
 - 将线圈的“磁场”接线接入磁共振实验仪的“磁场”端。
 - 调节磁共振实验仪“磁场”旋钮由小到大改变励磁电流（A）并观察相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），由大到小改变励磁电流（A）并观察相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），找出共振区的范围，并记录。
 - 调节磁共振实验仪“磁场”旋钮由小到大改变励磁电流（A）并读出相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），测一条曲线的数据（共振区励磁电流 0.02A 的改变，非共振区励磁电流 0.1A 的改变），**查表将励磁电流值（A）变为磁感应强度 $B(mT)$** 。（中间点可用线性插值法估算）。测量过程中不要再改变衰减量和波长表。
 - 调节励磁电流由高到低，（同上步骤）测一条曲线数据。
 - 画出两条 $I - B$ 曲线，由曲线求 ΔB 及 g 因子。

$$\gamma = \omega / B_r \quad g = \gamma \hbar / \mu_B \quad I_{1/2} = \frac{2I_0 I_r}{I_0 + I_r}$$

3. 用示波器观察共振波形。
- 将微波谐振腔的信号输出端接入磁共振实验仪的“检波输入”端。
 - 将磁共振实验仪的“X 轴”端接入示波器的“CH1 X”端。
 - 将磁共振实验仪的“Y 轴”端接入示波器的“CH2”端。
 - 将线圈的“扫场”接线端接入试验仪器的“扫场”端，调节“扫场”旋钮使“调谐表”指示在 30%。
 - 调节磁场电流达共振点值，观察示波器的波形。
4. 用非逐点调谐法测出 $I - B$ 曲线，并求 ΔB 及 g 因子（单晶样品）（**选做**）
- 将线圈的“扫场”接线端断开试验仪器的“扫场”端，
 - 调节磁共振实验仪“磁场”旋钮由小到大改变励磁电流（A）并观察相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），由大到小改变励磁电流（A）并观察相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），找出共振区的范围，并记录。
 - 调节磁共振实验仪“磁场”旋钮由小到大改变励磁电流（A）并读出相应的微波谐振腔输出电流值（ μA ），测一条曲线的数据（共振区励磁电流 0.01A 的改变，非共振区励磁电流 0.3A 的改变），**查表将励磁电流值（A）变为磁感应强度 $B(mT)$** 。（中间点可用线性插值法估算）。测量过程中不要再改变衰减量和波长表。画一条 $I - B$ 曲线，由曲线求 ΔB 及 g 因子。
 - 旋转样品（同上步骤）测一条曲线数据。由曲线求 ΔB 及 g 因子。样品的顶端有+字标记，可粗略估计角度。
 - 再次旋转样品（同上步骤）测一条曲线数据。由曲线求 ΔB 及 g 因子。至少旋转 4 次。
 - 比较上述 ΔB 及 g 因子。

5. 做思考题 4

思考题

- 1、用传输式谐振腔测 ΔB 时候，要保证哪些试验条件？
- 2、使得谐振腔和微波信号调谐时，磁铁应该至于使系统处于共振还是远离共振的位置？
- 3、本实验所用谐振腔内可以把样品放置任意位置么？
- 4、能否从试验结果曲线，取曲线高度一半处对应的磁场差作为 ΔB ？为什么？