

铁磁共振

姓名*

北京大学物理学院 学号: 2x000xxxxx

(实验日期: 2025 年 4 月 24 日)

铁磁共振是研究铁磁体中的动态过程和测量磁性参量的重要方法, 铁磁共振具有磁共振的一般特性, 而且效应显著, 用简单的装置就能进行观测. 本实验通过使用反射式速调管作为微波振荡器, 通过传输式谐振腔中的铁氧体样品发生的铁磁共振, 观测了速调管的振荡模和传输式谐振腔的谐振曲线及铁磁共振现象. 通过测量输出功率和磁场的关系, 计算得到了回磁比 γ , g 因子和弛豫时间 τ , 两种方法计算出的 g 因子均近似为 2.0. 通过观测铁磁共振和测定有关物理量, 认识了磁共振的一般特性.

关键词: 微波, 反射式速调管, 传输式谐振腔, 铁磁共振

I. 引言

微波技术是近代发展起来的一门尖端科学技术. 微波一般是指波长在 $1\text{ mm} \sim 1\text{ m}$ 范围内的电磁波, 具有波长短, 频率高, 有量子特性, 能穿透电离层等特点. 微波技术被广泛应用于国防、工业、农业和通讯, 以及科学研究之中. 微波与物质相互作用所发生的物理现象, 一方面可以研究物质中原子和分子的结构, 另一方面可以研究发生特殊效应的有关机制并开辟新用途 [1]. 铁磁共振是指铁磁介质在恒定外磁场条件下, 对微波段电磁波的共振吸收现象. 铁磁共振早在 1935 年由朗道和栗弗席兹在理论上预言, 直到 1946 年由于微波技术的发展和应用, 才从实验中观察到. 接着波尔德 (Polder) 和侯根 (Hogan) 在深入研究铁磁体的共振吸收和旋磁性的基础上, 发明了铁氧体的微波线性器件, 从而引起了微波技术的重大变革, 因此铁磁共振不仅是磁性材料在微波技术应用的物理基础, 也是研究其宏观性能与微观结构的有效手段. 谐振腔是常用的微波元件之一, 在微波技术中一般用作谐振腔波长计、微波电子管的组成部分或测量腔等 [1].

本实验中, 我们使用反射式速调管作为微波振荡器产生微波, 使用传输式谐振腔载波并使其中的铁氧体样品发生铁磁共振, 通过观察速调管的振荡模, 测量一个振荡模的中心频率和电子调谐范围; 通过观察传输式腔的谐振曲线, 测量腔的有载品质因数. 同时观察铁磁共振, 使用简便方法测量或逐点绘制两种方法, 通过测量输出功率和磁场的关系, 计算得到了回磁比 γ , g 因子和弛豫时间 τ . 熟悉了微波信号源的组成和使用方法, 掌握了有关谐振腔的工作特性的基本知识, 了解了用谐振腔法观测铁磁共振的测量原理和实验条件. 通过观测铁磁共振和测定有关物理量, 认识了磁共振的一般特性.

* email@pku.edu.cn; (86)1*****

II. 实验原理及装置

用传输式谐振腔观测铁磁共振的实验线路如图 1 所示。这是一套在 3cm 波段上进行观测的实验装置，可以做观测传输式腔的工作特性和铁磁共振两方面的实验。

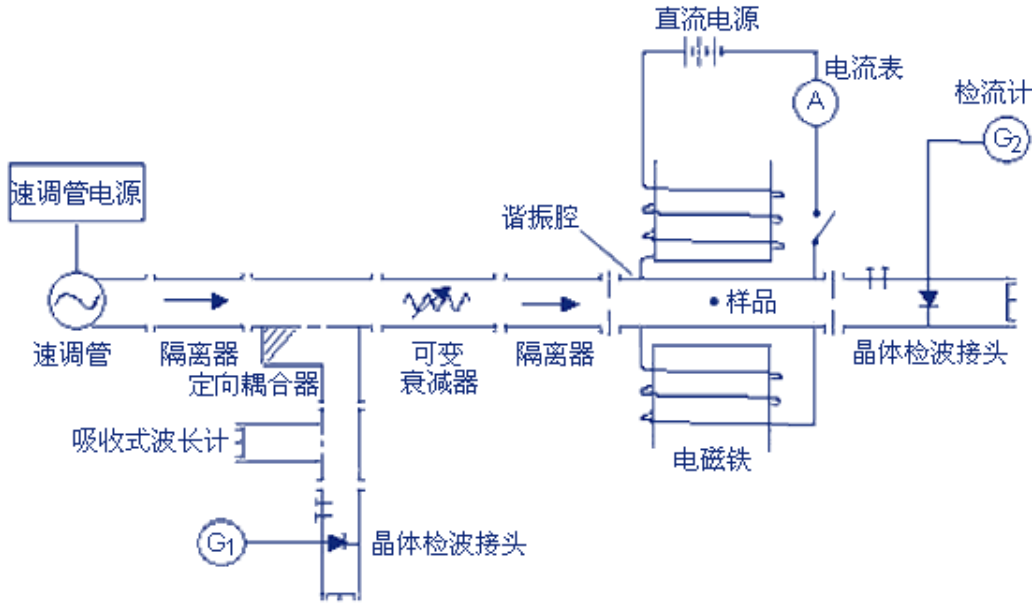


图 1. 观测铁磁共振的实验线路

本实验中使用反射式速调管作为微波振荡器产生微波，这种振荡器要通过稳压电源给反射式速调管提供较高的工作电压，因而耗能较多，但在频率稳定性和噪声方面比固态振荡源要好。反射式速调管主要由阴极、谐振腔和反射极三部分组成。从阴极飞出的电子被谐振腔上的正电压加速，穿过栅网。在反射极反向电压的作用下，驱动电子返回栅网。当满足一定条件时，在谐振腔中产生微波振荡，微波能量由同轴探针输出 [1]。一个振荡模半功率点所对应的频率宽度，称为振荡模的“电子调谐范围”，即 $|f_1 - f_2|$ 。

传输式谐振腔采用 TE_{10p} 型矩形谐振腔，空腔的有载品质因数近似为 2000—3000。谐振腔的品质因数 Q 表示谐振腔频率的高低和频率选择性的好坏，是谐振腔的一个重要参量。传输式腔的传输系数与频率的关系 $T(f)$ 称为谐振曲线。有载品质因数 Q_L 由下式确定：

$$Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|}, \quad (1)$$

式中 f_0 为腔的谐振频率， $|f_1 - f_2|$ 为 $T(f_0)/2$ 所对应的频率间隔。

对于铁磁共振现象，在经典力学的观点下，置于恒定磁场 \mathbf{H} 中的铁氧体，具有磁矩 \mathbf{M} 会受到力矩 $\mathbf{M} \times \mathbf{H}$ 的作用，从而在这个力矩的驱动下绕磁场以使得磁矩围绕磁场以角频率 $\omega = \gamma \mathbf{H}$ 进动，也被称为拉莫进动 (Larmor precession)。由于铁氧体内部阻尼的存在，会使得进动逐渐衰减。当外加微波磁场的角频率与进动角频率相等时，磁矩可以吸收微波的能量维持进动，发生共振现象。从量子力学的观点来看，微波铁氧体样品处于直流电源激励的恒磁场和谐振腔的微波磁场中，样品由于塞曼效应出现能级分裂，当电磁场的量子 $h\omega$ 等于系统两个相邻塞曼能级间的能量差时，就发生共振现象。

样品是多晶铁氧体小球，直径约 1 mm. 多晶体样品发生铁磁共振时，共振磁场 H_r 与微波角频率满足下列关系式：

$$\omega_r = \gamma H_r, \quad (2)$$

其中

$$\gamma = g \frac{\mu_0 e}{2m}. \quad (3)$$

式中 g 为朗德因子； e 为电子电量； m 为电子质量. 由以上公式可以推出，计算回磁比 γ 的公式为：

$$\gamma = \frac{2\pi f_0}{H_r}, \quad (4)$$

计算 g 因子的公式为：

$$g = \frac{2m\gamma}{\mu_0 e}. \quad (5)$$

当磁场改变时，铁氧体的磁矩 \mathbf{M} 趋于平衡态的过程称为弛豫过程. 弛豫所需的特征时间¹称为弛豫时间. \mathbf{M} 在外加磁场方向的分量趋于平衡值所需的特征时间称为纵向弛豫时间 τ_1 ； \mathbf{M} 在垂直于外加磁场的分量趋于平衡值的特征时间称为横向弛豫时间 τ_2 . 在一般情况下， $\tau_1 \approx \tau_2$, $\tau_2 = 2/\gamma\Delta H$ ，为了方便，把 τ_1, τ_2 统称为弛豫时间 τ ，则有

$$\tau = \frac{2}{\gamma\Delta H}. \quad (6)$$

晶体检波接头满足平方律检波，这时检波电流表示相对功率. 微安表 G1 用来监测速调管的输出功率；检流计 G2 用来测量传输式谐振腔的输出功率. 电磁铁提供 $0 - 5 \times 10^5 \text{ A/m}$ 的磁场.

在实验过程中，我们首先要打开信号发生器电源，预热 10 分钟，将断-连续-调制旋钮置于连续位置，衰减旋钮置于衰减量最小处. 调节反射极旋钮，电流面板上的读数出现不变—增大—减小—不变—增大的变化，并调节检波电流旋钮至合适位置，使电流的最大读数在面板量程 $3/4$ 附近. 对于开始增大到结束减小的一个振荡模中，记下最大电流刻度 I ，调节波长表旋钮，使电流减到最小，记下该频率读数，即为中心频率 f_0 . 调节波长表旋钮使其失谐，再分别顺时针和逆时针调节波长表旋钮，在电流读数为最大读数的一半时，用同上方法调节波长表旋钮，记录对应的频率 f_1, f_2 ，相减得到电子调谐范围 $|f_1 - f_2|$.

其次，打开检流计，在信号发生器的电流最大位置的附近慢慢调节反射极旋钮，检流计的读数非匀速地由小变大再变小，即为谐振曲线. 将可变衰减器置于合适的位置，使检流计的最大读数能被观测到，观察检流计的读数达到最大值的时候，就是谐振腔达到谐振的位置. 调节波长表旋钮，记录对应的频率，同时记录检流计最大值所对应的格数 P . 再分别顺时针和逆时针调节波长表旋钮，在检流计读数为最大读数的一半时，调节波长表旋钮，记录对应的频率，即 f_1, f_2 ，利用 式 (1) 即可算出有载品质因数.

然后，先用简便方法测量铁磁共振. 确认变阻器的阻值调到了最大值后，打开直流电源. 对谐振腔调谐振后改变变阻器阻值，观察到在很大的阻值范围内，检流计的读数

¹ \mathbf{M} 在趋于平衡态过程中与平衡态的偏差量减少到初始值 $1/e$ 时所经历的时间.

几乎没有变化，但在一个小范围内，检流计读数先变小，再变大。记录检流计最大读数 P_{\max} ，最小读数 P_r 及中点读数，以及它们所对应的电流表的读数。注意此处的中点即半共振点需要对频散效应进行修正，对应的功率为

$$P_{1/2} = \frac{2P_{\max}P_r}{P_{\max} + P_r}. \quad (7)$$

重复上述步骤 3 次取平均值，利用电流表读数查表得到 H ，即可确定共振磁场 H_r 和线宽 ΔH 。

最后，逐点测量 $P-H$ 曲线。将变阻器阻值调到略大于检流计读数开始有变化的位置，对谐振腔调谐振。再改变变阻器的阻值，逐点测检流计读数 P ，以及对应的电流表读数 I ，直到检流计的读数再次稳定，测 20 到 40 个点，查表得到 H ，绘制 $P-H$ 曲线。进而利用两种方法确定的 H_r 和 ΔH 之值，计算回磁比 γ ， g 因子和弛豫时间 τ 。

III. 结果与讨论

A. 观测速调管的振荡模

测量一个振荡模的中心频率和电子调谐范围的结果如表 I 所示，在此次实验的仪器上只能观察到 1.5 个振荡模，故测量只能围绕其中完整的振荡模展开。其中 I 为最大电流， f_0 为中心频率， f_1 和 f_2 为电流表度数为最大读数一半时的频率。

表 I. 一个振荡模的中心频率和电子调谐范围

I	f_0	f_1	f_2	$\Delta f = f_1 - f_2 $
49 μA	9213.44 MHz	9177.10 MHz	9234.99 MHz	57.89 MHz

B. 观测传输式谐振腔的谐振曲线

测量谐振腔的有载品质因数的结果如表 II 所示，其中 I 为最大电流刻度， f_0 为中心频率， f_1 和 f_2 为电流表度数为最大读数一半时的频率， Q 为有载品质因数， $Q = 2080$ 说明谐振腔的品质较好。

表 II. 谐振腔的有载品质因数测量

I	f_0	f_1	f_2	$Q = f_0/ f_1 - f_2 $
49 μA	9216.19 MHz	9214.29 MHz	9218.72 MHz	2080

C. 观测铁磁共振

用简便方法测量共振磁场 H_r 和线宽 ΔH 的结果如表 III 所示，其中 H_1 和 H_2 为半共振点对应的磁场。

表 III. 简便方法测量铁磁共振, 单位均为 Oe

	H_r	H_1	H_2	$\Delta H = H_1 - H_2 $	$\overline{H_r}$	$\overline{\Delta H}$
1	3288.35	3156.30	3438.47	282.17		
2	3288.35	3435.69	3121.55	314.14	3293.91	297.00
3	3305.03	3139.62	3434.30	294.68		

通过表中数据, 利用 式 (4), 式 (5), 式 (6), 计算得到

$$\gamma = 17.58 \text{ MHz/Oe} = 2.21 \times 10^5 \text{ m}/(\text{A} \cdot \text{s}), g = 2.00002, \tau = 3.83 \times 10^{-10} \text{ s}.$$

逐点测绘 $P - H$ 曲线的结果如 图 2 所示, 根据曲线确定 $H_r = 3303.64 \text{ Oe}$, $\Delta H = 250.17 \text{ Oe}$.

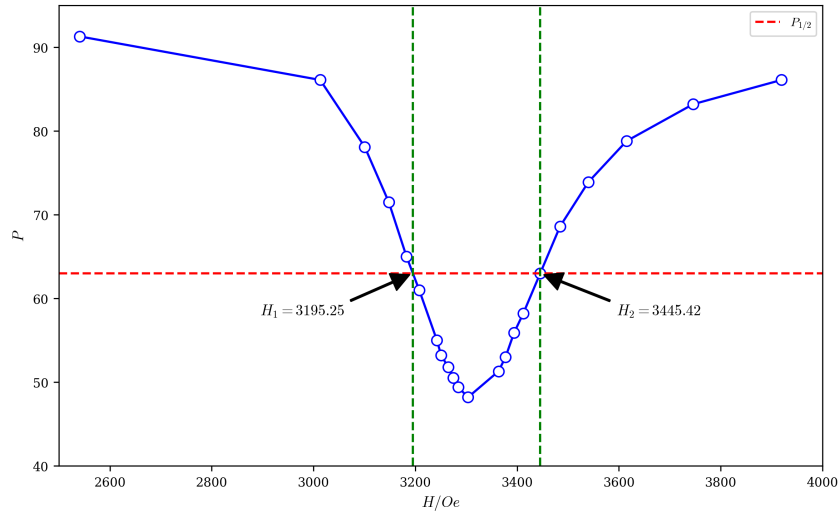


图 2. 输出功率 P 与磁场 H 的曲线

同样可以计算得到

$$\gamma = 17.53 \text{ MHz/Oe} = 2.2 \times 10^5 \text{ m}/(\text{A} \cdot \text{s}), g = 1.991, \tau = 4.56 \times 10^{-10} \text{ s}.$$

比较两种方法的观测结果, 可以看到共振磁场的差别不大, 但是线宽两者相比有较大区别. 两种方法计算得到的回磁比 γ , g 因子和弛豫时间 τ 基本相近, 至少在数量级上是一致的.

使用简便方法测量的误差可能主要有如下几个来源:

1. 简便方法测量会有滞回现象带来的回程差.
2. 测量曲线时长时间大功率运行使线圈发热带来的温度波动, 引起电阻改变等.
3. 实验中磁场的不均匀性.
4. 样品与腔体的耦合误差.

IV. 结论

本实验我们使用反射式速调管作为微波振荡器产生微波，使用传输式谐振腔载波并使其中的铁氧体样品发生铁磁共振，通过观察速调管的振荡模，测量一个振荡模的中心频率和电子调谐范围；通过观察传输式腔的谐振曲线，测量腔的有载品质因数。同时观察铁磁共振，使用简便方法测量或逐点绘制两种方法，通过测量输出功率和磁场的关系，计算得到了回磁比 γ ， g 因子和弛豫时间 τ ，两种方法计算出的 g 因子均近似为 2.0。熟悉了微波信与源的组成和使用方法，掌握了有关谐振腔的工作特性的基本知识，了解了用谐振腔法观测铁磁共振的测量原理和实验条件。通过观测铁磁共振和测定有关物理量，认识了磁共振的一般特性。

致谢

感谢杨东逸同学协力完成了本实验，感谢杨金波老师在实验中的讲解和指导。

[1] 吴思诚，荀坤，近代物理实验，4th ed. (高等教育出版社，北京，2015).

附录 A: 思考题

1. 计算你测量用的矩形谐振腔的腔长 (已知: 腔的尺寸 $a = 22.86 \text{ mm}$, $b = 10.16 \text{ mm}$, 振荡模式 TE_{108} , 谐振频率 f_0). 讨论样品可放在腔内哪些位置.

波导波长:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}, \lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = 4.6 \text{ cm}.$$

矩形谐振腔的腔长:

$$l = p \times \frac{\lambda_g}{2} = 18.4 \text{ cm}$$

样品可以放在腔内微波磁场最大、微波电场为零的位置, 即 $x = 0/a, y$ 任意, $z = kl/8, k = 0, 1, \dots, 8$ 的位置上.

2. 画出 $\mu'' - H$ 曲线, 并标明 H_r 和 ΔH 之值.

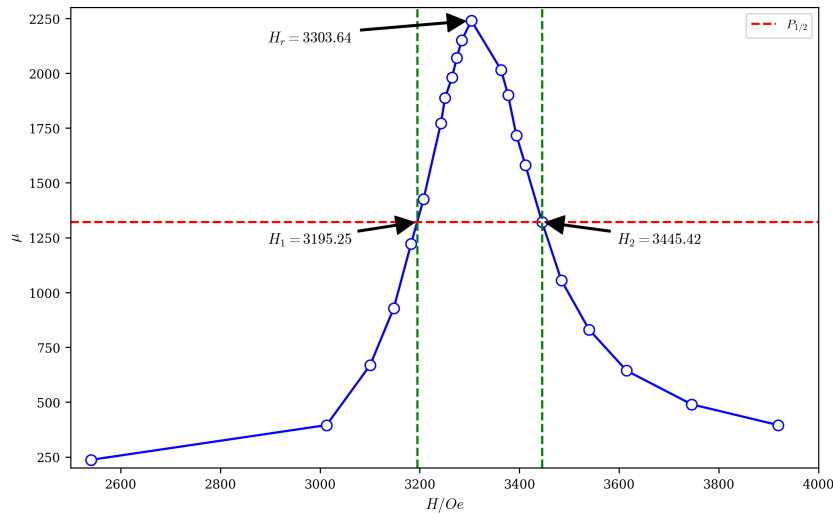


图 3. $\mu'' - H$ 曲线, $\Delta H = 250.17 \text{ Oe}$