

# 铁磁共振

张钰 201211141007

指导教师：王海波

2014-3-26

**摘要：**本实验首先观察谐振腔的谐振性质，根据谐振曲线求出品质因数；采用示波器法和逐点法分别观测单晶样品和多晶样品的共振曲线，再通过高斯计得到电磁铁电流与磁场强度的关系，进而计算单晶和多晶样品的旋磁比、g 因子和弛豫时间。

**关键词：**铁磁共振；品质因数；旋磁比；g 因子；弛豫时间

## 1.引言

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材料的 g 因子、共振线宽、弛豫时间等性质。

本实验要求能够熟悉微波传输中常用的元件及其作用，掌握传输式谐振腔的工作特征，了解用谐振腔观察铁磁共振的基本原理和实验条件。

## 2.实验原理

### 2.1 铁磁共振原理

在铁磁材料中，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  $M_s$  表示，不同磁畴  $M_s$  的方向是不一致的。由于铁磁具有很大的磁化率，所以只需要加很小的外磁场，就能够调节  $M_s$  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  $H_0$ （沿 z 轴）和微波交变磁场  $h$  的作用时，恒定磁场  $H_0$  使磁体饱和磁化，当磁化强度矢量  $M_s$  原来的平衡方向与  $H_0$  有夹角时， $M_s$  将绕  $H_0$  进动，其频率为

$$\omega_0 = \gamma H_0, \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为铁磁体材料的旋磁比，即

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

式中  $g$  为朗德因子,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $e$  和  $m$  分别为电子的电量和质量。

在进动过程中, 由于磁矩受到阻尼作用而使进动的振幅衰弱, 当进动角频率等于外加微波磁场角频率  $\omega_0$  时,  $M_s$  吸收其能量用以维持进动, 此时即发生铁磁共振。此时, 铁磁体的磁导张量可表示为

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

它的元素是复数, 其中

$$\mu = \mu' - i\mu'', \kappa = \kappa' - i\kappa'', \mu_z = \mu'_z - i\mu''_z, \quad (4)$$

各元素的实部表示材料的色散特征, 而虚部表示损耗特征。

当固定铁磁体所处微波磁场的频率为  $\omega_0$  改变  $H$  大小。当满足 (1) 时, 发生共振现象 (图 1)。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:

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H}, \quad (5)$$

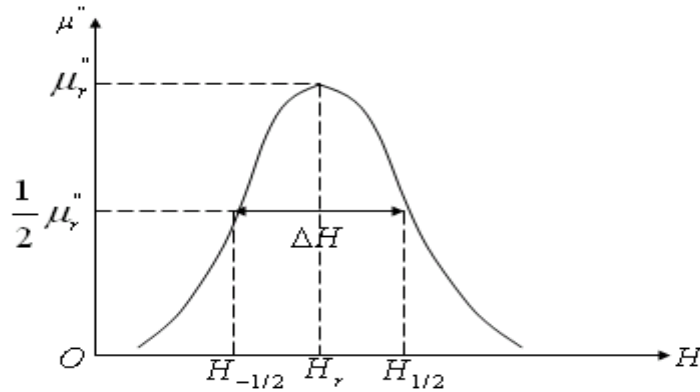


图 1 铁磁共振曲线

## 2.2 传输式谐振腔

谐振腔是微波系统中的重要原件, 它可将特定频率的微波限制在一定的几何空间内。微波波段的谐振腔按几何形状可分为矩形谐振腔、圆形谐振腔、同轴谐振腔等, 按使用的材料分为金属谐振腔、介质谐振腔等。本实验中采用的是传输式金属矩形谐振腔。

### 2.2.1 谐振腔的谐振条件

当谐振腔发生谐振时，腔长  $l$  必须是半个波导波长的整数倍，即

$$l = p \frac{\lambda_g}{2} \quad (p=1,2,3,\dots), \quad (6)$$

其中  $\lambda_g$  为微波的波导波长。对于  $TE_{10}$  波有

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \lambda = \frac{c}{f}, \quad (7)$$

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。

### 2.2.2 震荡模式

实验室使用的矩形波导内传输的电磁场通常为  $TE_{10}$  波，产生谐振时，腔内的电磁场分布必须用三个角标来描述，记为  $TE_{10p}$ ，成为振荡模式。角标  $p$  表示场沿谐振腔长度上的半波数。

### 2.2.3 品质因数

谐振腔的固有品质因数的定义为

$$Q_0 = \omega_0 \frac{\text{谐振时总的储能}}{\text{损耗功率}}, \quad (8)$$

$Q_0$  值的高低表示谐振效率的高低和频率选择性的好坏。

### 2.2.4 谐振曲线

谐振腔的传输系数与频率的关系曲线  $T(f)$  成为谐振腔的谐振曲线，如图 2 所示。谐振曲线越窄，谐振腔的频率选择性越好。

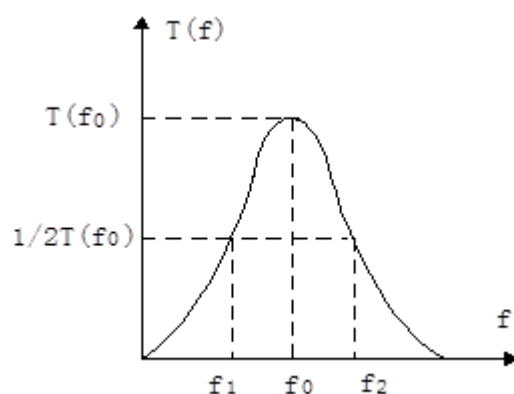


图 2 传输式谐振腔的谐振曲线

此时品质因数可表示为

$$Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|}, \quad (9)$$

式中  $f_0$  为谐振腔的谐振频率,  $|f_1 - f_2|$  为传输系数为  $T(f_0)/2$  的两点所对应的频率间隔。

## 2.3 用传输式铁磁腔测量铁磁共振线宽的原理

### 2.3.1 谐振腔的微扰公式

把铁磁体样品放入谐振腔中, 会引起谐振腔的谐振频率和品质因数的变化。如果变化很小, 可以当做是一个微扰, 则当样品处于腔内微波磁场最大, 微波电场最小时, 以  $TE_{10p}$  型谐振腔为例, 可得到

$$\frac{f - f_0}{f_0} = -A(\mu' - 1), \Delta\left(\frac{1}{Q_L}\right) = 2A\mu'', \quad (10)$$

式中  $\Delta\left(\frac{1}{Q_L}\right)$  为放进样品前后谐振腔的有载品质因数的倒数的变化,  $\mu'$  和  $\mu''$  分别表示磁导率张量对角元  $\mu$  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熟。通常

$$A = \frac{2}{\left[1 + \left(\frac{l}{ap}\right)^2\right]} \cdot \frac{V_s}{V_0}, \quad (11)$$

其中  $V_s$  和  $V_0$  分别是样品和谐振腔的体积。

### 2.1.2 用传输式谐振腔测量铁磁共振

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, 外磁场的方向与微波磁场分量垂直。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, 且始终保持谐振, 微波输入功率保持恒定, 则谐振腔的传输系数可以写为

$$T(f_0) = \frac{P_{\text{出}}(f_0)}{P_{\text{入}}(f_0)} = \frac{4Q_L^2}{Q_{e1}Q_{e2}}, \quad (12)$$

式中  $Q_{e1}, Q_{e2}$  分别为输出孔和输入孔的外观品质因数。通过测量谐振时的输出功

率  $P$  和恒定磁场  $H$  的关系曲线（图 3）再按公式就能求出  $\Delta H$ 。半共振点可以表示为

$$P_{1/2} = \frac{4P_0}{\left(\sqrt{P_0/P_r} + 1\right)^2}, \quad (13)$$

如果不逐点调谐测量， $\Delta H$  的值就应用下式进行修正

$$P_{1/2} = \frac{2P_0P_r}{P_0 + P_r}, \quad (14)$$

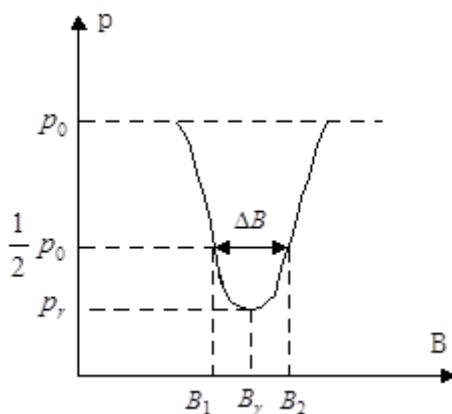


图 3 传输式谐振腔的输出功率  $P$  与磁场强度  $H$  的关系曲线

### 3. 实验方法

#### 3.1 实验装置

用传输式谐振腔观测铁磁共振的实验装置图如图 4 所示。本实验是在 3cm 微波波段进行的，传输式谐振腔采用  $TE_{10p}$  矩形谐振腔，样品直径约为 1-2mm 的多晶或单晶铁氧体小球。电磁铁提供外磁场强度为 0-4500oe.

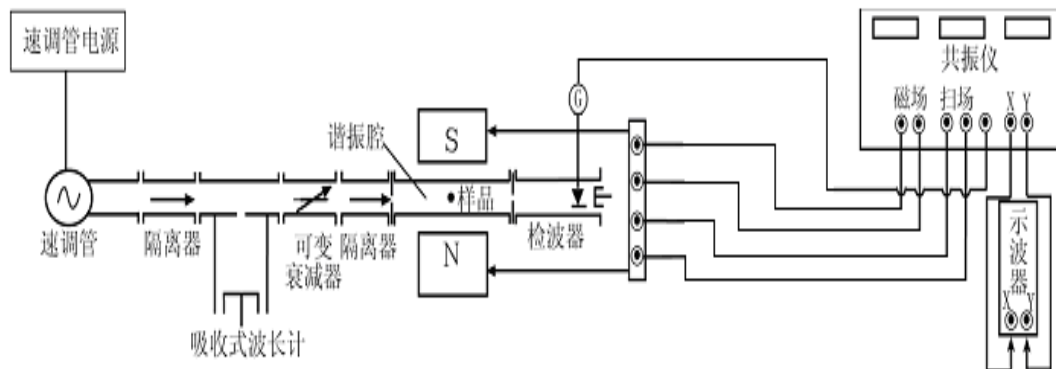


图 4 用传输式谐振腔测量铁磁共振的微波线路示意图

## 3.2 实验内容

(1) 观察谐振腔的谐振性质

(2) 观察铁磁共振

通过电子调谐方法，使速调管的输出频率为谐振腔的谐振频率；

分别测量单晶和多晶样品的共振线宽；

用高斯计测量电磁铁电流与磁场强度的关系；

计算样品的旋磁比、g 因子和弛豫时间；

比较分析两种样品测量结果

## 4. 实验数据及分析

### 4.1 观察谐振腔的谐振性质

首先根据理论估计谐振腔的谐振频率：

当  $a = 2.295\text{cm}$ ,  $P = 8$ ,  $l = 19.30\text{cm}$  时,  $\lambda_g = \frac{2l}{P} = \frac{2 \times 19.3\text{cm}}{8} = 4.825\text{cm}$ , 跟据公

式  $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$ ,  $\lambda = \frac{c}{f}$  可得:  $\lambda = 3.3265\text{cm}$ , 进而得到谐振腔的谐振频率

$$f = \frac{c}{\lambda} = 9.02 \times 10^9 \text{ Hz}。$$

用示波器观察速调管的谐振模式，可观测到示波器的波形如图 5 所示。可以看出在每一个峰的中间位置有一个小的吸收峰，这是由于微波与谐振腔达到共振现象。通过改变波长计的读数来改变吸收峰的位置，使吸收峰刚好位于 A 点和 B 点，再根据波长计与频率的换算关系得到速调管输出频率。

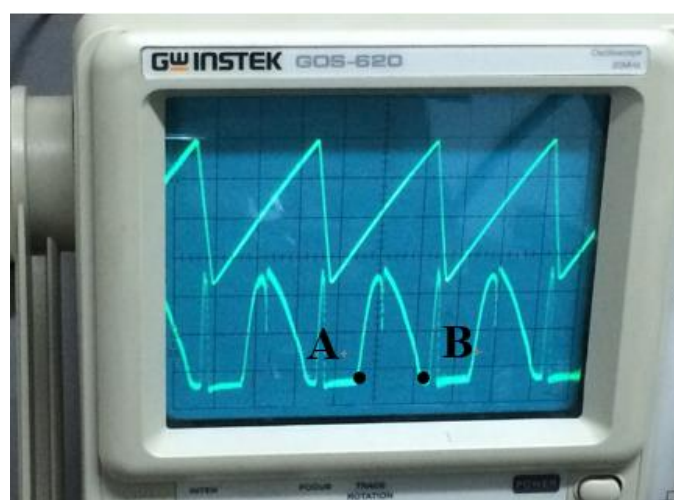


图 5 速调管在锯齿波调频时的特性

由实验结果可知，波长计的读数为  $7.95mm \sim 8.32mm$ ，对应的频率为  $8.99 \times 10^9 Hz \sim 9.03 \times 10^9 Hz$ ，因此谐振腔的谐振频率在速调管输出频率范围之内。

为观测谐振腔的谐振特性，把传输式谐振腔两侧加入金属耦合片。这是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，如果波形和频率合适，就会产生驻波，发生谐振现象。通过调节锯齿波的幅度、检波器的调谐旋钮，可以观测到理想的谐振腔谐振曲线如图 6 所示。由传输式谐振腔的谐振曲线可知： $T(f_0) = 3.6V$ ， $f_0 = 9012.0MHz$ （波长计的读数为  $8.142mm$ ，通过换算得到）， $\frac{T(f_0)}{2} = 1.8V$  对应的频率  $f_1 = 8996.5MHz$ ， $f_2 = 9026.5MHz$ （波长

计的读数分别为  $8.298mm, 8.002mm$ ，通过换算得到），因此可以求出有效品质因数  $Q = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} = 300.4$ 。

## 4.2 观察铁磁共振

将铁磁共振仪连入微波线路，并通过电子调谐的方法，使速调管的输出频率为谐振腔的谐振频率，调节反射极的电压和检波器调谐旋钮，使微波信号达到最强  $H_0 = -151.8V$ ，波长表读数为  $8.245mm$ ，即可得速调管的输出频率即共振频率为  $9001.5MHz$ 。

### 4.2.1 采用示波器观测单晶样品的共振曲线

将单晶样品放入谐振腔，将铁磁共振仪设为扫场方式，扫场电压调至适当幅度，调节磁场电流，用示波器观察到单晶的铁磁共振信号如图 6 所示。



图 6 单晶的铁磁共振信号

将铁磁共振仪设为检波，将单晶样品放入谐振腔，从小到大调节磁场电流，可得远离共振点对应的检波电流为  $p=100\mu A$ ，共振点对应的检波电流为

$$p_r=87\mu A, \text{ 因此可得 } p_{1/2}=\frac{2p_r p_0}{p_r+p_0}=93.0\mu A。$$

将铁磁共振仪设为扫场方式，首先利用共振吸收峰对示波器的屏幕定标，为了减小误差，实验中测量示波器的 4 个方格，得到 4 个方格对应电流从 1.524A 变到 1.576A，因此示波器一个方格对应的电流为 0.01075A。根据计算出的  $p_r$ ，

$$\text{利用比例关系 } \frac{p_0-p_r}{p_{1/2}-p_r}=\frac{62.5}{h}, \text{ 可知 } h=30.33, \text{ 即需要调节示波器横测量线位置,}$$

使示波器显示的两条线电压在 30.33V（如图 7 线 A、B 所示）。由于 A 线与 x 轴的两交点间隔 1.4 格，因此对应单晶样品共振线宽  $\Delta H=1.4\times 0.01075A=0.0151A$ 。

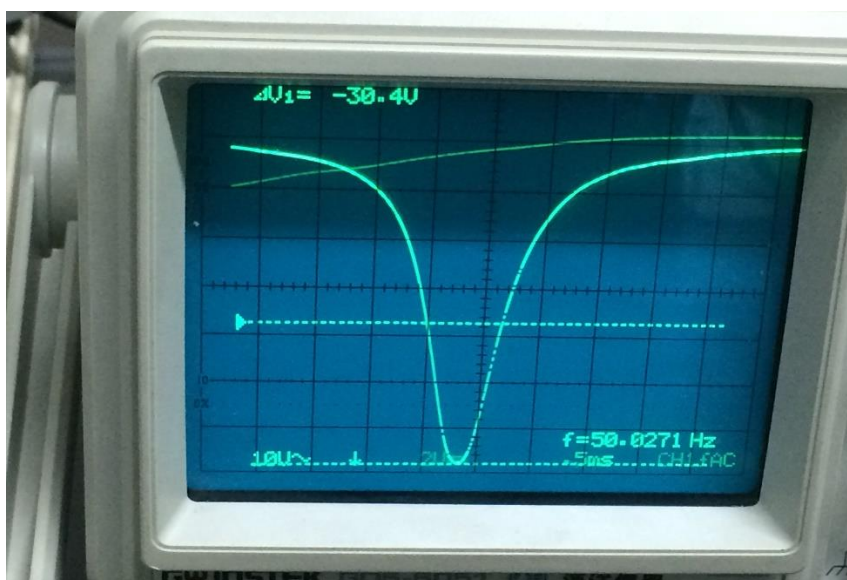


图 7 对示波器屏幕定标

#### 4.2.2 采用逐点法观测多晶样品的共振曲线

将多晶样品放入谐振腔，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如图 8 所示。



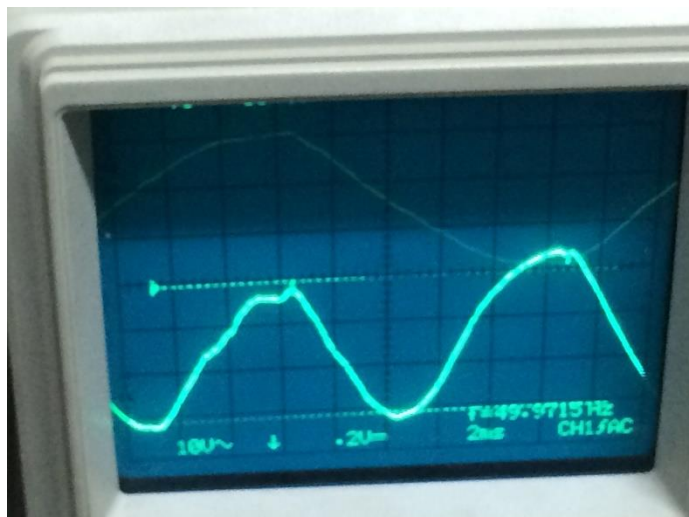


图 8 多晶样品共振曲线

将铁磁共振仪设为检波, 从小到大调节磁场电流, 用逐点法测量样品的共振曲线, 绘制的 P-H 图如图 10 所示。

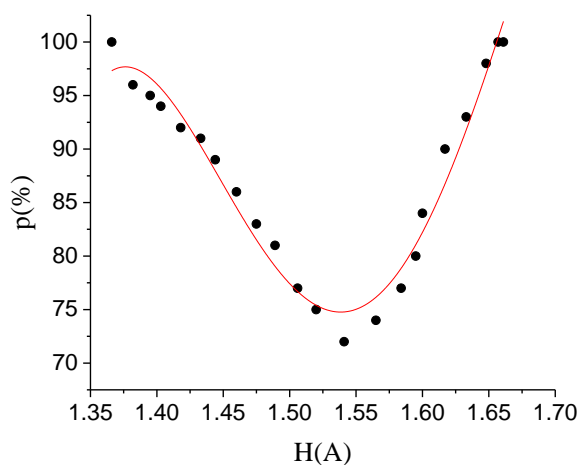


图 10 逐点法测量多晶样品的共振曲线图

由图可知, 远离共振点对应的检波电流为  $p=100\%$ , 共振点对应的检波电流为

$p_r = 72\%$ , 因此可得  $p_{1/2} = \frac{2p_r p_0}{p_r + p_0} = 83.72\%$ , 多晶样品共振线宽  $\Delta H = 0.125\text{A}$ 。

为了确定电磁铁电流与磁场强度关系, 用高斯计进行定标, 测量电磁铁电流与磁场强度关系的曲线如图 11 所示, 在误差允许范围内呈线性关系:  
 $B = 0.2126I + 0.0318$ 。

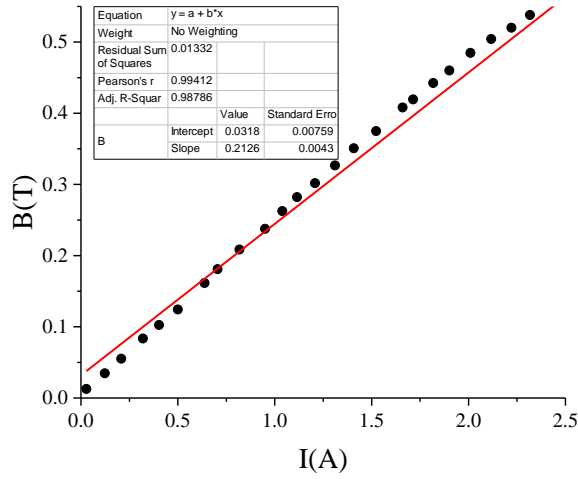


图 11 电磁铁电流与磁场强度关系的曲线

根据实验数据可知，对于单晶样品，达到共振时电流为 1.5A，对应磁场  $B = 0.2126I + 0.0318 = 0.3507T$

$$\gamma = \frac{\omega_0}{H_0} = \frac{2\pi f_0}{B / \mu_0} = \frac{2\pi \times 9012MHz \times 4\pi \times 10^{-7}}{0.3507} = 2.03 \times 10^5 Hz / T$$

$$g = \frac{2m\gamma}{\mu_0 e} = \frac{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 2.03 \times 10^5}{4\pi \times 10^{-7} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.84$$

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H} = \frac{2}{2.03 \times 10^5 \times 0.0151} = 6.5 \times 10^{-4} s$$

对于多晶样品，达到共振时电流为 1.54A，对应磁场  $B = 0.2126I + 0.0318 = 0.359T$

$$\gamma = \frac{\omega_0}{H_0} = \frac{2\pi f_0}{B / \mu_0} = \frac{2\pi \times 9012MHz \times 4\pi \times 10^{-7}}{0.359} = 1.98 \times 10^5 Hz / T$$

$$g = \frac{2m\gamma}{\mu_0 e} = \frac{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.98 \times 10^5}{4\pi \times 10^{-7} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.79$$

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H} = \frac{2}{1.98 \times 10^5 \times 0.125} = 8.08 \times 10^{-5} s$$

## 5. 实验总结

本实验首先观察谐振腔的谐振性质，根据谐振曲线求出品质因数为 300.4；通过高斯计得到电磁铁电流与磁场强度的关系为  $B=0.2126I+0.0318$ ，采用示波器法观测单晶样品的共振曲线，得到共振电流为 1.50A，对应磁场 0.3507T，旋磁比  $\gamma=2.03\times 10^5 \text{ Hz/T}$ ，g 因子  $g=1.84$ ，弛豫时间  $\tau=6.5\times 10^{-4} \text{ s}$ ，并利用逐点法观测多晶样品的共振曲线，得到共振电流为 1.54A，对应磁场 0.359T，旋磁比  $\gamma=1.98\times 10^5 \text{ Hz/T}$ ，g 因子  $g=1.79$ ，弛豫时间  $\tau=8.08\times 10^{-5} \text{ s}$ 。

## 6. 参考文献

[1] 熊俊主编 北京师范大学出版社，《近代物理实验》，2007 年 8 月