

用传输式谐振腔观测铁磁共振

西瓜^{*}, 罗老师[†]

北京大学 物理学院, 北京 100871

【摘要】 当铁磁材料处于外磁场时, 特定频率的电磁波被材料共振吸收的现象称为铁磁共振 (FMR)。铁磁共振具有磁共振的一般特性, 被广泛应用于光谱技术、高频电子设备等领域。本实验使用反射式速调管作为微波信号源, 观测了速调管的振荡模和传输式谐振腔的谐振曲线, 得到了谐振腔的有载品质因数。在传输式谐振腔中, 逐点测绘多晶铁氧体样品对微波的吸收曲线, 观测到了铁磁共振效应。通过测量共振磁场和共振线宽, 计算出了样品的 g 因子和弛豫时间。

【关键词】 铁磁共振, 传输式谐振腔

Observation of ferromagnetic resonance using a transmission resonant cavity

Xisense, Prof. Luo

Physics Institute, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: When ferromagnetic materials are subjected to an external magnetic field, the phenomenon in which electromagnetic waves of a specific frequency are resonantly absorbed by the material is called ferromagnetic resonance (FMR). Ferromagnetic resonance has the general characteristics of magnetic resonance and is widely used in fields such as spectroscopic technology and high-frequency electronic devices. This experiment used a reflective klystron as the microwave signal source, observed the oscillation mode of the klystron and the resonance curve of the transmission resonant cavity, and obtained the on load quality factor of the resonant cavity. In the transmission resonant cavity, the absorption curve of polycrystalline ferrite samples towards microwaves was measured point by point, and the ferromagnetic resonance effect was observed. The g -factor and relaxation time of the sample were calculated by measuring the resonance magnetic field and resonance linewidth.

Key Words: Ferromagnetic resonance, transmission resonant cavity

1 引言

谐振腔是常用的微波元件之一^[1], 在微波技术中一般用作谐振腔波长计^[2]、微波电子管^[3-4]的组成部分或测量腔等。微波磁共振是微波与物质相互作用所发生的物理现象, 磁共振方法已被广泛用来研究物质的特性、结构和弛豫过程。铁磁共振具有磁共振的一般特性, 而且效应显著, 用简单装置就可以进行观测。

铁磁共振现象在 1911 年被首次观测。1935 年, 物理学家朗道和利夫希兹预测了拉莫尔进动会导致铁磁共振效应。这种效应广泛应用于光谱技术和高频电子设备领域。FMR 光谱技术用于探测铁磁材料的磁化强度, 是探测自旋波和自旋动力学的标准工具。

本实验使用反射式速调管^[5]作为微波信号源, 在传输式谐振腔中, 观测多晶铁氧体样品的铁磁共振效应。实验旨在通过观测铁磁共振和测定有关物理量, 掌握微波信号源的使用方法和谐振腔的工作特性, 了解用谐振腔法观测铁磁共振的测量原理和实验条件, 加深磁共振的一般特性的理解。

*email: xisense_wyx@stu.pku.edu.cn

2 理论

2.1 传输式谐振腔

2.1.1 谐振条件

一个封闭的金属导体空腔可以用来做微波谐振腔。由一段标准矩形波导管，在其两端加上带有耦合孔的金属板，就构成一个传输式谐振腔。谐振腔发生谐振时，腔内电磁波为驻波，腔长与波导波长满足：

$$l = p \cdot \frac{\lambda_g}{2} \quad (2.1)$$

其中， $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{2a})^2}}$ ， $\lambda = \frac{c}{f}$ 。

2.1.2 品质因数与谐振曲线

品质因数(Q值)是用于表明谐振腔效率高低的量。品质因数的一般定义为：

$$Q = \omega_0 \frac{\text{谐振腔内总储能}}{\text{每秒耗能}} = \omega_0 \frac{W_{\text{储}}}{W_{\text{耗}}} \quad (2.2)$$

如图1，微波线路中，微波信号源输出的功率经过隔离器进入谐振腔，然后为检波器所接收。

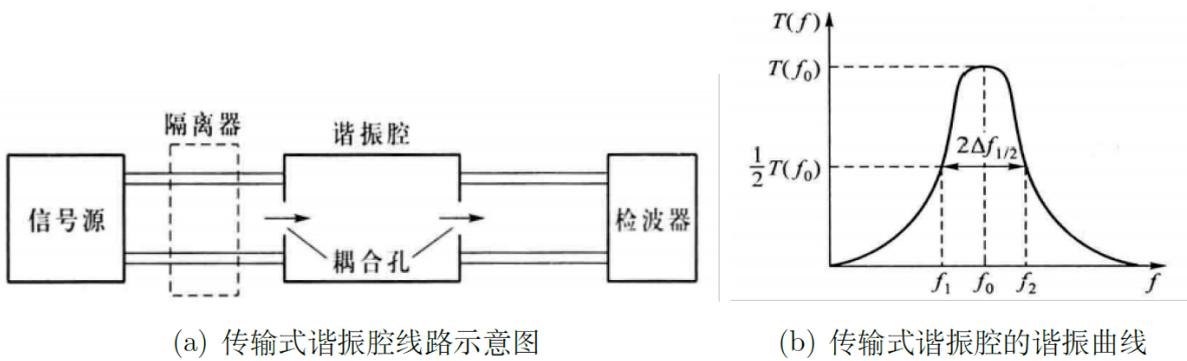


图1 传输式谐振腔的品质因数与谐振曲线^[6]

传输式谐振腔的传输系数 $T(f)$ 定义为：

$$T(f) = \frac{P_{\text{出}}(f)}{P_{\lambda}(f)} \quad (2.3)$$

Q值足够高时，有：

$$T(f) = \frac{T(f_0)}{1 + 4Q_L^2 \left(\frac{\delta f}{f_0}\right)^2} \quad (2.4)$$

其中， $T(f_0) = \frac{4Q_L^2}{Q_{e1}Q_{e2}}$ ， $\Delta f = f - f_0$ 。如图1，传输系数的曲线即为谐振曲线。对于半功率点，有：

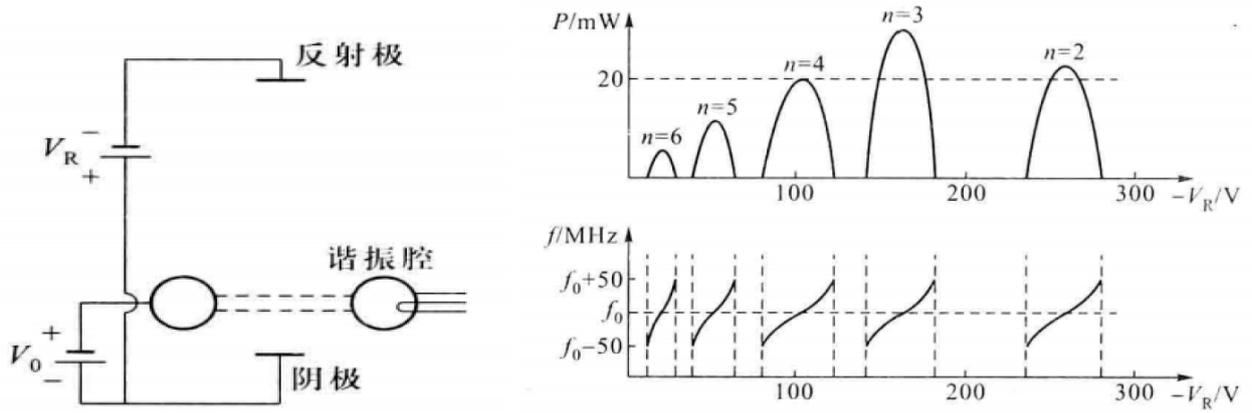
$$Q_L = \frac{f_0}{2\Delta f_{1/2}} \quad (2.5)$$

在微波测量中，先测量谐振腔谐振时的微波频率 f_0 (此时输出功率最大)，然后测量输出功率降至一半时的微波频率 f_1 和 f_2 ，则有载品质因数 Q_L 为：

$$Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} \quad (2.6)$$

2.2 反射式速调管的工作特性

如图2，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，电子返回栅网，从而产生微波振荡。



(a) 反射式速调管的结构原理图

(b) 反射式速调管的特性曲线

图2 传输式谐振腔的品质因数与谐振曲线^[6]

反射式速调管的特性曲线如图2所示。可以看出以下特性：具有分立的振荡模、改变反射极电压会引起微波功率和频率的变化、存在最佳振荡模、各个振荡模的中心频率相同。

反射式速调管的振荡频率可以通过“电子调谐”（改变反射极电压）来小范围调节，或通过“机械调谐”（调节调谐螺钉，改变谐振腔大小）来较大范围调节。

2.3 铁磁共振

处于微波磁场 h 和恒定磁场 H 中的微波铁氧体，微波磁感应强度 b 可表示成：

$$\mathbf{b} = \mu_0 \overset{\leftrightarrow}{\mu} \cdot \mathbf{h} \tag{2.7}$$

其中，

$$\overset{\leftrightarrow}{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

μ, κ 均为复数， μ_z 为实数，即 $\mu = \mu' + i\mu''$, $\kappa = \kappa' + i\kappa''$, $\mu_z = \mu'_z$ 。

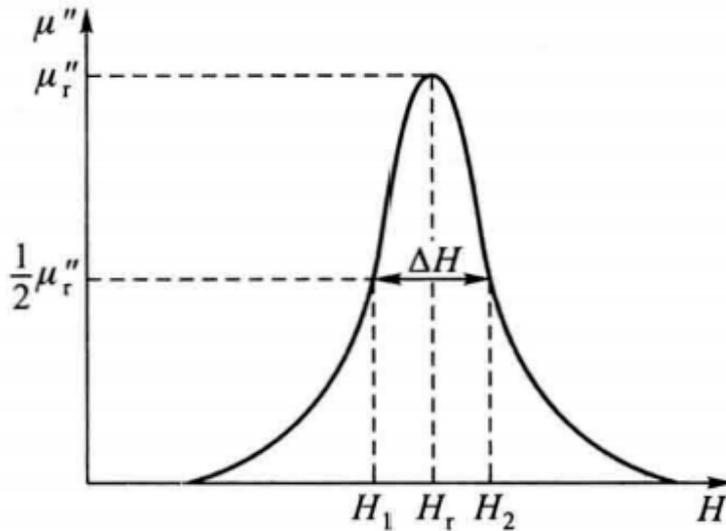


图3 铁磁共振曲线^[6]

微波铁氧体处在频率为 f_0 的微波磁场中，改变恒磁场 H 时，将发生铁磁共振现象。此时 $\mu'' - H$ 曲线上出现共振峰，峰值对应磁场 H_r 称为共振磁场， $\mu'' = \mu''_r/2$ 两点对应磁场间隔 $|H_2 - H_1|$ 称为铁磁共振线宽 ΔH ，表征磁损耗大小。

多晶体样品发生铁磁共振时，满足：

$$\omega_r = \gamma H_r \quad (2.9)$$

其中， $\gamma = g \frac{\mu_0 e}{2m}$ 。当磁场改变时， \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称为弛豫时间，有：

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H} \quad (2.10)$$

2.4 测量铁磁共振线宽的实验方法

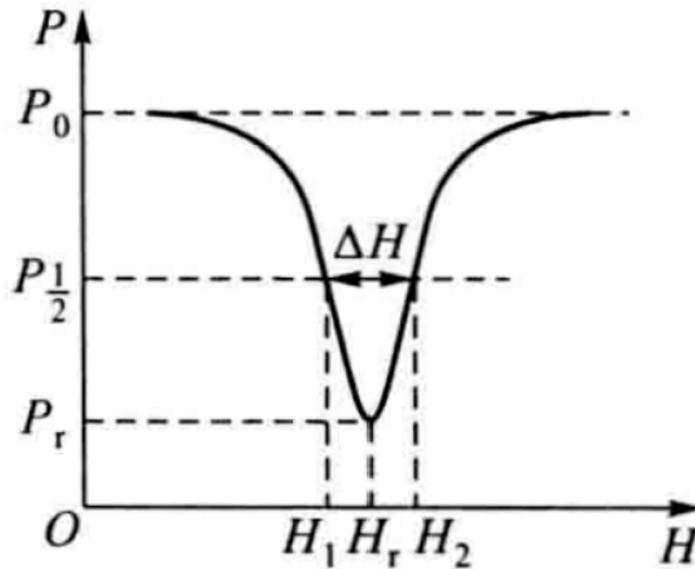


图 4 输出功率 P 与磁场 H 的曲线^[6]

实验过程中，需要满足下列实验条件：

- 球很小，可看成一个微扰，放在腔内微波磁场最大、微波电场为零处
- 谐振腔始终保持在谐振状态
- 微波输入功率保持恒定不变

如果在测量过程中不逐点调谐，而样品的频散效应又不能忽略，可以理论上进行修正。修正后，半功率点对应功率为：

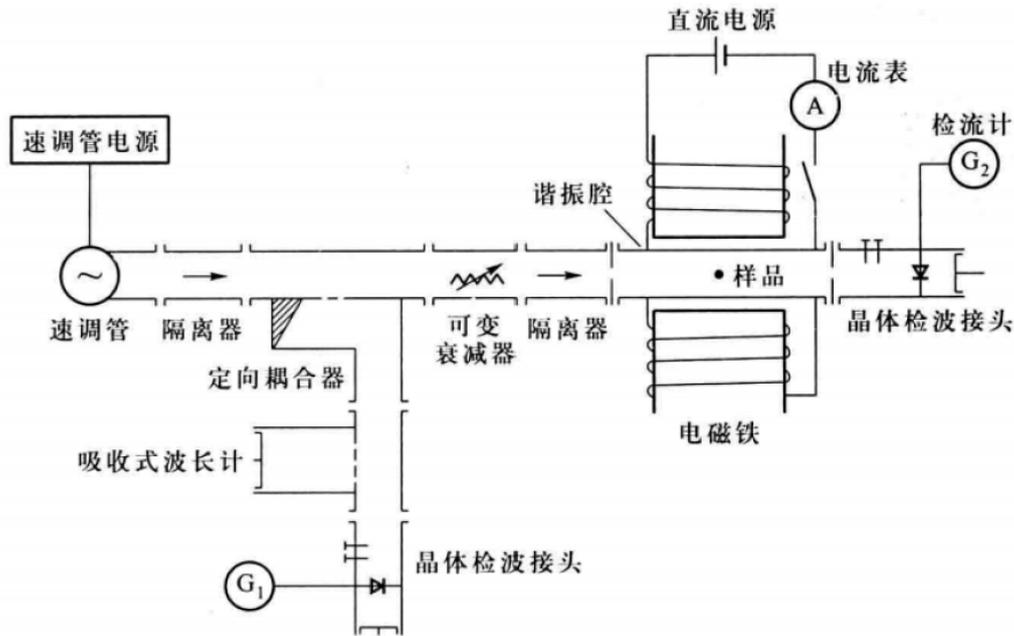
$$P_{1/2} = \frac{2P_0 P_r}{P_0 + P_r} \quad (2.11)$$

在实验中，我们在远离铁磁共振区域保证微波频率与谐振腔谐振，测量 $P-H$ 曲线时不逐点调谐，而利用式 (2.11) 计算出 $P_{1/2}$ ，再从 $P-H$ 曲线上定出 ΔH 。

3 实验

3.1 实验装置

本实验的装置如图5所示。该装置可以在 3cm 波段观测。

图 5 实验线路^[6]

实验中，速调管到第二个隔离器这部分集成在 XFL-2A 厘米波信号发生器中。其中，速调管用于产生微波信号，吸收式波长计和微安表 G1 用于测量微波波长，可变衰减器用于调控输入谐振腔的微波功率。

传输式谐振腔采用 TE_{10p} 型矩形谐振腔。样品为多晶铁氧体小球。

晶体检波接头满足平方律检波，其检波电流表示相对功率 ($I \propto P$)。检流计 G2 使用 AC15/4 直流复射式检流计，用于观测传输式谐振腔的输出功率。

电磁铁用于提供恒定磁场，其中直流电源使用 WYJ-9B 型晶体管稳压电源，电流表使用 PA15A 型直流数字电流表。

3.2 实验步骤

3.2.1 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

- 打开信号发生器，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，观察速调管的振荡模。调节检波电流旋钮，使电流最大读数在量程 3/4 处，此后保持检波电流不变。记录最大电流 I 。
- 调节波长表旋钮，使电流减到最小，此时波长对应中心频率 f_0 。
- 调节波长表旋钮使之失谐。分别朝两个方向调节反射极旋钮，使电流为最大电流的一半。分别测量其对应频率 f_1 , f_2 ，得到电子调谐范围 $|f_1 - f_2|$ 。

3.2.2 观察传输式腔的谐振曲线，测量腔的有载品质因数

- 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，观察谐振曲线。
- 调节反射极旋钮，使检流计示数最大，此时达到谐振状态。调节可变衰减器，使最大电流不超过检流计量程，测量此时的频率和检流计格数 P 。
- 分别朝两个方向调节反射极旋钮，使检流计格数为最大值的一半。分别测量对应频率 f_1 , f_2 ，计算出有载品质因数。

3.2.3 用简便方法测量共振磁场 H_r 和线宽

- 将变阻器阻值调到最大，打开直流电源，并对谐振腔调谐。
- 改变变阻器阻值，记录检流计最大读数 P_{max} ，最小读数 P_r ，中点读数 $P_{1/2}$ ，以及对应的电流表读数。
- 反复测量 3 次，每次都重新进行调谐。
- 查表得到磁场 H 的值，确定共振磁场 H_r 和线宽 $\Delta H = |H_1 - H_2|$ 。

3.2.4 逐点测绘 P-H 曲线

- 将变阻器阻值调至略大于检流计读数开始有变化的位置，并进行调谐。
- 改变变阻器的阻值，逐点记录检流计读数 P 及对应的电流表读数 I 。查表得到 H ，绘制 $P-H$ 曲线。（注意由于磁滞效应，变阻器阻值只能向一个方向变动）

4 实验结果和讨论

4.1 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

调节反射极旋钮，电流呈“不变-增大-减小-不变-增大”的变化趋势，从开始增大到结束减小即对应速调管的一个振荡模。

波长计波长-频率关系为 $f = 10014.79 - 211.27\lambda$ 。测量结果如表1所示：

表 1 速调管振荡模测量数据

$I/\mu A$	λ/mm	f/MHz
52	3.827	9206.26
26	3.833	9204.99
26	3.822	9207.32

该振荡模中心频率 $f_0 = 9206.26MHz$ ，电子调谐范围为 $|f_1 - f_2| = 56MHz$ 。

4.2 观察传输式腔的谐振曲线，测量腔的有载品质因数

在信号发生器的电流最大位置的附近调节反射极旋钮，检流计示数非匀速地由小变大再变小，此即为谐振腔的谐振曲线。

测量结果如表2所示：

表 2 传输式谐振腔的有载品质因数测量数据

P	λ/mm	f/MHz
112	3.778	9216.61
66	3.786	9214.92
66	3.771	9218.09

计算的谐振腔的有载品质因数为 $Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} = 2907.45$ 。

4.3 用简便方法测量共振磁场 H_r 和线宽

电磁铁电流-磁场关系为 $H = 1390I + 140(Oe)$ 。测量结果如表3所示。

由此，分别给出共振磁场和线宽的平均值，共振磁场 $H_r = 3247.11Oe$ ，线宽 $\Delta H = 270.59Oe$ 。计算可得回磁比 $\gamma = 2\pi f_0/H_r$ ，g 因子 $g = 2m\gamma/\mu_0e = 2.028$ ，弛豫时间 $\tau = 2/\gamma\Delta H = H_r/\pi f_0\Delta H = 4.14 \times 10^{-10}s$ 。

表 3 简便方法测量共振磁场和线宽测量数据

i	P_{max}	P_r	$P_{1/2}$	I_r/A	I_1/A	I_2/A	H_r/Oe	$\Delta H/Oe$
1	106.5	58.0	75.0	2.227	2.171	2.367	3235.53	272.44
2	110.0	60.0	77.5	2.227	2.139	2.339	3235.53	278.00
3	109.0	57.0	75.0	2.252	2.146	2.334	3270.28	261.32

4.4 逐点测绘 P-H 曲线

测得 P-H 曲线如图6所示

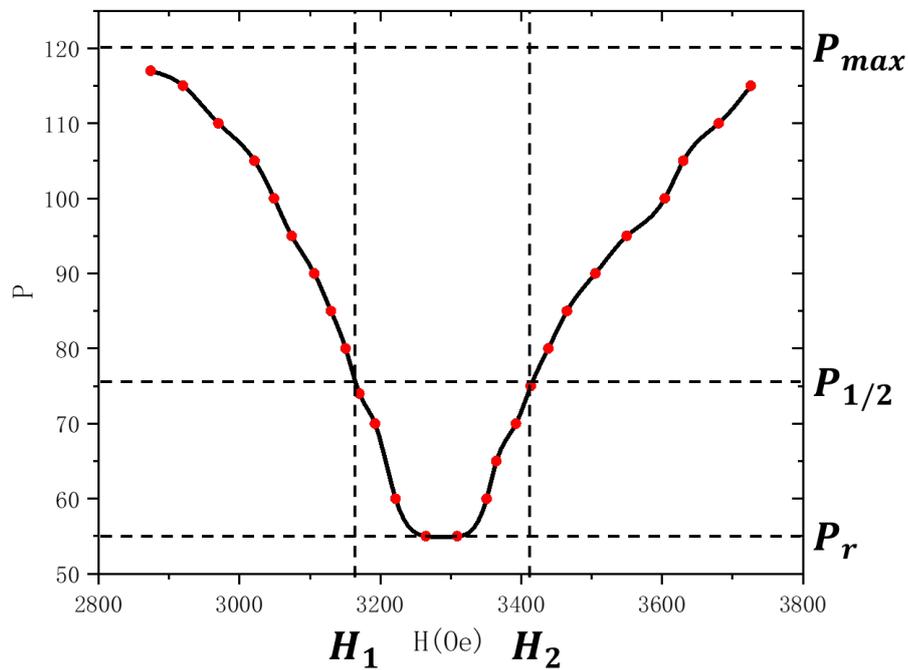


图 6 P-H 曲线

根据曲线，共振磁场 $H_r = 3270Oe$ ，线宽 $\Delta H = 253Oe$ 。计算可得回磁比 $\gamma = 2\pi f_0/H_r$ ，g 因子 $g = 2m\gamma/\mu_0e = 2.013$ ，弛豫时间 $\tau = 2/\gamma\Delta H = 4.49 \times 10^{-10}s$ 。可以看到两种方法得到的结果大体一致，考虑到仪器误差较大，两者的差异在可接受范围内。

5 结论

本次实验中，我们观测了反射式速调管的振荡模，确定了一个振荡模的中心频率以及速调管的电子调谐范围，掌握了微波信号发生器的使用方法。我们观测了传输式谐振腔的谐振曲线，测量了其有载品质因数，了解了谐振腔的工作特性。我们观测了谐振腔中多晶铁氧体小球的铁磁共振效应，通过测量共振磁场和 P-H 曲线线宽，得到了回磁比，g 因子和弛豫时间，加深了对于铁磁共振效应的理解。

致谢

感谢罗昭初老师耐心专业的指导。

参考文献

- [1] ÜNLÜ M S, STRITE S. Resonant cavity enhanced photonic devices[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(2): 607-639.
- [2] ÜNLÜ M S, STRITE S. Resonant cavity enhanced photonic devices[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(2): 607-639.
- [3] GILMOUR JR A S. Microwave tubes[J]. Dedham, 1986.
- [4] BASU B, DATTA S. Microwave tubes and applications[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2017, 31(17): 1771-1774.
- [5] MOTZ H. An analysis of klystron reflector performance[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, 1948, 95(36): 295-301.
- [6] 荀坤吴思成. 近代物理实验 (第四版)[M]. 高等教育出版社, 2015.

附录 A：思考题

1. 谐振腔的谐振频率为 $f_0 = 9217\text{MHz}$ ，对应波长为 $\lambda = c/f_0 = 32.53\text{mm}$ 。

波导波长为 $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\frac{\lambda}{2a})^2}} = 46.29\text{mm}$ 。

则腔长为 $l = p \cdot \frac{\lambda_g}{2} = 185.16\text{mm}$ 。

样品放置位置应满足电场为 0，因此应放置在驻波波节处，即距离谐振腔端面整数个半波长的位置。

2.

- 远离共振点时，调节衰减器，使检波电流为一个较小的值 I ，记录此时的衰减量 A_0 和检波电流 I 。
- 共振点处，降低衰减器的衰减，使检波电流恢复到 I ，记录此时的衰减量 A_r 。
- 利用公式计算出 $A_{1/2}$ ，将衰减器衰减量调至算出的 $A_{1/2}$ ，朝两个方向调节磁场 H ，使检波电流恢复到 I ，对应的两个磁场之差即为线宽。
- 改变衰减量 A ，调节磁场 H ，使检波电流恢复到 I ，逐点测量，即可得到 $A-H$ 曲线。