

# 传输式谐振腔观测铁磁共振

隋源\*

北京大学物理学院 学号: 2000011379

实验首先观测反射式速调管的振荡模和传输式谐振腔的谐振曲线，测量了中心频率的电子调谐范围及谐振腔的有载品质因数；随后通过速调管和谐振腔观测铁氧体样品的铁磁共振现象，测定了共振磁场  $H_r$  和共振线宽  $\Delta H$ ，测量了谐振腔输出功率  $P$  与恒磁场  $H$  的变化曲线，并计算了样品的回磁比  $\gamma$ 、 $g$  因子和弛豫时间  $\tau$ 。

**关键词：**铁磁共振，传输式谐振腔， $g$  因子，弛豫时间

## I 引言

磁矩非零的铁磁体处于外磁场能级会发生 Zeeman 分裂，此时垂直于磁场方向施加共振频率的交变磁场将产生共振跃迁效应，即铁磁共振。

1935 年，L. D. Landau[1] 和 E. M. Lifshitz 首次提出铁磁性物质具有铁磁共振特性。1946 年，J. H. E. Griffiths 和 E. K. Zavoiskij 分别独立地进行了实验验证。由于铁磁共振中磁矩较大，磁效应比较显著，常采用微波观测其效应。从上世纪五十年代开始，在 C. L. Hogan[2] 等人的研究下，有关微波铁氧体器件的技术快速发展，此后，铁磁共振和核磁共振、电子自旋共振等一样成为研究物质宏观性能及分析微观结构的有效手段。

当下，铁磁共振技术由于其信号强、精度高的优势发展为探测自旋波和自旋动力学的标准工具。本实验通过反射式速调管和传输式谐振腔观测铁磁共振现象，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性，了解谐振腔观察铁磁共振的基本原理和实验条件，并进行铁氧体样品相关参数的测定。

## II 理论

### (一) 传输式谐振腔

---

\*suiyuan@stu.pku.edu.cn

传输式谐振腔可由两端加上带有耦合孔的金属板的标准矩形波导管构成。谐振腔发生谐振时，腔长必须是波导波长的半整数倍

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

其中

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}, \quad \lambda = \frac{c}{f_0} \quad (2)$$

其中  $f_0$  为谐振频率，共振时传输系数达到最大。若传输系数为最大值一半时对应的频率为  $f_1$  和  $f_2$ ，则谐振腔的有载品质因数为

$$Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} \quad (3)$$

## (二) 反射式速调管

反射式速调管具有分立的振荡模，改变反射极电压会引起微波功率和频率的变化，存在最佳振荡模且各个振荡模的中心频率相同。一个振荡模的半功率点所对应的频率宽度称为该振荡模的电子调谐范围

$$\Delta f = |f_1 - f_2| \quad (4)$$

## (三) 铁磁共振

微波铁氧体处在微波磁场中，改变加到铁氧体样品上的恒磁场时将发生铁磁共振现象。球形多晶体样品发生铁磁共振时共振磁场  $H_r$  与微波频率  $f_r$  满足

$$2\pi f_r = \gamma H_r, \quad \gamma = g \frac{\mu_0 e}{2m} \quad (5)$$

其中  $\gamma$  为回磁比， $e$  为电子电荷， $m$  为电子质量。当磁场改变时，磁矩趋于平衡态所需的特征时间称为弛豫时间。一般情况下有

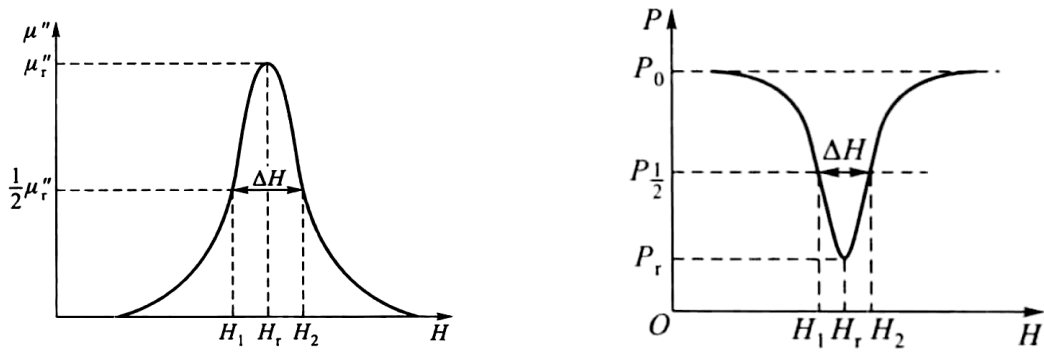
$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H} \quad (6)$$

## (四) 测量铁磁共振

用传输式谐振腔测量铁磁共振的原理是：保证谐振腔输入功率不变和样品微扰条件

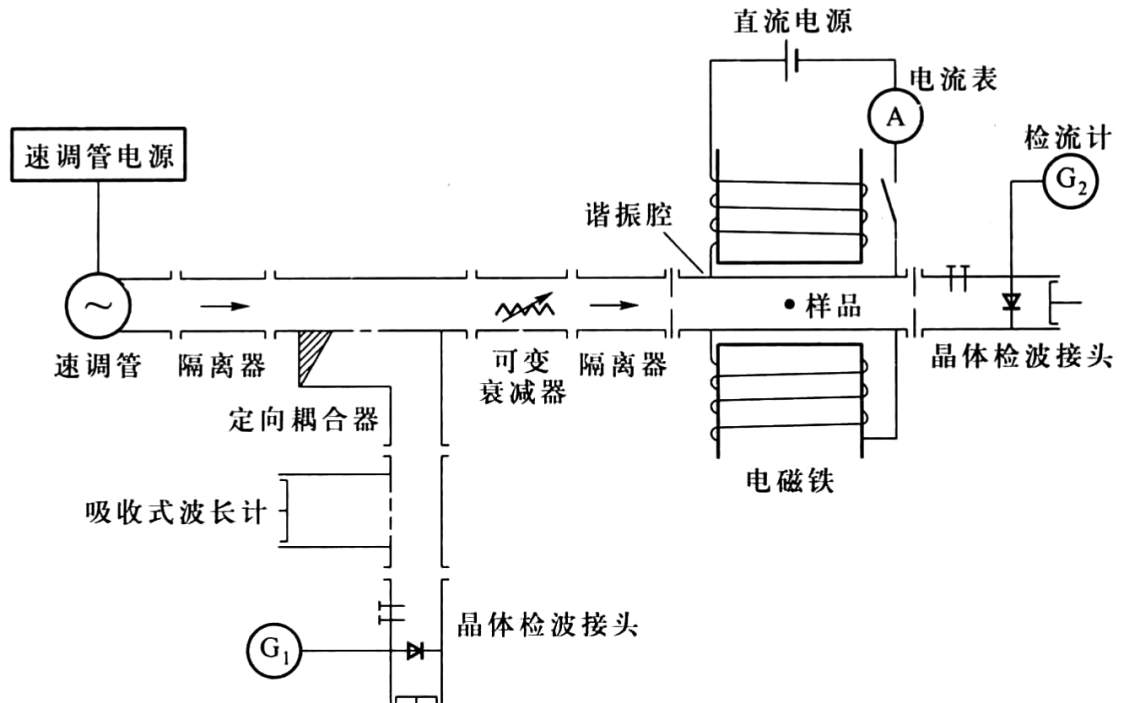
下，通过测量谐振腔的输出功率  $P$  和恒磁场  $H$  的变化关系得到共振磁场  $H_r$  和共振线宽  $\Delta H$ 。如果在测量时谐振腔不逐点调谐，则考虑频散效应得到的半共振点所对应的功率为

$$P_{1/2} = \frac{2P_0P_r}{P_0 + P_r} \quad (7)$$



图一：铁磁共振曲线（左）与 P-H 曲线（右）

### III 实验



图二：铁磁共振实验线路 [3]。包括：电源、速调管、隔离器、定向耦合器、吸收式波长计、可变衰减器、晶体检波器、隔离器、谐振腔、样品、电磁铁、电流表、检流计等。其中传输式谐振腔采用  $TE_{10p}$  型短形谐振腔，空腔的有载品质因数为 2000-3000。样品采用多晶铁氧体小球，直径约 1mm。

用传输式谐振腔观测铁磁共振的实验线路如图二所示。实验线路主要分为微波发生(反射式速调管)、衰减器和隔离器、传输式谐振腔和样品、电磁铁电路、检流计几个部分。其中速调管中内置吸收式波长计和微安表  $G_1$ ，分别用于频率读取和输出功率监控；衰减器和隔离器用于调节谐振腔和样品接收到的微波信号强度；电磁铁电路用于调控恒磁场强度，可通过电流表 A 监控；检流计  $G_2$  用于测量谐振腔的输出功率 P。

## IV 结果与讨论

### (一) 观测速调管的振荡模和腔的谐振曲线

调节反射式速调管反射极旋钮，观察到微安表读数出现不变-变大-变小-不变的变化，为一完整的振动膜。调节检波电流使微安表示数尽可能大，测量得到最大示数为  $51\mu A$ 。对照实验室的波长-频率换算表，得到频率数据如下表

频率	$f_0$	$f_1$	$f_2$
波长计读数	3.784	4.961	3.185
计算结果 (MHz)	9215	8967	9342

计算得到电子调谐范围

$$|f_1 - f_2| = 375\text{MHz} \quad (8)$$

同理调节反射极旋钮发现检流计示数非匀速地有小变大再变小，即为谐振曲线，记录下最大功率时检流计示数对应 105 格。同理得到频率数据

频率	$f_0$	$f_1$	$f_2$
波长计读数	3.278	3.285	3.268
计算结果 (MHz)	9322.2	9320.8	9324.4

计算得到谐振腔的品质因数

$$Q = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} = 2.60 \times 10^3 \quad (9)$$

### (二) 观测铁磁共振

首先简便测量共振磁场和共振线宽：打开电磁铁电路，对远离共振磁场的谐振腔进行调谐，之后测量恒磁场改变范围内  $P_0$  和  $P_r$  的值，根据式 (7) 计算得到  $P_{1/2}$ ，再测量检流计为  $P_r$  和  $P_{1/2}$  时电流表的值  $I_r$  和  $I_1, I_2$  如下表

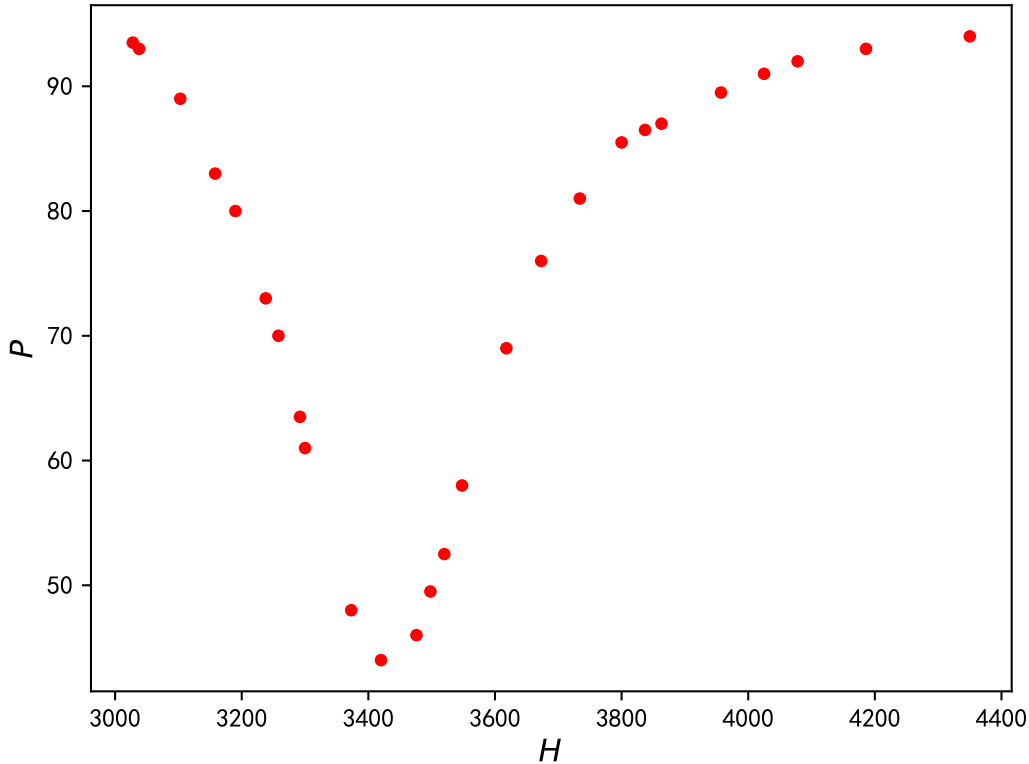
表三：简便测量共振磁场和共振线宽数据

测量次数	$P_0$	$P_r$	$P_{1/2}$	$I_r(\text{A})$	$I_1(\text{A})$	$I_2(\text{A})$
1	100	47.0	63.9	2.249	2.150	2.316
2	95.0	45.5	61.5	2.222	2.129	2.316
3	99.0	46.0	62.8	2.279	2.160	2.362

对三次测量数据取平均，再根据实验室的磁场-电流换算关系得到对应的磁场值

$$H_r = 3425\text{Oe}, \quad H = 277\text{Oe} \quad (10)$$

之后逐点测绘 P-H 关系如下图所示 (检流计和电流表示数的原始数据见附录 II)



图四：存在频散效应逐点测绘的 P-H 曲线 ( $P_0=97.5$ )

可以看到曲线存在明显的频散效应。根据修正公式可估计出  $P_r, P_{1/2}$

$$P_r \approx 43.0, \quad P_{1/2} \approx 60.0 \quad (11)$$

对应的共振磁场和共振线宽为

$$H_r = 3.43 \times 10^3 \text{Oe}, \quad \Delta H = 250 \text{Oe} \quad (12)$$

根据这一结果计算回磁比、朗德因子和弛豫时间

$$\gamma = 2.15 \times 10^5 \text{m}/(\text{A} \cdot \text{s}) \quad (13)$$

$$g = 1.95 \quad (14)$$

$$\tau = 4.68 \times 10^{-10} \text{s} \quad (15)$$

### (三) 误差分析

经过分析，误差主要来源于以下几方面：

1. 操作和读数误差。主要包括操作者调谐时判断误差和读取不稳定数据时产生的误差，是最主要的误差来源，属于随机误差。
2. 仪器允差。主要包括电流表、检流计、波长计、谐振腔等的仪器允差，误差较小。
3. 理论近似误差。主要包括微扰法展开的近似、频散效应修正近似等，误差较小。
4. 其他系统误差。主要包括操作中变阻器发热阻值变大、测量过程中磁滞效应带来的误差、测量操作中可能产生的波长计的回程差等，误差较大。

根据以上误差分析，结合各物理量的测量和计算结果，可粗略估计速调管、谐振腔和共振磁场的结果误差在 5% 左右，共振线宽、回磁比、朗德因子和弛豫时间的结果误差在 10% 左右。

## V 结论

本实验观测反射式速调管的振荡模和传输式谐振腔的谐振曲线，测量了中心频率的电子调谐范围及谐振腔的有载品质因数，并通过速调管和谐振腔观测铁氧体样品的铁磁共振现象，测定了共振磁场和共振线宽，测量了 P-H 的变化关系，并计算了样品的回磁比、朗德因子和弛豫时间。

## VI 致谢

感谢罗昭初老师对实验理念的的讲解和指导。

---

- [1] LANDAU L. and LIFSHITZ E. Physik. Z., Sowjetunion, 1935, 8, 153-169.
- [2] HOGAN, C. L. The ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its applications, Bell Syst. Tech. J., 1952, 31, pp. 1-31
- [3] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

## 附录 I: 思考题

(预习思考题见附录 II)

1.

根据公式求出波导波长的值

$$\lambda_g = 45\text{mm}$$

则腔长应为半整数倍

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

根据  $\text{TE}_{10}$  模分布，样品可以放置在

$$x = 0, a; \quad z = \frac{2k-1}{4}\lambda_g, k = 1, 2, \dots, p$$

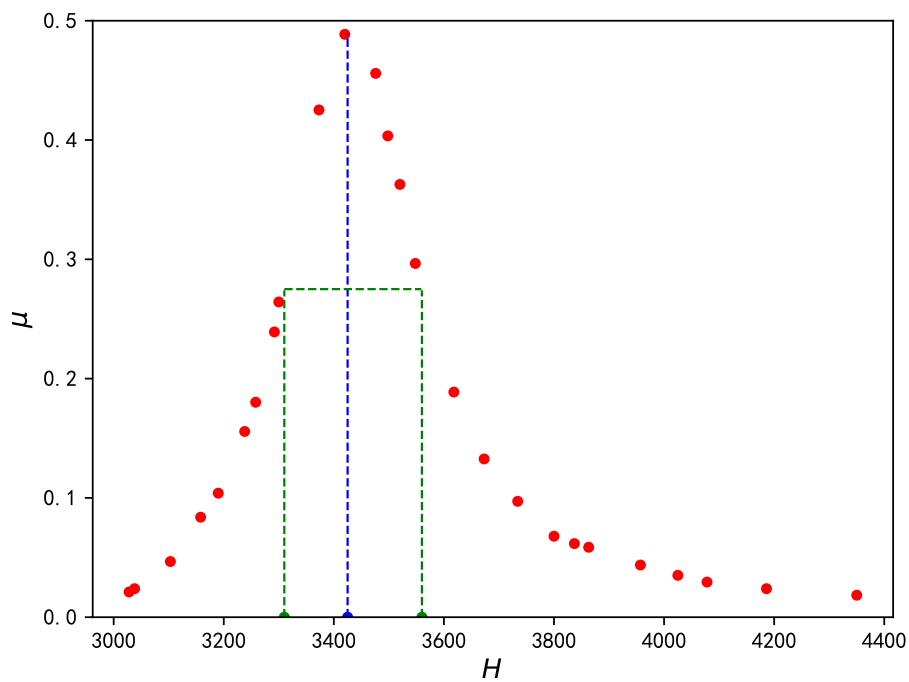
的位置上。

2.

根据公式有

$$\mu'' \propto \sqrt{\frac{P_0}{P}} - 1$$

因此可以作出下图（纵轴与  $\mu''$  差一系数）， $H_1, H_2, H_r$  分别用绿点和蓝点标出。





## 附录 II: 实验记录

### 用传输线谐振腔观测铁磁共振

#### 预习部分

#### [实验原理]

##### (一) 传输线谐振腔

腔长、波导波长和谐振频率的关系:

$$L = p \frac{\lambda}{2}, \quad \lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

##### (二) 反射式速调管的工作特性

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, 存在最高振荡模, 各模中心频率相同, 调谐方法分为机械"又"电子。

一个振荡模的半功率点对应的频率为电子调谐范围:

$$\Delta f = |f_1 - f_2|$$

谐振腔有载品质因数由下式决定 ( $f_0$  为谐振频率)

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f}$$

##### (三) 铁磁共振现象

共振磁场与微波频率的关系

$$\omega_r = \gamma H_r, \quad \gamma = g \frac{e h c}{2 m}$$

一般情况下, 弛豫时间近似为

$$\tau \approx \frac{2}{\gamma \Delta H}$$

##### (四) 测量铁磁共振线宽的原理和实验条件

谐振腔的微波公式给出的结果:

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

$\omega'$  和  $\omega''$  分别为外磁导率张量对应的实、虚部,  $A = \frac{2}{[1+(\frac{\omega}{\omega_0})^2]} \cdot \frac{V_s}{V_0}$

2. 用传输线谐振腔测量铁磁共振线宽的基本思路:

$$P_{\text{出}}(f) = \frac{4P_0(f_0)}{Q_0 Q_L} Q_L^2$$

即  $\Delta H \rightarrow \omega'' \rightarrow Q_L \rightarrow P_{\text{出}}$

若满足 (1) 小球微扰, 置于磁场最大磁力线处 (2) 始终谐振 (3) 微波输出功率恒定, 则计算式为:

$$P_{1/2} = \frac{4P_0}{(\sqrt{P_0/P_r} + 1)^2}, \quad \omega'' = \frac{1}{2A Q_L} (\sqrt{P_0/P_r} - 1)$$

若不逐点调谐, 考虑频率泛泛的近似为  $P_{1/2} = \frac{2P_0 P_r}{P_0 + P_r}$

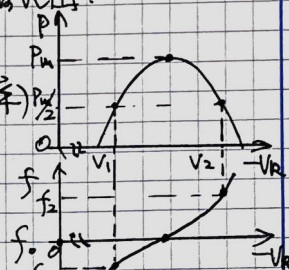


Fig 1. 电子调谐范围

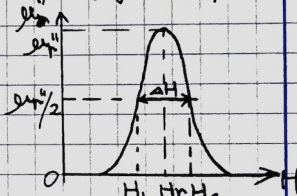


Fig 2. 铁磁共振线宽

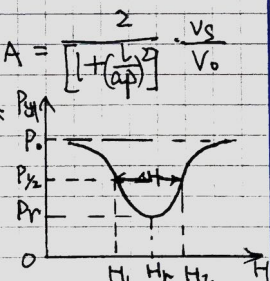


Fig 3. P-H 曲线

## 用传输式谐振腔观测铁磁共振

### [实验仪器]

微波信号源、速调管及电源、隔波器、可变衰减器、定向耦合器、吸收式波导计、检波器组成。也可用单信源、传输式谐振腔、TE<sub>10p</sub>型矩形谐振腔，样品是多晶铁氧体小球；检波1、2分别测量信号源输出功率和谐振腔输出功率；电磁铁提供磁场。

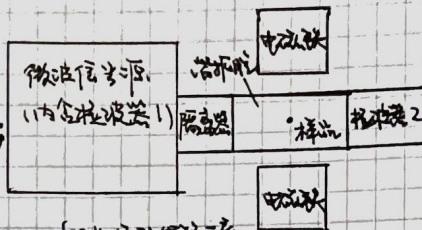


图4. 实验装置示意图

### [实验内容]

(一) 观测速调管的振荡模和传输式腔的谐振曲线

1. 观察速调管的振荡模，测量一个振荡模中心频率的电子调谐范围。
2. 观察传输式腔的谐振曲线，测量腔的有载品质因数。

(二) 观测铁磁共振

1. 用简便方法测量  $H_r$  和  $\Delta H$ ，三次取平均。
2. 逐点测绘  $P-H$  曲线，确定  $H_r$  和  $\Delta H$  的值，计算  $\gamma$ ,  $g$  和  $T$ 。

### [实验目的]

1. 熟悉微波信号源的组成和使用方法，掌握有关谐振腔的工作特性的基本知识。
2. 了解用谐振腔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量有关物理量，认识磁共振的一般特性。

### [预习思考题]

1. 通过调节  $V_r$  得到  $P_m$ ，并根据谐振腔原理计算中心频率  $f_0$ 。之后调节  $V_r$  至  $P = P_m/2$  来得到  $f_1$  和  $f_2$ ，进而计算电子调谐范围。
2. 对  $P-f$  曲线  $Q = f/(f_2 - f_1)$  不可以，因为偏离中心频率功率低，测量不精确。
3. 铁磁体磁矩在外磁场作用下进动，由阻尼减小，当微波频率与进动频率相等时发生共振吸收。要满足微波、E<sub>0</sub>、谐振、功率不变的条件。
4. 由于铁磁效应改变磁场分布，使得腔共振频率变动，即频散效应。
5. 主要来自频散效应的系统误差（理论近似）和仪器允差。用  $P_L = \frac{2P_{0L}}{P_{0L} + P_r}$  不严谨。

实验记录 (2/4): 预习部分-实验仪器、实验内容、实验目的、预习思考题



## 可传输功率匹配实验记录

### 实验笔记

#### [实验步骤]

##### (一) 观测同轴振荡模, 测品质因数

1. 打开电源, 预热 10min, 调节反射极按钮和检波电流旋钮, 使 mA 表有完整的大  $\rightarrow$  减小  $\rightarrow$  过程, 且最大值尽可能大。
2. 保持检波电流旋钮不动, 记下最大电流刻度, 调节波长表旋钮使 mA 表示数降至最小, 读出小数  $\lambda_1$ ;
3. 调失谐, 依次顺/逆时针调节反射极旋钮, 使电流读数达最大值一半, 再次调节波长表 读出  $\lambda_1, \lambda_2$ 。

##### (二) 观测传输式腔谐振曲线, 测品质因数

1. 调节反射极旋钮, 观察 ~~到~~ 检流计读数由小变大再变小, 调节至最大位置并调谐, 记录格数  $P$  和中心频率波长  $\lambda$ !
2. 分别顺/逆调反射极, 记录格数为  $P/2$  时的  $\lambda_1', \lambda_2'$ 。  
并调谐

##### (三) 简便测量 $H_r$ 和 $\Delta H$

1. 确认变阻器为最大值, 打开电源升压, 对谐振腔调谐。
2. 改变变阻器阻值, 观察到完整的电流减小  $\rightarrow$  增大过程, 记录下  $P_{max}$  和  $P_r$  和对应电流读数。
3. 再计算出  $P_{r/2}$  再改变阻值记录两个电流读数。
4. 上述步骤重复三次, 每次又调谐。计算  $H_r$  和  $\Delta H$

##### (四) 逐点测绘 $P-H$ 曲线

1. 变阻器阻值调到略大于检流计读数开始变化的位置并调谐。
2. 改变阻值逐点测  $P$  和  $I$ , 每次等待示数稳定再记录, 测 20-40 点 (不可变向移动)
3. 重绘, 绘出  $P-H$  曲线, 计算  $H_r$  和  $\Delta H$ 。

# 用传输线理论观测驻波现象

## [实验数据]

### (一) 驻波管的驻波模 ( $I_m = 5 \mu A$ )

频率	对应波长	计算结果/MHz	驻波范围
$f_0$	3.784	9215	$ f_1 - f_2  = 3.75 \text{ MHz}$ 品质因数 $Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2} = 24.6$
$f_1$	<del>4.961</del> 3.185	9367	
$f_2$	<del>4.961</del> 3.185	9342	

(频率-波长换算  $f = 100/4.79 - 211.27 \lambda$ )

### (二) 传输线理论的品质因数

频率	对应波长	计算结果/MHz	对应指数	品质因数
$f_0$	3.278	9322.2	105.0	$Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2} = 25.90$
$f_1$	3.285	9320.8	52.0	
$f_2$	3.268	9324.4	53.0	

### (三) 简便测量 $I_m$ 和 $\Delta H$ ( $P_{1/2} = \frac{2P_{max}P_n}{P_{max} + P_n}$ )

	$P_{max}$	$P_n$	$I_n(A)$	$P_{1/2}$	$I_{1/2}^{(-)}(A)$	$I_{1/2}^{(+)}(A)$
1	100.0	47.0	2.249	63.9	2.150	2.316
2	95.0	45.5	2.222	61.5	2.129	2.316
3	99.0	46.0	2.279	62.8	2.160	2.362

### (四) 逐点测绘 P-H ( $P_{max} = 97.5$ )

P	93.5	93.0	89.0	83.0	80.0	73.0	70.0	63.5	61.0	48.0	
I(A)	1.985	1.992	2.035	2.072	2.093	2.125	2.139	2.161	2.167	2.216	
P	44.0	46.0	49.5	52.5	58.0	69.0	76.0	81.0	85.5	86.5	87.0
I(A)	2.247	2.284	2.299	2.333	2.332	2.379	2.415	2.456	2.506	2.526	2.544
					89.5	91.0	92.0	93.0	94.0		
					2.610	2.658	2.685	2.781	2.915		