

## 微波系列实验及电子自旋共振

王沛 06300190054

**摘要：**电子自旋共振是指具有未成对电子的物质在静磁场作用下会对电磁波产生共振吸收。本实验要在微波波段下观察共振吸收的情况，先研究了常用的微波器件的特性，并使用此微波系统来观察电子自旋共振的信号。

**关键词：**微波器件性能 DPPH 电子自旋共振

**引言：**电子自旋的概念首先由 Pauli 在 1924 年提出。电子自旋共振谱仪是利用具有未成对电子的物质在静磁场作用下对电磁波的共振吸收原理而设计的，它可提供物质结构的丰富信息，根据共振条件测量基本参数  $g$  因子，进而由  $g$  张量的对称性，从而判断配位体的空间结构；通过其精细结构研究电子自旋和核自旋之间的相互作用；由共振信号的强度来测定自旋浓度，并通过饱和和特性线宽线型来研究弛豫机制。本实验使用的样品为 DPPH，由于其吸收处于微波波段，本实验先研究微波系统的各方面性能，再来观察其电子自旋共振的信号并讨论。

## 第一部分：微波技术

## i. 微波信号源

此实验使用的是利用体效应振荡制成的微波信号源。其核心部件体效应二极管也称耿氏二极管，是利用其伏-安效应中的微分负电阻特性，将直流转化为微波能量。其具体原理见其后讨论部分。

为了提高体效应管频率的稳定性，降低噪声，扩展调频范围和提高效率，必须把体效应管与特定谐振电路结合起来，一般用体效应管和有源元件做成 TE 模谐振腔振荡器。

## ii. 波导传输线

波导是空心金属管的总称。在此处为实现单一波型的传输，将矩形波导设计成了特殊的尺寸，以致只能传播  $TE_{10}$  波，具体原理见其后讨论部分。其电磁场为：

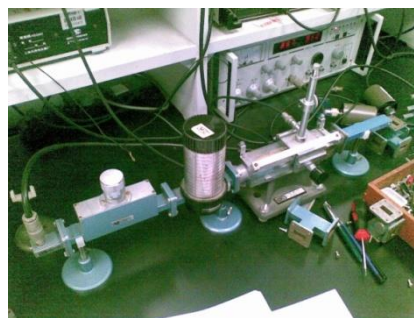
$$\begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = i \frac{\pi c k_0}{a k_c^2} B_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) \\ E_z = 0 \\ B_x = -i \frac{\pi k_g}{a k_c^2} B_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) \\ B_y = 0 \\ B_z = B_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) \end{cases}$$

其中  $k_c^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - k_g^2$ 。

$TE_{10}$  波在波导中传输时，在波导壁表面  $10^{-4} \text{cm}$  表面层感应产生管壁电流，其分布最大的特点是宽壁中心线上管壁电流最小。

## iii. 实验装置

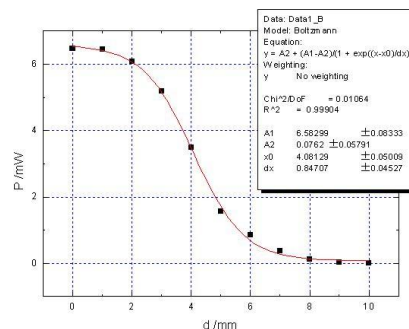
本实验装置由信号源、衰减器、波导等连接各待测微波元件组成，如图所示。



## iv. 微波器件的性质

## i. 衰减器

调节衰减深度 0mm~10mm，并根据实际情况调节功率计量程作图得衰减曲线为：



此曲线可用来定标，拟合相关度达 0.999

## ii. 魔 T

从不同编号的端口输入功率为 5.20mW 的波，在其他各端口测微波的功率得到下表：  
(单位：mW)



	1 端	2 端	3 端	4 端
1 输入		1.79	1.79	0
2 输入	1.70		1.12	2.22
4 输入		2.08	2.08	

可见其特性是相邻两臂平分而不进入相对臂。

## iii. 环行器

依然输入 5.20mW 的微波，各端口的功率为：  
(单位：mW)



	1 端	2 端	3 端
从 1 输入		0.388	4.80
从 2 输入	4.80		0.110

可见其特性是微波沿其标定的环形方向流动。

## iv. H-T

输入 5.20mW 的微波，各端口处的功率为：(单位：mW)



	1 端	2 端	3 端
从 1 输入		1.70	1.70
从 2 输入	1.50		3.50

可见从中部输入功率将平均分向两端，但损失比较多，因为反射较多。

## v. 匹配负载

纵向长度大于  $0.1\lambda$  的传输线统称为长线。当微波能量无损耗地从长线传输到负载时，长线上的电压可写成入射波和反射波之和：

$$V = V_1 e^{i\beta z} + V_2 e^{-i\beta z}$$

电压反射系数：

$$\Gamma = \frac{V_2}{V_1} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2 - 2\beta z)}$$

$$|\Gamma| = \frac{V_2}{V_1}$$

电压驻波比为：

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

匹配负载实测中指针基本不随螺钉位置而变化，所以驻波比约为 1，有

$$\bar{\rho} \approx 1$$

$$|\Gamma| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \approx 0$$

是属于基本完全吸收的情况。

## vi. 铜片加匹配负载

经过测量 5mm 宽的缝，有：(单位：mm)

极大	极小	驻波比
149.09	136.21	1.272
126.29	115.59	1.280
104.11	93.32	1.275
82.00	71.10	1.282

$$\bar{\rho} = 1.227$$

$$|\Gamma| = 0.12$$

3mm 宽的缝，有：(单位：mm)

极大	极小	驻波比
81.62	70.40	2.22
103.42	92.74	2.22
126.26	114.80	2.21
147.40	137.66	2.20

$$\bar{\rho} = 2.21$$

$$|\Gamma| = 0.38$$

都是部分反射的情况。

## vii. 短路活塞

随螺钉移动会出现周期性的极大极小的变化：(单位：mm)

极大	极小	驻波比
78.02	88.72	40
98.62	109.00	37.5
119.90	129.42	43
139.50	149.92	40

$$\bar{\rho} = 40.1$$

$$|\Gamma| = 0.95$$

说明反射很强，吸收很小。理论上说反射系数应该为 1。

## viii. 利用驻波比测波导中的传播波长

移动测量线可以看到波导中驻波比由极大到极小的变化，其间距为  $\frac{1}{4}$  个波长。利用短

路活塞的数据即上表, 得:

$$\lambda_g = 41.1 \text{ mm}$$

## 第二部分: 电子自旋共振

### 1. 电子自旋共振的条件

具有未成对电子的物质置于静磁场  $B_z$  中时, 由于电子自旋与外加的磁场的相互作用, 导致电子基态能级分裂, 有:

$$\Delta E = g\mu_B B_z$$

其中  $\mu_B = \frac{eh}{2m_e c}$ 。

当垂直于静磁场方向所加的电磁波的量子能量  $h\nu = \Delta E$  时, 即满足电子自旋共振条件时, 未成对电子会在 Zeeman 能级之间跃迁, 跃迁的选择定则是电子自旋量子数变化  $\Delta m = \pm 1$ 。由于热平衡电子遵循 M-B 分布, 它们的概率是相等的, 故而更多的电子在低能级上, 共振的统计结果是较低能级的电子跃迁到高能级上。

### 2. 布洛赫方程

对一个宏观自旋体系, Bloch 由外磁场  $B$  以及弛豫两者独立对单位体积内  $M$  的影响导出了描述磁化强度的 Bloch 方程, 其分量式为:

$$\frac{dM_z}{dt} = \gamma(\vec{B} \times \vec{M})_z - \frac{M_z - M_z^0}{t_1}$$

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma(\vec{B} \times \vec{M})_x - \frac{M_x - 0}{t_2}$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \gamma(\vec{B} \times \vec{M})_y - \frac{M_y - 0}{t_2}$$

$\vec{B}$  为  $z$  方向的外磁场  $B_z$  和垂直的交变磁场  $2\vec{B}_1 \cos \omega t$  之和,  $\gamma$  为旋磁比,  $M_z^0$  为  $z$  方向磁化强度的热平衡值。弛豫是自旋体系受外界电磁波扰动后由不平衡恢复到平衡态的过程。 $t_1$  和  $t_2$  分别代表磁化强度的纵向分量和横向分量返回热平衡值所需的弛豫时间, 故分别称为纵向和横向弛豫时间。纵向弛豫起因于自旋体系与它所依附的晶格之间以非辐射形式交换能量, 所以  $t_1$  又称自旋-晶格弛豫时间, 它与体系的温度密切相关; 横向弛豫则是由于自旋体系内部自旋-自旋之间交换能量, 所以  $t_2$  也称为自旋-自旋弛豫时间, 它与自旋的浓度密切相关。

### 3. 布洛赫方程的稳态解

在磁场频率较低时, 磁化强度可看作不随时间变化, 由此可得 Bloch 方程的稳态解, 从而把微观的共振吸收与样品的宏观磁化率  $\chi$  的实部  $\chi'$  和虚部  $\chi''$  联系起来:

$$\chi' = \frac{1}{2} \frac{\chi_0 \omega_0 t_2^2 (\omega_0 - \omega)}{1 + (\omega_0 - \omega)^2 t_2^2 + \gamma^2 B_1^2 t_1 t_2}$$

$$\chi'' = \frac{1}{2} \frac{\chi_0 \omega_0 t_2^2}{1 + (\omega_0 - \omega)^2 t_2^2 + \gamma^2 B_1^2 t_1 t_2}$$

$B_1$  是圆频率为  $\omega$  的横向磁场强度,

$\chi_0 = \frac{M_z^0}{B_0}$  为稳态磁化率,  $\chi'$  与磁场同相位的色散信号相联系, 称为色散磁化率,  $\chi''$  与相位滞后  $90^\circ$  信号联系, 称为吸收磁化率。

### 4. 实验装置

本实验装置由固体微波源、微波传输与检测系统、样品谐振腔、电磁铁等部分组成。微波源由体效应管矩形波导谐振腔提供, 它的振荡频率可通过改变变容管的偏压进行电调谐, 也可以用螺丝钉在外部进行机械调谐。微波信号经过隔离器、可变衰减器和环行器等传输到样品谐振腔, 当满足共振条件时, 由环行器把样品谐振腔的反射信号 (共振吸收信号) 传输到晶体检波器, 再输入进示波器中。隔离器可以阻断微波传输回路中反射波进入微波源, 以保证其稳定工作。可变衰减器可以调节传输到样品谐振腔的微波功率。单螺调配器可以调节谐振腔的工作状态。频率计可以用来测量微波的频率。其结构如图所示。



### 5. 估算样品 $g$ 因子

本实验用的样品是 DPPH, 即二苯基苦酸基联氨, 其结构如下:

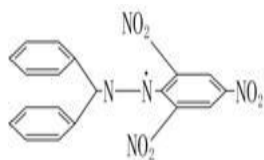


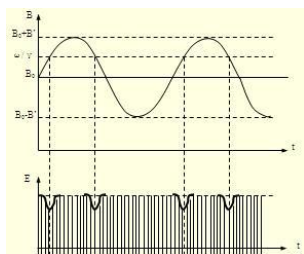
图 1 DPPH 的分子结构式

其  $g$  因子的值为 2.0023。加在样品上的总磁场由永磁铁的恒定磁场和电磁铁的交变磁场提供，而在满足： $\Delta E = g\mu_B B_z$  时，会发生共振吸收。要在微波线路中检测到比较好的共振吸收信号，就要调节单螺调配器、短路活塞及检波器前各螺钉，使吸收信号最大化。



图 2 吸收信号

通过调节永磁铁的大小，可以使吸收曲线由二峰合一到三峰等距连续变化（见图 3 所示）。由两次二峰时总磁场的变化量（特斯拉计测得）可以得出交变磁场即扫场的幅度，约为 5mT；由三峰等距时总磁场的大小可以估测出 DPPH 的  $g$  因子。



此处利用已知的  $g$  因子来估算磁场，并与特斯拉计所得值相比较。则得到：

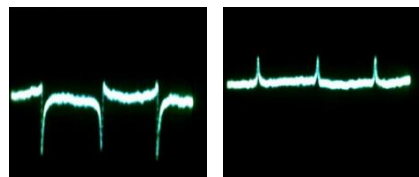
$$B_z = \frac{hf}{g\mu_B} = 351.3\text{mT}$$

而特斯拉计测得的值为  $B_0 = (340 \pm 25) \text{mT}$ 。所使用的特斯拉计在 1000mT 的量程下为 2.5 级仪表。

### 6. 利用信号计算波导的传播波长

调节永磁铁的磁场及各微波元件使达到三峰等距且吸收信号最佳的状态，此时的信号如图 2 所示。横向移动单螺调配器的螺

钉，会观察到周期性变化的信号，依次如图 4a、4b 所示。可以利用此信号来测量波导中微波的传播波长。



测出吸收和饱和时螺钉的位置：

螺钉位置	吸收	色散
X1,2 /mm	54.2	74.8
X3,4 /mm	13.0	33.6

则有：

$$\lambda_g = \frac{1}{2} [(74.8 - 33.6) + (54.2 - 13.0)] = 41.2 \text{ (mm)}$$

由此推出：

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{2a})^2}}{\lambda_g} = 9.794 \text{ Hz}$$

而用频率计测得的微波频率为 9.845 Hz。

### 7. 计算横向弛豫时间

当磁场幅度较小时，统计纵向和横向弛豫效应，总的弛豫时间可写成：

$$\frac{1}{t} = \frac{1}{2t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{g\mu_B}{h} \Delta B$$

对此样品可以估算出  $t_2$  为：

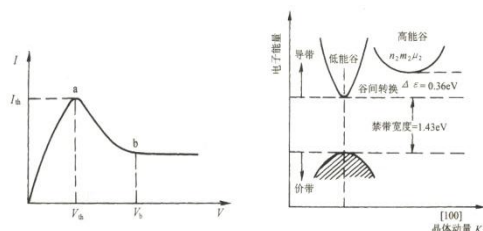
$$t_2 = \frac{2}{\Delta\omega} = \frac{2}{(\omega_1 - \omega_0)\omega_m \Delta t} = 6.02 \times 10^{-8} \text{ s}$$

实验讨论：

#### 1. 微波信号源的原理

信号源（耿氏二极管）具有负微分电导的特性，是因为 GaAs 的导带有高、低两个能谷，其间隙小于禁带宽度但大于热运动能量。当电场到达负微分区域时，部分电子会转移到能谷 2，而能谷 2 电子有效质量大，迁移率小，平均速率低。故在局部高阻区向阳极的一侧会缺少电子，而向阴极的一侧会积累电子，此区域称为高场畴。高场畴的边界随电场增加而扩大，但超出

负微分区后,就会趋于稳定,形成稳态畴。这时两类电子以相同的平均漂移速度向阳极运动,稳态畴也恒定向阳极漂移。当畴达到阳极后渐渐被阳极吸收而消失,同时一个新的畴又开始形成,如此反复便构成了“耿氏振荡”,而起振荡频率在微波范围,故可用来当微波信号源。



## 2. 共振信号的定性解释

调节单螺调配器螺钉的位置会使信号周期性变化,当外磁场满足共振条件时会发生共振跃迁,用扫场在共振条件附近变化,便可得到共振信号,实际上表示的是样品动态磁化率的虚分量,既吸收磁化率。磁化率的实分量称为色散磁化率。由于样品的磁化强度与微波磁场之间有一定的相位差,而在共振吸收点磁化率有最大值,看到的是吸收信号。若移动螺钉的位置,螺钉反射的信号与腔反射的信号会有一个相位差,这相当于磁化强度与端口的场有一个相位差,导致吸收信号变小。当相位差为  $90^\circ$  时,出现色散信号;当相位差为  $180^\circ$  时,出现负的吸收信号。

## 3. 微波系统的调节与检测

通常需要使微波系统在匹配的状态下工作,此时驻波比最小,波导中基本呈行波状态。单螺调配器的螺钉可以反射一部分微波,螺钉插入深度可改变反射量的大小,其位置可以改变反射波的相位,因此可以产生一个反射波,其大小与“失配元件”产生的反射相等,而相位相反,从而抵消此类元件在系统中引起的反射,达到调匹配的

目标。

微波的检测由晶体检波器完成。微波信号原本在一个周期内的平均值为零,而跨接于矩形波导宽壁中心线上的点接触微波二极管会截去周期内反向的部分,这样一个周期内的平均值便不再为零,便可以在示波器上显示出调幅波的信号。

## 4. 利用驻波比测传播波长

检测的总的电压可以写成:

$$\begin{aligned} V &= V_1 \cos(\omega t - kx) + V_2 \cos(\omega t + kx) \\ &= (V_1 + V_2) \cos \omega t \cos kx \\ &\quad + (V_1 - V_2) \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cos(kx - \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

可以看成是两套驻波的叠加。则按驻波比的定义,极大和极小间就会相差  $\frac{\lambda_g}{4}$ 。因此可以利用驻波比测传播波长。

## 5. 波导中的模式及场的分布

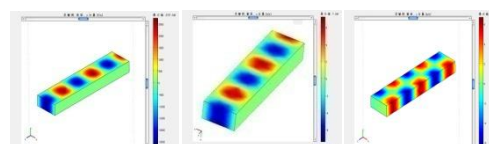
波导内有:

$$k_g^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] > 0$$

此处  $f = 9.845 \text{ GHz}$ ,  $a = 2.29 \text{ cm}$ ,  $b = 1.02 \text{ cm}$ , 代入上式得:

$$0.44m^2 + 2.23n^2 < 1$$

故只能取  $m=1, n=0$ , 即只能传播  $TE_{10}$  模式的波。用 Comsol 软件可以模拟波传播时场的分布:



## 小结:

本实验测量了各微波器件的性能及参数,并利用此微波系统对电子自旋共振的信号做了一定研究,最后对微波系统的原理、传输性能及电子自旋共振的信号机理做了进一步的解释。

## 参考文献:

1. 杨福家, 原子物理学, 第二版, 高等教育出版社, 1990
2. 复旦大学物理教学实验中心, 近代物理实验, 2009
3. 蔡圣善, 电动力学, 第二版, 高等教育出版社, 2002