

# 微波铁磁共振 实验报告

王国胜, 201511140243

指导教师: 廖红波

实验日期: 2018 年 4 月 18 日

## 摘 要

本实验将。<sup>[1]</sup>

关键词: 关键 关键 关键 关键 关键 关键 关键

## 1 引言

## 2 实验原理

### 2.1 微波

#### 2.1.1 微波的性质

微波即波长范围在 1mm-1m 的电磁波的总称, 对应频率为  $3 \times 10^8 \sim 10^{11}$  Hz。微波的振荡周期接近真空电子管中的电子渡越时间 ( $\sim 10^{-10}$  s), 使得电子在微波振荡中的滞后效应不可忽略; 微波的波长与一般宏观物体 (包括通常的电子元件) 相当, 因此会在宏观物体表面产生反射, 并可由一般电子元件产生, 且只能在波导管/谐振腔等中传输, 而其电磁场参量在一般电路中需要用分布参数来描述; 微波传播类似可见光, 有直线传播/反射/吸收/折射等效应, 而又可穿透电离层 (区别于其它无线电波), 常被用于卫星通信等领域, 但借助微波的地面通讯则须借助中继站; 微波量子能量许多原子/分子的振动-转动能级和磁能级相近, 适用于相关研究。由于这些特性与其它波段电磁波都有不同, 微波的产生/传播等都有专门的理论描述和技术实现。<sup>[1]</sup>

#### 2.1.2 微波的产生

一般采用微波固体振荡器或微波电子管产生微波; 前者包括微波晶体管振荡器/体效应管振荡器等, 而后者包括磁控管等, 多用于需要较高微波功率的应用场景。本实验中用微波体效应管产生微波。

微波体效应管振荡器即耿氏二极管振荡器主要利用有双能谷结构的半导体材料的负阻特性形成的电流震荡输出微波。这类材料包括砷化镓/磷化铟/碲化镉/硒化锌/砷化钢等。以下以砷化镓为例。

300K 下, 砷化镓的能带结构如图 1。图中可见其导带中的主能谷附近还有子能谷; 能量最低的子能谷能量比主能谷高出约 0.36eV, 故其中电子迁移率 (电子散射频率) 小于主能谷。常温下电子能量不足以进入子能谷; 加外电场到  $E > E_{th}$  时, 部分电子被激发到子能谷中, 于是平均电子迁移率将下降, 材料电阻下降, 表现负阻特性; 待电场增大到全部电子都被及发到子能谷中时, 效应结束。

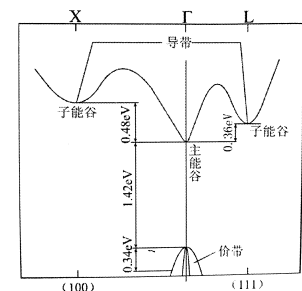


图 1 砷化镓的能带结构

设晶体管阴极附近有一因接触电阻和杂质不均匀分布产生的电阻率较大的区域,则在晶体管两端加逐渐增大的电压时,此区域分压较大,电场较强,首先超过阈值电场,表现负阻特性,电子迁移率较低;于是其阴极一侧电子堆积,阳极一侧电子抽空,内部电场进一步增大,形成高场畴。由于总电压由外电路给定,此畴一旦形成,即将抑制其他区域的电场增大,故只会产生一个高场畴。

高场畴中电子仍将在电场作用下向阳极运动,故整个高场畴将向阳极渡越;同时,畴内电场增大使得内部电子迁移率重新增大,逐渐又与外部的迁移率相等;于是畴内电场不再增大,场畴成为成熟畴;成熟畴将稳定地渡越到阳极,在阳极被吸收后在电路激起一个电流脉冲,同时晶体管开始下一个畴的形成。<sup>[1]</sup>

在上述过程中,砷化镓表现如子图 (2b) 的电流-电压特性。当电压  $V$  小于阈值电压  $V_{th}$  时,高场畴尚未形成,通过晶体管的电流与其两端的电压成正比。到达 A 点时,两端电压接近阈值电压后,高场畴开始形成,整体电阻随总电压增长而下降;达到 C 点后形成成熟畴,电流随着电压增长又略有上升。到达 D 点后降低电压,则在 B 点后畴内电场仍高于阈值,高场畴仍可维持,直到总电压小于  $V_s$  (维持电压) 时,高场畴不能维持,电流跃变到与上升阶段相同的位置 F。

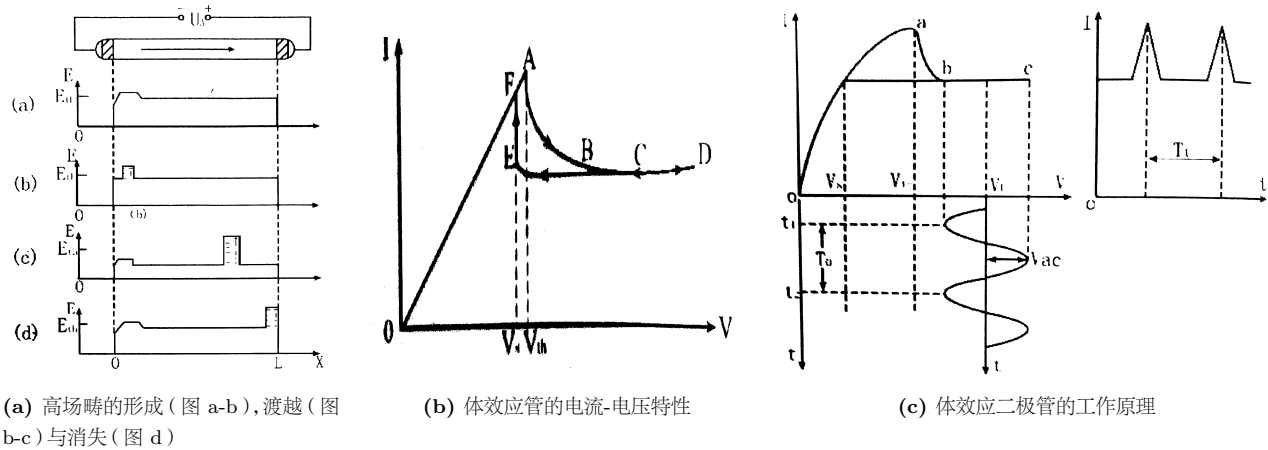


图 2 体效应二极管

通过外电路向体效应管提供振荡电压  $V = V_b + V_{ac} \cos \omega_0 t$ , 并令  $V_b - V_{ac} > V_{th}$  (子图 (2c))。电压零开始上升的过程激发了最初的一次振荡: 在外电压最小时高场畴即可开始形成并向阳极渡越, 到下一个最小值时被阳极吸收, 形成一个电流脉冲, 同时下一个高场畴开始成核。晶体管与外电路相互作用, 就形成了频率为  $\omega_0$  的一组电流脉冲。<sup>[1]</sup> 晶体管与外电路的阻抗的实部与虚部则分别决定了电路的频率与功率。

### 2.1.3 微波的传播

波导管是一段中空金属管。波导管中传播的电磁波一定由纵向分量, 但没有横向电场分量或横向磁场分量, 分别称为横磁波 (TM) / 横电波 (TE)。同时有电磁场横向分量的微波 (TEM) 只能在多层金属组成的电缆中传输。标准的矩形波导管只传输 TE 波, 没有纵向电场。

设有均匀无限长无损  $a \times b$  矩形波导管, 其中介质均匀, 介电常数为  $\epsilon$ , 磁导率为  $\mu$ , 一端输入角频率为  $\omega$  的电磁波, 沿  $z$  轴方向传播 (方向如图 3 所示)。其

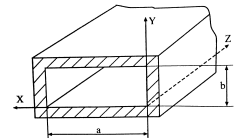


图 3 矩形波导管

中  $TE_{10}$  波解为

$$\begin{cases} E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}, & E_x = E_z = 0; \\ H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}, & H_y = 0, \\ H_z = i \frac{\pi}{\omega \mu a} E_0 \cos \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}. \end{cases} \quad (1)$$

其中, 相位常数  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ , 波导波长  $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_0)^2}}$ ,  $\lambda_0 = 2a$ ,

$\lambda$  是微波在真空中的波长。

由式 (1) 可以看出此波导管中的电磁波分布具有以下特征:

1.  $\lambda_g > \lambda$ ;
2. 只有  $\lambda < \lambda_0 = 2a$  的电磁波可以在此波导管中传输;
3.  $\mathbf{E} // \hat{e}_y, \mathbf{H} \perp \hat{e}_y$ ;
4. 电场在  $x$  方向是驻立半波;
5.  $E_y$  与  $H_x$  分布情况相同, 相位相差为  $\pi$ 。磁场的这种结构是行波的特点 (图 4)。

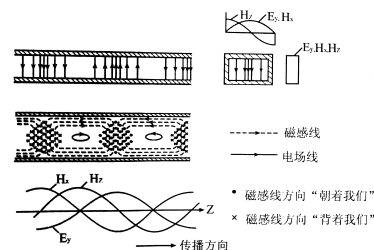
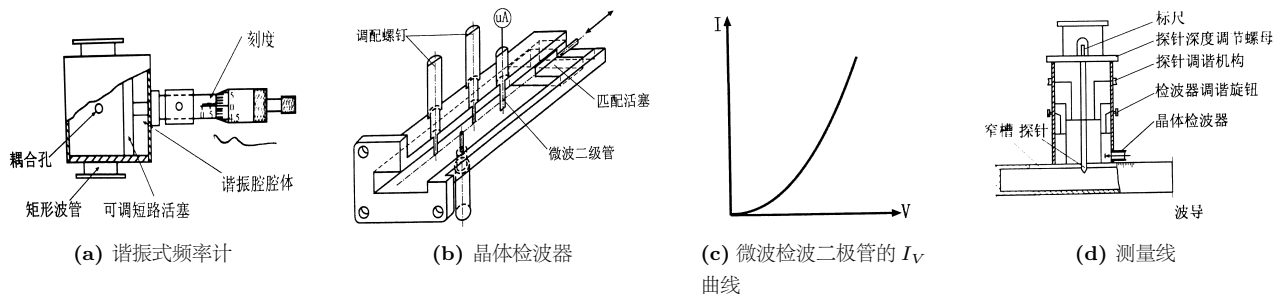


图 4 波导管中  $TE_{10}$  波的电磁场结构

### 2.1.4 微波测量



#### 1. 频率测量 (谐振式频率计)

吸收式谐振频率计 (子图 (5a)) 是一个长度  $L$  可调的谐振腔, 可以通过耦合孔与波导管相连, 调节  $L$  至腔体对微波功率发生强烈的共振吸收, 功率监测示数减小, 即可通过频率校正表得到微波频率。

#### 2. 功率测量 (晶体检波器)

功率的绝对测量可以用热敏电阻等测量微波转化的热能, 也可以用晶体检波器用于检测功率的相对值。晶体检波器 (子图 (5b)) 中的微波二极管将微波信号转化为直流电信号, 微波电信号很弱, 处于非线性区; 若微波检波信号电流在  $5 \sim 10 \mu A$ , 大致有  $I \propto V^2$ , 即平方检波律 (子图 (5c)), 由此可知  $I = KP$ , 故可用  $I$  作为  $P$  的相对值。

#### 3. 驻波比测量 (测量线)

如子图 (5d), 在一段波导管宽壁中线上沿微波传输方向开一个长为几个波长的狭槽, 将一探针在槽中来回移动, 即可测出沿槽线方向的相对强度分布。

## 2.2 铁磁共振

利用铁磁材料在相互垂直的稳恒磁场和交变磁场共同作用下发生的铁磁共振现象可以测定材料的  $g$  因子/共振线宽/弛豫时间等性质。

### 2.2.1 铁磁共振原理

磁畴是铁磁体中自发磁化的小区域,其自发磁化强度记为  $\mathbf{M}_S$ 。铁磁体中磁化系数  $\chi \sim 10^{1\sim6}$ ,故只要加以很小的磁场,就能使铁磁体达到饱和磁化。

设所加磁场为

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h} \quad (\mathbf{H}_0 \text{ 为 } z \text{ 方向恒定磁场, } \mathbf{h} \text{ 为横向微波交变磁场}) \quad (2)$$

时,铁磁体饱和磁化,则  $\mathbf{M}_S$  将从原来的平衡方向与  $\mathbf{H}_0$  夹角  $\theta$  处开始绕  $\mathbf{H}_0$  以角频率  $\omega_0 = \gamma \mathbf{H}_0$  进动,其中旋磁比  $\gamma = g \frac{\mu_0 e}{2m}$ 。

只有钟祥磁场时,磁矩进动将受到阻尼作用,振幅不断衰减,以至指向  $z$  方向;若加微波场为其补充能量,则到  $\omega = \omega_0$  时,微波能量被磁矩进动吸收的部分恰可弥补进动阻尼消耗的能量,即为铁磁共振。

此时磁导率张量为

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

其中实部表示色散特性,虚部表示损耗特性。

若固定微波频率  $\omega_0$ , 调节  $H_0$  大小, 则调至  $H_0 = H_r$  时发生共振。此式可以在  $\mu'' - H_0$  关系中观察到共振峰。共振磁场强度  $H_r$  即图中  $\mu''_{\max} = \mu''_r$  处对应的磁场强度。 $\Delta H = |H_1 - H_2|$  称为共振线宽, 其中  $\mu''|_{H_0=H_1, H_2} = \frac{\mu''_r}{2}$ 。通常铁磁体的弛豫时间满足

$$\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H}. \quad (\sim 10^{-6\sim-9}\text{s}) \quad (4)$$

### 2.2.2 传输式谐振腔

传输式金属谐振腔时一段矩形波导管两端加上带耦合孔的短路金属板。电磁场被导体壁局限在空腔内部连续反射;只有有合适波型和频率的电磁波能在其中形成驻波,发生谐振。

1.

## 3 实验内容

### 1. 体效应微波振荡器工作曲线测量及性能测量

- 打开体效应微波振荡器总电源, 调节“频率”旋钮使频率读数位于 9.000GHz 左右, 预热至少 30 分钟。按图 5 所示光路图检查光路是否连接妥当。
- 按下微波源信号的“等幅”和“教学”工作钮, 在 0~13V 的电压范围内连续改变体效应管的主作电压, 记录相应的工作电流值, 画出体效应管在 0~13V 区间电流·电压曲线。利用光路中的吸收式波长计和检波器 1 测量工作电压在 10~13V 区间频率-电压曲线, 分析体效应管的负阻区和微波工作区的电压范围。

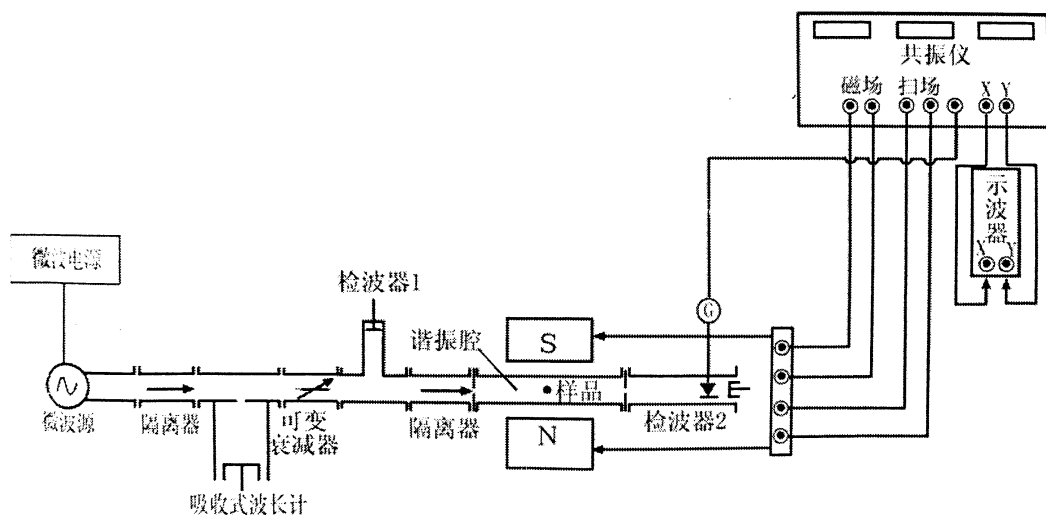


图 5 传输式谐振腔铁磁共振实验光路图

- (c) 弹起“教学”工作钮,此时体效应管工作在标准电压 12.0V 左右。调节体效应管功率钮和微波衰减器,使与检波器 1 连接的微安表的示数合适,调节频率旋钮,改变微波的频率范围 (8.9GHz-9.2GHz), 测量不同频率下的微波输出功率。  
注意,每次改变频率后,检波器要调谐。

## 2. 铁磁共振实验

- 检查传输式谐振腔中的金属耦合片是否装上。
- 本实验是在 3 厘米微波波段进行的,传输式谐振腔采用 TE<sub>10p</sub> 矩型谐振腔 (本实验中  $p=8$ ,  $a=2.295\text{cm}$ ,  $l=19.30\text{cm}$ ), 样品采用直径大约为 1-2mm 的多晶或单晶铁氧体小球。电磁铁提供的外磁场强度为 0~0.5T。根据 [ref 讲义公式 \(9\) 和 \(10\)](#) 估算谐振腔的谐振频率。
- 检测电磁铁电钮旋钮是否为最小,然后打开共振仪电源,工作方式设为检波。根据预习中对理论谐振频率的计算结果,在该频率附近连续调节微波频率,观察共振仪上的检波示数的变化,当表头示数发生变化时,及时调整检波器 2 的调谐活塞和灵敏度,使检波指针示数合适。观察示数随微波频率的变化关系。
- 仔细调节微波频率观察谐振腔的输出功率,找到其谐振频率  $f_0$ ,将检波器 2 连接到微安电流表上,调节衰减器,使微安表示数合适,在此频率左右单调、逐点测量传输式谐振腔的谐振曲线,并计算其品质因数。
- 将微波频率设置为  $f_0$ ,工作方式设为扫场,放入铁磁样品,调节磁场电流扫场为最大,调节磁场电流,直到在示波器 (x-y 扫描方式) 观察到共振曲线,调节相移钮,使左右信号重合,调节各参数 (电磁铁电流/相移/微调谐振频率),使共振曲线接近理想图形。
- 分别观察不同铁氧体样品的共振线宽。
  - 在谐振腔中放入不同的铁氧体样品,观察共振信号的变化,记录共振曲线的图像,分析不同样品共振信号的差异与成因。
  - 用逐点法测量样品的共振曲线:

- A. 将待测样品放入谐振腔,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;
  - B. 铁磁共振仪设为检波,将检波器 2 连接到微安表上,从小到大调节磁场电流,用逐点法测量样品的共振曲线,注意合理设置测量点的步长,测量前一定要使谐振腔调谐,使曲线左右远离共振时的信号功率尽量相等(如果共振曲线左右功率不等,应微调谐振频率),绘制  $P - B$  图,测量多晶样品的共振线宽  $\Delta B$ 。
- (g) 用高斯计测量电磁铁电流与磁场强度的关系。
- (h) 计算样品的旋磁比  $\gamma = \frac{B_0}{\omega_0}$ 、 $g$  因子和弛豫时间  $\tau$ 。
- (i) 比较分析不同样品的弛豫时间不同的原因。
3. 关机:将铁磁共振仪的电磁铁电流调至最小,关仪器电源开关。

4 实验结果与分析讨论

5 结论与建议

\* \* \* \* \*

参 考 文 献

[1]. 北京师范大学物理实验教学中心.2018.3. 近代物理实验 II 讲义.1-13 页.

A 仪器参数

B 实验注意事项

C 实验记录