

# 微波系列实验

微波技术是近代发展起来的一门尖端科学技术,它不仅在通讯、原子能技术、空间技术、量子电子学以及农业生产等方面有着广泛的应用,在科学研究中也是一种重要的观测手段,微波的研究方法和测试设备都与无线电波的不同。从图 1 可以看出,微波的频率范围是处于光波和广播电视所采用的无线电波之间,因此它兼有两者的性质,却又区别于两者。与无线电波相比,微波有下述几个主要特点

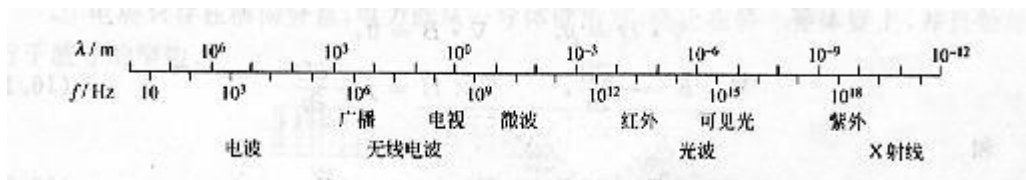


图 1 电磁波的分类

1. 波长短(1m—1mm): 具有直线传播的特性,利用这个特点,就能在微波波段制成方向性极好的天线系统,也可以收到地面和宇宙空间各种物体反射回来的微弱信号,从而确定物体的方位和距离,为雷达定位、导航等领域提供了广阔的应用。

2. 频率高: 微波的电磁振荡周期( $10^{-9}$ — $10^{-12}$ s)很短,已经和电子管中电子在电极间的飞越时间(约  $10^{-9}$ s)可以比拟,甚至还小,因此普通电子管不能再用作微波器件(振荡器、放大器和检波器)中,而必须采用原理完全不同的微波电子管(速调管、磁控管和行波管等)、微波固体器件和量子器件来代替。另外,微波传输线、微波元件和微波测量设备的线度与波长具有相近的数量级,在导体中传播时趋肤效应和辐射变得十分严重,一般无线电元件如电阻,电容,电感等元件都不再适用,也必须用原理完全不同的微波元件(波导管、波导元件、谐振腔等)来代替。

3. 微波在研究方法上不像无线电那样去研究电路中的电压和电流,而是研究微波系统中的电磁场,以波长、功率、驻波系数等作为基本测量参量。

4. 量子特性: 在微波波段,电磁波每个量子的能量范围大约是  $10^{-6}$ ~ $10^{-3}$ eV,而许多原子和分子发射和吸收的电磁波的波长也正好处在微波波段内。人们利用这一特点来研究分子和原子的结构,发展了微波波谱学和量子电子学等尖端学科,并研制了低噪音的量子放大器和准确的分子钟,原子钟。(北京大华无线电仪器厂)

5. 能穿透电离层: 微波可以畅通无阻地穿越地球上空的电离层,为卫星通讯,宇宙通讯和射电天文学的研究和发展提供了广阔的前途。

综上所述微波具有自己的特点,不论在处理问题时运用的概念和方法上,还是在实际应用的微波系统的原理和结构上,都与普通无线电不同。微波实验是近代物理实验的重要组成部分。

## 微波基本知识

### 一、电磁波的基本关系

描写电磁场的基本方程是:

$$\begin{aligned} \Delta \cdot D &= \rho, & \Delta \cdot B &= 0 \\ \Delta \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, & \Delta \times H &= j + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

和

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H, \quad j = \gamma E. \quad (2)$$

方程组(1)称为 Maxwell 方程组,方程组(2)描述了介质的性质对场的影响。

对于空气和导体的界面，由上述关系可以得到边界条件(左侧均为空气中场量)

$$E_t = 0, \quad E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

$$H_t = i, \quad H_n = 0。$$

方程组(3)表明，在导体附近电场必须垂直于导体表面，而磁场则应平行于导体表面。

由于微波的波长短，频率高，它已经成为一种电磁辐射，所以传输微波就不能用一般的金属导线。常用的微波传输器件有同轴线、波导管、带状线和微带线等，引导电磁波传播的空心金属管称为波导管。常见的波导管有矩形波导管和圆柱形波导管两种。从电磁场理论知道，在自由空间传播的电磁波是横波，简称为 TEM 波，理论分析表明，在波导中只能存在下列两种电磁波：*TE* 波，即横电波，它的电场只有横向分量而磁场有纵向分量；*TM* 波，即横磁波，它的磁场只有横向分量而电场存在纵横分量，在实际使用中，总是把波导设计成只能传输单一波形。*TE*<sub>10</sub> 波是矩形波导中最简单和最常使用的一种波型，也称为主波型。

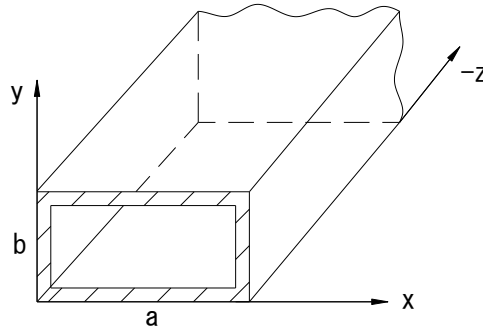


图 2 矩形波导管

一般截面为  $a \times b$  的、均匀的、无限长的矩形波导如图 1 所示，管壁为理想导体，管内充以介电常数为  $\varepsilon$ ，磁导率为  $\mu$  的介质，则沿  $z$  方向传播的 *TE*<sub>10</sub> 波的各分量为

$$E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (42)$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu} \cdot E_0 \sin \frac{\pi \cdot x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (43)$$

$$H_z = i \frac{\pi}{\omega \mu a} \cdot E_0 \cos \frac{\pi \cdot x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (44)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (45)$$

其中  $\omega = \beta / \sqrt{\mu \varepsilon}$  为电磁波的角频率， $\beta = 2\pi / \lambda_g$  称为相位常数，

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}} \quad (46)$$

$\lambda_g$  称为波导波长,  $\lambda_c = 2a$  为截止或临界波长(  $a = 22.86\text{mm}$  ,  $b = 10.16\text{mm}$  ),  $\lambda = c / f$  ,

$TE_{10}$  波具有下列特性:

- a) 存在一个截止波长  $\lambda_c$  , 只有波长  $\lambda < \lambda_c$  的电磁波才能在波导管中传播。
- b) 波长为  $\lambda$  的电磁波在波导中传播时, 波导波长  $\lambda_g >$  自由空间波长  $\lambda$  。
- c) 电场矢量垂直于波导宽壁 (只有  $E_y$ ), 沿  $x$  方向两边为 0, 中间最强, 沿  $y$  方向是均匀的。磁场矢量在波导宽壁的平面内 (只有  $H_x$ 、 $H_z$ ),  $TE_{10}$  的含义是 TE 表示电场只有横向分量。1 表示场沿宽边方向有一个最大值, 0 表示场沿窄边方向没有变化 (例如  $TE_{mn}$  , 表示场沿宽边和窄边分别有  $m$  和  $n$  个最大值)。
- d) 磁场既有横向分量, 也有纵向分量, 磁力线环绕电力线。电磁场在波导的纵方向( $z$ )上形成行波。

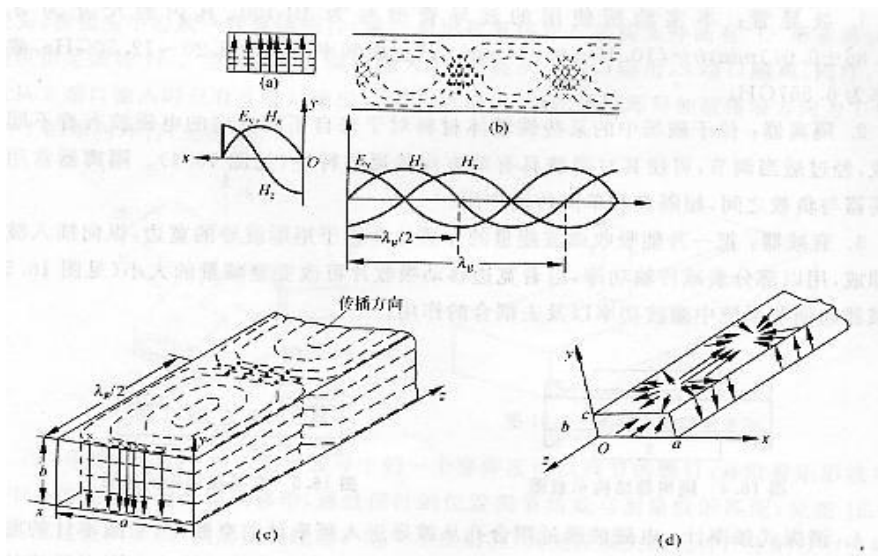


图 3  $TE_{10}$  波的电磁场结构 (a) , (b) , (c) 及波导壁电流分布 (d)

实际使用时, 波导不是无限长的, 它的终端一般接有负载, 当入射电磁波没有被负载全部吸收时, 波导中就存在反射波而形成驻波, 为此引入反射系数  $\Gamma$  和驻波比  $\rho$  来描述这种状态。

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = |\Gamma| e^{i\varphi} \quad (47)$$

$$\rho = \frac{|E_{\max}|}{|E_{\min}|} \quad (48)$$

$E_r$ 、 $E_i$  分别是某横截面处电场反射波和电场入射波， $\varphi$  是它们之间的相位差。 $E_{\max}$  和  $E_{\min}$  分别是波导中驻波电场最大值和最小值。 $\rho$  和  $\Gamma$  的关系为

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (49)$$

当微波功率全部被负载吸收而没有反射时，此状态称为匹配状态，此时  $|\Gamma| = 0$ ， $\rho = 1$ ，波导内是行波状态。当终端为理想导体时，形成全反射，则  $|\Gamma| = 1$ ， $\rho = \infty$ ，称为全驻波状态。当终端为任意负载时，有部分反射，此时为行驻波状态（混波状态）。

## 常用微波元件

- 微波源：**提供所需微波信号，频率范围在 8.6~9.6GHz 内可调，工作方式有等幅、方波、外调制等，实验时根据需要加以选择。

**固态微波信号源：**教学仪器中常用的微波振荡器有两种，一种是反射式速调管振荡器，另外一种是耿式（Gunn）二极管振荡器，也称为体效应二极管振荡器，或者称为固态源。

耿式二极管振荡器的核心是耿式二极管。耿式二极管主要是基于 n 型砷化镓的导带双谷——高能谷和低能谷结构。1963 年耿式在实验中观察到，在 n 型砷化镓样品的两端加上直流电压，当电压较小时样品电流随电压的增高而增大；当电压超过某一临界值  $V_{th}$  后，随着电压的增高电流反而减小，这种随着电场的增加电流下降的现象称为负阻效应，电压继续增大（ $V > V_b$ ），则电流趋向于饱和，如图 7 所示，这说明 n 型砷化镓样品具有负阻特性。

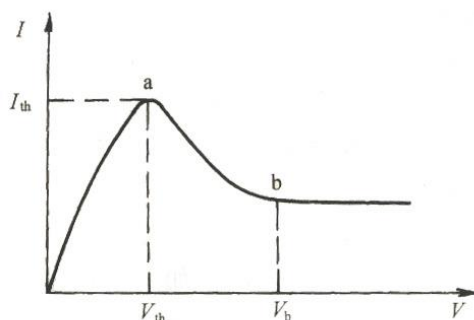


图 4 耿式二极管的电流—电压特性

砷化镓的负阻特性可以用半导体能带理论解释，如图 5 所示，砷化镓是一种多能谷材料，其中具有最低能量的主谷和能量较高的临近子谷具有不同的性质，当电子处于主谷时

有效质量  $m^*$  较小，则迁移率  $\mu$  较高；当电子处于子谷时有效质量  $m^*$  较大，则迁移率  $\mu$  较低。在常温且无外加磁场时，大部分电子处于电子迁移率高而有效质量低的主谷，随着外加磁场的增大，电子平均漂移速度也增大；当外加电场大到足够使主谷的电子能量增加至  $0.36\text{eV}$  时，部分电子转移到子谷，在那里迁移率低而有效质量较大，其结果是随着外加电压的增大，电子的平均漂移速度反而减小。

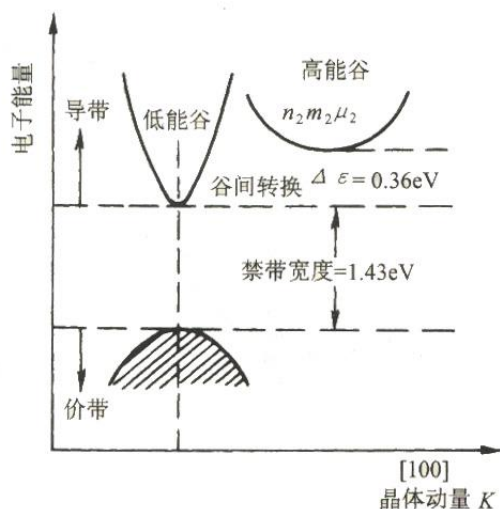


图 5 砷化镓的能带结构

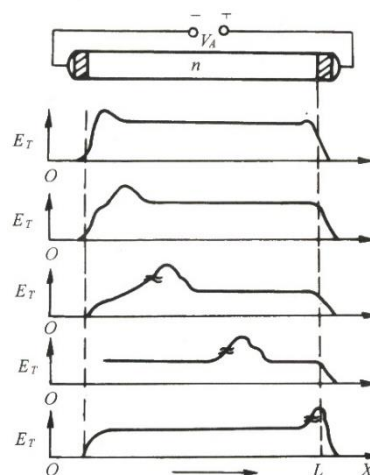


图 6 耿式管中畴的形成、传播和消失过程

图 6 所示为一耿式二极管示意图。在管两端加电压，当管内电场  $E$  略大于  $E_T$  ( $E_T$  为负阻效应起始电场强度) 时，由于管内局部电量的不均匀涨落 (通常在阴极附近)，在阴极端开始生成电荷的偶极畴，偶极畴的形成使畴内电场增大而使畴外电场下降，从而进一步使畴内的电子转入高能谷，直至畴内电子全部进入高能谷，畴不再长大。此后，偶极畴在外电场作用下以饱和漂移速度向阳极移动直至消失。而后整个电场重新上升，再次重复相同的过程，周而复始的产生畴的建立、移动和消失，构成电流的周期性振荡，形成一连串很窄的电流，这就是耿式二极管道振荡原理。

耿式二极管的工作频率主要由偶极畴的渡越时间决定，实际应用中，一般将耿式二极管装在金属谐振腔中做成振荡器，通过改变腔体内的机械调谐装置可以在一定范围内改变耿式二极管的工作频率。

## 2. 波导管:

本实验所使用的波导管型号为 BJ—100，其内腔尺寸为  $a = 22.86\text{mm}$ ， $b = 10.16\text{mm}$ 。其主模频率范围为  $8.20 \sim 12.50\text{GHz}$ ，截止频率为  $6.557\text{GHz}$ 。

## 3. 隔离器:

隔离器是一种不可逆的衰减器，在正方向（或者需要传输的方向上）它的衰减量很小，约 0.1dB 左右，反方向的衰减量则很大，达到几十 dB；两个方向的衰减量之比为隔离度。若在微波源后面加隔离器，它对输出功率的衰减量很小，但对于负载反射回来的反射波衰减量很大。这样，可以避免因负载变化使微波源的频率及输出功率发生变化，即在微波源和负载之间起到隔离的作用。

**4. 衰减器：**把一片能吸收微波能量的吸收片垂直于矩形波导的宽边，纵向插入波导管即成(见图 7)，用以部分衰减传输功率，沿着宽边移动吸收片可改变衰减量的大小。衰减器起调节系统中微波功率以及去耦合的作用。

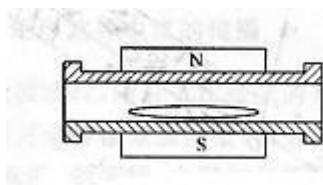


图 7 隔离器结构示意图

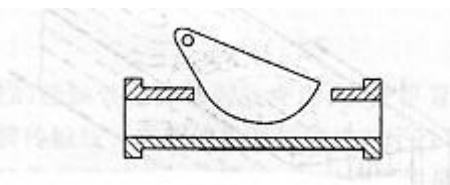


图 7 衰减器结构示意图

**5. 谐振式频率计（波长表）：**

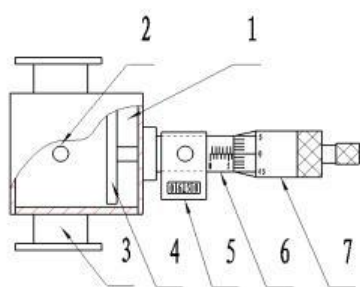


图 8 a 谐振式频率计结构原理图一

1. 谐振腔腔体
2. 耦合孔
3. 矩形波导
4. 可调短路活塞
5. 计数器
6. 刻度
7. 刻度套筒

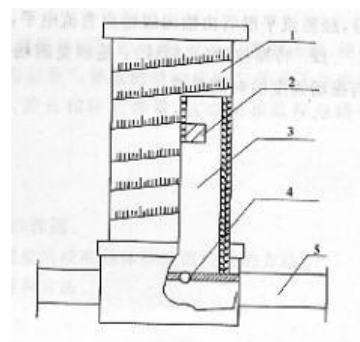


图 8 b 谐振式频率计结构原理图二

1. 螺旋测微机构
2. 可调短路活塞
3. 圆柱谐振腔
4. 耦合孔
5. 矩形波导

教学实验仪器中使用较多的是“吸收式”谐振频率计，谐振式频率计包含一个装有调谐柱塞的圆柱形空腔，腔外有 GHz 的数字读出器，空腔通过隙孔耦合到一段直波导管上，谐振式频率计的腔体通过耦合元件与待测微波信号的传输波导相连接，形成波导的分支，当频率计的腔体失谐时，腔里的电磁场极为微弱，此时它不吸收微波功率，也基本上不影响波导中波的传输，响应的系统终端输出端的信号检测器上所指示的为一恒定大小的信号输出，测量频率时，调节频率计上的调谐机构，将腔体调节至谐振，此时波导中的电磁场就有部分功

率进入腔内，使得到达终端信号检测器的微波功率明显减少，只要读出对应系统输出为最小值时调谐机构上的读数，就得到所测量的微波频率。

**6. 驻波测量线：**探测微波传输系统中电磁场分布情况，测量驻波比、阻抗、调匹配等，是微波测量的重要工作，测量所用基本仪器是驻波测量线(见图 9)。

测量线由开槽波导、不调谐探头和滑架组成。开槽波导中的场由不调谐探头取样，探头的移动靠滑架上的传动装置，探头的输出送到显示装置，就可以显示沿波导轴线的电磁场变化信息。测量线外形如图 9：

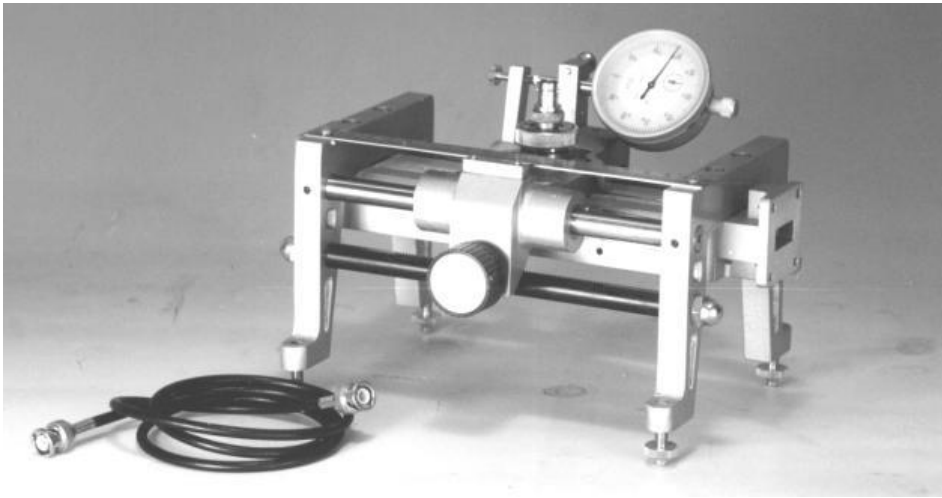


图 9：DH364A00 型 3cm 测量线外形

测量线波导是一段精密加工的开槽直波导，此槽位于波导宽边的正中央，平行于波导轴线，不切割高频电流，因此对波导内的电磁场分布影响很小，此外，槽端还有阶梯匹配段，两端法兰具有尺寸精确的定位和连接孔，从而保证开槽波导有很低的剩余驻波系数。

不调谐探头由检波二极管、吸收环、盘形电阻、弹簧、接头和外壳组成，安放在滑架的探头插孔中。不调谐探头的输出为 BNC 接头，检波二极管经过加工改造的同轴检波管，其内导体作为探针伸入到开槽波导中，因此，探针与检波晶体之间的长度最短，从而可以不经调谐，而达到电抗小、效率高，输出响应平坦。

滑架是用来安装开槽波导和不调谐探头的，其结构见图 9。把不调谐探头放入滑架的探头插孔中，拧紧锁紧螺钉，即可把不调谐探头固紧。探针插入波导中的深度为 1.5mm，约为波导窄边尺寸的 15%，

## 7. 晶体检波器：

微波检波系统采用半导体点接触二极管（又称微波二极管），外壳为高频铝瓷管，如图 10 所示，晶体检波器就是一段波导和装在其中的微波二极管，将微波二极管插入波导宽臂中，使它对波导两宽臂间的感应电压（与该处的电场强度成正比）进行检波。

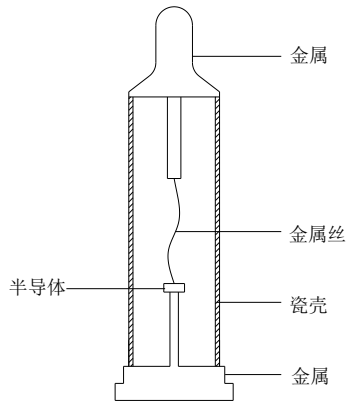


图 10 晶体检波器结构

8. **匹配负载：**波导中装有很好地吸收微波能量的电阻片或吸收材料，它几乎能全部吸收入射功率。

9. **环行器：**

环行器是一种多端口定向传输电磁波的微波器件，其中使用最多的是三端口和四端口环形器。

以下以三端口结型波导环行器为例来说明其特性。

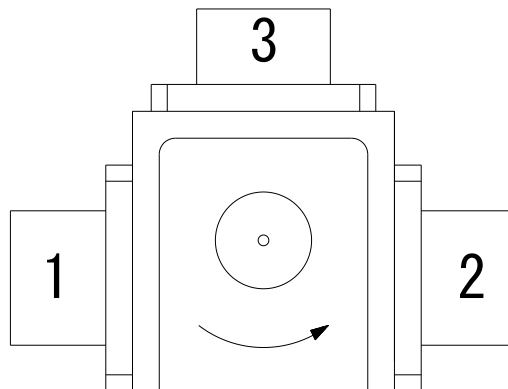


图 11 环行器结构

由于三个分支波导交于一个微波结上，所以称为“结”型。这里分支传输线为波导，但也可以由同轴线或微带线等构成。该环形器内装有一个圆柱形铁氧体柱，为了使电磁波产生场移效应，通常在铁氧体柱上沿轴向施加恒磁场，根据场移效应原理，被磁化的铁氧体将对通过的电磁波产生场移，如图 11 所示，当电磁波由臂 1 馈入时，由于场移效应，它将向臂 2 方向，同样道理由臂 2 馈入的电磁波也只向臂 3 方向偏移而不馈入臂 1，依此类推，该环行器将具有向右定向传输的特性。

铁氧体环行器经常应用于微波源与微波腔体之间，特别是在反应环境十分恶劣的情况下能够保护发生电源与磁控管的安全。



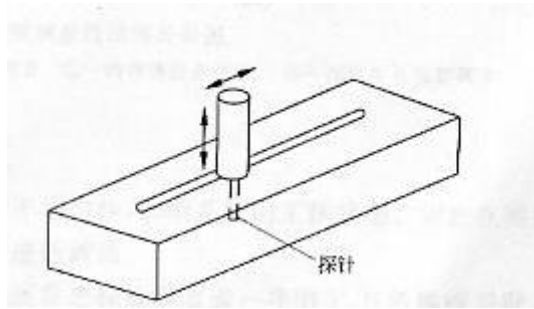


图 12 单螺调配器示意图

10. **单螺调配器**：插入矩形波导中的一个深度可以调节的螺钉，并沿着矩形波导宽壁中心的无辐射缝作纵向移动，通过调节探针的位置使负载与传输线达到匹配状态(见图 12)。调匹配过程的实质，就是使调配器产生一个反射波，其幅度和失配元件产生的反射波幅度相等而相位相反，从而抵消失配元件在系统中引起的反射而达到匹配。

### 11. 双 T 调配器

调配器是用来使它后面的微波部件调成匹配，匹配就是使微波能够完全进入而一点也不能反射回来。微波段电子自旋共振使用的是双 T 调配器，其结构如图 13 所示，

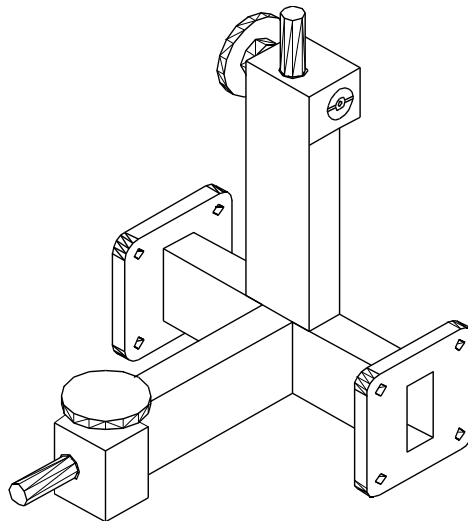


图 13 双 T 接头调配器

它是由双 T 接头构成，在接头的 H 臂和 E 臂内各接有可以活动的短路活塞，改变短路活塞在臂中的位置，便可以使得系统匹配。由于这种匹配器不妨害系统的功率传输和结构上具有某些机械的对称性，因此具有以下优点：a) 可以使用在高功率传输系统，尤其是在毫米波波段；b) 有较宽的频带；c) 有很宽的驻波匹配范围。

双 T 调配器调节方法：在驻波不太大的情况下，先调谐 E 臂活塞，使驻波减至最小，然后再调谐 H 臂活塞，就可以得到近似的匹配（驻波比  $s < 1.10$ ），如果驻波较大，则需要反复调谐 E 臂和 H 臂活塞，才能使驻波比降低到很小的程度（驻波比  $s < 1.02$ ）。

### 12. 矩形谐振腔

矩形谐振腔是由一段矩形波导，一端用金属片封闭而成，封闭片上开一小孔，让微波功率进入，另一端接短路活塞，组成反射式谐振腔，腔内的电磁波形成驻波，因此谐振腔内各点电场和磁场的振幅有一定的分布，实验时被测样品放在交变磁场最大处，而稳恒磁场垂至于波导宽边，这样可以保证稳恒磁场和交变磁场互相垂直。

### 13. 短路活塞

短路活塞是接在传输系统终端的单臂微波元件，如图14所示，它接在终端对入射微波功率几乎全部反射而不吸收，从而在传输系统中形成纯驻波状态。它是一个可移动金属短路面的矩形波导，也可称可变短路器。其短路面的位置可通过螺旋来调节并可直接读数。

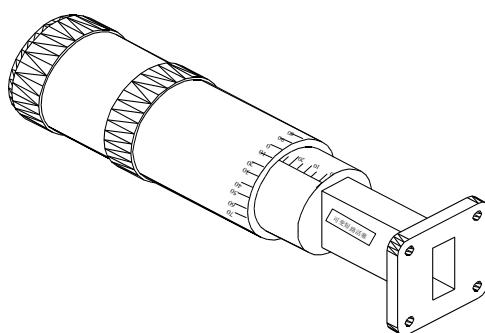


图14 短路活塞装置图

14. **选频放大器**: 用于测量微弱低频信号，信号经升压、放大，选出 1kHz 附近的信号，经整流平滑后由输出级输出直流电平，由对数放大器展宽供给指示电路检测。

15. **特斯拉计(高斯计)**: 是测量磁场强度的一种仪器，用它可以测量电磁铁的电流与磁场强度的对应关系。