



廣西師範大學
GUANGXI NORMAL UNIVERSITY

矩形波導中導行電磁波的觀測



背景资料

1. 微波是指频率为300MHz-300GHz的电磁波，是无线电波中一个有限频带的简称，即波长在1毫米~1米之间的电磁波。微波频率比一般的无线电波频率高，通常也称为“超高频电磁波”。微波作为一种电磁波也具有波粒二象性。微波的基本性质通常呈现为穿透、反射、吸收三个特性。对于玻璃、塑料和瓷器，微波几乎是穿越而不被吸收。对于水和食物等就会吸收微波而使自身发热。而对金属类东西，则会反射微波。

2. 由于微波的特性，其在空气中传播损耗很大，传输距离短，但机动性好，工作频宽大，除了应用于5G移动通信的毫米波技术之外，微波传输多在金属波导和介质波导中。



一、实验目的

1. 熟悉波导测量线和吸收式频率计的使用方法；
2. 掌握微波频率和矩形波导波长的测量方法；
3. 观测矩形波导终端三种状态（短路、接任意负载、匹配）时， TE_{10} 波的电场分量沿轴向上的分布。



二、实验原理

微波通常由**直流电**或**50Hz交流电**通过一特殊的器件来获得。可以产生微波的器件有许多种，但主要分为**两大类**：**半导体器件**和**电真空器件**。电真空器件是利用**电子在真空中运动来完成能量变换的器件**，或称之为**电子管**。在电真空器件中能产生大功率微波能量的有**磁控管、多腔速调管、微波三、四极管、行波管**等。在微波加热领域特别是工业应用中使用的主要是**磁控管及速调管**。

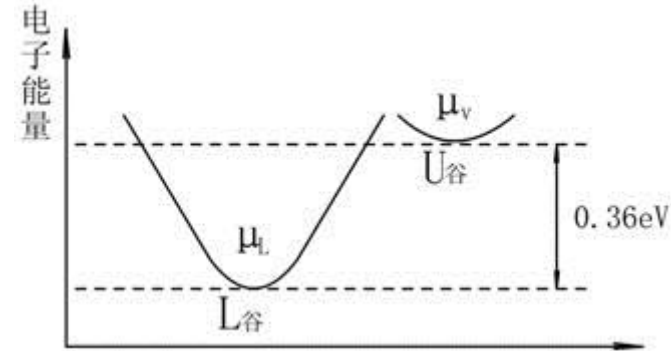
本实验使用半导体器件--**体效应管**产生微波。



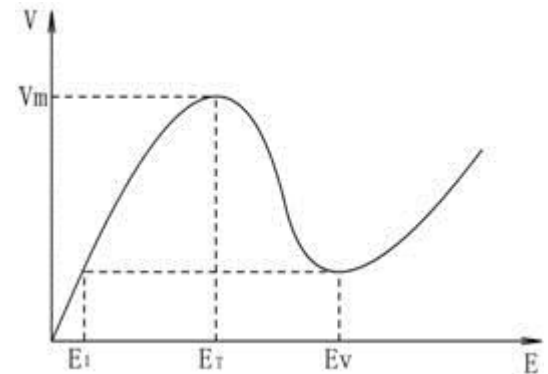
(一) 体效应管振荡器（固态源）工作原理

N型砷化镓体效应二极管工作特性

- 在常温下外加低电场时，大部分电子处在电子迁移率高的低能谷中，当外加高电场时，许多电子被激发跃迁至电子迁移率低的高能谷中。
- 当外加电场足够使低能谷中的电子增加至 0.36eV 时，大部分电子被激发跃迁到高能谷中，电子迁移率因而急剧下降。这种随电场的增加而导致电流下降的现象称为负阻效应。



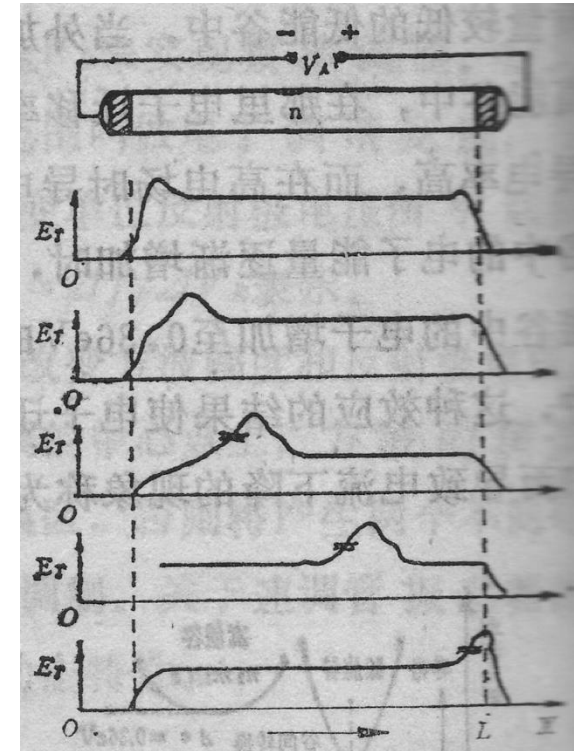
N型GaAs导带结构示意图



电子速度-电场强度关系图



- 如图所示是一个砷化镓器件。给其加上一个大于其阈值电压的电压值时，在阴极开始形成电荷的偶极畴，而后很快形成，并以饱和漂移速度向阳极移动至消失。而后整个电场又重新上升，再次重复。构成了电流的周期振荡。



固态源中畴的形成、传播和消失过程



(二) 常用波导元件特性

1. 矩形波导管中 TE_0 波（横电波）

- 横截面为 $a \times b$ 的矩形波导管，其管壁为理想导体，则管内沿着 Z 轴传播的 TE_{10} 波的各个分量可以写成：

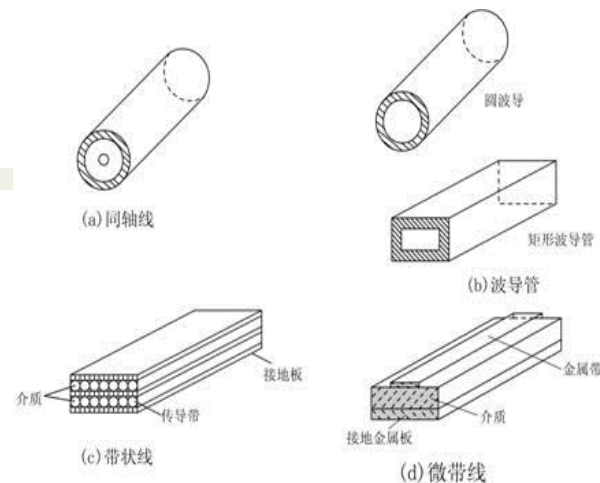
$$E_y = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_x = E_z = 0$$

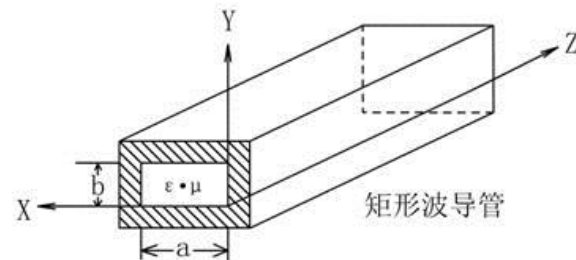
$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z = j \frac{\pi}{\alpha} E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

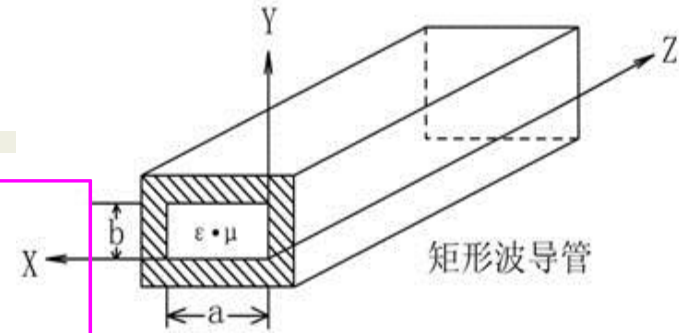
$$H_y = 0$$



波导管



矩形波导管



矩形波导管

- ▶ 其中，相位常数： $\beta = 2\pi / \lambda_g$
- ▶ 波导波长： $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}$
- ▶ 临界波长： $\lambda_c = 2a$
- ▶ 自由空间波长： $\lambda = c / f$
- ▶ $\lambda_c = 2a$ 称为波导的截止波长，只有波长 $\lambda < \lambda_c$ 的电磁波才能在波导管中传播。电场矢量垂直于波导宽臂（ \mathbf{E}_y ），而磁场矢量在平行于波导宽臂的平面内（ $\mathbf{H}_x, \mathbf{H}_z$ ）。

$$E_y = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{\alpha} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_x = E_z = 0$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_0 \sin\left(\frac{\pi}{\alpha} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z = j \frac{\pi}{\alpha} E_0 \cos\left(\frac{\pi}{\alpha} x\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y = 0$$

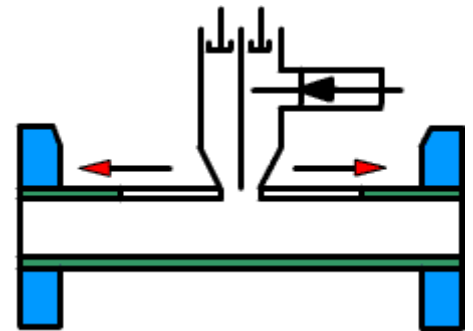
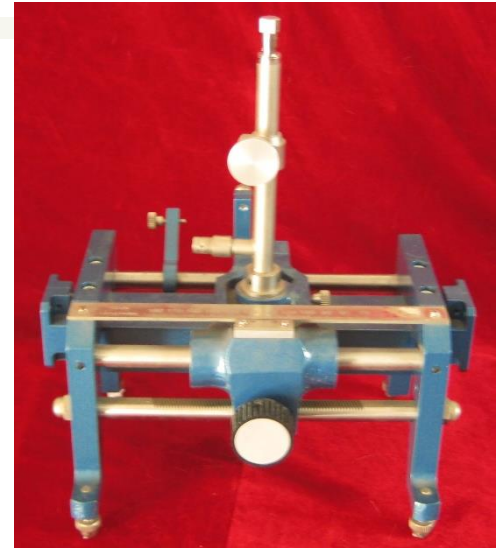


2. 测量线

- 微波测量线是测量波导中微波电场分布的精密仪器。
- 是一段在宽边中心线上开槽的波导管和可沿槽线滑动的探针。探针从波导中耦合出少量微波功率，通过二极管检波就给出沿波导各点的电场分布。指示器的读数 I 是探针所在处 $|E|$ 对应的检波电流。 $|E|$ 与 I 的对应关系可近似地认为是平方律检波，

即：
$$|E| = \sqrt{\frac{I}{C}}$$

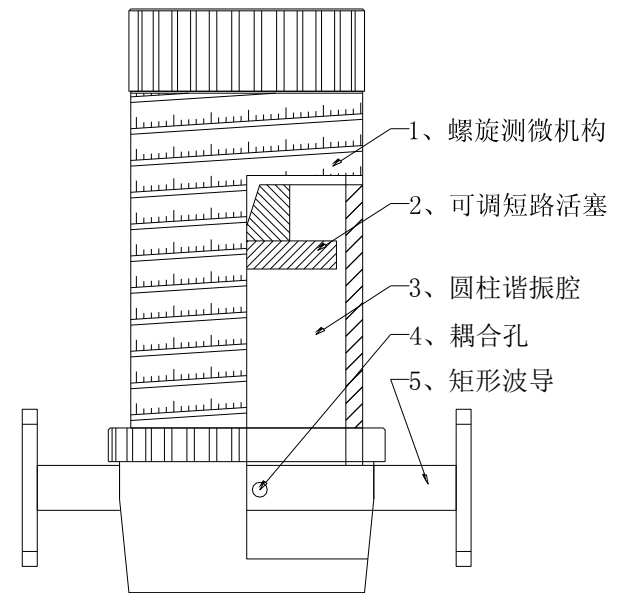
采用归一化表示为：
$$|E'| = \sqrt{I}$$





3. 频率计

频率计与波导系统的连接有**传输型**和**吸收型**两种。传输型具有输入与输出两个窗的谐振腔，当输入的微波与谐振腔谐振时，能量传输最大。**吸收式波长计**只有一个耦合元件与波导系统相耦合，当**微波频率与它谐振时**，输出指示为**一极小值**。右图为吸收型频率计。



吸收式频率计结构图



(三) 波导系统电场的基本解

- 电场的基本解为：
$$E_r = \frac{V_0}{r \ln(b/a)} e^{-j\beta z} = E_{rm} e^{-j\beta z}$$

(1) 当终端接短路负载时，导行波在终端全反射——纯驻波状态。

$$E_y = E_y^+ + E_y^- = E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta z} - E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{+j\beta z}$$

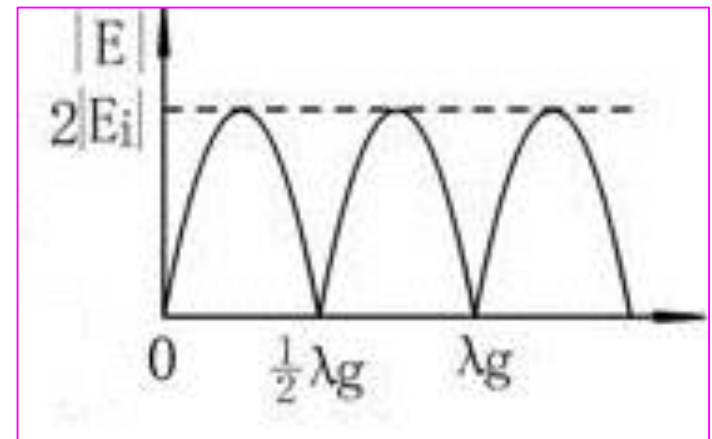
在 $x = \frac{a}{2}$ 处

$$E_y = E_{y0} (e^{-j\beta z} - e^{+j\beta z}) = -2E_{y0} \sin \beta z$$

其模值为： $|E_y| = 2E_{y0} |\sin \beta z|$

最大值和最小值分别为：

$$|E_y|_{\max} = 2E_{y0} \quad |E_y|_{\min} = 0$$





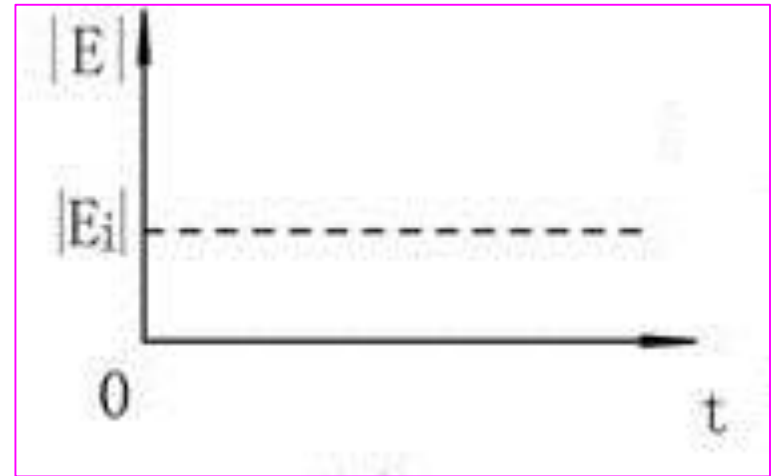
(三) 波导系统电场的基本解

- 电场的基本解为：
$$E_r = \frac{V_0}{r \ln(b/a)} e^{-j\beta z} = E_{rm} e^{-j\beta z}$$

(2) 当终端接匹配负载时，导行波仅有入射波而无反射波——行波状态。

$$E_y = E_{y0} e^{-j\beta z}$$

其模值为： $|E_y| = E_{y0}$





(三) 波导系统电场的基本解

- 电场的基本解为：
$$E_r = \frac{V_0}{r \ln(b/a)} e^{-j\beta z} = E_{rm} e^{-j\beta z}$$

(3) 当终端接任意负载时，导行波在终端部分被反射——行驻波状态。

$$E_y = E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta z} + E'_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{j\beta z}$$

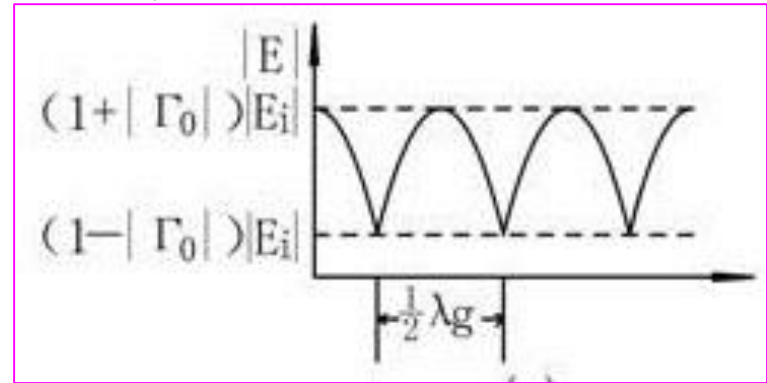
在 $x = \frac{a}{2}$ 处

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y0} e^{-j\beta z} + E'_{y0} e^{j\beta z} = (E_{y0} e^{-j\beta z} - E'_{y0} e^{-j\beta z}) + (E'_{y0} e^{-j\beta z} + E'_{y0} e^{-j\beta z}) \\ &= (E_{y0} - E'_{y0}) e^{-j\beta z} + 2E'_{y0} \cos \beta z \end{aligned}$$

其模值为：
$$|E_y| = \sqrt{(E_{y0} + E'_{y0})^2 \cos^2 \beta z + (E_{y0} - E'_{y0})^2 \sin^2 \beta z}$$

最大值和最小值分别为：

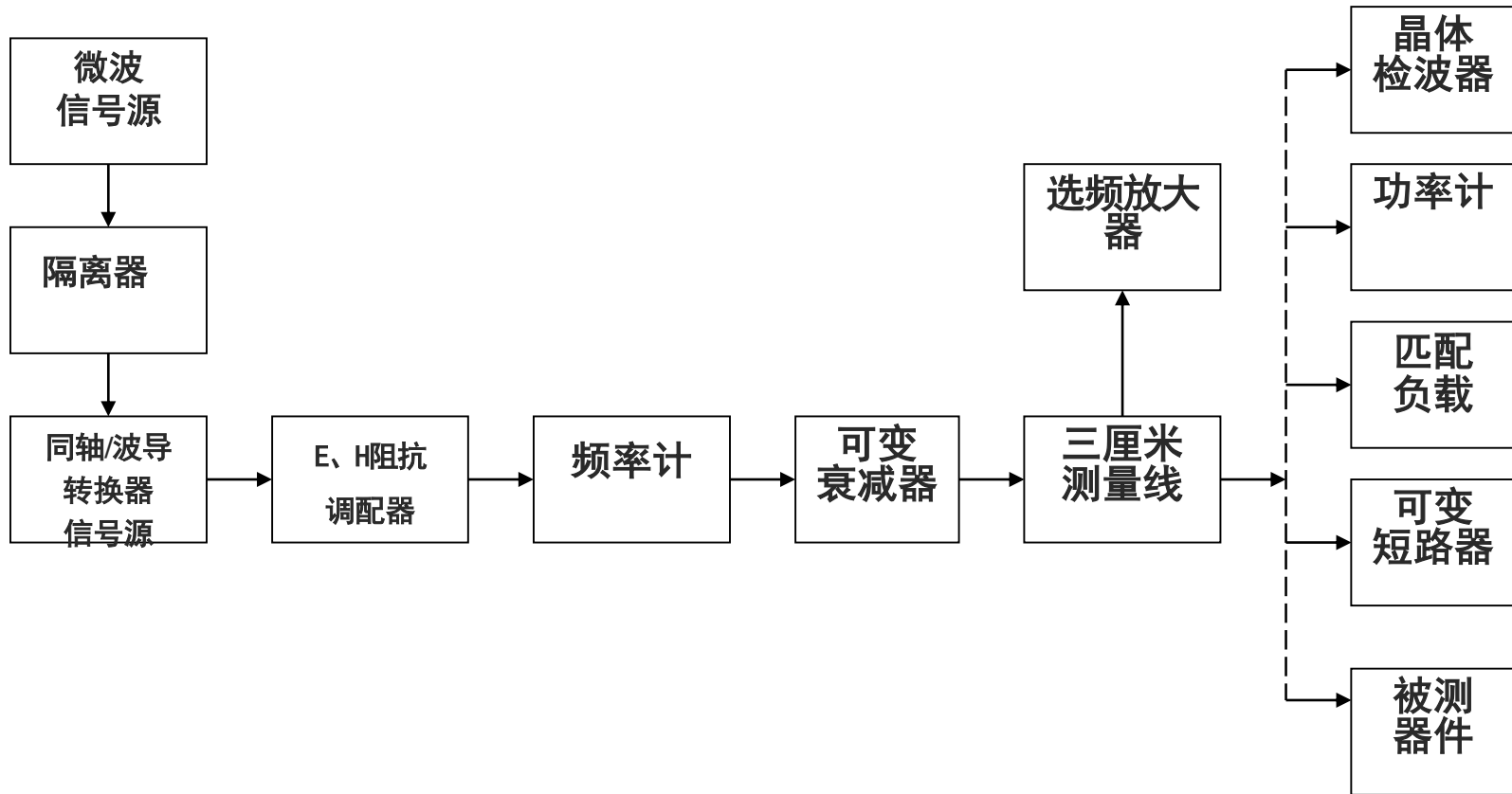
$$|E_y|_{\max} = E_{y0} + E'_{y0} \quad |E_y|_{\min} = E_{y0} - E'_{y0}$$





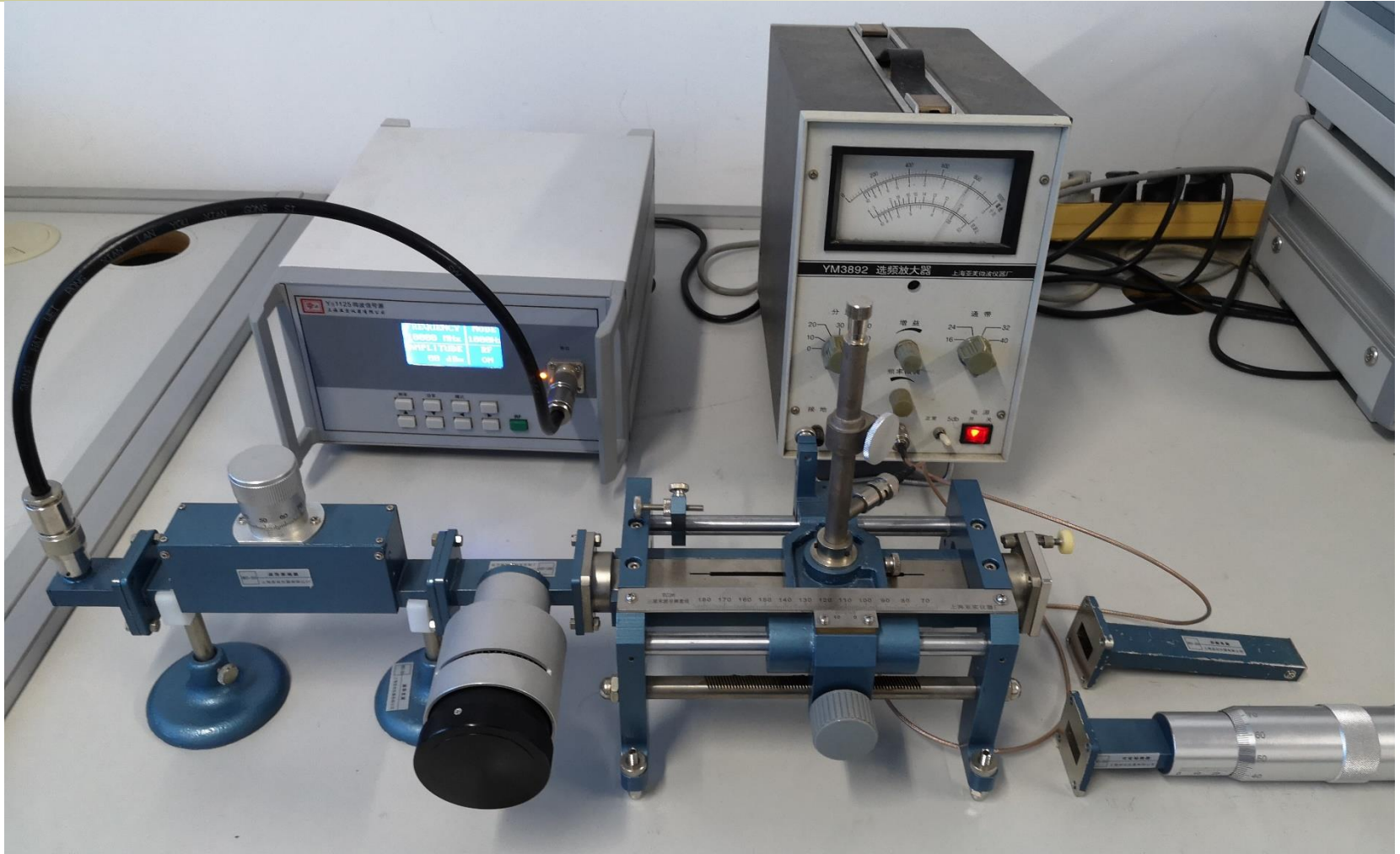
三、实验装置图

实验仪器和线路连接示意图





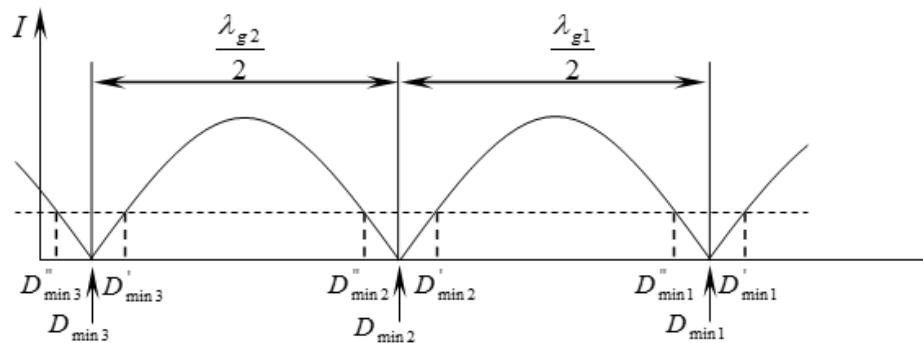
三、实验装置图





四. 实验步骤（简略）

1. 实验仪器的调试
2. 用吸收式频率计测量信号源频率
3. 用测量线利用如下图的交叉读数法测量波导波长
4. 用测量线测量终端三种不同负载（短路片、可变断路器、匹配负载）时 $|E'|$ 的分布



$$\lambda_g = \left| \frac{D'_{\min 1} + D''_{\min 1}}{2} - \frac{D'_{\min 2} + D''_{\min 2}}{2} \right| \times 2 = \left| (D'_{\min 1} + D''_{\min 1}) - (D'_{\min 2} + D''_{\min 2}) \right|$$



五. 注意的问题

1. **测量线探针**的插入深度可调。插得过深会影响波导内的场分布，增加测量误差；插得太浅，耦合的能量太少，检波电流很小，影响测量精度，**一般取插入深度为1~1.5mm合适。**
2. 利用吸收式频率计测量微波频率时，需要**缓慢转动频率计**才能准确找到微波输出为极小值的状态。



作业布置

- 根据实验要求完成相应的实验报告撰写。