



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

电磁场与微波技术综合实验

闫 森

信息与通信工程学院
电磁与信息技术研究所

2021年11月



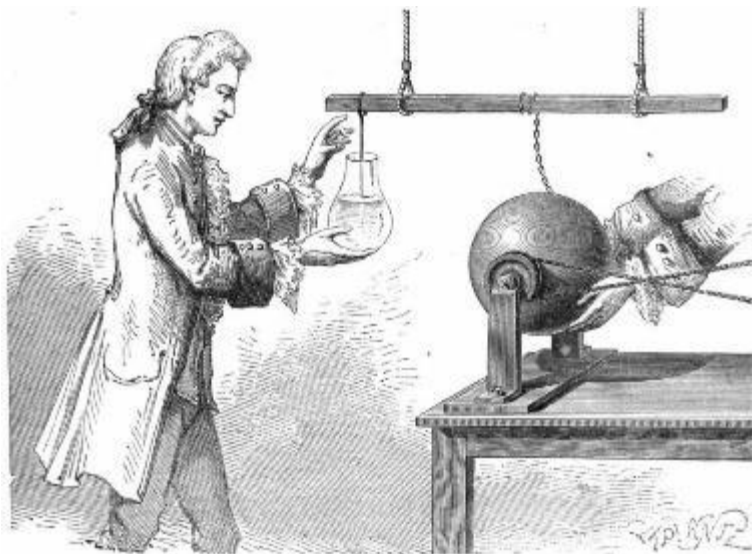


课程简介



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

- 电磁场是一门由实验发展而来的科学学科;
- 微波技术是一门利用电磁场解决工程问题的技术;

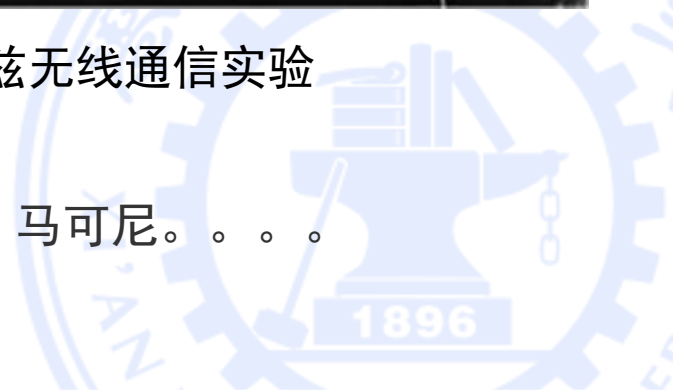


法拉第电磁感应实验



赫兹无线通信实验

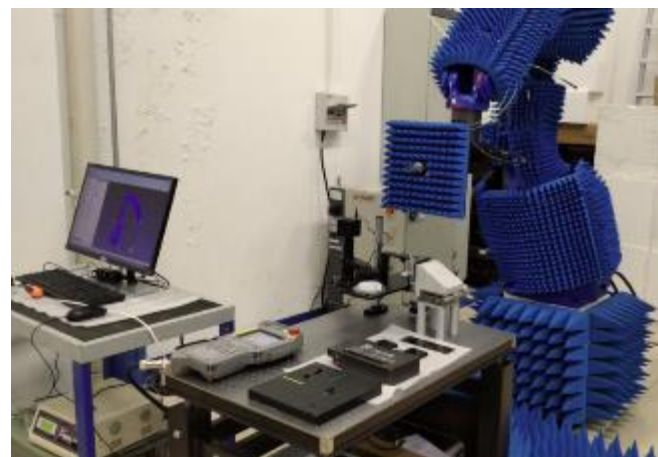
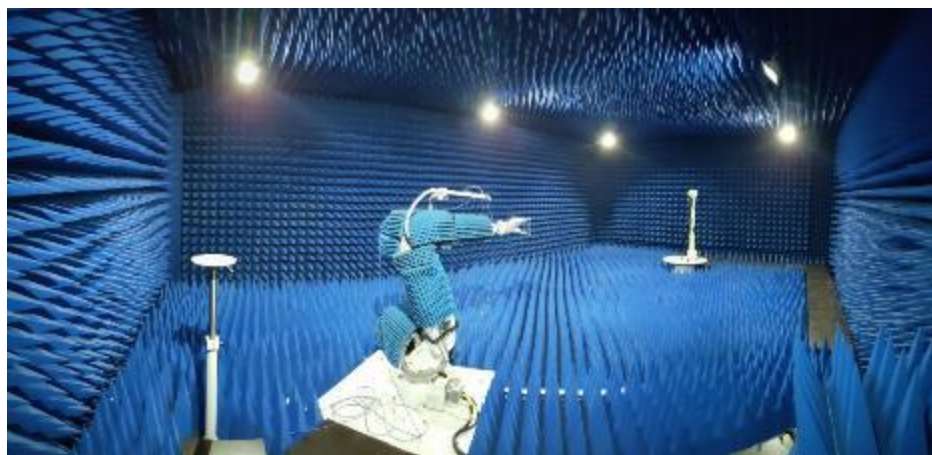
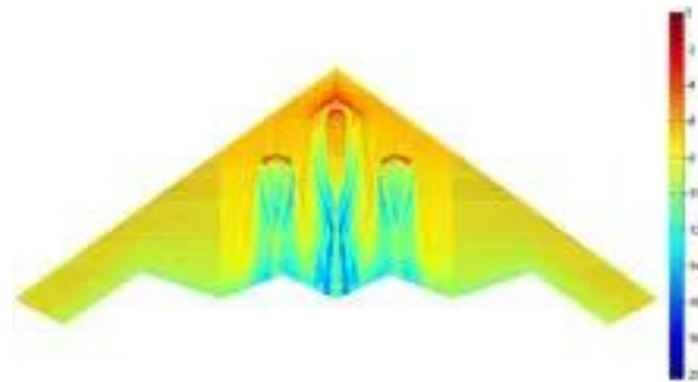
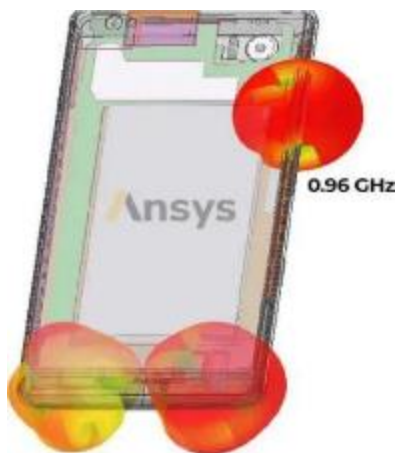
库仑、特斯拉、伏打、奥斯特、安培、毕奥、萨伐尔、马可尼。。。。





课程简介

- 当代先进电子器件的研发离不开电磁仿真计算和测试





课程简介

- 电磁场与微波技术综合实验 (INFT431405)
 - 专业核心课程 (实验实践类), 16学时 (0.5学分)
 - 时间: 9-14周 (预约), 地点: 西一楼374, 354
 - 成绩: 课堂表现+实验报告
 - 参考书: 电磁场与电磁波
- 授课教师: 闫森, 杨倩, 衣建甲, 李建星
- 前期课程: 电磁场与电磁波
- 后续课程: 微波电路、天线原理、光纤通信、微波与卫星通信、雷达原理、射频电路设计专题实验





课程简介



- 课程目标

- 通过实验直观理解电磁场和微波技术相关理论知识，加深对于频率、阻抗、反射、传播、S参量、辐射等概念的理解。
- 掌握常见微波仿真软件和测量仪器的使用方法。
- 简单微波器件和天线的设计、测量流程。
- 了解电磁场与微波技术的工程实用过程、发展现状和趋势，使学生建立自主学习和终身学习的意识。

- 实验内容：

- 4个专题实验（每次4学时）——分组完成

实验一

微波测试系统的调整 及频率测量

一、实验目的

1. 了解微波测试系统的组成；
2. 熟悉几种常用微波元件的结构；
3. 掌握微波测试系统的调试方法与操作；
4. 用测量线测量微波源的工作频率；

波导中的场分布

- 什么是导波结构、传输线、波导

凡是能够引导电磁波定向传输的装置统称为导波系统，被引导定向传输的电磁波称为导行电磁波，简称波导。

矩形导波是采用金属管传输电磁波的重要导波装置，其管壁通常为铜、铝或者其他金属材料，其特点是结构简单、机械强度大。波导内没有内导体，损耗低、功率容量大，电磁能量在波导管内部空间被引导传播，可以防止对外的电磁波泄露。

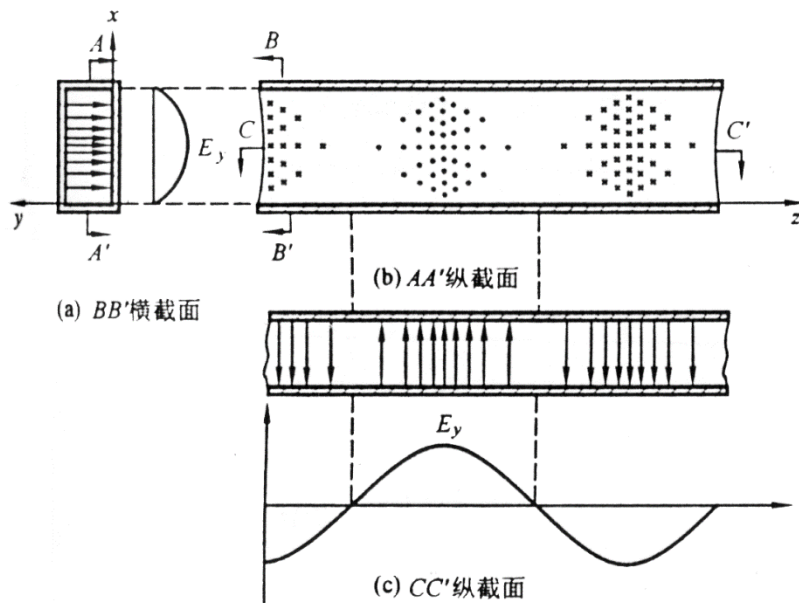
- 什么是波导的模式、主模：TE₁₀
- 波导中的波长与波速

$$f_c = \frac{v}{\gamma c} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

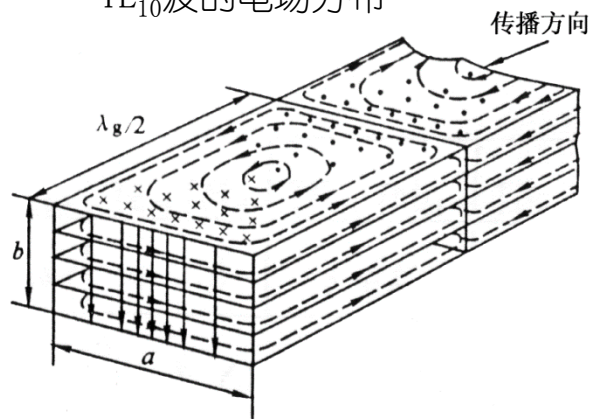
波导中的场分布

$$H_z(x, z, t) = \sqrt{2}H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - k_z z)$$

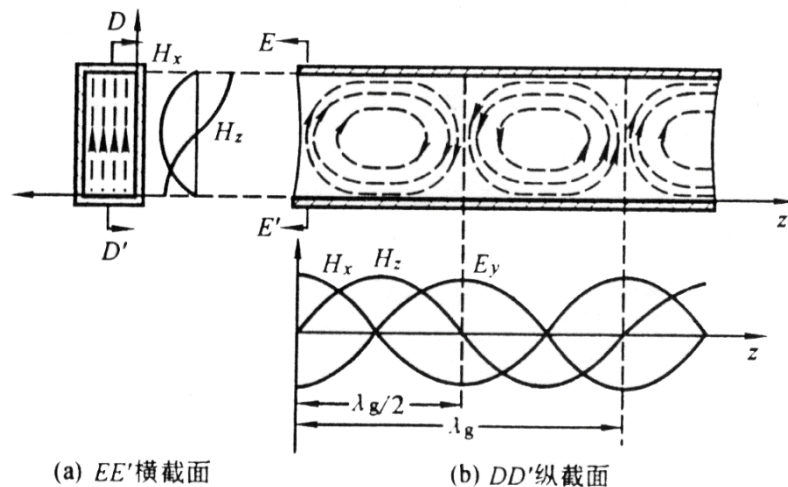
$$E_y(x, z, t) = \sqrt{2}E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - k_z z + \pi/2) \quad H_x(x, z, t) = \sqrt{2} \frac{\pi k_z}{ak_c^2} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - k_z z + \pi/2)$$



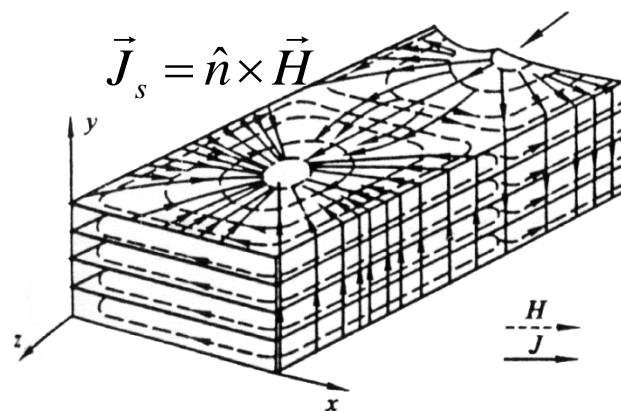
TE₁₀波的电场分布



TE₁₀波的立体电磁场分布



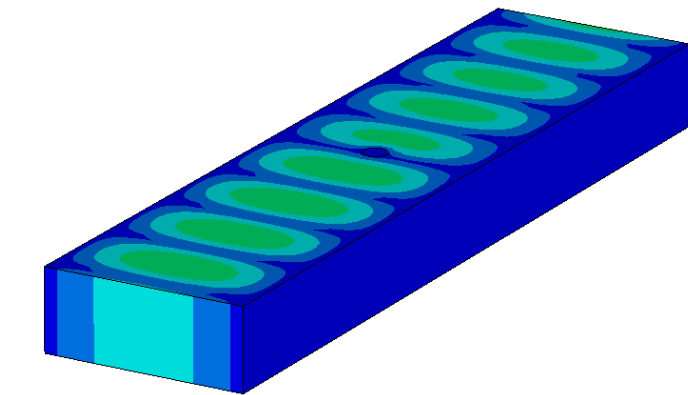
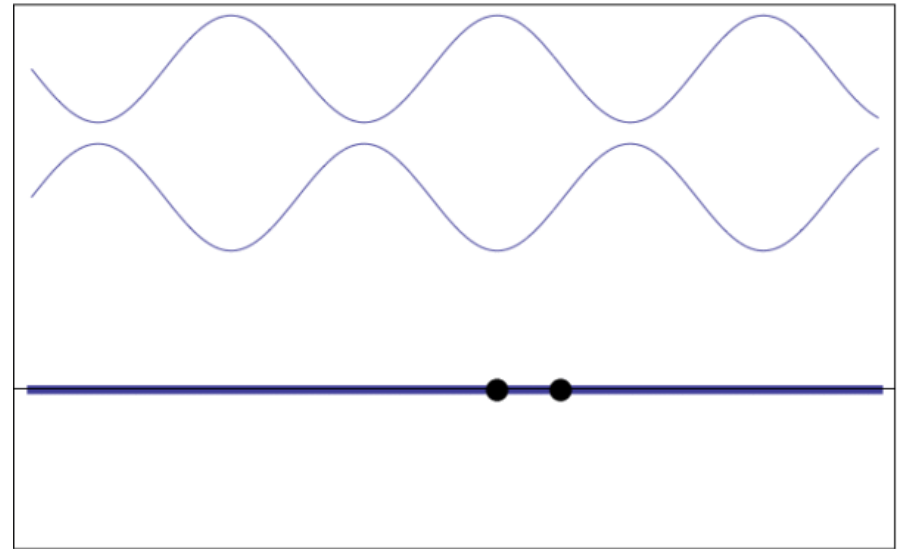
TE₁₀波的磁场分布



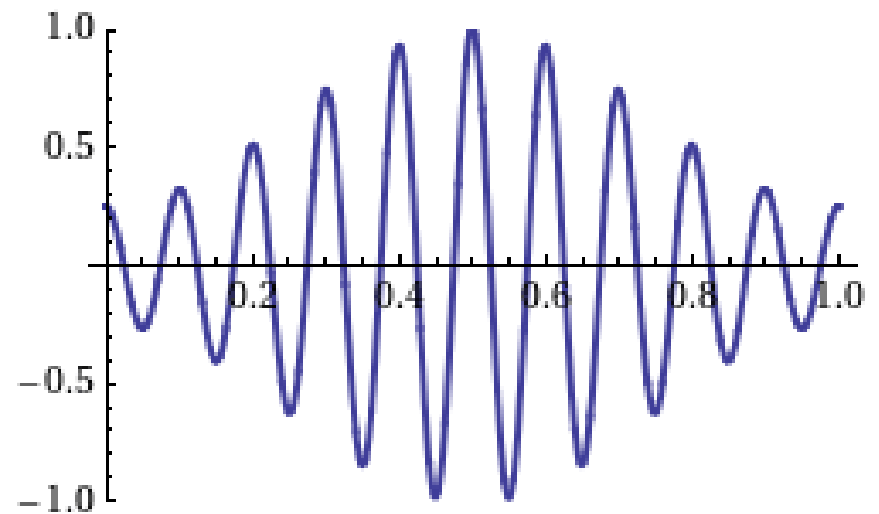
矩形波导中TE₁₀模的管壁电流

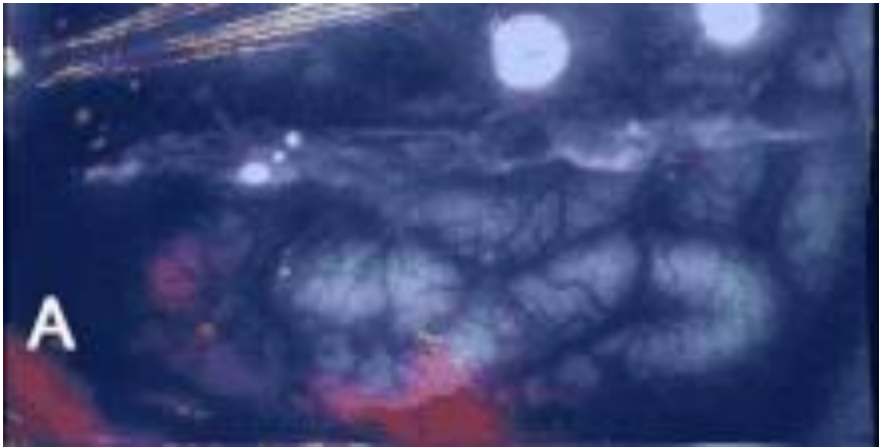
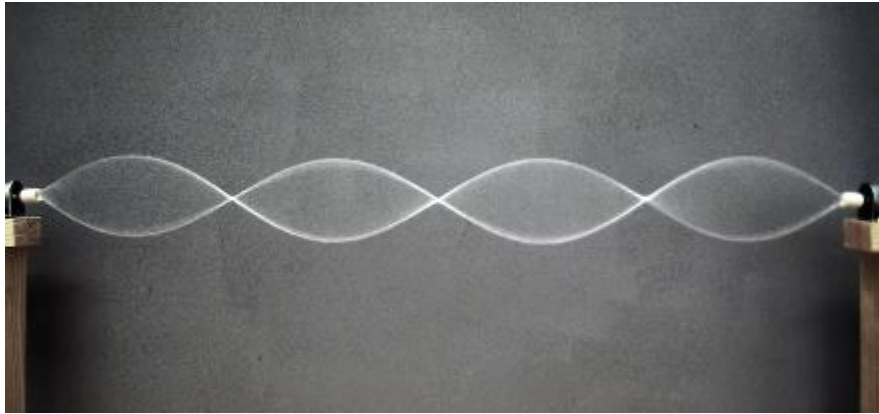
传输线的边界条件

- 波的干涉
- 开路边界、短路边界、匹配边界
- 驻波的形成
- 波节点、波腹点
- 全反射、全吸收、部分反射

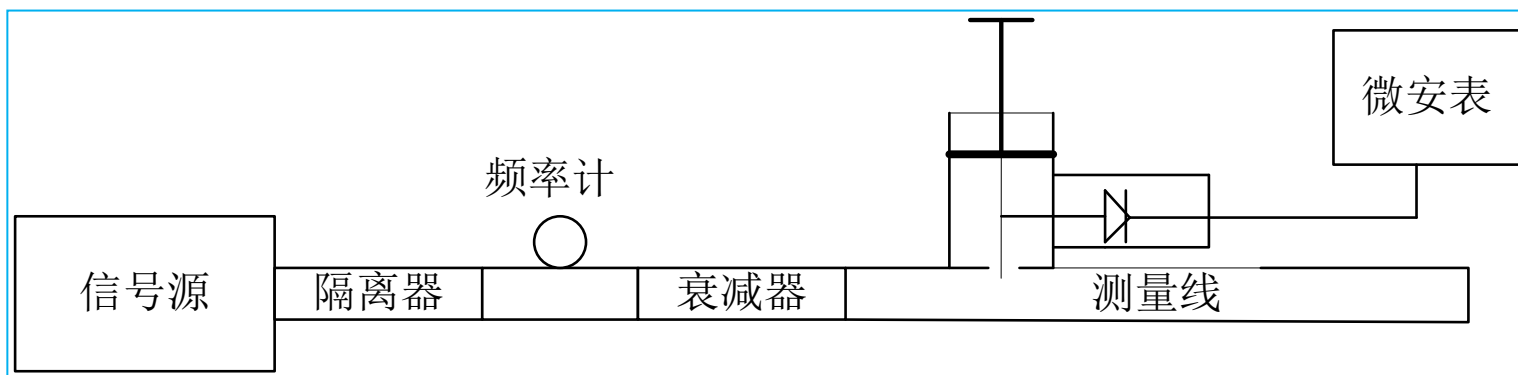
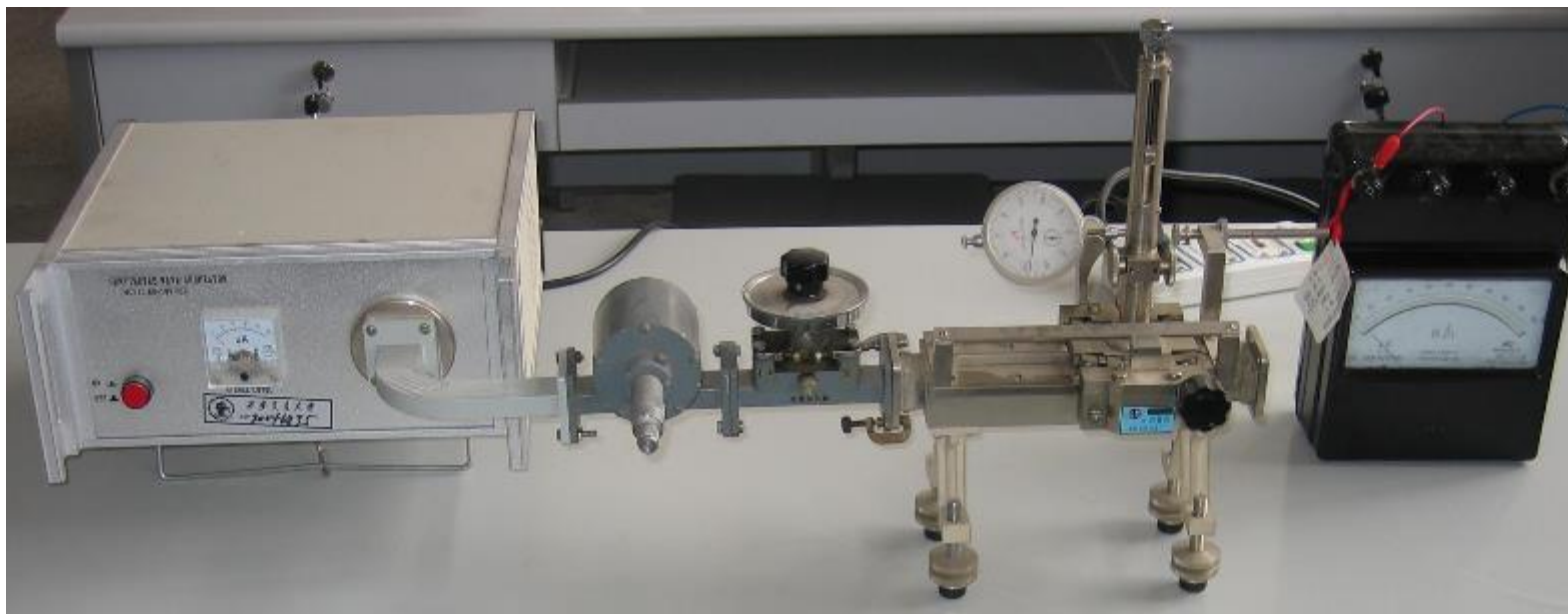


CST = E-Field (peak)
Mon = e-field (f=7) [11]
Component = Abs
Max = 6519.99 V/m at 23.5 / 15 / -1.5
Frequency = 7
Phase = 0 degrees
0 5.6e+003 V/m

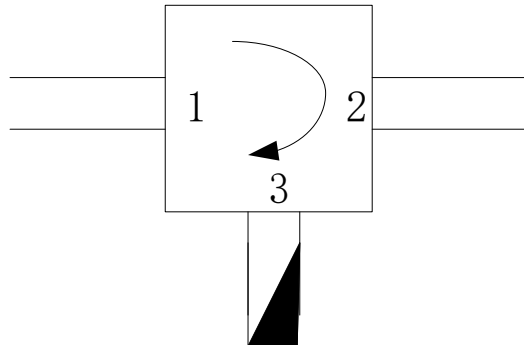




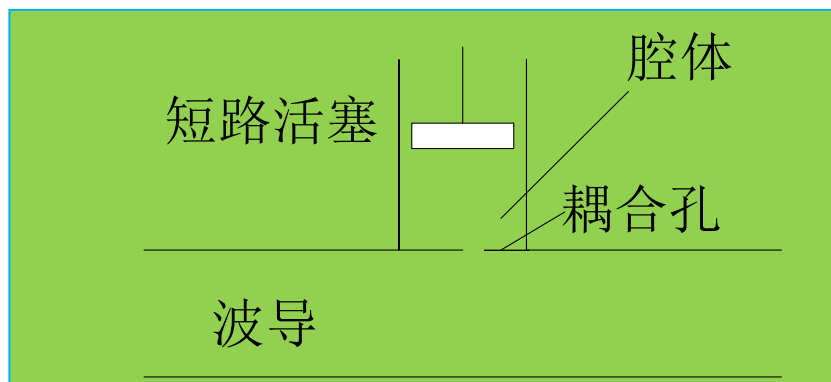
二、微波测试系统组成



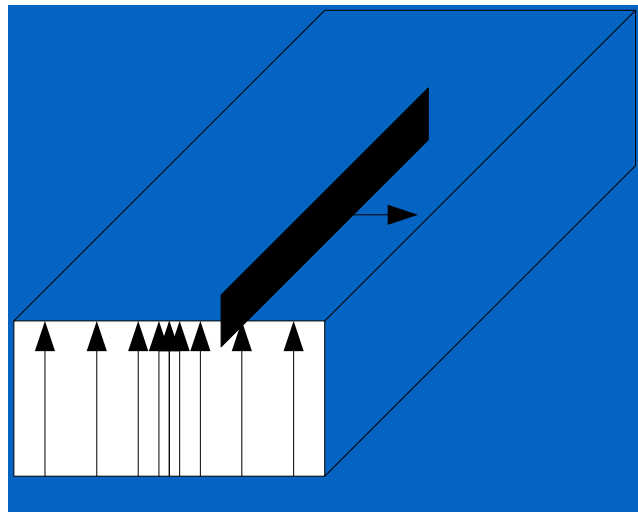
信号源



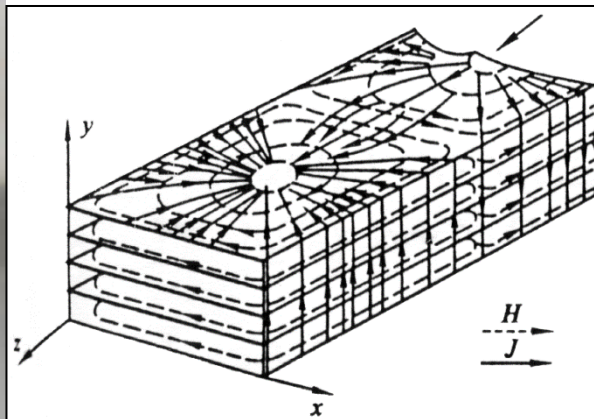
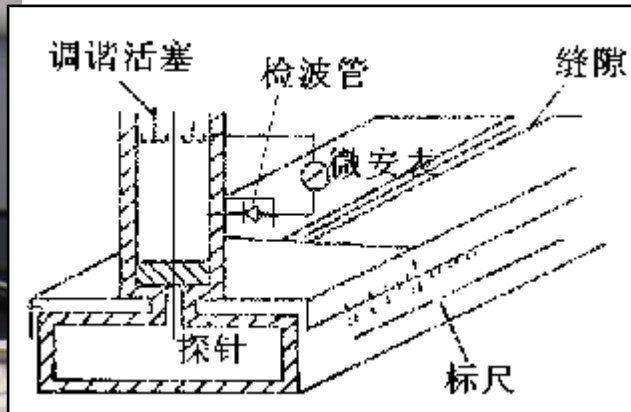
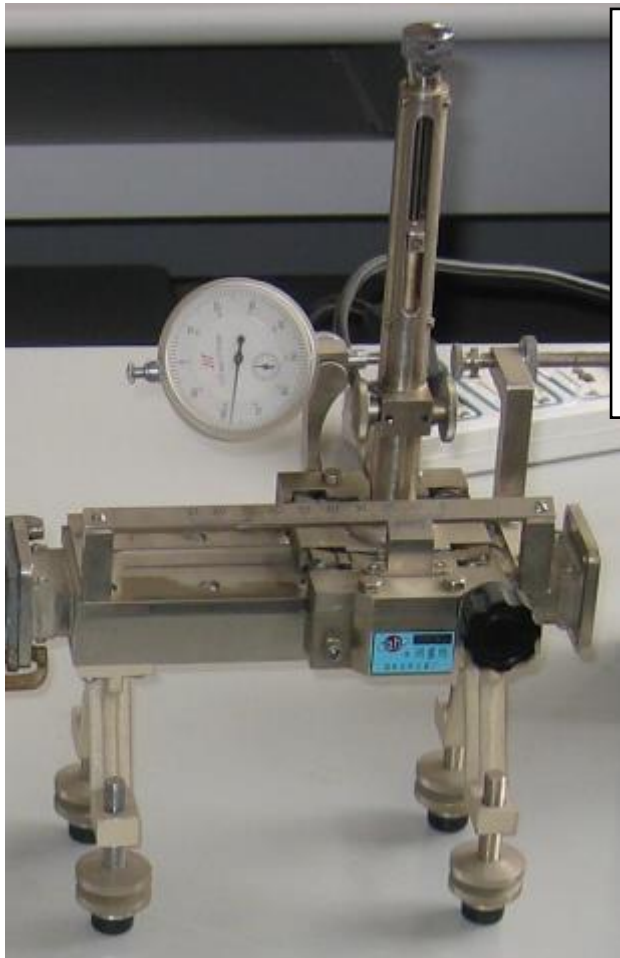
频率计



可调衰减器



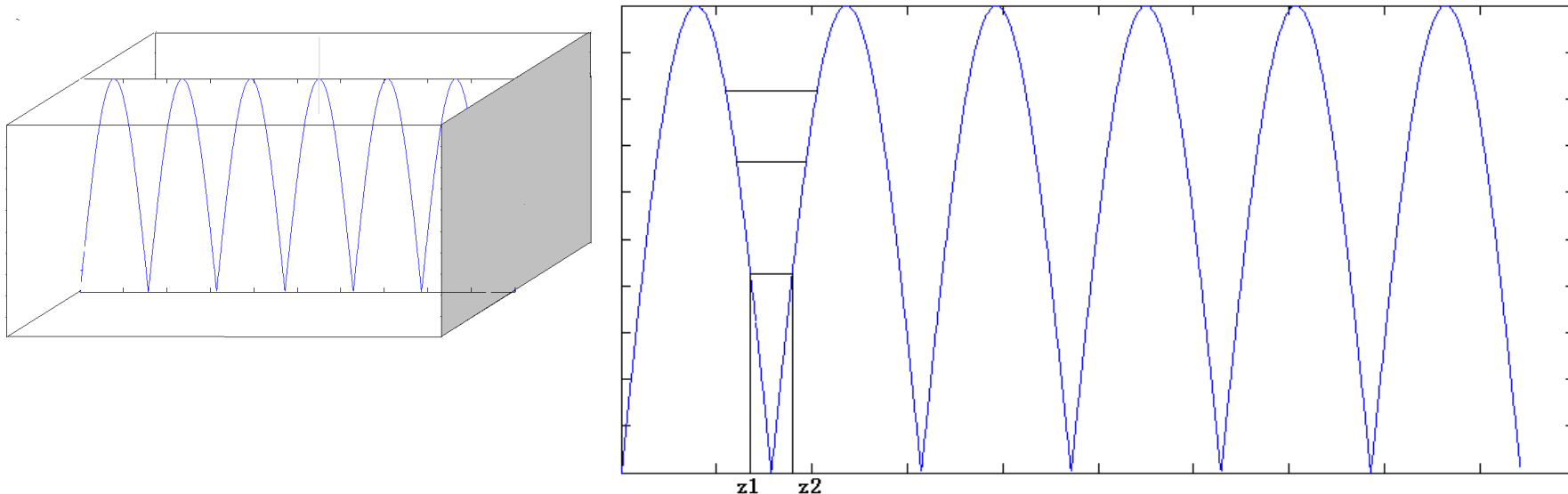
测量线



矩形波导中 TE_{10} 模的管壁电流



三、测量线测量原理



$$z = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

四、实验内容

1. 熟悉微波测试系统及其调试方法
2. 连接并调试测试系统
3. 用测量线测量工作频率（测量三次）

五、实验步骤

1. 连接好测试系统，测量线终端接短路片，并将可调衰减器调至衰减最大刻度的60%；
2. 开通电源，调节测量线调谐活塞、探针深度和可调衰减器，使得当探针在最大场强位置时，微安表接近满刻度（90°波腹>70）；
3. 测量相邻波节点位置，测量时，采用交叉读数法读取波节点的位置（测量三次）。

- 计算测量的波导波长；
- 计算工作波长与工作频（ $a=22.86\text{mm}$ ）

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_g}{2a}\right)^2}}$$

附：测量结果比对：

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \rightarrow \lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_c}\right)^2}} = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_g}{2a}\right)^2}}$$

$$f = 8.7\text{GHz}, \lambda_g = 52.51\text{mm}$$

$$f = 9.0\text{GHz}, \lambda_g = 48.70\text{mm}$$

$$f = 9.2\text{GHz}, \lambda_g = 46.52\text{mm}$$

$$f = 9.3\text{GHz}, \lambda_g = 45.52\text{mm}$$

$$f = 9.5\text{GHz}, \lambda_g = 43.67\text{mm}$$

实验二

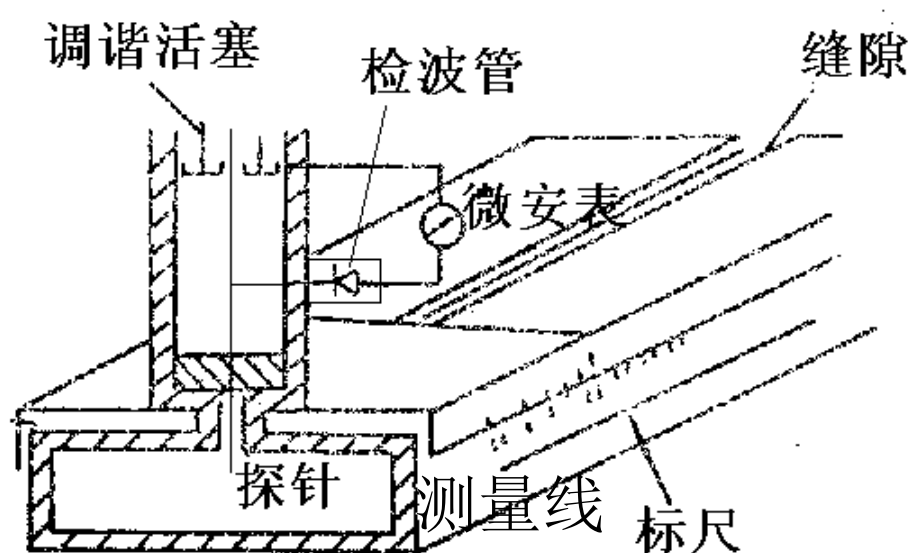
微波晶体二极管校正曲线 的测量

一、实验目的

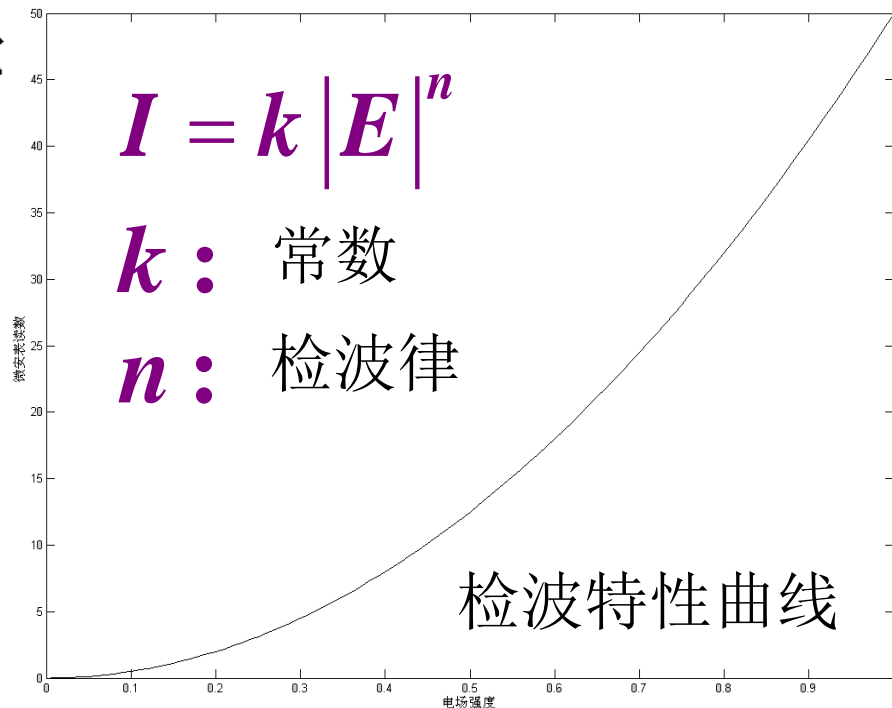
1. 掌握微波晶体二极管校正曲线测量与使用方法；

二、实验内容

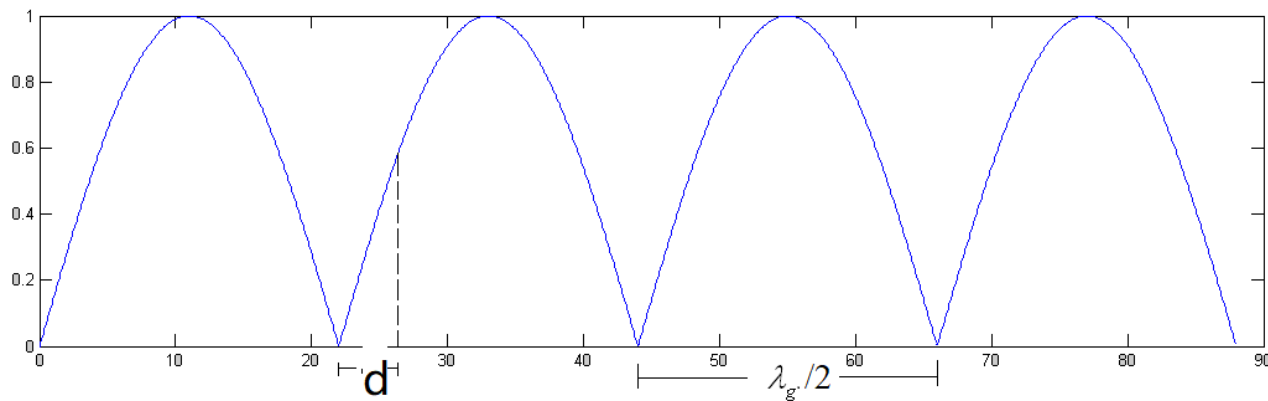
1. 测量微波晶体二极管校正曲线；



晶体二极管的检波特性：



三、实验原理（校正曲线）

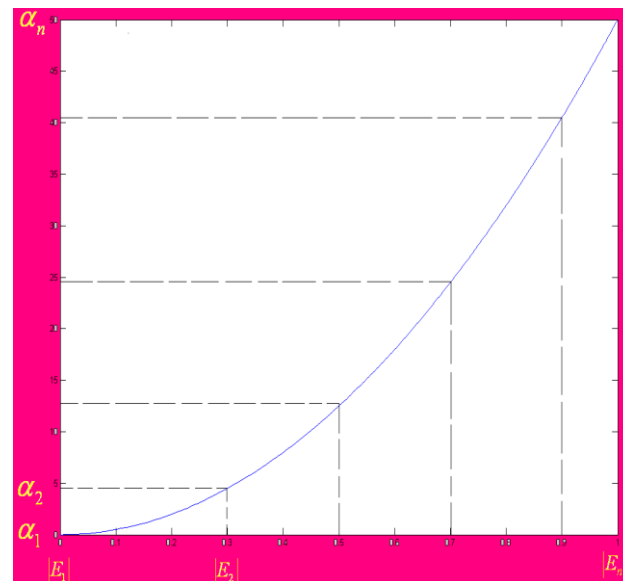


测量线上电场分布

相对电场强度：

$$|E| = \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right)$$

d	d_1	d_2	d_n
I	I_1	I_2	I_n
$ E $	$ E_1 $	$ E_2 $	$ E_n $



四、实验步骤

1. 连接系统，测量线终端接短路片；
2. 开通电源，调试系统；
3. 测量波导波长；
4. 在相邻波节点与波腹之间选11个点，设各点到波节点的距离为 d_0, d_2, \dots, d_{10} ，分别测出在各点的微安表读数 $\alpha_0, \alpha_2, \dots, \alpha_{10}$ ；
(注意：在波节点处应适当加密取点间隔)
5. 根据距离计算各点的归一化电场值 E_0, E_2, \dots, E_{10} ；
6. 描绘检波二极管校正曲线（matlab拟合）。

实验三

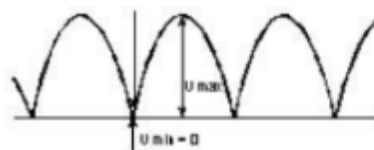
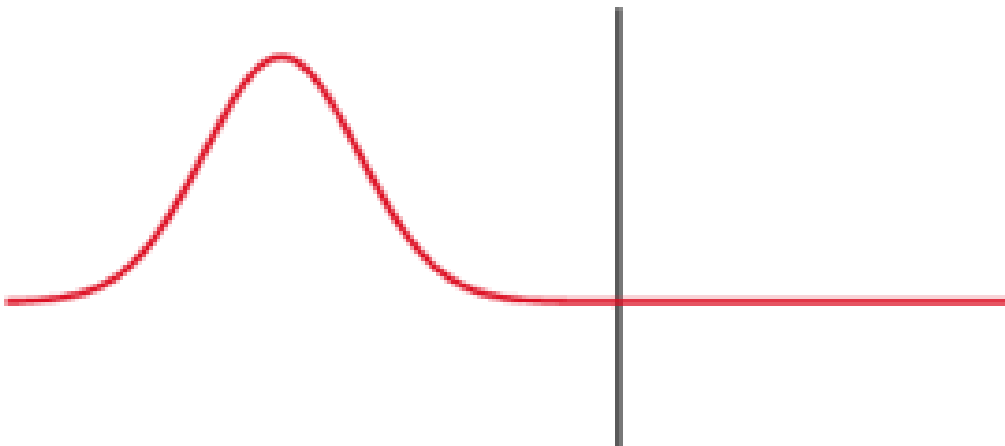
驻波比的测量

一、实验目的

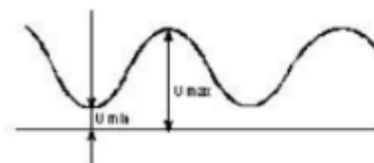
1. 建立大小驻波比的概念，掌握驻波比测量方法。

二、实验内容

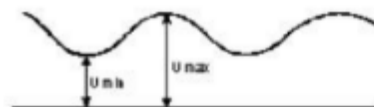
1. 测量微波器件的驻波比



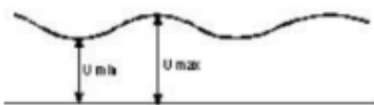
完全反射 $VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \infty$



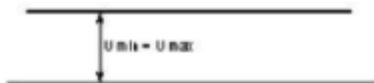
很大的反射



中等反射



很小反射



无反射 $VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = 1$

三、实验原理（驻波比）

驻波比，反射系数，回波损耗：

$$\rho = \left| \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right| = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = S_{11} \text{（单端口）}$$

$$RL = 1/\Gamma^2, \quad RL(dB) = -20 \log \Gamma$$

名称	大驻波比	小驻波比	一般驻波比
ρ	$10 < \rho < \infty$	$1 < \rho < 1.2$	$1.2 < \rho < 10$

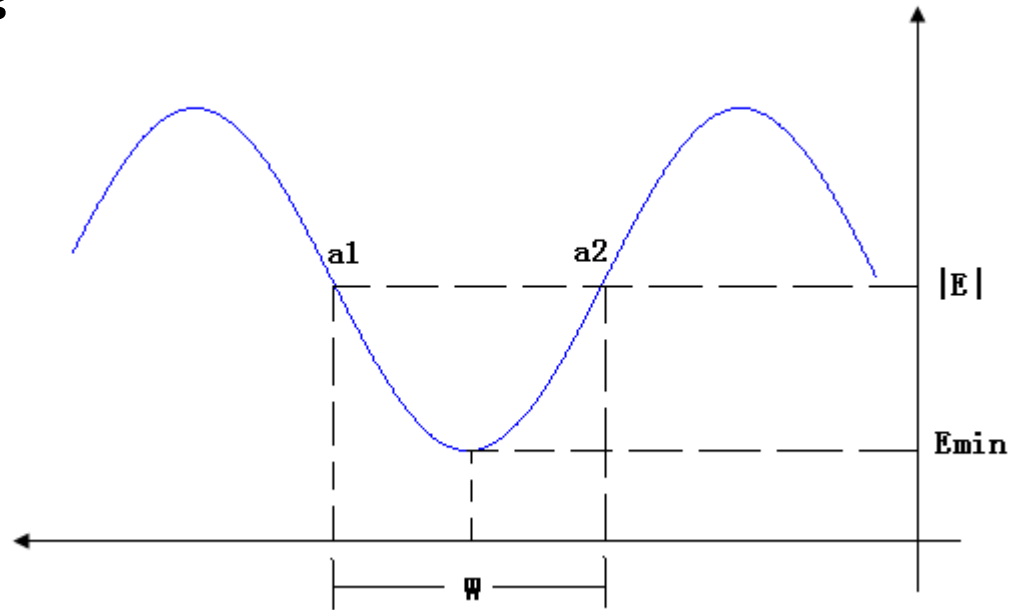
驻波比	回波损耗dB
3	6.02
2.5	7.36
2	9.542
1.5	13.979
1.2	20.828
1.1	26.444

测量方法1：

$$\rho = \left| \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right| = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}$$

三、实验原理（驻波比）

测量方法2:



$$\rho = \frac{\sqrt{k^2 - \cos^2\left(\frac{\beta W}{2}\right)}}{\sin\left(\frac{\beta W}{2}\right)} \quad k^2 = \left| \frac{E}{E_{\min}} \right|^2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_{\min}} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$$

三、实验原理（驻波比）

几种微波器件



调配器



匹配负载



四、实验步骤

1. 连接匹配负载检测；
2. 接上调配器与匹配负载；
3. 调节调配器，使得 $3 < \text{驻波比} < 6$ ；
4. 按照平方律检波，重新计算驻波比；
5. 根据校正曲线，查出电场强度的最大值与最小值，计算驻波比，并与4结果比较。

1. 旋动测量线，找出一电流最小点，读出此点的微安表读数 A_{\min} ；
2. 分别向左、右移动测量线，使得微安表上的读数为 $4A_{\min}$ ($k^2=4$)，测量左右两点之间的距离 w ；
3. 计算驻波比，并与上面的方法进行比较
4. 重新调整调配器，利用本方法测量一驻波比6-10的情况。

$$\rho = \frac{\sqrt{k^2 - \cos^2\left(\frac{\beta W}{2}\right)}}{\sin\left(\frac{\beta W}{2}\right)}$$

$$k^2 = \left| \frac{E}{E_{\min}} \right|^2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_{\min}}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$$

五、实验报告要求

- 1、实验目的、实验内容
- 2、简述频率计、衰减器、测量线工作原理；
简述驻波形成的原理和测量依据；
- 3、实验步骤（包含测量数据）
- 4、计算波导波长、工作波长、工作频率；
记录处理实验数据，计算二极管检波率，以及驻波比
- 5、问题：分析引起本实验测量误差的因素；
- 6、选作：证明课题给出的大驻波比测量方法。

注意：手写报告，检波曲线可打印，注明使用频率源的标称频率，注明同组实验同学姓名