

# “电磁场与电磁波”

## 课内实验指导书

实验一 电磁波参量的测定

实验二 电磁波的极化

唐万春，车文荃 编制

陈如山 审定

南京理工大学 通信工程系

2006 年 12 月

## 实验一 电磁波参量的测定实验

### 1. 实验目的

- a) 观察电磁波的传播特性。
- b) 通过测定自由空间中电磁波的波长 $\lambda$ ，来确定电磁波传播的相位常数 $k$ 和传播速度 $v$ 。
- c) 了解用相干波的原理测量波长的方法。

### 2. 实验内容

- a) 了解并熟悉电磁波综合测试仪的工作特点、线路结构、使用方法。
- b) 测量信号源的工作波长（或频率）。

### 3. 实验原理与说明

#### a) 所使用的实验仪器

分度转台

晶体检波器

可变衰减器

喇叭天线

反射板

固态信号源

微安表

实验仪器布置图如下：

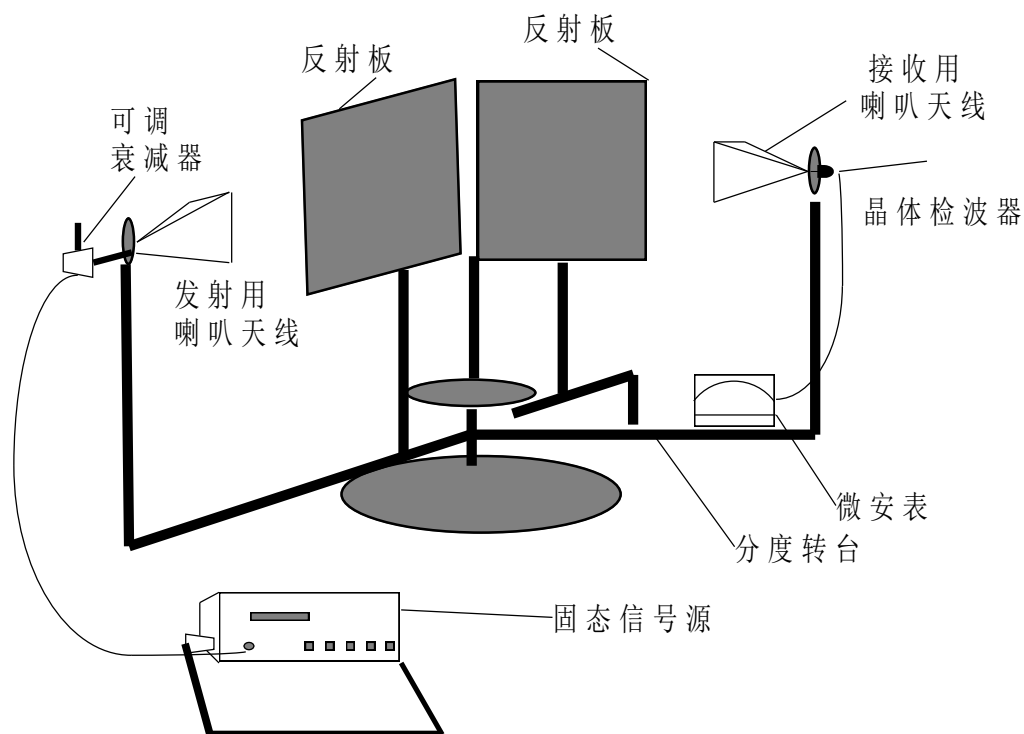


图 1 实验仪器布置图

固态信号源所产生的信号经可变衰减器至矩形喇叭天线，在接收端用矩形喇叭天线接收信号，接收到的信号经晶体检波器后通过微安表指示。

### b) 原理

本实验利用相干波原理，通过测得的电磁波的波长 $\lambda$ ，再由关系式

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad v = \lambda f = \frac{\omega}{k} \quad (1)$$

得到电磁波的主要参量 $k$ ， $v$ 等。

实验示意图如图2所示。图中 $P_{r0}$ 、 $P_{r1}$ 、 $P_{r2}$ 和 $P_{r3}$ 分别表示辐射喇叭、固定反射板、可动反射板和接收喇叭，图中介质板是一 $30 \times 30(mm)^2$ 的玻璃板，它对电磁波进行反射、折射后，可实现相干波测试。

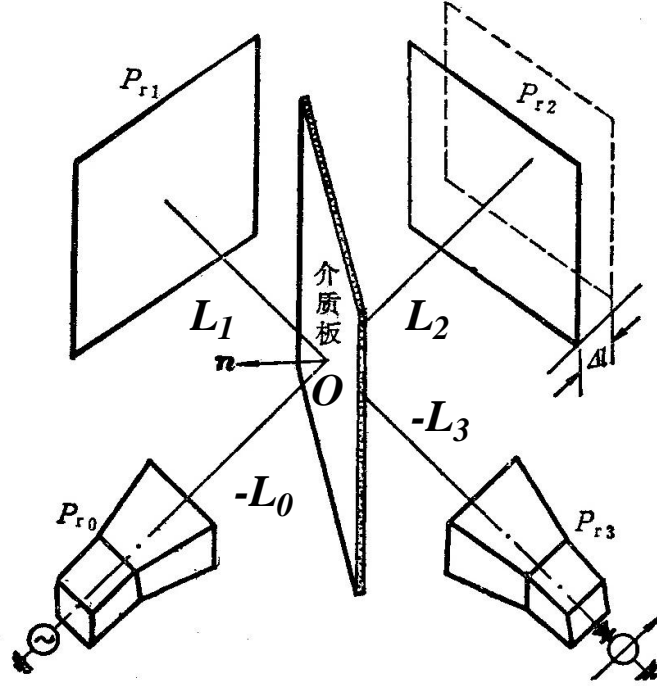


图 2 实验示意图

当入射波以入射角  $\theta_i$  向介质板斜投射时，在分界面上产生反射波  $\bar{E}^-$  和折射波  $\bar{E}'$ 。设入射波为垂直极化波，用  $R$  表示介质板的反射系数，用  $T$  分别表示由空气进入介质板再进入空气后的折射系数， $R$  与  $T$  为复数。另外固定的和可动的金属反射板的反射系数均为  $-1$ 。

假设发射的平面波为：

$$E^+ = E^0 e^{-jkl} \quad (2)$$

分析时  $l$  为在喇叭天线  $Pr0$  发射的波的传播方向上与相位参考零点所在的面之间的距离 (有正、负值之分)，相位参考零点不妨选介质板的中心点。忽略介质板与金属板之间的多次作用效应，则在反射板1与反射板2处的入射场  $E^+$  与反射场  $E^-$  可表示为：

$$\begin{aligned} E_1^+ &= RE^0 \exp(-jkl) \Big|_{l=L_1} \\ E_1^- &= -RE^0 \exp[jk(l-2L_1)] \Big|_{l=L_1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_2^+ &= TE^0 \exp(-jkl) \Big|_{l=L_2} \\ E_2^- &= -TE^0 \exp[jk(l-2L_2)] \Big|_{l=L_2} \end{aligned} \quad (4)$$

它们在接收喇叭Pr3处的场为：

$$\begin{aligned} E_1^- &= -TRE^0 \exp[jk(l-2L_1)] \Big|_{l=-L_3} \\ E_2^- &= -RTE^0 \exp[jk(l-2L_2)] \Big|_{l=-L_3} \end{aligned} \quad (5)$$

由于它们同频同极化，它们相干合成的场可写为

$$\begin{aligned} E &= E_1^- + E_2^- = -TRE^0 \exp[jk(-L_3-2L_1)] - RTE^0 \exp[jk(-L_3-2L_2)] \\ &= -TRE^0 \exp(-jkL_3) [\exp(-2jkL_1) + \exp(-2jkL_2)] \\ &= A [1 + \exp(-j2k\Delta l)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= -TRE^0 \exp(-jkL_3) \exp(-jk2L_1) \\ \Delta l &= L_2 - L_1 \end{aligned} \quad (7)$$

上述过程可以用图 3 来示意。

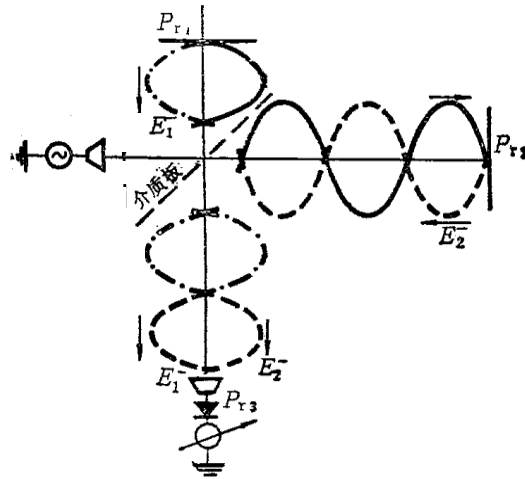


图 3 波形图

测量时，由于被测场  $E$  处于测试结构的近区场范围内，不完全满

足理想平面波的特性，这不仅影响着零点位置均匀分布，而且使波幅值也有起伏。为了测准波长 $\lambda$ 值，一般采用 $P_{r3}$ 为零指示办法。由(6)式可发现，合成波中当 $\exp[-j2k\Delta l]=-1$ 时，Pr3 处的场为零。实验时，固定 $L_0, L_1, L_3$ ，移动 $L_2$ ，使得 Pr3 处的场为零。这时可得条件

$$\begin{aligned} \exp[-j2k\Delta l] = -1 & \Rightarrow 2k\Delta l_n = (2n+1)\pi \\ \Delta l_n = \frac{(2n+1)}{4}\lambda & \quad \text{或} \quad L_{2n} - L_1 = \frac{(2n+1)}{4}\lambda \end{aligned}$$

不难发现相邻两个零值的 $L_{2n}$ 与 $L_{2(n+1)}$ 之间的间距为 $\frac{\lambda}{2}$ ，从而达到测量目的。

$$\begin{aligned} n=0, \quad L_{20} - L_1 &= \frac{2i+1}{4}\lambda & \text{得第一个零点位置 } L_{20} \\ n=1, \quad L_{21} - L_1 &= \frac{2(i+1)+1}{4}\lambda & \text{得第二个零点位置 } L_{21} \\ & \dots & \dots \\ n=N, \quad L_{2N} - L_1 &= \frac{2(i+N)+1}{4}\lambda, & \text{得第 } N+1 \text{ 个零点位置 } L_{2N} \end{aligned}$$

可见，当零点总数为 $(N+1)$ 时， $P_{r2}$ 上移动的总距离为 $(L_{2N} - L_{20})$ ，它相当于 $N$ 个半波长数。即： $2(L_{2N} - L_{20}) = N\lambda$ ，故： $\lambda = \frac{2(L_{2N} - L_{20})}{N}$ 。根据：

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

就可得到所测电磁波的参量 $\lambda$ 、 $k$ 、 $v$ 等值。可见测试波长 $\lambda$ 所用公式得出的是平均值。从理论上讲， $n$ 值越大，测出的 $\lambda$ 值精度应越高。

实际测试时，一般取 $n=4$ 已足够，这时相应于5个波节点，所测的波长为

$$\lambda = \frac{2(L_{24} - L_{20})}{4}$$

它表示了5个波节点的距离 $(L_{24} - L_{20})$ ，相应于4个半波长。

## 实验步骤

a) 了解并熟悉电磁波综合测试仪的工作特点、线路结构、使用方法。

b) 测量电磁波的波长。

首先调整好电磁波综合测试仪使能进行正常工作。然后测出电磁波的波长，根据测出的值，得到电磁波的重要参量 $k$ ，由 $k$ 值可计算出传播速度

$$v = \frac{2\pi f}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx c$$

c) 用波长计（或频率计）测出信号源的工作波长（或频率）。

把测试值填入表1中。如采用3cm标准信号源，则可改变信号源工作频率 $f_0$ （即改变 $\lambda_0$ ）。由以上实验内容，得到相应的电磁波参量 $\lambda$ ， $k$ ， $v$ ，并与 $\lambda_0$ ， $k_0$ ， $v_0$ 作比较（如使用该仪器本身的固态信号源，它已调定在一个固定频率 $f_0$ 上工作，故 $v$ 及 $k$ 不能改变）。

表1 电磁波参量测试数据表

信号源输出信号的波长 $\lambda_0$		
微安表零指示次数 $(n+1)$		
可动板总位移 $\Delta l = l_n - l_0$		
自由空间中波长 $\lambda = \frac{2\Delta l}{n}$		
波的相位常数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$		
波的相速度 $v = \frac{2\pi f_0}{k}$		

## 5. 实验报告

实验名称

实验目的

实验步骤（包括使用设备，实验框架图，实验原理等）

实验结果（实验数据，相关数据处理）

讨论（对实验结果和实验中碰到的一些问题的解释）

结论（实验的收获，或者某些建议等等）

## 6. 安全说明

在本实验室中所使用的微波源都在国际安全标准以内（ $10\text{mW}/\text{cm}^2$ ），不会对人体造成任何伤害。但是，在实验期间，请注意以下事项：

- a) 不要用眼睛望任何连接其他设备的开路传输线里面看；
- b) 不要把身体的任何部位放在传输线的开口端；
- c) 在拆/装微波元器件时，请关掉微波信号源。

**7. 思考题：**用相干波测量自由空间波长时，介质板所放位置，为什么必须如图1所示。若把介质板转 $90^\circ$ ，将发生何种现象？这时，能否测准电磁波波长？为什么？



## 实验二 电磁波的极化

### 1. 实验目的

研究线极化、圆极化和椭圆极化电磁波的产生和各自的特点。

### 2. 实验内容

- a) 圆极化波的调整与测试
- b) 线极化波的调整与测试
- c) 椭圆极化波的调整与测试

### 3. 实验原理

#### a) 所使用的实验仪器

固态信号源

频率计

衰减器

矩形喇叭

圆形喇叭

检波器

微安表

实验系统框图如图 1 所示。

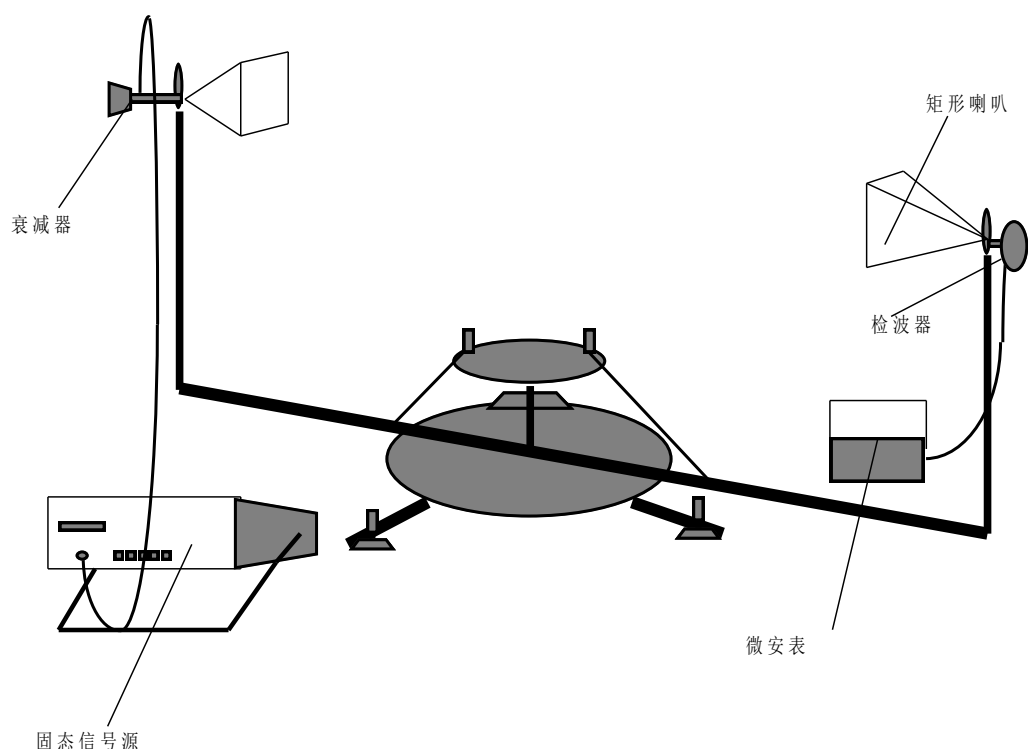


图 1 实验系统框图

电磁波综合测试仪中辐射喇叭（3cm波段）支路由固态信号源、频率计(或波长计)、衰减器及圆形喇叭等组成。固态信号源的工作频率 $f=9370\text{MHz}$ 左右，接收喇叭支路由矩形喇叭、检波器、微安表等组成。

### b) 原理

电磁波极化是指电磁波在无限大均匀媒质中传播时，空间某点上电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 的末端随时间变化的轨迹。当电场矢量末端总在一直线上周期地变化时，称为线极化波；当电场矢量末端轨迹是圆或椭圆时，即电场矢量末端总在圆或椭圆上周期地变化时，称为圆极化波或椭圆极化波。

无论是线极化波，左、右旋圆极化波，左、右旋椭圆极化波，都可由两个同频率且场矢量相互正交的线极化波组合而成。本实验利用

方圆波导转换，介质圆波导和圆锥喇叭连接而成的电磁波极化天线，分别研究波的极化——线极化波、圆极化波和椭圆极化波的特性。

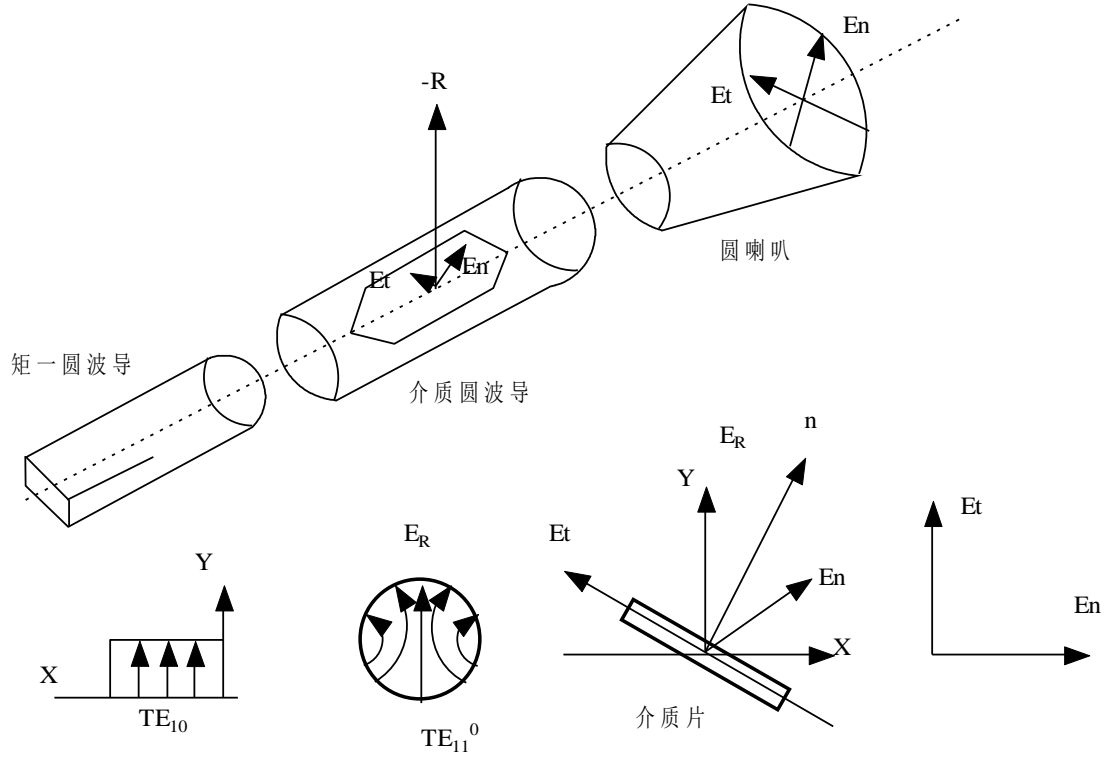


图2 圆极化波辐射装置

图2所示为圆极化波辐射装置，其中介质圆波导可做 $360^\circ$ 旋转，并有刻度指示转动的角度。当 $TE_{10}$ 波经方圆波导转换到圆波导口面时则过渡为 $TE_{11}$ 波，并在介质圆波导内分成两个分量的波，即垂直界面片平面的一个分量和平行介质面的一个分量。实验装置设计为 $9370\text{MHz}$ 左右使两个分量的波相位差 $90^\circ$ ，适当调整介质圆波导（亦可转动介质片）的角度使两个分量的幅度相等时则可得到圆极化波。

当方圆波导使 $TE_{10}$ 的 $EY$ 波过渡到 $TE_{11}$ 成为 $RP$ 波后，在装有介质片的圆波导段内分成 $E_t$ 和 $E_n$ 两个分量的波，因 $E_t$ 和 $E_n$ 的速度不同， $v_c = v_n > v_t = v_c / \sqrt{\epsilon_r}$ ，当介质片的长度 $L$ 取得合适时，使 $E_n$ 波的相位超前

$E_t$ 波的相位 $90^\circ$ ，这就实现了圆极化波相位条件的要求；为使 $E_t$ 和 $E_n$ 的幅度相等，可使介质片的 $\hat{n}$ 方向跟Y轴之间夹角为 $\alpha = \pm 45^\circ$ ，若介质片的损耗略去不计，则有 $E_m = E_{nm} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m$ ，实现了圆极化波幅度条件的要求（有时需稍偏离 $45^\circ$ 以实现幅度相位的要求）。

为了确定圆极化波右旋、左旋的特性，把 $\hat{n}$ 转到 $\hat{Y}$ 方向符合右手螺旋规则的波，定为右旋圆极化波；把 $\hat{n}$ 转到 $\hat{Y}$ 方向符合左手螺旋规则的波，定为左旋圆极化波。

波极化天线除作为圆极化波工作外，也可作线极化波，椭圆极化波工作使用。当作线极化波工作时，介质片 $\hat{n}$ 与Y轴相垂直（或平行）。当作椭圆极化波工作时，介质片 $\hat{n}$ 与Y夹角可在 $\alpha=0-45^\circ$ 之间。

## 4. 实验步骤

### a) 圆极化波的调整与测试

根据圆极化波的条件，两个同频率的正交场相干波必须幅度相等，相位差 $\pm \frac{\pi}{2}$ 。

为此将反射板和介质板拿掉，把辐射喇叭换成圆喇叭，转动圆喇叭使介质片的 $\hat{n}$ 方向跟Y轴之间夹角为 $45^\circ$ 左右，然后固定圆喇叭，再把接收喇叭调整到与圆喇叭成一直线。转动接收喇叭，每隔 $10^\circ$ 测量一次，读取微安表上的读数，并填入下表，最后算出圆极化波的椭圆度 $e = \sqrt{I_{\min} / I_{\max}}$ 值。

表 1 圆极化波调整与测试数据表

接收喇叭转动角度												
微安表读数 ( $\mu\text{A}$ )												
椭圆度												

## b) 线极化波的调整与测试

转动圆喇叭使介质片的 $\hat{n}$ 方向跟  $\mathbf{Y}$  轴之间夹角为  $0^\circ$  或  $90^\circ$ , 就可以得到线极化波。固定圆喇叭, 转动接收喇叭, 每隔  $10^\circ$  测量一次, 读取微安表上的读数, 并填入下表。

表 2 线极化波的调整与测试数据表

接收喇叭转动角度												
微安表读数 ( $\mu\text{A}$ )												

## c) 椭圆极化波的调整与测试

调整与测试椭圆极化波的方法与内容同 a、b 项, 要注意的是圆喇叭的转角在  $0-45^\circ$  之间, 按表 3 列出记录表格, 最后计算出椭圆极化波的椭圆度  $e = \sqrt{I_{\min}/I_{\max}}$  值。

表 3 椭圆极化波的调整与测试数据表

接收喇叭转动角度												
微安表读数 ( $\mu\text{A}$ )												
椭圆度												

## 5. 实验报告

实验报告提纲包括以下内容：

实验名称

实验目的

实验步骤（包括使用设备，实验框架图，实验原理等）

实验结果（实验数据，相关数据处理）

讨论（对实验结果和实验中碰到的一些问题的解释）

结论（实验的收获，或者某些建议等等）

## 6. 安全说明

在本实验室中所使用的微波源都在国际安全标准以内  
( $10\text{mW}/\text{cm}^2$ )，不会对人体造成任何伤害。但是，在实验期间，请注意以下事项：

- a) 不要用眼睛往任何连接其他设备的开路传输线里面看；
- b) 不要把身体的任何部位放在传输线的开口端；
- c) 在拆/装微波元器件时，请关掉微波信号源。

## 7. 思考题：一右旋圆极化波从空气正入射到另一种媒质表面， 反射波与透射波的旋向如何（左旋还是右旋）？