

《电磁场理论》配套实验教材

电磁场与电磁波实验讲义

甘 慧 编

南京航空航天大学

2016 年 9 月

实验须知

- 一、 实验教学是高等学校教学内容的重要组成部分，学生必须严肃对待、认真完成。
- 二、 实验各个环节的要求：
 1. 实验前：预习是实验的一个重要环节，在每次实验之前，必须认真阅读实验讲义及课本中有关内容，明确实验目的、原理、内容和要求；在此基础上做好实验前必要的准备工作，如画好数据记录表格。实验中有自拟实验步骤的，预习时要写好实验步骤。
 2. 实验中：要养成仔细观察实验现象、规范操作实验设备、详细记录实验数据的习惯。培养实事求是的作风，忠实地记录数据和观察到的现象，并认真分析研究。发现数据不合理时，应分析其原因，必要时重测，切不可按自己主观想法擅自修改数据。
 3. 实验后：实验完毕，原始数据记录应交教师检查后，方可拆除有关线路，关闭仪器电源，带走实验桌上的杂物，离开实验室。
 4. 认真独立地完成实验报告，字迹清晰、图表规范、内容翔实，并按时提交。
- 三、 学生必须准时进入实验室，不得迟到、早退、无故缺席。凡是迟到十分钟者，不得进行当场实验；凡是缺交一次实验报告或发现一次互相抄袭者，实验成绩一律以零分计。

实验一 电磁波的传播特性及极化测量

一. 实验目的:

1. 了解电磁波传播的基本原理。
2. 观察电磁波在传播过程中遇到障碍物时发生的现象，进一步加深对电磁波的传播特点和规律的认识。
3. 验证电磁波的极化特性，并进行极化的测量。

二. 实验系统的组成:

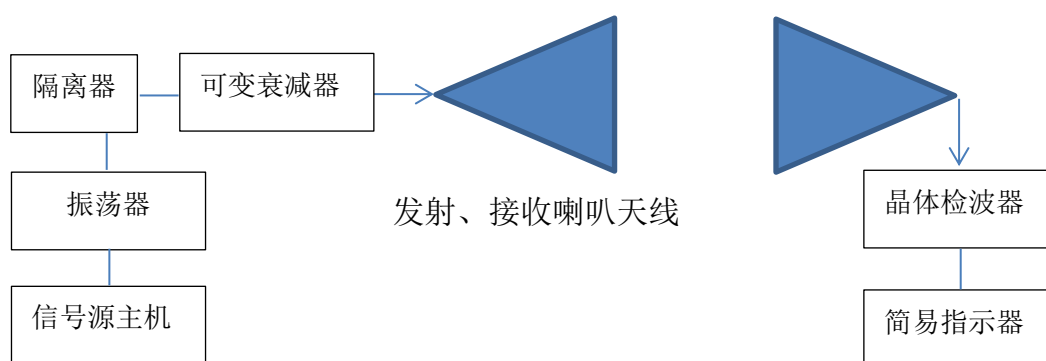


图 1-1 微波发射、接收方框图

1、信号源

DH1121B 型三厘米固态信号源是一种使用体效应管做振荡源的微波信号源，由主机、振荡器和隔离器组成。体效应管装在工作于 TE_{10} 模的波导谐振腔中。调节振荡器的螺旋测微器，可改变调谐杆伸入波导腔的深度，从而连续平滑地改变微波谐振频率；调节位于波导腔前面法兰盘中心处的调配螺钉，可使波导腔与外电路实现最佳耦合。隔离器保证振荡器与负载间的匹配与隔离，使微波输出的频率和功率更加稳定。

信号源主机包含电源和波形调制系统，通过仪器面板上的按键可方便地选择振荡器的工作方式为连续波或方波调制

主要技术特性：

频率范围：8.6~9.6GHz；

功率输出（等幅工作状态）：不小于 20mV

工作电压：直流+12V（典型值）

工作方式：等幅、方波，内方波调制重复频率：1000Hz±15%；

输出电压驻波比：≥1.20

2、喇叭天线：用于微波信号的发射和接收。

圆锥喇叭天线的增益大约为 20 分贝，波瓣的理论半功率点宽度大约为：H 面是 20°，E 面是 16°。

圆锥喇叭天线是由方圆波导转换、介质圆波导和圆锥喇叭连接而成，介质圆波导可做 360° 旋转。介质面长度 L 已定在适合于 9370MHz±50MHz 的带宽内工作，其椭圆率≥0.93。

3、可变衰减器：用来改变微波信号幅度的大小，衰减器的度盘指示越大，对微波信号的衰减也越大。

4、晶体检波器：可将微波信号转换成直流信号或低频信号（当微波信号幅度用低频信号调制时）。

三. 实验原理：

平面波是指等相位面是平面的电磁波，均匀平面波是指在这个等相位面上电场和磁场的振幅和相位处处保持不变。

平面电磁波的极化是指电磁波传播时，空间某点电场强度矢量 \vec{E} 随时间变化的规律，若 \vec{E} 的末端总在一条直线上周期性变化，称为线极化波；若 \vec{E} 末端的轨迹是圆（或椭圆），称为圆（或椭圆）极化波。若圆极化波 \vec{E} 末端的运动轨迹与波的传播方向符合右手（或左手）螺旋规则时，则称为右旋（或左旋）圆极化波。

线极化波、圆极化波和椭圆极化波都可由两个同频率的正交线极化波组合而成。

设同频率的两个正交线极化波为：

$$E_x = E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \quad (1-1)$$

$$E_y = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_2) \quad (1-2)$$

其中， φ_1 、 φ_2 为初相位， $k = 2\pi/\lambda$ 。

1、线极化波的合成

当 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ，或 φ_1 与 φ_2 的相位差为 $2n\pi$ 时，在固定点 Z 处（如 $Z=0$ ）其合成电场大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_{xm}^2 + E_{ym}^2} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

电场矢量与 x 轴的夹角 α （合成电场的方向）为

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \tan^{-1} \frac{E_{ym}}{E_{xm}} = \text{常数} \quad (1-4)$$

由(1-3)和(1-4)式可以看出，合成电场的大小随时间作周期性变化，电场矢量始终在一条直线上，合成场为线极化波。如图1-2所示。

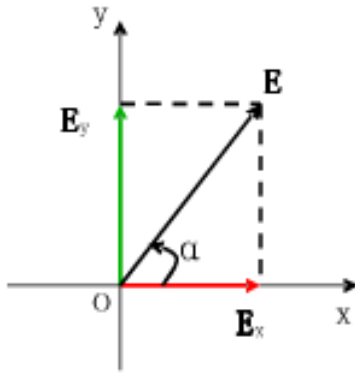


图 1-2 线极化

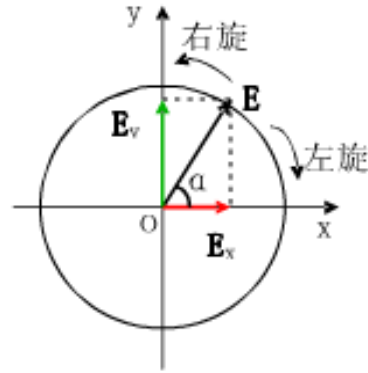


图 1-3 圆极化

2、圆极化波的合成

当 $E_{xm} = E_{ym} = E_m$ ，相位相差 $\pm\pi/2$ 时，则

$$E_x = E_m \cos(\omega t - kz + \varphi_1)$$

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kz + \varphi_1 \pm \pi/2) = \mp E_m \sin(\omega t + \varphi_1)$$

其合成电场大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = E_m = \text{常数} \quad (1-5)$$

电场分量与 x 轴的夹角 α 的正切为

$$\tan \alpha = \frac{E_y}{E_x} = \mp \tan(\omega t - \varphi_1)$$

$$\alpha = \mp (\omega t - \varphi_1) \quad (1-6)$$

由(1-5)和(1-6)式可以看出，合成电场的大小不变，但方向随时间变化，合成电场矢量的末端在一圆上以角速度 ω 旋转，合成场为圆极化波。

3、椭圆极化波的合成

如果 $E_{xm} \neq E_{ym}$ ，其相位差不为 0° 、 180° ，也不是 90° 、 270° ，则合成波为椭圆极化波。

四、工作原理：

1、发射与接收天线均为矩形口径喇叭天线。

图 1-4 是实现各种极化波的装置示意图。金属丝栅 P_{r1} 和 P_{r2} 的作用是分别反射垂直分量和水平分量的波，两反射波在接收喇叭 P_{r3} 内实现迭加，为使辐射喇叭同时产生 $E_{i\perp}$ 与 $E_{i\parallel}$ 两个入射波，只需将 P_{r0} 转动一个角度 α ，使入射场 E_i 分成同频率的两个正交场，调整 α 角，即可实现两个线极化波幅度相等的要求，作为相位条件，通过改变 P_{r2} 的位置即可实现两反射波相位相差 $\pm \pi/2$ ，可以方便的获得圆极化波。

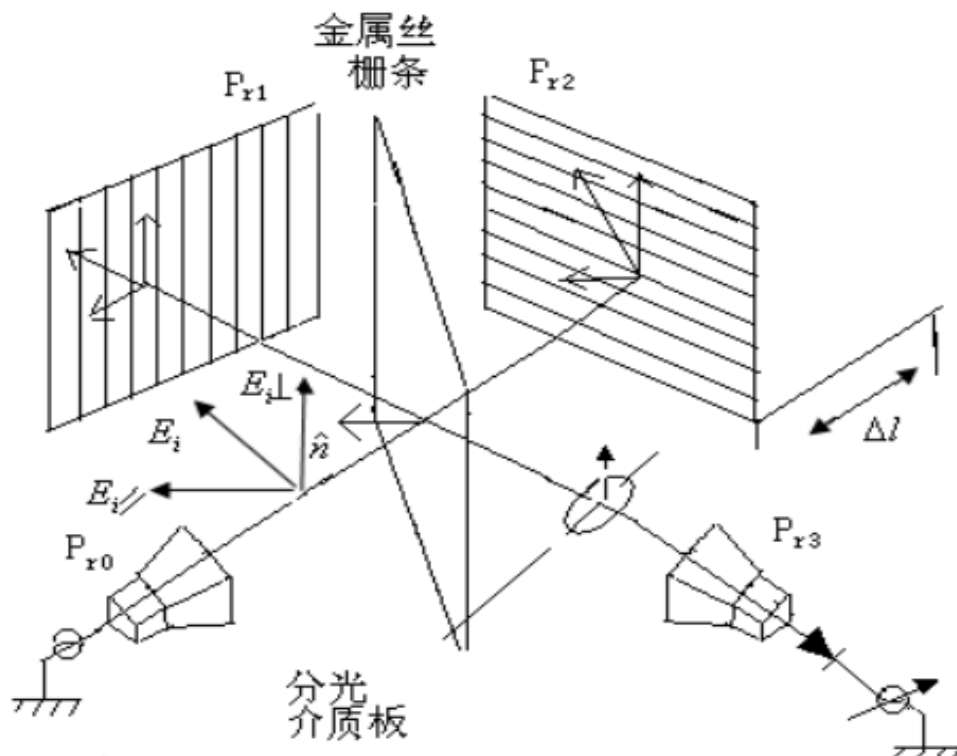


图 1-4 正交金属丝实现各种极化波装置图

2、发射天线为圆锥口径喇叭天线，接收天线为矩形口径喇叭天线。

电磁波在插入介质片的圆波导内被分成两个分量的波，即垂直介质片平面的一个分量 E_n 和平行于介质片平面的一个分量 E_t ，这两个分量的速度不同， $V_c = V_n > V_t = \frac{V_c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ，当介质片的长度 L 取值合适时，使 E_n 波的相位超前 E_t 波的相位 90° ，这就实现了圆极化波相位条件的要求；为使 E_n 与 E_t 的幅度相等，可使介质片的 \hat{n} 方向跟 Y 轴之间夹角为 $\alpha = \pm 45^\circ$ ，若忽略介质片的损耗，则有 $E_{tm} = E_{nm} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{rm}$ ，实现了圆极化波幅度条件的要求。

五、 实验内容及步骤：

1、实验系统调试：

1) 校整分光仪，保证收、发喇叭天线的机械轴与电磁波传播的方向要完全重合，这样才能保证测量精度。利用分光仪上的圆盘刻度，首先旋转工作平台，使 0° 刻线与固定臂上指针对正，再转动活动臂使活动臂上的指针对正在工作平台 180° 刻线上，这样装有两个喇叭的支架便处于一直线上；调整两个喇叭口，使喇叭口对正工作平台中心且平行于工作平台，将固定喇叭的螺钉拧紧。

2) 接通电源，信号源的工作状态选“方波”，此时内方波调制的重复频率为1000Hz。

3) 调整接收天线位置，找出使微安表指示最大的位置，调整可变衰减器旋钮，使微安表的指示有一适当值（达到满量程的三分之二以上），保持接收天线臂位置不动。

2、观察并记录不同的媒质对电磁波的影响并解释实验现象。

1) 在两喇叭之间分别放置铝合金板、有机玻璃板、普通玻璃板、硬纸板等物品，记录接收信号的变化情况。

2) 在两喇叭之间放置疏密有致的金属栅条，分别进行水平放置、垂直放置、疏的部分挡住喇叭、密的部分挡住喇叭，记录接收信号的变化情况。

3、当发射天线作线极化波发射时，观察接收喇叭旋转不同角度时微安表指示的变化。

4、完成圆极化波的调试与测量。

六、 实验结果

1、 原始数据：

1) 线极化波时，接收天线的数据：

角度 /(°)	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
读数																			

2) 圆极化波时，接收天线的数据：

角度 /(°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
读数																			

2、 数据处理：

1) 根据测试数据，画出二种极化方式随接收天线角度变化而变化的轨迹图。

2) 验证波的极化特性，计算出圆极化波椭圆度 e 。

由于 E_{xm} 与 E_{ym} 总有差别，我们用圆极化波的椭圆度 e 来表示， $e =$

$$\sqrt{I_{min}/I_{max}}, \text{ 它的取值范围在 } 0 \sim 1 \text{ 之间。}$$

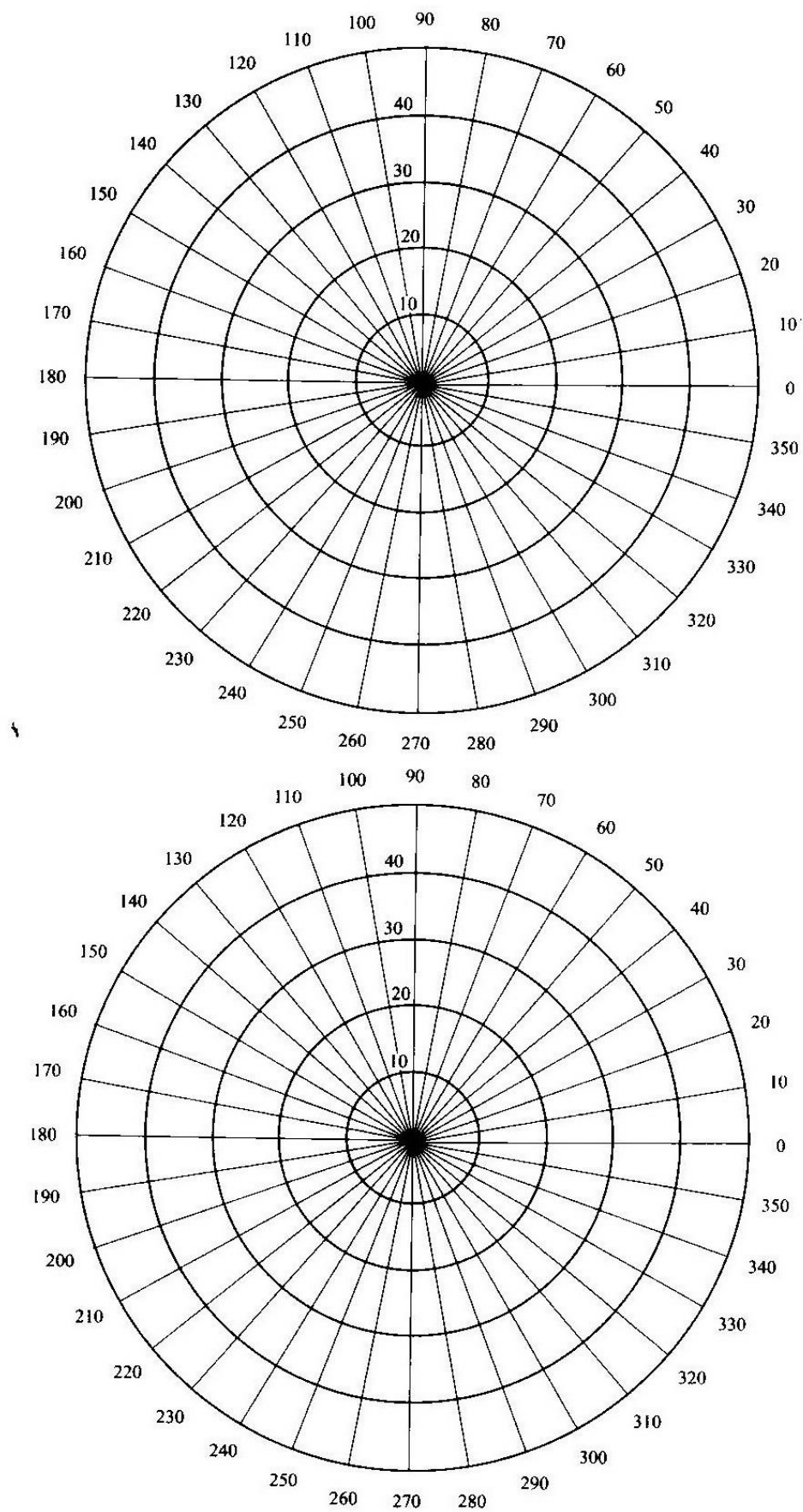
3、实验讨论及分析

1) 分析这些不同的介质对电磁波的影响；要求用课本上学过的知识对实验现象进行合理解释。

2) 分析金属栅条对电磁波透射的影响效果，简要说明其原理。

3) 用金属丝栅实现圆极化波时，为什么在其后加微波吸收材料？

4、心得与收获



实验二 平面电磁波的反射和干涉

一、实验目的：

- 1、通过电磁波在电介质分界面的反射，了解和验证反射定律。
- 2、加深对电磁波干涉现象的认识，学习利用干涉条纹的分布测量微波波长的方法。
- 3、掌握无耗媒质的介电常数 ε_r 的测量方法。

二、实验原理：

微波是特定频率的电磁波，它与光波一样都具有波动性，即能产生反射、折射、干涉和衍射等现象。由于微波的波长比光波的波长在量级上差一万倍左右，因此用微波设备作波动实验比光学实验要更直观、方便，所需要设备制造也较容易。

1、验证反射定律：

电磁波在传播过程中如遇到障碍物，必定要发生反射和折射，如图 2-1 所示，当一束电磁波斜射到电介质分界面时，媒质 I 中的平面电磁波一部分能量被反射成为反射电磁波，剩下的能量进入媒质 II 继续前进成为折射电磁波。这三条直线分别称为入射射线、反射射线和折射射线， θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别称为入射角、反射角和折射角。

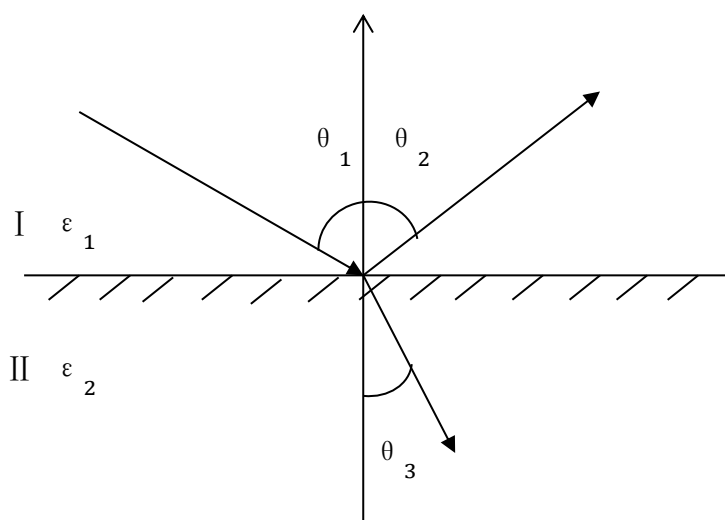


图 2-1 平面波斜入射到媒质分界面

如果采用金属板作为介质时，电磁波则产生全反射，即反射线在入射线和通过入射点的法线所决定的平面上，反射线和入射线分居在法线两侧，反射角等于入射角。

2、用迈克尔逊干涉原理测量电磁波波长

由发射天线发射出的电磁波，在空间传播过程中可以近似看成均匀平面波。此平面波投射到与传播方向成 45 度的介质板（半透射板）上，被介质板分成两列波，一列向 A 方向传播，另一列向 B 方向传播，由于 A、B 处的全反射金属板作用，两列波再次回到介质板并到达接收喇叭处。

于是接收喇叭收到两列同频率，振动方向一致的电磁波。若这两列电磁波的波程差满足一定的关系，那么这两列波必将发生干涉。

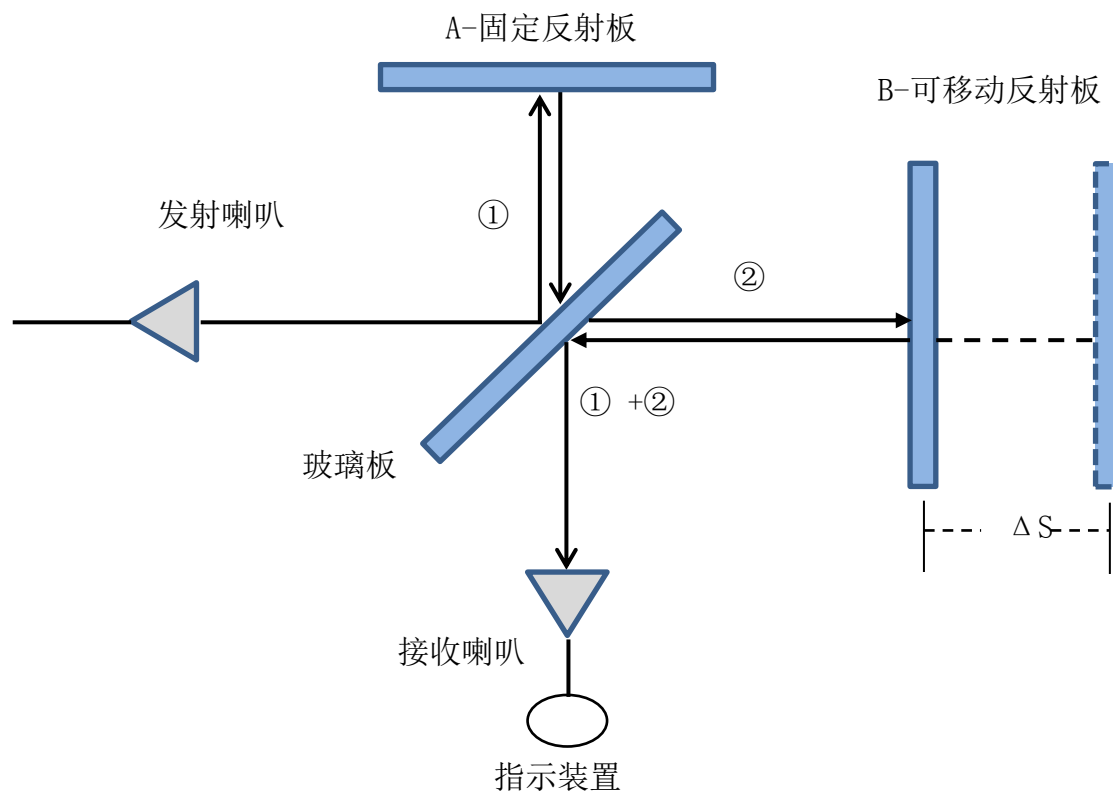


图 2-2 迈克尔逊干涉原理

设两个相干波的振动方程分别为:

$$y_1 = A_1 \cos \omega t$$

$$y_2 = A_2 \cos \omega t$$

两束波在接收喇叭处引起的振动方程为:

$$y_1 = A_1 \cos(\omega t - 2\pi \frac{L_1}{\lambda})$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t - 2\pi \frac{L_2}{\lambda})$$

接收喇叭处的实际振动情况应该是以上两个同方向同频率分振动的合成。合成振动的振幅 A 应为:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\phi}$$

式中 $\Delta\phi$ 为两个分振动的相位差。从两个分振动方程可得:

$$\Delta\phi = \left(\omega t - 2\pi \frac{L_1}{\lambda}\right) - \left(\omega t - 2\pi \frac{L_2}{\lambda}\right) = 2\pi \frac{L_2 - L_1}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}$$

式中 $\Delta L = L_2 - L_1$ 为两列波的波程差。

当 $\Delta L = n\lambda$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时, 接收天线处的合成振动加强, 合成振幅为:

$$A = A_1 + A_2$$

干涉加强, 检波后微安表有最大指示

当 $\Delta L = \frac{2n+1}{2}\lambda$ ($n=1, 2, \dots$) 时, 接收天线处的合成振动减弱, 合成振幅为:

$$A = |A_1 - A_2|$$

干涉减弱, 检波后微安表有最小指示

如果 A 板固定不动, 移动 B 板改变波程差 ΔL , 当出现电流表极小值时, B 板位置在某处, 同方向继续移动 B 板再次出现电流表指示极小值时, B 板的移动位置改变恰好为 $\lambda/2$, 如图 2-3 所示。继续同方向移动 B 板, 在 ΔS 距离内共出现了 n 个极小值。

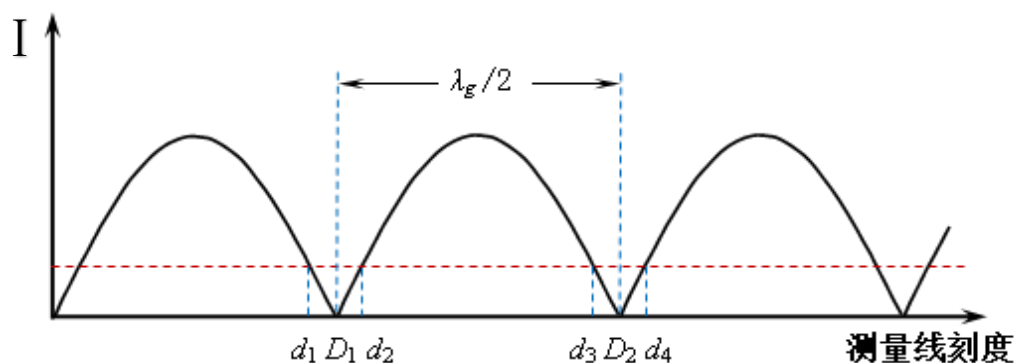


图 2-3 电表指针变化示意图

那么就有

$$\Delta S = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = \frac{2\Delta S}{n}$$

可见，测得了可动金属板移动的距离 ΔS ，代入上式中便可确定求出微波波长。

3、无耗媒质的介电常数 ε_r 的测量

接收天线收到的两束波反向叠加时，相干波的振幅最小，在测定 λ 的过程中取某个最小指示值（ a 点）作为参考点，当加入厚度为 W 介电常数为 ε_r 的有机玻璃后，就使得原来的节点位置发生改变，其影响因素与有机玻璃的厚度及它的常数 ε_r 有关，这时接收天线接收到的相干波已不再是反相叠加，为了使喇叭天线接收到的相干波再恢复为反相叠加，使电表指示重新恢复到最小值，就要移动 B 板到 b 点（距离为 ΔS_1 ），根据 ΔS_1 值引起的相位变化得出 ε_r 值。

$$\varepsilon_r = \left(1 + \frac{\Delta S_1}{w}\right)^2$$

其中： W 为有机玻璃板的厚度，此公式忽略了介质板表面反射

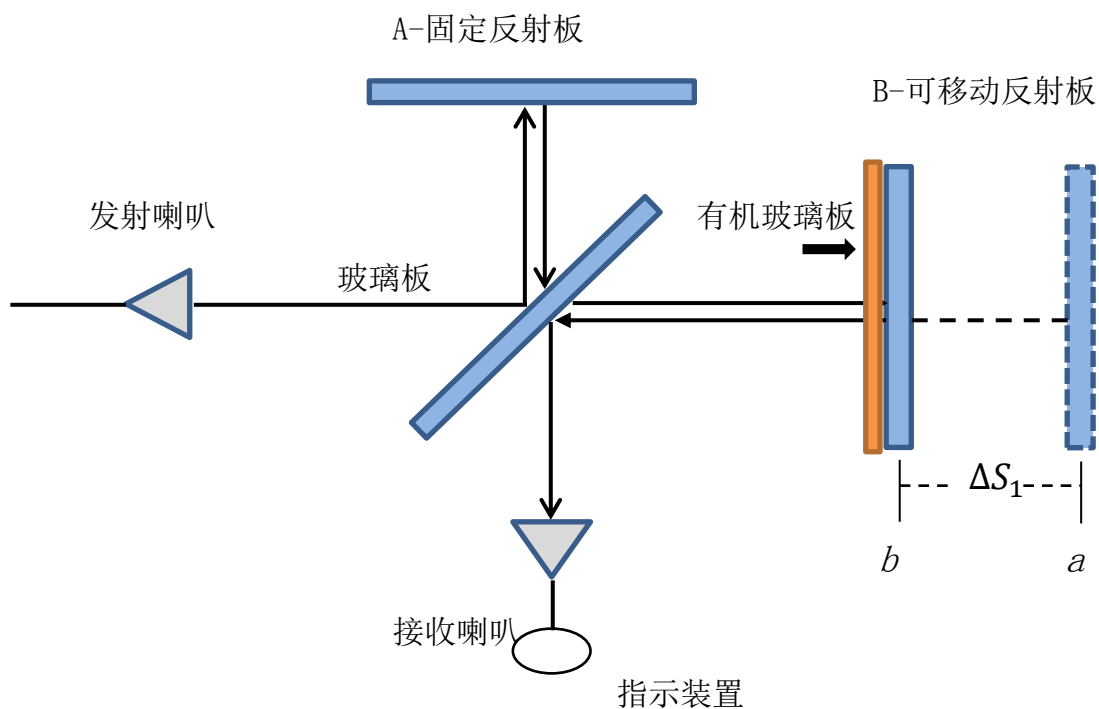


图 2-4 介电常数测量原理图

三、实验内容及步骤：

1、实验仪器调试。

- 1) 校正分光仪。利用分光仪上的圆盘刻度，首先旋转工作平台，使 0° 刻线与固定臂上指针对正，再转动活动臂使活动臂上的指针对正在工作平台 180° 刻线上，这样装有两个喇叭的支架便处于一直线上；调整两个喇叭口，使喇叭口对正工作平台中心且平行于工作平台。
- 2) 调整圆锥喇叭天线，使其发射波为垂直极化波状态，角锥喇叭天线也为接收垂直极化波状态。也可用角锥喇叭做为发射天线。
- 3) 将反射金属板放在支座上，应使金属板平面与支座下面的小圆盘上的某一对刻度线一致，拧紧金属板固定螺钉。把带金属反射板的支座放到小平台上，使圆盘上的这对与金属板平面一致的刻度线与小平台上相应 90° 的刻度的一对刻线一致，这时小平台上的 0° 就与金属板的法线方向一致，利用平台上的定位销和刻线对正支座（与支座上的刻线对齐）拉起平台上四个压紧螺钉旋转一个角度后放下，即可压紧支座。
- 4) 接通电源，信号源的工作状态选“方波”，此时内方波调制的重复频率为 1000Hz。

2、验证反射定律。

- 1) 转动小平台，使固定臂指针指在某一角度处，这个角度读数就是入射角，然后转动活动臂使微安表的读数达到最大，此时活动臂上的指针所指的刻度就是反射角，如果此时表头指示太大或太小，可调节衰减器，使微安表的指示有一适当值，即满量程的三分之二及以上，这样可以减小计数误差对测试结果的影响。
- 2) 做此项实验，入射角最好取 30° 至 65° 之间，因为入射角太大接收喇叭有可能直接接受入射波，且沿同一方向移动测试，不要来回移动动臂。

3、利用迈克尔逊干涉原理测量电磁波在自由空间的波长 λ 。

- 1) 将两个喇叭口互成 90° ，半透射板与两喇叭轴线互成 45° 。
- 2) 将读数机构通过它本身带有的两个螺钉旋入底座上，使其固定在底座上。
- 3) 插上反射板 A、B（铝合金板），将固定反射板（A 板）B 的法线与接收喇叭的轴线一致，可移动反射板（B 板）的法线与发射喇叭轴线一致，使两块反射板相互垂直放置。
- 4) 对 A、B 两板的位置进行校正：分别轻轻转动 A、B 板，仔细观察微安表头的指示，当指示最大时，说明两块板的位置已经校正好，将固定螺钉拧紧。

5) 移动反射板 B, 观察接收信号强弱变化, 当干涉加强时要尽可能地使电流表指示最大, 相抵消时尽可能地使电流表指示最小。

6) 将反射板 B 移至读数机构的一端, 在此附近确定出一个波节点位置 (用交叉读数法), 然后顺着同一方向移动反射板 B 进行测量, 确定出 $(n+1)$ 个波节点位置, 求出电磁波的波长 λ 。

4、测量无耗媒质的介电常数 ϵ_r 。

1) 移动反射板 B, 确定出一个波节点位置 a 。

2) 将有机玻璃板紧贴在 B 板上并用夹子将其固定好。注意动作要轻柔, 不要使 B 板产生任何移动以免引起误差。

3) 摇动手柄使 B 板移动, 使电表指示最小, 找到在 B 板前插入介质板后对应的同级极小点相应位置 b (即重新找到波节点位置), a 、 b 两点的距离即为 ΔS_1 。

4) 测出介质板厚度 d , 求出 ϵ_r 数值。

四、实验结果

1、原始数据及处理:

1) 验证反射定律

法线方向	0°						
入射角	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
反射角							

2) 测量微波波长 λ

$n=4$	$\Delta S = D_5 - D_1$			$\lambda =$	
测量点	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
标尺刻度					

3) 测量无耗媒质的介电常数 ϵ_r

$\Delta S_1 =$		$\epsilon_r =$	
测量点	a	b	
标尺刻度			

2、误差分析

对 3 个实验的测试数据及计算结果进行误差分析

3、心得与收获

附录：几种常用电介质的相对介电常数 ϵ_r

电介质	相对介电常数 ϵ_r	电介质	相对介电常数 ϵ_r
真空	1.00000	橡胶	2.3~4.0
空气	1.00054	有机玻璃	3.4
水	78	玻璃	4~10
纸	2~4	瓷	5.7~6.3