

昆 明 理 工 大 学

# 《物理实验(2)》 实验指导书

编 者： 物理实验中心

理 学 院  
2019 年 9 月

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 1、霍尔法测磁场 .....       | 1  |
| 2、用示波器研究互感耦合线圈 ..... | 6  |
| 3、电表的改装和校准 .....     | 11 |
| 4、超声波声速测量 .....      | 16 |
| 5、光强分布的测量 .....      | 23 |
| 6、光电效应实验 .....       | 30 |
| 7、等厚干涉实验 .....       | 36 |
| 8、温度传感器研究 .....      | 41 |
| 9、分光计的认识和调整 .....    | 50 |
| 10、衍射光栅实验 .....      | 57 |
| 11、迈克尔逊干涉实验 .....    | 61 |
| 12、空气中声速的测定 .....    | 64 |
| 13、光纤通讯技术实验 .....    | 67 |
| 14、用旋光仪测定液体的浓度 ..... | 72 |
| 15、光电二极管伏安特性测定 ..... | 75 |
| 附录 1 数显容栅尺说明         |    |

# 1、霍尔法测磁场

## [实验目的]

- (1) 了解产生霍尔效应的机理，明确应用霍尔效应测量磁场的原理。
- (2) 学习用霍尔元件测量磁场的基本方法。
- (3) 进一步熟悉箱式电位差计的使用方法。

## [仪器用具]

螺线管磁场实验仪、箱式电位差计、稳压电源、安培表、毫安表、干电池、滑线变阻器、开关等(或：螺线管磁场实验仪、HLZ-5 螺线管磁场测试仪)。

## [实验原理]

霍尔元件是根据霍尔效应制作的一种磁电转换元件。如图 1-1 所示，一块边长分别为  $l$  和  $b$ 、厚度为  $d$  的长方形半导体薄片，放在均匀磁场中，并使薄片平面垂直于磁场方向，若在 1、2 端面通以电流  $I$ ，则在 3、4 端面间就产生一电位差，这一现象称为霍尔效应，其电位差称霍尔电压  $V_H$ 。

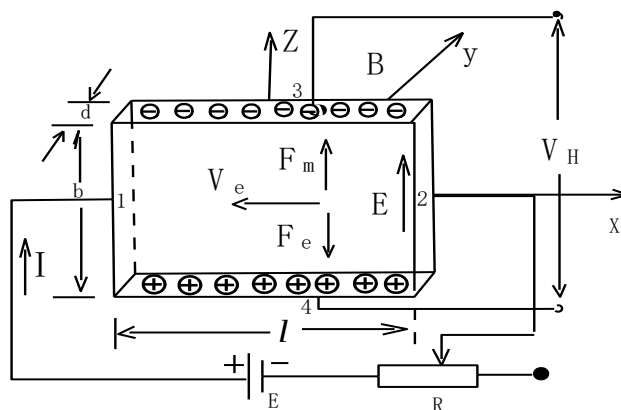


图 1-1. 霍尔效应示意图

霍尔效应是由于运动电荷在磁场中受到洛伦兹力作用而产生的。设电流  $I$  由带负电的载流子(电子)的运动形成(元件是由均匀的  $n$  型半导体材料做成的)，则电子受到洛伦兹力为

$$F_m = -ev_m \times B$$

方向沿  $Z$  轴向上，电子在  $F_m$  的作用下发生偏转，并聚积在端面 3 上。使端面 3 带负电荷，端面 4 带正电荷，从而在 3、4 两端面间建立起电场  $E$ 。这电场使电子又受到电场力  $F_e = -eE$  的作用， $F_e$  与  $F_m$  方向相反。开始时  $F_e < F_m$ ，电子将继续聚积到端面 3 上，电场  $E$  继续增大，直至  $F_e = F_m$  为止，此时就在 3、4 端面间形成一稳定的电场和稳定的电压  $V_H = Eb$ ，于是有

$$eE = e \frac{V_H}{b} = evB$$

设霍尔元件中载流子(电子)的密度为  $n_e$ ，则  $I$  的大小为：

$$I = \frac{dQ}{dt} = en_e v b d, \text{ 由上二式可解得}$$

$$V_H = \frac{1}{en_e d} IB = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (1-1)$$

式中  $R_H = \frac{1}{n_e e}$ ，称为霍耳系数； $K_H = \frac{1}{en_e d}$  称为霍耳元件的灵敏度，单位

为： $\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ ，它反映效应的强弱，其大小与材料特性（种类、载流子浓度等）及元件的几何尺寸有关。如果霍耳元件为 p 型（即载流子为空穴）半导体材料做成的，则  $K_H = \frac{1}{en_p d}$ （其中  $n_p$  为空穴的密度）。由于 n 型半导体的霍

耳系数比 p 型半导体的霍耳系数大，所以霍耳元件大都采用 n 型半导体材料。

由（1-1）式有

$$B = \frac{V_H}{K_H I} \quad (1-2)$$

如果霍耳元件的  $K_H$  值已知，只要测出实验中的工作电流  $I$  和霍耳电势差  $V_H$ ，就可算出霍耳元件所在处的磁感应强度。

在实验中，伴随着霍耳效应，还有一些副效应，所产生的附加电压，叠加在  $V_H$  上，使得测出的电压不只是霍耳电压  $V_H$ ，附加电压的来源主要有以下几种：

### 1. 不等位电位差 $V_0$

在霍耳元件的制造工艺中，很难将霍耳电极 3、4 焊在同一等位面上，如图 1-2 所示，因此当电流流过霍耳元件时，端面 3、4 间就会有一电位差  $V_0$ ，且

$$V_0 = Ir$$

式中  $r$  为沿  $X$  方向 3、4 两点间的电阻。 $V_0$  的方向与电流的方向有关，与外加磁场的方向无关。

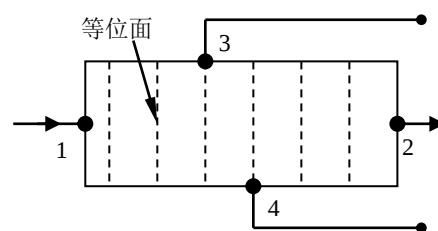


图 1-2. 霍尔元件等位面示意图

### 2. 厄廷好森效应及其产生的电压 $V_E$

当放在磁场  $B$  中的霍耳元件通以电流  $I$  后，由于载流子迁移速度的不同，载流子所受的洛仑兹力也不相等。 $F_m = F_e$  表明速度为  $v$  的载流子达到动态平衡。以电子为例，速度大于  $v$  的电子，满足  $F_m > F_e$ ，因而聚集在端面 3 上；速度小于  $v$  的电子，满足  $F_m < F_e$ ，因而聚集在端面 4 上。由于快速电子的能量大，转换成的热能多，使端面 3 的温度升得较高；反之，端面 4 的温度则较低，两端面就有一定的温度差，又因为电极与霍耳元件的制作材料不同，电极材料与霍耳元件形成一热电偶，所以这一温度差就会使 3、4 端面之间产生温差电压  $V_E$ ，这种现象称厄廷好森效应， $V_E$  的大小与  $IB$  乘积成正比，方向随  $I$ 、 $B$  的换向而改变。

### 3. 能斯脱效应及其产生的电压 $V_N$

由于电流  $I$  流入和流出霍耳元件的电极接头处的电阻不同，电流在两极

处产生的焦耳热也不同，因而也会引起温差电动势。这电动势又引起附加的电流，此电流在磁场作用下产生一个类似于  $V_H$  的电压  $V_N$ ，这一现象称能斯脱效应。 $V_N$  只与外磁场  $B$  的方向有关，与电流  $I$  的方向无关。

#### 4. 里纪-勒杜克效应及其产生的电压 $V_R$

能斯脱效应产生的电流也有厄廷好森效应，从而产生电压  $V_R$ ，这一现象称里纪-勒杜克效应， $V_R$  只与磁场  $B$  的方向有关，与电流  $I$  的方向无关。

这四种副效应使得霍尔电压难以测准。有时四种副效应产生的电压的总和，会远大于霍尔效应，因此必须减小和消除它们的影响。根据它们与电流  $I$  和磁场  $B$  的关系，可以用下述方法减小或消除它们的影响。

若实验测得的电压  $V_1$  为：
$$V_1 = V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R$$

我们把此情况下的  $B$  和  $I$  定为  $(+B, +I)$ ，则

当  $(+B, -I)$  时有：
$$V_2 = -V_H - V_0 - V_E + V_N + V_R$$

当  $(-B, -I)$  时有：
$$V_3 = V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$$

当  $(-B, +I)$  时有：
$$V_4 = -V_H + V_0 - V_E - V_N - V_R$$

由上述四式可消除  $V_0$ 、 $V_N$ 、 $V_R$ ，得

$$V_1 - V_2 + V_3 - V_4 = 4(V_H + V_E)$$

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) - V_E$$

实验证明， $V_E$  较  $V_H$  小得多，在误差范围内可略去，所以

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)$$

由于  $V_2$ 、 $V_4$  对  $V_1$ 、 $V_3$  来说测得的  $V_H$  为负值，故有

$$V_H = \frac{1}{4}(|V_1 + V_3| + |V_2 + V_4|) \quad (1-3)$$

#### [实验装置]

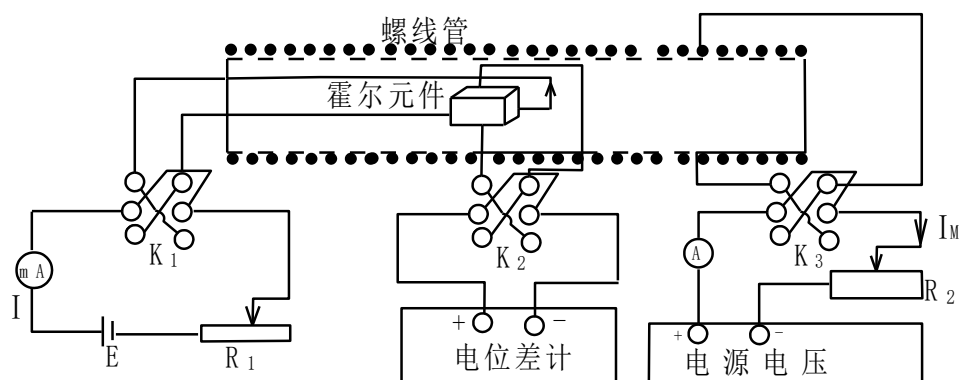


图 1-3 测绘通电螺线管轴向磁场实验电路

实验装置电路如图 1-3，可以分为以双极转换开关  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为中心的三个部分，即供给霍耳元件工作电流  $I$  部分、测量霍耳电压  $V_H$  部分和供给螺线管励磁电流  $I_M$  部分。变换开关  $K_1$ 、 $K_3$  的倒向可以改变工作电流  $I$  和磁场  $B$  的方向。当  $B$  或  $I$  换向引起 3、4 之间电压极性改变时，可转换  $K_2$  的倒向，使接至电位差计“未知”端的正负极性不变。在普通的磁场中霍耳电压  $V_H$  一般较小（约几个毫伏），要求用电位差计来测量。

### [实验内容]

#### 1. 测绘通电螺线管轴向磁场分布

(1) 按图 1-3 接好电路。

注意：对于 HLZ-5 型仪器，以双极转换开关  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为中心的三个部分被组装在 HLZ-5 螺线管磁场测试仪中，只需要将此仪器上工作电流、霍尔电压和励磁电流与螺线管实验实验仪上相应部分相连即可。



(2) 合上电键  $K_1$ ，调节  $R_1$  使霍耳元件的工作电流  $I=2\text{mA}$ 。合上电键  $K_3$ ，调节  $R_2$ ，使螺线管的励磁电流  $I_M=0.5\text{A}$ 。

(3) 由于螺线管中的磁场分布具有对称性。测量时，从螺线管的中点开始，到其一端为止，调整霍耳元件分别置于螺线管轴向不同位置处，将  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  向下合。由箱式电位差计测出每个位置时霍耳元件 3、4 两端面的电压，即  $V_1$  的值；再将  $K_1$ 、 $K_3$  向上合， $K_2$  向下合，所测出霍耳元件 3、4 两端面的电压，即为  $V_3$  的值。

(4) 为缩短实验时间，用  $V_H = \frac{1}{2}|V_1 + V_3|$  作为各点的霍耳电压  $V_H$ ，并填入数据表 1。

(5) 由公式 (1-2) ( $K_H$  由仪器上所标明的参数给出) 计算出螺线管内部各处轴向的磁感应强度大小  $B$ ，并作出  $B-x$  线。

#### 2. 测绘螺线管中心处的磁感应强度 $B$ 与励磁电流强度 $I_M$ 的关系曲线

(1) 将霍耳元件的位置调到螺线管中心处（即  $x=14\text{cm}$ ），保持工作电流  $I=2\text{mA}$  不变，调节  $R_2$ ，使  $I_M$  为  $0.10\text{A}$ 、 $0.20\text{A}$ 、 $0.30\text{A}$ 、 $0.40\text{A}$ 、 $0.50\text{A}$  时分别测出各励磁电流  $I_M$  对应的电压  $V_1$  和  $V_3$ ，计算相应的  $V_H$ 。

(2) 根据所测数据, 计算出  $I_M$  为各值时的磁感应强度大小  $B$ , 作出  $B-I_M$  曲线。

(3) 根据公式  $B = \mu_0 n I_M$  计算  $B$  的理论值 ( $n$  由仪器所标明的参数确定)

### [数据及处理]

数据表 1

$B-x$  曲线数据表

$K_H =$

| $X(\text{cm})$   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| $V_1(\text{mV})$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| $V_3(\text{mV})$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| $V_H(\text{mV})$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| $B(\text{T})$    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |

数据表 2

$B-I_M$  曲线数据表

$n =$

| $I_M(\text{A})$           | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $V_1(\text{mV})$          |     |     |     |     |     |
| $V_3(\text{mV})$          |     |     |     |     |     |
| $V_H(\text{mV})$          |     |     |     |     |     |
| $B(\text{T})$             |     |     |     |     |     |
| $B_{\text{理论}}(\text{T})$ |     |     |     |     |     |

### [思考题]

1. 电位差计直接测得的电压是霍耳电压吗?
2. 用实验装置能否测量霍耳元件的灵敏度  $K_H$ ? 如何进行测量?
3. 对  $B-I_M$  曲线数据表中  $B$  的实验值与理论值进行比较, 分析误差原因。

## 2、用示波器研究互感耦合线圈

### [实验目的]

1. 进一步熟悉示波器的使用。
2. 了解互感器的结构、原理和特性。
3. 用示波器测量或观察互感器的几个主要参量和特性。

### [仪器用具]

标准互感器一个、电阻箱两个、信号发生器一台（带鳄鱼夹的细缆线一根）、双踪示波器一台（带探头两个），连接导线若干。

### [实验原理]

#### 1. 互感器

互感器（或称变压器）是以互感现象为基础的电磁装置，其结构原理如图 2-1 所示。在同一铁芯上绕有两个线圈（或称绕组），联接到电源或信号源上的线圈称为原线圈（或初级绕组），联接到负载上的线圈称为副线圈（或次级绕组），两个绕组的电路一般彼此不联通（自耦变压器例外）。其作用

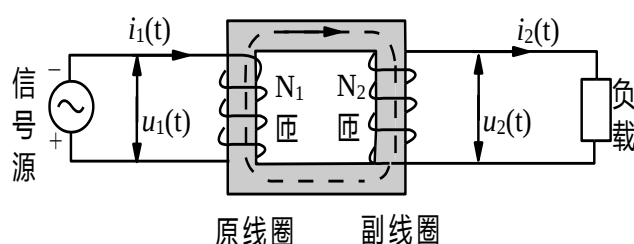


图 2-1 互感器示意图

是将能量或信号由一个线圈传递到另一线圈。

当原线圈中输入交变电流时，在铁芯内将产生交变的磁场，此交变磁场使副线圈中的磁通量不断变化，从而在副线圈中激发出感应电动势和感应电流，而副线圈中的感应电流同样也会在铁芯内形成交变的磁场，它反过来又影响原线圈中的电流。这就是互感器工作时的基本过程。

#### 2. 互感及互感系数

互感器可以简化为如图 2-2 所示的两组线圈 1、2，当其中任意一组中通有电流  $I$  时，会在周围激发磁场  $B$ ，从而在另一组线圈中产生磁通链。根据法拉第电磁感应定律，假设线圈 1 中的电流  $I_1$  随时间变化，它所激发的变化磁场会在它邻近的线圈 2 中产生感应电动势；同样，线圈 2 中的电流  $I_2$  变化时，也会在线圈 1 中产生感应电动势。这种现象称为互感现象，所产生的感应电动势称为互感电动势。

设线圈 1 所激发的磁场通过线圈 2 的磁通链数为  $\psi_{21}$ ，按照毕奥—萨伐尔定律， $\psi_{21}$  与线圈 1 中的电流强度  $I_1$  成正比

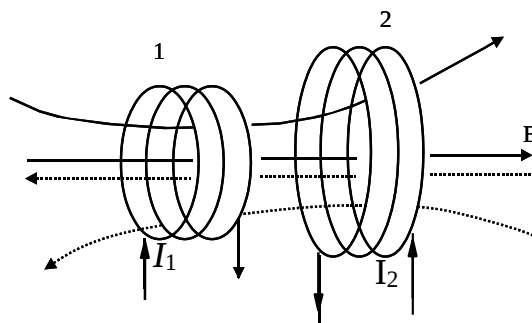


图 2-2. 互感现象

$$\Psi_{21} = M_{21} I_1$$

同理，设线圈 2 所激发的磁场通过线圈 1 的磁通链数为  $\Psi_{12}$ ，有

$$\Psi_{12} = M_{12} I_2$$

其中  $M_{12}$  和  $M_{21}$  是比例系数，它们由线圈的几何形状、大小、匝数、线圈之间的相对位置、是否填充磁介质，以及磁介质的性质决定，而与线圈中的电流无关。 $M_{12}$  和  $M_{21}$  称为互感系数，简称互感，单位为亨利（H）。可以证明， $M_{12}$  和  $M_{21}$  相等，一般用  $M$  表示，即

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (2-1)$$

互感系数的计算一般都比较复杂，实际中常常采用实验的方法来测定。

根据法拉第电磁感应定律，当线圈 1 中电流随时间变化时，线圈 2 中产生的感应电动势

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} \quad (2-2)$$

同样，当线圈 2 中的电流随时间变化时，在线圈 1 中也要产生感应电动势

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} \quad (2-3)$$

互感在电工、无线电技术中应用得很广泛，通过互感线圈，能够使能量或信号由一个线圈方便地传递到另一个线圈，因而电工、无线电技术中使用的各种变压器（电力变压器、中周变压器、输入、输出变压器等等）都是互感器件。

### 3. 交流信号及其表示

在一个电路中，如果电源的电动势  $e(t)$  随时间作周期性的变化，则各段电路中的电压  $u(t)$  和电流  $i(t)$  都将随时间作周期性变化，这种电路叫做交流电路。

实际工作中各场合所应用的交流电随时间变化的形式是多种多样的，有简谐波、锯齿波、矩形脉冲、尖脉冲、调幅波等等，如图 2-3 所示。

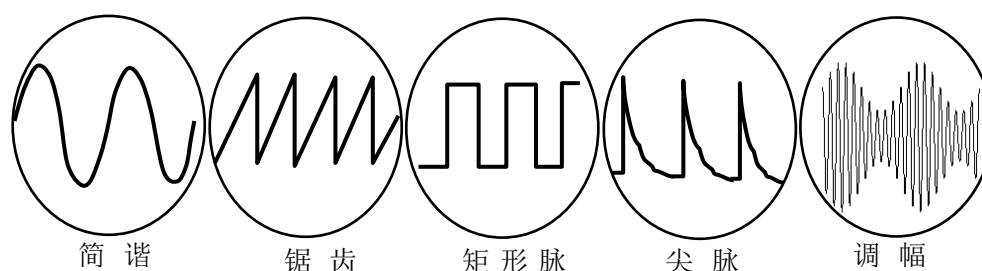


图 2-3. 交流电波形

尽管交流电的波形很多，但其中最重要的是简谐交流电，这不仅是因为简谐交流电最常见，更重要的是因为：

- (1) 任何非简谐式的交流电都可以分解为一系列不同频率和振幅的简谐式成分；
- (2) 不同频率的简谐成分在线性电路中彼此独立，互不干扰。

简谐交流电一般表示为：

$$\text{电动势} \quad e(t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi_e) \quad (2-4)$$

$$\text{电压} \quad u(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (2-5)$$

$$\text{电流} \quad i(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (2-6)$$

其中,  $E_0$ 、 $I_0$ 、 $U_0$  分别是电动势、电流和电压的峰(幅)值。不过,几乎所有的交流电表都是按“有效值”来表示的,简谐交流电的有效值等于峰值的  $1/\sqrt{2}$  倍,即峰值的 70% 左右:

$$\text{电压的有效值} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707U_0 \quad \text{电流的有效值} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707I_0$$

两个简谐量之间有相位差,表示他们变化的步调不一致。

## [ 实验内容 ]

### 1. 测量互感系数 $M$

为测量互感器的互感值,设计如图 2-4 的电路,其中  $R$  是电阻箱的电阻值,用示波器可以观测其上的交变电压  $u(t)$  并确定其峰值  $U_0$ ,同时,用示波器也可以观测副线圈上的输出交变电压  $u_2(t)$  并确定其峰值  $U_{20}$ ,根据法拉第电磁感应定律(2-2)式,若忽略线圈的直流电阻,副线圈上的输出电压等于感应电动势的负值,即

$$u_2 = -\mathcal{E}_2 = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt} = \frac{M}{R} \frac{du}{dt} \quad (2-7)$$

将(2-5)式代入上式两侧,可得

$$\begin{aligned} U_{20} \cos(\omega t + \varphi_{u_2}) &= -\frac{M}{R} \omega U_0 \sin(\omega t + \varphi_u) \\ &= \frac{M}{R} \omega U_0 \cos(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中  $U_{20}$ 、 $U_0$  分别是电压  $u_2$ 、 $u(t)$

的峰值,  $f$  是信号的频率。由于从示波器上可以确定输入与输出电压的峰值,则由(2-8)式可得互感器的互感系数

$$M = \frac{U_{20} R}{2\pi f U_0} \quad (2-9)$$

### 2. 测量变压比系数

设原、副线圈的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 通过线圈任意截面的磁通量是自感磁通和互感磁通的总和, 设为  $\Phi(t)$ , 它是时间的函数。通过原、副线圈的磁通链数分别为

$$\Psi_1(t) = N_1 \Phi(t) \quad , \quad \Psi_2(t) = N_2 \Phi(t)$$

忽略各种损耗,忽略线圈的直流电阻、线电容,则原、副线圈两端的电压分别等于各自感应电动势的负值,即

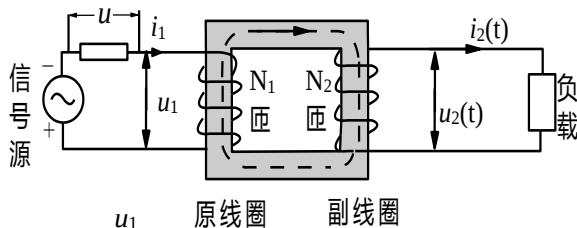


图 2-4 互感系数测量电路图

$$u_1 = -\varepsilon_1 = \frac{d\Psi_{12}(t)}{dt} = N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (2-10)$$

$$u_2 = \varepsilon_2 = \frac{d\Psi_{21}(t)}{dt} = N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (2-11)$$

将(2-5)式代入上面两式，可以看出输入电压与输出电压的峰值之比（变压比系数）为

$$\frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-12)$$

事实上，实际的变压器还存在线电容、直流电阻和电路的幅频特性等因素影响，所以，上面的公式是理想化的。

## [ 实验步骤 ]

### 1. 测量互感系数 $M$

(1) 用电阻箱作为电阻  $R$  和负载， $R$  取  $1K\Omega$ ，负载取值  $10K\Omega$ ，按图 2-4 接好线路，注意从信号源上的正弦信号输出端输出信号，并在“波形选择按钮”中按下“正弦”。

(2) 接通低频信号源的电源，选择“频率范围”为  $3KHz$  档，调节“频率调节”和“频率微调”旋钮，使输出信号的频率为  $500Hz$ ，微调“正弦幅度”旋钮，使输出信号的峰-峰值为  $2\sim 10V$ （可固定为某一定值）。

(3) 接通示波器的电源，调节辉度、聚焦和“垂直位移”、“水平位移”等旋钮，使示波器工作在最佳工作状态。

(4) 将电阻  $R$  上的电压  $u$  用探头接到示波器的 CH 1 通道，负载上的电压  $u_2$  接到示波器的 CH2 通道，注意将两个通道的“衰减开关”（VOLTS / DIV）均逆时针拨到衰减最大，“垂直工作选择按钮”选择 CH 1 或 CH2。

(5) 在示波器上依次按下 CH 1 和 CH2 观察  $u$  和  $u_2$ ，同时调节两个通道的“衰减开关”（VOLTS / DIV）和“扫描时间因数选择开关”（SEC / DIV）到合适位置，使信号便于观察和测量，注意测量时要把“衰减开关”调到校准位置。

(6) 测量并记录  $u$  和  $u_2$  的峰-峰值  $U_0$  和  $U_{20}$ ，代入(2-9)式计算互感系数  $M$ 。

### 2. 测量变压比系数

重新按图 2-1 连接电路，负载取  $50\sim 10000\Omega$ ，将低频信号源的输出频率调到  $500Hz$ ，同时将输出信号的峰-峰值调到  $2\sim 10V$  左右（可固定为某一定值），改变负载电阻的阻值，从示波器上测量  $u_1$  和  $u_2$  的峰-峰值  $U_{10}$ 、 $U_{20}$ ，代入公式(2-12)计算变压比系数，并填表，然后分析变压比变化的原因。

## [实验数据表格]

### 1. 测量互感系数 $M$

| (仪器标示值: $M=$ $H$ ) |                |                |                        |                             |             |
|--------------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------------------|-------------|
| 输出信号频率<br>$f(Hz)$  | 电阻 $R(\Omega)$ | 负载值 $(\Omega)$ | $u$ 的峰-峰值<br>$U_0 (V)$ | $u_2$ 的峰-峰值<br>$U_{20} (V)$ | 互感系数<br>$M$ |
| 500                | 1000           | 10000          |                        |                             |             |

### 2. 测量变压比系数

| 负载值 ( $\Omega$ ) | 输出信号频率<br>f(Hz) | $u_1$ 的峰-峰值<br>$U_{10}$ (V) | $u_2$ 的峰-峰值<br>$U_{20}$ (V) | 变压比系数<br>N |
|------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| 50               | 500             |                             |                             |            |
| 200              | 500             |                             |                             |            |
| 400              | 500             |                             |                             |            |
| 800              | 500             |                             |                             |            |
| 1000             | 500             |                             |                             |            |
| 3000             | 500             |                             |                             |            |
| 5000             | 500             |                             |                             |            |
| 8000             | 500             |                             |                             |            |
| 9000             | 500             |                             |                             |            |
| 10000            | 500             |                             |                             |            |
| 分析变压比发生变化的原因：    |                 |                             |                             |            |

〔 思考题 〕

互感器的原理是什么，有哪些用途？

### 3、电表的改装和校准

#### [实验目的]

1. 了解微安表头的基本性能及其基本参量的意义。
2. 掌握将微安表头改装成不同量程的直流电流表、直流电压表的原理和方法。
3. 学会用标准电表校正电流表、电压表的方法。

#### [仪器用具]

磁电式微安表头、若干阻值不同的电阻、毫安表、微安表、标准电压表、稳压电源、滑线变阻器、开关等。

#### [实验原理]

通常用于改装的电表—微安表，习惯上称之为“表头”，表的两端只允许加微小的电压(毫伏级)，也就是说它只能测量微小的电流和电压。如果想用它测量较大的电流和电压，就必须对它进行改装(或称为扩程)。改装后，可成为具有多个量程的直流电流表和多个量程的直流电压表，甚至可具有更多的功能，如测量交流电流、交流电压、电容、电感等。

表征表头性能的量为满度电流  $I_g$  和内阻  $R_g$ 。使微安表指针转至满刻度时，通过表头的电流  $I_g$  称为表头的“满度电流”。 $I_g$  越小，表头越灵敏，它表征着表头的电流灵敏度。表头线圈的直流电阻  $R_g$  称为表头的“内阻”。显然，表头的满度电压  $V_g = I_g \cdot R_g$  在  $I_g$  一定的条件下，表头内阻越小，则表头的满度电压就越小，说明表头的电压灵敏度越高。因此， $R_g$  表征着表头的电压灵敏度。在实验中， $I_g$  和  $R_g$  由实验室给出。

#### 1. 将微安表头改装成两量程的直流电流表

扩大表头电流量程的方法是在表头两端并联一个电阻  $R_s$ ，使超过表头量限的那部份电流从  $R_s$  流过， $R_s$  称为分流电阻。这样表头与  $R_s$  就组成了一个能测量较大电流的电流表，如图 3-1 所示。选用不同的分流电阻，可以得到不同量程的电流表。

设表头改装后的量程为  $I$ ，根据欧姆定律有

$$(I - I_g) \cdot R_s = I_g \cdot R_g \quad (3-1)$$

若将微安表的量程扩大  $n$  倍，即  $I = nI_g$ ，则

$$R_s = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{R_g}{n - 1} \quad (3-2)$$

可见，如果在表头上并联阻值为  $R_s = R_g / (n - 1)$  的分流电阻，就将微安表的量程扩大

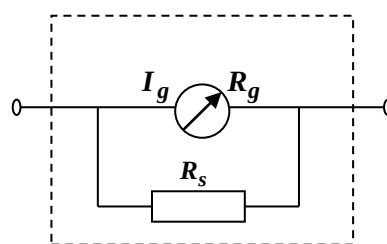


图 3-1

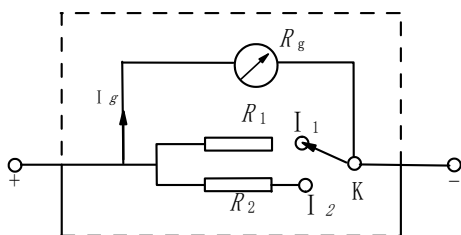


图 3-2

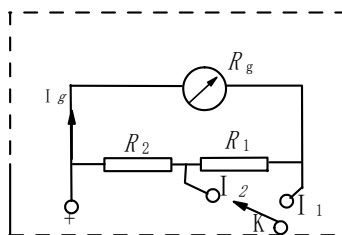


图 3-3

了  $n$  倍。若要将表头改装成量程为  $I_1=n_1I_g$ ,  $I_2=n_2I_g$  两量程电流表, 则只需给表头并联两个分流电阻  $R_1=R_g/(n_1-1)$ ,  $R_2=R_g/(n_2-1)$  即可。两个量程可以通过一个转换开关来选择, 如图 3-2 所示。

然而上面的安排存在着严重的弊病, 一旦转换开关  $K$  接触不良, 分流器就从表头脱出, 全部电流将从表头流过, 以致烧毁表头。为克服这一弊端, 一般多量程电流表采用抽头式分流器, 如图 3-3 所示。在图 3-3 中, 当转换开关转到  $I_1$  时, 表头量程为两量程中最小量程  $I_1$ , 分流电阻  $R_s=R_1+R_2$ 。此时

$$R_s = R_1 + R_2 = \frac{R_g}{n_1 - 1} \quad (3-3)$$

当开关转到  $I_2$  时, 表头量程为两量程中最大量程  $I_2$ , 分流电阻  $R_s= R_2$ 。此时

$$R_s = R_2 = \frac{R_g + R_1}{n_2 - 1} \quad (3-4)$$

解 (3-3) 和 (3-4) 式得

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{n_2 - n_1}{n_2(n_1 - 1)} R_g \\ R_2 &= \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} R_g \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

## 2. 将微安表头改装为两量程的直流电压表

微安表本身也可以认为是小量程  $V_g=I_g \cdot R_g$  的电压表。把它改装为不同量程的电压表, 只需给它串联一个合适的分压电阻  $R_H$ , 使大部份电压降落于分压电阻上。选用不同的分压电阻就可以得到不同的电压量程, 如图 3-4 所示。

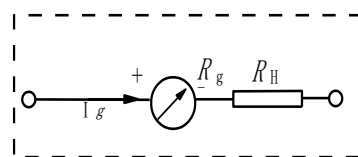


图 3-4

若将它改装成电压量程为  $V$  的伏特表, 由欧姆定律有

$$V = I_g (R_g + R_H)$$

则  $R_H = \frac{V}{I_g} - R_g \quad (3-6)$

即只要在表头两端串联一个  $R_H = \frac{V}{I_g} - R_g$  的分压电阻, 就把微安表头改装成量程

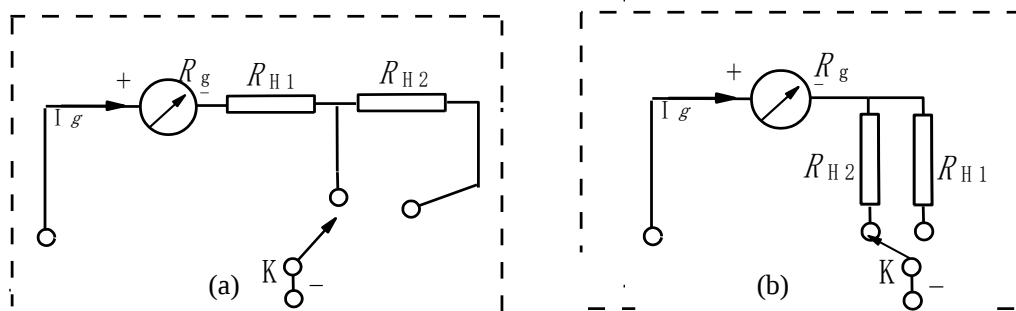


图 3-5

为  $V$  的伏特计。要把表头改装成  $V_1$ 、 $V_2$  两量程的电压表，只需在表头串联两个阻值  $R_{H1} = \frac{V_1}{I_g} - R_g$  和  $R_{H2} = \frac{V_2}{I_g} - R_g$  的电阻即可，它们通过一个转换开关选择。为此有如图 3-5 的两种接法。

在图 3-5(a) 中，分压电阻由上面讨论的方法确定。用类似的方法不难算出图 3-5(b) 中的分压电阻分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{H1} &= \frac{V_1}{I_g} - R_g \\ R_{H2} &= \frac{V_2}{I_g} - (R_{H1} + R_g) = \frac{V_2 - V_1}{I_g} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

### 3. 将微安表头改装成多量程电压电流两用表

我们可以将一个表头同时改装成电流、电压两用表，即伏安计。但由于只用简单的转换开关很难将表头脱出分流器，所以往往是将表头首先改装为电流表，然后在电流表的最低量程(档)的基础上改装电压表。如图 3-6 所示。

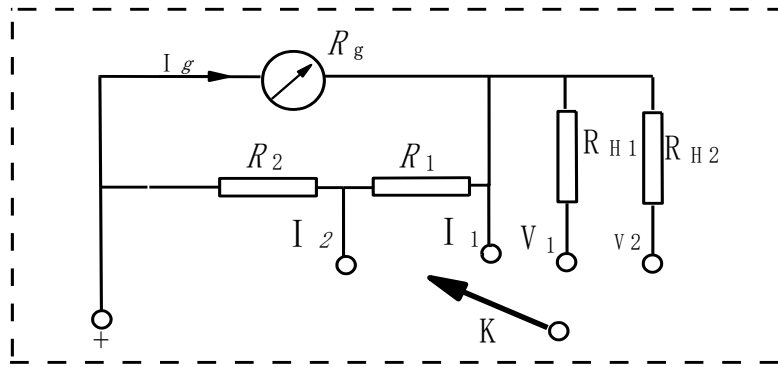


图 3-6

设  $I'_g$  为最低量程的等效满度电流，即

$$I'_g = I_1 = n_1 I_g$$

其等效电阻  $R'_g$  由欧姆定律求得

$$R'_g = \frac{R_g \cdot R_s}{R_g + R_s} = \frac{1}{n_1} R_g$$

若改装为  $V_1$ 、 $V_2$  两量程电压表，则两个分压电阻为

$$\left. \begin{aligned} R_{H1} &= \frac{V_1}{I'_g} - R'_g = \frac{1}{n_1} \left( \frac{V_1}{I_g} - R_g \right) \\ R_{H2} &= \frac{1}{n_1} \left( \frac{V_2}{I_g} - R_g \right) \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

电路原理图如图 3-6 所示。其中  $R_1$ 、 $R_2$  由 (3-5) 式确定

### 3. 电表的定标与校准

电表由于不可避免地存在结构的缺陷，在使用任一量程测量时，电表的指示值同电流(电压)的真值之间总是存在误差。而且在整个量程的不同指示值处绝对误差不同，其中最大的一个绝对误差与电表量程比值的百分数称为该电表的标称误差。

即

$$\text{标称误差} = \frac{\text{最大绝对误差}}{\text{量程}} \times 100\%$$

通常在电表的等级中表明了这一特性：

电表的准确度等级

$$K = \text{标称误差} \times 100$$

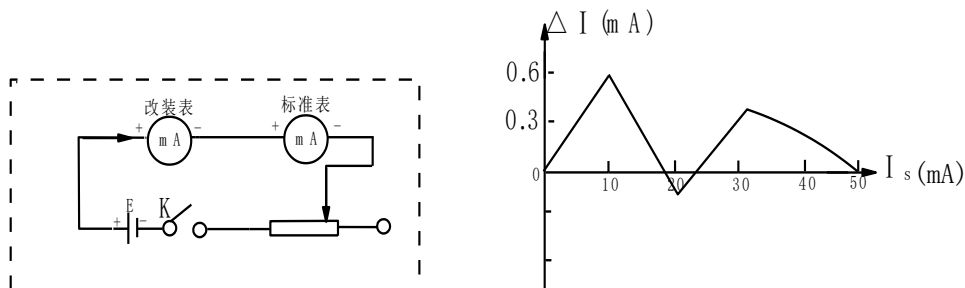


图 3-7

我国国家标准规定电表准确度为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 共七个等级。准确度为 K 级的电表称为 K 级表。因此，在规定条件下使用电表，由准确度等级可知其测量值的最大误差。

新改装的电表，由于表头内阻和满度电流、分流电阻、分压电阻的测量和制作上的误差，不可能十分准确。所以，改装后的电表应进行校准，才能交付使用。使

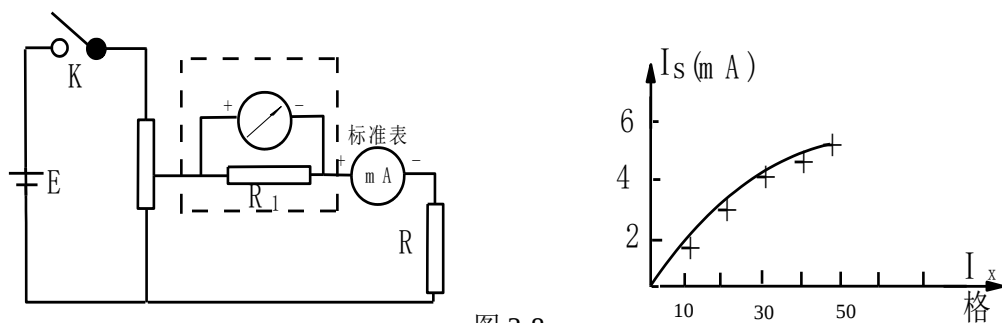


图 3-8

用和存放久了的电表，由于元件的磨损、老化、氧化、腐蚀等原因，它的准确度等

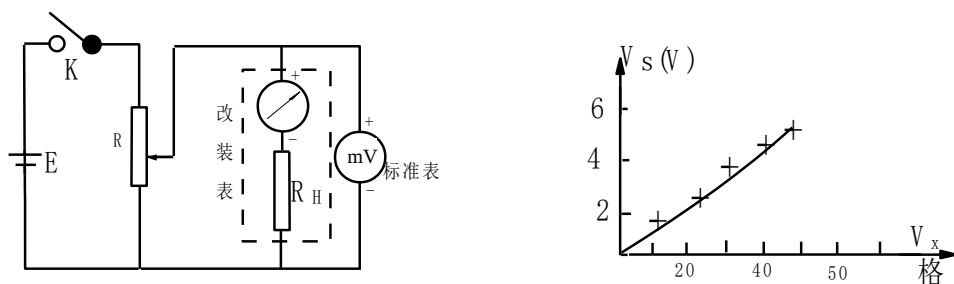


图 3-9

级  
会下降，通过校准电表就可发现这一情况。进行合理的修理调整后，一般可以保持原来的准确度等级。

校准的方法很多，最简单的方法是：将待校电表与一块量程合适的准确度等级高的电表(视为标准表)同时去测量同一个电流(或电压)，把标准电表的读数值作为真实值  $I_s$  来确定待校电表在不同电流值  $I_x$  (或电压值)下的绝对误差，即  $\Delta I_x = I_x - I_s$ ，再画出

10 30 50

$\Delta I \sim I_s$  校准曲线(折线)，如图 3-7 所示。

注意：被校表读数值为横坐标； $\Delta I$  可能为正，也可能为负，而不可以取绝对值。当电流表的量程较小时(几十毫安以下)，也可以采用小阻值滑线变阻器作为分压式联接。校表线路和定标曲线如图 3-8 和 3-9 所示。

[实验内容]

1. 电表改装

(1)将满度电流为  $50\mu A$  的表头改装为  $I_1 = 5mA$ 、 $I_2 = 50mA$  两量程电流表, 计算出分流电阻  $R_1$ 、 $R_2$  ( $R_g$  由实验室给出)。

(2)在  $5mA$  电流表基础上，再改装为  $V_1 = 0.5V$ 、 $V_2 = 5V$  的电压表，计算出  $R_{H1}$ 、 $R_{H2}$  的值。

(3)按图 3-6 接好线路图。此时表头已经改装成了一块具有两个量程的 V-A 表，只要改变转换插头 K 的位置，就会得到合适量程的电流表或电压表。

2. 电表的校准

分别对量程  $I_2 = 50mA$  (或  $I_1 = 5mA$ ) 的电流表和量程  $V_1 = 0.5V$  的电压表进行校正。

(1)分别按电流表校正电路图 3-8 和电压表校正电路图 3-9 接好线路。

(2)调滑线变阻器，使改装表头指针指向表格内指定的偏转格数，记录下相应的理论值，并记下相应标准表的读数。先校上升(使电流或电压量值从小到大调整)，后校下降。

[数据及处理]

电流表校准数据和电压表校准数据

| 电 表                    |    | 电 流 表 |    |    |    |    | 电 压 表 |    |    |    |    |
|------------------------|----|-------|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|
| $I_x, V_x$ (格)         |    | 10    | 20 | 30 | 40 | 50 | 10    | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 预期 $I_x, V_x$ 值        |    |       |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| $I_s, V_s$             | 上升 |       |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
|                        | 下降 |       |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| $\bar{I}_s, \bar{V}_s$ |    |       |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| $\Delta I, \Delta V$   |    |       |    |    |    |    |       |    |    |    |    |

1. 在坐标纸上作出  $I_s - I_x$ 、 $V_s - V_x$  两条定标曲线和  $\Delta I - I_s$ 、 $\Delta V - V_s$  校准曲线。

2. 由校准曲线算出  $I_1$ 、 $V_1$  两表的标称误差，并分别判定两表的准确度等级。

[思考题]

- 电表在上升、下降情况下读数不严格一致的原因是什么？
- 若校准电流表时改装表读数总大于标准表读数，问题出在何处？  
校准电压表时改装表读数总小于标准表读数，问题又出在何处？  
若校准电流表改装表读数总小于标准表读数，说明什么问题？
- 若用普通电炉丝作分流电阻，将一表头改装成电流表，将会有何后果？

## 4、 超声波声速测量

### [实验目的]

- 1、了解超声驻波形成的原理。
- 2、利用驻波法和相位比较法测量空气中的声速。
- 3、进一步熟悉示波器的使用,熟悉逐差法用于数据处理。

### [仪器用具]

SV-DH 声速测定仪、SVX-7 声速测定仪信号源、双踪示波器、温湿度计、气压计等。

### [实验原理]

声波是一种在弹性介质中传播的机械波,它是纵波,其振动方向与传播方向相一致。频率低于 20Hz 的声波为次声波;频率在 20Hz~20kHz 的声波可以被人听到,为可闻声波。频率在 20kHz 以上的声波为超声波。

声速是描述声波在介质中传播特性的一个基本物理量,声波在介质中的传播速度与媒质的特性及环境状态等因素有关。因而通过对介质中声速的测定,可以了解介质的特性或状态变化,这在现代检测中应用非常广泛。例如,根据声速与温度的关系设计出声速温度计,测量特定场合的温度,如测量可燃混合物爆燃瞬间的温度;根据声速与介质浓度的关系,设计出测量氯气、蔗糖等气体或溶液的浓度、氯丁橡胶乳液的比重、麦芽汁酵母浓度在线测试等等。这些问题都可以通过测定这些物质中的声速来解决,可见,声速测定在工业生产上具有一定的实用意义。

本实验以在空气中由高于 20kHz 的声振动所激起的纵波为研究对象,介绍声速测量的基本方法。实验中采用压电陶瓷超声换能器来测定超声波在空气中的传播速度,这是非电量电测方法应用的一个例子。

#### 1. 声波在空气中的传播速度

假设空气为理想气体,则声波在空气中的传播可以近似为绝热过程,传播速度可以表示为:

$$v = \sqrt{\frac{RT\gamma}{\mu}} \quad (4-1)$$

式中 R 为摩尔气体常数(8.314J/mol·K);  $\gamma$  是比热容比; T 为空气的绝对温度;  $\mu$  为空气分子量,如果以摄氏度计算,将 0℃ 时,一个标准大气压下,声波在空气中的传播速度记为  $v_0$  ( $v_0 = 331.45\text{m/s}$ ), 空气的温度为  $\theta$  时,声速可以表示为:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{R\gamma}{\mu}(273.15 + \theta)} \\ &= v_0 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.15}} \end{aligned} \quad (4-2)$$

#### 2. 超声波的发射与接收——压电换能器。

本实验采用压电陶瓷超声换能器(图 4-1)来实现声压和电压之间的转换,压电换能器做波源具声波指向性好,在接收端信号强度强的特点。同时,由于换能器工作频率在超声波频率范围内,一般的音频信号对它没有干扰。超声波频率高,波长  $\lambda$  较可闻声波短,在不长

的距离内可测到多个  $\lambda$ ，取其平均值， $\lambda$  测定就比较准确，这些都可提高实验测量精度。

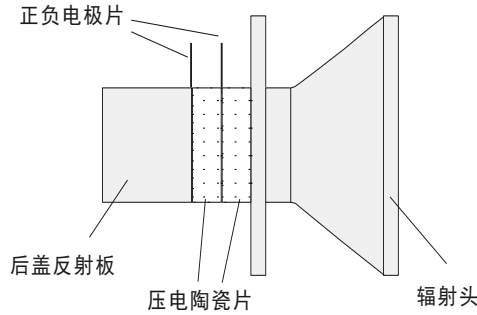


图 4-1 超声换能器结构示意图

压电陶瓷超声换能器由压电陶瓷片和轻、重两种金属组成。压电陶瓷片（如钛酸钡、锆钛酸铅等）是由一种多晶结构的压电材料做成的，在一定的温度下经极化处理后，具有压电效应。在简单情况下，压电材料受到与极化方向一致的应力  $T$  时，在极化方向上产生一定的电场强度  $E$ ，它们之间有一简单的线性关系  $E=gT$ ；反之，当与极化方向一致的外加电压  $U$  加在压电材料上时，材料的伸缩形变  $S$  与电压  $U$  也有线性关系  $S=dU$ 。比例常数  $g$ 、 $d$  称为压电常数，与材料性质有关。由于  $E$ 、 $S$ 、 $T$ 、 $U$  之间具有简单的线性关系，因此我们就可以将正弦交流电信号转变成压电材料纵向长度的伸缩，成为声波的波源；同样也可以利用压电效应的逆效应——电致伸缩效应，使声压变化转变为电压的变化，用来接收声信号。

在压电陶瓷片的头尾两端胶粘两块金属，组成夹心型振子，头部用轻金属做成喇叭型，尾部用重金属做成锥型或柱型，中部为压电陶瓷圆环，紧固螺钉穿过环中心。这种结构增大了辐射面积，增强了振子与介质的耦合作用。由于振子是以纵向长度的伸缩直接影响头部轻金属作同样的纵向长度伸缩（对尾部重金属作用小），这样所发射的波方向性强，平面性好。

### 3. 声速测量的基本原理

在波动过程中波速  $v$ ，波长  $\lambda$  和频率  $f$  之间存在着下列关系：

$$v = f\lambda \quad (4-3)$$

实验中可通过测定声波的波长  $\lambda$  和频率  $f$  来求得声速  $v$ ，常用的具体实现方法有驻波法与相位比较法。

#### (1) 驻波法

如图 4-2 所示由声源  $S1$  发出的平面简谐波沿  $x$  轴正方向传播，接收器  $S2$  在接收声波的同时还反射一部分声波，当  $S1$  和  $S2$  表面互相平行时，并且  $S1$  到  $S2$  的距离为  $\frac{1}{2}\lambda$  的整数倍， $S1$  发出的声波和  $S2$  反射的声波之间形成干涉，出现超声波共振现象，这称为超声驻波。

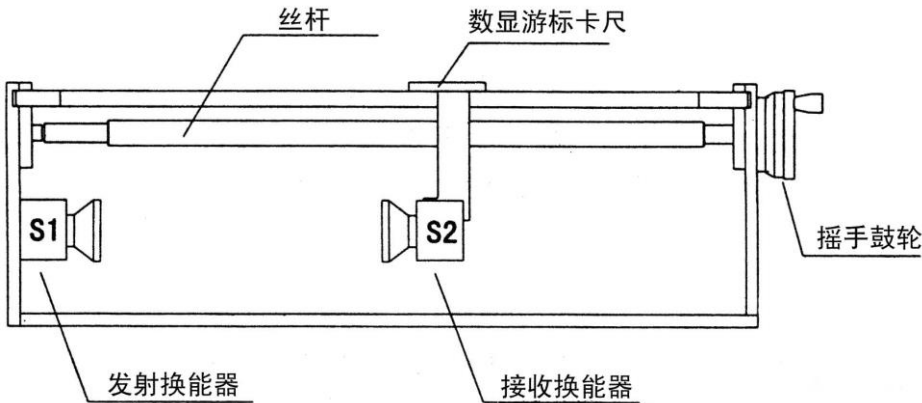


图 4-2

设沿  $x$  方向入射波的方程为：

$$y_1 = A \cos 2\pi \left( ft - \frac{x}{\lambda} \right)$$

(4-4)

沿  $x$  负方向反射波方程为:

$$y_2 = A \cos 2\pi \left( ft + \frac{x}{\lambda} \right) \quad (4-5)$$

两波相遇干涉时, 在空间某点的合振动方程为(驻波方程):

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A \cos 2\pi \left( ft - \frac{x}{\lambda} \right) + A \cos 2\pi \left( ft + \frac{x}{\lambda} \right) \\ &= (2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}) \cos 2\pi ft \end{aligned} \quad (4-6)$$

当  $x = n\lambda/2$ ; ( $n=1,2,\dots$ ) 位置时, 声振动振幅最大, 为  $2A$ , 称为波腹, 当  $x = (2n-1)\lambda/4$ , ( $n=1,2,\dots$ ) 位置上声振动振幅为零, 这些点称为波节。其余各点的振幅在零和最大值之间。两相邻波腹(或波节)间的距离为  $\lambda/2$  即半波长。

一个振动系统, 当激励频率接近系统固有频率时, 系统的振幅达到最大, 称为共振, 当信号发生器的激励频率等于驻波系统的固有频率时, 发生驻波共振, 声波波腹处的振幅达到相对最大值, 此时更便于测出波长  $\lambda$ , 由  $u = f\lambda$  可求出声速。

## (2) 相位比较法

声源  $S_1$ 、接收器  $S_2$ , 设  $S_2$  距  $S_1$  为  $L$ , 则在发射波和接收波之间的相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi f \frac{L}{v} \quad (4-7)$$

因此可通过测量  $\Delta\varphi$  来求得声速。

$\Delta\varphi$  的测定可以用示波器观察相互垂直振动合成的李萨如图形的方法进行。

$S_2$  的输出信号输入示波器进行  $x$  轴方向的振动, 振动方程为

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (4-8)$$

$S_1$  的激励信号输入示波器进行  $y$  轴方向的振动,

振动方程为

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (4-9)$$

则合振动方程为

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (4-10)$$

此方程轨迹为椭圆, 椭圆长短轴和方位由相位差  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  决定。若  $\Delta\varphi = 0$ , 则轨迹为图 2 a) 所示直线; 若  $\Delta\varphi = \pi/2$  则轨迹为以坐标轴为主轴的椭圆, 如图 2 b) 所示, 若

$\Delta\varphi = \pi$  则轨迹为图 2 c) 所示的直线。 $\Delta\varphi$  为  $3\pi/2$  和  $2\pi$  时的轨迹图依次变为图 1 d) 和图 2 e)。

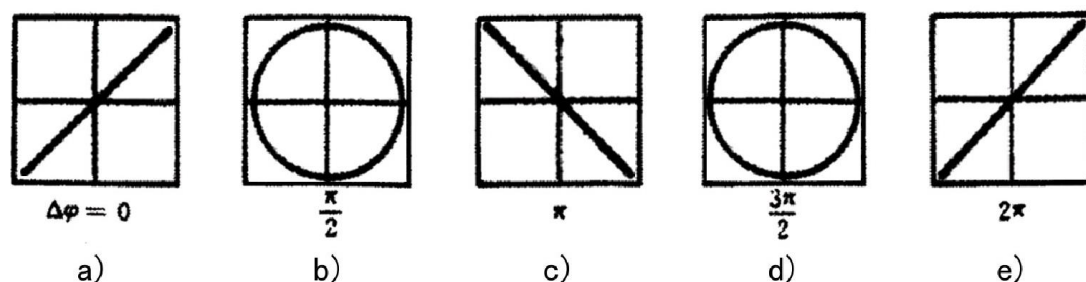


图 4-3 相互垂直的同频率的两个谐振动的合成绩

若  $S_2$  向离开  $S_1$  的方向移动距离  $L = S_2 - S_1 = \lambda/2$ ，则  $\Delta\varphi = \pi$ ；而  $S_2 - S_1 = \lambda$ ，则  $\Delta\varphi = 2\pi$ 。

随着  $S_2$  的移动， $\Delta\varphi$  随之从  $0 \rightarrow \pi \rightarrow 2\pi$  变化，李萨如图形也随之如图 2 中从 a)  $\rightarrow$  c)  $\rightarrow$  e) 的图形变化，所以由图形的变化可测出  $\Delta\varphi$  与  $S_2$  移动距离，从而得到  $\lambda$ ，并计算出波速  $v$ 。

### [实验内容及步骤]

#### 1. 调仪器至待测状态

##### (1) 连接线路

按图 4-4 连接线路，示波器和声速测定仪信号源开机预热。

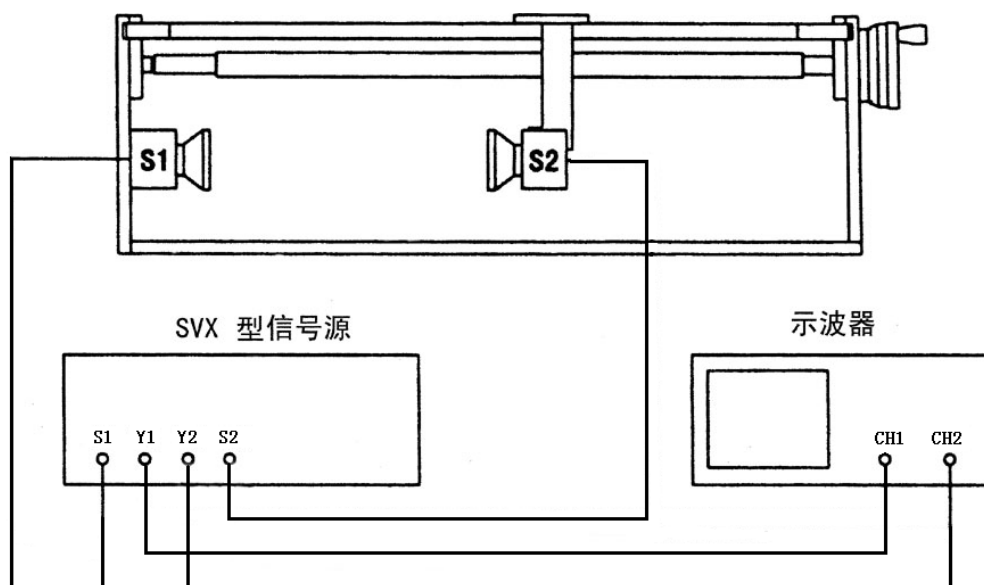


图 4-4

## (2) 调节声速测定仪

调整发射换能器与接收换能器的距离，使两个换能器之间的距离为 2cm，打开数显卡尺的液晶显示器电源开关，并使其显示数值的单位为 mm。(注：通电后两端面不可接触，否则发射换能器的谐振频率会被改变)。

## (3) 调整发射换能器的信号峰峰值和工作频率

选择“功率信号源”输出信号频率可调范围为 5K-50K，调节“频率粗调”将信号源输出信号频率调节到 35KHz 左右。

## (4) 调节示波器

将“辉度”旋钮调到居中的位置，示波器的显示方式选择“双踪”，扫描方式选择“自动”，示波器输入信号选择“AC”，用 CH1 观察发射换能器的波形，用 CH2 观察接收换能器的波形，若波形显示不稳定，调节“电平”旋钮使波形显示稳定下来。

## (5) 调整换能器系统的信号峰峰值和谐振频率

调节信号发生器的“连续波强度”旋钮，改变发射换能器的驱动信号峰峰值，调整到 3V，调节“接收增益”旋钮，使 CH2 显示的波形处于不失真状态即可，若接收增益过大会造成接收信号失真，不易准确判断信号幅值的极大值出现。

缓慢移动  $S_2$ ，当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大处，固定  $S_2$ ，再仔细微调信号发生器的输出频率，使屏幕上正弦波幅值达到最大，此时信号源频率等于换能器的谐振频率，接收换能器的输出信号峰峰值亦为最大，此时的频率就是换能器的谐振频率。

## 2. 驻波法测声速

转动游标卡尺的鼓轮使发射面和接收面之间的距离逐渐增加，并依次记下示波器上的正弦波达到极大值时从游标卡尺读得的相应位置和对应的信号源频率的示值，由于信号源输出信号的频率在实验过程中会发生漂移，而换能器在一个狭窄的频段内都可以发生谐振，所以每次记录数显游标卡尺读数时，也要记录信号源的频率示数，共记录 10 组数据。

记下室温，空气相对湿度，大气压强，并用逐差法对实验数据进行处理。

## 3. 相位比较法测声速

转动游标卡尺的鼓轮，改变发射面与接收面之间的距离，观察示波器荧光屏上李萨如图形的变化，依次读取示波器上显示相位差  $\Delta\varphi = 0$  和  $\Delta\varphi = \pi$  图样时，接收面的位置和对应的信号源频率的示值，记录 10 组数据。

记下室温，空气相对湿度，大气压强，用逐差法处理数据。

## 4. 关闭电源，整理仪器。

# [实验数据处理]

## 1、驻波法

表 1. 驻波法测声速

室温 T= 大气压强 P= 相对湿度 RH=

|                |                |                |                |                |                |                |                |                |                   |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| $l_1$<br>(mm)  | $l_2$<br>(mm)  | $l_3$<br>(mm)  | $l_4$<br>(mm)  | $l_5$<br>(mm)  | $l_6$<br>(mm)  | $l_7$<br>(mm)  | $l_8$<br>(mm)  | $l_9$<br>(mm)  | $l_{10}$<br>(mm)  |
|                |                |                |                |                |                |                |                |                |                   |
| $f_1$<br>(kHz) | $f_2$<br>(kHz) | $f_3$<br>(kHz) | $f_4$<br>(kHz) | $f_5$<br>(kHz) | $f_6$<br>(kHz) | $f_7$<br>(kHz) | $f_8$<br>(kHz) | $f_9$<br>(kHz) | $f_{10}$<br>(kHz) |
|                |                |                |                |                |                |                |                |                |                   |

表 2. 驻波法测定声速  $\bar{\lambda}$  的分组逐差处理

|                                               |   |   |   |   |   |                                                                                     |
|-----------------------------------------------|---|---|---|---|---|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 序号 $i$                                        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | $\bar{\lambda} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \lambda_i \text{ (mm)}$ $= \text{ (mm)}$  |
| $\lambda_i = \frac{2}{5} (L_{i+5} - L_i)$     |   |   |   |   |   |                                                                                     |
| $S_{\lambda_i} =  \lambda_i - \bar{\lambda} $ |   |   |   |   |   | $\bar{S}_{\bar{\lambda}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_{\lambda_i}$ $= \text{ (mm)}$ |

$$U_{A\lambda} = \bar{S} = U_{B\lambda} = \Delta_{\text{仪器}} = 0.01(\text{mm})$$

$$\lambda \text{ 的合成不确定度: } U_{\bar{\lambda}} = \sqrt{U_{A\lambda}^2 + U_{B\lambda}^2} =$$

$$\lambda \text{ 的相对不确定度 } U_{r\lambda} = \frac{U_{\bar{\lambda}}}{\bar{\lambda}} \times 100\% =$$

表 3. 驻波法测定声速  $\bar{f}$  的逐项逐差法处理

|                             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |                                                                    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------------------------------------------------------------------|
| 序号 $i$                      | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $f_4$ | $f_5$ | $f_6$ | $f_7$ | $f_8$ | $f_9$ | $f_{10}$ | $\bar{f}$ (kHz)                                                    |
| $f_i$                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |                                                                    |
| $S_{f_i} =  f_{i+1} - f_i $ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          | $\bar{S}_{\bar{f}} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9  f_{i+1} - f_i $ $=$ |

(注：由于频率漂移的方向通常是单向的，故采用逐项逐差的方法处理)

$$U_{Af} = \overline{S_{\bar{f}}} = \quad U_{Bf} = \Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ (kHz)}$$

$$f \text{ 的合成不确定度 } U_{\bar{f}} = \sqrt{U_{Af}^2 + U_{Bf}^2} =$$

$$f \text{ 的相对不确定度 } U_{rf} = \frac{U_{\bar{f}}}{\bar{f}} \times 100\% =$$

$$\text{计算实验声速: } \bar{\nu} = \bar{\lambda} \cdot \bar{f} =$$

$$\nu \text{ 的合成不确定度: } U_{\bar{\nu}} = \bar{\nu} \sqrt{\left(\frac{U_{\bar{f}}}{\bar{f}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\bar{\lambda}}}{\bar{\lambda}}\right)^2} =$$

$$\nu \text{ 的相对不确定度: } U_{r\nu} = \frac{U_{\bar{\nu}}}{\bar{\nu}} \times 100\% =$$

$$\nu \text{ 的测量结果表达式: } \nu = \bar{\nu} \pm U_{\bar{\nu}} =$$

## 2、相位法

数据表格、处理过程同驻波法(请再写预习报告时一并画好相位法的数据表格)。

### [注意事项]

1. 使用时，应避免声速测试仪信号源的功率输出端短路。
2. 严禁将液体（水）滴到数显尺杆和数显表头内，如果不慎将液体（水）滴到数显尺杆和数显表头上，请用 60℃ 以下的温度将其烘干，即可使用。
3. S1、S2 两端面应平行；信号源电源打开后 S1 与 S2 不准接触。
4. 示波器电源打开后可连续使用，不要时开时关，以免高压对仪器造成损害，暂时不用时可将其辉度调暗。辉度过大时对荧光屏寿命有影响。
5. 示波器图形不稳定（图形左右移动、滚动、模糊），调节电平旋钮使之稳定。
6. x、y 增幅暂为零时，屏中亮点直径 1mm；聚焦应调至图线为亮细线。
7. 若图形的终点与起点间出现一条较暗的图线，说明辉度过大，应调小至回扫线消失。
8. 注意换能器系统的谐振频率的调节，先粗调后细调，调好后不可再改变，否则就必须重复调整步骤测量数据；在实验过程中，信号源输出频率有少量漂移，是正常现象，用逐差法处理数据即可。

### [思考题]

1. 声速测量中共振干涉法、相位法那种测量方法的精度更高些，为什么？
2. 声音在气体介质和液体介质中传播有何区别？声速为什么会不同？
3. 用逐差法处理数据的优点是什么？

4. 将采用相位法测量声速的测量结果与由公式  $\nu = \sqrt{\frac{RT\gamma}{\mu}}$  计算出的结果进行比较，说明为什么两个数据会有差异。

## 5、 光强分布的测量

### 【实验目的】

1. 掌握在光学平台上组装、调整光的实验光路；
2. 观察夫琅禾费衍射现象，加深对衍射理论的理解；
3. 学习利用光电元件测量相对光强的实验方法，掌握干涉衍射分布规律，并测出单缝宽度；
4. 验证马吕斯定律。

### 【仪器用具】

导轨、半导体激光器、二维调节架、分划板、小孔狭缝板、准直扩束镜、起偏检偏装置、光电探头、一维光强移动测量器、数字式光电检流计、可调狭缝、小孔屏。

### 【实验原理】

光的衍射现象是光的波动性的重要表现。根据光源及观察衍射图像的屏幕（衍射屏）到产生衍射的障碍物的距离不同，分为菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射两种，前者是光源和衍射屏到障碍物的距离为有限远时的衍射，即所谓近场衍射；后者则为无限远时的衍射，即所谓远场衍射。要实现夫琅禾费衍射，必须保证光源至障碍物的距离和障碍物到衍射屏的距离均为无限远（或相当于无限远），即要求照射到障碍物上的入射光、衍射光都为平行光，屏应放到相当远处，在实验中利用两个透镜  $L_1$  和  $L_2$  即可达到此要求。实验光路如图 5-1 所示。

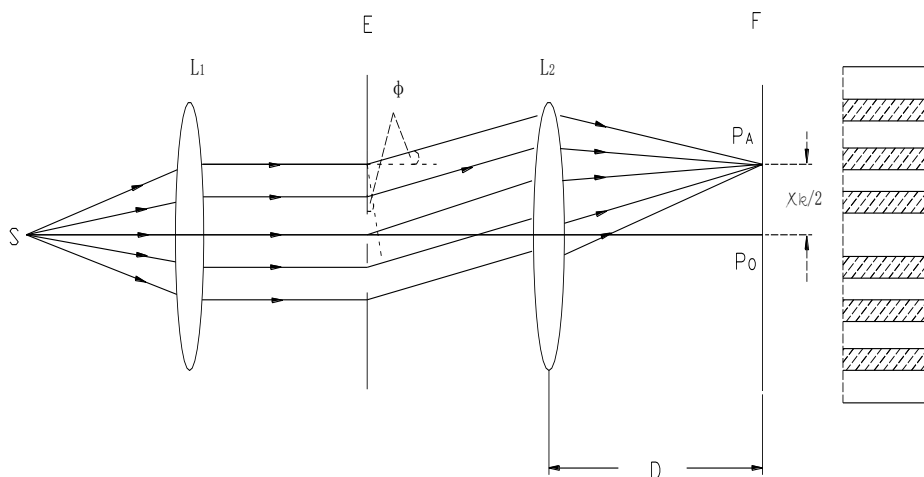


图 5-1 夫琅禾费单缝衍射光路图

与狭缝  $E$  垂直的衍射光束会聚于屏上  $P_0$  处，是中央明纹的中心，光强最大，设为  $I_0$ 。

与光轴方向成  $\phi$  角的衍射光束会聚于屏上  $P_A$  处， $P_A$  的光强由计算可得公式：

$$I_A = I_0 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \quad (\beta = \frac{\pi a \sin \phi}{\lambda}) \quad (5-1)$$

式中， $a$  为狭缝的宽度， $\lambda$  为单色光的波长， $\phi$  为衍射角。当  $\beta = 0$ （即  $\phi = 0$ ）时，光强最大，称为主极大，主极大的强度决定于光强的强度和缝的宽度。

当  $\beta = k\pi$ ，即  $\sin \phi = K \frac{\lambda}{a}$  ( $K = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) 时，出现暗条纹，与此衍射角  $\phi$  对应的位置为暗条纹中心， $K$  为暗条纹的级次。

除了主极大之外，两相邻暗纹之间都有一个次极大，由计算可得出出现这些次极大的位置在  $\beta = \pm 1.43\pi$ ， $\pm 2.46\pi$ ， $\pm 3.47\pi$ ， $\dots$ ，这些次极大的相对光强  $I/I_0$  依次为 0.047，0.017，0.008， $\dots$  夫琅禾费衍射的光强分布如图 5-2 所示

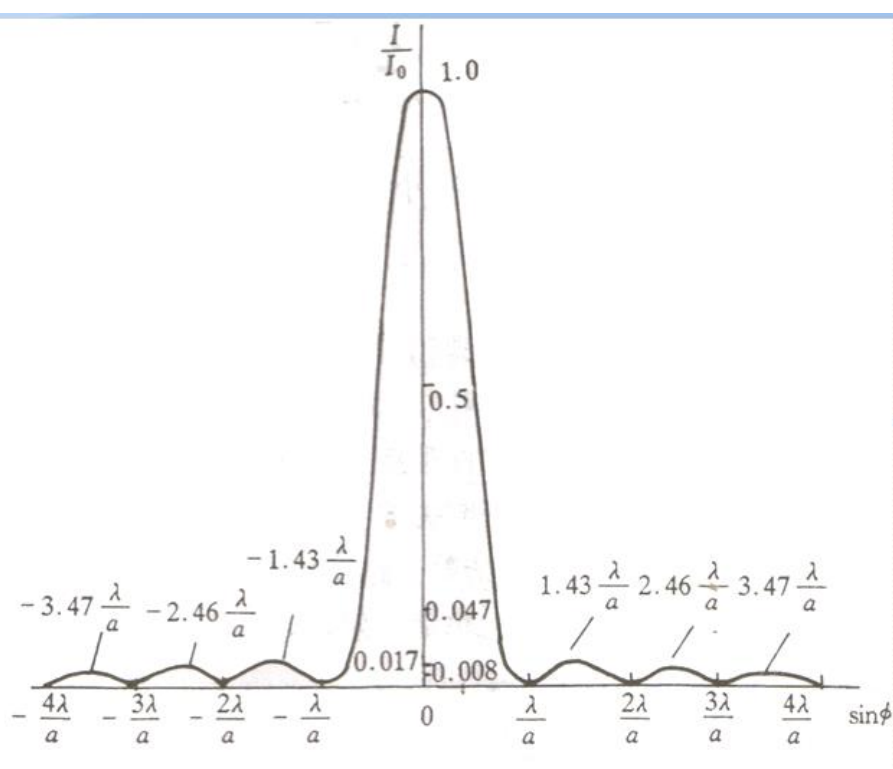


图 5-2 夫琅禾费衍射的光强分布

本实验只研究夫琅禾费衍射。理想的夫琅禾费衍射，其入射光束和衍射光束均是平行光。用半导体激光器作光源，激光束的方向性好，能量集中，且缝的宽度  $a$  一般很小，这样就可以不用透镜  $L_1$ ，若观察屏（接受器）距离狭缝也较远（即  $D$  远大于  $a$ ）则透镜  $L_2$  也可以不用，这样夫琅禾费单缝衍射装置就简化为图 5-3，

这时， $\sin \phi \approx \tan \phi = x / D$

由上二式可得公式：

$$a = K\lambda D / x \quad (5-2)$$

$x$  为暗条纹中心的位置坐标。

### 【实验装置】

激光器座、半导体激光器、导轨、二维调节架、一维光强测试装

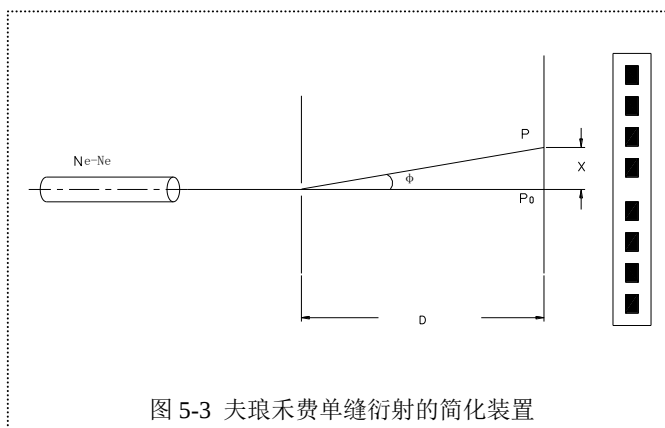


图 5-3 夫琅禾费单缝衍射的简化装置

置、分划板、可调狭缝、平行光管、起偏检偏装置、光电探头、小孔屏、数字式检流计、专用测量线等。按测量一维光强分布和测量偏振光光强分布两种方式可构成两种装置，分别见图 5-4 和图 5-5。

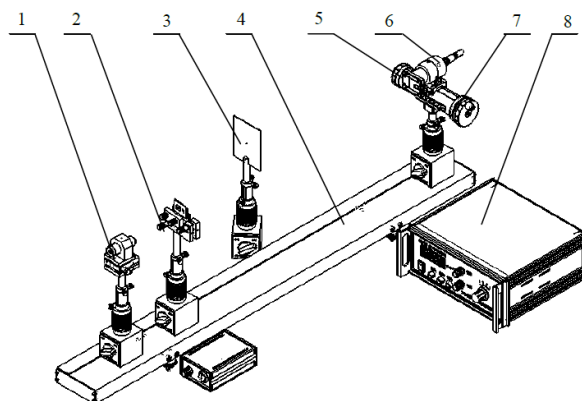


图 5-4 干涉、衍射等一维光强分布的测试

- 1、激光器；3、单缝或双缝等及二维调节架；3、小孔屏；4、导轨；5、可调狭缝； 6、光电探头  
7、一维光强测量装置；8、数字式检流计

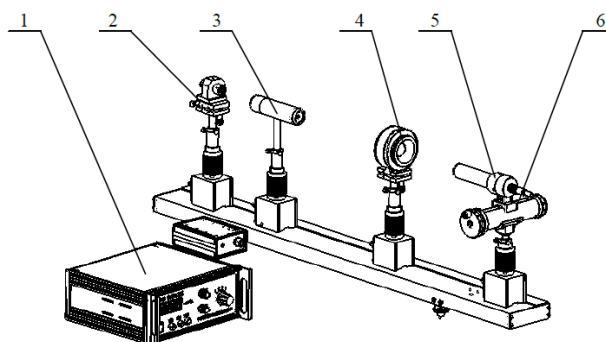


图 5-5 测量偏振光光强

- 1、 数字式检流计；2、激光器；3、扩束平行光管；4、起偏检偏装置；  
5、光电探头；6 、一维光强测量装置

数字式检流计用于微电流的测量，其正面如图 5-6 所示



图 5-6 数字式检流计

数字式检流计使用方法：

1. 接上电源，开机预热 15 分钟；
2. 量程选择开关置于“1”档，衰减旋钮置于校准位置（即顺时针转到头，置于灵敏度最高位置），调节调零旋钮，使数据显示为 000；
3. 选择适当量程，接上测量线，即可测量微电流；
4. 如果被测信号大于该档量程，仪器会有超量程指示，即数码管显示“1”或“E”，其他三位均显示“9”或没有显示，此时可调高一档量程；
5. 小数点不在第一位时，一般应将量程减小一档，以充分利用仪器的分辨率；
6. 衰减旋钮用于测量相对值，只有在旋钮置于校准位置（顺时针到底）时，数显窗才指示标准电流值；
7. 测量过程中，需要将某数值保留下来时，可开保持开关（指示灯亮），此时，无论被测信号如何变化，显示数值保持不变。

### 【实验内容及步骤】

#### （一）衍射一维光强分布的测试

- 1、按图 5-4 搭好实验装置。打开激光器，用小孔屏调整光路，使出射的激光束与导轨平行；
- 2、打开检流计电源，预热及调零，并将测量线连接其输入孔与光电探头；
- 3、调节二维调节架，选择所需要的单缝，对准激光束中心，使之在小孔屏上形成良好的衍射光斑；
- 4、移去小孔屏，调整一维光强测量装置，使光电探头中心与激光束高低一致，移动方向与激光束垂直，起始位置适当；为了实现光强分布的逐点测量，在光电电池表面处装一可调狭缝，用以控制光电电池的受光面积。
- 5、开始测量。转动手轮，使光电探头沿衍射图样展开方向（x 轴）单向平移，以等间隔的

- 位移对衍射图样的光强进行逐点测量，记录位置坐标  $x$  和对应的检流计（置适当量程）所指示的光电流值读数  $i$ ，要特别注意衍射光强的极大值和极小值所对应的坐标的测量；
- 6、绘制衍射光的相对强度  $I/I_0$  与位置坐标  $x$  的关系曲线。由于光的强度与检流计所指示的电流读数成正比，因此可用检流计的光电流的相对强度  $i/i_0$  代替衍射光的相对强度  $I/I_0$ ， $i_0$  为最大光电流。（由于激光衍射所产生的散斑效应，光电流值显示将在时示值的约 10% 范围内上下波动，属正常现象，实验中可根据判断选一中间值，由于一般相邻两个测量点（如间隔为 0.5mm 时）的光电流值相差一个数量级，故该波动一般不影响测量）
- 7、在坐标纸上以横轴为测量装置的移动距离，纵轴为光电流相对强度（ $i/i_0$ ），将记录下来的数据绘制出来，就是单缝衍射光强分布图。

## （二）测量单缝的宽度

- 1、测量单缝到光电池的距离  $D$ （根据导轨标尺刻度读数测取相应移动座间的距离即可）；
- 2、再从前一步骤中所得的分布曲线可得各级衍射暗条纹中心到明条纹中心的距离  $x$ ，代入公式（5-2）计算出单缝宽度，用不同级次的结果计算平均值。

## （三）观察偏振光现象

- 1、按图 5-5 搭好实验装置；
- 2、同（一），打开激光电源，调好光路，使在平行光管后的小孔屏上可见一较均匀圆光斑；
- 3、同（一），打开检流计，预热及调零；
- 4、旋去光电探头前的可调狭缝，把探头旋接在起检偏装置上，然后连好测量线；
- 5、将起偏检偏器置于平行光管后并紧帖平行光管，使光斑完全入射起检偏器；
- 6、转动刻度手轮（连起偏器），在检流计上观察光强变化，以验证马吕斯定律。
- 7、置起偏器读数鼓轮于“0”位置，开始测量。转动分度盘（连检偏器） $2^\circ$  或  $4^\circ$ ，从检流计（置适当量程）上读取一个数值，逐点记录下来，测量一周；
- 8、用方格纸或坐标纸将记录下来的数值描述出来就是偏振光实验的光强变化图；
- 9、在转动刻度盘（连起偏器）一周的过程中，可找到两个位置，在检流计上的读数为 0 时，出射光强为零，此现象为消光现象，但因为杂散光或偏振片不完全理想等因素，无法得到完全的消光效果，所以一般情况下，可在检流计上读出接近于零的最小读数。正常时，起、检偏器的夹角为  $90^\circ$  或  $270^\circ$ 。

## （四）验证马吕斯定律

观察偏振光通过检偏器后光强的变化，通过检偏器后的光强  $I_0$  为：

$$I_0 = I \cos^2 \theta \quad (\text{马吕斯定律})$$

其中  $\theta$  为偏振光偏振面与检偏器主截面的夹角，改变  $\theta$  角可以改变透过检偏器的光强。 $I$  为两偏振片主截面平行（ $\theta = 0$ ）时的透射光强。使起偏和检偏器正交，记录光电检流计的示值  $I_0$ ，然后将检偏器间隔  $10^\circ \sim 20^\circ$  转动一次并纪录一次，直至转动  $90^\circ$  为止。

### 【数据记录及数据处理】

1. 测量光电流。为消除空程误差，应转动手轮使光电探头单方向移动，即沿衍射图像的展开方向（ $x$  轴方向），从左向右或从右向左，每次移动  $1.000\text{mm}$ ，单向、逐点记下衍射图像的位置坐标  $x$  和相应的光电流  $i$ ，并记录最大光电流  $i_0$ ；

$\lambda = 650\text{nm}$ ； $D = \underline{\hspace{2cm}}\text{mm}$ ；狭缝宽度  $a_0 = 0.100\text{mm}$ ；最大光电流  $i_0 = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-6}\text{A}$

|                                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $x \text{ (mm)}$                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i \text{ (} \times 10^{-6}\text{A)}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i/i_0 (I/I_0)$                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $x \text{ (mm)}$                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i \text{ (} \times 10^{-6}\text{A)}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i/i_0 (I/I_0)$                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $x \text{ (mm)}$                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i \text{ (} \times 10^{-6}\text{A)}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i/i_0 (I/I_0)$                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $x \text{ (mm)}$                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i \text{ (} \times 10^{-6}\text{A)}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i/i_0 (I/I_0)$                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

2. 选取最大光电流处为  $x$  轴坐标原点，把测得的数据作处理。即把在不同位置上测得的光电流读数  $i$  除以最大光电流  $i_0$ ，然后在坐标纸上绘出  $i/i_0 \sim x$  曲线，即为  $I/I_0 \sim x$  衍射相对光强分布曲线。

3. 计算单缝的宽度。从  $I/I_0 \sim x$  分布曲线测出各级暗条纹中心的坐标  $x$ ，利用公式  $a = K\lambda D/x$  计算单缝的宽度  $a$ ，取平均值为测量值  $\bar{a}$ 。

| 级次        | 第一级 | 第二级 | 第三级 | 平均值 $\bar{a}$ |
|-----------|-----|-----|-----|---------------|
| K         | 1   | 2   | 3   |               |
| 位置坐标 $x$  |     |     |     |               |
| 单缝的宽度 $a$ |     |     |     |               |

$$\text{计算相对不确定度: } U_{ar} = \frac{|a_0 - \bar{a}|}{a_0} \times 100\%$$

#### 4. 偏振光强记录。

$$i_0 =$$

|                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $\theta$ (度)    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i$             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $i/i_0 (I/I_0)$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\cos^2 \theta$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

作  $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$  图，若为直线则验证了马吕斯定律。

#### 【注意事项】

1. 实验过程中注意激光光线的方向。激光亮度极高，任何时间、任何情况下禁止眼睛直视激光发射口！若用眼睛直接观看，可能会烧坏视网膜。

#### 【思考题】

1. 在单缝夫琅禾费衍射实验中，缝宽的变化对衍射图样的光强和条纹宽度有什么影响？
2. 将实验测的缝宽与给出的理论值作比较，并分析产生误差的原因？
3. 激光器输出的光强如有变动，对单缝衍射图样有无影响？

## 6、光电效应实验

### [实验目的]

1. 了解光电效应的规律，加深对光的量子性的理解；
2. 测量普朗克常数。
3. 测绘光电管的伏安特性曲线；

### [仪器用具]

ZKY-GD-3 光电效应实验仪。

### [实验原理]

在近代物理学中，光电效应在证实光的量子性方面有着重要的地位。1905 年爱因斯坦在普朗克量子假说的基础上提出光量子假说，圆满地解释了光电效应，约十年后密立根以精确的实验证实了爱因斯坦的光电效应方程，并测定了普朗克常数。光电效应对于认识光的本质及早期量子理论的发展，具有里程碑式的意义。而今光电效应已经广泛地应用于科技领域。利用光电效应制成的光电器件如光电管、光电池、光电倍增管等已成为生产和科研中不可缺少的器件。

光电效应是指一定频率的光照射在金属表面时会有电子从金属表面逸出的现象。实验原理如图 1 所示。入射光照射到光电管阴极 K 上，逸出的电子称为光电子，产生的光电子在电场的作用下向阳极 A 迁移，并且在回路中形成光电流。

光电效应的基本实验事实如下：

(1) 光强一定时，随着光电管两端电压的增大，光电流趋于一个饱和值  $I_M$ ，对不同的光强，饱和电流  $I_M$  与入射光的强度  $P$  成正比。

(2) 随着光电管两端电压减小时，光电流也减小，但当电势差减小至零甚至变为反向电压时，光电流还不为零，直至反向电压达到  $U_0$  时，光电流为零。 $U_0$  称为截止电压。

(3) 对于不同频率的光，其截止电压的值不同。

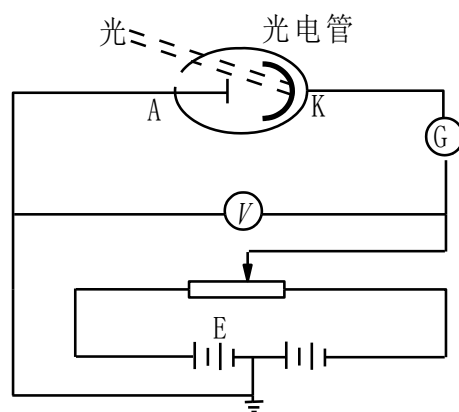
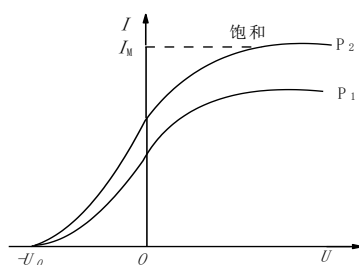


图 1 光电效应原理图



入射光强  $P_1 < P_2$

图 2 光电管的伏安特性曲线

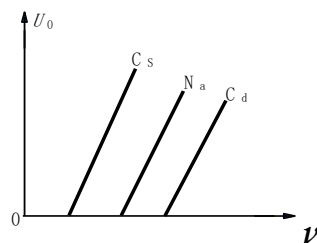


图 3. 截止电压  $U_0$  与入射光频率  $\nu$  的关系

(4) 截止电压  $U_0$  与频率  $\nu$  的关系图如图 3 所示。

$U_0$  与  $\nu$  成正比关系。当入射光频率低于某极限值  $\nu_0$  ( $\nu_0$  随不同金属而异) 时, 不论光的强度如何, 照射时间多长, 都没有光电流产生。

(5) 光电效应是瞬时效应。即使入射光的强度非常微弱, 只要频率大于  $\nu_0$ , 在开始照射后立即有光电子产生, 所经过的时间至多为  $10^{-9}$  秒的数量级。

按照爱因斯坦的光量子理论, 光能并不像电磁波理论所想象的那样, 分布在波阵面上, 而是集中在被称之为光子的微粒上, 但这种微粒仍然保持着频率(或波长)的概念, 频率为  $\nu$  的光子具有能量  $E=h\nu$ ,  $h$  为普朗克常数。当光子照射到金属表面上时, 一次为金属中的电子全部吸收, 而无需积累能量的时间。电子把这能量的一部分用于克服金属表面对它的吸引力, 余下的就变为电子离开金属表面后的动能, 按照能量守恒原理, 爱因斯坦提出了著名的光电效应方程:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + W \quad (1)$$

式中,  $W$  为金属的逸出功,  $\frac{1}{2}mv_0^2$  为光电子获得的初始动能。

由该式可见, 入射到金属表面的光频率越高, 逸出的电子动能越大, 所以即使阳极电位比阴极电位低时也会有电子落入阳极形成光电流, 直至阳极电位低于截止电压, 光电流才为零, 此时有关系:

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (2)$$

阳极电位高于截止电压后, 随着阳极电位的升高, 阳极对阴极发射的电子的收集作用越强, 光电流随之上升; 当阳极电压高到一定程度, 已把阴极发射的光电子几乎全收集到阳极, 再增加  $U_{ak}$  时,  $I$  不再变化, 光电流出现饱和, 饱和光电流  $I_m$  的大小与入射光的强度  $P$  成正比。

光子的能量  $h\nu$ 。当  $h\nu < W$  时, 电子不能脱离金属, 因而没有光电流产生。产生光电效应的最低频率(截止频率)是  $\nu_0 = W/h$ 。

爱因斯坦的光量子理论成功地解释了光电效应规律。

将(2)式代入(1)式可得:

$$eU_0 = h\nu - W \quad (3)$$

$$U_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0) \quad (4)$$

此式表明截止电压  $U_0$  是频率  $\nu$  的线性函数, 直线斜率  $k=h/e$ , 只要用实验方法测出不同频率对应的截止电压, 求出直线斜率, 就可算出普朗克常数  $h$ 。

在测量各谱线的截止电压时, 可用“零电流法”或“补偿法”, 我们采用较简单的“零电流法”, (“补偿法”在附录中介绍)。

零电流法是直接将各谱线照射下测得的电流为零时对应的电压  $U$  的绝对值作为截止电

压  $U_0$ 。此法的前提是阳极反向电流、暗电流和本底电流都很小，用零电流法测得的截止电压与真实值相差很小。且各谱线的截止电压都相差  $\Delta U$ ，对  $U_0 - \nu$  曲线的斜率无大的影响，因此对  $h$  的测量不会产生大的影响。

[实验仪器]

光电效应实验仪由汞灯、滤光片、光阑、光电管和测试仪组成。如图 4 所示。

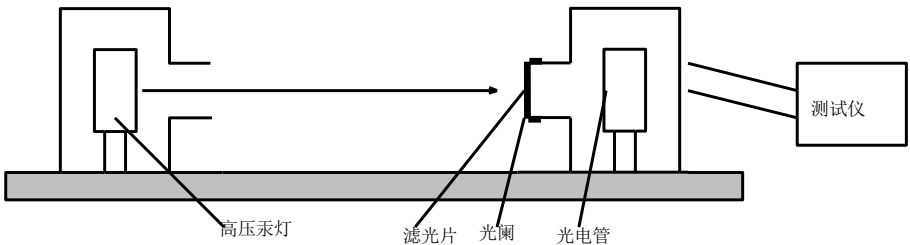


图 4. 实验装置图

1. 光电管：光谱响应范围 3400~7000nm，暗电流  $I \leq 2 \times 10^{-12} \text{A}$ 。

为了避免杂散光和外界电磁场对微弱光电流的干扰，光电管安装在铝质暗盒中，暗盒窗口可以安放光阑和滤色片。

2. 高压汞灯。在高压汞灯发光的光谱范围内较强的谱线有 365nm、404.7nm、435.8nm、491.1nm、546.1nm、577nm。

3. 滤光片：滤光片能使光源中某种谱线通过。实验用的带通型滤光片可获得所需的单色光。本实验配有五种滤光片。通过的谱线波长分别为 365.0nm、404.7nm、435.8nm、546.1nm、577nm。

4. 光阑。实验仪中有 3 种光阑可供选择，孔径分别为 2mm、4mm、8mm

5. 测试仪分为光电管工作电源和微电流放大器两部分。光电管工作电源为光电管提供两极上的电压  $U$ ， $U$  由测试仪面板上的“电压”选择按键和“电压调节”旋钮控制，并由三位半数字表显示。 $U$  有两档：-2V~+2V，-2V~30V。

微电流放大器用于测量光电流  $I$ 。利用“电流量程选择”开关可实现 10<sup>-8</sup>~10<sup>-13</sup>A 六档的电流值测定，并由三位半数字表显示，测试仪面板如图 5 所示。

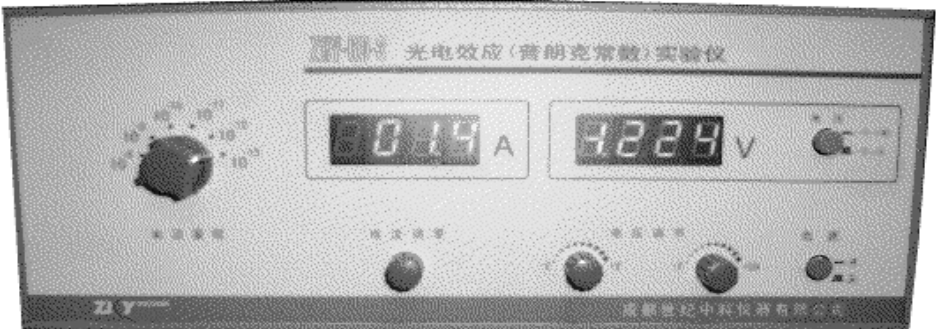


图 5. 光电效应实验仪面板图

## [实验内容及步骤]

### (1) 测试前准备

- 将测试仪及汞灯电源接通，预热 20 分钟。
- 把汞灯及光电管暗箱遮光盖盖上，将汞灯暗箱光输出口对准光电管暗箱光输入口，调整光电管与汞灯距离为约 40cm 并保持不变。

### (2) 测普朗克常数 $h$

- 将电压选择按键置于  $-2V \sim +2V$  档，“电流量程”选择开关置于  $10^{-13}A$  档。
- 调零：旋转调零旋钮，使电流指示为 00.0。
- 取下光电管的暗盒遮光盖，将直径 4mm 的光阑及 365.0nm 的滤色片装在光电管暗箱光输入口上。然后取下汞灯遮光盖。
- 从低到高调节电压，当电流为零时，记录该电压的值，即为该波长对应的  $U_0$ ，并将数据记于表一中。
- 依次换上 405 nm, 436 nm, 546 nm 的滤色片，重复以上测量步骤。

表一  $U_0 \sim \nu$  关系

光阑孔  $\Phi =$  mm

| 波长 $\lambda_i$ (nm)                                 | $\lambda_1 = 365$ | $\lambda_2 = 405$                                   | $\lambda_3 = 436$ | $\lambda_4 = 546$ |
|-----------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 频率 ( $\times 10^{14}$ Hz)                           | $\nu_1 = 8.22$    | $\nu_2 = 7.41$                                      | $\nu_3 = 6.88$    | $\nu_4 = 5.49$    |
| 截止电压 $U_{0i}$ (V)                                   | $U_{01} =$        | $U_{02} =$                                          | $U_{03} =$        | $U_{04} =$        |
| $K_1 = \frac{ U_{02}  -  U_{01} }{\nu_2 - \nu_1} =$ |                   | $K_2 = \frac{ U_{03}  -  U_{02} }{\nu_3 - \nu_2} =$ |                   |                   |
| $K_3 = \frac{ U_{04}  -  U_{03} }{\nu_4 - \nu_3} =$ |                   | 平均值<br>$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3} =$      |                   |                   |

- 普朗克常数  $\bar{h} = e\bar{K} =$

$$\text{误差: } \delta_h = \left| \bar{h} - h_{\text{理论}} \right| =$$

$$\text{相对误差 } E_h = \frac{\delta_h}{h_{\text{理论}}} \times 100\% =$$

- 用表一数据在坐标纸上作出  $U_0 - \nu$  直线，由图求出直线斜率  $k$ 。再由  $h = ek$  求出普朗克常数，并与  $h$  的公认值  $h_{\text{理论}}$  比较求出相对误差  $E = \frac{|h - h_{\text{理论}}|}{h_{\text{理论}}}$ ,

式中  $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ ,  $h_{\text{理论}} = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot S$ 。

### (3) 测光电管的伏安特性曲线:

- 将电压选择按键置于  $-2V \sim +30V$  档; “电流量程”选择开关置于  $10^{-11}A$  档, 调零后重新接上, 将直径 2mm 的光阑及 577nm 的滤色片装在光电管暗箱光输入口上。

从低到高调节电压，记录表二中各电压对应的光电流值。（若  $I$  值出现较大波动，则用  $\times 10^{-10}$  档）。作出伏安特性曲线。

表二  $I$ - $U$  关系

$L =$  mm

$\Phi =$  mm

|           |                            |   |      |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
|-----------|----------------------------|---|------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| 577nm     | U(V)                       |   | -0.2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 光阑<br>2mm | $I (\times 10^{-11})$<br>A | 0 |      |   |   |   |   |   |    |    |    |    |

(4) 光电管饱和光电流与入射光强的关系

在  $U$  为 30 伏时，将“电流量程”开关置于  $10^{-10}$ A 档，调零。在同一谱线、同一入射距离下，记录光阑分别为 2mm, 4mm, 8mm 时对应的电流值于表三中。

表三  $I_m$ - $\Phi$  关系曲线

$U =$  V

$L =$  mm

|        |                         |     |     |     |
|--------|-------------------------|-----|-----|-----|
| 436 nm | 光阑孔 $\Phi$              | 2mm | 4mm | 8mm |
|        | $I (\times 10^{-10})$ A |     |     |     |
| 546 nm | $I (\times 10^{-10})$ A |     |     |     |

由于照到光电管上的光强与光阑面积成正比，对应于较大的光阑，照射到光电管上的光强较强。

也可以在  $U$  为 30V 时将“电流量程”开关置于  $10^{-10}$ A 档并调零，测量并记录在同一谱线，同一光阑下，光电管与入射光不同距离 如： 300mm, 400mm 等对应的电流值于表中。由于照到光电管上的光强与距离成反比，对应于较大的距离，照射到光电管上的光强较弱。

表四  $I_m$ - $L$  关系曲线

$U_{AK} =$  V  $\Phi =$  mm

|         |                         |  |  |  |
|---------|-------------------------|--|--|--|
| 435.1nm | 入射距离 $L$                |  |  |  |
|         | $I (\times 10^{-10})$ A |  |  |  |
| 546.1nm | 入射距离 $L$                |  |  |  |
|         | $I (\times 10^{-10})$ A |  |  |  |

由以上实验得结论： \_\_\_\_\_

#### [注意事项]

1. 滤色片使用前需检查是否干净，以保证良好透光。更换滤色片时注意避免污染和平整放入套架，以免不必要的折光带来实验误差。
2. 更换滤色片时先将光源出光孔遮盖住，实验完毕后用遮光罩盖住光电管暗盒进光窗，以避免强光直接照射阴极而缩短光电管寿命。
3. 实验时，光电管入射窗口请勿面对其它强光源(如窗户等)以减少杂散光干扰。仪器

不宜在强磁场、强电场、强振动、高湿度、带辐射物质的环境下工作。

4. 测量放大器必须充分预热测量方能准确。光电效应的测量过程中，常常存在暗电流和本底电流。在完全没有光照射光电管的情形下，由于阴极本身的热电子发射等原因所产生的电流称为暗电流。本底电流则是由于外界各种漫反射光入射到光电管上所致。这两种电流属于实验中的系统误差。我们的实验过程中忽略了这一系统误差。精确实验时须将它们测出，并在作图时消去其影响。

#### [思考题]

1. 当加在光电管两端的电压为零时，光电流不为零，这是为什么？
2. 光电管一般都用逸出功小的金属做阴极，用逸出功的金属做阳极，为什么？
3. 实验能否将滤色片放在光源的出孔上？为什么？

## 7、等厚干涉实验

### [实验目的]

1. 观察等厚干涉现象及其特点。
2. 用牛顿环测平凸透镜的曲率半径。
3. 学会使用读数显微镜。

### [仪器用具]

读数显微镜、牛顿环、钠光灯

### [实验原理]

牛顿环属于分振幅等厚干涉现象。干涉现象在科学研究和工业技术中有着广泛的应用，如测量光波波长、精确测量微小物体的长度、厚度和角度，检查光学元件、精密机械表面的光洁度、平整度，研究机械零件内应力分布以及测量半导体器件上镀膜厚度等。

在一块平玻璃片  $B$  上，放一曲率半径  $R$  很大的平凸透镜  $A$ ，在  $A$ 、 $B$  间形成一从中间向四周渐渐加厚的空气薄膜，以接触点  $O$  为中心的圆周上空气膜的厚度相等。当单色平行光束垂直地射向平凸透镜时，在空气膜的上下表面(平凸透镜的下表面和平面玻璃的上表面)所反射的两束光因存在一定的光程差而相互干涉。从透镜上侧俯视，干涉图样是以两玻璃接触点  $O$  为圆心的一系列明暗相间的同心圆环，称为牛顿环。它是等厚干涉图样，空气膜厚度相同的点都处于同一条纹上。

设第  $k$  级环的环半径为  $r_k$ ，该处空气膜厚度为  $e$ ，波长为  $\lambda$ ，显然有下列干涉条件成立：

$$2e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad \text{明环} \quad (1)$$

$$2e + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad \text{暗环} \quad (2)$$

式中的  $\lambda/2$  是由于从空气膜的下表面反射的反射光有半波损失。中心处  $e=0$ ，形成中央暗斑。从图 1(b) 中的三角形得

$$r_k^2 = R^2 - (R-e)^2 = 2Re - e^2$$

因  $R \gg e$ ，所以  $2Re \gg e^2$ ，可以把上式中  $e^2$  略去，于是

$$e = \frac{r_k^2}{2R} \quad (3)$$

上式说明  $e$  与  $r_k^2$  成正比，所以离开中心愈远光程差增加愈快，牛顿环也变得愈来愈密。

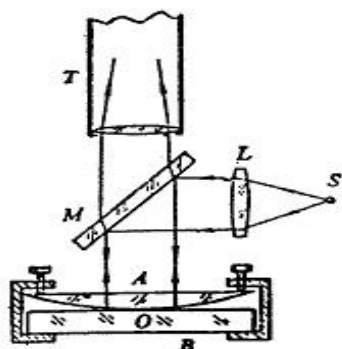
把(3)代入(2)，求得暗环半径为：

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \quad (4)$$

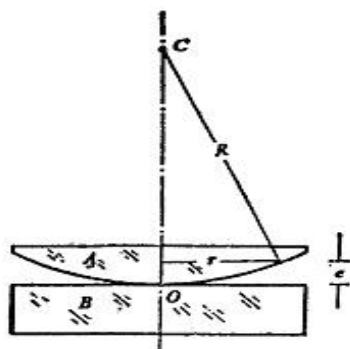
如果测量第  $k$  级暗环的半径，必须确定环心的位置，也就是牛顿环中央暗斑的中心位置，实验中这一位置不易确定，于是第  $k$  级暗环的半径不易测准，为此，把(4)变成牛顿环直径  $D_k$  表达式：

$$D_k = 2r_k = 2\sqrt{kR\lambda}$$

$$D_k^2 = 4r_k^2 = 4kR\lambda$$



(a) 观察牛顿环的仪器简图



(b) 牛顿环的半径的计算用图

图 1. 牛顿环实验装置图

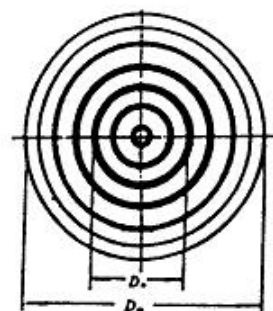


图 2. 牛顿环纹

对  $m$  级和  $n$  级暗环有

$$D_m^2 = 4mR\lambda \quad D_n^2 = 4nR\lambda$$

二式相减，得：

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m - n)\lambda} \quad (5)$$

由(5)式通过测量暗环直径计算出平凸透镜的曲率半径  $R$ ，可克服测量暗环半径环心不容易确定的困难。

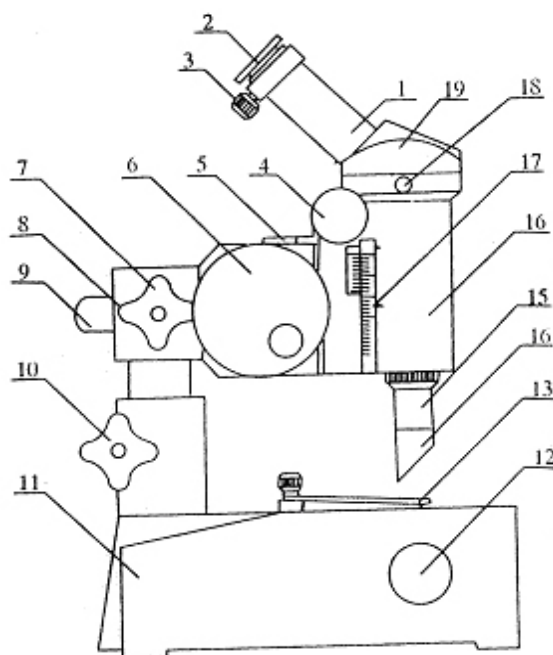
读数显微镜的结构和调整方法

读数显微镜是用于精确测量直线长度的光学仪器。一般的显微镜只有放大物体的作用，不能测量物体的大小。如果在显微镜上装上十字叉丝，并把镜筒固定在一个可以左右或上下移动的托板上，而托板移动的距离由螺旋测微器读出来，则这样改装的显微镜称为读数显微镜。

如图 3 所示，读数显微镜主要由显微镜和测微读数装置两部分组成。测量时，把被测物放在工作台上显微镜物镜(15)下方，用压片(13)压紧。调节目镜(2)，看清十字叉丝，松开目镜固紧螺钉(3)，转动目镜筒，把十字叉丝调正，再将此螺钉锁紧。用调焦手轮(4)使显微镜自下而上运动，直至看清被测物的放大像，并消除放大像和十字叉丝之间的视差(特别注意调焦方法：首先从显微镜外观察，通过调焦手轮向下移动镜筒到十分接近被测物，然后在显微镜中观察，通过调焦手轮使镜筒由下向上移动，就可找到聚焦点位置，使被测物最清晰)。如果此时被测物仍不清晰，则可松开底座手轮(10)，大距离地改变物镜到被测物的间距，然后固紧底座手轮，再用调焦手轮进行细调(注意：松开底座手轮时，必须用手托住显微镜筒，以免其坠落和受冲击)。显微镜前后位置的改变，须松开锁紧手轮(7)，就可前后移动镜筒。欲使显微镜筒左右移动读数，旋转测微鼓轮(6)便得以实现。显微镜的位置坐标读数方法是这样的：由正面的读数标志线所指的标尺(5)的刻度位置可读出 mm 以上的坐标数值，由右侧面读数标志线所指的测微鼓轮的数值可读出 mm 以下的数值(精确到百分之一毫米，估读到千分位)。

测量时，将十字叉丝的纵丝对准被测物的一端，即可在标尺和测微鼓轮上读出数  $A$ ，沿同方向转动测微鼓轮，使十字叉丝的纵丝对准被测物的终点，在标尺和测微鼓轮上读出数  $B$ ，则被测物的直线长度为： $|A - B|$ 。

读数显微镜的左右横向移动是靠螺母丝杆的推动，所以一般采用单向测量的方法，以避免空程误差。



- |         |           |         |           |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 1. 目镜接筒 | 2. 目镜     | 3. 锁紧螺钉 | 4. 调焦手轮   |
| 5. 标尺   | 6. 测微鼓轮   | 7. 锁紧手轮 | 8. 接头轴    |
| 9. 方轴   | 10. 底座手轮  | 11. 底座  | 12. 反光镜旋轮 |
| 13. 压片  | 14. 半反镜组成 | 15. 物镜组 | 16. 镜筒    |
| 17. 刻尺  | 18. 锁紧螺钉  | 19. 棱镜组 |           |

图3 读数显微镜的结构

## [实验内容和步骤]

### 1、测牛顿环平凸透镜的曲率半径

(1) 轻微调节牛顿环圆形框架上的三个螺丝，用肉眼观察，使牛顿环心在镜面中央，无畸变，且中心处暗斑较小。但应注意，调节时既要保持条纹的稳定，又不能将螺丝拧得过紧，以免透镜变形而损坏牛顿环装置。将牛顿环放在工作台上物镜下方。

(2) 照明：点亮钠光灯，待其正常发光后，调整钠光灯和显微镜位置，使灯的光(最亮部分)大体水平射向镜筒最下端的  $45^\circ$  反射玻璃片。调好后可在目镜中看到很亮的黄色视场。

(3) 调焦：先调节读数显微镜的目镜，使十字叉丝清晰，再旋转调焦手轮，使干涉圆环清晰，并消除视差。

(4) 对准：转动测微鼓轮，使显微镜位于水平标尺的中间位置。移动牛顿环装置，使牛顿环的环心尽量处于显微镜十字叉丝的中心。转动鼓轮，应看到叉丝中心沿直径方向移动(即十字叉丝的交点始终与各圆环相切)，否则，应转动目镜镜筒，端正十字叉丝方向。

(5) 测量：从中央暗斑开始，逆时针方向缓缓转动鼓轮，同时数环数(0, 1, 2……)，直到第 23 环为止。缓缓顺时针转动鼓轮使十字叉丝的纵丝对准暗环第 21 环环纹弧线中央，读数记录环直径右端坐标。接着测读 18、15、12、9、6 暗环，继续沿此方向转动，跨过中心后读出另一侧的 6、9、12、15、18、21 环处直径的左端坐标。

(6) 读完第一组数后，沿原方向转出两环(即 23 环)，再沿相反方向转至 21，以后重复步骤(5)作三次。将所测数据记入表格中。

## [注意事项]

1、在测量牛顿环直径的过程中，只能单向测量，绝对禁止中途逆向转动测微鼓轮，否

则应从头开始测量。

- 2、桌面要平稳，不能振动，读数显微镜调焦时必须自下而上进行调整。
- 3、取拿牛顿环装置时，切忌触摸光学表面。
- 4、实验完毕，应旋松牛顿环仪上的螺钉，以防透镜变形。

### [思考题]

1. 牛顿环干涉圆条纹的中心在什么情况下是暗的？什么情况下是亮的？
2. 牛顿环的中心是亮斑而非暗斑，对实验结果是否有影响？测直径时显微镜叉丝交点未过圆环纹中心，测量的是弦而非直径，对结果有无影响？为什么？
3. 怎样调节，才能在显微镜中看到清晰的牛顿环？
4. 实验中为什么要测量多组数据并进行分组处理？
5. 为什么在测量多个环直径端点时，鼓轮只能向一个方向旋转，中途不能反转？
6. 将牛顿环换成劈尖图象会怎样变化？
7. 此装置能用于检查光学面的平整度吗？
8. 正确使用显微镜有哪些步骤？

### [数据及处理]

已知钠灯光波波长

$$\lambda = 5893 \text{ \AA} = 5.893 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

数据表 1

级差  $m-n=$

仪器编号 No

| 环数 | 次数 | 环位置(mm) |   | 环直径<br>$d_i$ (mm) | $\bar{d}_i$ | $\Delta d_i$ | $\overline{\Delta d}$ | $R_i$ (m)                                                       |
|----|----|---------|---|-------------------|-------------|--------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
|    |    | 左       | 右 |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 21 | 1  |         |   |                   |             |              |                       | $R_1 = \frac{\bar{d}_{21}^2 - \bar{d}_{12}^2}{4(21-12)\lambda}$ |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 18 | 1  |         |   |                   |             |              |                       | $R_2 = \frac{\bar{d}_{18}^2 - \bar{d}_9^2}{4(18-9)\lambda}$     |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 15 | 1  |         |   |                   |             |              |                       | $R_3 = \frac{\bar{d}_{15}^2 - \bar{d}_6^2}{4(15-6)\lambda}$     |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 12 | 1  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 9  | 1  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
| 6  | 1  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 2  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |
|    | 3  |         |   |                   |             |              |                       |                                                                 |

长度单位：mm

直径平方单位：mm<sup>2</sup>

不计系统误差：
$$\bar{R} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 R_i$$

$$E_i = \frac{2(\bar{d}_{mi}\bar{\Delta d}_{mi} + \bar{d}_{ni}\bar{\Delta d}_{ni})}{\bar{d}_m^2 - \bar{d}_n^2} \quad (i=1,2,3)$$

$$\Delta R_i = R_i E_i \quad (i=1,2,3)$$

$$U_R = \overline{\Delta R} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta R_i$$

$$R = \bar{R} \pm U_R$$

## 8、温度传感器研究

### [实验目的]

1. 测定负温度系数热敏电阻的电阻—温度特性，并利用直线拟合的数据处理方法，求其材料常数。
2. 了解以热敏电阻为检测元件的温度传感器的电路结构及电路参数的选择原则。
3. 学习运用线性电路和运放电路理论分析温度传感器电压—温度特性的基本方法。

### [仪器与用具]

1. TS—B3 型温度传感综合技术实验仪；2. 磁力搅拌电热器；3. ZX21 型电阻箱；4. 数字万用表；5. 酒精温度计；6. 烧杯；7. 变压器油

### [实验原理]

具有负温度系数的热敏电阻广泛地应用于温度测量和温度控制技术中。这类热敏电阻大多数是由一些过渡金属氧化物（主要有 Mn、Co、Ni、Fe 等氧化物）在一定的烧结条件下形成的半导体金属氧化物作为基本材料制做而成，它们具有 P 型半导体的特性。对于一般半导体材料，电阻率随温度变化主要依赖于载流子浓度，而迁移率随温度的变化相对来说可以忽略。但对上述过渡金属氧化物则有所不同，在室温范围内基本上已全部电离，即载流子浓度基本与温度无关，此时主要考虑迁移率与温度的关系，随着温度升高，迁移率增加，所以这类金属氧化物半导体的电阻率下降，根据理论分析<sup>[1]</sup>，对于这类热敏电阻的电阻—温度特性的数学表达式通常可以表示为：

$$R_t = R_{25} \cdot \exp [B_n(1/T - 1/298)] \quad (1)$$

其中  $R_{25}$  和  $R_t$  分别表示环境温度为 25.0℃ 和  $t$ ℃ 时热敏电阻的阻值； $T = 273 + t$ ； $B_n$  为材料常数，其大小随制做热敏电阻时选用的材料和配方而异，对于某一确定的热敏电阻元件，它可由实验上测得的电阻—温度曲线的实验数据，用适当的数据处理方法求得。

下面对以这种热敏电阻作为检测元件的温度传感器的电路结构、工作原理、电压—温度特性的线性化、电路参数的选择和非线性误差等问题论述如下：

#### 一. 电路结构及工作原理

电路结构如图 1a 示，它是由含  $R_t$  的桥式电路及差分运算放大电路两个主要部分组成。当热敏电阻  $R_t$  所在环境温度变化时，差分放大器的输入信号及其输出电压  $V_o$  均要发生变化。传感器输出电压  $V_o$  随检测元件  $R_t$  环境温度变化的关系称温度传感器的电压—温度特性。为了定量分析这一特征，可利用电路理论中的戴维南定理把图 1a 示的电路等效变换成图 1b

示的电路，在图 1b 中：

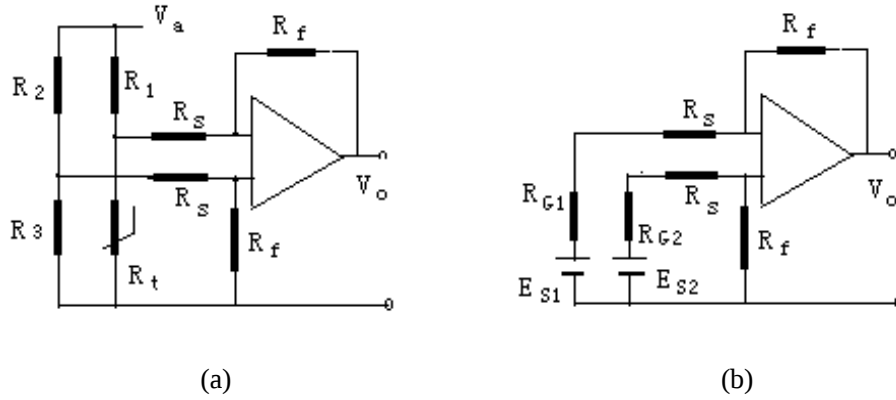


图 1 电路原理图及其等效电路

$$R_{G1} = \frac{R_1 \cdot R_t}{R_1 + R_t} \quad E_{S1} = \frac{R_t}{R_1 + R_t} V_a \quad (2)$$

它们均与温度有关；而

$$R_{G2} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad E_{S2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_a \quad (3)$$

与温度无关。根据电路理论中的叠加原理，差分运算放大器输出电压  $V_o$  可表示为：

$$V_o = V_{o-} + V_{o+} \quad (4)$$

其中  $V_{o-}$  和  $V_{o+}$  分别为图 1b 示电路中  $E_{S1}$  和  $E_{S2}$  单独作用时对输出电压的贡献。由运算放大器的理论知：

$$V_{o-} = -\frac{R_f}{R_s + R_{G1}} \cdot E_{S1}, \quad V_{o+} = \left[ \frac{R_f}{R_s + R_{G1}} + 1 \right] V_{i+} \quad (5)$$

此处的  $V_{i+}$  为  $E_{S2}$  单独作用时运放电路同相输入端时对地电压。由于运放电路输入阻抗很大，故：

$$V_{i+} = E_{S2} \times R_f / (R_s + R_{G2} + R_f) \quad (6)$$

把以上结果代入 (4) 式，并经适当整理得：

$$V_o = \frac{R_f}{R_{G1} + R_s} \left[ \frac{R_{G1} + R_s + R_f}{R_{G2} + R_s + R_f} E_{S2} - E_{S1} \right] \quad (7)$$

由于上式中  $R_{G1}$  和  $E_{S1}$  与温度有关，所以该式就是温度传感器的电压—温度特性的数学表达式，只要电路参数和热敏元件  $R_t$  的电阻—温度特性已知，(7) 式所表达的输出电压  $V_o$  与温度  $t$  的函数关系就完全确定。

## 二、电压—温度特性的线性化和电路参数的选择

一般情况下（7）式表达的函数关系是非线性的，但通过适当选择电路参数可以使得这一关系和一直线关系近似。这一近似引起的误差与传感器的测温范围有关。设传感器的测温范围为  $t_1 \sim t_3$ ℃，则  $t_2 = (t_1 + t_3)/2$  就是测温范围的中值温度。若对应  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  三个温度值传感器的输出电压分别为  $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$  和  $V_{o3}$ 。所谓传感器电压—温度特性的线性化就是适当选择电路参数使得这三个测量点在电压—温度坐标系中落在通过原点的直线上，即要求：

$$V_{o1} = 0, V_{o2} = V_{o3} / 2, V_{o3} = V_3 \quad (8)$$

在图 1a 所示的传感器电路中需要确定的参数有七个，即  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_f$  和  $R_s$  的阻值、电桥的电源电压  $V_a$  和传感器的最大输出电压  $V_3$ ，这些参数的选择和计算可按以下原则进行：

1. 当温度为  $t_1$ ℃ 值时，电路参数应使得  $V_o = V_{o1} = 0$ ，这时电桥应工作在平衡状态，差分运放电路参数应处于对称状态，即要求  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{t1}$ （热敏电阻在  $t_1$ ℃ 时的阻值）。

2. 为了尽量减小热敏电阻中流过的电流所引起的发热对测量结果带来的影响， $V_a$  的大小不应使  $R_t$  中流过的电流超过 1mA。

3. 传感器的最大输出电压  $V_3$  的值应与后面连接的显示仪表相匹配，若温度—电压变换电路的输出是与计算机数据采集系统联接， $V_3$  应根据以下关系确定： $V_3 = (t_3 - t_1) \times 50 \text{mV}/^\circ\text{C}$ 。所以若测温范围为 25.0~65.0℃ 时， $V_3 = 2000 \text{mV}$ 。

4. 最后两个电路参数  $R_s$  和  $R_f$  的值可按（8）式所表示的线性化条件的后两个关系式确定，即：

$$V_{o3} = V_3 = \frac{R_f}{R_{G13} + R_s} \left[ \frac{R_{G13} + R_s + R_f}{R_{G2} + R_s + R_f} E_{S2} - E_{S13} \right] \quad (9)$$

$$V_{o2} = \frac{V_3}{2} = \frac{R_f}{R_{G12} + R_s} \left[ \frac{R_{G12} + R_s + R_f}{R_{G2} + R_s + R_f} E_{S2} - E_{S12} \right] \quad (10)$$

其中  $R_{Gi}$ 、 $E_{Si}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 是热敏电阻  $R_t$  所处环境温度  $t_i$  时按（2）式计算得的  $R_{G1}$  和  $E_{S1}$  值。当电桥各桥臂阻值、电源电压  $V_a$  和热敏电阻的电阻—温度特性以及传感器最大输出电压  $V_3$  已知后，在（9）、（10）两式中除  $R_s$ 、 $R_f$  外其余各量均具有确定的数值，这样只要联立求解（9）、（10）两式就可求出  $R_s$  和  $R_f$  的值。然而（9）、（10）两式是以  $R_s$  和  $R_f$  为未知数的二元二次方程组。其解很难用解析的方法求出，必须采用数值计算技术。

### 三、确定 $R_s$ 和 $R_f$ 的数值计算技术

如前所述、方程（9）和（10）是以  $R_s$  和  $R_f$  的为未知数的二元二次方程组，每个方程式在（ $R_s$ 、 $R_f$ ）直角坐标系中对应着一条二次曲线，两条二次曲线交点的坐标值即为这个联立方程组的解（如图 2 所示）。这个解可以利用迭代法求得。由于在  $R_s = 0$  处与（10）式对

应的曲线对  $R_f$  轴的截距较 (9) 式对应的曲线的截距大 (由数值计算结果可以证明), 因此为了使迭代运算收敛, 首先令  $R_s = 0$  代入 (10) 式, 由 (10) 式求出一个  $R_f$  的值, 然后把这一  $R_f$  值代入 (9) 式, 并由 (9) 式求出一个新的  $R_s$  值, 再代入 (10) 式……, 如此反复迭代, 直到在一定的精度范围内可以认为相邻两次算出的  $R_s$  和  $R_f$  值相等为止。

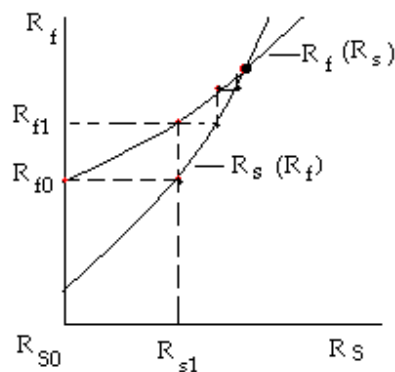


图2 确定  $R_s$  和  $R_f$  的数值计算技术

## [实验内容]

### 1. 热敏电阻元件电阻—温度特性的测定

该项测量是设计温度传感器的基础, 要求测量结果十分准确。测量时把热敏电阻固靠在酒精温度计的头部后, 把温度计及热敏元件放入盛有变压器油的烧杯内, 并用磁力搅拌电加热器加热变压器油。在  $25.0 \sim 65.0^\circ\text{C}$  的温度范围内, 从  $25.0^\circ\text{C}$  开始, 每隔  $5.0^\circ\text{C}$  用数字万用表的电阻档测量这些温度下热敏电阻的阻值, 直到  $65.0^\circ\text{C}$  止。为了使测量结果更为准确, 可在降温过程中测量, 该项测定完成后, 采用直线拟合方法处理实验数据, 求出 (1) 式所表示的热敏电阻电阻—温度特性中的材料常数  $B_n$  的实验值。

### 2. 选择和计算电路参数

首先根据实验测得的热敏电阻的电阻—温度特性和测温范围 ( $25.0 \sim 65.0^\circ\text{C}$ ), 按前面所述的原则确定  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $V_a$  和  $V_3$ , 然后把 (9)、(10) 两式写成以下标准形式:

$$AR_s^2 + BR_s + C = 0 \quad (A, B, C \text{ 中含 } R_f) \quad (9')$$

$$A'R_f^2 + B'R_f + C' = 0 \quad (A', B', C' \text{ 中含 } R_s) \quad (10')$$

并用迭代法计算电路参数  $R_s$  和  $R_f$ , 在此之后, 按 (7) 式计算以上测温范围情况下传感器的电压—温度特性的理论值。

### 3. 温度传感器的组装与调试

首先调节设置在 TS—B3 型温度传感综合技术实验仪前后面板上的多圈电阻器  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_s$  和  $R_f$  的值为计算结果值 (具体调节方法见 TS—B3 型温度传感综合技术实验仪使用

说明书), 然后调节传感器零点和校准量程, 具体操作如下:

**(1) 零点调节** 调节图 3 示电路中的  $W_1$  (对应的 TS—B3 型温度传感技术实验仪前面板上的“ $V_2$  调节”旋钮) 使传感器的输入桥式电路的电源电压  $V_a$  为设计时的选定值,

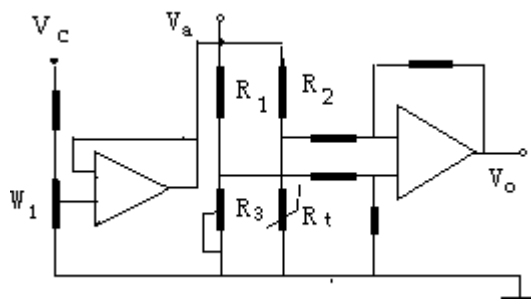


图 3 温度—电压变换电路原理图

然后用 ZX21 型电阻箱代替热敏元件  $R_t$  接入传感器电路, 并把电阻箱的阻值调至  $R_{t1}$  (即热敏元件在  $t_1^\circ\text{C}$  时的阻值), 用数字万用表 200mV 档观测传感器的输出电压  $V_o$  是否为零, 若不为零调节图 3 中的“ $R_3$  调节”, 使  $V_o$  值为零 (允许  $\pm 1\text{mV}$  的误差)。

**(2) 量程校准** 完成零点调节后, 把代替热敏电阻的电阻箱阻值调至  $R_{t3}$  (即热敏电阻在  $t_3^\circ\text{C}$  的阻值), 用数字万用表的电压档观测传感器输出电压  $V_o$  是否为设计时所要求的  $V_3$  值。如果不是, 再次调节“ $V_a$  调节”旋钮改变电桥电源电压  $V_a$ , 使  $V_o = V_3$ 。在完成以上调节工作后, 注意保持各电阻元件的阻值和“ $V_a$  调节”旋钮位置不变。

#### 4. 传感器电压—温度特性的测定

把测温范围分成 9 个等间隔的子温区, 加热变压器油, 当温度计示值低于  $t_3$  约  $5.0^\circ\text{C}$  时就停止加热 (但不停止搅拌)。由于加热器余热, 变压器油的温度会继续升高, 当温度计示值高于  $t_3$  的某一最高温度后, 变压器油便处于降温状态。在降温过程中测量和记录下以上各子温区交界点温度对应的传感器输出电压  $V_o$  值, 并与按 (7) 式计算的理论值列表进行比较。

#### [数据处理]

1. 根据实验数据在直角坐标上绘出  $R_t$  的电阻—温度特性曲线; 求出根据实验的  $B_n$  值, 并在同一坐标系上绘出由 (1) 式表示的特性曲线。
2. 在同一直角坐标系中绘出温度传感器的电压—温度特性的理论计算曲线和实验测定曲线。
3. 实验结果的分析、讨论和评定。

#### [思考题]

1. 用迭代法计算  $R_s$  和  $R_f$  时, 若先给  $R_f$  赋值, 计算过程将会如何发展?
2. 在调节温度传感器的零点和量程时, 为什么要先调节零点, 后调节量程?

## TS—B3 型温度传感综合技术实验仪使用说明

### 一. 仪器的结构

本实验仪由三种测温元件(2.7KM11 型半导体热敏电阻、晶体管 PN 结和 AD590)、PN 结和 AD590 温度特性测试电路、温度—电压变换电路、实验用电源电压及数字电压表等部分组成。此外,为了进行有关计算机在自动测温系统中应用的实验,还配备有 MCS-2 型 AD / DA 转换接口板及相应的配套软件。

### 二. 功能

利用本仪器可做以下三个题目的实验内容

一). 热敏电阻为探头的温度—电压变换电路及其变换特性的线性化实验。

二). AD590 为探头的温度传感器设计与实验:

三). PN 结伏安特性随温度变化的实验测定:

1. 室温下的手动测定;

2. 不同温度下的计算机自动测定。

### 三. 操作

一) 温度—电压变换及其变换特性的线性化

1. 热敏电阻元件电阻—温度特性曲线的测定

2. 选择和计算满足设计要求的温度—电压变换电路的电路参数

3. 温度—电压变换电路的组成及调试

1) 电路参数调节

把 I—V 变换电路的  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  和  $R_s$  及  $R_f$  各电阻元件的阻值调节到理论计算值。这项调节必须是在断电和原理图中桥式输入电路与差分放大电路间的联结开关  $K_2$ (即仪器后面板上开关  $K_2$ ) 处于断开状态下进行。具体操作时,把数字万用表的电阻档接入仪器前、后面板上的相应插孔内,旋动相应的调节旋钮即可完成调节。 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  的测试孔和调节旋钮在前面板的“I—V 变换”单元; $R_s$ ,  $R_f$  的测试孔及调节旋钮在仪器的后面板上。

接通电源,旋动前面板上的“ $V_a$  调节”旋钮,使桥式输入电路的电源电压  $V_a=3V$ (用数字万用表电压档测量)。

2) I—V 变换电路的零点调节

把仪器后面板的开关  $K_2$  接通,用 ZX21 型电阻箱接入桥式输入电路中标有“热敏电阻”的桥臂中,并把其阻值调到  $R_{t1}$  值(热敏电阻在  $25^\circ C$  时的电阻值),用数字万用表 200mV 档监测仪器前面板 I—V 变换电路的输出电压是否为零,若不为零,再次微调  $R_3$  的阻值,使其为零(允许  $\pm 5mV$  的变化范围)

3) I—V 变换电路量程调节

保持以上联结不变,把 ZX21 型电阻箱的阻值调到  $R_{t3}$ (热敏电阻在  $65^\circ C$  时的电阻值),用数字万用表电压档监测 I—V 变换电路的输出电压是否为 2V,若不是 2V,微调“ $V_a$  调节”旋钮使之为 2V。

把 ZX21 型电阻箱阻值调  $R_{t2}$ (热敏电阻在  $45^\circ C$  时的阻值),用上述办法验证 I—V 变换电路在  $t=t_2=45^\circ C$  时的输出电压应为 1V。

4) I—V 变换电路温度—电压特性的实验测定

保持以上联结不变,用热敏电阻代替 ZX21 型电阻箱。测量 I—V 变换电路在设计要求的测温范围内的温度—电压特性。

二) 由 AD590 组成的温度传感器设计与实验

AD590 是一种输出电流与温度成正比的集成温度传感器,有关其内部结构,伏安特性随

温度的变化曲线、温度特性测试电路及温度—电压变换电路等见教学参考资料。以下仅就有关实验操作论述如下：

### 1. AD590 集成温度传感器输出电流随温度变化特性曲线的测定

把仪器前面板“AD590 温度特性测试”单元中的开关 K 置于“断”，I—V 变换电路中的电位器 w2 的阻值调为  $10\text{K}\Omega$  变换电路的输出接至 20V 量程的数字电压表，然后把 AD590 探头置于盛有变压器油的烧杯中，加热变压器油使其温度升至  $75^{\circ}\text{C}$  时停止加热。变压器油继续升温到某一最高点后，在降温过程中从  $80^{\circ}\text{C}$  开始每隔  $5^{\circ}\text{C}$  记录一次 I—V 变换的输出电压，直到接近室温为止。根据不同温度下所记录的电压值除以  $10\text{K}\Omega$  便得相应温度下 AD590 输出的电流值 ( $\mu\text{A}$ )，最后在以电流为纵轴 ( $\mu\text{A}$ )，温度为横轴 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 的坐标系中绘制 AD590 的温度—电流特性曲线。在上述测温范围内几乎是一条直线，根据这一直线与电流轴的截距及斜率就可推断出在温度为  $^{\circ}\text{C}$  时的电流值及温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$  时电流的变化值。

### 2. 温度—电压变换电路的组成

为了组成一个测温范围为  $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ ，在  $t=100^{\circ}\text{C}$  输出电压为 5000mV 的温度—电压变换电路，严格说来，应按前面板右侧所示的原理图把开关 K 置于“通”的状态后，把 AD590 置于  $0^{\circ}\text{C}$  和  $100^{\circ}\text{C}$  的温度环境中分别调节“W1 调节”旋钮和“W2 调节”旋钮使其输出电压为 0 mV 和 5000 mV。

在实际中也可按以下方法进行调节：在完成第 1 项测量基础上，保持电位器 W2 的阻值  $=10\text{K}\Omega$  不变，把开关 K 置于“通”状态，断开 AD590 与变换电路的联接，调节“W1 调节”电位器使 I—V 变换电路的输出电压  $V=-I_0\times 10\text{K}\Omega$ （其中  $I_0$  为根据第 1 项测量结果推断出的 AD590 在  $0^{\circ}\text{C}$  时的电流值）。在此后的测量过程中注意保持 W1 这一状态不变。

接通 AD590 与变换电路的联接，并记录下 AD590 探头所在环境的温度值，调节“W2 调节”电位器的阻值（原为  $10\text{K}\Omega$ ），使变换电路的输出电压  $V=50t_r$  (mV)，其中  $t_r$  为 AD590 所在环境的温度值 ( $^{\circ}\text{C}$ ) (比如  $t_r=20^{\circ}\text{C}$ ，则调节 W2 时应使  $V=1000\text{mV}$ )，然后保持电位器 w2 的这一状态不变。

### 3. 温度—电压变换特性的实验制定

在完成 AD590 元件特性测试和温度—电压变换电路组装工作后，保持变换电路中 W1 和 W2 电位器的阻值不变，在降温过程中测量变换电路的温度—电压特性，并列表记录测量结果。

#### 三) 不同温度下 PN 结伏安特性的测定

##### 1. 室温下 PN 结伏安特性的手动测定

测量前把被测 PN 结热敏元件的红、黑插头插入仪器前面板左侧的 PN 结伏安特性测试电路中标有“PN 结”标记的相应插孔中，并把测试电路中测定方式切换开关 K1 置于“手动”状态，然后用一导线把仪器前面板右侧量程为 0—20V 的数字电压表与这一单元中 PN 结伏安特性测试电路的输出端接通，用数字万用表的 2V 电压档接到 PN 结的红色插头与测试电路的“地”端，调节仪器前面板上的“给定调节”旋钮，使 PN 结的电压从零慢慢增加，每增加 50mV 读取一次测试电路的输出电压，直到这一读数接近(但必须小于)5V 为止。

测量完毕后，在断电情况下，测量出测试电路输出端和 PN 结黑色插孔之间电阻的准确值 R 和实验室的温度值。根据测量结果，按以下表格形式列出 PN 结在室温下的伏安特性

##### 2. 不同温度下 PN 结伏安特性的计算机自动测定

有关测试原理见教学参考资料，在此仅论具体操作步骤：

###### 1) 准备工作

接口板及“PN 结温度特性”软件的安装

把 MCS-2 型 AD / DA 转换接口板插入计算机的 ISA 扩展槽中，用两头带 D 形 9 针插头的电缆线接通仪器主机与计算机之间的通讯联结，把随仪器配给的“PN 结温度特性”软件安

装在计算机内，安装成功后该软件将被存入“程序”菜单中名为“PN 结温度特性”的文件中。

#### b. 测量系统参数的设置与传感器特性的输入

开启计算机，在“开始”菜单中点击“程序”，在“程序”的子菜单中打开“PN 结温度特性”文件，然后点击计算机屏幕上左上角“文件”栏，再点击“新建”命令，在计算机屏幕上将现出附图 1 示的显示。此后再点击“设置”栏，计算机屏幕上将显示出附图 2 示的有关利用计算机自动测试 PN 结伏安特性时的 AD / DA 转换通道的选择、测温范围、测温间隔的设置及测量过程中用作温度传感器的温度—电压变换特性的输入等有关窗口，供用户输入相关信息。输入完备后，点击“确定”，然后再点击“运行”栏，计算机就按程序进入 PN 结伏安特性自动测试状态。

在测试过程中，计算机系统随时都在监测着测量系统中温度传感器温度—电压变换电路的输出电压，并把这一电压与已经输入到计算机内的温度—电压特性的有关测温点(由设定的测温范围和测温间隔确定)对应的电压值比较，当两者相等时，计算机系统通过 DAC0832 数模转换芯片给出一个扫描电压，使加在 PN 结的电压从零逐渐升高，PN 结逐渐导通，电流从。逐渐变大，并经 I—V 变换电路转换成的电压值也从 0 逐渐升高：与此同时计算机系统通过 ADC0809 模数转换芯片，不断把代表 PN 结电流变化的这一电压值进行数据采集，扫描电压和 PN 结电流的变化过程实时地存入计算机内存的有关数据区内并显示在屏幕上。测量完毕，计算机屏幕上将显示出附图 3 所示的特性曲线。

#### c. 计算机测量系统电流、电压坐标轴的校准调节

为了使计算机屏幕上显示的 PN 结伏安特性曲线在定量关系上能反映真实的情况，在正式测量之前需要对特性曲线坐标轴的刻度和作为参数的温度值进行校准，其方法如下：

##### 1. 关于作为参数的温度值的校准

只要“设置”过程中输入的温度传感器的温度—电压变换关系是与测量过程中实际使用的温度传感器的特性一致，计算机屏幕上显示的 PN 结伏安特性曲线中的温度值的标定就是正确的，如果在测量过程中使用了另外的温度传感器，则需在“设置”过程中重新输入新的数据。

在 PN 结伏安特性随温度变化的计算机自动测试时采用 AD590 作温度传感器，有关由 AD590 组成的温度传感器的设计及温度—电压变换关系的实验测定见前面有关论述。

##### 2. 关于电流坐标轴刻度的校准

把仪器前面板的测量方式切换开关 K1 置于“手动”状态，在室温情况下调节“给定调节”旋钮，使 PN 结的结电压为 550mV，并打开“PN 结温度特性”程序，在“文件”栏，选择“新建”后，再点击“运行”栏，观察计算机屏幕右下角显示的温度传感器当前的温度值，然后点击屏幕上左上角的“停止”，再点击“设置”栏后把测温范围的起始温度设置成当前的温度值，最后点击“运行”，这样计算机的屏幕上应扫描出一条水平直线，在扫描过程中观察这一直线对应的电流值是否与手动测量时 PN 结 550mV 电压对应的电流值相等，若有偏差，调节仪器后面板“ $I_{ce}$  轴定标”旋钮，使扫描点对应的电流值与其相等，然后在以后测量过程中保持“ $I_{ce}$  轴定标”旋钮的状态不变。“关闭”原来的屏幕画面后，按以上步骤重新扫描出一条对电流轴已校准好的水平直线。

##### 3. 关于电压坐标轴刻度的校准

把测定方式切换开关 K1 置于“自动”状态，在“设置”状态不变的情况下，运行“PN 结温度特性”程序，这时计算机屏幕上将出现一条室温状态下的伏安特性曲线(附图 4 所示)，观察这条曲线 550mV 电压对应的扫描点是否落在前面电流轴已校准好的水平直线上。若未落在这一直线上，调节仪器后面板的“ $V_{ce}$  轴定标旋钮(注意：不要错误地调节到“ $I_{ce}$  轴定标”旋钮)使之落到这一直线上(附图 4 所示)，调节完毕后在以后的实验过程中，注意

保持“ $V_{ce}$ 轴定标”旋钮这一状态不变。

## 2) 测量

把 PN 结与温度传感器的热探头靠在一起，并共同置于盛有变压器油的烧杯中，利用磁力搅拌加热器加热变压器油，当计算机屏幕右下角显示的温度接近选定的测温范围的最高温度  $t_1$  时，停止加热，在停止加热后，PN 结的温度还会继续上升，升高到某一最高点后，就会进行冷却，在降温过程中当降到  $t_1$  温度时，计算机就在  $t_1$ - $t_2$  温区内按程序进行 PN 结不同温度下的伏安特性曲线的测定。

## 9、分光计的认识和调整

### [实验目的]

1. 了解分光计的原理与结构。
2. 学习掌握分光计的调节方法。
3. 测定三棱镜的顶角。

### [仪器用具]

分光计、光源、玻璃三棱镜、平面反射镜

### [实验原理]

#### 1. 分光计

分光计是一种用来精确测量角度的仪器，如测量反射角、折射率和衍射角等。通过测量有关角度，可以确定测定材料的折射率、光波波长和色散率等，其用途十分广泛。近代摄谱仪、单色仪等精密光学仪器也是在分光计的基础上发展起来的。

分光计结构复杂、构件精密、调节要求高，对初学者有一定难度。但只要了解了其结构和光路，严格按照要求步骤耐心调节，就能掌握。

#### (一) 仪器描述

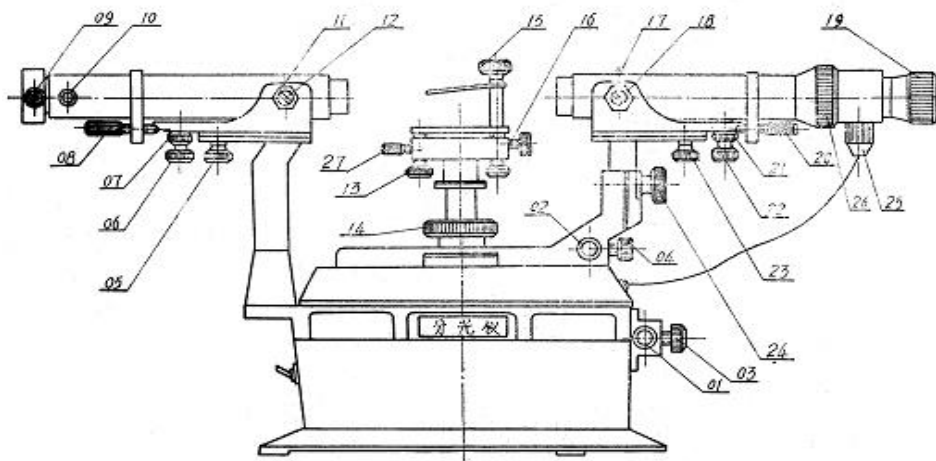


图 4-3-1 分光计

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 01、03—度盘微动、锁紧螺丝    | 02、04—游标盘微动、锁紧螺丝    |
| 06、08—平行光管倾斜、锁紧螺丝  | 09、10—狭缝宽度调节、位置固定螺丝 |
| 11、12—平行光管左右摆动调节螺丝 | 13—载物台面水平调节螺丝（三颗）   |
| 14—载物台升降螺丝         | 15、16—工件夹紧螺丝        |
| 17、18—望远镜左右摆动调节螺丝  | 19—望远镜目镜调节手轮        |
| 20、22—望远镜倾斜、锁紧螺丝   | 25—侧窗灯              |
| 26—望远镜聚焦手轮         | 27—载物台锁紧螺丝          |

分光计的种类繁多，但构造基本相同。分光计主要由望远镜、平行光管、载物台、光学游标刻度盘四部分组成，其外形如图 4-3-1 所示。

分光计的下部是金属底座，底座中央装有一竖直的固定轴，望远镜、载物台、主刻度盘和游标刻度盘都可绕这一固定竖轴旋转，此轴称为分光计主轴（中心轴）。

（1）望远镜 它由物镜、阿贝目镜、分划板三部分组成。分划板上刻有双十字准线（“ $\oplus$ ”），在分划板的右下方紧贴一块  $45^\circ$  全反射小三棱镜，其表面涂不透明薄膜，薄膜上刻有一个空心十字透光窗口，反射棱镜另一光学面上涂有绿色，当小电珠光从管侧射入后成为绿色。调节目镜前后位置，在望远镜视场中可见清晰的准线像。若在物镜前放一平面镜，前后调节目镜（连同分划板一起）与物镜的距离，使分划板（空心绿十字窗口）处于物镜焦平面上，小电珠照亮空心绿十字窗口的光经物镜后成平行光射在平面镜上，从平面镜反射经物镜在分划板上形成十字窗口的像。若平面镜与望远镜光轴垂直，此像将落在准线上方的交叉点上。

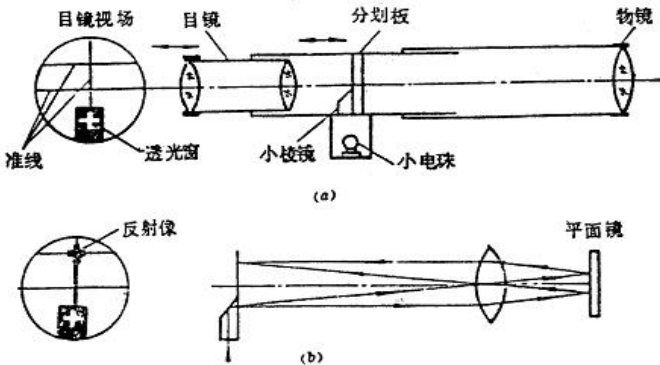


图 4-3-2 阿贝目镜望远镜

调节目镜调焦手轮（19），可改变目镜与分划板的距离，使准线调焦清楚。调节望远镜调焦手轮（26）可改变分划板到物镜的距离，使平面镜反射回来的十字像调焦清楚。调节螺丝（22）可改变望远镜光轴的倾斜度。放松螺丝（04），望远镜可自由转动；旋紧它，望远镜就不能转动，但此时可通过微调螺丝（02）使望远镜左右微动。注意：转动望远镜时，不要握住望远镜筒转动。

（2）平行光管 它是一个圆筒，一端是宽度和位置可调的精密狭缝，另一端是一个凸透镜。松开螺丝（10），可沿筒轴方向平移狭缝位置。当狭缝处于凸透镜焦平面上时，从



图 4-3-3 平行光管

狭缝进入平行光管的光经凸透镜射出，都变成平行光束，所以望远镜接收到的平行光管发出的光，都应是平行光。调节螺丝（06）可改变平行光管的倾斜度，调节螺丝（09）可改变狭

缝宽度。注意：调节狭缝宽度时一般调到 1mm 左右,千万不能使其完全闭合,以免狭缝受到严重损坏。

(3) 载物台 放置反射镜、三棱镜、光栅等光学元件的平台。台上有夹持固定待测光学元件的簧片 (15), 周边有压紧螺丝 (27) 用来固定平台, 使其不能绕中轴转动。台底有三个竖立螺丝 (13) 处在正三角形顶点, 用来调节台面斜度使台面平行于刻度盘。旋紧中轴抵紧螺丝 (03), 松开滚花螺母 (14) 可升降台面高度。螺丝 (02、04) 为游标盘微动锁紧螺丝, 螺丝 (01、03) 为度盘微动锁紧螺丝。

(4) 读数装置 度盘表面镀金属薄膜, 按圆周等分刻度 1080 条透光线条, 格值  $20'$ , 3 小格为  $1^\circ$ 。游标盘亦镀有金属膜, 在圆弧  $13^\circ$  内等分刻有 40 条线, 格值  $19'30''$ , 亦即每格格值  $\delta = a / n = 20' / 40 = 0.5' = 30''$ 。40 格游标与 39 格度盘弧长相等。度盘下方有照明光源, 当度盘线与游标线重合, 即可看见刻线贯通连成一条线, 此即游标读数线, 若双线贯通读中间的游标。度盘、游标表面镀铬, 在观察窗中同时会有数字标记的反射像, 在读数时要左右移动眼睛, 当反射像与实观的数字标记重合后再进行读数, 以避免读数误差。为了消除机械加工时主刻度盘与游标盘二者的转轴不重合所引入的读数偏心误差 (属于系统误差), 在度盘同一直径 ( $180^\circ$ ) 两端各装一游标 (二个读数窗), 读数时相当于两个坐标系, 计算转角可用二坐标系读出的转角求平均作为结果。

望远镜在 I 位置接受到的光线 I 的角坐标分别为  $\theta_1$  (左窗读数) 和  $\theta_1'$  (右窗读数), 望远镜转过  $\varphi$  角在 II 位置接受到光线 II 的角坐标分别为  $\theta_2$  (左窗读数) 和  $\theta_2'$  (右窗读数), 则 I、II 光线的夹角  $\varphi$  应由下式计算:

$$\varphi = \frac{|\theta_1 - \theta_2| + |\theta_1' - \theta_2'|}{2} \quad (4-3-1)$$

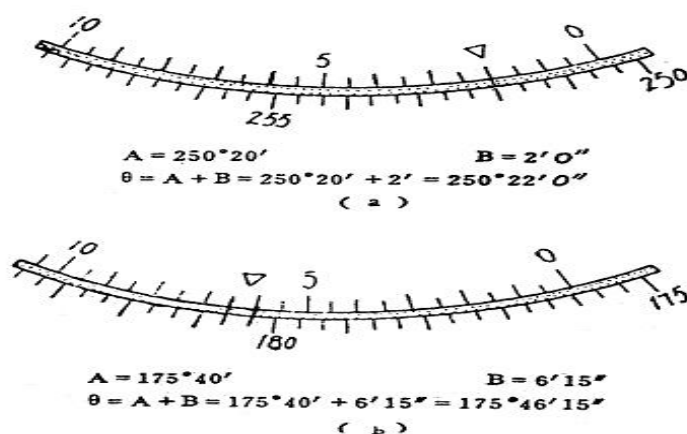


图 4-3-4 光学度盘示意图

应该特别指出, 若望远镜由 I 转至 II 过程中, 游标零线与度盘零线相遇一次, 则计算公式不是  $\varphi = |\theta_1 - \theta_2|$ , 而应是  $= 360^\circ 0' 0'' - \text{大角坐标} + \text{小角坐标}$ , 例如: 由  $290^\circ 0' 0''$  转至  $15^\circ 0' 0''$ , 转角  $\varphi = 360^\circ 0' 0'' - 290^\circ 0' 0'' + 15^\circ 0' 0'' = 85^\circ 0' 0''$ 。

角度的读法以游标盘零线为准，先读出零刻线对应的度盘上的度值和分值（每格  $20'$ ） $A$ ，再找游标盘上与度盘刚好重合的刻线（亮线），在游标上读出分值和秒值（每格  $30''$ ） $B$ ，二次数值相加（ $A+B$ ）即为读数值  $\theta$ 。

### [实验内容及步骤]

#### 1. 分光计的调节

调整分光计的目的：（1）望远镜能发出平行光并能接受平行光束；（2）平行光管能发出平行光束；（3）望远镜、平行光管的光轴共轴，且均与分光计中心轴相垂直。载物台面平行于度盘。

分光计的调整方法如下：

（1）目测粗调：沿不同方位观察，将望远镜、平行光管、载物台调成水平，并与中心轴垂直，调载物台只需把三个竖直螺丝放松，旋紧台面中心的拉簧即可。

（2）用自准直法使望远镜聚焦于无穷远（能发出、接受平行光）

①目镜调焦：接通电源，从目镜中观察分划板准线，调目镜手轮，至分划板准线清晰为止。

②正确放置平面镜：将双面平行平面镜立放在载物台中央，使镜面与任意两个载物台倾度螺丝  $a$ 、 $b$  的连线垂直，如图 4-3-5。这样放置的好处是，若要改变平面镜倾斜度，只要调节  $a$ 、 $b$  螺丝即可， $c$  的调节与平面镜的仰俯无关。

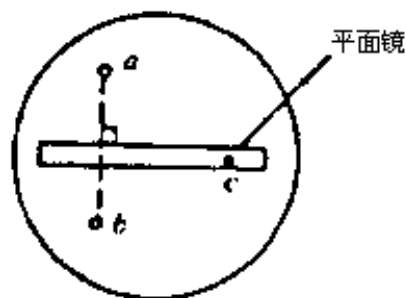


图 4-3-5 平面镜位置

③寻找亮十字像及对亮十字像调焦清楚：把望远镜筒垂直对准平面反射镜，使小电珠发出的光通过绿十字窗口经过物镜再由平面镜反射回到分划板上，这时从目镜中可看到绿色小十字像。若看不到此亮十字，一般是平面反射镜与望远镜光轴不垂直，从望远镜射出的光没有被平面镜反射到望远镜中，应改变反射镜相对望远镜的倾度，使平面镜镜面与望远镜光轴大致垂直。若看到的是一模糊的光斑，则说明聚焦不对，应调望远镜的调焦手轮，把十字像调焦清晰，再用同样的方法在目镜中找到平面镜另一面反射回来的亮十字像。在目镜视场中应既能看清准线，又能看清亮十字像，即二者都应十分清晰，若有视差，则需反复调节聚焦手轮和目镜调节手轮，直至视差消除，此时望远镜聚焦于无穷远，可以发出和接受平行光了。

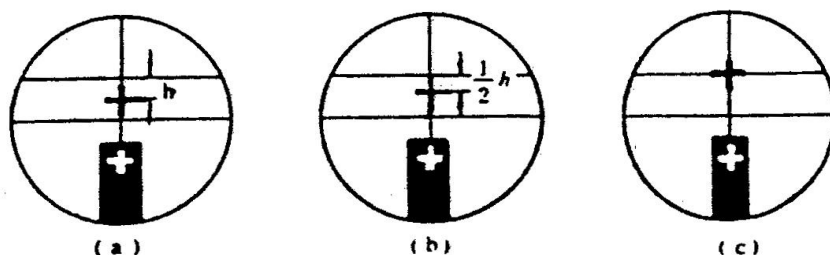


图 4-3-6 各半调节法

(3) 调节望远镜的光轴垂直于分光计的中心轴①当看清由平面镜（两个反射面）反射回来的十字像时，十字像一般与分划板准线的上十字叉丝并不重合，如图 4-3-6（a）所示，此时应采取“各半调节法”，调到图 4-3-6（c）的位置。所谓“各半调节法”，就是把绿十字像调到位应有两个步骤：首先调载物台下竖直螺丝  $a$  或  $b$ ，让绿十字像向“目的”位置移动一半路程，如图 4-3-6（b）接着调望远镜倾斜调节螺丝（22），使绿十字像到达“目的”位置（与分划板准线的上部叉丝重合）。

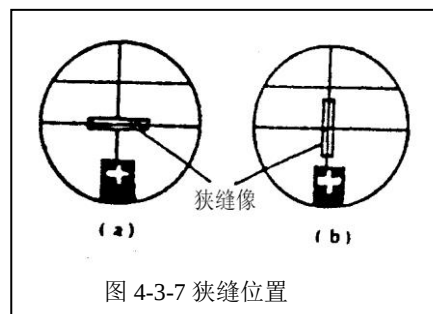
② 把载物台转  $180^\circ$ ，使望远镜对准平面反射镜的另一面，用上述各半调节法，使绿十字像与分划板准线上十字叉丝重合（如图 4-3-6（c）所示）。如此重复调节，直至转动载物台时，从平面反射镜前后两表面反射回来的绿十字像都能与分划板准线的上部叉丝重合为止。这时望远镜的光轴与分光计的中心轴垂直，也就是与度盘达到平行。

#### (4) 平行光管发射平行光、使其光轴垂直于中心轴

①使平行光管产生平行光。用光源照亮狭缝，调节缝宽至望远镜视场中约  $1\text{mm}$ 。沿管轴方向前后移动狭缝，直到在望远镜中看到一条清晰（边界不模糊），与准线无视差竖直位于视场正中对称位置的狭缝像。这时狭缝位于平行光管透镜的焦平面上，发出的是平行光。

② 调整平行光管光轴垂直于分光计中心轴。转动狭缝成水平（但缝不能沿管轴方向移动），调平行光管倾斜调节螺丝（06），使水平缝像被分划板中央水平准线上下平分，如图 4-3-7(a)所示。至此平行光管光轴与仪器中心轴垂直，发出的平行光平行于度盘。再把狭缝转至铅直位置并需保持狭缝像最清晰且无视差，如图 4-3-7(b)所示。

经过以上四步骤，分光计正式测量前的基本调节已经完成，即望远镜和平行光管的光轴均已垂直于仪器转轴，并且已聚焦良好。在测量时，不能再改变它们的倾度和聚焦状态，否则前功尽弃，但可转动望远镜，



而且对某一个具体测量项目，放到载物台上的被测光学平面可能与仪器转轴不平行，还要对载物台的倾度螺丝进行适当调节，才能达到要求进行测量。

## 2. 测三棱镜顶角

### (1)、三棱镜的调整

三棱镜的两个折射面的法线应与分光计中心轴相垂直。为了便于调整，三棱镜应按图 4-3-8 所示的位置放置在载物台上，使平台下三个螺丝  $a$ 、 $b$ 、 $c$  中每两个的连线与三棱镜的镜面之一正交。转动载物台，使三棱镜的一个折射面  $AC$  对准已调好的望远镜，调节  $AC$  面下方载物台下的水平调节螺丝  $a_1$ ，使准线上的十字叉丝与亮十字像重合（注意此时望远镜

已调好, 不可再调); 再旋转载物台, 使三棱镜另一折射面  $AB$  对准望远镜, 以同样方法调整成重合。经反复调整, 直到  $AB$ 、 $AC$  面反射回来的亮十字像均能和分划板准线的上十字叉丝重合为止。此时三棱镜的两个折射面均与分光计中心轴相垂直。

(2) 测顶角的光路图如图 4-3-9, 顶角  $A$  正对观测者, 固定载物台和游标盘不动, 转动望远镜正对  $AB$  面, 使亮十字像与上十字叉丝重合, 从左右读数窗读出角坐标  $\theta_1$ 、 $\theta_1'$ 。将望远镜转到  $AC$  面, 使亮十字像与上十字叉丝重合, 读出左右角坐标  $\theta_2$ 、 $\theta_2'$ 。这两次反射光的夹角为:

$$\varphi = \frac{|\theta_1 - \theta_2| + |\theta_1' - \theta_2'|}{2} \quad (4-3-3)$$

则三棱镜顶角为  $A = 180^\circ 0' 0'' - \varphi \quad (4-3-4)$

(3) 平行光法测顶角的光路图如图 4-3-10 所示。在调好的分光计载物台上, 放置三棱镜固定不动, 让平行光管的平行光直射顶角。转动望远镜测出二反射面反射光的角坐标  $\theta_1$ 、 $\theta_1'$  和  $\theta_2$ 、 $\theta_2'$ , 即可算出二反射光的夹角为:

$$\varphi = \frac{|\theta_1 - \theta_2| + |\theta_1' - \theta_2'|}{2} \quad (4-3-5)$$

由简单几何关系知顶角等于  $\varphi$  的一半:  $A = \frac{\varphi}{2} \quad (4-3-6)$

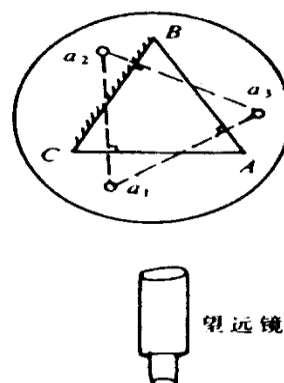


图 4-3-8

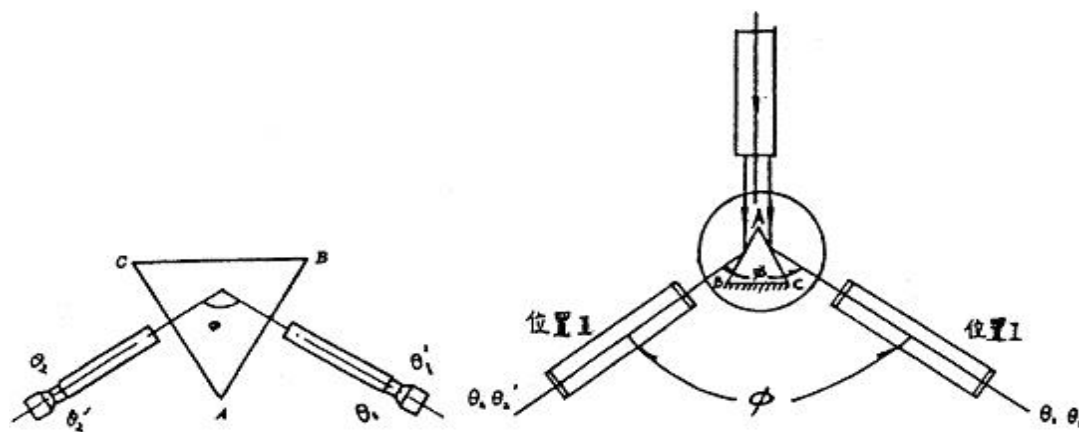


图 4-3-9 测三棱镜顶角

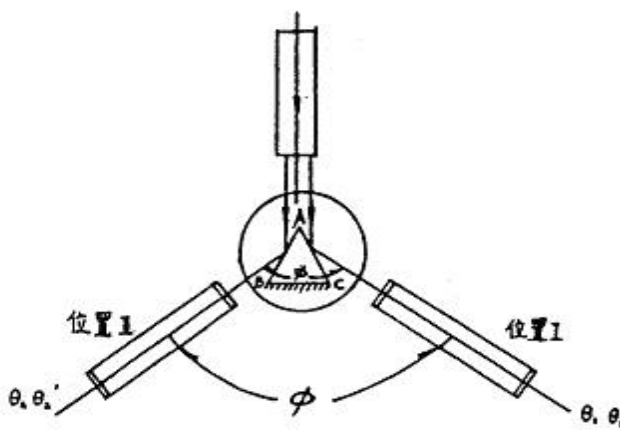


图 4-3-10 平行光法测三棱镜顶角

### [实验步骤]

1. 调整分光计。学习并熟悉分光计结构, 调整螺丝的位置, 学会调节的方法和步骤, 调好分光计至待用状态。

2. 用自准法或平行光法（二种方法任选一种）测定三棱镜的顶角  $A$ ，重复测三次。

### [注意事项]

1. 望远镜、平行光管上的镜头，三棱镜、平面镜的镜面不能用手摸。三棱镜、平面镜不准磕碰或跌落，以免损坏。

2. 分光计为精密仪器，各活动部分均应小心操作，如发现异常现象，要及时报告。当轻轻推动可转动部件（例如望远镜、游标盘）而无法转动时，切记不可强制其转动，应分析原因后再进行调节。

3. 分样板照明用小灯泡的连接导线不得拉动。

### [数据及处理]

数据表      测顶角  $A$       测量方法：\_\_\_\_\_ 棱镜号：No \_\_\_\_\_

| 次数 | 望远镜在左边                 |                         | 望远镜在右边                 |                         | $ \theta_1 - \theta_2 $ | $ \theta'_1 - \theta'_2 $ | $\varphi$ | $A$ |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|-----|
|    | 游标<br>1 ( $\theta_1$ ) | 游标 2<br>( $\theta'_1$ ) | 游标<br>1 ( $\theta_2$ ) | 游标 2<br>( $\theta'_2$ ) |                         |                           |           |     |
| 1  |                        |                         |                        |                         |                         |                           |           |     |
| 2  |                        |                         |                        |                         |                         |                           |           |     |
| 3  |                        |                         |                        |                         |                         |                           |           |     |

$$\bar{A} =$$

$$U_A = \delta_A =$$

$$A = \bar{A} \pm U_A =$$

### [思考题]

1. 分光计由哪几个主要部分组成？其主要作用是什么？
2. 分光计的调整要求是什么？
3. 反射镜放在平台上时，为什么要使镜面垂直于台下二倾斜度调节螺丝连线？
4. 在望远镜中只看到平面镜  $A$  面反射回来的绿十字像，转动载物台  $180^\circ$  后， $B$  面的反射绿十字像应如何找出来？
5. 各半调节法如何进行？它的作用是什么？

## 10、衍射光栅实验

### [实验目的]

1. 观察光通过光栅后的衍射现象。
2. 进一步熟悉分光计的调整和使用。
3. 测透射光栅的光栅常数。
4. 用透射光栅测光波波长。

### [仪器用具]

分光计、汞灯光源、透射光栅

### [实验原理]

光栅是一种根据多缝衍射原理制成、将复色光分解成光谱的重要分光元件，能产生亮度较大、间距较宽的光谱线，常用来精确地测定光波波长及进行光谱分析。

光栅是由一系列等宽又等间距的平行狭缝所组成。一般是在一片光学玻璃上进行刻划或用全息照像法做成刻痕或黑条纹，使光线不能通过，两刻痕或黑条纹间能透光，相当于狭缝。

设缝宽为  $a$ ，间隔为  $b$ ，则  $d=a+b$  为相邻两狭缝上相应两点之间的距离，称为光栅常数，是表征光栅特性的重要参数。

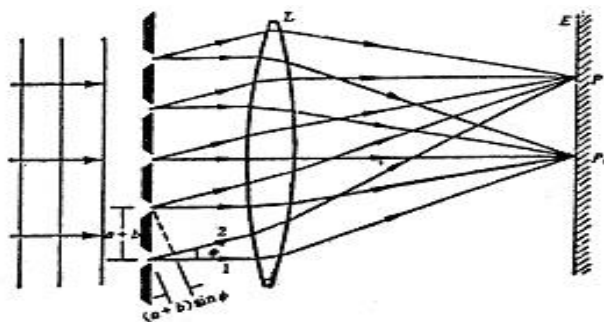


图 4-4-1 衍射光栅

如图 4-4-1 所示，一束波长为  $\lambda$  的单色平行光垂直入射到光栅上，透过每一狭缝的光都要发生衍射，沿同一方向传播的各狭缝的衍射光经过透镜  $L$  后会聚在焦平面上而相互干涉，在透镜  $L$  的焦平面  $E$  上形成一系列暗背景下的亮条纹，称为谱线。形成亮条纹的条件为：

$$(a+b)\sin\varphi_k = \pm k\lambda \quad (k=0,1,2, \dots) \quad (4-4-1)$$

(4-4-1)式称为光栅方程， $k$  为光谱线的级数， $\varphi_k$  是第  $k$  级谱线对应的衍射角。若光栅常数  $a+b$  已知，用分光计测出第  $k$  级谱线相应的衍射角  $\varphi_k$ ，由(4-4-1)式可求出光波波长  $\lambda$ ；反之，若已知波长  $\lambda$ ，可求出光栅常数  $a+b$ 。

如果入射光为包含多种不同波长的复色光，除零级谱线外，同一级条纹（ $k$  相同）的衍射角  $\varphi$  与入射光的波长有关。将各种波长的同一级次条纹合成的整体称为光栅的衍射光谱。

## [实验内容及步骤]

### 1. 调整分光计

① 将光栅如图 4-4-2 放置在载物台上, 使光栅平面处于载物台调节螺丝  $a$ 、 $c$  连线的中垂线上。望远镜物镜对着光栅平面, 以光栅平面为反射面, 细调  $a$ 、 $c$  及望远镜调节螺丝与聚焦手轮, 使分别从光栅正、反两面反射的绿色十字像清晰且与望远镜分划板准线的上十字叉丝重合, 这时望远镜聚焦无穷远且望远镜光轴与分光计竖直轴垂直。

② 将已调好的望远镜对准平行光管(注意, 只能转动载物台螺丝  $a$ 、 $c$ , 不可调望远镜), 调节狭缝在平行光管套筒中的位置, 使在望远镜中能看到清晰的狭缝像, 且狭缝像与望远镜分划板准备工作线的竖线重合。这样, 平行光管的轴线与与分光计竖直轴垂直。

③ 调节载物台螺丝  $c$ , 使望远镜中看到的衍射光谱的中央明纹 ( $k=0$ ) 与分划板准线的竖线重合 (这时光栅平面的法线与分光计的竖直轴垂直)。

④ 转动望远镜, 视场中应看到排列在中央明纹两侧的  $\pm 1$ 、 $\pm 2$  级光谱线, 且这些光谱线等高, 若看不到  $+2$  级 (或  $-2$  级) 或不等高, 则重新进行第①、③步。

### 2. 测量各级衍射角

打开光源, 转动望远镜, 使分划板的竖线对准左 (或右) 第 2 级谱线, 读出两游标窗口的示数, 沿同一方向转动望远镜, 依次测出其它各级谱线的两游标窗口的示数值。

3. 汞灯 (深绿色) 波长  $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ , 利用 (4-4-1) 式, 求出光栅常数。

4. 测出其它颜色 (如红光, 由实验室给) 谱线的衍射角, 利用 (4-4-1) 式算出该光的波长, 并与公认值比较。

5. 不计系统误差, 计算测量的不确定度。

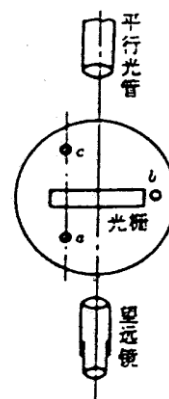


图 4-4-2 光栅的放置

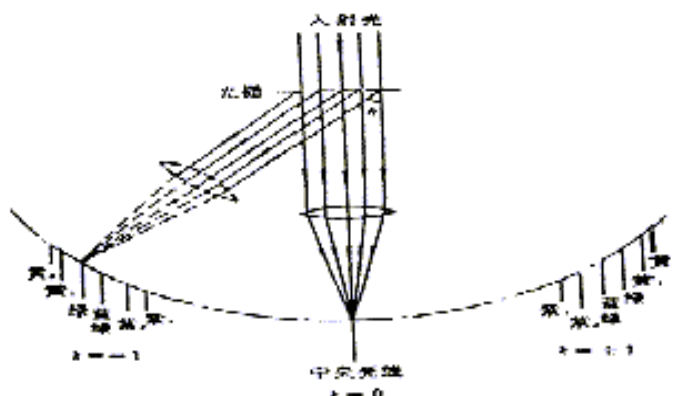


图 4-4-3 汞灯的光栅衍射光谱

# [数据及处理]

## 1. 测光栅常数

数据表  $\lambda = 5461 \overset{\circ}{\text{\AA}}$   $1/(a+b)_{\text{标}} =$   $\text{mm}^{-1}$

| 次数 | 游标 | 左 2 级 | 左 1 级 | 右 1 级 | 右 2 级 | $2\varphi_{1i} =$<br>(左 1 级-右 1 级) | $2\varphi_{2i} =$<br>(左 2 级-右 2 级) |
|----|----|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 1  |       |       |       |       |                                    |                                    |
|    | 2  |       |       |       |       |                                    |                                    |
| 2  | 1  |       |       |       |       |                                    |                                    |
|    | 2  |       |       |       |       |                                    |                                    |
| 3  | 1  |       |       |       |       |                                    |                                    |
|    | 2  |       |       |       |       |                                    |                                    |

在不计系统误差的情况下:  $\bar{\varphi}_2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{2\varphi_{2i}}{2} =$

$$(a+b)_2 = \frac{2\lambda}{\sin \bar{\varphi}_2} = \quad \delta_2 = \frac{1}{6} \sum |\bar{\varphi}_2 - \varphi_{2i}| =$$

$$\bar{\varphi}_1 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{2\varphi_{1i}}{2} =$$

$$(a+b)_1 = \frac{\lambda}{\sin \varphi_1} = \quad \delta_1 = \frac{1}{6} \sum |\bar{\varphi}_1 - \varphi_{1i}| =$$

$$\overline{(a+b)} = \frac{1}{2} [(a+b)_1 + (a+b)_2] =$$

$$U_{(a+b)} = \frac{\lambda}{2} \left[ \frac{\cos \bar{\varphi}_1 \delta_1}{\sin^2 \bar{\varphi}_1} + \frac{2 \cos \bar{\varphi}_2 \delta_2}{\sin^2 \bar{\varphi}_2} \right] =$$

$$(a+b) = \overline{(a+b)} \pm U_{(a+b)} =$$

(注意: 计算时  $\delta_i$  以弧度为单位)

2. 测出其它颜色 (红光, 由实验室给) 谱线的衍射角, 利用 (4-4-1) 式算出该光的波长, 并与公认值比较。

### [注意事项]

1. 分光计应按操作规程正确使用。
2. 光栅是易碎、易损的精密光学元件，必须轻拿轻放，严禁用手触摸光栅面，只能拿支架。
3. 不要用眼睛直视点燃的汞灯，以免紫外线灼伤眼睛。

### [思考题]

- 1、在分光计实验中为什么要把光栅面放在平台上两调节螺丝连线的中垂线上？
- 2、本实验对分光计的调节有何特殊要求？如何调节才能满足测量要求？
- 3、如何测定光谱线的衍射角？如何决定光谱级数  $k$ ？
- 4、当平行管狭缝太宽，太窄对实验有何影响？
- 5、光栅光谱和三棱镜光谱有哪些不同？在上述实验中哪一种颜色的光偏向角最大？

# 11、迈克尔逊干涉实验

## [实验目的]

1. 了解迈克尔逊干涉仪的结构、原理及调节使用方法。
2. 观察等倾、等厚干涉现象。
3. 测定He—Ne激光波长。

## [仪器用具]

迈克尔逊干涉仪、氦氖激光器、扩束镜、载物台等。

## [实验原理]

迈克尔逊干涉仪的光路如图1所示,从点光源射出的光束在分束板 $G_1$ 的半反射面 $D$ 上被分成相互垂直的两束光,这两束光分别由 $M_1, M_2$ 平面镜反射回到 $G_1$ ,再由 $G_1$ 反射或折射后,同时向接收器 $E$ 的方向传播。这两束光都来自同一光源,是相干光。因此,在 $E$ 处的观察者能看到干涉条纹。图中 $G_2$ 为补偿板,

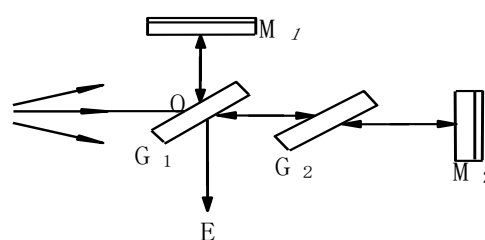


图 1. 迈克尔逊干涉仪的光路

它的材料和厚度与 $G_1$ 完全一样,且板面也与 $G_1$ 平行,它的作用是为了补偿两束光由于穿过 $G_1$ 的次数不同而产生的附加光程差。

由平面镜成像原理可知: $G_1$ 上的半反射面使 $M_2$ 在 $M_1$ 附近生成一个虚像 $M_2'$ ,从 $M_2$ 反射来的光线可以看成是从 $M_2'$ 反射的,见图2。调节 $M_1$ 或 $M_2$ ,即可调节 $M_1$ 和 $M_2'$ 之间的距离或夹角。因此,迈克尔逊干涉仪可以通过改变 $M_1$ 和 $M_2$ 之间的相对位置,分别观察等倾干涉和等厚干涉图样。由于使用的光源不同(点光源或扩展面光源),又可把获得的干涉条纹分为定域干涉或非定域干涉。

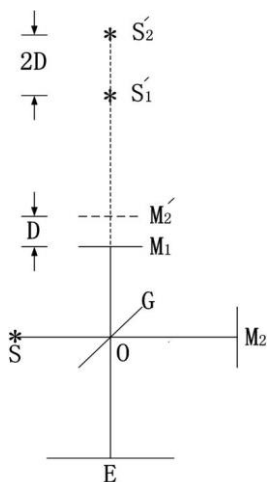


图 2 干涉仪中光路的反射关系

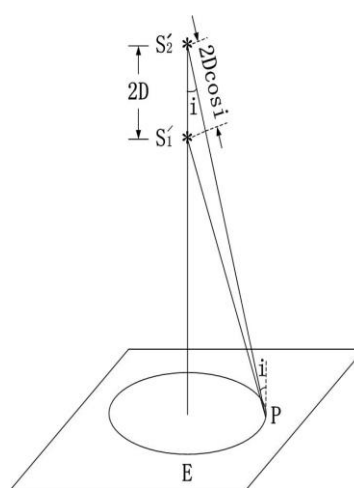


图 3 等倾干涉等效光路

### 1. 等倾干涉图样

可采用激光扩束形成点光源实现非定域等倾干涉,如图2所示。当 $M_1$ 和 $M_2'$ 平行( $M_1 \perp M_2$ )时,点光源 $S$ 发出的球面光波,经过分束板 $G_1$ 反射透射和 $M_1 M_2$ 镜反射,

在  $M_1M_2'$  法线方向上形成 S 的两个虚光源  $S_1'$  和  $S_2'$ ，在观察屏 E 处可看到由两束反射光波形成的干涉图样，实际上可由两个虚光源  $S_1'$  和  $S_2'$  直接发出的光相干涉进行计算得出。可以证明：若  $M_1$  和  $M_2'$  相距为  $D$ ，则  $S_1'$  和  $S_2'$  相距为  $2D$ 。如图 3 所示， $S_1'$ 、 $S_2'$  到屏上一点 P 的光程差为：

$$\delta = 2D \cos i \quad (1)$$

若屏面与  $M_1$  平行，则入射角  $i$  相等的点在屏上构成一个圆，不同入射角的干涉条纹成为一系列同心圆，因此这种干涉为等倾干涉。出现明暗圆环的条件是：

$$\delta = \begin{cases} 2D \cos i_N = N\lambda & (N = 1, 2, \dots) \text{ 明环} \\ 2D \cos i_N = (2N + 1) \frac{\lambda}{2} & (N = 0, 1, 2, \dots) \text{ 暗环} \end{cases} \quad (2)$$

在圆环中心处  $i=0$ ，干涉条纹级数最高。若环心是  $N$  级亮环，则：

$$\delta = 2D = N\lambda \quad (3)$$

当移动  $M_1$  使间隔  $D$  增大时，圆心的干涉级数越来越高，我们就可看到同心环纹将一个个向外“冒”出；反之，当  $D$  减小时，同心环纹将一个个“缩”进去；每当“冒出”或“缩

进”一个暗（或明）环纹时， $D$  就相应地增加或减小  $\lambda/2$ 。由 (3) 式可得  $M_1$  和  $M_2$  距离改变量  $\Delta D$  与环纹级次改变量  $\Delta N$  之间的关系：

$$\Delta D = \Delta N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{即} \quad \lambda = \frac{2\Delta D}{\Delta N} = \frac{2(d - d_0)}{\Delta N} \quad (4)$$

式中  $d_0$  为  $M_1$  移动前的位置坐标， $d$  为  $M_1$  移动后的位置坐标。只要测出  $M_1$  镜移动的距离  $\Delta D = d - d_0$ ，以及在此过程中“冒出”或“缩进”的环纹数目  $\Delta N$ ，就可求出入射单色光的波长。

## 2. 等厚干涉图样

当  $M_1$  和  $M_2$  不严格平行而有一个很小的角度  $\theta$  时，则形成一个楔形空气层，产生等厚干涉条纹。这部分内容已在等厚干涉实验中研究过。

## [仪器简介]

迈克尔逊干涉仪是用分振幅法获得相干光束从而实现光的干涉的精密光学仪器。 $M_1$  和  $M_2$  是在相互垂直两臂上放置的两个全反射镜。 $M_2$  为固定的， $M_1$  可以在传动系统控制下沿一精密导轨移动。移动的距离可以从涡轮蜗杆的读数机构读出。 $M_1$ 、 $M_2$  平面反射镜背后都有三个螺丝，用以调节  $M_1$ 、 $M_2$  的镜面倾斜度。但通常很少调节  $M_1$ ，而是调节  $M_2$ 。固定镜  $M_2$  下面还设有方向相互垂直的两个调节螺旋，用以微调  $M_2$  的倾斜度。两臂交会处立放一块半镀银（或铝）膜的平玻璃板  $G_1$ （透射率为 50%），它将从光源投射来的光分成强度相等的两束。一束透过  $G_1$  射向  $M_2$ ，另一束经镀银面反射后透过  $G_1$  射向  $M_1$ 。 $G_1$  称为分束板。在  $G_1$  和  $M_2$  之间还放了一块与  $G_1$  完全一样（只是未镀银）的玻璃板  $G_2$ ，称为补偿板。它起光程补偿作用。底座上可插入一金属棒，作观察屏或相机的支撑。

本仪器的正面有一粗调手轮，右侧有一微调手轮，它们是用于调节  $M_1$  的。准确测定  $M_1$  镜的移动距离有三个读数尺：毫米以上读数可以从导轨旁的米尺上读出，0.01~1 mm 范围

的数从涡轮读数窗口（粗调螺旋测微计）上读出， $0.01\text{mm}$ 以下从涡轮螺头（微调螺旋测微计）上读出，分度值为 $10^{-4}\text{mm}$ ，还可以估读到 $10^{-5}\text{mm}$ 。 $M_1$ 镜在导轨上的位置由导轨上标尺读数 $l$ ，粗调螺旋测微计读数 $m$ 和微调螺旋测微计读数 $n$ 之和表示即 $d=l+m\times 10^{-2}+n\times 10^{-5}(\text{mm})$ 。这套读数系统可以把 $M_1$ 的移动距离准确读到万分之一毫米，这正是该仪器的优点。

### [实验内容]

1. 接通电源使 He — Ne 激光器发光，调节激光器的高低使光束照亮 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 。调节粗调手轮使 $M_1$ 距 $G_1$ 中心距离与 $M_2$ 距 $G_1$ 中心距离大致相等。
2. 使激光束照在 $G_1$ 、 $G_2$ 中心，观察屏 $E$ 上出现的光点，细心调节 $M_2$ 镜后面三个螺丝使两组光点中最亮的两点重合，然后放上扩束镜，在屏 $E$ 上就会看到干涉条纹，再轻轻地调节 $M_2$ 镜旁的两个螺丝，直到出现圆环条纹并使环纹中心在视场中央。
3. 转动微调手轮，观察圆环从中央“冒出”（或“缩进”）的现象。
4. 校准标尺零点，将微动手轮沿顺时针（或逆时针）方向转到零线上，沿与微动手轮转动方向相同的方向转动粗调手轮，使百分尺指在一整数刻度线上，然后将粗调手轮百分尺继续拨在零上（小手轮不动），若主尺指在一整数刻度线上就算标尺零点全部校好。
5. 将最内一个圆环扩大到最大（即新环还未“冒出”只有一个黑点）使其边与坐标相切，记下 $M_1$ 的位置，然后微微转动小手轮使其冒出 50 个，100 个，150 个，200 个，…，450 个圆环，记下每冒出 50 个圆环后 $M_1$ 的位置。手轮只能往一个方向转，不能逆转。

### [注意事项]

迈克尔逊干涉仪是一种非常精密的光学仪器，使用时必须遵守以下规则：

1. 首先必须弄清仪器的构造、各部分性能、原理和调整方法，才可以进行操作。
2. 仪器的光学元件，特别是平面镜 $M_1$ 、 $M_2$ ，分束板 $G_1$ 和补偿板 $G_2$ ，绝对不允许用手触摸，也不准用任何东西（包括擦镜纸）揩擦。
3. 为了保持仪器传动系统的精度，在调节仪器机械传动部分和测量时，动作要轻要稳。
4. 测量时应先调整测微尺的零点，并沿同一方向测读，若中途有反转，会产生空程误差，应重新校准零点。
5. 严禁乱动和私拆仪器。

## 12、空气中声速的测定

### [实验目的]

1. 了解共鸣管中声波驻波形成的原理。
2. 利用声波驻波测定空气中的声速。

### [仪器用具]

共鸣管装置、小喇叭、音频讯号发生器、温度计等。

### [实验原理]

#### 1. 仪器描述

实验装置如图 1 所示。一支长约一米附有米尺刻度的玻璃管，上端开口，下端插入侧面有一胶管接口的电木封头内。胶管接口上接一橡皮软管，橡皮软管另一端与一盛水筒连接。整个装置固定于一金属三角架上。盛水筒夹具可以沿三角架上的立柱上下调节，使玻璃管中水面高度得到调整。

在玻璃管管口上方约 1cm 处装有一个向着玻璃管口的小喇叭。当音频讯号发生器输入音频电流激励小喇叭发声时，小喇叭发出的声波便沿玻璃管传播。调节音频讯号的频率和输出功率，便可以改变声波的频率和声强。

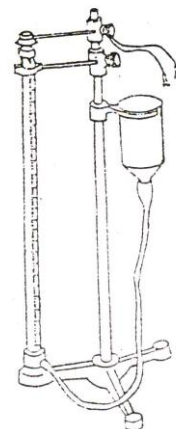


图 1 实验装置

#### 2. 玻璃管内声波驻波的形成与利用共鸣现象测声速

当喇叭发出声响时，声波沿玻璃管轴向传播，到达水面时便反射回来。由于水对空气而言是波密媒质，声波在反射时发生了“半波损失”，即在水面反射处反射声波与入射声波的相位改变为 $\pi$ 。由于反射波与入射波是相干波，所以在玻璃管的空气柱内发生相干叠加。

设管口处为坐标原点，沿玻璃管轴线向下为  $x$  轴正向，管中水面到管口的空气柱长为  $L$ ，声波波长为 $\lambda$ ，则管中入射波和反射波的波方程分别为：

$$y_1 = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$y_2 = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi(2L - x)}{\lambda} + \pi\right) \quad (2)$$

(2) 式中的 $\pi$ 是反射时的半波损失引起的相位突变。管内合成的声波为：

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cos\left[\frac{2\pi(L - x)}{\lambda} - \frac{\pi}{2}\right] \cos\left(\omega t - \frac{2\pi L}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right)$$

这是驻波方程，表明管内形成了驻波。各点的振幅为：

$$\left| 2A \cos \left[ \frac{2\pi(L-x)}{\lambda} - \frac{\pi}{2} \right] \right|$$

可见振幅是空气柱长  $L$  和位置  $x$  的函数。在空气柱长  $L$  一定的情况下，若坐标  $x$  满足

$$\frac{2\pi(L-x)}{\lambda} - \frac{\pi}{2} = K\pi \quad (K=0,1,2,\dots)$$

即：  $x = L - (2K+1)\frac{\lambda}{4}$  (3)

的各点振幅最大，称为波腹。

而坐标  $x$  满足

$$\frac{2\pi(L-x)}{\lambda} - \frac{\pi}{2} = (2K+1)\frac{\pi}{2} \quad (K=0,1,2,\dots)$$

即  $x = L - (K+1)\frac{\lambda}{2}$  (4)

的各点振幅最小，称为波节。由 (2) 式可知，管口处 ( $x=0$ ) 为波腹时，空气柱长  $L$  应满足的条件为：

$$L = (2K+1)\frac{\lambda}{4} \quad (K=0,1,2,\dots) \quad (5)$$

此时，管口处振动最强，这一现象称为共鸣。

当  $K=0$ ,  $L_0 = \lambda/4$  时，称“基音共鸣”。对应于  $K=1, 2, 3, \dots$  的共鸣称为“倍音共鸣”，相应空气柱的长度为  $L_1 = 3\lambda/4$ ,  $L_2 = 5\lambda/4$ ,  $L_3 = 7\lambda/4, \dots$  如图 2 所示。

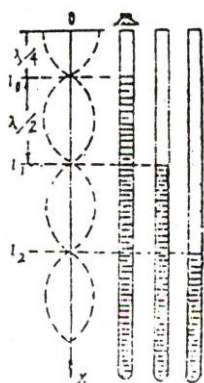


图 2

$$L_K - L_{K-1} = (2K+1)\frac{\lambda}{4} - (2K-1)\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$$

相邻两次共鸣的空气柱长度之差为

即：

设各次共鸣时水面的位置的读数为  $x_0, x_1, x_2, \dots$ ，则

$$\lambda = 2(L_K - L_{K-1})$$

$$\lambda = 2(x_K - x_{K-1}) \quad (6)$$

实验时只要读出相邻两次共鸣时的水面位置，即可从 (6) 式得到波长  $\lambda$ 。于是空气中声速为

$$u = 2\nu(x_K - x_{K-1}) \quad (\nu \text{ 为音频讯号频率})$$

### [实验内容及步骤]

1. 将小喇叭口正对玻璃管口，其间距离约 1cm。接通音频讯号发生器电源，调节输出频率为 600Hz，调节输出电平，使小喇叭发出刚能听见时的小声音（不可太大，否则，一方面容易震坏喇叭纸盆，另一方面共鸣现象也不明显）

2. 调节盛水筒高度，使玻璃管中水面上升到离管口约 3cm 左右（注意不要让水流出）。

调节水桶高度使玻璃管中水面缓慢下降，同时倾听小喇叭的声响会由弱渐渐变强，到某处达最强，水面再下降时声响将随之变弱。水面继续下降将会出现几次共鸣，粗略记下几次共鸣时的水面位置，反复熟悉几次。

3. 将水面提到第一次共鸣位置，细心调节水面，使其从上下两边渐渐靠近声响最大处，记下声响最大时水面位置读数。

4. 使水面下降，重复步骤 3，测出第二次、第三次共鸣时水面的准确位置  $x_1$ 、 $x_2$ 。

5. 改变讯号发生器的输出频率为 800Hz、1000Hz，重复步骤（3）、（4），再测出相应  $x_0$ ， $x_1$ ， $x_2$ 。

6. 记下室温。

### [数据及处理]

数据表

室温：

| $\nu$<br>(Hz) | $x_0$<br>(m) | $x_1$<br>(m) | $x_2$<br>(m) | $u=2\nu(x_K-x_{K-1})$ (m/s) |                        |
|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|------------------------|
|               |              |              |              | $u_{10}=2\nu(x_1-x_0)$      | $u_{21}=2\nu(x_2-x_1)$ |
| 600           |              |              |              |                             |                        |
| 800           |              |              |              |                             |                        |
| 1000          |              |              |              |                             |                        |

声速平均值：

$$\bar{u} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 u_i$$

$$\Delta u =$$

取  $\Delta x = 1\text{mm}$ ，根据（6）式推导  $u$  的不确定度计算公式（按算术平均误差传递）。

给出最后结果  $u = \bar{u} \pm U_u$

### [思考题]

1. 当空气柱长  $L \neq (2K+1)\lambda/4$  时，空气柱中是否形成驻波？
2. 为什么我们不用第一次共鸣水面位置到管口距离为  $\lambda/4$  来计算声速？
3. 本实验的主要误差来源是什么？
4. 温度为  $t^\circ\text{C}$  时，空气中的声速可用公式  $u = 331.50 + 0.6t$  (m/s) 计算. 你测出的空气中声速与由上式算出的值相差多少？
5. 你能否设计出判断管口振动最强的仪器？

## 13、光纤通讯技术实验

### [实验目的]

1. 了解光纤通信的基本工作原理。
2. 了解光纤通信中主要元器件的工作原理和部分特性。
3. 调试传输音频信息的光纤通信实验系统。

### [仪器用具]

光信号发送器、光信号接收器、光功率计、传输光纤、万用电表。

### [实验原理]

光导纤维可以用于光通讯的理论于 1966 年首次提出。1976 年首先研制成世界上第一个光纤通信系统。80 年代末，横跨太平洋、长达 8300km 及横跨大西洋、长达 6300km 的海底光缆线路先后建成并投入使用。现在以光纤光缆为主体的网络已遍布全世界。光纤通信以其多方面的优点已胜过长波通信、短波通信、电缆通信、微波通信和卫星通信，成为现代通信的主流、信息社会中信息传输和交换的主要手段。

#### 1. 光纤简介

光纤是光导纤维的简称，常用光纤是由各种导光材料做成的纤维丝。其结构分两层：内层为纤芯，直径为几微米到几十微米；外层称包层，其材料的折射率  $n_2$  小于纤芯材料的折射率  $n_1$ 。包层外面常有塑料护套保护光纤。由于  $n_2 < n_1$ ，只要入射于光纤头上的光满足一定角度要求，就能在光纤的纤芯和包层的界面上产生全反射，通过连续不断的全反射，光波就可从光纤的一端传输到另一端如图 1 所示。

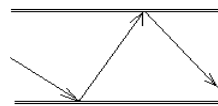


图 1

光纤的主要参数有数值孔径和衰减等。数值孔径是反映光纤接收入射光能力的一个参数，数值孔径越大，接收光的能力就越强。衰减是反映光在传播过程中能量损耗程度的参数，用每公里距离上光能(光功率)的衰减分贝数来表示。

光纤通讯的优点：① 频带宽，通信容量大。光纤通信以光波作为载体，光的频率高达  $10^{14}$  Hz。通常电话音频带宽为 4~5kHz，电视视频带宽为 8~10MHz，因此理论上，光波可携带上亿路电话，上十万路电视节目，这样大的信息容量是其他方法所不能相比的。② 中继距离长。由于技术的进步，光纤损耗已接近理论极限，现在已能做到 200 余公里不要中继站。③ 线径细，重量轻：一根光纤只相当于一根头发丝粗细，而重量与做成相同容量的电缆相比，只有电缆的几分之一或更小，④ 取材容易，价格低廉：光纤主要成分是  $\text{SiO}_2$ ，Si 是地球上最丰富的元素。⑤ 电磁干扰不易进入光纤，所以光纤抗强干扰、耐震动。光纤也耐高压、耐腐蚀。

#### 2. 系统的组成

光纤通信系统的基本工作过程是：将信息（语音、图像、数据等）按一定的方式调制到载运信息的光波上，经光纤传输到远端的接收器，再经解调将信息还原并输出。

图 5-4-2 为传输音频信息的光纤通信实验原理图，它主要包括由半导体发光二极管及其驱动、调制电路组成的光信号发生器、传输光纤和由硅光电池（一种光电二极管）、前置电路和功放电路组成的光信号接收器三个部分。

由图可见，在光纤传输过程中，将音频讯号转变成光讯号和将光讯号还原为音频讯号是整个系统的关键，下面分别介绍。

### 3. 光信号发生器

光信号发生器主要由发光二极管和驱动、调制电路组成。

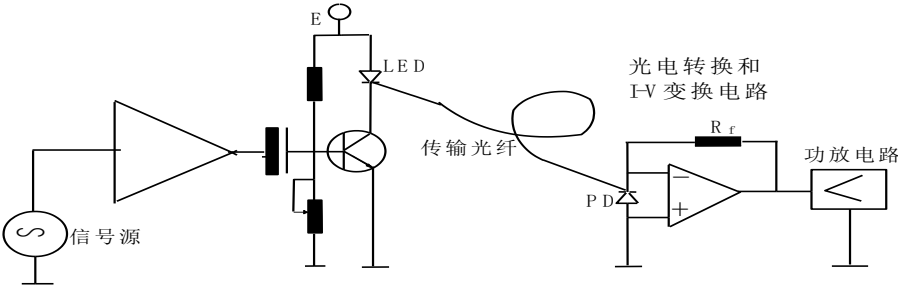


图 2 音频信号直接光强调制光纤传输系统结构原理图

#### （1）半导体发光二极管简介：

光纤通讯系统对光源器件在发光波长、电光功率、工作寿命、光谱宽度和调制性能等许多方面均有特殊要求。目前在以上各个方面都能较好满足要求的光源器件主要有半导体发光二极管和半导体激光器（简称 LD）。本实验用的是红色半导体发光二极管（简称 LED）。

半导体发光二极管是将电能转换成光能的转换器。它是一个如图 3 所示的 n-p-p 三层结构的半导体器件，中间层通常是由直接带隙的 GaAs（砷化镓）p 型半导体组成，称有源层，其带隙宽度较窄，两侧分别由 AlGaAs 的 n 型和 p 型半导体组成，与有源层相比，它们都有较宽的带隙。具有不同带隙宽度的两种半导体单晶之间的结构称为异质结，在图 3 中，有源层与左侧的 N 层之间形成的是 p-n 异质结，而与右侧的 p 层之间形成的是 p-p 异质结，故这种结构又称 n-p-p 双异质结构，简称 DH 结构。当给这种结构加上正向偏压时，就能使电子从 n 层向有源层运动，这些电子进入有源层后，因受到右边 p-p 异质结的作用不能再进入右侧的 p 层，它们只能被限制在有源层内与空穴复合。在电子与空穴复合的过程中，有不少电子要释放出能量满足以下关系的光子：



图 3 半导体发光二极管的结构及工作原理

$$h\nu = E_1 - E_2 = E_g \quad (1)$$

其中  $h$  为普朗克常数， $\nu$  是光波的频率， $E_1$  是有源层内电子的能量， $E_2$  是电子与空穴复合后处于价键束缚状态时的能量。两者的差值  $E_g$  与 DH 结构中各层材料及其组份的选取等多种因素有关，制做 LED 时只要这些材料的选取和组份的控制适当，就可使得 LED 的发光中

心波长与传输光纤的低损耗波长一致。

## (2) 驱动和调制电路

驱动和调制电路的作用是选择一个适当的基础电流（称为偏置电流），在此基础上被传音频讯号经放大后加到驱动电流上（称为调制），使其变为随音频讯号变化的电讯号，再使其通过发光二极管成为光强随被传音频讯号变化的光讯号。光纤传输系统发送端 LED 的驱动和调制电路如图 5-4-4 所示。以 BGI 为主组成的电路是 LED 的驱动电路，调节这一电路中的 W：可使 LED 的偏置电流在 0-50mA 的范围内变化。被传音频信号经由 ICI 组成的音频放大电路放大后再经电容器 C4 耦合到 BGI 的基极，对 LED 的工作电流进行调制，从而使 LED 发出光强随音频信号变化的光信号，并经光导纤维把这一讯号传至接收端。

半导体发光二极管的光是经称为尾纤的光导纤维输出的，光在光纤出口处的光功率与 LED 驱动电流的关系称 LED 的电光特性。为了避免和减少非线性失真，使用时偏置电流  $I$  一般应取在这一特性曲线线性部分中点，而调制信号的峰—峰值应位于电光特性的直线范围内。对于非线性失真要求不高的情况下，也可将偏置电流选为 LED 最大允许工作电流的一半，这有利于信号的远距离传输。

## 4. 光信号接收器-半导体光电二极管简介

光电二极管和发光二极管相似，核心也是 p-n 结，但光电二极管是把光能转为电能的转换器。在光电二极管外壳上有一个能让光照射到光敏区的窗口，光电二极管工作在反向电压下。无光照时，反向偏置的 p-n 结中只有微弱的反向漏电流—暗电流通过。当有光子能量大于 p-n 结半导体材料禁带宽度的光波照射时，p-n 结各区域中的价电子吸收光子能量后，将挣脱价键的束缚而成为自由电子，同时产生一个空穴，这些由光照产生的自由电子和空穴称为光生载流子。在远离耗尽层的 p 区和 n 区中，因电场强度弱，光生载流子只能作扩散运动，在扩散过程中因复合而消失，不可能形成光电流。而耗尽层中由于电场强度大，光生自由电子和空穴将在电场力作用下以很大速度分别向 n 区和 p 区运动，并到达电极沿外电路运动，形成光电流。方向由光电二极管的负极到正极。

本实验光讯号接收部分采用硅光电池作为光电检测元件，实现光讯号到电信号的转换，并进行放大。经  $I-V$  转换电路，把光电流转换成电压  $V_0$  输出， $V_0$  与  $I_0$  之间有以下比例关系：

$$V_0 = R_f I_0$$

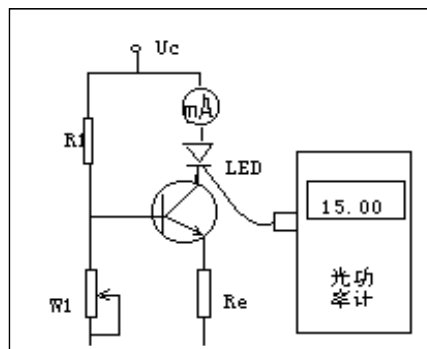
因此，可从电阻上测量输出信号大小或用扬声器输出音频信号。

调节发送端 LED 的驱动电流，从零开始，每增加 10mA 读取一次接受端  $I-V$  变换电路输出电压，根据已测得的 LED-光纤组件的光电特性曲线的  $I-V$  变换电路的反馈电阻  $R_f$  的值便可由这些测量数据算出被测硅光电池的光电特性曲线，由这一曲线，就可按下面公式算出被测量光电池的响应度：

$$R = \frac{\Delta I_0}{\Delta P_0} (\text{mA} / \text{mW})$$

其中  $\Delta P_0$  表示两个测量点对应的入照光功率和差值， $\Delta I_0$  电对应的光电流的差值。响应度表征了硅光电池的光电转换效率，它是一个在光电转换电路的设计工作中需要知道的重要参数。

## [实验及步骤]



电光特性的测定

### 1. 音频信号的传输

把发送器输入端接入收音机输出信号，把接收器功放输出端接上扬声器。调节 LED 的驱动电流和功放电路的  $W_1$ ，考察音频信号在光纤通信系统中的传输效果。

### 2. 测绘 LED 的电光特性曲线

本实验系统中由 LED 输出的光与传输光纤是直接耦合的，LED 的正负极通过光纤绕线盘上的电流插口与发送器的调制驱动电路连接（即 LED 装在绕线盘的光入口处）。

(1) 用两端为两芯插头的连接线，一端插入光纤绕线盘上的电流插孔，另一端插入发送器前面的“LED”插孔，然后把光纤的远端与光功率计的光照窗孔连接。

(2) 功率计接通电源，并调节零点。把传输光纤的尾纤轻轻插入光功率计的光电探头内，使 LED 的 mA 表示值为某一数值，调整光纤尾纤位置，使光功率计示值最大，保持此位置不动。

(3) 调节驱动电路中的“偏流调节”旋钮，使驱动电流  $I_D$  从 0—50mA 变化(由 mA 表读出)，每改变 10mA，测读光功率计对应的示值  $P_0$ 。按下表记录测量数据，根据测量数据用直角坐标纸描绘 LED—传输光纤组件的电光特性曲线，并确定出其线性度较好的线段。

(4) 绘出  $P_0 - I_D$  曲线，确定电光特性的线性区。

数据表 1 LED—传输光纤组件的电光特性测量数据表

|                  |   |    |    |    |    |    |
|------------------|---|----|----|----|----|----|
| $I_D$ (mA)       | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $P_0$ ( $\mu$ W) |   |    |    |    |    |    |

### 3. 测定光电二极管的光电特性

(1) 将传输光纤的尾纤轻轻插入接收器的光接收插孔，并使其处于最佳耦合状态。

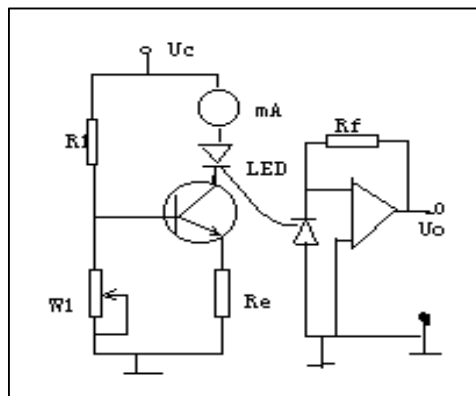
(2) 调节“偏流调节”旋钮，使驱动电流从 0—50mA 变化，每改变 10mA，测读一次电流—电压变换电路的输出电压  $V_0$ 。

数据表 2 LED—传输光纤组件的光电特性测量数据表

|                         |   |    |    |    |    |    |
|-------------------------|---|----|----|----|----|----|
| $I_D$ (mA)              | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $V_0$ (mV)              |   |    |    |    |    |    |
| $R_f$ (k $\Omega$ )     |   |    |    |    |    |    |
| $I_0 = \frac{V_0}{R_f}$ |   |    |    |    |    |    |

4. 由  $P_0 - I_D$  关系和  $I_0 - I_D$  关系，可得  $I_0 - P_0$  关系，这就是光电二极管的光电特性关系。将按下表数据整理，并绘出  $I_0 - P_0$  曲线。（ $R_f$  由实验给出）

数据表 3  $I_0 - P_0$  关系曲线数据表



光电特性的测定

|                  |   |    |    |    |    |    |
|------------------|---|----|----|----|----|----|
| $I_D$ (mA)       | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $P_0$ ( $\mu$ W) |   |    |    |    |    |    |
| $I_0$ (mA)       |   |    |    |    |    |    |

4. 由  $I_0 - P_0$  曲线求光电二极管在红光处的响应度  $R = \Delta I_0 / \Delta P_0$ 。

#### [注意事项]

1. 有关仪器的使用，实验前应仔细阅读相关资料。
2. 传输光纤虽有护套，也易损坏，应小心使用。
3. 插入或拔出光纤的尾纤均要格外小心，并细心调节，使耦合最佳。

#### [思考题]

1. 光波在光纤中传输时，除衰减外，还有色散，色散对信息传输有何影响？
2. 您能分析能否用光栅来做分波器或合波器吗？

## 14、用旋光仪测定液体的浓度

### [实验目的]

1. 观察线偏振光通过旋光物质的旋光现象。
2. 了解旋光仪的结构原理并掌握其使用。
3. 测定旋光溶液的旋光率和浓度。

### [仪器用具]

WXG-4 型旋光仪，葡萄糖（蔗糖）溶液，测试管。

### [实验原理]

#### 1. 旋光现象

线偏振光通过某些溶液（如糖溶液）或透明物质后，偏振光的振动面将转过一定角度 $\phi$ ，这种现象称为旋光现象，旋转的角度称为这种物质的旋光度。

对溶液来说，实验证明：旋光度 $\phi$ 与溶液的厚度  $L$  和浓度  $C$  的乘积成正比：

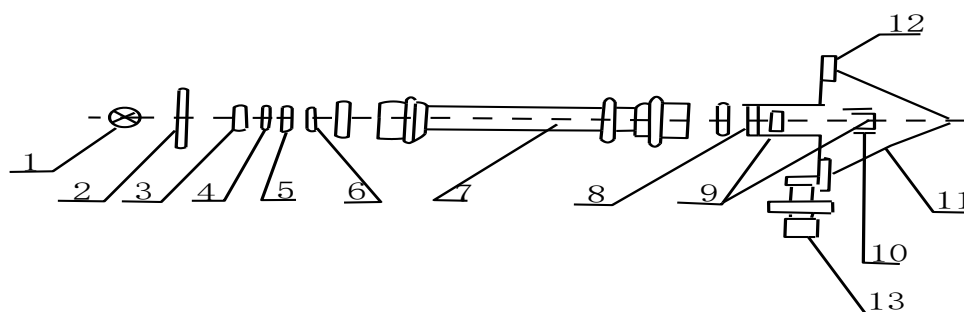
$$\phi = \alpha CL \quad (1)$$

$\alpha$ 表示物质的旋光性质，对一定的物质是一常数，称为旋光率，它在数值上等于线偏振光通过厚度 1 分米，浓度 1 ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ) 的溶液层后，其偏振面旋转的角度。

同一物质对不同波长的光有不同的旋光率，旋光率与人射光的波长平方成反比，即随波长减少而迅速增大，常用钠光的 D 线 ( $\lambda_{\text{Na}} = 5893 \text{ \AA}$ ) 来测定旋光率。旋光率与温度有关，实验时要注明温度。(1) 式即为旋光定律。

#### 2. 旋光仪简介

旋光仪是用来测定物质旋光度的仪器，其结构如图 1 所示。测量时，先将旋光仪中起偏



1. 光源 2. 毛玻璃 3. 聚光镜 4. 滤色镜 5. 起偏镜 6. 半波片 7. 试 管 8. 检偏镜  
9. 物镜、目镜组 10. 调焦手轮 11. 读数放大镜 12. 度盘及游标 13. 度盘转动手轮

图 1 旋光仪结构示意图

镜和检偏镜的偏振轴调到正交位置，这时目镜中看到最暗但并非全黑的视场，称作光学零点

位置，然后装上盛有旋光物质溶液的试管，使起偏后的单色光的振动面发生旋转，从而会有部分光线通过检偏镜而使视场变亮，接着再转动检偏镜，可使视场重新达到光学零点状态，此时检偏镜转过的角度就等于待测溶液的旋光度。

由于人眼难以准确地判断视场是否黑暗，因此采用半荫式结构，用比较视场中相邻两光束的强度是否相同来确定光学零点，从而确定旋光度，其装置示意图见图 2。在起偏镜后加一条形石英半波片，它和起偏镜中间部分在视场重叠。将视场分为三部分。同时在石英片旁装上一定厚度的玻璃片，以补偿石英片产生的光强减弱。石英半波片的光轴平行于其表面并与起偏镜的偏振轴成一角度 $\theta$ （约几度）。光源发出的自然光经起偏镜后变成线偏振光，其中间部分的光再经过石英半波片后其振动面相对于入射到石英片上的线偏振光的振动面转过了 $2\theta$ 角，所以进入试管的光是振动面夹角为 $2\theta$ 的两束线偏振光。

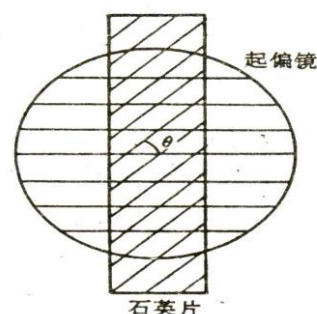


图 2 三分视场

在图 3 中， $OP$  和  $OA$  分别表示起偏镜和检偏镜的偏振轴， $OP'$  表示透过石英片后偏振

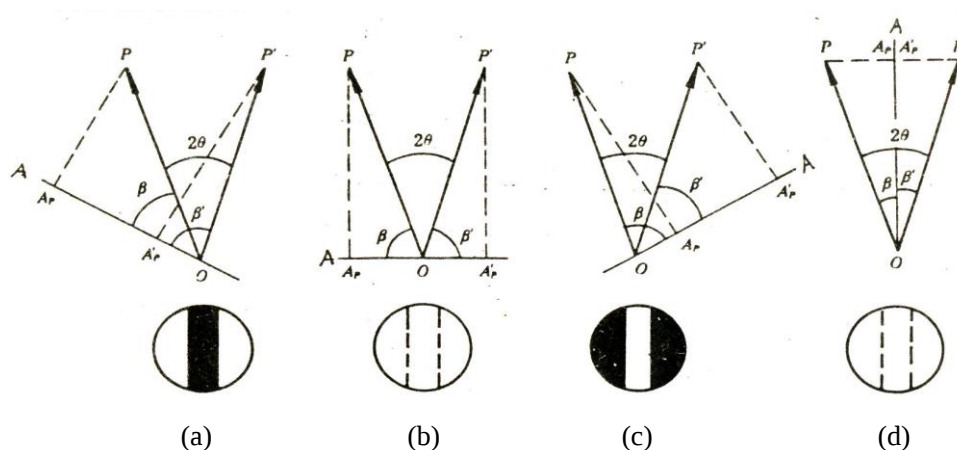


图 3 转检偏镜时，目镜中视场的亮暗变化图

光的振动方向， $\beta$ 表示  $OP$  与  $OA$  的夹角， $\beta'$ 表示  $OP'$  与  $OA$  的夹角，再以  $A_p$  和  $A'_p$  分别表示通过起偏镜和石英片的偏振光在检偏镜偏振轴方向的分量（振幅）；则由图可知，当转动检偏镜时， $A_p$  和  $A'_p$  的大小将发生变化，反映在从目镜中见到的视场内将出现亮暗的交替变化，图中列出四种显著不同的情形。

(a)  $\beta' > \beta$ ,  $A_p > A'_p$ , 视场中与石英片对应的部分中间为暗区，与起偏镜对应的部分（两边弓形区）为亮区，视场被分为清晰的三部分。当  $\beta = \pi/2$  时，亮暗反差最大。

(b)  $\beta' = \beta$ ,  $A_p = A'_p$ , 视场中三部分界线消失，亮度相等，但较暗。

(c)  $\beta' < \beta$ ,  $A_p < A'_p$ , 视场中间部分为亮区，两边部分为暗区，分界明显， $\beta = \pi/2$  时，亮暗反差最大。

(d)  $\beta' = \beta$ ,  $A_p = A'_p$ , 视场中三部分界线消失，亮度相等，此时较亮。

因为在低亮度环境中，人眼分辨亮度差别的能力最强，所以一般取(b)图所示的视场作为参考视场，即所谓光学零点，并将此时检偏镜偏振轴的位置作为刻度盘的零点。

将装有待测溶液的测试管装入旋光仪后，透过起偏镜和石英片的两束线偏振光均通过试管溶液，它们的振动面均转过相同角度  $\phi$ ，夹角仍为  $2\theta$ 。转动检偏镜，使视场仍回到(b)图所示的光学零点位置，则检偏镜转过的角度  $\phi$  即为被测溶液的旋光度。

### [实验内容]

#### 1、测定糖溶液的旋光率

##### (1) 定旋光仪的光学零点。

把钠光灯点亮，待发光正常后，调节目镜焦距旋钮，使能看清三分视场。

调节目镜手轮，观察并熟悉视场变化的规律，使视场最暗而非全黑，分界线消失，亮度相等，则刻度盘上左右窗读出的示数就是光学零点  $\theta_{0左}$ ， $\theta_{0右}$ 。重复测 3 次取平均值  $\bar{\theta}_0$ 。

##### (2) 测定旋光度

把盛满溶液（浓度已知）的试管放入旋光仪中盖好，观察视场有何变化，转动目镜手轮，使视场分界线消失，重现光学零点，在最暗的情况下，刻度盘示数就是新的光学零点  $\theta_{左}$ 、 $\theta_{右}$ ，则旋光度由下式计算：

$$\phi = \frac{1}{2} [(\theta_{左} - \theta_{0左}) + (\theta_{右} - \theta_{0右})] \quad (2)$$

(3) 使手轮转动几十度，重复步骤 (2)，再测。共测三次。

(4) 根据测量数据，计算糖溶液的旋光率。

#### 2、测糖溶液的浓度

(1) 将另一盛有未知其浓度值的溶液试管，装入旋光仪中，照上面的方法，测三次。

(2) 根据测量数据计算糖溶液的浓度。

# 15、光电二极管伏安特性测定

## [实验目的]

- 1. 了解晶体二极管的伏安特性。
- 2. 学会用伏安法测绘晶体二极管的伏安特性曲线。

## [仪器用具]

毫安表、微安表、伏特计、直流稳压电源、滑线变阻器、开关、晶体二极管等。

## [实验原理]

### 1. 晶体二极管简介

从导电性能上说，材料可分为导体、半导体和绝缘体三类，半导体的导电性能处于导体和绝缘体之间，而且对光照与受热很敏感。纯净的半导体单晶的导电能力较弱，但只要加入微量的“杂质”，它的导电能力便可大大提高（可增大几千倍）。p 型半导体是在纯净半导体（也称本征半导体）中掺入微量三价元素（如硼）而形成的，它的空穴浓度高，依靠空穴移动而导电。n 型半导体是在纯净半导体中掺入微量五价元素（如磷）而形成，它的电子浓度高，依靠电子移动而导电。

当 p 型和 n 型半导体相互“接触”时，p 型一方由于空穴浓度高就要向缺少空穴的 n 型区扩散，同样 n 型区的电子也要向 p 型区扩散。随着扩散的进行，在两区的交界面上形成带正电和带负电的薄层，这薄层间就建立起一个电场

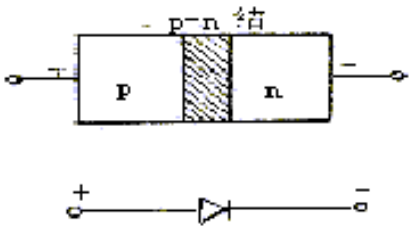


图 3-1-1 p-n 结

$E_0$ ，

这一电场会阻碍空穴和电子的继续扩散。当阻碍作用和扩散达到平衡时，半导体内再无电荷移动，这一正负电荷的薄层叫做 p-n 结，如图 3-1-1 所示。p-n 结的代表符号也如图 3-1-1 所示。

二极管就是具有一个 p-n 结的晶体管。其中 p 区的引出线为正端，n 区的引出线为负端如图 3-1-2(a)。若将正端接入外电路的高电位端，负端接入外电路的低电位端，即在 p-n 结上加一正向电压，如图 3-1-2(b) 所示。此时外加电场  $E$  的方向与 p-n 结的内电场  $E_0$  方向相反，因而削弱了阻挡层，使其变薄。这时扩散运动加强，形成正向电流，p-n 结导通，电阻很小。

若将二极管负端接入外电路的高电位端，正端接入低电位端，则在 p-n 结上加一反向电压，如图 3-1-2(c) 所示。此时外加电场与 p-n 结内电场一致，这就加强了阻挡层，使其变厚。这时 p 区空穴、n 区电子更难越过 p-n 结区，p-n 结处于截止状态，电阻很大。这就是晶体二极管的单向导电原理。

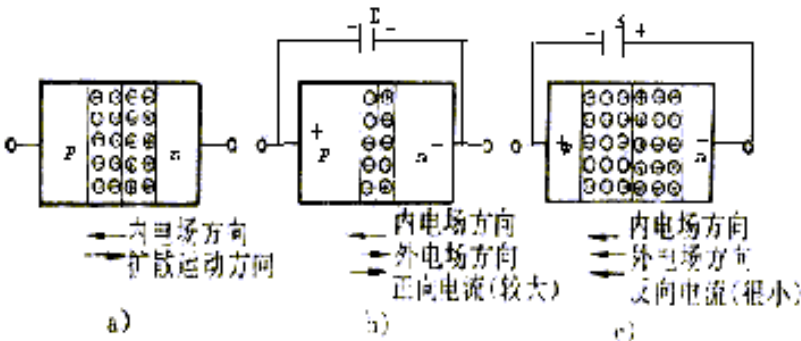


图 3-1-2 p-n 结的单向导电原理

## 2. 二极管的伏安特性曲线

由欧姆定律有

$$R = \frac{V}{I} \quad (3-1-1)$$

如果在实验中能准确测出电阻  $R$  上的电压  $V$  和电流  $I$ ，就可以求出电阻  $R$  的阻值。这种测量电阻的方法称为伏安法。电路元件两端所加的电压与流过该元件的电流之间的关系，称为该元件的伏安特性，描写这一关系的曲线称为伏安特性曲线。若元件两端的电压与通过元件的电流成正比，相应的伏安特性曲线为一直线，此元件称为线性元件，否则为非线性元件。

晶体二极管为非线性元件，流过晶体二极管的电流与加于两端的电压不成正比。常用的晶体二极管的伏安特性曲线一般具有类似图 3-1-3 的形状。正反向特性曲线分别在第一、三象限，由图可见晶体二极管的外加正向电压与正向电流不成正比，即不满足欧姆定律；外加反向电压时，反向电流极小，当反向电压达某个值时，反向电流迅速增大，该电压称为反向击穿电压。反向击穿电压一般将损坏晶体管。在正常散热情况下，二极管正向电流太大也会损坏二极管。每个晶体二极管都规定有最大允许正向电流和最大允许反向电压。

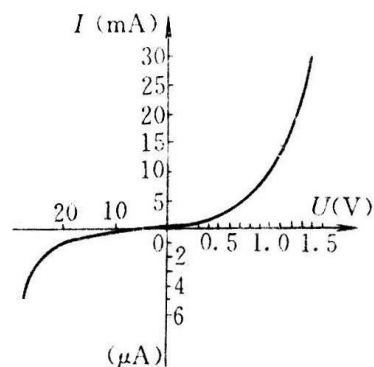


图 3-1-3 晶体二极管的伏安特性曲线

## 3. 测量电路误差分析

从 (3-1-1) 式可得

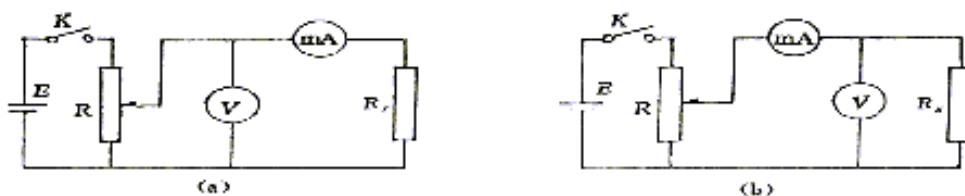


图 3-1-4

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V}$$

在伏安法的测量中，在被测元件电阻  $R$  允许的功率范围内，采用的测量电流（电压）越大，测量结果的误差越小。其中  $\Delta V$  和  $\Delta I$  为仪器误差，由表头最小刻度与量程决定。同时，由于电表准确度的限制也会带来测量误差，因此还要求电流表和电压表具有较高的准确度等级。同时使被测的  $I$ 、 $V$  值在电表量程的 70%—90% 左右。

另外，为了使测量电路的系统误差尽可能小，通常在同时使用电流表和电压表测量电阻上的电流电压时，根据被测量元件的阻值的大小，有电流表内接法和电流表外接法等不同方法。

(1) 电流表内接法：如图 3-1-4(a) 所示。电流表的读数  $I$  为通过待测电阻  $R_x$  的电流值，

但电压表的读数  $V$  不是待测电阻  $R_x$  的端电压  $V_x$ ，而是待测电阻上电压和电流表上电压  $V_A$

之和, 即  $V = V_x + V_A$ , 设电流表的内阻为  $R_A$ , 则

$$\frac{V}{I} = \frac{V_x + V_A}{I} = R_x + R_A$$

$$R_x = \frac{V}{I} - R_A \quad (3-1-2)$$

如果将  $\frac{V}{I}$  视作被测电阻的值, 则此法引入的系统误差为

$$E = \left| \frac{\frac{V}{I} - R_x}{R_x} \right| = \frac{R_A}{R_x} \quad (3-1-3)$$

即待测电阻阻值越大, 误差愈小; 电流表内阻愈小, 误差也越小。

(2) 电流表外接法: 如图 3-1-4(b) 所示。此时电压表的读数  $V$  等于待测电阻  $R_x$  两端的电压  $V_x$ , 但电流表的读数  $I$  等于电压表与待测电阻  $R_x$  上的电流之和, 即  $I = I_x + I_V$ 。设电压表内阻为  $R_V$ , 则

$$\frac{V}{I} = \frac{R_x + R_V}{R_x R_V}$$

$$R_x = \frac{V}{I - \frac{V}{R_V}} \quad (3-1-4)$$

在实验中如果仍将  $\frac{V}{I}$  视作被测电阻的值, 则此法引入的系统误差为

$$E = \left| \frac{\frac{R_x R_V}{R_x + R_V} - R_x}{R_x} \right| = \left| \frac{-R_x}{R_x + R_V} \right| = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x}} \quad (3-1-5)$$

即待测电阻阻值越小, 误差越小; 电压表内阻越大, 误差也越小。

可见, 由于线路中仪表内阻的原因, 不管电流表是内接还是外接, 都要引入系统误差, 但合理的安排可以减小这一系统误差。在  $R_A$  和  $R_V$  一定的条件下, 当  $R_x$  较小时 (即  $R_x \approx R_A$ ,  $R_x \ll R_V$ ), 采用电流表外接法系统误差较小; 当  $R_x$  较大时, 采用电流表内接法系统误差较小。

### [实验内容及步骤]

#### 1. 测绘晶体二极管的正向伏安特性曲线

(1) 由于二极管的正向电阻小, 测试电压也小, 但电流较大, 故采用电流表外接法。按图 3-1-5 接好线路。

(2) 由 0V 开始, 每隔 0.05V 读一次电流表, 并将所读数据记入表中, 直到电压为 0.4V (或电流值比所用二极管的最大允许正向电流值低 5mA) 为止。

#### 2. 测绘二极管的反向伏安特性曲线

(1)由于二极管反向电阻很大，测试电流小，电压大，故采用微安表内接法。按图 3-1-6 接好线路。

(2)由 0V 开始，每隔 1.5V 读一次微安表，并将所读数据记入表中，直到电压为 12.0V（或比所用二极管的最大允许反向电压值低 2V）为止。

3. 注意所用电表的准确度等级。电表的仪器误差为 $\Delta N = \text{量程} \times \text{准确度等级的百分数}$ ， $\Delta N$ 决定电表读数的有效数值的位数。

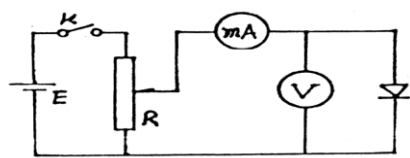


图 3 - 1 - 5 测正向伏安特性电路图

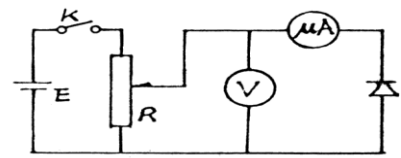


图 3 - 1 - 6 测反向伏安特性电路图

[数据及处理]

| 实验点    |       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 正<br>向 | V(V)  | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 |
|        | I(mA) |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 反<br>向 | V(V)  | 1.5  | 3.0  | 4.5  | 6.0  | 7.5  | 9.0  | 10.5 | 12.0 |
|        | I(μA) |      |      |      |      |      |      |      |      |

二极管型号:\_\_\_\_\_

最大允许正向电流\_\_\_\_\_；最大允许反向电压\_\_\_\_\_

1. 在同一坐标纸上画出二极管的正向与反向伏安特性曲线，注意：正、反向电压、电流差值较大，作图时应选取不同长度单位。
2. 指出二极管伏安特性曲线的特点。

[思考题]

1. 正向特性曲线上任一点到坐标原点连线的斜率代表什么？不同点的连线斜率相同否？说明二极管有什么特性。
2. 二极管特性曲线所表征的二极管特性可能有什么应用价值？

## 附录1 数显容栅尺说明

电容位移测量装置包括一个可相对于测量装置纵向移动的带状标尺（10），测量装置内有几组电极（22至25），通过线路（27）与电子装置连接。带尺由金属制成，上面具有许多等间隔的矩形窗孔（11）。带尺（10）与发射电极相对的接收电极（29）一起构成差动电容器，用来完成电容位移测量。

电容位移测量装置，包括一带状标尺和一测量装置，测量装置上有一系列的发射电极和含一个或多个接收电极的传感器，其位置可由差动电容传感器确定。把大测量极板分成数个小测量极板，这样由于转换功能的精度不够所造成的转换误差不会损害传感器的精度。

因此，误差为千分之一的不精确度相当于一米测量极板有一毫米的误差。另一方面，如果测量极板是一毫米的标尺则其转换误差只有一微米。如补偿分度方面的误差，通过几个刻度同时进行测量比较有利。在此情况下，几个顺次排列的基本电容就构成单个的或差动的电容。

为此，该测量装置的标尺由导电带尺构成，其上有数个间隔相等的窗口，带尺通过测量极板时，这些窗口与几个由基本电容器组成的电极一起，构成差动电容。此电容可变，它是带尺与测量极板相对位置的函数。

由于这些特点，这样的标尺结构简单，然而在测量精度方面有一些优异性能。另一个优点就是带尺可在其弹性极限内拉长，这就有可能调整其长短，该带尺还可以接地，因此它不需任何电的连接。

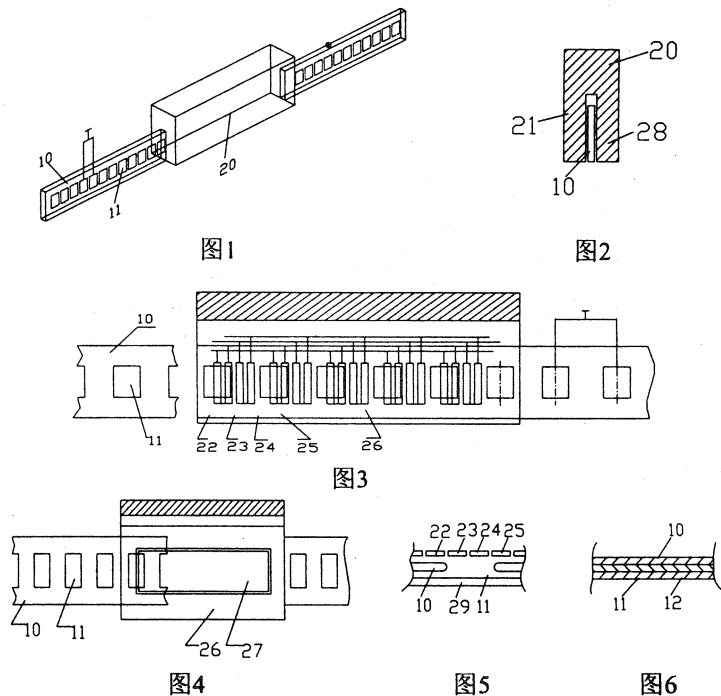


图1：标尺和测量装置的透视图

图2：沿标尺垂直方向的剖面图

图3：展示出发射电极的该测量装置的纵向剖面图

图4：展示出接收电极的剖面

图5：以示意图说明电极的排列图

图6：带介质零件的测量装置的剖面图

如图 1 和图 2 所示，该装置包括一个由金属带 10 构成的标尺和一个测量装置 20。带尺 10 上有间隔相等的矩形窗孔 11，相邻窗孔的中心轴线之间的距离设定为  $T$ ，测量装置 2。

带尺 10 安排在面 21 和 28 之间，发射电极的涂敷面（如图 3 所示）包含  $2N$  整数倍的电极有，。在图中所示情况下  $2N=4$ 。

在本例中，如电极 22，23，24，25 之间的距离为  $T$ ，则  $T/2N$  为  $T/4$ 。所以对带尺 10 窗孔中心轴线之间的距离值  $T$ ，计数  $2N$  的话，即四个电极。在本例中各电极通过线 27 与电子装置连接，成为  $N$  个电极。从电的观点看，两个电极构成差动电容器极，另一级  $N$  个电极构成此差动电容器的第二电极。差动电容器的共用板是由接收电极 29 上位置与窗孔 11 相对应的部分构成（如图 5 所示）。

因此，测量装置 20 的电极一带尺 10 的窗孔 11 组成一系列的差动电容器，它们按顺序连接以形成一个差动电容器。差动电容的变化与带尺的位移成比例，如果带尺的移动超过了规定值，电气装置就把发送电极的供电窜过一个电极来。

从电的观点看，刻度变化的方式是由  $N$  个电极形成的极板以  $T/2N$  的极数来跟随带尺 10 的窗孔 11 的位移，在本例中即以  $T/4$  的级数，这样可给出近似测量结果。接收电极必须与发射电极系列一样或比发射电极系列还长。在此情况下，整排发射电极的长度必须等于距离  $T$  的整数倍。在这两种情况下，为避免边缘效应和外部干扰，最好用位于测量装置主体上的涂敷面 29 将接收电极 29 围绕起来（如图 3 和图 4 所示）。

为了不让杂质落到带尺 10 的窗孔 11 上并保护带尺，从机构和化学观点来看，可用图 6 所示之聚四氟乙烯制成。保护层不会影响这些装置的功能。

数显表头的使用方法及维护

- 1、inch/mm 按钮为英/公制转换用，测量声速时用“mm”
- 2、“OFF”“ON”按钮为数显表头电源开关
- 3、“ZERO”按钮为表头数字回零用。
- 4、数显表头在标尺范围内，接收换能器处于任意位置都可设置“0”位。摇动丝杆，接收换能器移动的距离为数显表头显示的数字。
- 5、数显表头右下方有“▼”处打开为更换表头内扣式电池处。
- 6、使用时，严禁将液体淋到数显表头上，如不慎将液体淋入，可用电吹风吹干（电吹风用低档，并保持一定距离，使温度不超过  $60^{\circ}\text{C}$ ）。
- 7、数显表头与数显杆尺的配合极其精确，应避免剧烈的冲击和重压。
- 8、仪器使用完毕后，应关掉数显表头的电源，以免不必要的消耗电池。