

专业基础课程补充教材

基础物理实验

目 录

课程安排.....	1
本学期实验题目.....	2
补充材料 实验数据的处理.....	3
补充实验 1 示波器的原理及使用.....	6
补充实验 2 铈化铟磁阻传感器的特性测量.....	13
补充实验 3 二极管的伏安特性测量及应用.....	16
补充实验 4 <i>LCR</i> 串联谐振电路.....	20
补充实验 5 量子论实验 ——原子能量量子化的观察与测量.....	23
补充实验 6 光的衍射.....	27

复旦大学物理教学实验中心

<http://phylab.fudan.edu.cn>

2014 年 2 月

课程安排

第 1 周：讲课—绪论课（大教室）

第 2 周：讲课—数据处理课（大教室）

第 3-16 周：12 次实验课、1 次讨论课（光华楼西辅楼 8 楼实验室）

第 17 周：答疑、考试（笔试）

从第三周开始，每周二下午 13:00—15:00 实验室开放，每个实验室在该时段均有教师值班，欢迎同学前来预习或答疑。

本学期实验题目

第一循环： 光华楼西辅楼 804 室 实验 4-15 必做，实验 3-2、实验 4-5 中选做其中一个

实验 4-15：液氮比汽化热的测量

实验 3-2：碰撞打靶

实验 4-5：用扭摆法测定物体转动惯量实验

第二循环： 光华楼西辅楼 801 室 补充实验 1 必做，补充实验 2、补充实验 3 中选做一个

补充实验 1：示波器的原理及使用（补充教材）

补充实验 2：铽化钕磁阻传感器的特性测量（补充教材）

补充实验 3：二极管的伏安特性测量及应用（补充教材）

第三循环： 光华楼西辅楼 802 室 补充实验 4 必做，实验 5-3、实验 5-11 中选做一个

补充实验 4：LCR 串联谐振电路（补充教材）

实验 5-3：直流电桥

实验 5-11：圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场（预习前请先阅读实验网页上的实验要求）

第四循环： 光华楼西辅楼 805B 室 补充实验 5、实验 7-13 皆必做

补充实验 5：量子论实验—原子能量量子化的观察与测量（补充教材）

实验 7-13：X 光实验—X 光透视与食盐晶体的结构分析

第五循环： 光华楼西辅楼 805A 室 补充实验 6 必做，实验 6-1、实验 6-2 中选做一个

补充实验 6：光的衍射（补充教材）

实验 6-1：眼镜片（透镜）焦距的测量

实验 6-2：牛顿环

第六循环： 光华楼西辅楼 803 室 实验 7-4 必做，实验 7-5、实验 7-6 中选做其中一个

实验 7-4：计算机实测物理实验（实测系列实验器材和软件已更新，预习请注意网页提示）

实验 7-5：用计算机实测技术研究冷却规律

实验 7-6：用计算机实测技术研究声波和拍

补充材料 实验数据的处理 (上接教材《基础物理实验》第二章, p.19)

注意: (1) 用最小二乘法计算斜率 k 和截距 b 时, 不宜用有效数字的运算法则计算中间过程, 否则会有较大的计算误差引入。提倡用计算器计算, 将所显示的数值均记录下来为佳。(2) 如果 y 和 x 的相关性好, 可以粗略考虑 b 的有效位数的最后一位与 y 的有效数字最后一位对齐, k 的有效数字与 $y_n - y_1$ 和 $x_n - x_1$ 中有效位数较少的相同。(3) 确定有效位数的可靠方法是计算 k 和 b 的不确定度。

直线拟合的不确定度估算: (以 $y = kx + b$ 为例)

斜率 k 和截距 b 是间接测量物理量, 分别令测量数据的A类和B类不确定度分量中的一个分量为零, 而求得另一个分量比较简单, 最后将两个分量按直接测量的合成方法求出合成不确定度, 这种方法被称为等效法。

可以证明, 在假设只有 y_i 存在明显随机误差的条件下 (且 y 的仪器不确定度远小于其A类不确定度), k 和 b 的不确定度分别为:

$$S_k = \frac{S_y}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}}$$
$$S_b = S_k \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = S_y \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

式中, S_y 是测量值 y_i 的标准偏差, 即

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - kx_i - b)^2}{n-2}}$$

根据上述公式即可算出各个系数 (斜率 k 和截距 b) 的不确定度值, 初看上去计算似乎很麻烦, 但是利用所列的数据表格, 由表中求出的那些累加值 Σ 即可很容易算得。

最小二乘法应用举例

应用最小二乘法处理物理量的测量数据是相当繁琐的工作, 容易出现差错。因此, 工作时要十分细心和谨慎。为便于核对, 常将各数据及计算结果首先表格化。

例: 已知某铜棒的电阻与温度关系为: $R_t = R_0 + \alpha \cdot t$ 。实验测得7组数据 (见表1) 如下: 试用最小二乘法求出参量 R_0 、 α 以及确定它们的误差。

表 1

$t / ^\circ\text{C}$	19.10	25.10	30.10	36.00	40.00	45.10	50.10
R_t / Ω	76.30	77.80	79.75	80.80	82.35	83.90	85.10

此例中只有两个待定的参量 R_0 和 α , 为得到它们的最佳系数, 所需要的数据有 n 、 $\sum x_i$ 、 $\sum y_i$ 、 $\sum x_i^2$ 、 $\sum y_i^2$ 和 $\sum x_i y_i$ 六个累加数, 为此在没有常用的科学型计算器时, 通过列表计算的方式进行, 这对提高计算速度将会有极大的帮助 (参见表2), 并使工作有条理与不易出错。其中表内双线右边的计算是为了确定 R_0 和 α 的误差项用的。

表 2

i	$t / ^\circ\text{C}$ (x_i)	R_t / Ω (y_i)	$t \times t$ (x_i^2)	$R_t \times R_t$ (y_i^2)	$t \times R_t$ ($x_i y_i$)	$R_{\text{计算}} / \Omega$	v_i / Ω	$v_i^2 \times 10^{-4}$
1	19.10	76.30	364.81	5821.7	1457.3	76.26	+0.04	16
2	25.10	77.80	630.01	6052.8	1952.8	77.99	-0.19	361
3	30.10	79.75	906.01	6360.1	2400.5	79.43	+0.32	1024
4	36.00	80.80	1296.0	6528.6	2908.8	81.13	-0.33	1089
5	40.00	82.35	1600.0	6781.5	3294.0	82.28	+0.07	49
6	45.10	83.90	2034.0	7039.2	3783.9	83.75	+0.15	225
7	50.10	85.10	2510.0	7242.0	4263.5	85.19	-0.09	81
$n = 7$	$\sum x_i = 245.50$	$\sum y_i = 566.00$	$\sum x_i^2 = 9340.8$	$\sum y_i^2 = 45825.9$	$\sum x_i y_i = 20060.8$			$\sum v_i^2 = 2845 \times 10^{-4}$

根据表 2 中所求得的数据，代入公式 (12) (参见教材第二章，p.19) 则可得：

$$\alpha = k = \frac{7 \times 20060.8 - 245.50 \times 566.00}{7 \times 9340.8 - (245.50)^2} = \frac{1472.6}{5115.35} = 0.28788 \Omega / ^\circ\text{C}$$

$$R_0 = b = \frac{566.00}{7} - 0.28788 \cdot \frac{245.50}{7} = 70.76078 \Omega$$

把测量数据代入式 (13) 和 (15) (参见教材第二章，p.19) 中可求出相关系数

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2] \cdot [\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2]}} = \frac{20060.8 - \frac{245.50 \times 566.00}{7}}{\sqrt{[9340.8 - \frac{(245.50)^2}{7}] \times [(45825.9 - \frac{(566.00)^2}{7})]}} \\ &= k \times \frac{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2}}{\sqrt{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2}} = 0.28788 \times \frac{\sqrt{9340.8 - \frac{(245.50)^2}{7}}}{\sqrt{45825.9 - \frac{(566.00)^2}{7}}} = 0.99757 \end{aligned}$$

说明：电阻 R_t 与温度 t 的线性关系良好，所以取 R_0 的有效数字与 R 对齐，即 $R_0 = 70.76 \Omega$ ；又因为 $t_7 - t_1 = 31.00 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $R_7 - R_1 = 8.80 \Omega$ ，取 k 有效数字为以上两个差值中较少的位数 3 位，则 $k = 0.288 \Omega / ^\circ\text{C}$ 。由此可以得到电阻与温度的相关关系为：

$$R_t = 70.76 + 0.288t$$

按补充资料中的公式计算 k 和 b 的不确定度，可得

$$S_y = S_{R_t} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{2845 \times 10^{-4}}{7-2}} = 0.239 (\Omega)$$

$$S_k = S_\alpha = \frac{S_y}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}} = \frac{0.239}{\sqrt{9340.8 - \frac{(245.50)^2}{7}}} = 0.239 \times 0.03699 = 0.0088(\Omega / ^\circ\text{C})$$

$$S_b = S_{R_0} = S_k \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 0.0088 \times \sqrt{\frac{9340.8}{7}} = 0.33(\Omega)$$

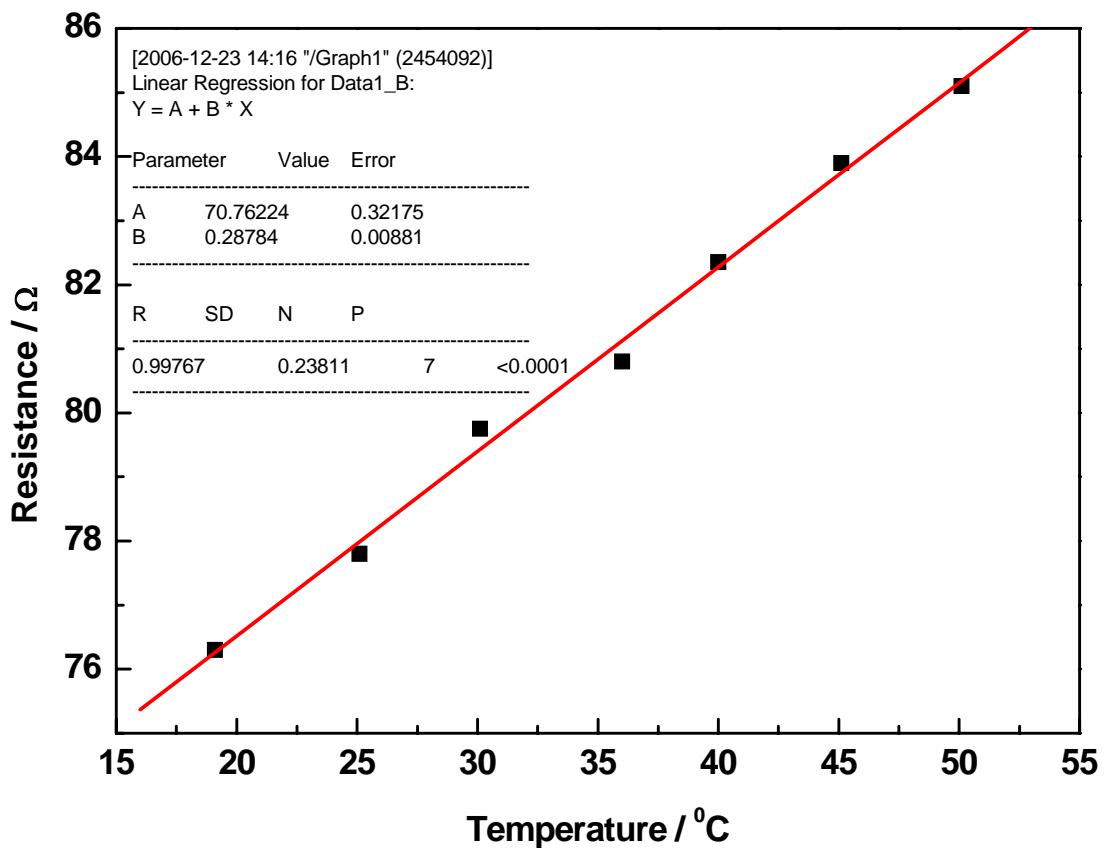
故 $R_0 = (70.76 \pm 0.33)\Omega = (70.8 \pm 0.3)\Omega$,

$\alpha = (0.2879 \pm 0.009)\Omega / ^\circ\text{C} = (0.288 \pm 0.009)\Omega / ^\circ\text{C}$

则 $R_t = 70.8 + 0.288t$

验证及比较最后的计算结果:

利用计算机软件 (Origin 7.5) 对上述实验数据进行线性拟合, 发现: 其斜率、截距及其标准偏差, 以及测量值 y_i 的标准偏差与直接用所述公式进行计算的结果是完全一致的 (仅讨论A类不确定度, 而B类不确定度未考虑)。



补充实验 1 示波器的原理及使用

示波器是一种显示各种电信号波形的仪器。它利用被测信号产生的电场对示波管中电子运动的影响来反映被测信号电压的瞬变过程。由于电子惯性小，荷质比大，因此示波器具有较宽的频率响应，用以观察变化极快的电压瞬变过程，因而它具有较广的应用范围。一切能转换为电压信号的电学量（如电流、电功率、阻抗等）和某些非电学量（如温度、位移、速度、压力、光强、磁场、频率等）以及它们随时间的瞬变过程都可以用示波器进行观察和测量分析。本实验通过用示波器观察各种电信号的波形，测量直流电压；测量交流信号的电压、周期、频率和位相等参数。了解示波器的基本结构及工作原理，较熟练地掌握示波器的调节和使用。

实验原理

一、示波器的结构及简单工作原理

示波器一般由 5 个部分组成，如图 1 所示。(1) 示波管；(2) 扫描发生器；(3) 同步电路；(4) 水平轴和垂直轴放大器；(5) 电源。下面分别加以简单说明。

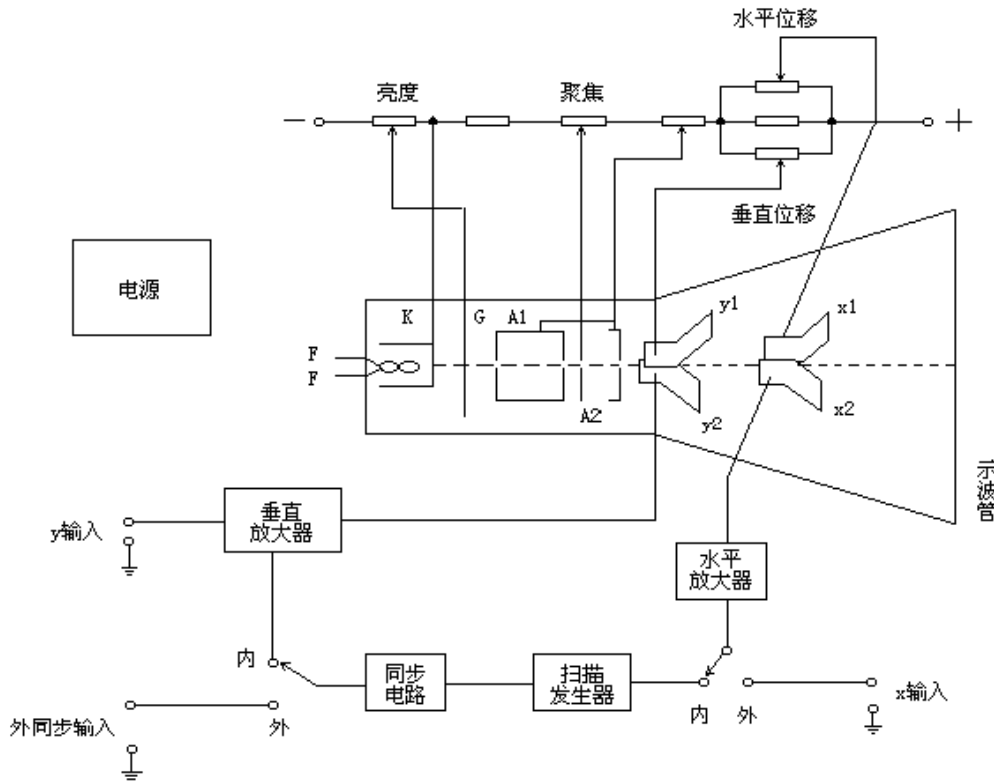


图 1 示波器原理图

(1) 示波管

示波管是示波器中的显示部件。在一个抽成真空的玻璃泡中，装有各种电极，其结构如图 1 所示。阴极K受灯丝F加热而发射电子，这些电子受带正高压的加速阳极A₁的加速，并由A₁、A₂组成的聚焦系统，形成一束很细的高速电子流到达荧光屏。荧光屏上涂有荧光粉，它在这些高速电子的激发下发光。光点的大小取决于A₁、A₂组成的电子透镜的聚焦。改变A₂相对A₁的电位，可以改变电

子透镜的焦距，使其正好聚焦在荧光屏上，成为一个很小的亮点。因此，调节 A_2 的电位，称为“聚焦”调节。示波管内装有两对互相垂直的平行板（ x_1 、 x_2 和 y_1 、 y_2 ），如在垂直方向的平行板 y_1 、 y_2 上加周期变化的电压，电子束通过时受到电场力的作用而上下偏转，在荧光屏上就可以看到一根垂直的亮线；同理，在水平方向的平行板 x_1 、 x_2 上加周期变化的电压，也可以看到一根水平亮线。因而，在这两对平行板上加变化的电压能对运动的电子束产生偏转作用，这两对平行板称为偏转板，其符号如图 2（此也常作为示波器的符号）。在控制栅极G上加相对于阴极为负的电位，调节其高低就能控制通过栅极的电子流强度，使荧光屏上光迹的亮度（也称辉度）发生变化。因此，调节栅极的电位称为“辉度”调节。

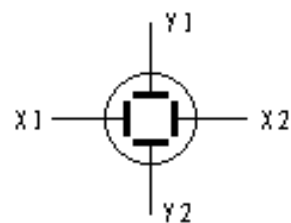


图 2 偏转板

(2) 扫描与同步的作用

若将正弦变化的信号只加在 y_1 、 y_2 偏转板上，荧光屏上将显示一条垂直亮线，而看不到正弦变化。如同时在 x_1 、 x_2 偏转板上加一与时间成正比增加的线性电压，电子束在作上下运动的同时，还必须作自左向右的匀速运动，这样，便在荧光屏上描出正弦曲线，如图 3 所示。

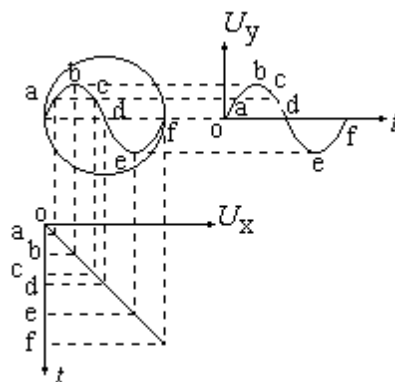


图 3 正弦曲线的形成

如果光点沿 x 轴正向匀速移动到右端后，又迅速回跳到左边原来的起始点，再重复 x 轴正向匀速移动，则在荧光屏上的光迹必与第一次重合，当重复频率足够高时，由于荧光屏的余辉与人眼的视觉暂留作用，就能在荧光屏上看到稳定的波形。此过程称为“扫描”，获得扫描的方法是在 x_1 、 x_2 偏转板上加周期性变化的电压—锯齿波电压，其波形如图 4 所示。产生锯齿波电压的电路称为锯齿波发生器，它能根据需要产生不同频率的锯齿波电压。

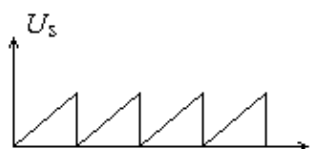


图 4 锯齿波电压

如锯齿波电压周期是加在 y_1 、 y_2 偏转板上正弦波电压周期的两倍，则在荧光屏上显现两个正弦波；如是 3 倍，则显现 3 个正弦波，依此类推。要使荧光屏上显示出完整而稳定的波形，其条件是扫描电压的周期必须是加在 y_1 、 y_2 偏转板上信号电压周期的整数倍，稍有差异，波形就不稳定。为此，在示波器上专门设置一种电路，控制扫描电压的频率 f_x ，使 f_x 随着被观测信号的频率 f_y 变化，即用 y 轴信号频率去控制扫描发生器的频率，使之始终满足整数倍的关系，此作用称为“同步”。使用示波器的关键，就是调节扫描电压的频率，使之与信号频率之间成整数倍关系，并加上“同步”作用，迫使这种关系保持稳定。

(3) 水平与垂直轴放大器

加在水平与垂直偏转板上的信号电压必须足够大，才能使电子束偏转一定角度。因此，必须将输入的弱信号经放大器放大，并用水平及垂直增幅旋钮来调节放大量。如输入信号过强，则需用分压电路进行衰减。

(4) 电源

用以供给示波管及各部分电路所需的各种交直流电源。

二、信号电压、频率、相位的测量，李萨如图形的观察

把待测信号电压输入到示波器 y 轴放大器的输入端。调节示波器面板上各开关旋钮到适当的位置，示波屏上显示一稳定波形。根据示波屏上的坐标刻度，读出显示波形的电压值或周期值。

1. 测量电压：

把待测信号输入到示波器的 y 轴输入端，y 轴输入选择按钮置于“AC”位置（测量直流电压时 y 轴输入选择按钮置于“DC”位置），y 轴衰减倍率开关“Volts/DIV”置于适当位置，调节有关控制开关及旋钮使显示波形稳定，读出波形的峰峰值 H ，如图 5 所示。

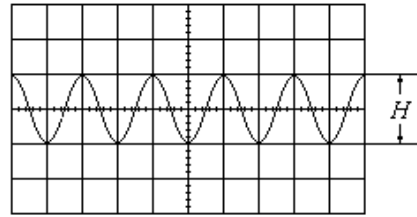


图 5 电压峰峰值

$$\text{电压的峰峰值 } U_{PP} = \text{Volts/DIV} \times H(\text{DIV})$$

在测量被测信号的电压时，应通过调节衰减倍率开关（Volts/DIV）使其幅度尽量放大，但是不能超出显示屏幕。（为什么？）

2. 测量频率

把待测信号输入示波器的 y 轴输入端，将扫描速度开关“SEC/DIV”置于适当的位置，调节有关控制开关及旋钮使显示波形稳定，读出被测波形上所需测量的 P、Q 两点间的距离 L ，如图 6 所示。

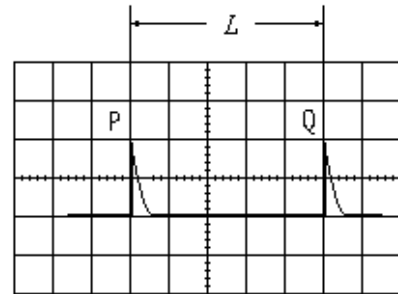


图 6 频率的测量

$$\text{信号周期 } T = \text{SEC/DIV} \times L(\text{DIV})$$

$$\text{频率 } f = 1/T$$

在测量被测信号的周期和频率时，应通过调节扫描速度开关(SEC/DIV)使被测信号相连两个波峰的水平距离尽量拉大，但是不能超出显示屏幕。（为什么？）

3. 利用李萨如图形测定信号频率

在 x 轴输入端输入正弦信号，频率为 f_x ，在 y 轴输入端输入另一正弦信号，频率为 f_y ，当两者的频率成简单整数倍关系时，示波屏上就显示一稳定的图形，称为李萨如图形。

图 7 画出了两个相互垂直正弦波电压合成不同的李萨如图形。若以 n_x 和 n_y 分别表示李萨如图形与外切水平线及外切垂直线的切点数，则其切点数与正弦波频率之间有如下关系：

$$f_y / f_x = n_x / n_y \quad (1)$$

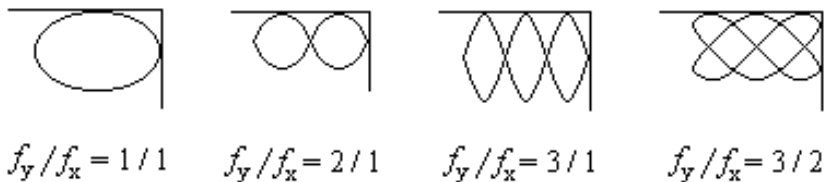
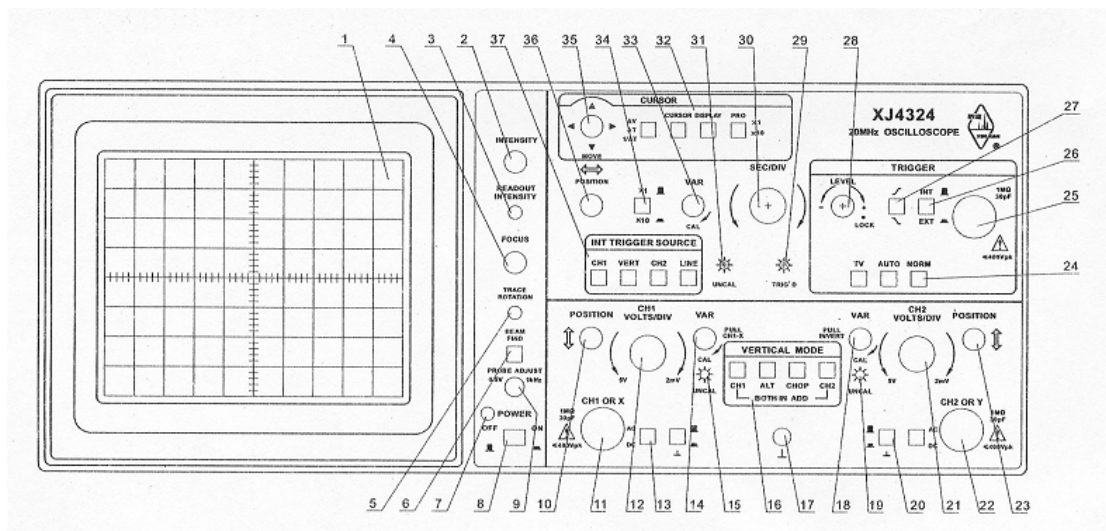


图 7 李萨如图形

如已知 f_x （或 f_y ）和从示波屏上读得的 n_x 和 n_y ，就可以由（1）式计算出 f_y （或 f_x ）。

实验装置：

XJ4324 型双踪示波器



XJ4324 型双踪示波器面板示意图

XJ4324 型双踪示波器面板上主要旋钮的功能与作用：

按钮标号及名称	功能
(8) POWER	打开和关闭示波器电源
(2) INTENSITY	调节显示器显示亮度。顺时针调节增加亮度。
(4) FOCUS	获得最清晰、尖细的光迹。
(11) CH1 OR X	CH1 端口信号加在 Y (垂直) 偏转板上。在 X-Y 模式时, CH1 端口信号加在 X (水平) 偏转板上。
(22) CH2 OR Y	CH2 端口信号加在 Y (垂直) 偏转板上。在 X-Y 模式时, CH2 端口信号加在 Y (垂直) 偏转板上。
(13) (20) AC/⊥/DC	AC: 只能观察交流信号, 信号中的直流成份被除去; DC: 信号中的交流、直流成份同时被输入、观察; ⊥: Y (垂直) 偏转板信号输入端接地 (信号无法输入)。
(12) (21) CH1(CH2) VOLTS/DIV	CH1 (CH2) 信号输入衰减旋钮
(14) (18) VAR	信号输入衰减微调旋钮。 拔出 (14) 用于观测李萨如图形, 此时 CH1 变为 X 轴信号, CH2 变为 Y 轴信号。 注意: 在定量测量时, 此微调旋钮必须顺时针旋足至锁定状态。
(10) (23) POSITION	波形垂直位置调节旋钮
(16) VERTICAL MODE	CH1: 显示 CH1 端口信号; CH2: 显示 CH2 端口信号; ADD: 显示 CH1 和 CH2 信号的代数和; ALT: 双踪显示方式 (适用高频信号); CHOP: 双踪显示方式 (适用低频信号)。
(30) SEC/DIV	扫描时间选择旋钮
(33) VAR	扫描时间微调旋钮。 注意: 在定量测量时, 此微调旋钮必须顺时针旋足至锁定状态。

(36) POSITION	波形水平位置调节旋钮
(37) INT TRIGGER SOURCE	VERT: 触发信号源由 VERTICAL MODE 选定; CH1(CH2): 触发信号源为 CH1(CH2)信号; LINE: 市电的电压信号。
(28) LEVEL	扫描信号触发电位选择旋钮。LOCK: 触发电位范围被限定在触发信号的幅度之间。

SG1005S 双路数字合成信号发生器



实验内容:

(一) 必做部分:

开机使用前, 如下设置和检查仪器:

1. 观察和测量双踪示波器校正信号波形 (0.5Vp-p 1KHz 方波)

接通电源开关, 红色指示灯发亮, 表明电源已接通。向右调节“辉度”旋钮, 在示波屏上可看到一条扫描线或光点, 使其亮度适中。调节“聚焦”旋钮, 使光点圆而小或使扫描线细亮。然后把示波器面板相应开关旋钮置于下列适宜于测量输入信号的位置:

AC/DC 开关 (13) (20)	AC 或 DC (“上”按钮必须弹出)
内、外触发开关 (26)	INT (弹出)
VOLTS/DIV (12) (21)	0.1V/DIV
SEC/DIV 开关 (30)	0.2ms/DIV

用电缆线把示波器上的校正信号输出端 (PROBE ADJUST) (9)和 CH1(或 CH2)输入插座连接起来, 即能在示波屏上显示稳定的方波波形。调节 x、y 垂直位移旋钮, 使波形位于适当位置, 便于读数。描下整周期波形, 记录表格参见下表。

波形	Y 轴示值		X 轴示值	
	“VOLTS/DIV” 开关位置		“SEC/DIV” 开关位置	
波形高度 H/DIV		波形宽度 L/DIV		
峰-峰值/V		周期/s		
		频率/Hz		
相对误差		相对误差		

测好后, 将连接电缆线从校正信号输出端取下。记录实验现象, 分析误差来源。

2. 直流电压 U_D 的测量

用 1.5V 干电池作为直流电压源。“AC/DC”按钮改变为“DC”，“VOLTS/DIV”开关调至 0.5V/DIV。按下“⊥”按钮（接地），调节 Y 位移旋钮，使扫描线与屏上中央刻度线重合，确定零电平基线。用电缆线将干电池两输出端与示波器 CH1（或 CH2）输入插座连接起来，弹出“⊥”按钮（不接地），观察扫描线跳变方向及幅度。记录数据。

在本次测量中“垂直位移”旋钮不可再改变，否则读数不准。

示波器测量结果	“VOLTS/DIV”开关位置	Y 轴跳变高度 H/DIV	干电池电压 U_D/V
万用表测量结果			
相对误差			

测好后，将连接电缆线从干电池上取下。记录实验现象，分析误差来源。

3. 交流电压 U_{AC} 的测量：

用函数信号发生器作为交流电压源，它可以输出方波、三角波、脉冲及正弦波等。示波器面板开关作如下改变：

“AC/DC”按钮改变为“AC”，在信号发生器电源“关”的情况下，用电缆线将信号发生器的“电压输出端”与示波器 CH1（或 CH2）插座连接起来。打开信号发生器电源开关，调节信号发生器输出一个“幅度”为 6V 的正弦交流信号（频率建议为 500Hz 或 1KHz），调节信号发生器“衰减”分别为 0db、20db、40db，调节示波器的“VOLTS/DIV”、“SEC/DIV”及“LEVEL”触发电平旋钮，显示稳定清晰波形，测量输出电压，记录数据，分析“db”的含义。

信号发生器输出衰减		0db	20db	40db
示波器测量电压 (V)	“VOLTS/DIV”开关位置			
	高度 H/DIV			
	峰-峰值 U_{AC}/V			
信号发生器显示电压 (V)				

4. 频率的测量

将信号发生器的“衰减”调为 0db，频率依次改变为 0.1kHz、1kHz、10kHz、100kHz，相应调节示波器扫描速度“SEC/DIV”开关及“LEVEL”触发电平旋钮，使在示波屏上显示稳定波形。读出波形上相邻两波峰或波谷之间的水平距离 L ，即可算出信号周期 T 及频率 f ，记录数据，分析误差来源。

信号频率/KHz		0.1	1	10	100
示波器测量 频率 (KHz)	“SEC/DIV”开关位置				
	长度 L/DIV				
	周期 T/s				
	频率 f/Hz				
相对误差					

5. 李萨如图形的观察

将一信号发生器输出的 50Hz 信号连接到 CH1 输入插座作为 X 轴输入信号，拉出垂直微调钮 (VAR) (14)；将另一信号发生器输出的信号连接到 CH2 输入插座作为 Y 轴输入信号，垂直方式开关 (VERTICAL MODE) (16) 选择 CH2，且输出电压调到合适的大小。分别改变信号发生器的输出频率为 50Hz、100Hz、150Hz，可以在示波屏上观察到 X、Y 轴信号合成后的李萨如图形。记录各种合成的李萨如图形的波形及相应的相位差。

X 轴频率 / Hz	50								
Y 轴频率 / Hz	50			100			150		
	n_x	n_y	相位差	n_x	n_y	相位差	n_x	n_y	相位差
李萨如图形									

(二) 选做部分：

观察和测量人体上感生的电信号

人体所处的空间中各种交变的电磁波在人体上会产生感生电动势。当你手握示波器的输入电缆线时，通过调节衰减倍率开关 (Volts/DIV) 和扫描速度开关 (SEC/DIV) 的位置到适当量程，在示波器屏幕上就可以观察到这种电信号的波形。测量它包含的最低频率及其电压的峰-峰值。

思考题

1. 示波屏上的信号波形是如何形成的？如果没有 X 轴扫描信号，屏上显示出什么波形？
2. 如何使示波屏上显示出稳定的，适当大小的信号波形？
3. 示波器打开电源后，荧光屏上既无光点又无扫描线，可能的原因是什么？应该怎样调节？
4. 若波形总是沿横向左右移动，应该怎样调节？
5. 若扫描锯齿波周期较被观测信号的周期大很多，荧光屏上将看到什么图形？反之又会怎样？
6. 若被观测的信号电压较大（但不损坏示波器），荧光屏上将看到什么图形？

参考文献

- [1] 上海新建仪器设备有限公司 XJ4324 双踪示波器说明书.
- [2] 贾玉润，王公治，凌佩玲主编.大学物理实验[M].上海：复旦大学出版社，1987，66-68.

补充实验 2 铋化铟磁阻传感器的特性测量

新型铋化铟磁阻传感器是一种灵敏度相当高,且抗干扰能力极强的磁敏器件,是一种常用磁阻传感器。磁阻器件的种类很多,它可分为正常磁电阻、各向异性磁电阻、特大磁电阻、巨磁电阻和隧道磁电阻等,其中正常磁电阻应用十分广泛。如数字式罗盘、交通车辆检测、导航系统、伪钞检测、仪器仪表、医疗器件、探矿等。典型的正常磁电阻传感器有铋化铟(InSb)传感器、玻璃合金薄膜磁阻传感器等。为了便于学习和掌握正常磁电阻传感器的磁阻特性,本实验以铋化铟传感器为测量和研究对象,着重测量铋化铟传感器的电阻与磁感应强度的关系,作出铋化铟传感器的电阻变化与磁感应强度的关系曲线,并对此关系曲线的非线性区域和线性区域分别进行曲线和直线拟合;测量铋化铟磁阻传感器处于小磁场中时,传感器输出信号出现的倍频效应。

实验原理

一定条件下,导电材料的电阻值 R 随磁感应强度 B 的变化而变化的现象称为磁阻效应。如图 1 所示,当半导体处于磁场中时,它的载流子将受洛仑兹力的作用,发生偏转,在两端产生积聚电荷并产生霍尔电场。如果霍尔电场的作用和某一速度的载流子的洛仑兹力作用刚好抵消,那么小于或大于该速度的载流子将发生偏转,因而沿外加电场方向运动的载流子数量将减少,电阻增大,表现出横向磁阻效应。如果将图 1 中 a 端和 b 端短路,磁阻效应更明显。通常以电阻率的相对改变量来表示磁阻的大小,即用 $\Delta\rho/\rho(0)$ 表示,其中 $\rho(0)$ 为零磁场时的电阻率, $\Delta\rho=\rho(B)-\rho(0)$ 。由于磁阻传感器电阻的相对变化率 $\Delta R/R(0)$ 正比于 $\Delta\rho/\rho(0)$, 这里 $\Delta R=R(B)-R(0)$ 。因此,也可以用磁阻传感器电阻的相对改变量 $\Delta R/R(0)$ 来表示磁阻效应的大小。

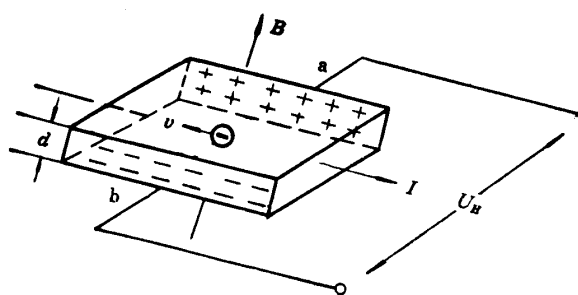


图 1 磁阻效应

实验证明,当金属或半导体处于较小磁场中时,一般磁阻传感器电阻相对变化率 $\Delta R/R(0)$ 正比于磁感应强度 B 的二次方,而在较大磁场中 $\Delta R/R(0)$ 与磁感应强度 B 呈线性函数关系。磁阻传感器的上述特性在物理学和电子学方面有着重要应用。

如果半导体材料磁阻传感器若处于角频率为 ω 的弱正弦波交流磁场中,由于磁电阻相对变化量 $\Delta R/R(0)$ 正比于 B^2 ,那么磁阻传感器的电阻 R 将随角频率 2ω 作周期性变化。这就是在小正弦波交流磁场中磁阻传感器具有交流电倍频性能。

若外界交流磁场的磁感应强度 B 为

$$B=B_0\cos\omega t \quad (1)$$

(1) 式中, B_0 磁感应强度的振幅, ω 为角频率, t 为时间。设在弱磁场中

$$\Delta R/R(0)=KB^2 \quad (2)$$

(2) 式中, K 为常量。由 (1) 式和 (2) 式可得

$$\begin{aligned} R(B) &= R(0) + \Delta R = R(0) + R(0) \frac{\Delta R}{R(0)} = R(0) + R(0)KB_0^2 \cos^2 \omega t \\ &= R(0) + \frac{1}{2}R(0)KB_0^2 + \frac{1}{2}R(0)KB_0^2 \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式中, $R(0) + \frac{1}{2}R(0)KB_0^2$ 为不随时间变化的电阻值, 而 $\frac{1}{2}R(0)KB_0^2 \cos 2\omega t$ 为以角频率 2ω 作余弦变化的电阻值。因此, 磁阻传感器的电阻值在小正弦波交流磁场中, 将产生倍频交流电阻阻值变化。

实验仪器

实验采用 FD-MR-II 型磁阻效应实验仪, 它包括直流双路恒流电源、直流数字电压表、毫特计、电磁铁、砷化镓 (GaAs) 霍尔传感器、铟化铟 (InSb) 磁阻传感器、单刀双向开关及导线等。

请按图 2 左侧所示的实验电路图接线。其中铟化铟 (InSb) 磁阻传感器的电源和砷化镓 (GaAs) 霍尔传感器输入/输出通过航空插头 A 与控制单元连接, 外接电阻接到 C、D 两端, 直流数字电压表的一端接到单刀开关的中间端 F, 另一端接到 C, 单刀开关的另两端 E、G 分别接到 B 和 D。(电磁铁的工作电路是独立的)。

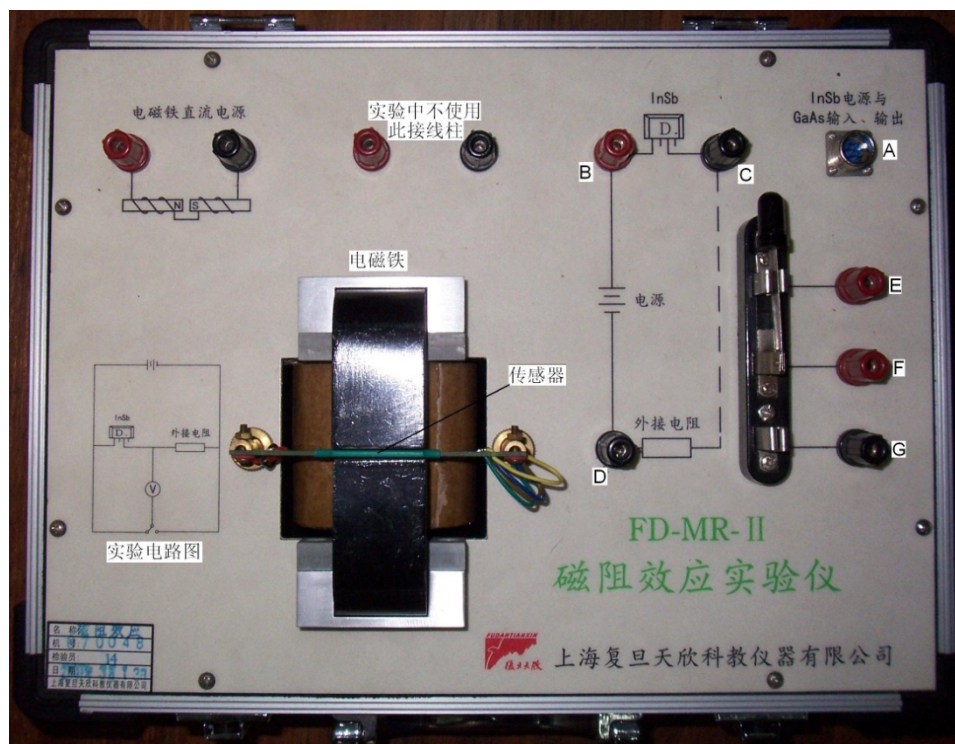


图 2 磁阻效应实验仪

磁阻效应测量仪器使用方法:

- (1) 直流励磁恒流源与电磁铁输入端相联, 通过调节该直流恒流电源电流调节旋钮可改变输入电磁铁电流的大小, 从而改变电磁铁间隙磁感应强度的大小;
- (2) 磁场大小 B 由砷化镓 (GaAs) 霍尔传感器测量, 可以从毫特计上直接读取 (使用毫特计时, 不要忘了调零)。固定外接电阻 (建议取 500Ω), 通过改变单刀双向开关的连接方向, 可以分别测量外接电阻或铟化铟 (InSb) 磁阻传感器两端的电压。根据外接电阻两端的电压可以求出流过铟化铟 (InSb) 磁阻传感器的电流, 此电流的大小由 InSb 电流调节旋钮来控制, 电流大小在 $0-3\text{mA}$ 连续可调 (注意: 电流与所取外接电阻的乘积最大为 2V), 再根据磁阻传感器两端的电压可以求出其电阻的值。
- (3) 通过上述 (1)、(2) 步骤测量, 可求得铟化铟磁阻传感器的电阻 R 与磁感应强度 B 的关系。

实验内容

(一) 必做部分：磁阻随磁场的变化

在流过铽化铟磁阻传感器电流保持不变的条件下，测量铽化铟磁阻传感器的电阻与磁感应强度的关系。由于铽化铟磁阻传感器的电阻值随磁感应强度的变化在小磁场区（一般小于 60mT）和较大磁场区不同（两者之间可能会有一个过渡区），请根据具体情况设计实验方案。

提示：首先确定自变量的变化范围（怎么确定？），再确定合适的数据点的间隔，保证两个磁场区内都有足够的数点，以便进行下一步的数据处理。作 $\Delta R/R(0)$ 与 B 的关系曲线（根据实际情况，可分段进行），并分段进行数据处理（可以用哪些方法来验证平方关系？要求适当讨论比较几种方法的优缺点，数据处理只要求用其中一种方法即可）。

数据记录参考表：

外接电阻 $R=$ _____ Ω ，两端电压 $U_R=$ _____mV，流过的电流 $I_R=$ _____mA

提示： R 的读数该有几位有效数字？ I_R 选取什么值比较合理？对于我们要研究的物理规律，下表中的哪个物理量是自变量？该怎么取值，更便于数据处理？

电磁铁	InSb	$B \sim \Delta R/R(0)$ 对应关系		
I_M/mA	U/mV	B/mT	R/Ω	$\Delta R/R(0)$

(二) 选做部分：

磁阻倍频效应的观察

将电磁铁的线圈引线 with 低频信号发生器（选正弦信号输出）输出端相接；铽化铟磁阻传感器通以合适的电流，用示波器测量磁阻传感器两端电压与电磁铁两端电压构成的李萨如图形，证明在交流变化的弱磁场下，磁阻传感器阻值的变化具有交流倍频特性。

提示：预习时请先熟悉怎么用示波器观察李萨如图形，思考该怎么选取各个参数的值，其中，信号发生器的工作频率要设在 10Hz 量级，为什么？请讨论！如果有时间，建议观察一下不同频率时，加在电磁铁两端的方波信号的波形是否会随频率发生变化，为什么？请讨论。

思考题

1. 什么叫做磁阻效应？霍尔传感器为何有磁阻效应？
2. 铽化铟磁阻传感器在小磁场时和较大磁场时的电阻值与磁感应强度关系有何不同？这两种特性有什么应用？请说明：某个具体应用是基于磁阻的什么特性？适用于什么情况？
3. 适于制作磁阻传感器的材料应具备什么样的性质？

参考资料

- [1] 刘仲娥，张维新，宋永祥. 敏感元件与应用[M]. 青岛海洋大学出版社，1993.
- [2] 吴杨，姜捷，陆申龙. 铽化铟磁阻传感器特性测量及应用研究 [J]. 物理实验，2001，21(10): 46-48.
- [3] 上海复旦天欣科教仪器有限公司.FD-MR-II 磁阻效应实验仪使用说明书.

补充实验 3 二极管的伏安特性测量及应用

电路中有各种元器件，如电阻、二极管、三极管、光敏和热敏元件等。人们常需要了解这些元件的伏安特性，以便正确地选择或使用。本实验要求利用伏安法测绘二极管的伏安特性曲线，了解二极管的单向导电性，以及学会修正电表内阻引起的系统误差。用示波器观察整流的输出波形，了解二极管的整流作用。

实验原理

1. 电学元件的伏安特性

在某一电学元件两端加上直流电压，在元件内就会有电流通过，通过元件的电流与端电压之间的关系称为电学元件的伏安特性。在欧姆定律式 $U = IR$ 中，电压 U 的单位为 V，电流 I 的单位为 A，电阻 R 的单位为 Ω 。一般以电压为横坐标和电流为纵坐标作出元件的电压——电流关系曲线，称为该元件的伏安特性曲线。

对于碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等电学元件，在通常情况下，通过元件的电流与加在元件两端的电压成正比关系变化，即其伏安特性曲线为一通过原点的直线。这类元件称为线性元件，如下图 1 所示。半导体二极管、稳压管等元件，通过元件的电流与加在元件两端的电压不成线性关系变化，其伏安特性为一曲线。这类元件称为非线性元件，如图 2 所示为某二极管元件的伏安特性示意图。

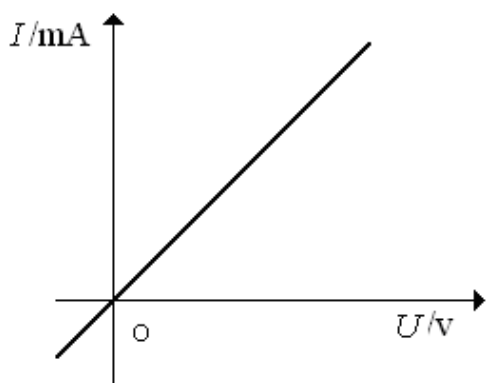


图 1 线性元件的伏安特性曲线

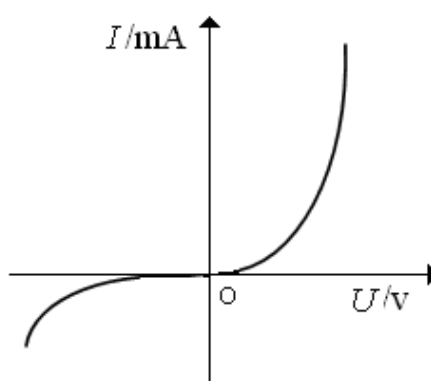


图 2 某非线性元件的伏安特性曲线

在设计测量电学元件伏安特性的线路时，必须了解待测元件的规格，使加在它上面的电压和通过的电流均不超过额定值。此外，还必须了解测量时所需其它仪器的规格（如电源、电压表、电流表、滑线变阻器等规格），也不得超过其量程或使用范围。根据这些条件所设计的线路，可以将测量误差减到最小。

2. 二极管伏安特性测量——伏安法的两种接线方式及其误差

在测量电阻 R 伏安特性的线路中，常有两种接法，即图 3、图 4 分别所示的电流表内接法和电流表外接法。电压表和电流表都有一定的内阻（分别设为 R_V 和 R_A ）。简化处理时直接用电压表读数 U 除以电流表读数 I 来得到被测

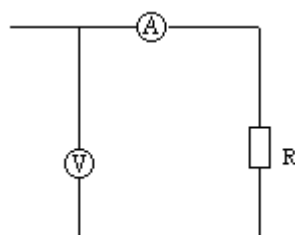


图 3 内接法

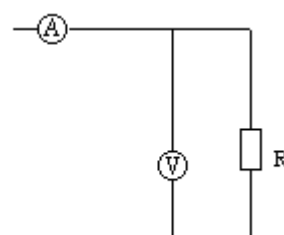


图 4 外接法

电阻值 R ，即 $R = U / I$ ，这样会引进一定的系统性误差。电流表内接时，电压表读数比电阻端电压值大，即有： $R = U / I - R_A$ ，相对误差： $\frac{|R_{测} - R_x|}{R_x} = \frac{|R_x + R_A - R_x|}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \times 100\% = \frac{R_A}{R_{测} - R_A} \times 100\%$ ，

只有当 $R_A \ll R_x$ 时才 $R_x \approx R_{测}$ ，因此电流表内接法适合测高值电阻；电流表外接时，电流表读数比电阻 R 中流过的电流大，这时有： $1/R = I/U - 1/R_V$ ，相对误差：

$$\frac{|R_{测} - R_x|}{R_x} = \frac{|\frac{R_V R_x}{R_V + R_x} - R_x|}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_V} \times 100\% = \frac{R_{测}}{R_V} \times 100\%$$

只有当 $R_V \gg R_x$ 时才有 $R_x \approx R_{测}$ ，因此

电流表外接法适合测低值电阻。

说明：此处 R_x 是待测电阻的真实值， $R_{测}$ 是实验室测量值 U/I 。

3. 二极管应用——整流输出波形的观察

晶体二极管具有反向电阻大、正向电阻小的特性，因此它的最简单和最重要的应用之一是整流作用，即把交流电变成脉动的直流电（脉动直流电——电压的方向（正负极）不变，但大小随时间变化）。一般的整流电路有半波整流(电路和输出波形如图5-1)和桥式整流（又称全波整流，电路和输出波形如图5-2）。对于一定频率的正弦波输入，这种波形仅使输出端的电压极性保持不变，而电压值却是周期性的变化。

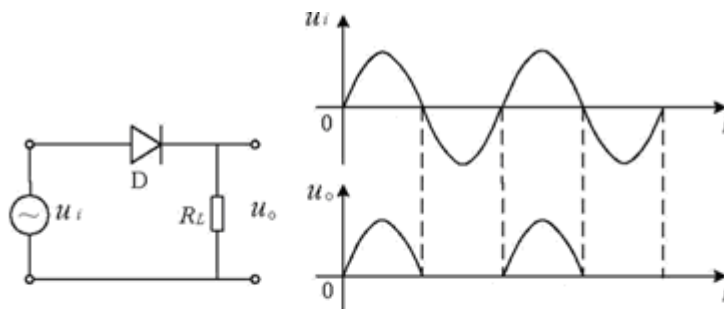


图 5-1 半波整流

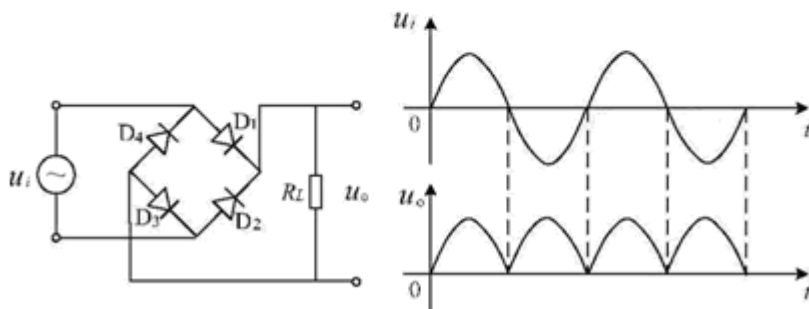


图 5-2 全波整流

实验仪器

直流稳压电源（QJ2002A），VC9801A+型数字万用表、VC890D 型数字万用表，PA15A 型直流数字电流表，电阻箱（ZX21A），待测二极管（2AP10/2AP09），XJ4324 型双踪示波器，SG1005S 双路数字合成信号发生器。

实验内容

1. 二极管伏安特性测量

1) 数字万用表检测二极管是否正常工作

- 将黑表笔插入“COM”插座，红表笔插入V/ Ω 插座(注意红表笔为“+”极)；
- 将量程开关置于 \rightarrow 挡，红表笔端接二极管正极，黑表笔端接二极管负极(即二极管正接)，此时本表显示值为二极管正向压降的近似值(1mA)；当二极管反接时则显示过量程“1”，可判断该二极管正常工作。
- 注意事项：当输入端未接入时，即开路时，电表也显示过量程“1”。

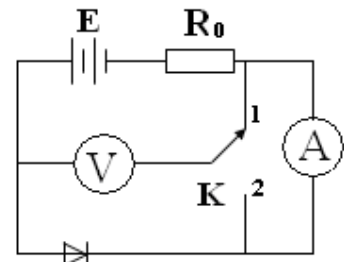


图6 伏安法电路图

2) 按图6所示连接电路：开关K打向位置1为电流表内接，打向位置2为电流表外接。

- 正向特性测量：二极管正向特性选取电流表_____法(内接/外接)。

操作步骤：调节直流稳压电源及电阻箱 R_0 ，使得电流表达到二极管允许通过的最大正向电流——**4mA**，记录此时电压表读数 U_1 ；调节直流稳压电源及电阻箱 R_0 使电压表读数从 U_1 减小至0V，在此区间内记录20~30组数据。(建议正向测量时电源电压不超过1.5V；电阻箱开始实验前置于最大阻值处。请思考为什么这么设置?)

- 反向特性测量：二极管反向特性选取电流表_____法(内接/外接)。

操作步骤：将二极管极性调换，调节直流稳压电源及电阻箱 R_0 使电压表读数从最大电压20V减小至0V，在此区间内记录15~20组数据。

数据记录：二极管正向压降_____。

参考表格：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
$I(mA)$										
$U(V)$										
$R(\Omega)$										

数据处理要求：根据实验所得数据，作图纸上作出二极管的特性曲线图。注意：因为通过二极管的正反向电压和电流数值相差很大，作图时正反向坐标轴可选用不同分度值。

2. 观察半波整流和全波整流的输出波形

1) 按图5-1连接整流电路，输入一定频率的正弦电压，负载电阻(电阻箱) $R_L = 1k\Omega$ ，用示波器观察并记录 R_L 两端的输出电压波形。

波形	Y轴示值		X轴示值	
	“VOLTS/DIV” 开关位置		“SEC/DIV” 开关位置	
波形高度 H/DIV		波形宽度 L/DIV		
峰-峰值/V		周期/s		
		频率/Hz		

2) 按图 5-2 接线，重复上述步骤。

波形	Y 轴示值		X 轴示值	
		“VOLTS/DIV” 开关位置		“SEC/DIV” 开关位置
	波形高度 H/DIV		波形宽度 L/DIV	
	峰-峰值/V		周期/s	
			频率/Hz	

3. 选做内容——示波器显示二极管的伏安特性曲线

示波器可以直接测定电压的大小，凡一切可以转换成电压的电学量（如电流、阻抗和功率），非电学量（如温度、位移、速度、压力）都可以用示波器进行测量。利用 XJ4324 型示波器的双踪显示功能，将二极管的电压加到示波器的“X 轴”，二极管的电流转化为电压后加到示波器的“Y 轴”，在 X-Y 模式下即可以直接显示二极管的伏安特性曲线。

思考题

1. 伏安法电路图中 R_0 的作用是什么？
2. 二极管伏安特性的物理原理是什么？
3. 半波整流中输出为 0 及有输出的时间间隔，为何前者大于后者？为何全波整流中相邻输出电压之间有极短时间的零输出？

参考资料：

- [1] 王新生，张银阁.用伏安法测绘二极管伏安特性的研究[J].大学物理实验，2000，13(3)：41-43.
- [2] 崔玉亭，刘红兵.二极管伏安特性曲线实验的探讨[J].黄淮学刊：自然科学，1997，13(4)：65-67.
- [3] 陈清梅，刑红军，朱南.也谈伏安法测电阻时电流表内、外接法的判定条件[J].大学物理，2007，26(8)：42-43.
- [4] <http://www.buyecs.com/basis/20081105779.html> 2AP系列检波二极管参数.
- [5] VC9801A+型数字万用表使用说明.
- [6] VC890D型数字万用表使用说明.

补充实验 4 LCR 串联谐振电路

在力学实验中介绍过弹簧的简谐振动、阻尼振动和强迫振动，阐述过共振现象的一些实际应用。同样，在电学实验中，由正弦电源与电感、电容和电阻组成的串联电路，也会产生简谐振动、阻尼振动和强迫振动。当正弦波电源输出频率达到某一频率时，电路的电流达到最大值，即产生谐振现象。谐振现象有许多应用，如电子技术中电磁波接收器常常用串联谐振电路作为调谐电路，接收某一频率的电磁波信号，收音机就是其中一例。在人类活动的空间中存在着各种不同频率的来自无线电发射机发射的电磁波，无线电接收器若要对某种频率信号进行选择接收，则必须采用电感和电容组成的 LC 回路来“守门”，一组 L 、 C 值组成的输入回路，只让一种频率的电磁波进入接收器的后继电路，而其它频率的电磁波都拒之“门外”。 LC 回路不但成了无线电发射和接收电路中不可缺少的部分，而且在其它电子技术领域中也得到了广泛的应用。本实验通过对 LCR 调谐电路的研究，测量电路的谐振曲线，了解电路品质因素 Q 的物理意义，掌握 LCR 串联谐振电路的特点及其测量方法。

实验原理

图 1 为 LCR 串联电路，交流信号源 ε 在电路中所产生的电流的大小，不仅决定于电路中的电阻 R ，而且还决定于电路中的电抗 $(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})$ 。其中 $2\pi fL$ 是线圈 L 的感抗 Z_L ；

$\frac{1}{2\pi fC}$ 是电容器 C 的容抗 Z_C 。根据交流电路原

理，此回路中的电流 I 与电动势 ε 之间的关系为：

$$I = \frac{\varepsilon}{Z} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})^2 + R^2}} \quad (1)$$

式中， Z 为调谐回路的总阻抗， f 为交流信号的频率， L 表示电感， C 表示电容。电动势 ε 与电流的相位差为：

$$\varphi = \arctg \left[\frac{2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}}{R} \right] \quad (2)$$

公式 (1)、(2) 中阻抗 Z 和相位差 φ ，都是信号频率 f 的函数。

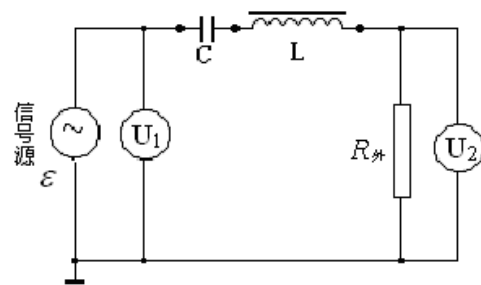


图 1 LCR 串联电路

图 2、3、4 分别为 LCR 串联电路的阻抗、相位差、电流随频率的变化曲线，其中图 3 所示的 φ - f 曲线称为相频特性曲线。图 4 所示的 I - f 曲线称为幅频特性曲线（谐振曲线），它表示在输出电压 U_1 保持不变的条件下 I 随 f 的变化曲线。

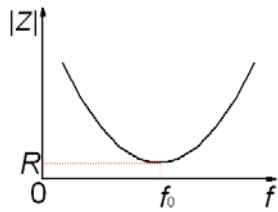


图 2 阻抗随频率的变化曲线

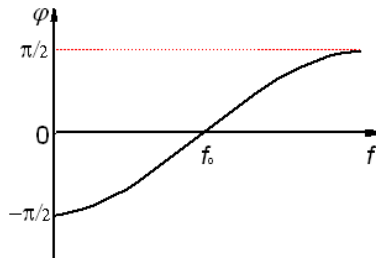


图 3 相频特性曲线

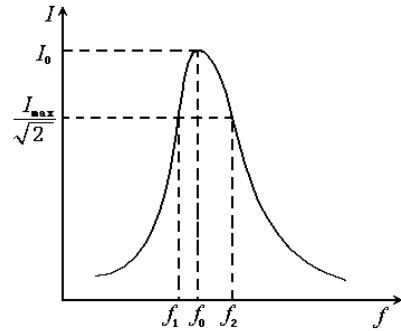


图 4 谐振曲线

相频特性曲线和幅频特性曲线有时统称为频响特性曲线。

由曲线图可以看出，存在一个特殊的频率 f_0 ，特点为：

- 1) 当 $f < f_0$ 时， $\varphi < 0$ ，电流的相位超前于电压，整个电路呈电容性，且随 f 降低， φ 趋近于 $-\pi/2$ ；而当 $f > f_0$ 时， $\varphi > 0$ ，电流的相位落后于电压，整个电路呈电感性，且随 f 升高， φ 趋近于 $\pi/2$ 。
- 2) 随 f 偏离 f_0 越远，阻抗越大，而电流越小。

$$3) \text{ 当: } 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0 \quad (3)$$

此时电路中总阻抗 Z 最小，电流 I 达到最大值，整个电路呈现电阻性，电流的大小只决定于回路中总电阻的大小。LCR 串联电路的这种状态称为串联谐振，对应的信号频率 f_0 称为谐振频率，由式 (3) 可得：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

图 4 为 LCR 串联电路的谐振曲线，在正弦波的频率 f 达到 f_0 时，电路的电流达到最大值 I_0 。

在谐振曲线上电流值为 $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ 的两个频率点 f_1 和 f_2 称为半功率点， $\Delta f = f_2 - f_1$ 的值称为谐振曲线的频率宽度。通常用 Q 值来表征电路选频性能的优劣，称为电路的品质因素。

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (5)$$

Q 值越大，即 LCR 串联电路的频带宽度越窄，谐振曲线就越尖锐。品质因素的定义是电路中储存的能量与每个周期内消耗的能量之比的 2π 倍。当电路处于谐振状态时：

$$Q = \frac{I^2 2\pi f_0 L}{I^2 R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad \text{或} \quad Q = \frac{1}{2\pi f_0 C R} \quad (6)$$

因此，谐振回路中的电阻 R 的值越小， Q 值越大，选择电台的能力越好，反之越差。

从式 (6) 也不难得出，在谐振时，电容 C 上的电压 U_C 和电感 L 上的电压 U_L 分别是输入信号电动势 ε 的 Q 倍，但它们之间的相位差为 π 。

实验内容

(一) 必做部分:

1. 按照图 1 接线。图中信号源为 SG1020A 型数字合成信号发生器 (使用说明请参考实验网页中的有关内容或实验室仪器说明书), 接上电源, 打开信号源电源按钮, 自检通过后, 信号源将输出频率为 1KHz, 电压为 5V_{pp} 的正弦信号。U₁、U₂ 为 DF2170A 型双指针交流电压表 (有关实验仪器的使用说明请参考实验网页中的有关内容或实验室仪器说明书), 分别用来指示信号源的电压输出端 (端口固定阻抗 50Ω) 上输出信号的电压值和 R_外 上的电压值。图中的 R_外 为外接的信号取样电阻, 分别记录电感 L、电容 C 以及 R_外 的数值; 信号发生器按下住功能键“函数”进入函数主功能模式下, 按下“幅度”软键, 进入幅度设定状态, 将幅度量设置为 1V_{pp}, 合理设置电压表 U₁、U₂ 量程, 使得 U₁、U₂ 有较合理的测量值 (也可略微调整信号发生器幅度的大小)。信号发生器按下“频率”软键, 进入频率设定状态, 调节频率使电路达到谐振状态, 记录下此时的频率 f₀' (请仔细观察信号频率改变时双指针交流电压表示值 U₁ 和 U₂ 的变化情况, 看到什么样的现象时可以判断信号频率已调节至电路的实际谐振频率?)。

2. 根据图 1 电路, 确定合理的频率范围, 改变频率 f, 测量回路中的电流随频率的变化, 并在作图纸上画出 LCR 串联谐振曲线。方法一: 维持谐振回路输入电压 U₁ 不变 (通过调节信号源幅度来实现), 记录 U₁ 的大小, 测量不同频率所对应的外接电阻 R_外 两端的电压值 U₂, 作 I~f 曲线。方法二: 在测量时将信号源输出电压调节至某一固定值, 改变频率 f 值, 同时记录在该频率时 U₁、U₂ 的值, 作 U₂/U₁~f 曲线。(请讨论: 为什么谐振时 U₁ 和 U₂ 不相等? 方法一中为什么要保持 U₁ 不变? 方法二中为什么 U₂/U₁~f 曲线可以代表 LCR 回路的谐振曲线? 两种方法各有什么优缺点?)

提示: 可以根据半功率点的定义和回路谐振时的电流值 (方法一) 或 U₂/U₁ 的值 (方法二) 来判断测量的范围。注意: 测量点之间的频率间隔不要过大。

3. 根据谐振曲线图, 求出半功率点频率 f₁、f₂ 和谐振频率 f₀。利用公式 (5) 求 Q 的值。根据公式 (6) 计算图 1 中 输入电路的 Q' 值。该 Q' 值与 (5) 式求得的 Q 值是不一样的。(为什么? 应该如何用公式 (6) 计算电路的 Q' 值? 公式 (6) 中的电阻值等于 R_外 吗? 若不等的话, 应如何计算出电路中的总电阻值?)

(二) 选做部分:

改变外接电阻的大小, 测量电路的谐振特性会有什么变化。

思考题

1. 简述 LCR 串联谐振电路中品质因素 Q 的物理意义。Q 值的大小与哪些参数有关?
2. 为什么信号发生器的输出指示 (峰-峰电压 V_{p-p}) 与电压表测量得到的 U₁ 值有较大的差别?
3. 在图 1 中改变信号源输出频率时, 为什么谐振回路的输入电压 U₁ 会改变?
4. 谐振电路有哪些应用?

参考文献

- [1] 赵凯华, 陈熙谋, 电磁学 (上册), 人民教育出版社, 1978, 238—239。
- [2] 凌佩玲等编, 普通物理实验, 上海科学技术文献出版社, 1989, 216—222。
- [3] 吕斯骅, 段家祇, 基础物理实验, 北京大学出版社, 2002, 137-141

补充实验 5 量子论实验

——原子能量量子化的观察与测量

1900年普朗克(M. Planck)提出了关于能量量子化的假设,圆满地解释了黑体辐射的规律,从而开创了量子论的新时代。1905年爱因斯坦提出了光子论,解释了光电效应。1913年玻尔提出了原子结构的量子论,很好地解释了氢原子的线状光谱。在玻尔提出原子量子结构的第二年,德国实验物理学家夫兰克和赫兹,利用汞蒸汽碰撞管完成了一个物理学史上著名的实验。该实验装置简单、构思精巧,实验结果强有力地支持了玻尔理论。为此,他们二人同获1925年诺贝尔物理学奖。后人称此实验为夫兰克—赫兹实验。本实验用夫兰克—赫兹实验仪观察原子能量量子化的现象并进行一些简单的测量,加深对原子量子化结构及量子论的认识。

实验原理

原子的核式结构模型认为:原子由原子核和核外电子组成,电子绕核做高速运动。按照经典电动力学,电子做圆周运动,会不断发射电磁波,由于损失能量,电子运动半径会不断地减小,最后碰到原子核,原子会坍塌。玻尔的量子理论假设:①电子只能在某些特定的轨道上运动,叫做“定态”;②在定态作圆周运动的电子不发射电磁波,其能量是恒定的,叫做“能级”;③电子可以从一个能级“跃迁”到另一能级上,在跃迁的过程中发射或吸收一定频率的光子从而满足能量守恒。玻尔理论的核心是:原子只能处在某些特定的能量状态,它的能量不可能连续变化而只能是突变,即“跃迁”。

根据能量守恒定律,跃迁时吸收或放出的能量,应等于跃迁前后原子能量的差。若 E_2 和 E_1 是原子跃迁前后两个能级所对应的能量, ν 是吸收或放出光子的频率,则有

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

其中 h 是普朗克常数。

在原子中,能量最低的能级叫基态,比基态能量高的能级叫“第一激发态”,更高的能级依次叫“第二激发态”、“第三激发态”等等。如果以 E_0 表示基态的能量, E_1 表示第一激发态的能量,则定义原子的第一激发电势(位)为:

$$U_1 = (E_1 - E_0) / e \quad (2)$$

其中, e 是电子的电量。同理,原子的第二激发电位、第三激发电位……分别为:

$$U_2 = (E_2 - E_0) / e \quad U_3 = (E_3 - E_0) / e, \dots \quad (3)$$

原子发生跃迁的原因,也可以是与自由电子的碰撞。如果自由电子的能量是从电场中加速而获得的,则电子的动能为:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eU \quad (4)$$

其中, U 是电子的加速电压, m_e 是电子的质量, v 是电子在电场中获得的速度。当 $U < U_1$ 时,电子的动能小于第一激发态能量与基态能量之差,这种电子在与原子碰撞时,不可能用它的能量使原子从基态跃迁到激发态,发生动能与内能的交换,因而是“弹性碰撞”。根据弹性碰撞前后系统动量和动能守恒的原理,由于电子的质量远小于原子的质量,不难推出电子的能量损失极小。反之,当 $U = U_1$ 时,电子的动能恰好等于第一激发态能量与基态能量之差,于是,电子在与原子碰撞时,可把它的动能交给原子,使原子从基态跃迁到第一激发态。由于这种碰撞发生时,伴随着动能转变为原子的激发能(内能)的过程,因而是“非弹性碰撞”。由此可知,当电子在某原子体系中受电场加速

时，其动能由近似为 0 开始逐渐增加，达到某一定值（相当于条件 $U=U_1$ ）时，电子的动能会忽然下降（大量电子的动能交给了原子），然后再继续增加，以后又忽然下降……如此循环，出现周期性的变化。这种周期性的变化反映出原子能量量子化。夫兰克—赫兹实验通过巧妙的实验装置，把这种电子动能的周期性变化用电流大小的周期性变化直观地显示出来。

处于激发态的原子会自发地跃迁回基态。这种跃迁一般都会辐射光子，光子的频率由（1）式确定。因此，当电子的动能开始下降时，将同时出现发光现象：先是电子把动能交给原子，使它从基态跃迁到第一激发态，然后原子自发辐射光子，回到基态。如此循环，可在 $U=U_1$ 附近，出现稳定的发光区。当然，电子的初始能量不都是 0，而当满足条件 $U=U_1$ 时，电子也不一定碰到原子。因此，必有一些电子的能量超过 eU_1 而达到 eU_2 、 eU_3 ……，即原子可能被激发到更高的能级。这些在更高能级上的原子当然也会自发地跃迁到较低的能级直到返回基态。这些跃迁也都会辐射光子，光子的频率也由（1）式确定。如果这些光子的频率在 $(3.9\sim 7.7)\times 10^{14}\text{Hz}$ 之间（即光的波长在 770nm 到 390nm 之间），则为可见光，人眼可直接看到这种发光区。

实验内容

一. 必做内容

测量氩原子的第一激发电位。采用充氩夫兰克—赫兹碰撞管（充有氩气的玻璃管），管内主要有 4 个电极：最左边的阴极 K 由灯丝 F 加热而发射电子；靠近阴极的控制栅极 G_1 是一个栅网，它的电位略高于阴极，以利于从阴极拉出电子（它的电位越高，拉出电子越多，故可用于控制电流）；在控制栅极右边的是另一个栅网，它的电位最高，称为加速栅极 G_2 ；最右边的电极是一块圆板，称为板极 P。

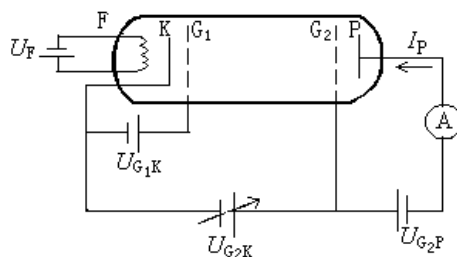


图 1 充氩 F-H 管及其实验线路图

线路如图 1， U_F 为灯丝加热电压， U_{G_1K} 为正向小电压， U_{G_2K} 为加速电压， U_{G_2P} 为反向（减速）电压，A 为微电流放大器和微电流计。其中，除加速电压由扫描电源提供外，其余三个电压均由碰撞管电源提供。

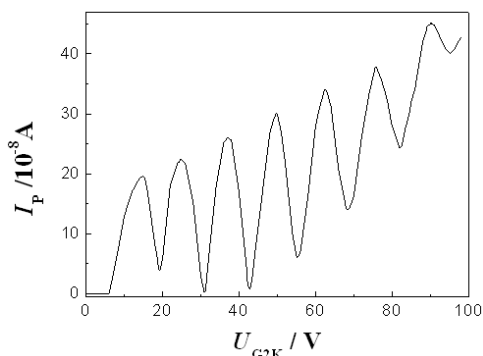


图 2 $I_P \sim U_{G2K}$ 曲线示意图

通过电缆线，把碰撞管中的灯丝加热电压 U_F 、正向小电压 U_{G_1K} 、加速电压 U_{G_2K} 、反向电压 U_{G_2P} 及电流都与实验仪接好。为了降低外界干扰，仪器的外壳应妥善接地。电源接通后，氩管中灯丝加热，使阴极发射电子，在加速电压 U_{G_2K} 的作用下，电子加速跑向加速栅极 G_2 ，若能克服反向电压 U_{G_2P} ，则可穿过 G_2 ，到达板极 P，形成电流 I_P 。增加 U_{G_2K} ，电流开始增加，但随着 U_{G_2K} 继续增加，电流会开始下降，从而出现一个极大值。这是因为当在 G_2 处附近的一部分电子的能量达到 $\Delta E = eU_1$ 时，这些电子可以把氩原子从基态激发到第一激发态，这种激发使电子的动能转变为氩原子的激发能（非弹性碰撞），以致这些电子的能量下降，不能克服反向电压而到达板极，从而使电流减小，形成峰。随着越来越多的电子不能到达板极，电流将连续下降（见图 2），直到能到达板极的电子数达到极小值时，电流达到谷底。随着 U_{G_2K} 的继续增加，电子动能也随之增加，电子与原子交换能量的

位置向左移动，失去动能的电子将可在电场中继续加速，电流从极小值又开始加大。但当电子的动能在 G_2 处又一次增加到 ΔE 时，又会发生非弹性碰撞，电流又一次开始下降，出现第二个峰及第二个谷。依此类推，随着 U_{G_2K} 的增加，由于 G_2 处的多次非弹性碰撞，可观察到电流 I_p 的多次下降及上升，形成多个峰和谷，如图2所示。

由图可见，曲线的极大极小出现明显的规律性，它是特定能量被反复吸收的结果。原子在与电子碰撞的过程中只吸收特定能量而不吸收任意能量，正是原子能量量子化的充分体现。就图2的规律来说，每相邻极大或相邻极小值之间的电位差 ΔU 就是碰撞管中气体原子（氩原子）的第一激发电势（电位） U_1 。

实验注意事项：

1. U_{G_2K} 太高时，电子的动能有可能大到使气体原子电离而使F-H管击穿。不同的实验条件，有不同的击穿值，一旦发生击穿，应立即调低 U_{G_2K} ，以免F-H管受损。
2. 灯丝电压不要放得过大，宜在2~4V。
3. 选择适当的实验条件，如 $U_F \sim 2-4V$ ， $U_{G_1K} \sim 1-2V$ ， $U_{G_2P} \sim 7-8V$ ，用手动方式改变 U_{G_2K} ，同时观察微电流计上的 I_p 随 U_{G_2K} 的变化情况。如果 U_{G_2K} 增加时，电流迅速增加则表明F-H管产生击穿，此时应立即降低 U_{G_2K} 。如果希望有较大的击穿电压，可以用降低灯丝电压来达到。
4. 适当调整实验条件使微电流计能出现6~7个峰，波峰波谷明显。选取合适的实验点记录数据，使之能真实完整地绘出 $I_p \sim U_{G_2K}$ 曲线；读出曲线的峰或谷对应的 U_{G_2K} 值，用最小二乘法拟合数据，求出氩的第一激发电位。

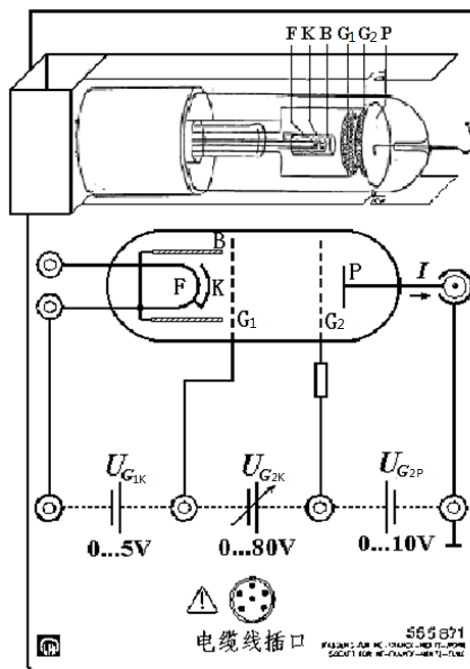
二. 选做内容

1. 观察氩管发光现象

- (1) 根据氩碰撞管接线图，给氩管接上电源。
- (2) 选择合适的实验条件， $U_{G_1K} = 1V \sim 2V$ ， $U_{G_2P} = 5V \sim 10V$ ， U_{G_2K} 自动扫描电压（ $0V \sim 80V$ ）。
- (3) 仔细观察 G_1 与 G_2 之间，注意是否有发光区出现？出现的位置在哪里？发光区是否会移动？有几个发光区？发光区的形状如何？如实记录所见现象并说明理由。（**注意：**当 U_{G_2P} 过小而 U_{G_1K} 和 U_{G_2K} 过大，因而 I 过大时，会出现发光区中心向阴极凸出，甚至在阴极附近出现极亮点的情况，这是**气体被击穿**的现象，应立即减小 U_{G_2K} ，重新设置实验条件再做实验。）

2. 测定氩原子的第一激发电位

- (1) 选择合适的实验条件，在扫描过程中，观察电流表读数变化，注意有几个最大值、最小值。
- (2) 用手动扫描记录一系列 U_{G_2K} 、 I_p 值，用作图纸绘出 $I_p \sim U_{G_2K}$ 曲线（怎样选择所记数据点，才能画出完整而正确的曲线？），从图上求出氩原子的第一激发电位 $U_1 = \Delta U$ 。



F: 阴极加热丝 K: 阴极 B: 保护圆筒
G₁: 控制栅极 G₂: 加速栅极 P: 板极

图3 氩碰撞管接线图

思考题

1. 如何从本实验结果看出原子的能量是量子化的?
2. 实验装置中, 各个电源的作用是什么?
3. 实验中有时波谷会出现负值, 这是为什么?
4. 第一峰位置的电位与第一激发电位是否相同? 为什么?
5. 选做实验中为什么红色发光区向阴极移动时会越来越窄、越来越亮?
6. 选做实验中看到的发光区的颜色所对应的波长大约是多少? 它是氖原子从第一激发态返回基态时所发的光吗? 为说明你的观点, 请算出氖原子从第一激发态返回基态时所发光的波长。
7. 选做实验中为什么电流较大时, 发光区中心会向阴极凸出? 为什么应尽量避免这种情况发生?

参考文献

1. 沈元华、陆申龙. 基础物理实验. 北京: 高等教育出版社. 2003. 326~332
2. 杨福家. 原子物理学 (第二版). 北京: 高等教育出版社. 1990.
3. 戴乐山、戴道宣. 近代物理实验. 上海: 复旦大学出版社. 1995. 45~68

补充实验 6 光的衍射

当波的传播遇到障碍物受到限制，发生偏离直线传播（并非指反射和折射）的现象，称为衍射现象。平时衍射现象不易为人们所觉察，是因为可见光的波长很短，以及普通光源是非相干的面光源。衍射现象通常分为两类：一类是菲涅耳衍射（又称近场衍射），光源和观察屏离开衍射缝(孔)的距离为有限远；另一类是夫琅禾费衍射（又称远场衍射），光源和观察屏离开衍射缝(孔)的距离为无限远。

衍射现象在生活中用肉眼也能观察到。比如，由于光盘的表面均匀地刻有一系列的光轨，所以可以看到光盘表面呈现出的彩色图样；透过两指并拢后成的一条细缝观察日光灯，可以看到细缝间的明暗条纹。

实验原理

水面上的波传播时遇到一个有孔的障碍物，如果小孔的直径比光的波长小或相差不大时，穿过小孔的波的形状与原来的波的形状无关，小孔可以看作产生新波的波源，如图 1。

光是电磁波，所以具有波的特性。惠更斯提出当光波在传播过程中，波阵面上的各点都起着发射次波的波源的作用，这些子波的包迹就形成了新的波阵面，如图 2。这就是惠更斯原理。

但是惠更斯原理不能给出衍射波的速度分布。法国物理学家菲涅耳采纳惠更斯原理中的子波观点基础上提出了同一波阵面上各点发出的子波在空间某点都是相干的理论，从而以波动理论解释光的衍射现象。建立了惠更斯-菲涅耳原理。它可以表述为：波所到达的任意点都可以看作是新的振动中心，他们发出的球面次波，空间任意点 P 的振动是包围波源的任意闭合曲面上所有这些次波在该点的相干叠加。

如图 3 所示， P 点合振动就等于波面 S 上各点面元 dS 发出的子波在 P 点上振动的叠加。 P 点光振动可表示为

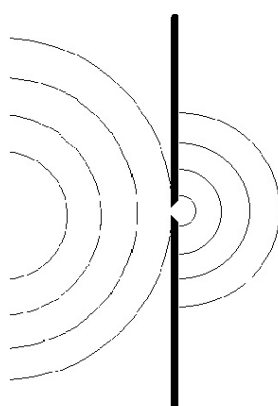


图 1 水面上的波传播时遇到一个有孔的障碍物

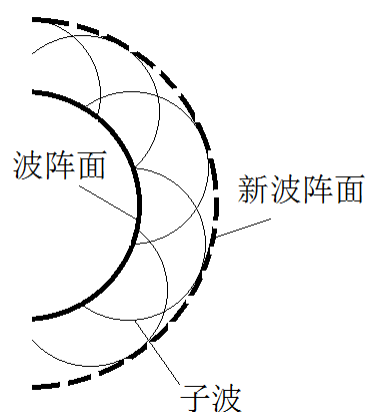


图 2 波传播示意图

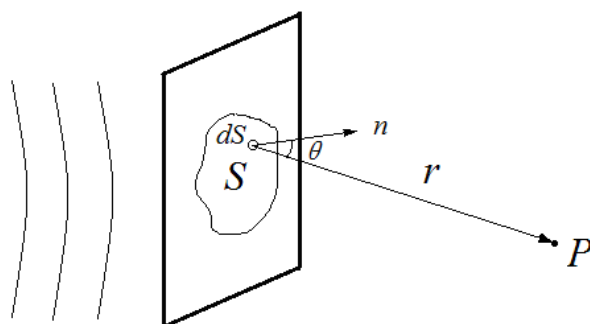


图 3 波面 S 上各点面元 dS 发出的子波

$$E_p = \int_s CK(\theta) \frac{\cos(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda})}{r} dS \quad (1)$$

式中 C 是比例系数, $K(\theta)$ 是倾斜因子 (倾角 θ 的函数)。这就是惠更斯-菲涅耳的数学表达式。

1. 夫琅禾费单缝衍射

利用公式 (1) 可以定量地描述光的衍射现象, 但要用到积分运算。所以通常分析光的衍射用到的是半波带法与振幅矢量法。

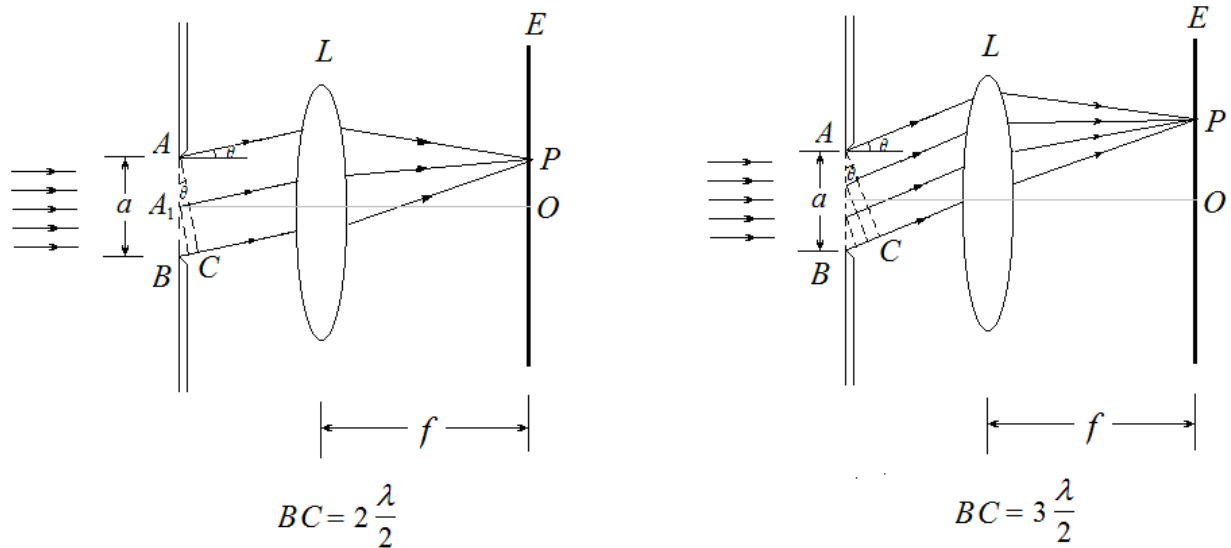


图 4 半波带法

a) 半波带法描述光的衍射现象:

如图 4, 波长为 λ 的单色光垂直入射到宽度为 a 的单缝 AB 上, 衍射后沿各个方向传播, 衍射角为 θ 。当 $\theta=0$ 时, 衍射光沿原入射方向传播, 经过透镜 L 会聚后到达屏幕 O 点上。由于透镜 L 只起会聚的作用, 不产生附加的光程差。于是在 O 点上呈现出中央明纹。

当 θ 为某一值时, BC 恰好等于偶数 n 个半波长, 这时单缝 AB 可分成偶数个半波带。例如 $n=2$, AA_1 与 A_1B 带上各对应点发出的子波的光程差为半波长, 相位差为 π 。经过透镜 L 会聚到达 P 点后相互抵消, 在 P 点处出现暗纹。

当 θ 为某一值时, BC 恰好等于奇数 n 个半波长时, 单缝 AB 处可分成奇数个半波带。例如 $n=3$, 相邻两个半波带相互抵消后留下一个半波带作用。在 P 点处出现明纹。由于光程差 $BC = a \sin \theta$ 。所以屏上单缝衍射出现明暗条纹的条件是

$$\text{中央明纹} \quad BC = a \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$\text{暗纹} \quad BC = a \sin \theta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

$$\text{明纹} \quad BC = a \sin \theta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

b) 单缝衍射光强分布:

用振幅矢量法可得到光的衍射强度为

$$I = I_0 (\sin u / u)^2 \quad (5)$$

其中 $u = \pi a \sin \theta / \lambda$

当 $a \sin \theta = 0, u = 0$, 衍射的主极大强度 $I = I_0$ 。

当 $a \sin \theta = \pm k\lambda, u = \pm k\pi$, 衍射极小 $I = 0$ 。 ($k = 1, 2, 3, \dots$)

当 $a \sin \theta = \pm(2k+1)\lambda/2$, 即 $u = \pm(2k+1)\pi/2$, 一系列衍射次极大。 ($k = 1, 2, 3, \dots$)

$k = \pm 1, u = \pm 3\pi/2$, 第一次次极大, $I = 0.045 I_0$

$k = \pm 2, u = \pm 5\pi/2$, 第二次次极大, $I = 0.016 I_0$

$k = \pm 3, u = \pm 7\pi/2$, 第三次次极大, $I = 0.0083 I_0$

图 5 是单缝衍射强度分布曲线,

由图中可以看出, 大部分光强集中在中央极大区域内。当缝的宽度 a 与光的波长 λ 相比很大时, 第一衍射极小的衍射角 θ ($\approx \lambda/a$) 很小, 中央衍射极大的宽度很小。看到的是一条很细很细的明亮线。

在单缝衍射中, 如果光源是激光。且光缝与光屏之间距离 S 比光缝宽度大的很多时, 可以不用透镜, 如图 6, 如果光屏上衍射光第一次极小位置为 x_1 与 x_2 , 且衍射角 θ 很小时, 则有 $\sin \theta = (x_1 - x_2) / 2S$, 则 $\lambda = |(x_1 - x_2) / 2S|$ 。

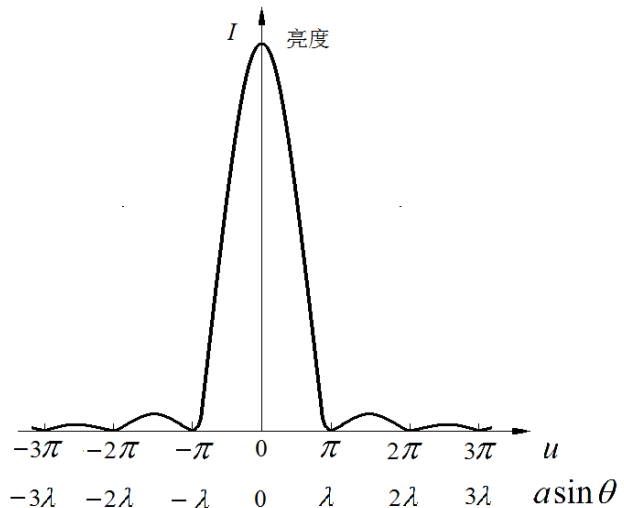


图 5 夫琅禾费单缝衍射强度分布曲线

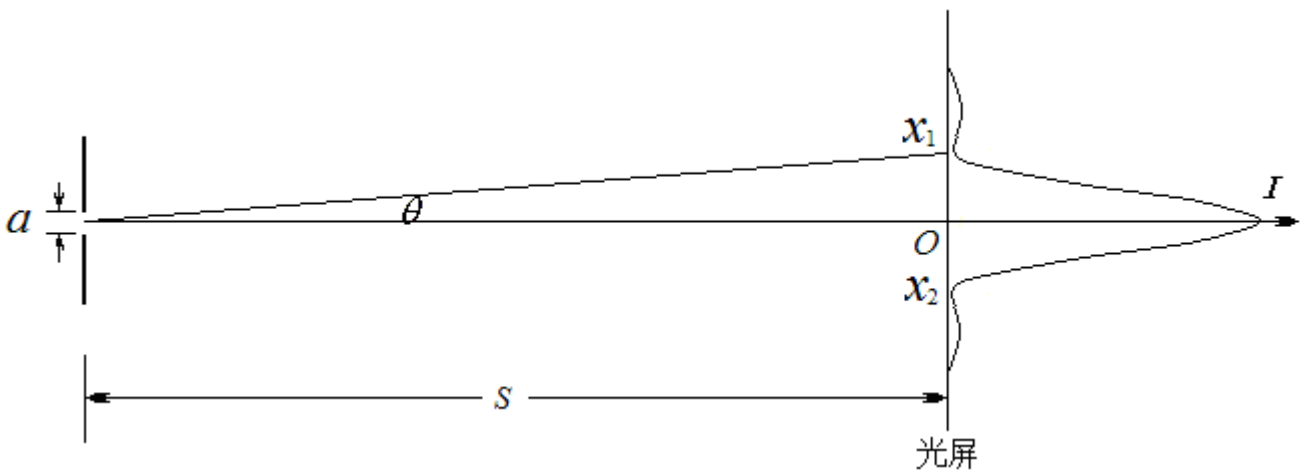


图 6 激光光源的单缝衍射

2. 双缝衍射

当两个单缝相距一定距离 d 放置时, 光经过两个单缝后在远处就会产生干涉。如图 7, 两个单缝发出波到达屏上时, 如果相位差为 π 的奇数倍 (即光程差 $d \sin \theta = \pm(2k+1)\lambda/2$, 其中 $k = 1, 2, \dots$), 在屏上得暗条纹。相位差为 π 偶数倍 (即光程差 $d \sin \theta = \pm k\lambda$, 其中 $k = 0, 1, 2, \dots$) 时, 在屏上得亮条纹。

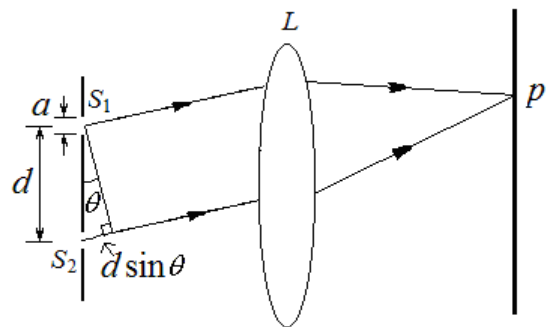


图 7 双缝衍射

如果每个单缝宽度与缝间距相差不大（或几倍）时就要考虑衍射效果。屏上干涉后光强因受到单缝衍射的调制，有可能在屏上出现亮条纹位置却看不到亮条纹的情况，而是看到暗条纹，即缺级。例如，当两缝中心距离 d 是缝宽 a 的两倍时就有缺级现象，如图 8。

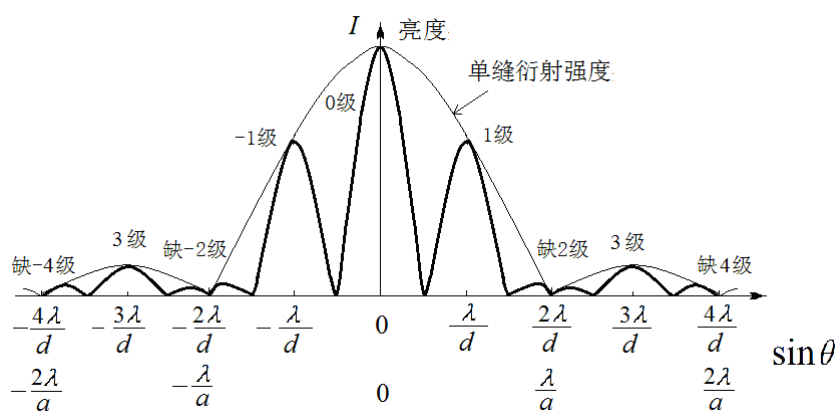


图 8 $d=2a$ 时双缝衍射强度分布曲线

实验仪器

实验仪器如图 9 所示，

1. 半导体激光器：输出功率 3 毫瓦。
2. 光学元件狭缝板(单缝与双缝)与小一维位移调节架：单缝板上有三个缝宽 0.05mm，0.1mm，0.2mm 的单缝，双缝板上有三个缝间距分别为 0.2mm，0.3mm，0.45mm 的双缝。
3. 白屏
4. 十二档光探头（光传感器）与大一维位移调节架：十二档光探头内置硅光电池，光探头在硅光电池前加有多结构圆孔与细缝光阑（栏）。
5. 激光电源与激光功率指示计：激光功率指示计上有不同的测量档可选择。
6. 带刻度标尺的导轨。

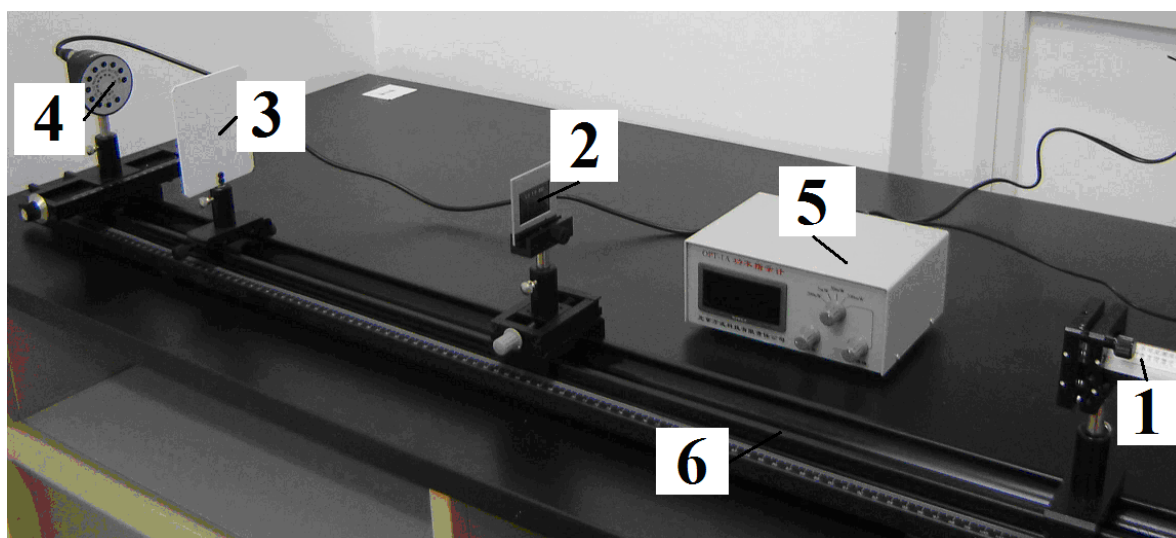


图 9 光的衍射实验仪器

当心激光!

激光是一种方向性和单色性都很好的强光,使用时要格外小心。本实验所用的激光功率虽然不大,但也绝不能让激光直接射入眼睛,它会对视网膜产生永久的伤害。同时任何光滑的表面均可造成光线的反射,也要避免反射的激光射入眼睛。做实验时,要留意其他同学,勿让他们受到激光的照射。不用激光时,最好关掉电源。

实验内容

调节激光器调节架使激光垂直照射在光屏上,放上单缝狭缝板(注意手不要接触单缝),使激光器垂直照射单缝狭缝板上。

1. 观察夫琅禾费衍射现象(比较不同单缝缝宽的衍射效果)

a) 激光垂直照射在缝宽 0.05mm 单缝上,观察夫琅禾费衍射现象,并画出示意图。

b) 激光垂直照射在缝宽 0.1mm 单缝上,观察夫琅禾费衍射现象,并画出示意图。

c) 激光垂直照射在缝宽 0.2mm 单缝上,观察夫琅禾费衍射现象,并画出示意图。

2. 测量夫琅禾费衍射光强分布

取下光屏,激光垂直照射在缝宽 0.2mm 单缝上,衍射光照射在光探头上,光探头选最大细缝光阑,注意激光功率指示计调零。

a) 调节大一维位移调节架,移动光探头,大致定出 $k=-2$ 到 $k=2$ 的次极大的位置范围,并定出 $k=0$, $k=\pm 1$, $k=\pm 2$ 极大值位置。

b) 在 $k=-2$ 到 $k=2$ 的范围内每移动 0.5mm 对应测出光探头接受到光强大小,测出缝到屏距离。

c) 作图, X 轴为衍射光在屏上的位置 x , Y 轴为衍射光光强 I , 标出 $k=0$ 光强主极大的光强与位置, $k=\pm 1$, $k=\pm 2$ 光强次极大的光强与位置,比较他们的相互之间的光强大小与关系。标出 $k=\pm 1$, $k=\pm 2$ 衍射极小位置,并由衍射光第一次极小的位置计算得激光波长。

3. 观察双缝衍射现象

a) 单缝狭缝板换上双缝狭缝板,放上光屏。在光屏上观察不同双缝间距的双缝衍射现象。并画出示意图。

b) 如果衍射图上有缺级,则根据缺级数,由双缝之间距离 d 计算出缝宽 a 。

思考题

1. 光的衍射条件是什么?
2. 举出在生活中看到衍射现象例子?
3. 双缝衍射为什么有缺级现象?
4. 缝宽变化,单缝衍射图如何变化?

参考文献

- [1] 贾玉润,王公治,凌佩玲. 大学物理实验. 上海: 复旦大学出版社. 1987.
- [2] 张铁强, 大学物理学(第二版下册). 北京: 高等教育出版社. 2012, 134~143
- [3] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下册). 北京: 北京大学出版社. 1984.
- [4] 钟锡华, 陈熙谋, 光学·近代物理. 北京: 北京大学出版社. 2004.