

## 实验 25 电子荷质比的测量

### 【实验目的】

1. 了解电子在电场和磁场中的运动规律；
2. 学习用磁聚焦法测量电子的荷质比；
3. 通过本实验加深对洛伦兹力的认识。

### 【实验仪器】

DZS-D 型电子束实验仪

### 【实验原理】

#### 1. 示波管的简单介绍：

示波管如图 1 所示，示波管包括有：

- (1) 一个电子枪，它发射电子，把电子加速到一定速度，并聚焦成电子束；
- (2) 一个由两对金属板组成的偏转系统；
- (3) 一个在管子末端的荧光屏，用来显示电子束的轰击点。

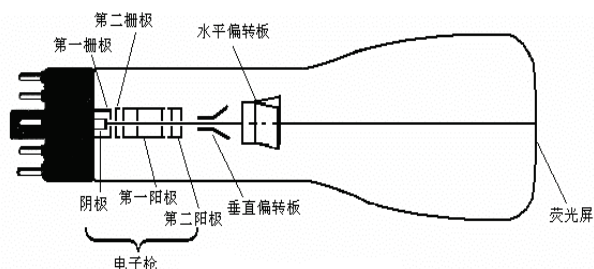


图 1 小型示波管外形示意图

所有部件全都密封在一个抽成真空的玻璃外壳里，目的是为了电子与气体分子碰撞而引起电子束散射。接通电源后，灯丝发热，阴极发射电子。栅极加上相对于阴极的负电压，它有两个作用：①一方面调节栅极电压的大小控制阴极发射电子的强度，所以栅极也叫控制极；②另一方面栅极电压和第一阳极电压构成一定的空间电位分布，使得由阴极发射的电子束在栅极附近形成一个交叉点。第一阳极和第二阳极的作用一方面构成聚焦电场，使得经过第一交叉点又发散的电子在聚焦场作用下又会聚起来；另一方面使电子加速，电子以高速打在荧光屏上，屏上的荧光物质在高速电子轰击下发出荧光，荧光屏上的发光亮度取决于到达荧光屏的电子数目和速度，改变栅压及加速电压的大小都可控制光点的亮度。水平偏转板和垂直偏转板是互相垂直的平行板，偏转板上加以不同的电压，用来控制荧光屏上亮点的位置。

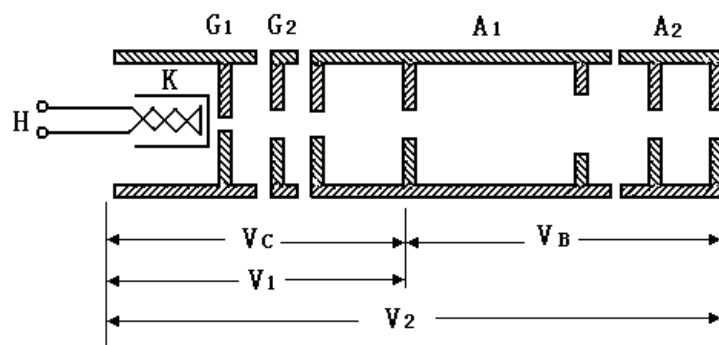
#### 2. 电子的加速和电偏转：

为了描述电子的运动，我们选了一个直角坐标系，其  $z$  轴沿示波管管轴， $x$  轴是示波管正面所在平面上的水平线， $y$  轴是示波管正面所在平面上的竖直线。

从阴极发射出来通过电子枪各个小孔的一个电子，它在从阳极  $A_2$  射出时在  $z$  方向上具有速度  $v_z$ ； $v_z$  的值取决于  $K$  和  $A_2$  之间的电位差  $V_2 = V_B + V_C$  (图 2)。

电子从  $K$  移动到  $A_2$ ，位能降低了  $e \cdot V_2$ ；因此，如果电子逸出阴极时的初始动能

可以忽略不计，那么它从  $A_2$  射出时的动能  $\frac{1}{2} m \cdot v_z^2$  就由下式确定：



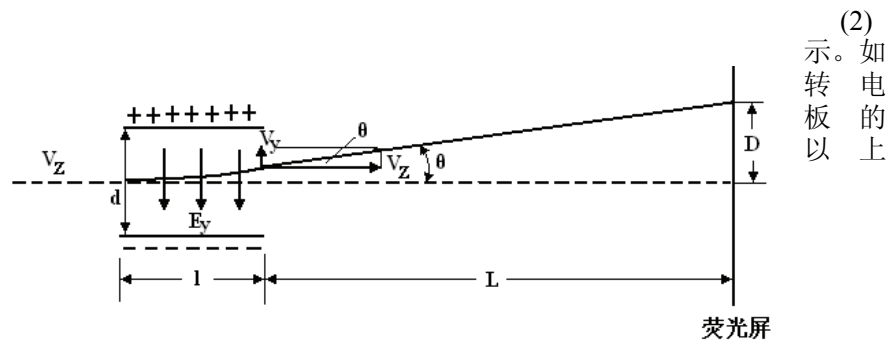
$$\frac{1}{2} m \cdot v_z^2 = e \cdot V_2 \quad (1)$$

图 2 电子枪电极结构示意图

此后，电子再通过偏转板之间的空间。如果偏转板之间没有电位差，那么电子将笔直地通过。最后打在荧光屏的中心（假定电子枪瞄准了中心）形成一个小亮点。但是，如果两个垂直偏转板（水平放置的一对）之间加有电位差  $V_d$ ，使偏转板之间形成一个横向电场  $E_y$ ，那么作用在电子上的电场力便使电子获得一个横向速度  $v_y$ ，但却不改变它的轴向速度分量  $v_z$ ，这样，电子在离开偏转板时运动的方向将与  $z$  轴成一个夹角  $\theta$ ，而这个  $\theta$  角由下式决定：

$$\text{tg}\theta = \frac{v_y}{v_z}$$

如图 3 所示，如果知道了偏位差和偏转尺寸，那么



各个量都能计算出来。

图 3 电子在电场中的运动

设距离为  $d$  的两个偏转板之间的电位差  $V_d$  在其中产生一个横向电场  $E_y = V_d / d$ ，从而对电子作用一个大小为  $F_y = eE_y = eV_d / d$  的横向力。在电子从偏转板之间通过的时间  $\Delta t$  内，这个力使电子得到一个横向动量  $m v_y$ ，而它等于力的冲量，即

$$m \cdot v_y = F_y \cdot \Delta t = e \cdot V_d \cdot \frac{\Delta t}{d} \quad (3)$$

于是：

$$v_y = \frac{e}{m} \cdot \frac{V_d}{d} \cdot \Delta t \quad (4)$$

然而，这个时间间隔  $\Delta t$ ，也就是电子以轴向速度  $v_z$  通过距离  $l$  ( $l$  等于偏转板的长度) 所需要的时间，因此  $l = v_z \Delta t$ 。由这个关系式解出  $\Delta t$ ，代入冲量—动量关系式

结果得：

$$v_y = \frac{e}{m} \cdot \frac{V_d}{d} \cdot \frac{l}{v_z} \quad (5)$$

这样，偏转角  $\theta$  就由下式给出：

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v_y}{v_z} = \frac{e \cdot V_d \cdot l}{d \cdot m \cdot v_z^2} \quad (6)$$

再把能量关系式 (1) 代入上式，最后得到：

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_d}{V_2} \cdot \frac{l}{2d} \quad (7)$$

这个公式表明，偏转角随偏转电位差  $V_d$  的增加而增大，而且，偏转角也随偏转板长度  $l$  的增大而增大，偏转角与  $d$  成反比，对于给定的总电位差来说，两偏转板之间距离越近，偏转电场就越强。最后，降低加速电位差  $V_2 = V_B + V_C$  也能增大偏转，这是因为这样就减小了电子的轴向速度，延长了偏转电场对电子的作用时间。此外，对于相同的横向速度，轴向速度越小，得到的偏转角就越大。

电子束离开偏转区域以后便又沿一条直线行进，这条直线是电子离开偏转区域那一点的电子轨迹的切线。这样，荧光屏上的亮点会偏移一个垂直距离  $D$ ，而这个距离由关系式  $D = L \operatorname{tg} \theta$  确定；这里  $L$  是偏转板到荧光屏的距离（忽略荧光屏的微小的曲率），

如果更详细地分析电子在两个偏转板之间的运动，我们会看到：这里的L应从偏转板的中心量到荧光屏。于是我们有：

$$D = L \cdot \frac{V_d}{V_2} \cdot \frac{1}{2d} \quad (8)$$

### 3. 电聚焦原理：

图 2 显示了电子枪各个电极的截面，加速场和聚焦场主要存在于各电极之间的区域。

图 4 是  $A_1$  和  $A_2$  这个区域放大的截面图，其中画出了一些等位面截线和一些电力线。从  $A_1$  出来的横向速度分量为  $v_r$  的具有离轴倾向的电子，在进入  $A_1$  和  $A_2$  之间的区域后，被电场的横向分量推向轴线。与此同时，电场  $E$  的轴向分量  $E_z$  使电子加速；当电子向  $A_2$  运动，进入接近  $A_2$  的区域时，那里的电场  $E$  的横向分量  $E_r$  有把电子推离轴线的倾向。但是由于电子在这个区域比前一个区域运动得更快，向外的冲量比前面的向内的冲量要小，所以总的效果仍然是使电子靠拢轴线。

### 4. 电子的磁偏转原理：

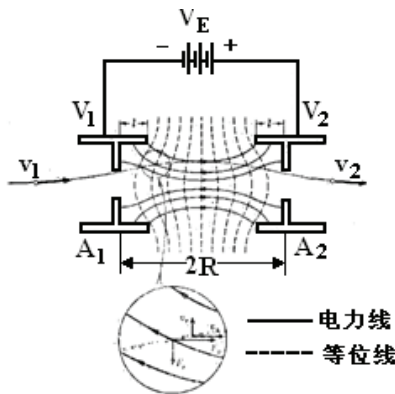


图 4 电子聚焦

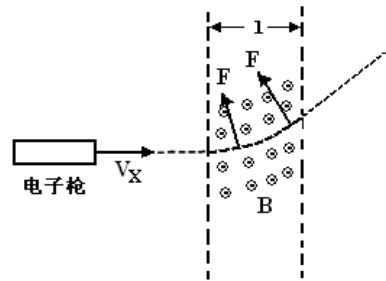


图 5 电子在磁场中的运动

在磁场中运动的一个电子会受到一个力加速，这个力的大小  $F$  与垂直于磁场方向的速度分量成正比，而方向总是既垂直于磁场  $B$  又垂直于瞬时速度  $v$ 。从  $F$  与  $v$  方向之间的这个关系可以直接导出一个重要的结果：由于粒子总是沿着与作用在它上面的力相垂直的向运动，磁场力不对粒子作功，由于这个原因，在磁场中运动的粒子保持动能不变，因而速率也不变。当然，速度的方向可以改变。在本实验中，我们将观测到在垂直于电子束方向的磁场作用下

电子束的偏转；图 5 电子从电子枪发射出来时，其速度  $v$  由下面能量关系式决定：

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot V_2 = e \cdot (V_B + V_C)$$

电子束进入长度为  $l$  的区域，这里有一个垂直于纸面向外的均匀磁场  $B$ ，由此引起的磁场力的大小为  $F = e \cdot v \cdot B$ ，而且它始终垂直于速度，此外，由于这个力所产生的加速度在每一瞬间都垂直于  $v$ ，此力的作用只是改变  $v$  的方向而不改变它的大小，也就是说。粒子以恒定的速率运动。电子在磁场力的影响下作圆弧运动。因为圆周运

动的向心加速为  $v^2/R$ ，而产生这个加速度的力(有时称为向心力)必定为  $m \cdot v^2/R$ ，所以圆弧的半径很容易计算出来。向心力等于  $F = e \cdot v \cdot B$ ，因而  $m \cdot v^2/R = e \cdot v \cdot B$  即  $R = mv/eB$ 。电子离开磁场区域之后，重新沿一条直线运动，最后，电子束打在荧光屏上某一点，这一点相对于没有偏转的电子束的位置移动了一段距离。

### 5. 磁聚焦和电子荷质比的测量原理：

置于长直螺线管中的示波管，在不受任何偏转电压的情况下，示波管正常工作时，调节亮度和聚焦，可在荧光屏上得到一个小亮点。若第二加速阳极  $A_2$  的电压为  $V_2$ ，则电子的轴向运动速度用  $v_z$  表示，则有

$$v_z = \sqrt{\frac{2e \cdot V_2}{m}} \quad (9)$$

当给其中一对偏转板加上交变电压时，电子将获得垂直于轴向的分速度(用  $v_r$  表示)，此时荧光屏上便出现一条直线，随后给长直螺线管通一直流电流  $I$ ，于是螺线管内便产生磁场，其磁场感应强度用  $B$  表示。众所周知，运动电子在磁场中要受到洛伦兹力  $F = ev_r B$  的作用 ( $v_z$  方向受力为零)，这个力使电子在垂直于磁场(也垂直于螺线管轴线)的平面内作圆周运动，设其圆周运动的半径为  $R$ ，则有：

$$e \cdot v_r \cdot B = \frac{m \cdot v_r^2}{R} \quad \text{即 } R = \frac{m \cdot v_r}{e \cdot B} \quad (10)$$

圆周运动的周期为：

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v_r} = \frac{2\pi \cdot m}{e \cdot B} \quad (11)$$

电子既在轴线方面作直线运动，又在垂直于轴线的平面内作圆周运动。它的轨道是一条螺旋线，其螺距用  $h$  表示，则有：

$$h = v_z \cdot T = \frac{2\pi \cdot m}{e \cdot B} \cdot v_z \quad (12)$$

从(11)、(12)两式可以看出，电子运动的周期和螺距均与  $v_r$  无关。虽然各个点电子的径向速度不同，但由于轴向速度相同，由一点出发的电子束，经过一个周期以后，它们又会在距离出发点相距一个螺距的地方重新相遇，这就是磁聚焦的基本原理，由(12)式可得

$$e/m = 8\pi^2 \cdot V_2 / h^2 \cdot B^2 \quad (13)$$

长直螺线管的磁感应强度  $B$ ，可以由下式计算：

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad (14)$$

将 (14) 代入 (13)，可得电子荷质比为：

$$e/m = 8\pi^2 \cdot V_2 \cdot (L^2 + D^2) / \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot h^2 \cdot I^2 \quad (15)$$

$\mu_0$  为真空中的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  亨利/米

本仪器的其它参数如下：

螺线管内的线圈匝数：  $N = 526T$

螺线管的长度：  $L = 0.234m$

螺线管的直径：  $D = 0.090m$

螺距（Y 偏转板至荧光屏距离）  $h = 0.145m$

### 【实验步骤】

#### 1. 电偏转：

(1) 接线图见图 6

(2) 开启电源开关，将“电子束—荷质比”选择开关打向电子束位置，辉度适当调节，并调节聚焦，使屏上光点聚成一细点，应注意：光点不能太亮，以免烧坏荧光屏。



图 6 电偏转接线示意图

(3) 光点调零，将 X 偏转输出的两接线柱和电偏转电压表的两输入接线柱相连接，调节

“X 调节”旋钮，使电压表的指示为零，再调节调零的 X 旋钮，使光点位于示波管垂

直

中线上。同 X 调零一样，将 Y 调零后，使光点位于示波管的中心原点。

(4) 测量 D 随  $V_d$  (X 轴) 变化：调节阳极电压旋钮，使阳极电压  $V_2 = 600V$ 。将电偏转电压表接到电偏转水平电压输出的两接线柱上，测量  $V_d$  值和对应的光点的位移量 D 值，提高电压转电压，每隔 3 伏测一组  $V_d$ 、D 值，把数据一一记录到表格 1-1 中。然后调节  $V_2 = 700V$ ，重复以上实验步骤。

(5) 同 X 轴一样，只要把电偏转电压表改接到垂直偏转电压输出端，即可测量 Y 轴 D -  $V_d$  的变化规律。

## 2. 电聚焦：

(1) 不必接线，开启电源开关，将“电子束—荷质比”选择开关拨到电子束，适当调节辉度。调节聚焦，使屏幕上光点聚焦成一细点，注意：光点不要太亮，以免烧坏荧光屏，缩短示波管寿命。

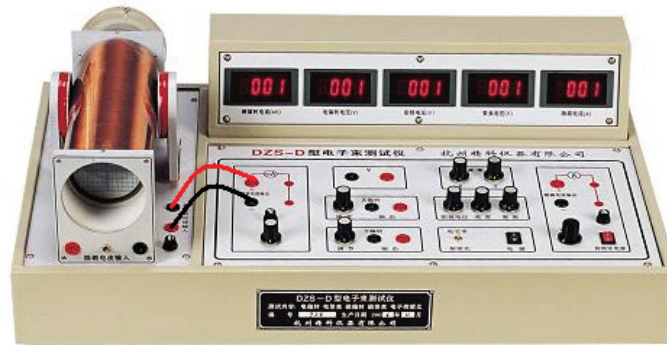
(2) 光点调零，通过调节“X 偏转”和“Y 偏转”旋钮，使光点位于 X、Y 轴的中心。

(3) 调节阳极电压  $V_2 = 600V, 700V, 800V, 900V, 1000V$ ，调节聚焦旋钮（改变聚焦电压）使光点分别达到最佳的聚焦效果，测量并记录各对应的聚焦电压  $V_1$ 。

(4) 求出  $V_2 / V_1$  比值。

## 3. 磁偏转：

(1) 接线



图见图 7

图 7 磁偏转接线示意图

(2) 开启电源开关，将“电子束—荷质比”选择开关打向电子束位置，辉度适当调节，并调节聚焦，使屏上光点聚焦成一细点，应注意：光点不能太亮，以免烧坏荧光屏。

(3) 光点调零，在磁偏转输出电流为零时，通过调节“X 偏转”和“Y 偏转”旋钮，使光点位于 Y 轴的中心原点。

(4) 测量偏转量 D 随磁偏电流 I 的变化，给定  $V_2$  (600V)，按图 8 所示接线，调节磁偏电流调节旋钮（改变磁偏电流的大小），每 10mA 测量一组 D 值，改变  $V_2$  (700V)，再测一组 D - I 数据。

## 4. 磁聚焦和电子荷质比的测量：

(1) 接线图见图 8



图 8 磁聚焦(荷质比测定)接线示意图

- (2) 把励磁电流接到励磁电流的接线柱上，把励磁电流调节旋钮逆时针旋到底。
- (3) 开启电子束测试仪电源开关，“电子束~荷质比”转换开关置于荷质比方向，此时荧光屏上出现一条直线，把阳极电压调到 700V。
- (4) 开启励磁电流电源，逐渐加大电流使荧光屏上的直线一边旋转一边缩短，直到变成一个小光点。读取电流值，然后将电流调为零。再将电流换向开关（在励磁线圈下面）扳到另一方，再从零开始增加电流使屏上的直线反方向旋转并缩短，直到再一次得到一个小光点，读取电流值并记录到表格 4 中。
- (5) 改变阳极电压为 800V，重复步骤 (3)。
- (6) 实验结束，请先把励磁电流调节旋钮逆时针旋到底。

**【实验数据记录】**

**1-1 电偏转（水平方向）：**

(1) 阳极电压  $V_2 = 600V, V_2 = 700V$  时，X 轴  $D - V_d$  数据记录

$V_d(600V)$											
D (mm)											
$V_d(700V)$											
D (mm)											

(2) 作  $D - V_d$  图，求出曲线斜率得电偏转灵敏度  $S_x$  值。

**1-2 电偏转（垂直方向）：**

(1) 阳极电压  $V_2 = 600V, V_2 = 700V$  时，Y 轴  $D - V_d$  数据记录

$V_d(600V)$											
D (mm)											
$V_d(700V)$											
D (mm)											

(2) 作  $D - V_d$  图，求出曲线斜率得电偏转灵敏度  $S_y$  值。



## 2. 电聚焦:

记录不同 $V_2$ 下的 $V_1$ 数值, 求出 $V_2/V_1$ 。

## 3. 磁偏转:

(1)  $V_2$  电压为 600V, D-I 数据

I (mA)												
D (mm)												

(2) 作 D-I 图, 求曲线斜率得磁偏转灵敏度。

(3)  $V_2$  电压为 700V, D-I 数据

I (mA)												
D (mm)												

(4) 作 D-I 图, 求曲线斜率得磁偏转灵敏度。

## 4. 磁聚焦和电子荷质比的测量:

电 流 \ 电 压	700(V)	800(V)
$I_{\text{正向}}$ (A)		
$I_{\text{反向}}$ (A)		
$I_{\text{平均}}$ (A)		
电子荷质比 $e/m$ (C/kg)		

### 【注意事项】

1. 光点不能太亮, 以免烧坏荧光屏, 缩短示波管寿命;
2. 实验结束, 请先把励磁电流调节旋钮逆时针旋到底;
3. 电子的荷质比的理论之为:  $e/m = 1.76 \times 10^{11} (c/kg)$

### 【思考题】

1. 本实验中磁力是否会作功, 是否会改变电子的动能? 请说明。
2. 电子束为何在本实验中可清楚看到? 是否电子束自己可以发光? 请解释。