

## **【实验要求】**

### **1. 课前预习**

- (1) 认真阅读实验讲义；
- (2) 不写预习报告，完成预习测试题。

### **2. 实验阶段**

- (1) 实验仪器：了解仪器的功能，掌握仪器的使用；轻拿轻放、爱护实验设备；
- (2) 实验数据：如实、规范记录实验数据；不得篡改、抄袭；
- (3) 数据签字：实验完毕，原始数据须经指导老师签字；并整理实验设备；
- (4) 出门测试：完成结束后，完成出门测试题。

### **3. 实验报告**

- (1) 按照课程具体格式要求；
- (2) 提供原始签字实验数据；
- (3) 数据处理：按实验要求处理数据、绘图、分析与讨论等；
- (4) 思考题：回答思考题。

# 弗兰克-赫兹实验

## 【实验目的】

- (1) 通过测定氩原子等元素的第一激发电位，证明原子能级的存在。
- (2) 了解研究原子内部能量问题时所采用的基本实验方法
- (3) 了解电子与原子碰撞和能量交换过程的微观图象
- (4) 进一步理解玻尔的原子理论

1913 年丹麦物理学家玻尔 (N·Bohr) 提出了原子能级的概念并建立了原子模型理论，原子处于稳定状态时不辐射能量，当原子从高能态 (能量  $E_m$ ) 向低能态 (能量  $E_n$ ) 跃迁时才辐射。辐射能量满足：

$$\Delta E = E_m - E_n$$

对于外界提供的能量，只有满足原子跃迁到高能级的能级差，原子才吸收并跃迁，否则不吸收。

1914 年德国物理学家弗兰克 (J·Franck) 和赫兹 (G·Hertz) 用慢电子穿过汞蒸气的实验，测定了汞原子的第一激发电位，从而证明了原子分立能态的存在。后来他们又观测了实验中被激发的原子回到正常态时所辐射的光，测出的辐射光的频率很好地满足了玻尔理论。弗兰克—赫兹实验的结果为玻尔理论提供了直接证据。

玻尔因其原子模型理论获 1922 年诺贝尔物理学奖，而弗兰克与赫兹的实验也于 1925 年获此奖。弗兰克——赫兹实验与玻尔理论在物理学的发展史中起到了重要的作用。

## 二、实验原理

弗兰克—赫兹实验原理 (如图 1 所示)，氧化物阴极 K，阳极 P，第一、第二栅极分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 。

K- $G_1$ - $G_2$  加正向电压，为电子提供能量。 $U_{G_1K}$  的作用主要是消除空间电荷对阴极电子发射的影响，提高发射效率。 $G_2$ -P 加反向电压，形成拒斥电场。

电子从 K 发出，在 K- $G_2$  区间获得能量，如果电子进入  $G_2$ -P 区域时动能大于或等于  $eU_{G_2P}$ ，就能到达板极形成板极电流  $I$ 。

电子在不同区间的情况：

- (1) **K- $G_1$  区间** 电子迅速被电场加速而获得能量。

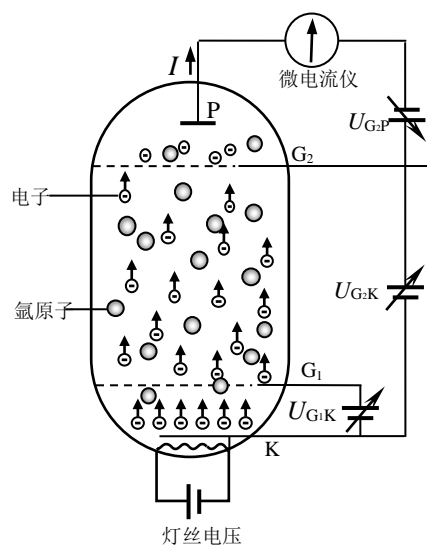


图 1 弗兰克-赫兹实验原理图

(2) **G<sub>1</sub>-G<sub>2</sub> 区间** 电子继续从电场获得能量并不断与氩原子碰撞。当其能量小于氩原子第一激发态与基态的能级差 $\Delta E = E_2 - E_1$ 时，氩原子基本不吸收电子的能量，碰撞属于弹性碰撞。当电子的能量达到 $\Delta E$ ，则可能在碰撞中被氩原子吸收这部分能量，这时的碰撞属于非弹性碰撞。 $\Delta E$ 称为临界能量。

(3) **G<sub>2</sub>-P 区间** 电子受阻，被拒斥电场吸收能量。若电子进入此区间时的能量小于 $eU_{G2P}$ 则不能到达板极。

由此可见，若 $eU_{G2K} < \Delta E$ ，则电子带着 $eU_{G2K}$ 的能量进入 G<sub>2</sub>-P 区域。随着 $U_{G2K}$ 的增加，电流 $I$ 增加（如图 2 中 *Oa* 段）。

若 $eU_{G2K} = \Delta E$ 则电子在达到 G<sub>2</sub>处刚够临界能量，不过它立即开始消耗能量了。继续增大 $U_{G2K}$ ，电子能量被吸收的概率逐渐增加，板极电流逐渐下降（如图 2 中 *ab* 段）。

继续增大 $U_{G2K}$ ，电子碰撞后的剩余能量也增加，到达板极的电子又会逐渐增多（如图 2 中 *bc* 段）。

若 $eU_{G2K} > n\Delta E$ 则电子在进入 G<sub>2</sub>-P 区域之前可能 $n$ 次被氩原子碰撞而损失能量。板极电流 $I$ 随加速电压 $U_{G2K}$ 变化曲线就形成 $n$ 个峰值，如图 2 所示。相邻峰值之间的电压差 $\Delta U$ 称为氩原子的第一激发电位。氩原子第一激发态与基态间的能级差

$$\Delta E = e\Delta U \quad (2)$$

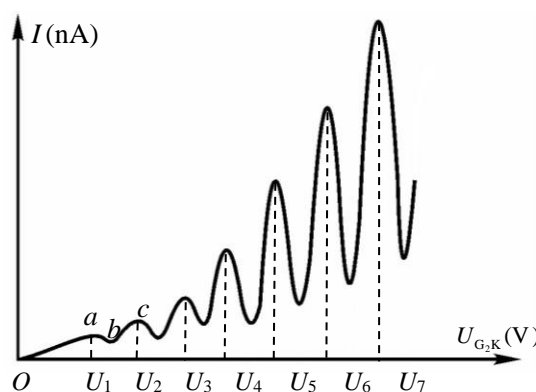


图 2 弗兰克-赫兹实验 $V_{G2K} \sim I$ 曲线

### 三、实验器材

FD-FH-C 弗兰克-赫兹（氩管）实验仪，FH-Hg-6 弗兰克-赫兹（汞管）实验仪，示波器

### 四、实验内容

#### 1、氩原子激发曲线观察与测量

##### (1) 观察氩原子的激发曲线

(a) 将实验仪的“ $U_{G2K}$  输出”与示波器的“X 相”通道相连，“ $I_P$  输出”与示波器的“Y”通道相连。将实验仪“手动 / 自动”置于“自动”模式，“ $I_P$  电流显示”设置为“0.1uA”；示波器设置为“X-Y”模式。

(b) 将灯丝电压 $U_F$ 、栅极电压 $U_{G1K}$ 、拒斥电压 $U_{G2P}$ 缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”，

预热 2 分钟。在参考值 $\pm 50\%$  范围内分别调节  $U_F$ 、 $U_{G1K}$ 、 $U_{G2P}$ 、 $U_{G2K}$ ，观测并用文字描述各实验参数对激发曲线的影响，分析各参数对激发曲线的作用机制。

## (2) 测量氩原子的第一激发电位

(1) 将实验仪“手动 / 自动”置于“手动”模式，“ $I_p$  电流显示”设置为“ $0.1\mu A$ ”。

(2) 将灯丝电压  $U_F$ 、栅极电压  $U_{G1K}$ 、拒斥电压  $U_{G2P}$  缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”。

**粗测：** 手动方式逐渐增大  $U_{G2K}$  电压，观察  $I_p$  变化，依次记录激发曲线的 6 个峰、谷的大概位置。

**细测：** 手动方式逐渐增大  $U_{G2K}$  电压，在  $10.0\sim 95.0V$  内以  $0.5\sim 2.0V$  为步长（在峰、谷附近以  $0.5V$  为步长）改变加速电压  $U_{G2K}$ ，观察  $I_p$  变化，测量 6 个完整的峰、谷数据。

(3) 以第二栅极电压  $U_{G2K}$  为横坐标，阳极电流  $I_p$  为纵坐标，绘制氩的  $U_{G2K}\sim I_p$  激发曲线；根据大学物理实验（第二册）图 4.3.1-7 所述方法得到相差曲线。用最小二乘法处理，计算出氩原子的第一激发电位。

## 2、汞原子激发曲线观察与测量

### (1) 观察汞原子的激发曲线

(1) 按图 3 所示，连接汞原子第一激发曲线测量电路，打开实验仪电源开关。

(2) 设置加热炉温度：打开加热炉电源开关，根据仪器出厂给定的参考温度，设置温控器的目标温度，一般设定为  $220^\circ C$ 。

(3) 加热炉升温过程需要 15-20 分钟，注意观察温控显示器。

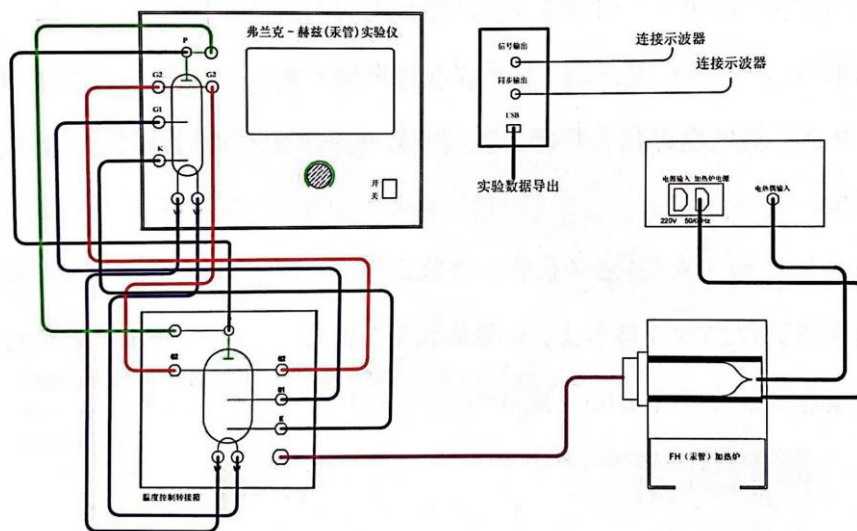


图 3 汞原子第一激发曲线的电路图

(4) 将灯丝电压  $U_F$ 、栅极电压  $U_{G1K}$ 、拒斥电压  $U_{G2P}$  缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”。在参考值 $\pm 50\%$ 范围内分别调节  $U_F$ 、 $U_{G1K}$ 、 $U_{G2P}$ ，采用“自动”模式观察原子激发曲线，并用文字描述各实验参数对激发曲线的影响，分析各参数对激发曲线的作用机制。

## (2) 测量汞原子的第一激发电位

(1) 将灯丝电压  $U_F$ 、栅极电压  $U_{G1K}$ 、拒斥电压  $U_{G2P}$  缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”。手动方式逐渐增大  $U_{G2K}$  电压，在  $5.0\sim 65.0V$  内，每次改变  $0.5V$ ，记录一次  $I_p$  数值，测量 10 个完整的峰、谷数据。

(2) 以栅极电压  $U_{G2K}$  为横坐标，阳极电流  $I_p$  为纵坐标，绘制汞的  $U_{G2K}\sim I_p$  激发曲线；根据大学物理实验（第二册）图 4.3.1-7 所述方法得到相差曲线。用最小二乘法处理，计算出汞原子的第一激发电位。

## (3) 测量汞原子较高能级的激发曲线

按下“高激”模式，按图 4 电路图连接汞原子较高激发电位的测量电路，将 G1 和 G2 短接。炉温从  $220^\circ C$  降至  $100\sim 135^\circ C$ 。将灯丝电压  $U_F$ 、拒斥电压  $U_{G2P}$  缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”。采用“自动”模式，在  $5.0\sim 35.0V$  内（步长  $0.05V$ ），测量汞原子较高能级的激发曲线，分析汞原子较高能级激发曲线的特征变化。

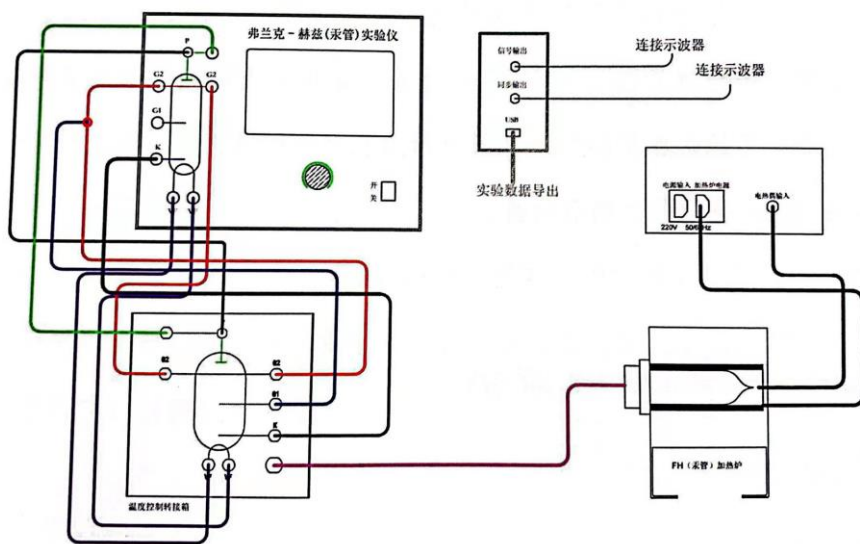


图 4 汞原子较高激发曲线的电路图

## 3、课间计算

若已知在汞蒸汽中电子的平均自由程 $\lambda$ 与温度  $T$ 、蒸汽压  $p$  的关系为：

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p}$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常数，汞原子半径  $r = 0.176 \text{ nm}$ 。

计算 80、90、100、160、170、180℃ 时电子在汞蒸汽中的平均自由程  $\lambda$ 。

### 思考题：

- (1)  $U_{G2K} \sim I_p$  曲线电流下降并不十分陡峭，主要原因是什么？
- (2)  $I$  的谷值并不为零，而且谷值依次沿  $U_{G2K}$  轴升高，如何解释？
- (3) 第一峰值所对应的电压是否等于第一激发电位？原因是什么？
- (4) 写出氙（或汞）原子第一激发态与基态的能级差。

### 注意事项：

1、因有微小电流通过阴极 K 而引起电流热效应，致使阴极发射电子数目逐步缓慢增加，从而使阳极电流  $I_p$  缓慢增加，形成“飘移”现象。 $U_{G2K}$  应从小至大依次逐渐增加，不回读，不跨读。

2、实验完毕后， $U_F$ 、 $U_{G1K}$ 、 $U_{G2K}$ 、 $U_{G2P}$  应调至最小值！

## 附 录

表 S1 不同温度下汞的蒸汽压

玻尔兹曼常数 $k$	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸汽压/Pa
60	3.4
70	6.4
80	11.8
90	21.1
100	36.4
110	61.0
120	99.4
130	158.1
140	246.0
150	374.2
160	558.5
170	817.0
180	1172.7
190	1656.3
200	2304.7

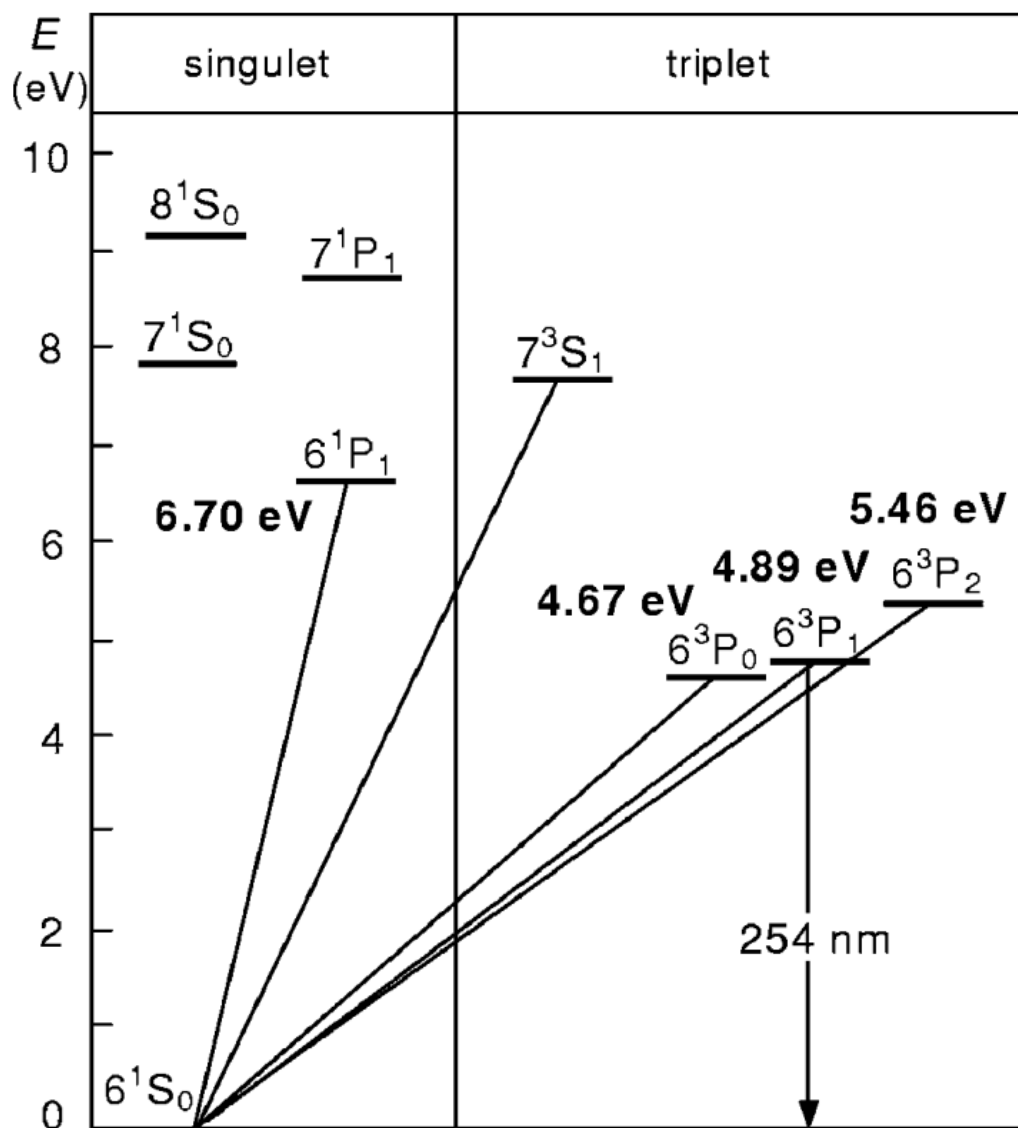


图 S1 汞原子简化能级图



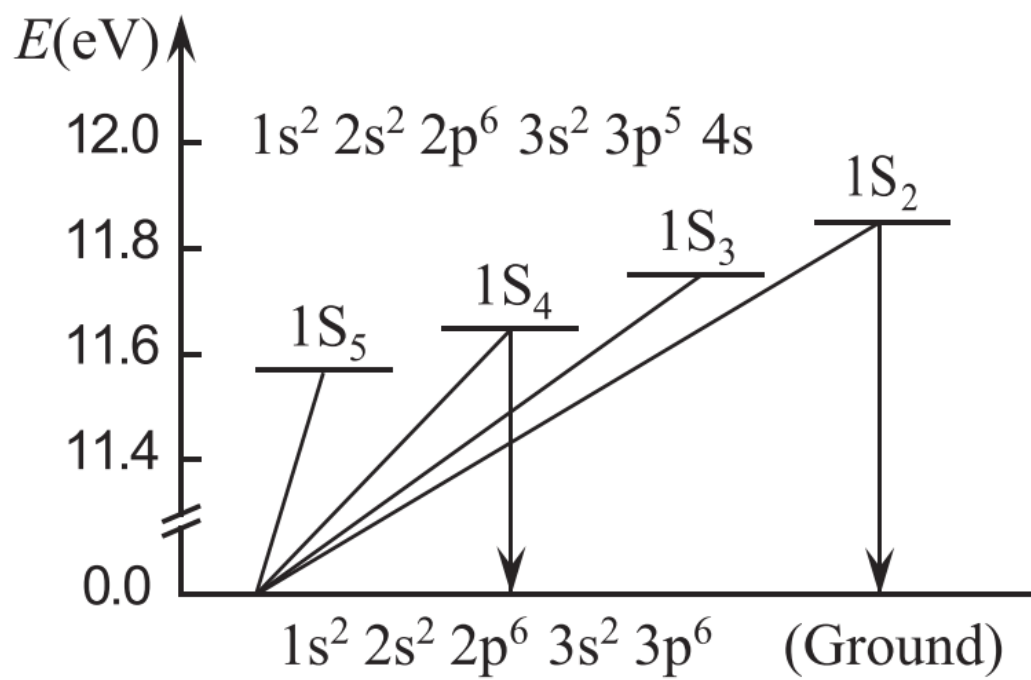


图 S1 氩原子简化能级图