

# 夫兰克-赫兹实验

## 实验目的

1. 测定汞原子的第一激发电位，验证原子内部量子化能级的存在。
2. 分析灯丝电压、拒斥电压和温度等因素对 F-H 实验曲线的影响。

## 实验原理

### 一、玻尔原子理论

原子只能较长久地停留在一些稳定状态（称为定态）。这些定态的能量（称为能级）是不连续分布的，其中能级最低的状态称为基态。原子在两个定态之间发生跃迁时，要吸收或发射一定的能量，该能量等于两个定态之间的能量差  $\Delta E = E_2 - E_1$ 。

当电子与原子发生碰撞时，碰撞前后整体能量保持恒定：

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV'^2 + \Delta E$$

其中， $m$ 、 $M$  分别为电子、原子的质量， $v$ 、 $v'$  分别为电子碰撞前、后的速度， $V$ 、 $V'$  分别为原子碰撞前后的速度。 $\Delta E$  为原子内能的变化。

通常，电子的能量通过在静电场中的加速获得，即  $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = eU$ 。原子的动能（热运动）由温度决定。由于  $m \ll M$ ，碰撞前后原子的动能几乎不发生改变。因此，电子动能的变化直接反映了原子内能的变化。使原子从基态激发到第一激发态所需的对静电子的最低加速电压，称为原子的第一激发电位。

### 二、夫兰克-赫兹实验的物理过程

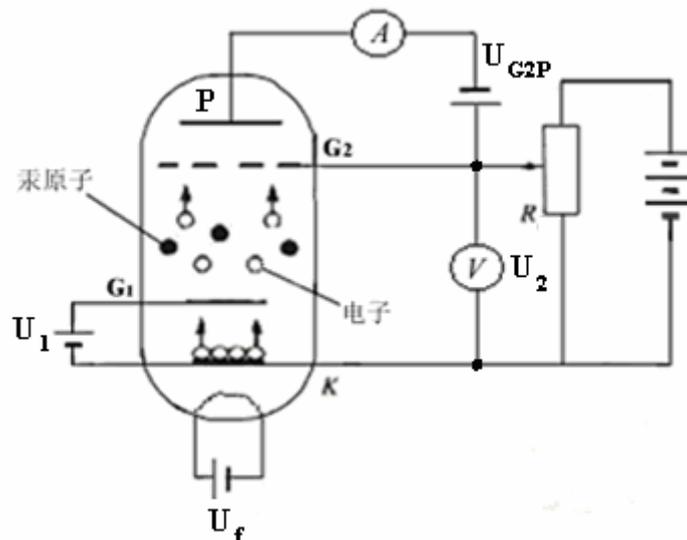


图 1 夫兰克-赫兹实验原理图

图 1 是夫兰克-赫兹原理图。图中左侧为夫兰克-赫兹管（F-H 管），它是一种密封的玻璃管，其中充有稀薄的原子量较大的汞或惰性气体原子。在这里灯丝用来对阴极 K 加热，使其发射热

电子。灯丝电压  $U_r$  越高，阴极  $K$  发射的电子流也就越大。第一栅极  $G_1$  的主要作用是消除空间电荷对阴极电子发射的影响。栅极  $G_1$  和阴极  $K$  之间的电压通常只有几伏。第二栅极  $G_2$  的作用是在  $G_2$  和  $K$  之间形成对电子加速的静电场。由阴极  $K$  发射的绝大多数热电子被栅极  $G_1$  和  $G_2$  所接收，并且其中被栅极  $G_2$  接收的比例随加速电压  $U_{G2K}$  的升高而增大。少量的发射电子穿过栅极  $G_2$  达到极板  $P$ ，形成板流  $I_p$ 。板流  $I_p$  的大小由微电流测试仪进行测量。在板极  $P$  和  $G_2$  之间加有一反向拒斥电压  $U_{G2P}$ ，它对电子减速，使经过碰撞后动能非常低的电子折回并被栅极  $G_2$  接受，从而起到调节板流  $I_p$  大小的作用。

设汞原子的基态能量为  $E_1$ ，第一激发态能量为  $E_2$ ，且由热阴极发射的电子初速度为零。受加速电场  $U_2$  作用，电子到达栅极  $G_2$  时所获得的能量为  $E=eU_2$ ，具有这种能量的电子与汞原子发生碰撞。当  $U_2$  较低时，电子能量  $eU_2$  小于原子的激发能（即  $eU_2 < E_2 - E_1$ ），电子与汞原子只能发生弹性碰撞。由于汞原子质量是电子质量的  $10^5$  倍，碰撞过程中电子几乎不损失能量。因此，到达  $G_2$  的电子仍有足够的动能可以克服拒斥电场  $U_{G2P}$  的阻碍，向板极运动，形成板流  $I_p$ 。并且  $I_p$  随  $U_2$  增加而增加。

当  $U_2$  增大到原子的第一激发电位  $U_0$  时，电子积累的动能  $E$  达到原子的激发能，即  $eU_2 = E_2 - E_1$ ，则在电子与原子间就产生非弹性碰撞，汞原子吸收电子的能量，由基态被激发到第一激发态。而电子损失的动能数值上恰好等于汞原子的这一激发能  $\Delta E = E_2 - E_1 = eU_0$ 。电子损失能量后不能穿越拒斥场，引起板流  $I_p$  聚减，于是  $I_p - U_2$  特性曲线上出现第一个峰值。

继续增大  $U_2$ ，电子的动能又会增加，当电子积累的动能足以克服反向拒斥电压  $U_{G2P}$  的作用时，即  $eU_2 - (E_2 - E_1) > eU_{G2P}$  时，电子又能到达板极，使板流  $I_p$  回升。当  $U_2$  增大到  $2U_0$  时，电子经第一次非弹性碰撞后的剩余能量足以使其与汞原子产生第二次非弹性碰撞，汞原子再次从电子中取得能量，能量交换的结果使  $I_p$  再次下降。同理可知， $U_2$  继续增大时，电子会在第二栅极  $G_2$  附近与汞原子发生第三次、第四次、……非弹性碰撞，引起板流  $I_p$  的相应下跌。可见，随着加速电压  $U_2$  的增加，板流  $I_p$  会周期性地出现极大值和极小值，凡满足加速电压  $U_2 = nU_0$ （ $n=1,2,3,\dots$ ）时，板流  $I_p$  都会相应下跌，形成规则起伏的  $I_p - U_2$  特性曲线。曲线各峰值之间的等间隔规律表明：碰撞过程中电子有确定的能量传递给汞原子，而与相邻的两板流极大值（或极小值）所对应的加速电压的差值就是汞原子的第一激发电位  $U_0$ 。它的公认值为  $4.9V$ 。

由图 2 的  $I_p - U_2$  特性曲线可见，板流  $I_p$  并不是突然下降的，其峰线有一定宽度。这是因为热阴极所发射的电子具有初速，电子的初始能量不完全相同，服从一定的统计分布规律，同时电子与原子的碰撞有一定的几率，在大部分电子与汞原子碰撞而损失能量的时候，还会有部分电子不发生碰撞而到达板极。电子的能量越大，碰撞的几率越小，因此， $I_p - U_2$  特性曲线上各电流极小值会随加速电压  $U_2$  的增大而增大。

实际测量中，由于  $F-H$  管的栅极与阴极的材料不同，会产生接触电位差  $V_a$ ，这会使  $F-H$  曲线沿电压轴平移。 $V_a$  的大小和极性，取决于两种金属材料的逸出功之差： $V_a = (W_G - W_K)/e$ 。

处于激发态的汞原子是不稳定的，当它跳回基态时，将以光量子的形式释放出能量  $eU_0$ ，相应的光辐射波长为  $253.7nm$ （由  $eU_0 = h\nu$  及  $\nu = c/\lambda$  计算）。可用紫外光谱仪进行观测。

1914 年夫兰克和赫兹所用的是一支充汞的三极管，只有阴极、加速栅极和板极。1920 夫兰克对原装置作了改进，使电子在加速区内获得高于  $4.9eV$  的能量，可测得汞原子的一系列量子态，进一步证实了原子内部能量状态的不连续性。

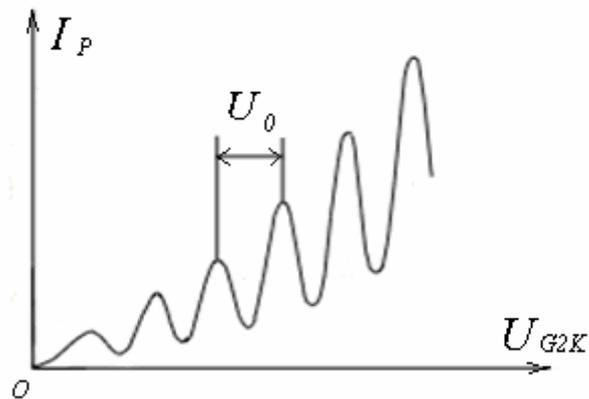


图2 充汞 F-H 管的  $I_P-U_2$  特性曲线

### 实验仪器

图3是F-H实验的实验装置图，其中右侧为装有F-H管的控温加热炉，左下为稳压电源，左上微电流测量放大器和扫描控制装置。数据输出可连接到函数记录仪。



图3 F-H 实验装置图

#### (1) F-H 管

实验选用复旦大学研制的双栅柱面型四极式夫兰克-赫兹管，其结构如图4所示。板极P为直径约14mm的敷铝铁皮圆筒，控制栅 $G_1$ 和加速栅 $G_2$ 分别用钼丝绕制成直径为1.8mm和12mm的螺旋线、阴极K是直径为1.14mm的镍管，管外壁敷有约0.05mm厚的三元氧化物涂层。管内是双向绞绕的钨丝制成的灯丝F，它与阴极K构成傍热式氧化物阴极。栅极 $G_1$ 的表面镀金或银，以确保管子性能稳定。各电极同轴地固定在云母片上，并经过严格的清洁处理及真空封装，并充汞。

#### (2) 稳压电源

可提供F-H管所需的灯丝电压 $U_f$ ，控制栅电压 $U_1$ ，加速电压 $U_2$ 及拒斥电压 $U_{G2P}$ ，实验中各参数的选取范围为：

灯丝电压：0~3V，灯丝温度对阴极的发射系数有很大影响，一般在2V左右就能发射足够的电子流。

控制栅电压：控制阴极发射的电子流的大小，一般取1V左右。

加速电压：0~60V，取 $I_P-U_2$ 特性曲线上6~10个峰即可。

拒斥电压：0.5~2V (Hg管)

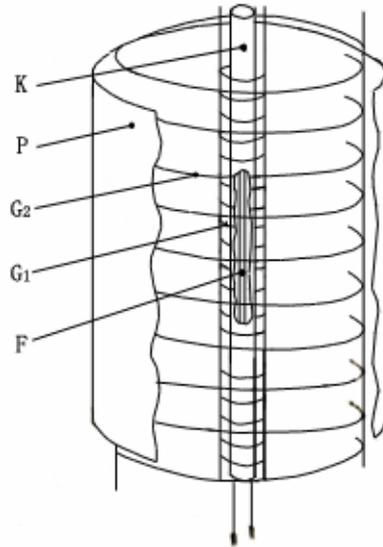


图4 F-H管的结构示意图

### (3) 控温加热炉

选择和控制 F-H 管内的汞蒸气压。汞的饱和蒸气压  $p_{\text{饱}}$  随温度的升高而急剧增高，它满足关系式： $\log(p_{\text{饱}}/\text{Pa}) = -\frac{3200}{T(\text{K})} + 10.125$ 。蒸气压高时，汞原子的密度大，电子的平均自由程就短，电子在汞蒸气中运动的平均自由程随温度升高而很快减小。电子与汞原子的碰撞次数大大增加，能量损失过大，导致板流过小。为了观察到第一个峰，一般使汞的蒸气压低一些，如果要获得较多的峰，蒸气压要高一些。当炉温偏低，加速电压又偏高时，易引起 F-H 管的电离击穿，这是要注意防止的。

### (4) Y-X 函数记录仪

Y-X 函数记录仪用于描绘板流随加速电压的变化曲线。Y-X 函数记录仪与实验仪的连接示于图 5。

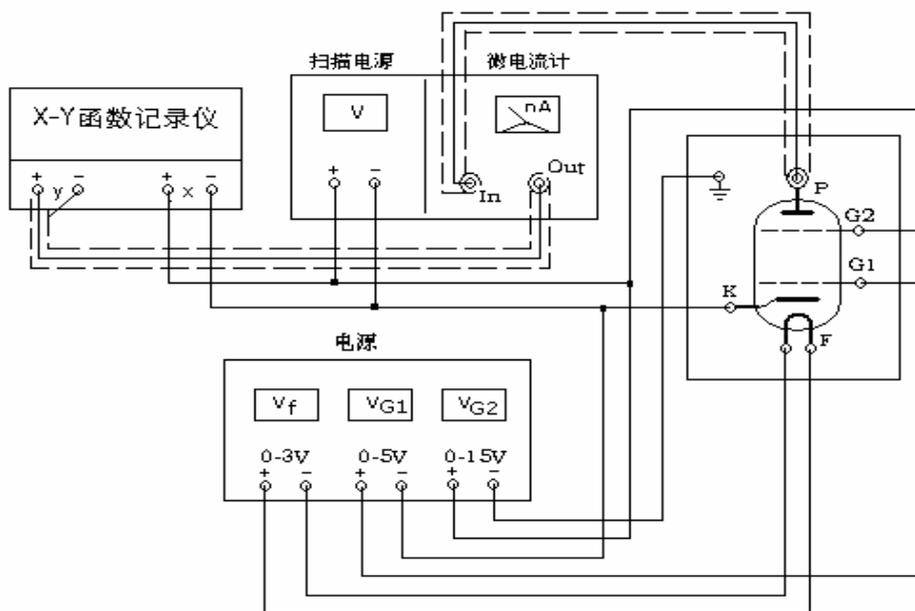


图5 测量线路图

## 实验内容

测绘 F-H 管的板流  $I_p$  与加速电压  $U_2$  的关系曲线 ( $I_p-U_{G2P}$  特性曲线), 测定汞原子的第一激发电位  $U_0$ 。

### 一、手动测量

- 1) 按图 5 所示的测量线路连接各仪器, 并检查、确认连线正确。
- 2) 开启控温加热炉电源, 设定炉温为  $150^{\circ}\text{C}$ 。加热 F-H 管, 红灯亮时, 炉温达到设定温度。
- 3) 开启微电流测试仪电源, 待炉温达到设定温度后, 根据给定的 F-H 管的工作参数, 设定灯丝电压  $U_f$ , 控制栅电压  $U_1$ , 拒斥电压  $U_{G2P}$  (以整个曲线起伏较大为宜)。
- 4) 设置扫描方式为手动。手动调节加速电压  $U_2$ , 缓慢地增加  $U_2$  至  $60.0\text{V}$ , 定性地观察板流  $I_p$  的起伏变化, 粗测“峰”“谷”的位置, 注意选择微电流测试仪的量程, 使  $I_p$  的最大值不超过量程。若量程选在  $10^{-8}$  档, 即表示满刻度指示为  $1 \times 10^{-8}\text{A}$ , 其他档量程以此类推。
- 5) 在粗测调整适宜的基础上, 从  $U_2$  最小开始, 逐点测量并记录  $I_p-U_2$  对应的数值。 $U_2$  每改变  $0.5\text{V}$  记录一次。在电流的峰、谷附近, 宜每隔  $0.2\text{V}$  取值一次。
- 6) 根据实验数据, 手工描绘  $I_p-U_2$  特性曲线, 确定各峰位的电压值  $V_n$ 。
- 7) 确定汞原子的第一激发电位  $U_0$ 。峰位电压值  $V_n$  与峰序数  $n$  的关系为:  $V_n = V_a + nU_0$ , 用最小二乘法对各组  $I_p, U_2$  值进行直线拟合得出  $U_0$  和  $V_a$  值

### 二、用 x-y 函数记录仪记录 $I_p-U_2$ 曲线, 研究温度对 $I_p-U_2$ 曲线的影响。

- 1) 设置扫描方式为自动, 用慢扫描观察板流的变化情况, 调节扫描的上限电压约  $60\text{V}$ , 以  $I_p-U_2$  曲线出现  $6 \sim 8$  个峰为宜。
- 2) 选择几种不同的炉温 ( $90^{\circ}\text{C}$ 、 $120^{\circ}\text{C}$ 、 $150^{\circ}\text{C}$  等), 炉温不要超过  $180^{\circ}\text{C}$ , 分别测绘  $I_p-U_2$  曲线, 并计算  $U_0$ 。注意曲线形状、峰谷起伏程度、峰峰间隔、峰数等有无变化, 对观测结果进行分析讨论。
- 3) 用记录仪分别研究拒斥电压及灯丝电流对  $I_p-U_2$  曲线的影响, 并分析所得结果 (选做)。

### 注意事项

1. 使用充汞管应先开启加热电炉至实验值, 再开启其他电源。实验时加热炉外壳温度较高, 要防止烫伤。
2. 不同的实验条件有不同的  $V_{G2K}$  击穿值, 炉温低于  $130^{\circ}\text{C}$  时, F-H 管较易电离击穿。当发生电离击穿时, 应立即降低  $V_{G2K}$ , 并减小  $U_f$ , 以免 F-H 管受损。
3. 灯丝电压不宜取得太大, 一般宜在  $2 \sim 3$  伏左右。

### 观察思考

1. 试分析实验中影响曲线形状 (如峰位、峰宽、峰谷起伏大小及本底电流等) 的各种因素。影响第一激发电势测量精度的主要原因是什么?
2. 解释温度较高时,  $I_p-U_{G2P}$  曲线中第一峰容易消失的原因。
3. 温度过低时, 加速电压为什么不能过高?
4. F-H 管中, 栅极位置安排是如何考虑的? 要测定更高的激发电势, 应对 F-H 管结构作何改进?

### 参考资料

- [1] 褚圣麟, 原子物理学, 高等教育出版社, 1995。
- [2] 刘复汉, 物理实验, 13 (1), 1993: 21。