

弗兰克-赫兹实验

23 级 Elaina

引言

1914 年，詹姆斯·弗兰克和古斯塔夫·路德维希·赫兹在研究中发现电子与原子发生非弹性碰撞时能量的转移是量子化的。他们的精确测定表明，电子与汞原子碰撞时，电子损失的能量严格地保持 4.9eV ，即汞原子只接收 4.9eV 的能量。由于他们的工作对原子物理学的发展起了重要作用，曾共同获得 1925 年的诺贝尔物理学奖。

在本实验中可观测到电子与汞蒸汽原子碰撞时的能量转移的量子化现象，测量汞原子的第一激发电位。弗兰克-赫兹实验为能级的存在提供了直接的证据，对玻尔的原子理论是一个有力支持。

一、实验目的

1. 学习测量原子的第一激发电位的方法；
2. 通过实验证实原子能级的存在；
3. 研究影响充电电子管阳极电流的因素，分析其机理。

二、实验仪器

电子管综合实验仪。

三、实验原理

1. 玻尔原子理论

(1) 原子只能处于一些不连续的能量状态，即 E_1 、 E_2 、 E_3 、 \dots ，处在这些状态的原子是稳定的，称为“定态”。其中 E_1 叫基态， E_2 、 E_3 ， \dots ，叫激发态。原子的能量不论通过什么方式发生改变，只能使原子从一个定态跃迁到另一个定态。

(2) 原子从一个定态跃迁到另一个定态时，它将发射或吸收一定频率的电磁波。如果用 E_m 和 E_n 分别代表原子的两个定态的能量，则发射或吸收辐射的频率由以下关系决定：

$$h\nu = E_m - E_n (h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})$$

其中 h 是普朗克常量。

2. 弗兰克-赫兹实验原理

原子在正常情况下处于基态，当原子吸收电磁波或受到其他有足够能量的粒子碰撞而交换能量时，可由基态跃迁到能量较高的激发态。从基态跃迁到第一激发态所需要的能量称为临界能量。原子从低能级向高能级跃迁，可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换来实现。本实验就是让电子在真空中与氩原子相碰撞。

设氩原子的基态能量为 E_1 ，第一激发态的能量为 E_2 ，从基态跃迁到第一激发态所需的能量就是 $\Delta E = E_2 - E_1$ 。初速度为零的电子在电位差 V 的加速电场作用下具有能量 eV ，若 $eV = E_2 - E_1$ ，则电子与氩原子只能发生弹性碰撞，二者之间几乎没有能量转移。当电子的能量 $eV \geq E_2 - E_1$ 时，电子与氩原子就会发生非弹性碰撞，氩原子将从电子的能量中吸收相当于 $E_2 - E_1$ 的那份能量，使自己从基态跃迁到第一激发态，而多余的部分仍留给电子。设使电子具有 $E_2 - E_1$ 能量所需加速电场的电位差 V_0 ，则 $eV_0 = E_2 - E_1$ ，式中 V_0 为氩原子的第一激发电位，是本实验要测的物理量。

3. 弗兰克-赫兹实验方法

在充有氩气的电子管中，电子由热阴极发出，第一栅极 G_1 很靠近阴极 K ，电位比阴极稍高，作用是消除阴极电子的散射。第一栅极 G_1 和第二栅极 G_2 之间的加速电压 V_{G_2K} 使电子加速，且 G_1 和 G_2 之间距离较大，以保证电子在 G_1 和 G_2 之间和氩原子有足够的碰撞几率，在极板 A 和栅极 G_2 之间有减速电压（也叫拒斥电压） V_{G_2A} 。当电子通过栅极 G_2 进入 G_2A 空间时，如果剩余能量大于 eV_{G_2A} ，就能到达极板 A ，即形成电流 I_A 。电子在 G_1G_2 空间与氩原子发生碰撞，电子把一部分能量给了氩原子，本身剩余的能量小于 eV_{G_2A} ，则电子不能到达极板 P ，如果发生这样情况的电子很多，电流表中的电流将显著下降。

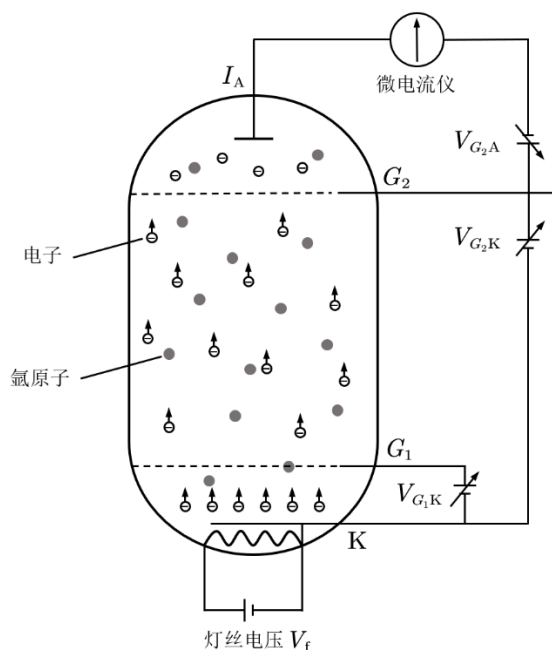


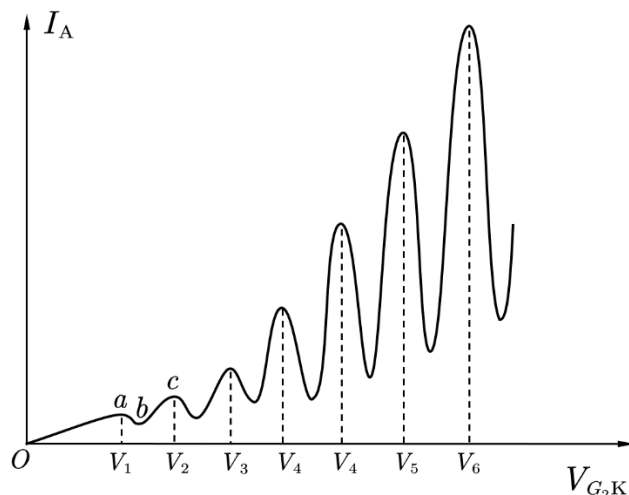
图 3.3.1 弗兰克赫兹实验原理与装置图

实验时，把 V_{G_2K} 的电压逐渐增加，电子在 G_1G_2 空间的电场作用下被加速而获得越来越大的能量。但在起始阶段，电压 V_{G_2K} 较低，电子的能量较小，即使在运动过程中与氩原子相碰撞（为弹性碰撞），也只有微小的能量交换。这样，穿过第二栅极 G_2 的电子所形成的电流 I_A 随第二栅极电压的增加而增大（见下图中 Oa 段）。当 V_{G_2K} 达到氩原子的第一激发电位时，电子在第二栅极附近与氩原子相碰撞（此时产生非弹性碰撞）。电子把从加速电场中获得的全部能量传递给氩原子，使氩原子从基态激发到第一激发态，而电子本身由于把全部能量传递给了氩原子，它即使穿过第二栅极，也不能克服反向拒斥电压 V_{G_2A} 而被折回第二栅极。

所以电流 I_A 将显著减小（见下图中 ab 段）。氩原子在第一激发态不稳定，会跃迁回基态，同时以光子形式向外辐射能量。

以后随着第二栅极电压 V_{G_2K} 的增加，电子的能量也随之增加，与氩原子相碰撞后还留下足够的能量，这就可以克服拒斥电压 V_{G_2A} 的作用力而到达极板 A ，这时电流又开始上升（见下图中 bc 段），直到 V_{G_2K} 是 2 倍氩原子的第一激发电位时，电子在 G_1G_2 空间会因两次非弹性碰撞而失去能量，结果板极电流 I_A 第二次下降，这种能量转移随着加速电压的增加而呈周期性的变化。

以 V_{G_2K} 为横坐标，以板极电流 I_A 为纵坐标就可以得到谱峰曲线，两相邻谷点（或峰尖）间的加速电压差值，即为氩原子的第一激发电位值。实验发现第一激发电位是个定值，这就证明了氩原子能量状态的不连续性。


 图 3.3.2 弗兰克-赫兹实验 $I_A - V_{G2K}$ 曲线

四、 内容步骤

1. 按照图 3.3.1 连接好实验电路，接通电源。
2. 主机启动后，在弗兰克-赫兹实验主菜单进行参数设置：灯丝电压 $V_f \approx 2.4V$ ，第一栅极电压 $V_{G1K} \approx 1.0V$ ，拒斥电压 $V_{G2A} \approx 8.5V$
3. 预热三到五分钟，点击弗兰克-赫兹实验主菜单的“自动 V_{G2K} ”，开始进行自动模式实验，仪器将控制 V_{G2K} 从 0 到 85V 以 0.2V 的步距测量数据并绘制 $I_A - V_{G2K}$ 曲线，并将试验记录保存。若屏幕上的曲线削峰，则适当降低灯丝电压；若削谷，则适当降低拒斥电压；并重新开始实验，直到绘制出包括 5 个左右完好峰和谷的曲线
4. 记录曲线各个峰、谷对应的拒斥电压 V_{G2K}

五、 数据处理

1. 在表 5.1.1 中记录曲线各个峰、谷对应的拒斥电压 V_{G2K} ，其中 V_0 为计算所得的第一激发电势，其计算公式为 $V_0 = \frac{V_4 - V_1 + V_5 - V_2 + V_6 - V_3}{9}$ 。

在本组实验过程中，由于第 6 个峰的谷电压超出量程（即削峰不足），因此第一激发电势部分采用计算公式 $V_0 = \frac{V_4 - V_1 + V_5 - V_2}{6}$ 。

 表 5.1.1 $I_A - V_{G2K}$ 曲线峰、谷 V_{G2K} 及 V_0 表

次数	1	2	3	4	5	6	V_0/V
峰值电 压 $V_{G_2K-max}/$ V	20.3	30.9	42.4	54.6	67.2	80.1	12.03
谷值电 压 $V_{G_2K-min}/$ V	25.3	36.3	47.8	59.8	72.3	/	11.75

2. 经计算, $\bar{V}_0 = \frac{V_{G_2K-max} + V_{G_2K-min}}{2} = 11.89 V$

3. 计算相对误差: 与氩原子第一激发电势公认值 $V_0 = 11.55V$ 对比, 相对误差为 $\delta = \frac{\bar{V}_0 - V_0}{V_0} * 100\% = 2.9\%$

六、 结论及分析

结论:

由实验测得氩原子的第一激发电位为 $11.89 V$, 验证了原子能级的存在。

误差分析:

1. 系统误差: 电子管综合实验仪的量程和精度有限, 使得第六个波的峰值和谷值无法准确测出; 自动模式测量电压步长为 $0.2 V$, 此步长下电压值不连续, 可能无法准确测得曲线的峰值与谷值。
2. 偶然误差: V_{G_1K} 过大, 导致曲线整体偏后; V_f 过大, 导致 $I_A - V_{G_2K}$ 峰值与谷值差异过大。

七、 思考题

1. 为什么 $I_A - V_{G_2K}$ 曲线呈周期性变化?

电子从K出发，在到达 G_2 之前均受电场力作用而加速获得能量。 V_{G_2K} 逐渐增加使得更多电子能够获得能量来克服拒斥电压到达极板A，此时 I_A 呈上升趋势。

当 V_{G_2K} 增加到一定值时，电子能量被电子管中的氩原子吸收 ΔE 的概率逐渐增加，使得电子的能量不足以再克服拒斥电压到达极板A，此时 I_A 呈下降趋势。

当 V_{G_2K} 继续增加时，电子能量继续增大，又足够克服拒斥电压，因此能够到达极板A的电子增多，此时 I_A 呈上升趋势。

如此往复，使得 $I_A - V_{G_2K}$ 呈现周期性变化，峰谷交替。

2. 如果 $I_A - V_{G_2K}$ 曲线出现削峰，应该如何调节？如果出现削谷，又应该如何调节？

削峰时，应适当降低 V_f ，从而减少到达极板A的电子数而降低 I_A 。削谷时，应适当降低 V_{G_2K} ，从而减少电子受拒斥电压影响减少的能量而增大 I_A 。

3. 分别改变灯丝电压 V_f 、第一栅极电压 V_{G_1K} 、拒斥电压 V_{G_2A} ，对 $I_A - V_{G_2K}$ 有什么影响？

若灯丝电压 V_f 增大，则 $I_A - V_{G_2K}$ 曲线向上移动；反之则向下移动。

若第一栅极电压 V_{G_1K} 增大，则 $I_A - V_{G_2K}$ 曲线向右下移动；反之则向左上移动。

若拒斥电压 V_{G_2A} 增大，则 $I_A - V_{G_2K}$ 曲线向下移动；反之则向上移动。

附：原始数据