

弗兰克-赫兹实验

2017011620 计 73 李家昊

实验日期：2019/5/16

1. 实验目的

- (1) 用实验的方法测定汞或氩原子的第一激发电位，从而证明原子分立态的存在。
- (2) 练习使用微机控制的实验数据采集系统。

2. 实验原理

根据玻尔的原子模型理论，原子是由原子核及以核为中心沿各种不同轨道运动的一些电子构成的，一定轨道上的电子具有一定的能量，原子所处的能量状态并不是任意的，而是受到玻尔理论的两个基本假设的制约：

- (1) 定态假设。原子只能处于稳定状态中，其中每一个状态对应于一定的能量值，这些能量值是彼此分立的，不连续的。
- (2) 频率定则。当原子从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态时，就吸收或放出一定频率的电磁辐射。频率大小满足如下关系：

$$h\nu = E_n - E_m$$

其中 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，称作普朗克常数。

原子状态的改变通常在两种情况下发生，一是当原子本身吸收或放出电磁辐射时，二是当原子与其它粒子发生碰撞而交换能量时。

一般情况下，原子在受激态所处的时间不会太长，短时间后会回到基态，并以电磁辐射的形式释放出所获得的能量。其频率 ν 满足下式

$$h\nu = eU_g$$

其中 U_g 为汞（或氩）原子的第一激发电位。因此当电子的能量等于或大于第一激发能时，原子就开始发光。

弗兰克-赫兹实验原理如图 2 所示。第一栅极 G_1 与阴极 K 之间的电位差由 U_G 提供。电源 U_f 加热灯丝 FF ，使旁热式阴极 K 被加热。产生慢电子，扫描电源 U_a 加载栅极 G_2 和阴极 K 之间，建立加速场，使得从阴极发出的电子被加速，穿过管内汞（或氩）蒸气朝栅极 G_2 运动。这些电子与汞（或氩）原子可以发生多次碰撞。电源 U_R 在栅极 G_2 和极板 P 之间建立拒斥场，到达 G_2 附近而能量小于 eU_R 的电子不能到达极板。极板电路中电流强度 I_P 用微电流放大器 A 来测量，反映了从阴极到达极板的电子数。实验中保持 U_R 和 U_G 不变，直接测量极板电流 I_P 随加速电压 U_a 变化的关系。

加速电压 U_a 开始升高时，极板电流随之升高，直到加速电压 U_a 等于或稍大于汞

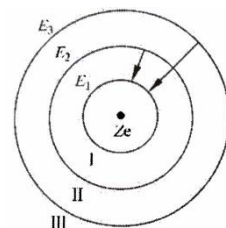


图 1 原子结构示意图
(玻尔模型)

(或氩)原子的第一激发电位,这时在栅极 G_2 附近,电子与汞(或氩)原子发生非弹性碰撞,把几乎全部能量交给汞(或氩)原子,使汞(或氩)原子激发。这些损失了能量的电子不能越过 U_R 产生的拒斥场,到达极板的电子数减小,所以电流开始下降。继续增加加速电压 U_a ,电子在与汞(或氩)原子碰撞后还能在到达栅极 G_2 前被加速到足够的能量,克服拒斥场的阻力而到达极板 P ,这时电流又开始上升。直到 G_2K 间的电压到达 $2U_g$ 时,电子在 G_2 附近又会因第二次非弹性碰撞而失去能量,受到拒斥场的阻挡而不能到达极板 P ,电流 I_P 再次下降。同理,随着加速电压的升高,电子会在栅极 G_2 附近与汞(或氩)原子发生第三次、第四次……非弹性碰撞,形成具有规则起伏的 $I_P \sim U_a$ 曲线,如图 3。本实验的任务是测出氩原子的 $I_P \sim U_a$ 曲线,并由此定出氩原子的第一激发电位。

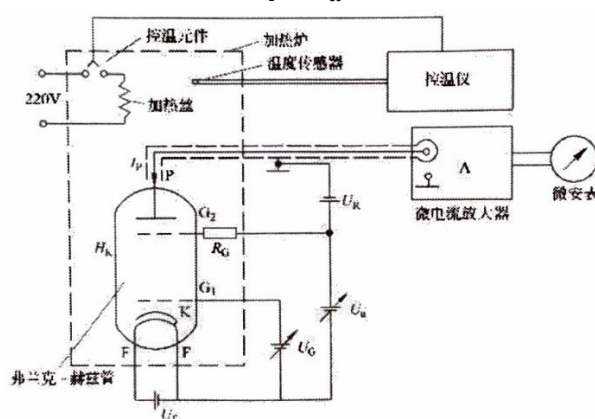


图 2 弗兰克-赫兹实验线路原理图

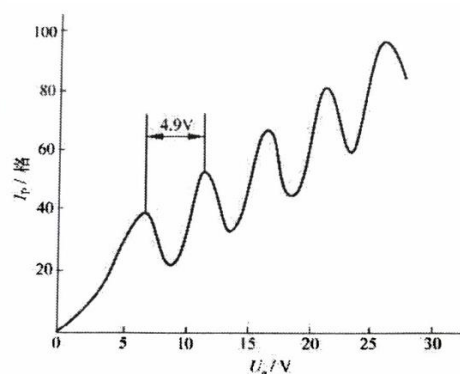


图 3 弗兰克-赫兹实验曲线(汞蒸气)

3. 实验仪器

- (1) 弗兰克-赫兹实验仪。
- (2) 微机控制的弗兰克-赫兹实验数据采集系统。

4. 实验步骤

- (1) 接线和检查线路。
- (2) 扫描电源与微电流放大器通电预热, 加热炉不需要通电。
- (3) 摸索实验条件, 定性观察 $I_P \sim U_a$ 变化情况: 开启稳压电源, 根据给定的 U_f, U_G, U_R 控制范围, 预置参数值。缓慢增加 U_a , 观察极板电流 I_P 的变化情况, 当看到 I_P 起伏变化时, 分别改变 U_f, U_G, U_R , 观察每个参量对 $I_P, I_P \sim U_a$ 曲线的影响。最后, 要求随着 U_a 的增加 0~90V 内能观察到 I_P 有 6~7 个峰, 峰谷差别明显, 最大峰值接近电流表满量程处, $I_P \sim U_a$ 曲线能保持 3-5 分钟不变。
- (4) 测量 $I_P \sim U_a$ 曲线。
- (5) 熟悉计算机控制与采集程序, 进行数据采集获得 $I_P \sim U_a$ 曲线后打印。
- (6) 设计实验方案, 定量研究 U_f, U_G, U_R , 对 $I_P, I_P \sim U_a$ 曲线的影响, 并作分析解释。

5. 数据处理

5.1 计算氩原子的第一激发电位

编号 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6
峰值电压 <i>U_i</i> /V	16.06	27.21	39.19	51.53	63.53	76.92

5.1.1 逐差法

氩原子的第一激发电位

$$U_g = \frac{(U_4 - U_1) + (U_5 - U_2) + (U_6 - U_3)}{3 \times 3} = 12.169 \text{ V}$$

$3U_g$ 的标准偏差

$$S_{3U_g} = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (U_{i+3} - U_i - 3U_g)^2} = 1.142 \text{ V}$$

仪器误差

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.1\% U_g + 0.1 = 0.112 \text{ V}$$

$3U_g$ 的不确定度

$$\Delta_{3U_g} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{\left(\frac{t_P(v)}{\sqrt{n}} S_{3U_g}\right)^2 + \left(\sqrt{2} \Delta_{\text{仪}}\right)^2} = 2.840 \text{ V}$$

U_g 的不确定度

$$\Delta_{U_g} = \frac{1}{3} \Delta_{3U_g} = 0.947 \text{ V}$$

最终结果为

$$U_g = (12.17 \pm 0.95) \text{ V}$$

5.1.2 最小二乘法

用 Excel 作出峰值电压 U 与序号 i 的线性拟合图像如下图

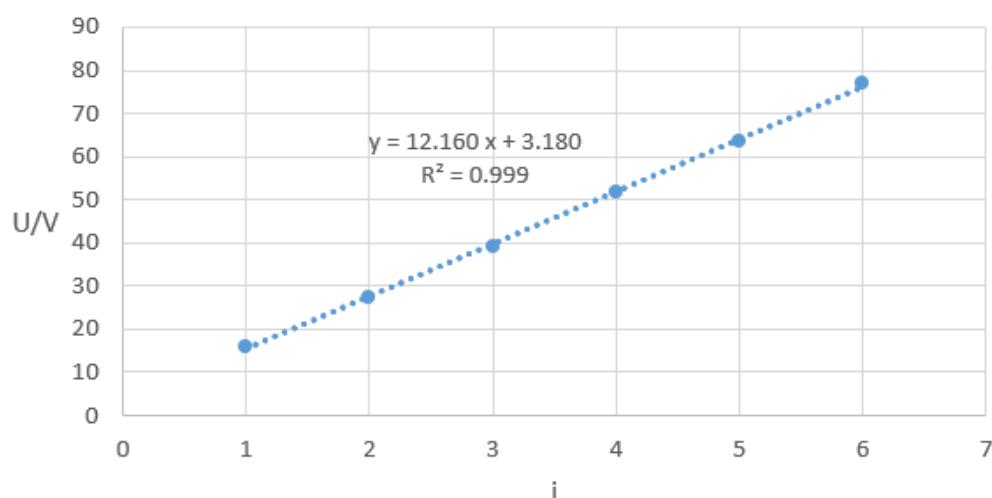


图 1 峰值电压 U 与序号 i 的线性拟合图像

拟合结果为

$$U_g = a + bi = 3.180 + 12.160 \times i \text{ (V)}$$

其中 $r^2 = 0.999$ ，拟合程度较好，得到

$$U_g = b = 12.160 \text{ V}$$

标准偏差

$$S_{U_g} = U_g \sqrt{\frac{r^{-2} - 1}{n - 2}} = 0.272 \text{ V}$$

仪器误差

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.1\% U_g + 0.1 = 0.112 \text{ V}$$

不确定度

$$\Delta_{U_g} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_P(v) S_{U_g})^2 + (\Delta_{\text{仪}})^2} = 0.764 \text{ V}$$

最终结果为

$$U_g = (12.16 \pm 0.76) \text{ V}$$

5.2 计算氩原子回到基态所辐射的光波波长

由公式

$$h\nu = eU_g$$

可得

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{eU_g} = 101.96 \text{ nm}$$

不确定度

$$\Delta_\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{1}{U_g}\right)^2 \cdot (\Delta_{U_g})^2} = 6.37 \text{ nm}$$

最终结果为

$$\lambda = (102.0 \pm 6.4) \text{ nm}$$

5.3 第一、第二峰位图

5.3.1 第一峰

手动测量第一峰数据如下

U_a/V	16.0	16.4	16.8	17.2	17.6	18.0	18.4
$I_P/\mu\text{A}$	19.0	19.5	19.9	20.1	19.8	19.2	18.4

作出 $I_P \sim U_a$ 曲线如下图

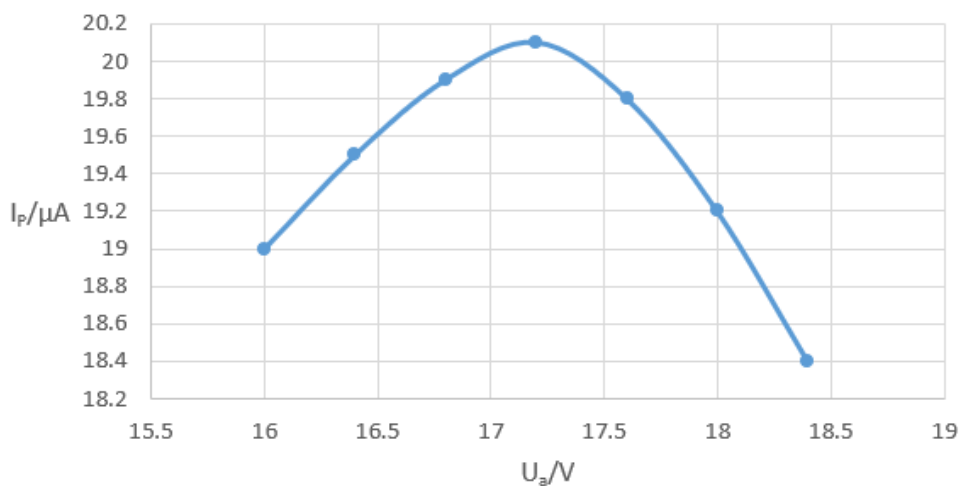


图 2 第一峰附近的 $I_p \sim U_a$ 曲线

由图可得，第一峰位置为

$$U_{a1} = 17.2 V$$

5.3.2 第二峰

手动测量第二峰数据如下

U_a / V	27.0	27.4	27.8	28.2	28.6	29.0	29.4
$I_p / \mu A$	29.2	30.1	31.0	31.2	30.8	29.9	28.0

作出 $I_p \sim U_a$ 曲线如下图

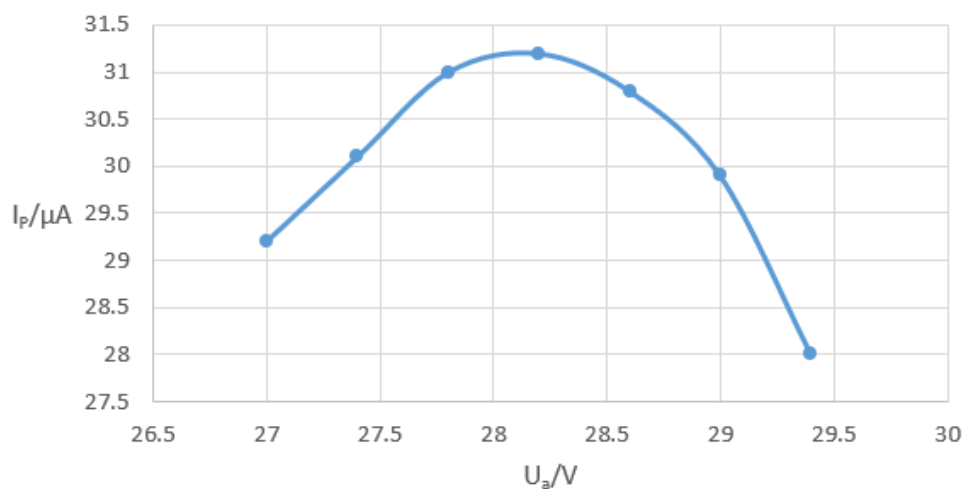


图 3 第二峰附近的 $I_p \sim U_a$ 曲线

由图可得，第二峰位置为

$$U_{a2} = 28.2 V$$

5.3.3 分析 $U_{a1} > U_g$ 的原因

实际的弗兰克-赫兹管中，阴极与栅极采用不同的金属材料制成，因此会产生接触电位差，记其大小为 U_0 ，于是真正加在电子上的加速电压 $U_a^* = U_a - U_0$ ，因此，当 $U_a^* = U_g$ 时， $U_a = U_a^* + U_0 > U_g$ ，因此 $U_{a1} > U_g$ 。

5.4 分析 U_f , U_G , U_R 对 I_P 的影响

5.4.1 U_f 对 I_P 的影响

设置 $U_a = 30.5 \text{ V}$, $U_G = 2.4 \text{ V}$, $U_R = 10 \text{ V}$, 测得数据如下

U_f/V	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
$I_P/\mu\text{A}$	0.0	0.0	0.0	0.2	2.4	8.4	22.2	39.8

作图如下

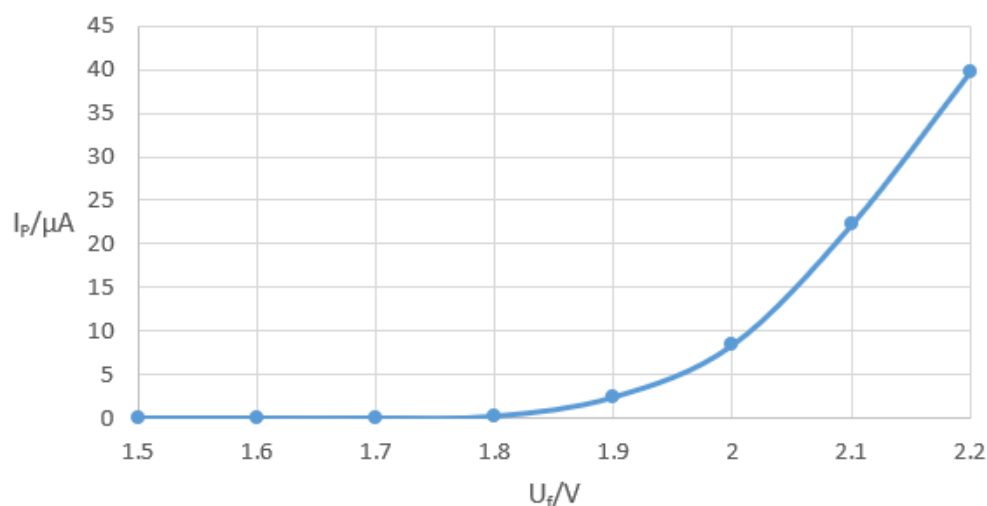


图 4 $I_P \sim U_f$ 曲线

U_f 对 I_P 的影响：当 U_f 小于某阈值时， I_P 为 0，当 U_f 大于此阈值时， I_P 随着 U_f 增大而急剧增大，且 I_P 对 U_f 的变化非常敏感。

定性分析： U_f 为灯丝 FF 的加热电压。因此，在其他条件相同的情况下，随着 U_f 的增大，阴极 K 温度升高，产生的电子增加，到达极板 P 的电子增加，故电流 I_P 增大。

5.4.2 U_G 对 I_P 的影响

设置 $U_a = 30.5 \text{ V}$, $U_f = 2.1 \text{ V}$, $U_R = 10 \text{ V}$, 测得数据如下

U_G/V	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$I_P/\mu\text{A}$	15.0	25.4	22.2	17.4	13.0	11.1

作图如下

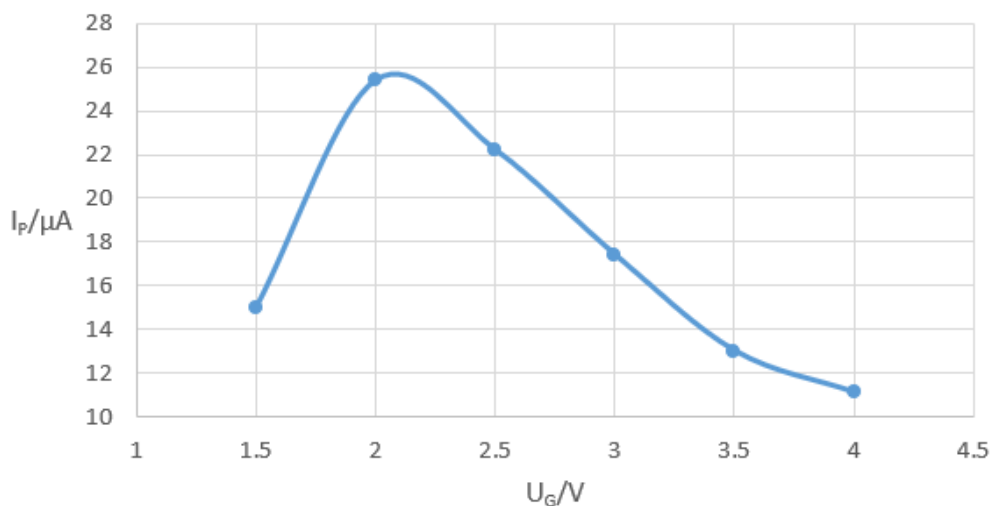


图 5 $I_P \sim U_G$ 曲线

U_G 对 I_P 的影响：随着 U_G 的增大，电流 I_P 先增大，后减小。

定性分析： U_G 提供栅极 G_1 与阴极 K 之间的电位差，消除空间电荷对阴极电子发射的影响，使阴极 K 发射的电子加速进入栅极 G_1 。因此，在其他条件相同的情况下，随着 U_G 增大，进入栅极 G_1 的电子能量增加，到达极板 P 的电子增加，因此 I_P 增大；随着 U_G 继续增大，电子的能量继续增大，将与氩原子发生非弹性碰撞，电子的能量传递给氩原子，到达极板 P 的电子减少，因此 I_P 减小。综上，随着 U_G 的增大，电流 I_P 先增大，后减小。

5.4.3 U_R 对 I_P 的影响

设置 $U_a = 30.5 \text{ V}$, $U_f = 2.1 \text{ V}$, $U_G = 3 \text{ V}$ ，测得数据如下

U_R / V	5	6	7	8	9	10
$I_P / \mu\text{A}$	29.9	26.8	23.0	22.0	20.8	18.1

作图如下

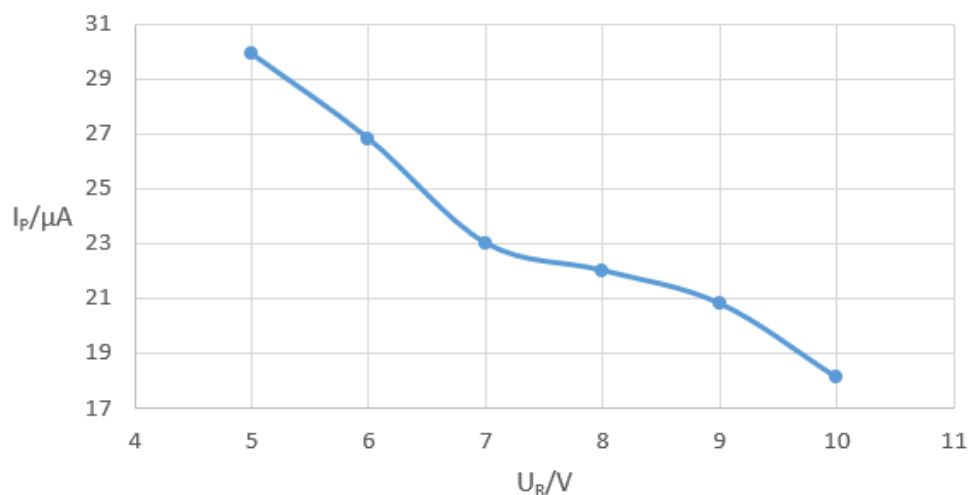


图 6 $I_P \sim U_R$ 曲线

U_R 对 I_P 的影响：随着 U_R 的增大，电流 I_P 减小。

定性分析： U_R 在栅极 G_2 与极板 P 之间建立拒斥场，能量小于 eU_R 的电子无法到达极板 P 。因此，在其他条件相同的情况下，随着 U_R 的增大，拒斥场增强，能够到达极板 P 的电子减小，电流 I_P 减小。

6. 思考题

(1) 为什么 $I_P \sim U_a$ 呈现周期性变化？

答：加速电压 U_a 开始升高时，极板电流 I_P 随之升高，直到加速电压 U_a 等于或稍大于氩原子的第一激发电位 U_g 时，这时在栅极 G_2 附近，电子与氩原子发生非弹性碰撞，把几乎全部能量交给氩原子，使氩原子激发。这些损失了能量的电子不能越过 U_R 产生的拒斥场，到达极板的电子数减小，所以电流 I_P 开始下降。继续增加加速电压 U_a ，电子在与氩原子碰撞后还能在到达栅极 G_2 前被加速到足够的能量，克服拒斥场的阻力而到达极板 P ，这时电流 I_P 又开始上升。直到 G_2K 间的电压到达 $2U_g$ 时，电子在 G_2 附近又会因第二次非弹性碰撞而失去能量，受到拒斥场的阻挡而不能到达极板 P ，电流 I_P 再次下降。同理，随着加速电压的升高，电子会在栅极 G_2 附近与氩原子发生第三次、第四次……非弹性碰撞，形成周期性变化的 $I_P \sim U_a$ 曲线。

(2) 拒斥电压 U_R 增大时， I_P 如何变化？

答：在其他条件相同的情况下，随着 U_R 的增大，拒斥场增强，能够到达极板 P 的电子减小，故电流 I_P 减小。

(3) 灯丝电压 U_f 改变时，弗兰克-赫兹管内什么参数将发生改变？

答：阴极 K 的温度发生改变，发射的电子数目发生改变，到达极板 P 的电子数量发生改变， I_P 发生改变。

(4) 若实验采用充汞的管子，炉温的大小会直接影响管内什么参量？

答：炉温的大小直接影响管内汞蒸气原子的数量，从而影响电子与汞原子碰撞的次数，影响到达极板 P 的电子数目以及 I_P 。

7. 实验总结

(1) 弗兰克-赫兹实验验证了玻尔的原子模型，使弗兰克、赫兹共同获得诺贝尔物理学奖，我非常荣幸能在实验课上亲手复现这个著名的实验。

(2) 本实验设计的非常巧妙，将原子能级跃迁的微观现象，转换为极板电流的宏观现象，通过测量电流的波峰，计算出氩原子的第一激发电位，这种将微观量转换为宏观量的技巧令我印象深刻，让我对微观世界有了更深刻的理解。

(3) 在数据处理过程中，通过逐差法、最小二乘法、不确定度的计算，提高了自己的数据处理能力以及误差分析能力。

(4) 感谢老师的详细讲解和耐心指导！