

Franck-Hertz 实验

唐延宇 PB22030853

2023 年 12 月 6 日

摘要

在原子物理学与对微观世界的研究中, Bohr 的原子能级理论可谓是开拓者, 而 Franck-Hertz 实验则是这一理论的坚实实验证据. 本次实验通过对 Franck-Hertz 实验的复现, 分析了实验曲线随实验参数的变化特征, 测定了汞原子的第一激发电位, 观察了汞原子高激发态的激发曲线, 以直观的方式加深了我们对微观理论的理解.

关键词: *Franck-Hertz* 管 汞原子 第一激发电位

1 引言 [1]

1.1 实验背景

1913 年, Bohr 提出了原子能级的概念并建立了原子模型的理论. 他指出: 原子内部, 绕原子核做圆周运动的电子的角动量并非是连续的, 而是分立的, 即只有其为 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍时, 体系才会稳定, 否则原子将向外以电磁波的形式辐射能量, 从而使自身的能量降低, 这些能使原子保持稳定状态的能量取值即被称为**能级**. 一年之后, Franck 与 Hertz 的慢电子穿过汞蒸气的实验测定了汞原子的第一激发电位, 证实了原子能级理论, 此后他们又精确测定了激发态原子辐射出的光的频率, 为 Bohr 的理论提供了直接的实验证据.

本实验的主要内容即对 Franck-Hertz 实验进行复现, 从而加强对能量分立理论的理解, 从实验角度体会通过宏观现象反映微观变化的思想.

1.2 实验原理

Franck-Hertz 实验原理示意如图1所示, 图中 K 为氧化物阴极, P 为阳极, G_1, G_2 分别为第一, 第二栅极. $K-G_1-G_2$ 加正向电压, G_2-P 加反向电压. 电子从 K 发出后, 在 $K-G_1$ 区间中迅速被加速, 获得能量; 同时 U_{G_1K} 也能消除空间电荷对阴极电子发射的影响, 提高发射效率. 在 G_1-G_2 区间中, 电子在被加速的同时也会与处于此区间中的汞原子发生碰撞, 当电子动能 $E_k < \Delta E = E_2 - E_1$, 即未达到汞原子第一激发态与基态

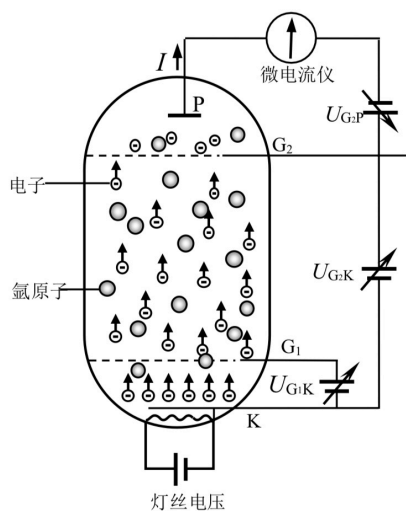
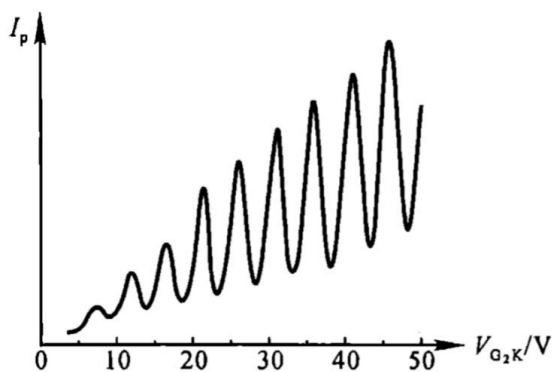


图 1: Franck-Hertz 实验原理图

图 2: $I_p - U_{G_2K}$ 曲线示意图

的能级差时,汞原子不能吸收电子的能量,故而这一碰撞是近乎弹性的;而当 $E_k \geq \Delta E$ 时,汞原子则可以 ΔE 为单位吸收能量发生跃迁,碰撞转为非弹性,故 ΔE 亦被称为临界能量. 在 $G_2 - P$ 区间,电子在反向电压作用下持续减速,若 $E_k = eU_{G_2K} \leq eU_{G_2P}$, 那么电子便无法到达阳极;反之,则电子可到达阳极,形成板极电流.

由上分析可知,板极电流 I_p 随栅极电压 U_{G_2K} 的变化趋势如下:

- 若 $eU_{G_2K} < \Delta E$, 电子若能到达阳极,则其所携带能量与 U_{G_2K} 呈正相关,从而 I_p 随 U_{G_2K} 增加而增加.
- 若 $eU_{G_2K} = \Delta E$, 电子到达 G_2 时刚好获得临界能量,则之后随 U_{G_2K} 增加,实验管中可与汞原子发生非弹性碰撞的电子数目不断增加,从而电子与汞原子碰撞损失能量的概率也进一步增加,这引起了 I_p 的下降.
- 此后,若 $eU_{G_2K} > n\Delta E$, 则电子在到达 G_2 前可能与汞原子发生 n 次碰撞,从而 $I_p - U_{G_2K}$ 曲线形成 n 个峰值,如图2所示. 可知,相邻峰值间电压差即为汞原子的第一激发电位.

2 实验仪器与内容

2.1 实验仪器

FH-Hg-6 弗兰克-赫兹(汞管)实验仪. 仪器上标注的参考值列举如下: 第一激发态: $U_F = 1.2 \text{ V}$, $U_{G_1K} = 1.3 \text{ V}$, $U_{G_2P} = 2.1 \text{ V}$, $t = 220^\circ \text{C}$.

2.2 主要实验内容

本实验仪器电路图如图3所示. 本实验的主要内容与步骤如下:

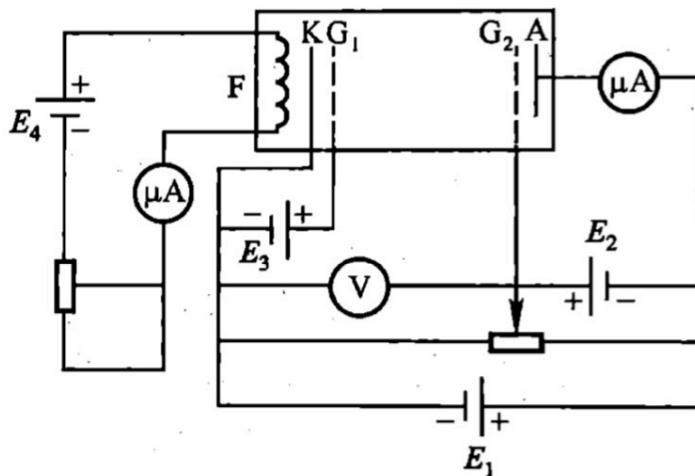


图 3: 实验装置电路图

1. 打开实验仪, 将加热炉温度设置为仪器参考值, 预热 15-20min;
2. 按照仪器上标注的参考值, 在 $\pm 50\%$ 范围内改变 U_F, U_{G_1K}, U_{G_2P} 的值, 在“自动”模式下观察激发曲线的特征并记录;
3. 按照仪器上标注的参考值, 在 5.0V–65.0V 范围内 (步长 0.5V) 范围内的“手动”模式下测量激发曲线, 并记录数据点, 由此拟合汞原子的第一激发电位;
4. 切换仪器至“高激”模式, 在 5.0V–30.0V 范围内 (步长 0.5V) 范围内的“手动”模式下测量激发曲线, 并记录数据点.

3 实验结果与分析

3.1 汞原子激发曲线特征的分析

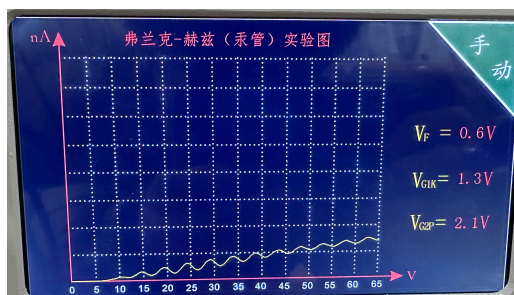
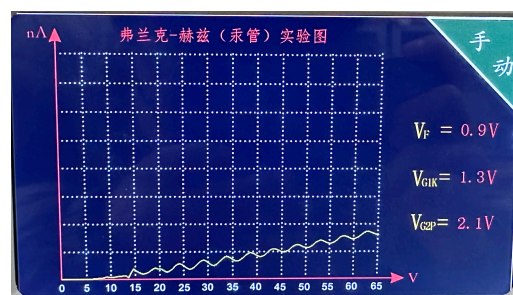
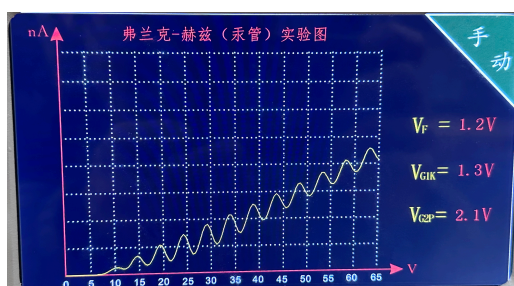
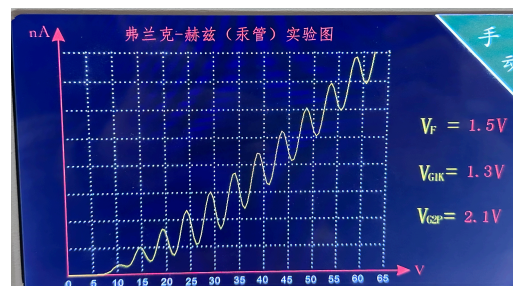
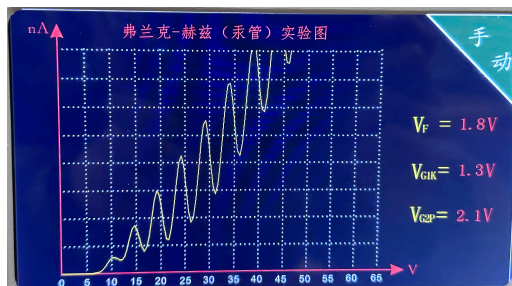
U_F 改变 U_F 得到的激发曲线图如图4所示:

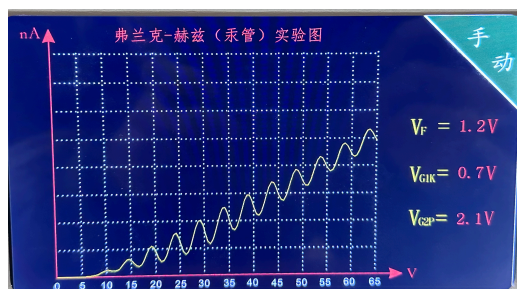
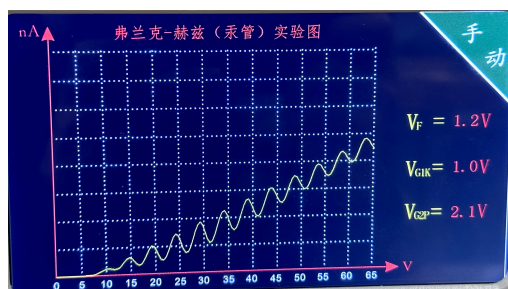
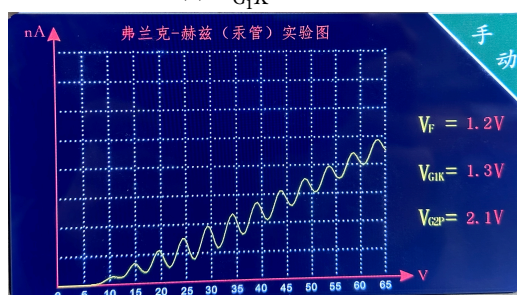
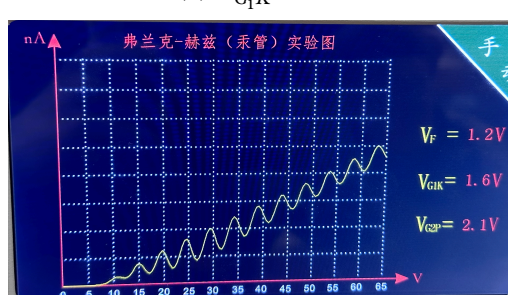
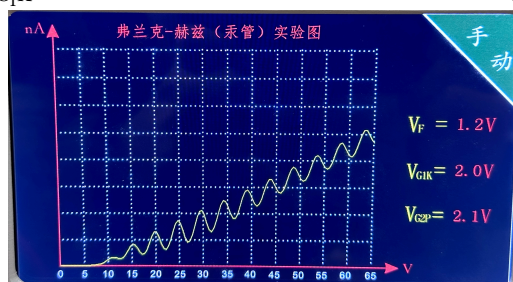
变化规律: 随灯丝加热电压 U_F 的增加, 板极电流 I_p 迅速增加, 且增幅逐渐变大.

作用机制: 当灯丝加热电压 U_F 增加, 而加速电压 U_{G_2K} 保持恒定时, 阴极 K 温度迅速增加, 根据 Richardson-Dushman 方程:

$$J_e = A_e T_e^2 \exp\left(-\frac{W_e}{kT_e}\right) \quad (1)$$

阴极 K 发射的电子数目也会迅速增加, 这也就导致了更多的电子可跨过拒斥电场, 表现为板极电流增加. 这就解释了实验所观察到的现象. 上式中, J_e 为阴极 K 发射的电流密度, W_e 为阴极 K 的热离子功函数, A_e 为阴极 K 的 Richardson 常数, T_e 为阴极 K 的 Kelvin 温度, k 为 Boltzmann 常数.[3]

(a) $U_F - 50\%$ (b) $U_F - 25\%$ (c) U_F (d) $U_F + 25\%$ (e) $U_F + 50\%$ 图 4: 改变 U_F 的激发曲线

(a) $U_{G_1K} - 50\%$ (b) $U_{G_1K} - 25\%$ (c) U_{G_1K} (d) $U_{G_1K} + 25\%$ (e) $U_{G_1K} + 50\%$ 图 5: 改变 U_{G_1K} 的激发曲线

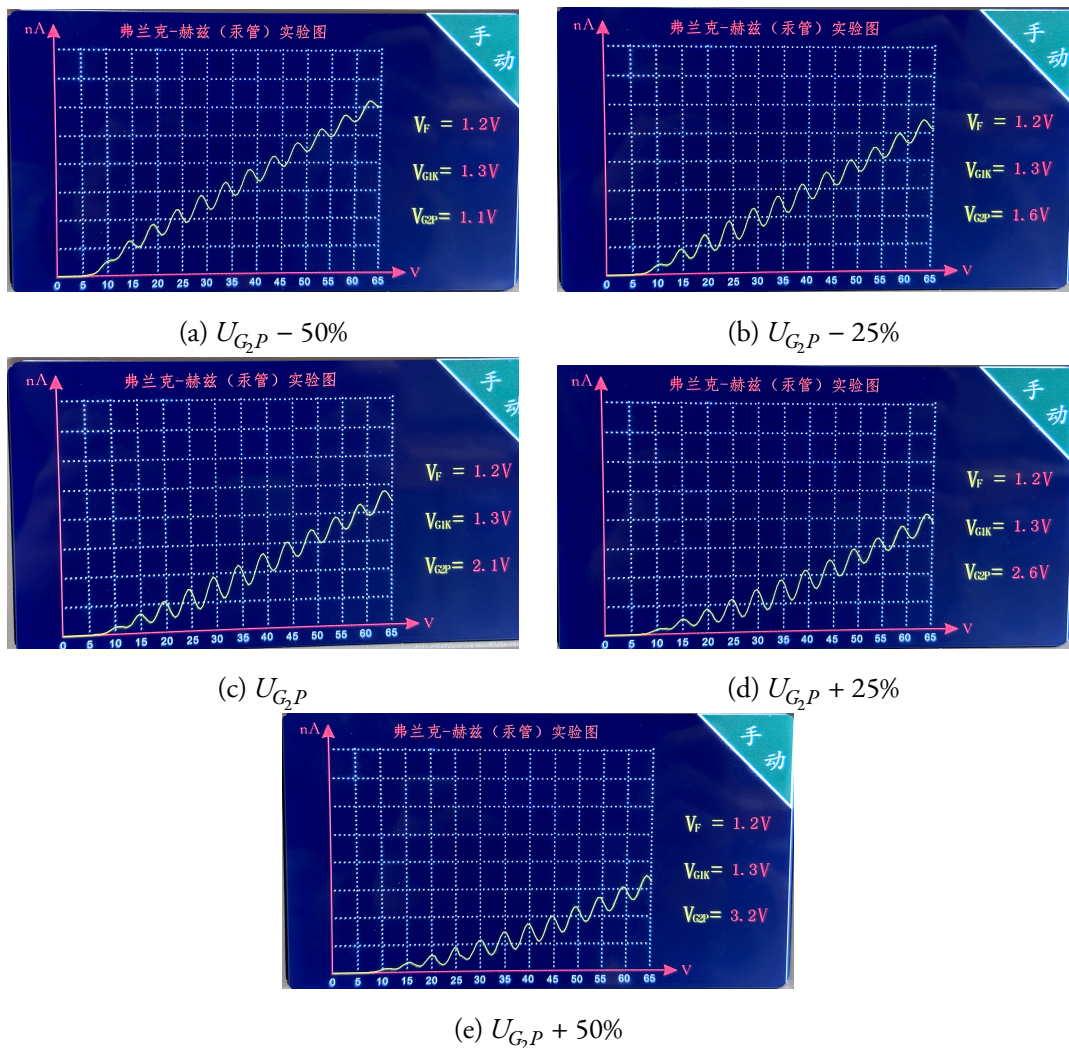


图 6: 改变 U_{G2P} 的激发曲线

U_{G1K} 改变 U_{G1K} 得到的激发曲线图如图5所示:

变化规律: U_{G1K} 对曲线整体状态几乎没有明显影响, 仅仅使曲线出现了 y 轴方向向上的微小平移以及峰谷差的略微增大。

作用机制: 阴极发射的电子初速较小, 聚集在阴极附近形成空间电荷层。该空间会吸引电子, 并抑制其发射, 而 U_{G1K} 可以驱散该电荷层, 从而提高发射效率。这便解释了实验中出现的曲线整体抬升及峰谷差增大的现象。[2, 3]

U_{G2P} 改变 U_{G2P} 得到的激发曲线图如图6所示:

变化规律: 随拒斥电压 U_{G2P} 增加, 板极电流曲线 $I_p - U_{G2K}$ 整体下移, 且峰谷变得更加明显(峰谷差略微增大, 但不显著), 峰值电压略微增大。

作用机制: 随拒斥电压 U_{G2P} 的增加, 在加速电压 U_{G2K} 相等的每个点, 电子进入拒斥电场时动能相同, 但克服阻力做功增加, 电子更加难以通过拒斥电场, 从而板极电流强度减小。随拒斥电压 U_{G2P} 的增大, 本底电流受到一定抑制, 故峰谷差略微增大, 峰值电压略微右移。[3]

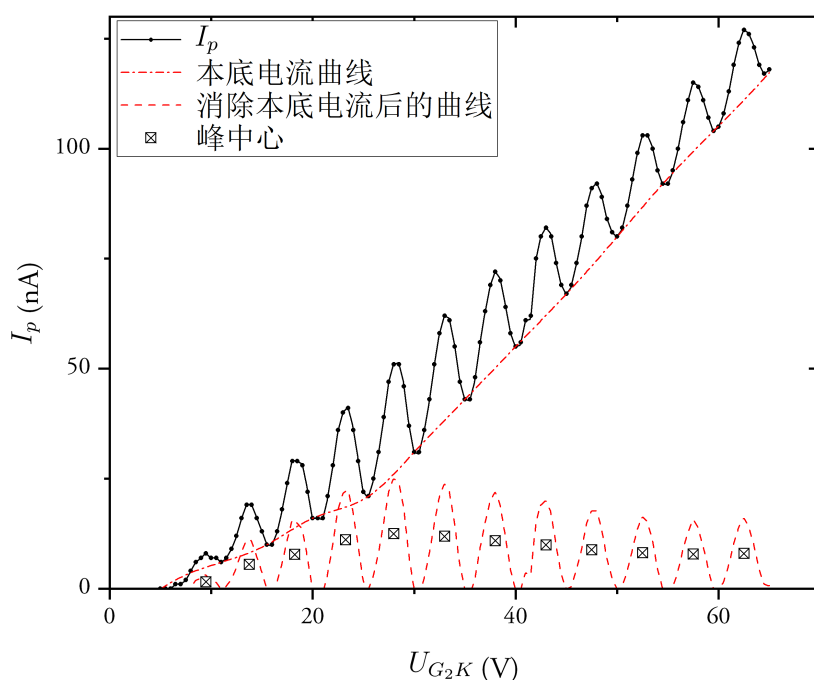


图 7: 数据处理结果图

表 1: 峰中心数据记录表

峰次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U_{G_2K}	9.5	13.5	18	23.5	28	33	38	43	48	52.5	57.5	62.5

3.2 汞原子第一激发电位的测定

实验中测得的原始数据请参见报告后附原始数据记录表, 鉴于数据量过大, 不再在此另列表, 以免冗赘. 使用 Origin 软件绘制的 $I_p - U_{G_2K}$ 特性曲线, 本底电流曲线, 消除本底电流后的 $I_p - U_{G_2K}$ 特性曲线, 峰中心图线如图7所示, 利用课上所给公式拟合的本底电流曲线如图8所示: 通过作图(取半峰高的中点值)得到的峰中心数据如表1所示: 利用 Origin 软件最小二乘拟合得到的 U_{G_2K} -峰次序直线如图9所示: 由图可得, 拟合直线斜率 $k = 4.87063$, 皮尔逊相关系数 $r = 0.99985$, 可见拟合效果很好, 数据呈现高度线性相关. 则斜率的不确定度可如下计算:

$$\begin{aligned}
 u_k &= \hat{k} \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{n - 2}} \\
 &= 4.87063 \sqrt{\frac{1/0.99985^2 - 1}{10}} \\
 &= 0.03 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{2}$$

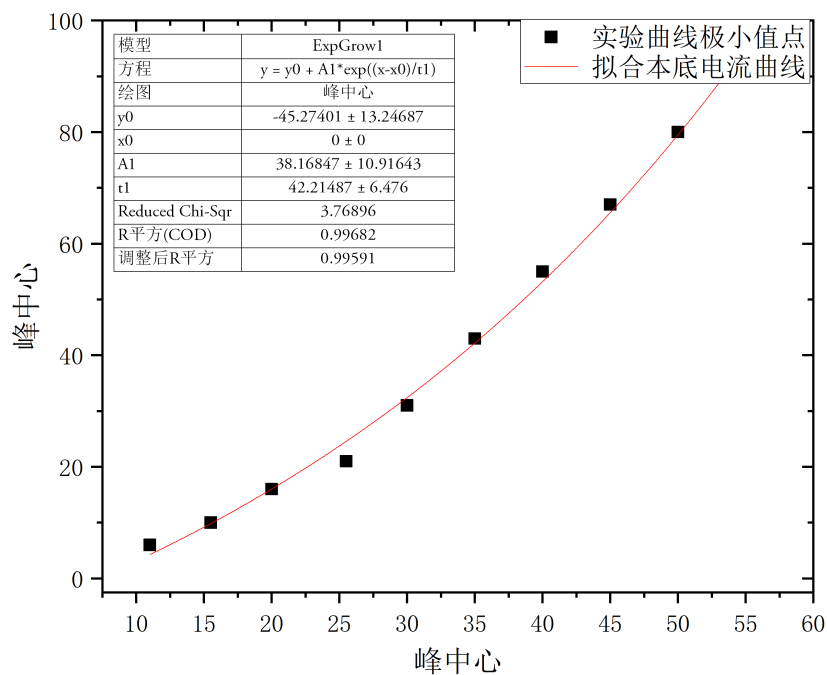
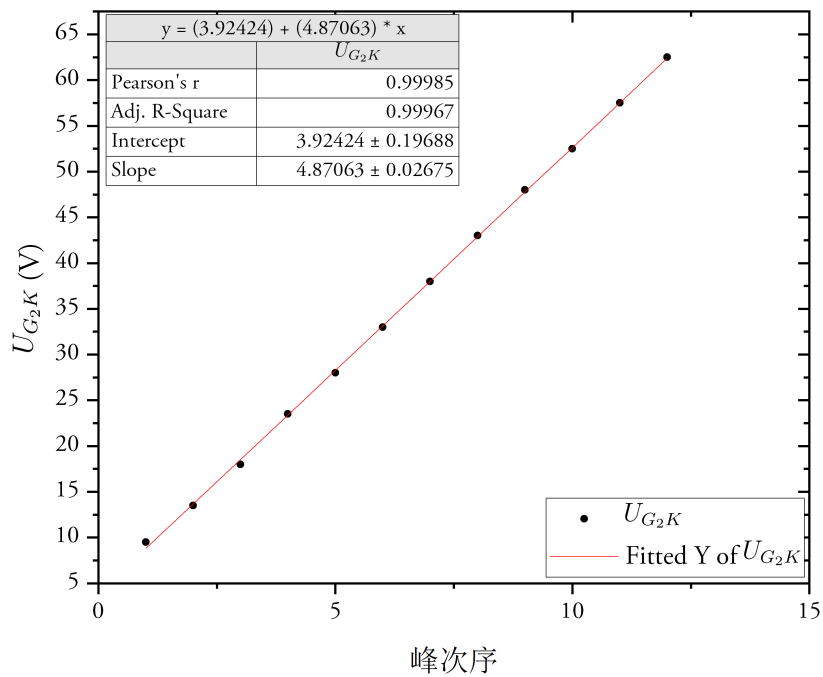


图 8: 本底电流曲线拟合图

图 9: U_{G2K} -峰次序最小二乘拟合结果图

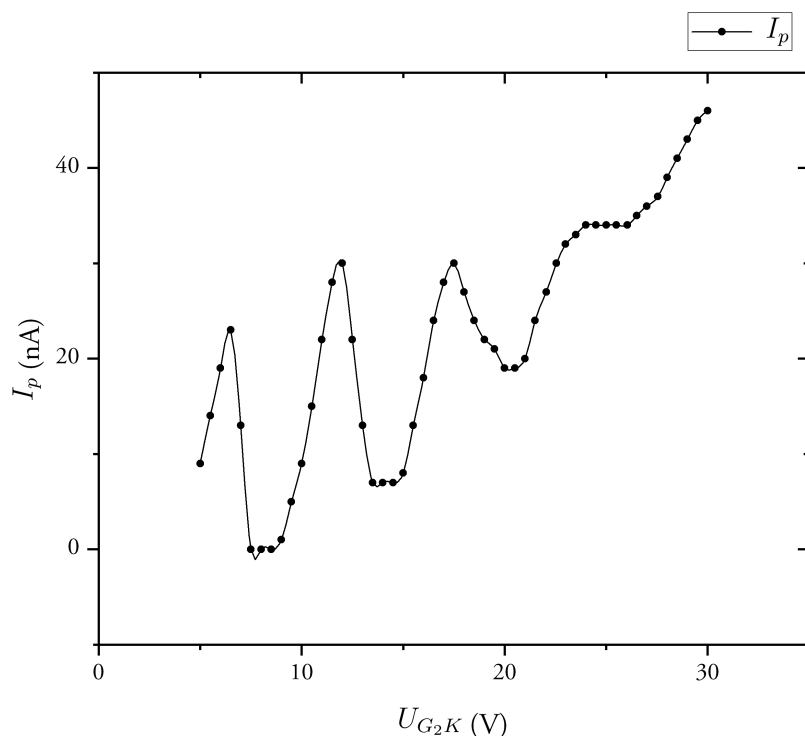


图 10: 汞原子较高能级的激发曲线图

又由实验原理可知, 斜率即所测的第一激发电位, 故第一激发电位 U_0 的最终测量值为:

$$U_0 = (4.87 \pm 0.03) \text{ V} \quad (3)$$

3.3 汞原子较高能级的激发曲线绘制

实验得到的汞原子较高能级的激发曲线如图10所示:

曲线特征变化: 与第一激发态下的曲线对比可见, 较高能级下的汞原子激发曲线在前两个峰处的峰值几乎相同, 而谷值有所增加; 在此之后板极电流一直迅速增加, 仅仅中间有一小段较为平缓的区间, 而并未出现下降, 这便可能是电离峰的一部分。[\[2\]](#)

3.4 电子在汞蒸气中平均自由程的计算

据汞蒸气中电子平均自由程公式:

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} \quad (4)$$

可得: (注: 以下算式中数据单位均已采用国际单位制下标准单位)

$$T = 80^\circ\text{C}, \lambda_1 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 80)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 11.8} = 4.24 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (5)$$

$$T = 90^{\circ}\text{C}, \lambda_2 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 90)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 21.1} = 2.44 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (6)$$

$$T = 100^{\circ}\text{C}, \lambda_3 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 100)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 36.4} = 1.45 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (7)$$

$$T = 160^{\circ}\text{C}, \lambda_4 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 160)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 558.5} = 1.10 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (8)$$

$$T = 170^{\circ}\text{C}, \lambda_5 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 170)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 817.0} = 7.69 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (9)$$

$$T = 180^{\circ}\text{C}, \lambda_6 = \frac{1.30 \times 10^{-23} \times (273.15 + 180)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 1172.7} = 5.48 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (10)$$

3.5 分析与讨论

3.5.1 误差分析

总体而言,本实验的仪器较为精密,这也就带来了较小的误差,在实验者看来,本实验的误差来源有如下可能方面:

- 由于最小分度值仅为 0.1 V, 在调整 U_F, U_{G_1K}, U_{G_2P} 时, 往往无法准确达到标准值 $\pm 50\%$ 的程度, 这便带来了曲线分析的不甚精确, 从而可能导致结论的偏差;
- 以 0.5 V 为步长手动测绘 $I_p - U_{G_2K}$ 特性曲线时, 较为容易一次拧过两个数据点, 这时便需要将仪器复原后再重新测量, 这时便无法确保第二次实验的条件与第一次完全相同, 进而给第一激发电位的测量带来了一些误差.

3.5.2 实验讨论

1. $I_p - U_{G_2K}$ 曲线电流下降并不十分陡峭, 主要原因是什么?

阴极 K 发出的热电子的能量服从 Maxwell 统计规律, 故而电流下降不可能是陡然, 而是在极值附近出现的有一定宽度的峰谷.

2. I 的谷值并不为零, 而且谷值依次沿 U_{G_2K} 轴升高, 如何解释?

谷值不为零: 有一部分被加速的原子并未与原子碰撞, 直接到达极板, 形成本底电流. 且在管中没有充入 Hg 蒸气时, I_p 本身也会随 U_{G_2K} 增加而增加, 这是本底电流的另一成因;

谷值升高: 随电压增加, 所有电子获得的能量均增加, 未能与汞原子碰撞的电子的能量也会增加, 从而使谷值增大.

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?

不等于. 电子形成的空间电荷对加速电压存在一定屏蔽作用, 而且汞蒸气与热阴极金属氧化物间存在接触电势差, 因此第一峰值略高于第一激发电位.

4. 写出汞原子第一激发态与基态的能级差.

由第一激发电位, 汞原子第一激发态与基态的能级差可如下计算:

$$\Delta E = eU_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times 4.87 = 7.79 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (11)$$

4 总结

本实验利用 FH-Hg-6 型 Franck-Hertz 实验仪, 复现了 Franck-Hertz 实验, 分析了仪器各参数对于激发曲线形态的影响, 测定了汞原子的第一激发电位: $U_0 = (4.87 \pm 0.03) \text{ V}$, 与标准值较为接近, 可见效果较好, 同时测绘了高激发态下的汞原子激发曲线, 并计算了不同温度下汞蒸气中电子的平均自由程. 最后对实验可能的误差来源与实验中的一些细节进行了分析与讨论.

5 致谢

感谢中国科学技术大学物理实验教学中心的实验平台搭建与仪器购置工作! 感谢物理实验教学中心代如成老师的实验设计工作! 感谢金健学长在实验教学中的指导、讲解与提醒!

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. F-H 实验(实验讲义). 2023.09.28.
- [2] 谢行恕, 康士秀, 霍剑青主编. 大学物理实验第二册(第 2 版). 北京: 高等教育出版社, 2005. pp.200-207.
- [3] L. Huang, H. Lv, W. Liu, et al. From macro-measure of Franck-Hertz curves to micro-collisions between electrons and argon atoms. *Eur. J. Phys.* 41 (2020) 035401.
url:<https://dx.doi.org/10.1088/1361-6404/ab6501>.