

F-H 实验 实验报告

(中国科学技术大学 李若贤 安徽合肥 230000)

(指导老师:胡钰)

摘要 本文使用 FD-FH-C 弗兰克-赫兹(氩管)实验仪测量了氩原子的第一激发电位,通过绘制 U_{G2K} 与板极电流 I_P 的关系曲线,对波峰电位和峰的次序线性拟合得到的氩原子第一激发电位为 11.61(14)V. 同时分析了实验装置中各参数对激发曲线的影响. 本实验有力地证明了原子分立能级的存在, 加深了人们对原子结构的认识.

关键词 Franck-Hertz 管 第一激发电位 原子分立能级

1. 引言 [1]

1913 年,Bohr 提出了原子能级的概念并建立了原子模型理论, 电子在两个定态轨道之间跃迁时, 会以电磁辐射形式吸收或者放出能量:

$$h\nu = E_n - E_m$$

1914 年, Franck 和 Hertz 进行了原子的激发试验, 他们最初测量了汞原子的第一激发电位, 从而表明了原子的激发需要吸收的能量并不是连续的, 而是量子化的, 无可辩驳地证明了原子分立能级地存在. 他们也因此获得 1925 年的诺贝尔物理学奖.

2. 实验仪器与原理

2.1 实验仪器

FD-FH-C 弗兰克-赫兹(氩管)实验仪, 示波器

2.2 实验原理

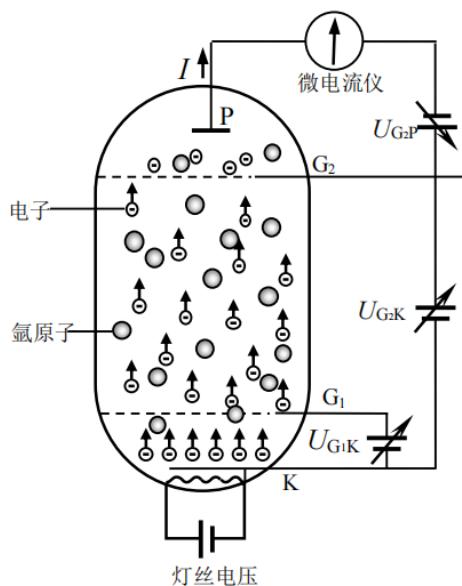


图 1 Franck-Hertz 实验原理图

实验装置如图 1 所示,包含氧化物阴极 K,阳极 P,第一与第二栅极 G₁, G₂.

电子从 K 发出后,在 K~G₁ 被加速,获得能量;

在 G₁ ~ G₂ 之间,电子从电场获得能量的同时不断与氩原子碰撞,设氩原子基态与第一激发态的能量差为 ΔE ,如果电子的能量达到了 ΔE ,则可能被氩原子吸收一部分能量,发生非弹性碰撞;但如果电子的动能 $E_k < \Delta E$,氩原子基本不吸收电子的能量,此时发生弹性碰撞;

在 G₂ ~ P 区间,电子受到拒斥电场的阻碍而减速,若能量小于 eU_{G2P} 则无法到达极板,而能量大于 eU_{G2P} 的电子则会到达极板形成板级电流 I_P .

于是随着 U_{G2P} 的增大,到达极板的电子数逐渐增多,在电子能量接近氩原子第一激发电位的 n 倍时,一部分电子会由于与氩原子发生 n 次非弹性碰撞失去能量,使电流下降.于是在 $U_{G2P} - I_P$ 曲线上形成 n 个峰值.

对去除本底电流后的峰值电位 U_h 与峰值序号 n 进行直线拟合,其斜率即为氩原子的第一激发电位.

3. 实验过程 [2]

3.1 氖原子激发曲线的观察与测量

1. 将实验仪上的“ U_{G2K} 输出”端与示波器的“X”输入通道连接, 并将“ I_P 输出”端与示波器的“Y”输入通道相连。随后, 将实验仪的工作模式设置为“自动”, 同时将“ I_P 电流显示”调整至 0.1 微安; 示波器则需设置为 X-Y 工作模式。
2. 缓慢调节灯丝电压 U_F 、栅极电压 U_{G1K} 以及拒斥电压 U_{G2P} , 使它们达到仪器给出的出厂检验参考值, 并预热 2 分钟。接着, 将 U_{G2K} 调至最大值, 再在参考值 $\pm 50\%$ 的范围内分别调整 U_F 、 U_{G1K} 和 U_{G2P} , 观察并详细描述各参数对激发曲线的影响, 进而分析这些参数对激发曲线的作用机制。

3.2 测量氩原子第一激发电位

- (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”。

细测:手动方式逐渐增大 U_{G2K} 电压, 在 10.0 ~ 95.0V 内以 0.5 ~ 1.0V 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; 通过对峰值电位 U_h 与峰值次序 n 的拟合得到相差曲线。用最小二乘法处理, 计算出氩原子的第一激发电位。

4.实验结果与讨论

4.1 观察氩原子的激发曲线 [3]

使用自动模式,将灯丝电压 U_F ,slit 电压 U_{G1K} ,拒斥电压 U_{G2P} 调至出厂检验参考值,得到的图象为:



图 2 出场检验参考值

4.1.1 灯丝电压 U_F

在 $\pm 50\%$ 范围内调节灯丝电压 U_F 得到的图形的变化,如图 3,4 所示:



图 3 $U_F + 50\%$



图 4 $U_F - 50\%$

可以看到,随着灯丝电压增大,波形振幅越来越大,最大值也不断增大.

作用机制分析:

U_F 的作用是加热灯丝,通过热电子发射效应发射电子.根据 Richardson-Dushman 方程,热电子发射的电流密度:

$$J_e \propto T^2 e^{-\frac{W_e}{kT}}$$

其中, W_e 是阴极 K 的热离子功函数, T 是阴极 K 的温度.由此可见,随着 U_F 的增加,阴极温度 T 也会逐渐上升,导致发射的电流密度迅速上升,从而使得检测到的极板电流迅速增大,即振幅变大,反之则振幅变小

4.1.2 棚极电压 U_{G1K}

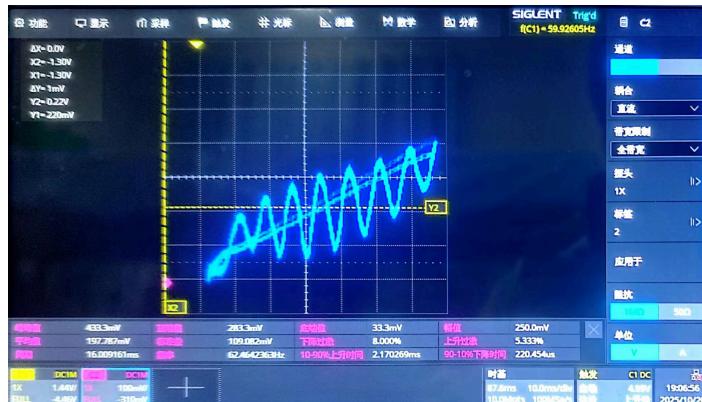


图 5 $U_{G1K} + 50\%$



图 6 $U_{G1K} - 50\%$

随着 U_{G1K} 增大, 波形变化并不明显. 在电子初速度较小时, U_{G1K} 可以驱散聚集在阴极附近的空间电荷, 使得在开始时电位发生变化, 但这种变化并不明显.

4.1.3 拒斥电压 U_{G2P}



图 7 $U_{G2P} + 50\%$

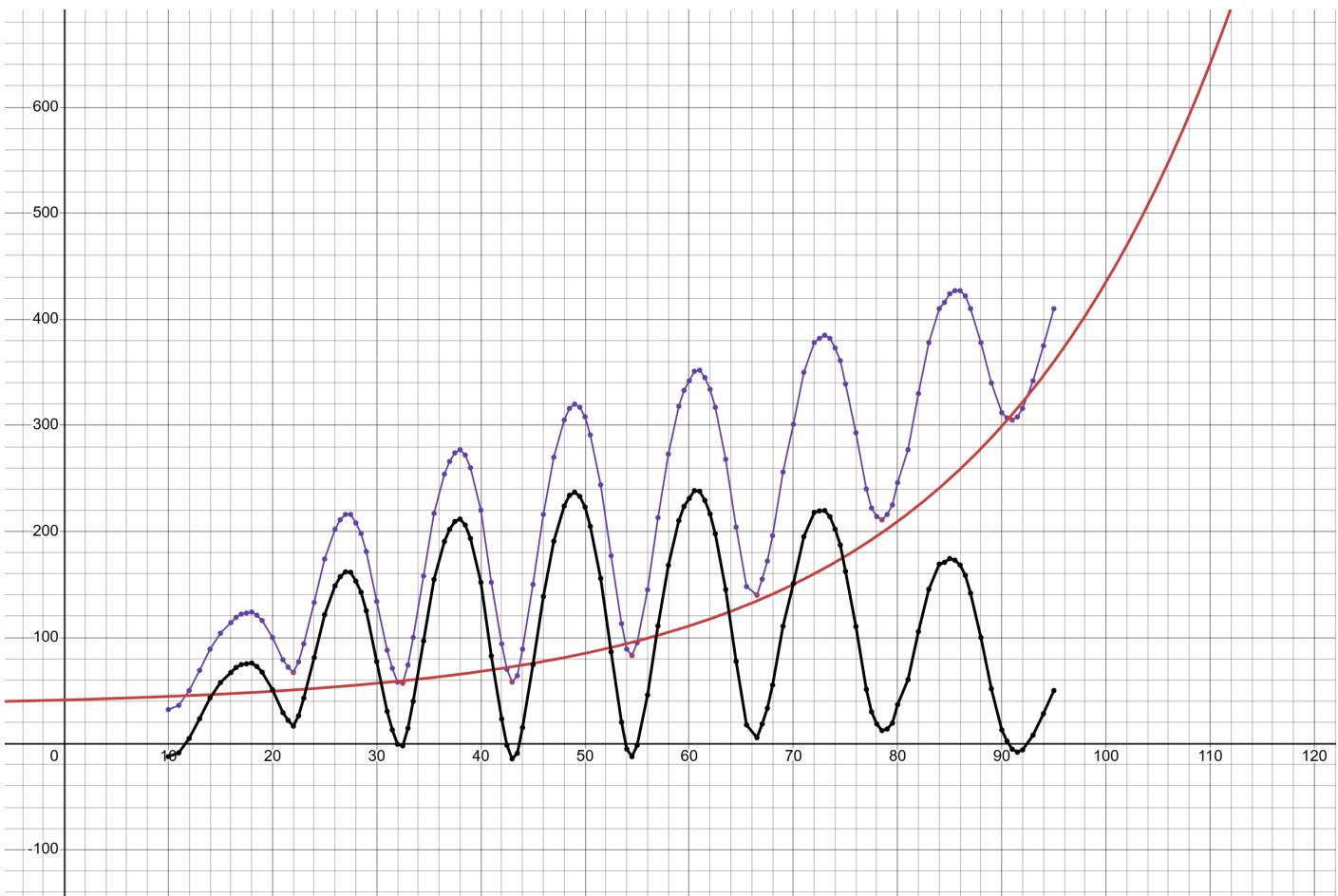


图 8 $U_{G2P} - 50\%$

随着 U_{G2P} 增大, 电流总体上升得越来越慢, 且电流值越来越小. 随着拒斥电压的增大, 电子更难通过 G_2P 区间, 从而使得板级电流总体减小.

4.2 测量氩原子第一激发电位

实验测得了 U_{G2K} 在 $10.0 \sim 95.0V$ 范围内每隔 $0.5V$ 或 $1.0V$ 变化的 I_P-U_{G2K} 曲线(紫色), 如图 2 所示:

图 9 I_P - U_{G2K} 曲线

其中,纵轴为 I_P ,单位为 nA;横轴为 U_{G2K} ,单位为 V.详细的数据可以见本文最后的原始数据记录.

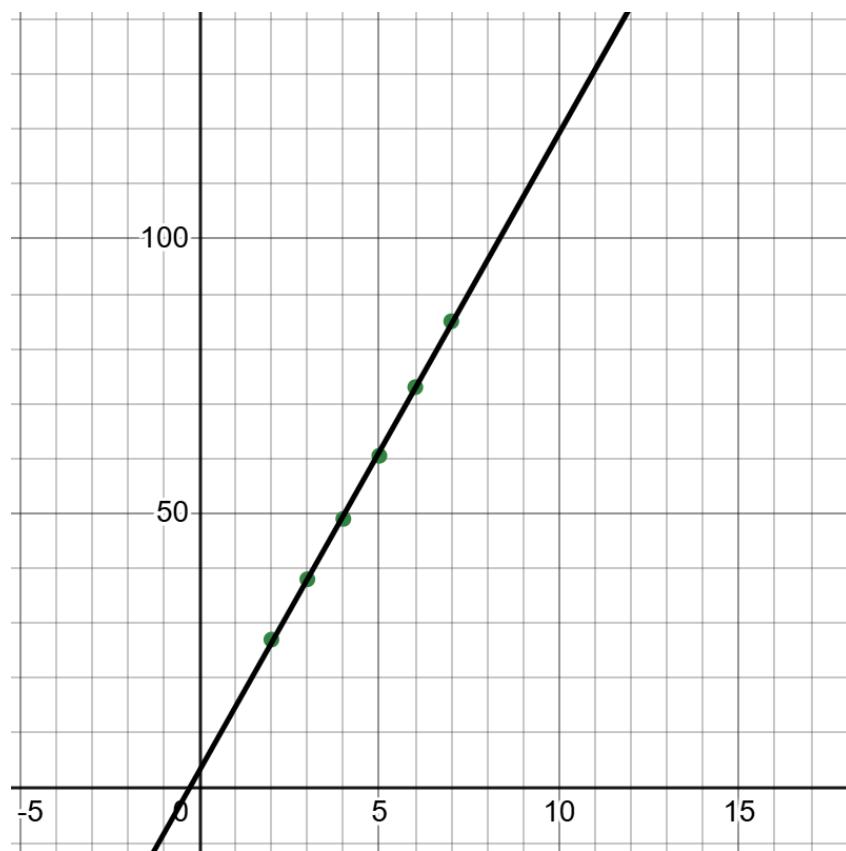
通过对波谷电流电压的指数拟合得到的本底电流(红线):

$$I_P = 6.31839e^{0.0414867V_{G2K}} + 34.77001, R^2 = 0.9984$$

扣除本底电流后的 I_P - U_{G2K} 曲线如图 2 中黑色曲线所示.取图中 6 个波峰的电位(单位:V)为纵轴及与峰的次序为横轴, 进行直线拟合:

n	2	3	4	5	6	7
U_h (V)	27	38	49	60.5	73	85

拟合的图象:



拟合的结果:

$$k = 11.61429 \text{ V}, b = 3.15238 \text{ V}, r = 0.9997, R^2 = 0.9993$$

A 类不确定度:

$$u_A = k \sqrt{\frac{\frac{1}{r^2} - 1}{n - 2}} = 0.14 \text{ V}$$

所以氩原子的第一激发电位为

$$U = 11.61(14) \text{ V}$$

5.思考题

1. I_P-U_{G2K} 曲线电流下降并不十分陡峭,主要原因是什么?

从 K 极发出的电子是受热辐射的电子,其速度服从麦克斯韦分布律,所以电子的能量存在一个范围. U_{G2K} 在激发电位整数倍附近时,随着达到激发电位的电子数增多,曲线是逐渐下降的.

2. I_P 的谷值并不为零,而且谷值依次沿 U_{G2K} 轴升高,如何解释?

I_P 的谷值并不为零:由于电子出射的能量存在一个范围,会有部分电子能量低于第一激发电位能量,同时有部分电子也会发生弹性碰撞,能量损失小,也有部分电子没有与原子发生碰撞,形成本底电流,所以谷值非零.同时,二次发射电子也贡献了一部分谷底电流.

I_P 的谷值依次升高:随着加速电场 U_{G2K} 的增大,电子的能量也原来越大,到达极板的电子数增多,从而本底电流也会越来越大.

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.金属电极连接时存在接触电势差,会影响第一峰值的结果;而且在加速电压 U_{G2K} 较低的时候,电子出射的速度很慢,聚集形成类似“电子云”的空间电荷.第一峰值的电压还需要额外克服空间效应产生的电压.所以第一峰值的电压略大于第一激发电位.

4. 写出氩原子第一激发态与基态的能级差.

$$\Delta E = eU_0 = 1.602 \times 10^{-19} \times 11.61 = 1.86 \times 10^{-18} \text{ J}$$

6. 结论

本实验通过 FD-FH-C 弗兰克-赫兹(氩管)实验仪,测得氦原子的第一激发电位为 11.61(14) V,与标准值贴合较好,分析了实验装置的影响因素,有利地证明了原子分立能级的存在,从而对原子结构和微观图象形成了更深的理解.

参考文献

- [1] 张增明等, 编, 大学物理实验 第二册. 高等教育出版社.
- [2] 代如成, 大学物理 F-H 实验讲义.
- [3] L. Huang, H. Lü, W. Liu, L. Xin, H. Zhao, 和 Y. Zhang, 《From macro-measure of Franck–Hertz curves to micro-collisions between electrons and argon atoms》, *European Journal of Physics*, 卷 41, 期 3, 页 35401, 2 月 2020, doi: 10.1088/1361-6404/ab6501.

附：原始数据

十一组 2025. 10. 20

弗兰克赫兹实验数据记录表

姓名 李若贤 学号 PB24000070 实验台 7 任课老师 _____ 日期 2025. 10. 20

实验参数: $T = \text{_____}^{\circ}\text{C}$, $U_F = 2.60 \text{ V}$, $U_{G1K} = 1.30 \text{ V}$, $U_{G2P} = 9.10 \text{ V}$

实验现象变化规律:

- U_F 影响 随着 U_F 的增大, 波形的振幅越来越大, 最高处不断增大
- U_{G1K} 影响 随着 U_{G1K} 的增大, 波峰的电流值越来越小
- U_{G2P} 影响 随着 U_{G2P} 的增大, 电流总体上升得越慢, 电流值也越小

粗测数据:

U_{G2K}/V									
I_p/nA									

细测数据:

U_{G2K}/V	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	17.0	17.5
I_p/nA	32	36	50	69	89	104	114	119	122	123
U_{G2K}/V	18.0	18.5	19.0	20.0	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	24.0
I_p/nA	124	121	116	100	79	72	67	77	94	133
U_{G2K}/V	25.0	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	30.0	31.0
I_p/nA	174	202	211	216	216	208	198	181	134	88
U_{G2K}/V	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.5	35.5	36.5	37.0	37.5
I_p/nA	71	58	57	74	100	158	217	254	266	274
U_{G2K}/V	38.0	38.5	39.0	40.0	41.0	42.0	42.5	43.0	43.5	44.0
I_p/nA	277	272	260	220	152	94	70	58	64	89
U_{G2K}/V	45.0	46.0	47.0	48.0	48.5	49.0	49.5	50.0	50.5	51.5
I_p/nA	150	216	270	305	316	320	317	308	291	244
U_{G2K}/V	52.5	53.5	54.0	54.5	55.0	56.0	57.0	58.0	59.0	59.5
I_p/nA	177	113	89	83	95	145	213	273	318	333

细测数据:

U_{G2K}/V	60.0	60.5	61.0	61.5	62.0	62.5	63.5	64.5	65.5	66.5
I_p/nA	342	351	352	345	334	317	268	204	148	140
U_{G2K}/V	67.0	67.5	68.0	69.0	70.0	71.0	72.0	72.5	73.0	73.5
I_p/nA	155	172	196	256	301	350	378	382	385	382
U_{G2K}/V	74.0	74.5	75.0	76.0	77.0	77.5	78.0	78.5	79.0	79.5
I_p/nA	373	361	339	293	240	222	214	211	216	225
U_{G2K}/V	80.0	81.0	82.0	83.0	84.0	84.5	85.0	85.5	86.0	86.5
I_p/nA	246	277	330	378	410	416	424	427	427	422
U_{G2K}/V	87.0	88.0	89.0	90.0	90.5	91.0	91.5	92.0	93.0	94.0
I_p/nA	410	378	340	312	307	305	308	316	342	375
U_{G2K}/V	95.0									
I_p/nA	410									
U_{G2K}/V										
I_p/nA										

3. 最小二乘法处理
用最小二乘法处理，得到的图像如图 3 所示。
图 3 是使用 Origin Pro 2023 进行数据处理，采用最小二乘法拟合得到的图像。图中显示了实验数据点和拟合直线。