

# 浙江大学

## 物理实验报告

实验名称: 弗兰克-赫兹实验

实验桌号: 11111

指导教师: 韩益航

班级: 计科 2404

姓名: 李宇晗

学号: 3240106155

实验日期: 2025 年 12 月 1 日 星期二 上午

# 一、预习报告（10分）

## 1. 实验综述（5分）

本实验旨在通过弗兰克-赫兹实验验证原子能级的量子化特性，加深对“量子化”概念的认识。

**实验原理：**根据波尔原子模型，原子中的电子只能处于特定的能量状态（定态），电子在不同能级之间跃迁时，吸收或发射的能量是量子化的，满足关系式  $h\nu = E_m - E_n$ 。本实验使用充氩的四极电子管验证这一理论。

**实验装置：**弗兰克-赫兹管是一个双栅结构的充氩四极电子管，主要由阴极  $K$ 、第一栅极  $G_1$ 、第二栅极  $G_2$  和阳极  $A$  组成。各电压的作用如下：

- $U_{F_1 F_2}$ : 灯丝电压，加热灯丝产生热电子。
- $U_{G_1 K}$ : 第一栅极电压，消除空间电荷效应，提高发射效率。
- $U_{G_2 K}$ : 加速电压，使电子加速并与氩原子碰撞。
- $U_{G_2 A}$ : 拒斥电压，筛选能量足够的电子到达阳极。

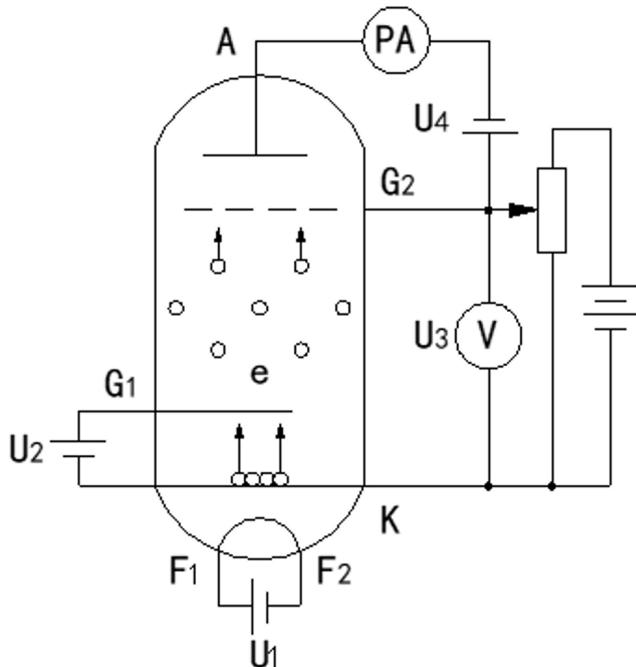


Figure 1: 弗兰克-赫兹电子管示意图

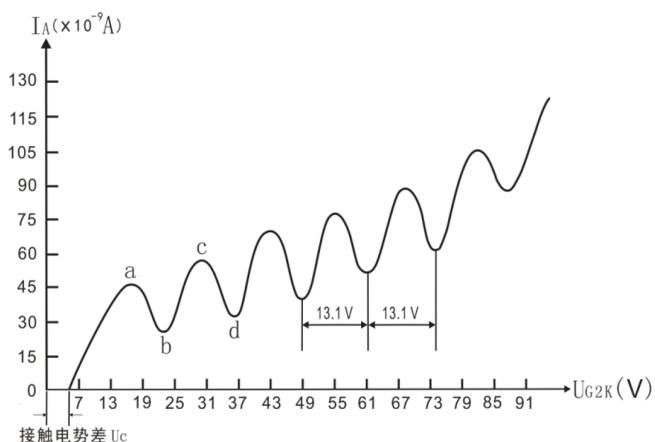


Figure 2: 弗兰克-赫兹电子管结构示意图

**实验现象：**当加速电压  $U_{G_2K}$  逐渐增加时，阳极电流  $I_A$  呈现周期性变化：

1. 低电压阶段：电子与氩原子发生弹性碰撞，能量损失很小， $I_A$  随  $U_{G_2K}$  单调增加。
2. 当  $U_{G_2K}$  达到氩原子第一激发电势时，电子与氩原子发生非弹性碰撞，电子损失大部分能量，无法克服拒斥电压到达阳极， $I_A$  急剧下降。
3.  $U_{G_2K}$  继续增加，电子在碰撞后仍有足够能量到达阳极， $I_A$  再次上升。

上述过程周期性重复，在  $I_A - U_{G_2K}$  曲线上形成多个峰谷，相邻峰值对应的电压差即为氩原子的第一激发电势  $U_0$ 。

#### 实验方法：

1. 自动测量模式：通过示波器观察  $I_A - U_{G_2K}$  曲线，记录各峰值对应的加速电压，用逐差法计算氩原子第一激发电势。
2. 手动测量模式：逐点测量不同  $U_{G_2K}$  下的阳极电流  $I_A$ ，绘制完整的  $I_A - U_{G_2K}$  曲线。

#### 2. 实验重点（3分）

本实验的重点在于理解原子能级量子化的物理意义，掌握通过电子与原子碰撞激发来验证能级量子化的实验方法，学会使用弗兰克-赫兹实验仪测量氩原子的第一激发电势，并通过  $I_A - U_{G_2K}$  曲线的峰谷特征理解非弹性碰撞的物理过程。

#### 3. 实验难点（2分）

本实验的难点在于准确识别和记录  $I_A - U_{G_2K}$  曲线上的峰值位置，理解弹性碰撞与非弹性碰撞在不同加速电压下的转换机制，以及正确使用逐差法处理数据以减小系统误差，获得准确的第一激发电势值。

## 二、原始数据 (20 分)

3240106155 学号姓名 4 12.1											
1. 手动 $U_{F_1 F_2} = 3.30V$ $U_{G_1 K} = 4.00V$ $U_{G_2 A} = 3.00V$											
2. 自动											
$U_{G_2 K}(V)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
$I_A(nA)$	0	6	0	3	5	11	23	38	49	57	
$U_{G_2 K}(V)$	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	
$I_A(nA)$	64	69	74	78	82	86	90	92	94	93	
$U_{G_2 K}(V)$	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	
$I_A(nA)$	91	86	86	93	106	124	136	146	155	159	
$U_{G_2 K}(V)$	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0	
$I_A(nA)$	155	141	121	108	117	143	171	201	225	240	
$U_{G_2 K}(V)$	41.0	42.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0	50.0	
$I_A(nA)$	249	246	223	183	150	159	198	242	287	325	
$U_{G_2 K}(V)$	51.0	52.0	53.0	54.0	55.0	56.0	57.0	58.0	59.0	60.0	
$I_A(nA)$	354	371	375	360	313	250	217	214	218	358	
$U_{G_2 K}(V)$	61.0	62.0	63.0	64.0	65.0	66.0	67.0	68.0	69.0	70.0	
$I_A(nA)$	415	464	486	514	514	487	426	333	381	342	
$U_{G_2 K}(V)$	71.0	72.0	73.0	74.0	75.0	76.0	77.0	78.0	79.0	80.0	
$I_A(nA)$	398	462	521	578	618	641	643	620	560	481	
$U_{G_2 K}(V)$	81.0	82.0	83.0	84.0	85.0	86.0	87.0	88.0	89.0	90.0	
$I_A(nA)$	447	456	487	558	622	683	730	735	778	766	
$U_{G_2 K}(V)$	91.0	92.0	93.0	94.0	95.0	96.0	97.0	98.0	99.0	100.0	
$I_A(nA)$	724	670	626	601	624	666	725	782	838	984	

## 三、结果与分析 (60 分)

### 1. 数据处理与结果 (30 分)

1.1 手动测量模式:  $I_A - U_{G_2 K}$  曲线分析

实验条件:  $U_{F_1 F_2} = 3.30V$ ,  $U_{G_1 K} = 4.00V$ ,  $U_{G_2 A} = 3.00V$

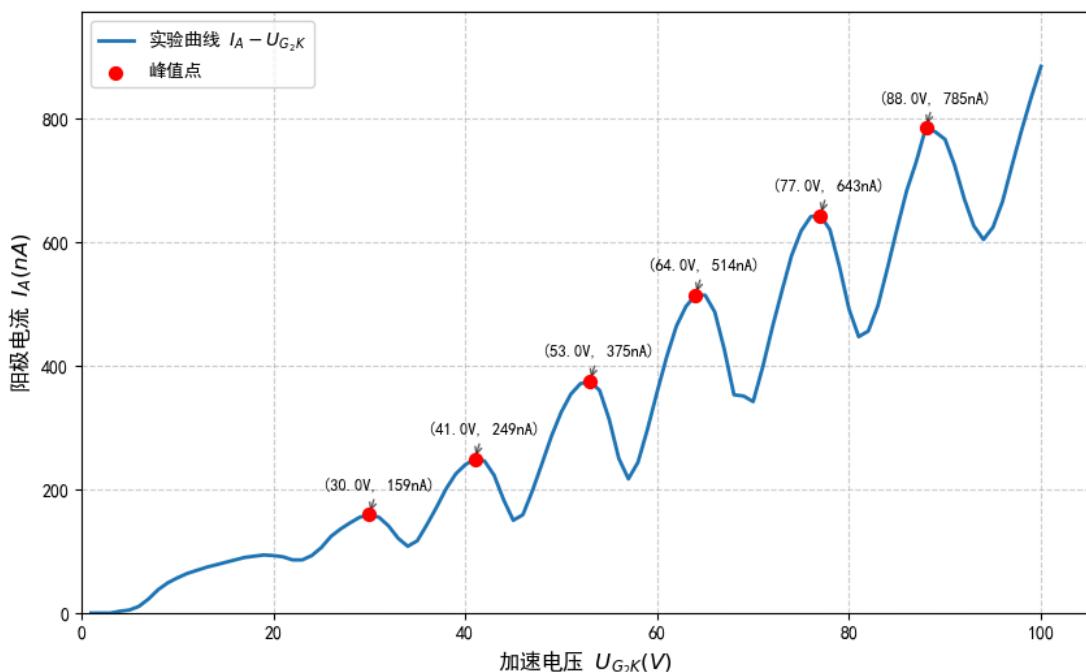
通过手动调节加速电压, 逐点记录电流数据如下表所示:

$U_{G_2 K}(V)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
$I_A(nA)$	0	0	0	3	5	11	23	38	49	57	
$U_{G_2 K}(V)$	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	
$I_A(nA)$	64	69	74	78	82	86	90	92	94	93	
$U_{G_2 K}(V)$	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	
$I_A(nA)$	91	86	86	93	106	124	136	146	155	159	
$U_{G_2 K}(V)$	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0	
$I_A(nA)$	155	141	121	108	117	143	171	201	225	240	
$U_{G_2 K}(V)$	41.0	42.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0	50.0	
$I_A(nA)$	249	246	223	183	150	159	198	242	287	325	
$U_{G_2 K}(V)$	51.0	52.0	53.0	54.0	55.0	56.0	57.0	58.0	59.0	60.0	

$I_A(nA)$	354	371	375	360	313	250	217	244	298	358
$U_{G_2K}(V)$	61.0	62.0	63.0	64.0	65.0	66.0	67.0	68.0	69.0	70.0
$I_A(nA)$	415	464	496	514	514	487	426	353	351	342
$U_{G_2K}(V)$	71.0	72.0	73.0	74.0	75.0	76.0	77.0	78.0	79.0	80.0
$I_A(nA)$	398	462	521	578	618	641	643	620	560	491
$U_{G_2K}(V)$	81.0	82.0	83.0	84.0	85.0	86.0	87.0	88.0	89.0	90.0
$I_A(nA)$	447	456	497	558	622	683	730	785	778	766
$U_{G_2K}(V)$	91.0	92.0	93.0	94.0	95.0	96.0	97.0	98.0	99.0	100.0
$I_A(nA)$	724	670	626	604	624	666	725	782	835	884

根据完整手动测量数据 (1V-100V), 绘制  $I_A - U_{G_2K}$  曲线如下:

弗兰克-赫兹实验: 手动测量  $I_A - U_{G_2K}$  曲线



峰值点读取与处理: 从手动测量数据中提取峰值电压如下:

峰序号	1	2	3	4	5	6
$U_{peak}$ (V)	30.0	41.0	53.0	64.0	77.0	88.0
$I_A$ (n A)	159	249	375	514	643	785

第一激发电势计算 (相邻峰值差):

$$\Delta U_{2-1} = 41.0 - 30.0 = 11.0 \text{V}$$

$$\Delta U_{3-2} = 53.0 - 41.0 = 12.0 \text{V}$$

$$\Delta U_{4-3} = 64.0 - 53.0 = 11.0 \text{V}$$

$$\Delta U_{5-4} = 77.0 - 64.0 = 13.0 \text{V}$$

$$\Delta U_{6-5} = 88.0 - 77.0 = 11.0 \text{V}$$

手动测量结果：平均值  $U_0 = 11.60V$ 。

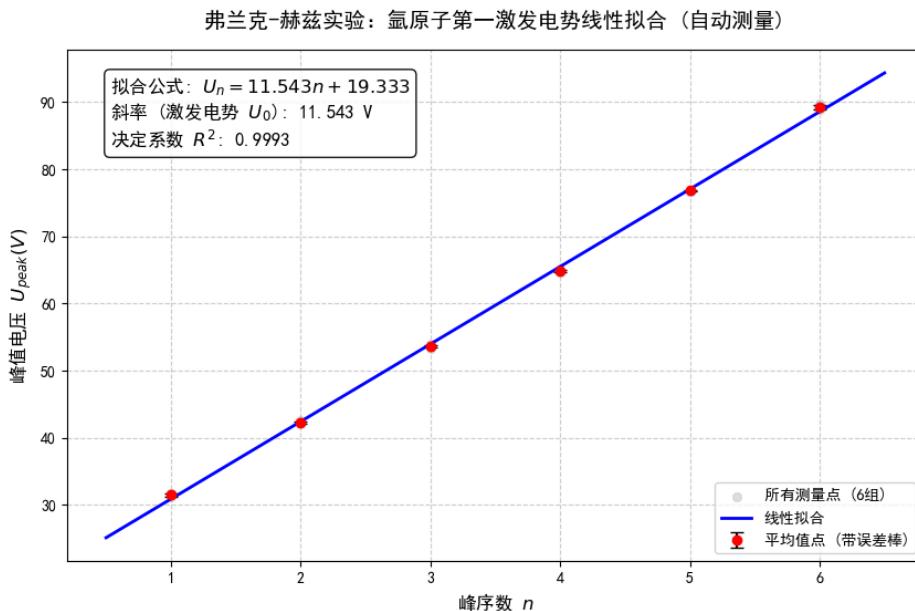
## 1.2 自动测量模式：线性拟合分析

使用示波器进行自动扫描，共记录了 6 组 峰值数据，数据记录如下：

组别	峰 1 (V)	峰 2 (V)	峰 3 (V)	峰 4 (V)	峰 5 (V)	峰 6 (V)
1	31.7	42.2	53.5	64.9	76.9	89.3
2	31.2	42.2	53.7	64.8	76.9	89.2
3	31.7	42.2	53.7	64.9	76.7	88.9
4	31.5	42.4	53.3	64.7	76.8	89.1
5	31.5	42.1	53.9	65.2	76.8	89.8
6	31.3	42.6	53.5	65.0	76.8	89.5

### 数据分析与结果：

为减小误差，以峰序号  $n$  为横坐标，各峰对应的平均电压  $U_n$  为纵坐标进行线性拟合（如下图所示）。根据公式  $U_n = U_0n + U_K$ ，拟合直线的斜率即为氩原子的第一激发电势  $U_0$ 。



根据拟合结果：

- 拟合公式:  $U_n = 11.543n + 19.333$
- 第一激发电势 (斜率):  $U_0 = 11.54V$
- 决定系数:  $R^2 = 0.9993$ , 表明峰值电压与峰序号具有极好的线性关系。

不确定度分析：本次测量的不确定度主要由 B 类不确定度（仪器误差）决定。实验仪器示数精确到 0.1V，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_B = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \approx 0.058V$$

由于拟合线性度极高 ( $R^2 \approx 1$ )，统计误差  $u_A$  远小于仪器误差，故合成不确定度主要取决于仪器精度：

$$U_c \approx u_B \approx 0.06V$$

最终结果：

$$U_0 = (11.54 \pm 0.06)\text{V}$$

## 2. 误差分析 (20 分)

### 2.1 实验结果对比

测量方式	结果 $U_0$ (V)	不确定度 (V)	相对误差(vs 理论)
手动测量	11.60	-	约 0.4%
自动测量	11.54	0.06	约 0.1%
理论值	11.55	-	-

分析：两种测量方法得到的结果非常接近，均落在氩原子第一激发电势的理论值 (11.5V-11.7V) 范围内。自动测量通过对 6 组数据进行线性拟合，有效抑制了随机误差，结果 (11.54V) 与理论值符合度极高。误差主要来源于仪器分辨率限制 (0.1V) 以及接触电势差导致的峰位平移 (但不影响斜率)。

### 2.2 主要误差来源分析

**接触电势差：**阴极与栅极材料不同产生的接触电势差会使整个  $I - U$  曲线平移，体现为拟合直线的截距，但不影响斜率 (激发电势) 的计算。

**读数误差：**手动测量时，峰值位置较为平缓，肉眼判断峰顶电压存在主观误差；自动测量受限于示波器光标采样的分辨率。

**温度影响：**管内温度决定了氩气压强和电子平均自由程。若温度波动，会影响碰撞概率，导致峰形变化或位置微小漂移。

## 四、实验探讨 (10 分)

本实验通过手动与自动两种方式成功验证了玻尔原子模型的能级量子化假设。手动测量直观地展示了随着加速电压增加，电流呈现周期性振荡的物理图像；自动测量则通过多组数据统计分析与线性拟合，给出了精度极高的测量结果 11.54V。实验中发现，随着级数增加，峰值电流不断增大，峰形逐渐展宽，这与电子能量分布及散射截面变化有关。

## 五、思考题 (10 分)

### 1. 第一激发电位的物理含义是什么？

答：第一激发电位 (First Excitation Potential) 是指使原子从基态跃迁到第一激发态所需的最小能量，以电子伏特 (eV) 为单位表示。其物理含义包括：

1. **能级量子化的体现：**对应原子能级结构中基态  $E_0$  与第一激发态  $E_1$  之间的能量差，即  $U_0 = \frac{E_1 - E_0}{e}$ 。
2. **非弹性碰撞的能量阈值：**当电子动能  $E_k = eU_{G_2K}$  达到第一激发电位对应的能量时，才能发生非弹性碰撞。
3. **原子特征参数：**不同元素的第一激发电位不同，本实验测得氩原子的第一激发电位约为 11.6V。
4. **光谱线的对应关系：**原子退激辐射的光子能量满足  $h\nu = eU_0$ 。
2. **温度对 F-H 管的  $I_p - U_{G_2K}$  曲线有什么影响？**

答：温度对曲线影响显著：

1. **温度过低时**: 管内氩原子密度过大, 电子平均自由程减小, 经历多次碰撞, 导致峰谷特征不明显, 曲线平缓, 阳极电流偏小。
  2. **温度适中时(最佳)**: 电子平均自由程与电极间距匹配, 能观察到清晰的周期性峰谷结构, 测量最准确。
  3. **温度过高时**: 氩原子密度过小, 碰撞概率降低, 且热运动加剧导致峰值位置漂移, 曲线趋于平滑。
- 注意事项:
    1. 用 PDF 格式上传“实验报告”, 文件名: 学生姓名+学号+实验名称+周次。
    2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
    3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” - “选课系统”内查询。
    4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” - “选课系统”内进行, 学生必须进行教学评价, 才能看到实验报告成绩, 教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。