

# 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： -

指导教师： 张妍老师

班级： -

姓名： -

学号： -

实验日期： 2025 年 9 月 22 日 星期 一 上/下午

(此处填实验选课系统内日期)

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：  
情况说明：

# 一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

## 1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

弗兰克-赫兹实验，旨在通过测量氩原子的第一激发电势，验证原子能级的存在，从而帮助我们学习关于原子碰撞激发和测量的方法，并加深对“量子化”概念的认识。

**实验现象：**当加速电压  $U_{G2K}$  逐渐增大时，阳极电流  $I_A$  并不是单调上升，而是出现一系列周期性的峰谷（如图 1 所示）。每当电子能量达到氩原子的第一激发电势时，二者发生非弹性碰撞，电子的能量骤降，无法克服拒斥电压  $U_{G2A}$  到达阳极，电流减小；随后随着电压继续升高，电流又重新增大。相邻谷值间的电压差即为氩原子的第一激发电势。

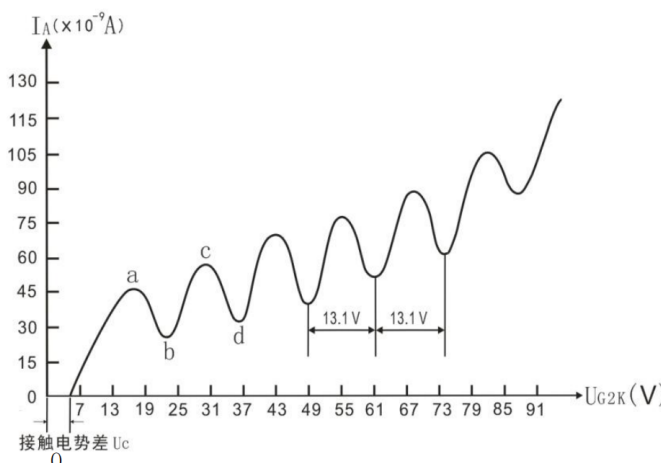


图 1:  $I_A$  随  $U_{G2K}$  变化曲线

**实验原理：**根据波尔原子理论，原子的能级是分立的。电子从阴极 K 出发，经加速电压  $U_{G2K}$  加速，与氩原子发生碰撞。当电子能量小于氩原子激发电势时，只发生弹性碰撞；当电子能量达到氩原子激发电势  $U_0$  时，发生非弹性碰撞，氩原子由基态跃迁至第一激发态，电子能量损失：

$$eU_0 = E_2 - E_1$$

因此，测定相邻极小值的电压差即可得到氩原子第一激发电势，从而验证能级的量子化。

**实验方法：**实验采用充氩的四极弗兰克-赫兹管，内部包括灯丝 F1F2、阴极 K、栅极 G1、G2 和阳极 A。

- 灯丝电压  $U_{F1F2}$ ：加热灯丝，使灯丝发出热电子。
- 第一栅极电压  $U_{G1K}$ ：消除空间电荷对阴极电子发射的影响，提高发射效率。
- 加速电压  $U_{G2K}$ ：使从阴极 K 发出的电子被加速，进入管内与氩原子碰撞。
- 拒斥电压  $U_{G2A}$ ：筛选能量大于  $eU_{G2A}$  的电子到达阳极 A。

通过自动或手动方式调节  $U_{G2K}$  的大小，测量并绘制  $I_A - U_{G2K}$  曲线，并使用逐差法计算氩原子的第一激发电势。

## 2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

掌握原子能级量子化的概念，理解原子能级跃迁与非弹性碰撞的关系，学会通过测量与分析  $I_A - U_{G2K}$  曲线，使用逐差法求取氩原子的第一激发电势，从而验证分立能级的存在。

## 3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

需要精确控制灯丝、栅极与拒斥电压的合适参数，避免电子管过热或被击穿；同时需要准确测量峰谷电流差，尽可能减小接触电势差带来的误差。

## 二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）（原始数据扫描版放在本报告的最后两页）

## 三、结果与分析（60 分）

### 1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

#### 1. 手动测量实验结果

实验中的仪器参数：  $U_{F1F2}=3.10V$  ,  $U_{G1K}=1.25V$  ,  $U_{G2A}=3.5V$

微电流测量量程：  $\times 10^{-9}A$

手动测量数据如下：

表 1: 手动测量实验数据记录表

$U_{G2K}(V)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$I_A(nA)$	0	4	11	21	32	47	62	76	90	101
$U_{G2K}(V)$	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0
$I_A(nA)$	112	122	131	139	146	152	158	160	158	155
$U_{G2K}(V)$	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0
$I_A(nA)$	157	166	176	185	193	200	205	209	206	197
$U_{G2K}(V)$	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0
$I_A(nA)$	183	179	189	204	219	229	237	244	246	244
$U_{G2K}(V)$	41.0	42.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0	50.0
$I_A(nA)$	233	217	204	211	227	246	262	273	280	283
$U_{G2K}(V)$	51.0	52.0	53.0	54.0	55.0	56.0	57.0	58.0	59.0	60.0
$I_A(nA)$	283	278	264	244	238	248	268	287	303	313
$U_{G2K}(V)$	61.0	62.0	63.0	64.0	65.0	66.0	67.0	68.0	69.0	70.0
$I_A(nA)$	320	323	322	316	300	283	278	289	307	325

$U_{G2K}(V)$	71.0	72.0	73.0	74.0	75.0	76.0	77.0	78.0	79.0	80.0
$I_A(nA)$	341	353	362	366	367	361	348	334	329	335
$U_{G2K}(V)$	81.0	82.0	83.0	84.0	85.0	86.0	87.0	88.0	89.0	90.0
$I_A(nA)$	349	366	382	396	408	416	420	418	411	400
$U_{G2K}(V)$	91.0	92.0	93.0	94.0	95.0	96.0	97.0	98.0	99.0	100.0
$I_A(nA)$	394	396	405	417	433	449	463	474	485	488

用 python 进行数据拟合，得到的曲线如下：

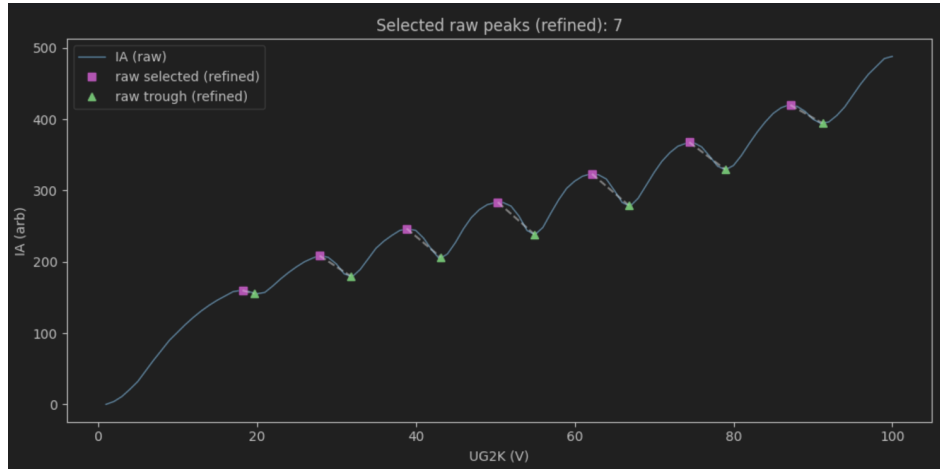


图 4: 拟合出的  $I_A - U_{G2K}$  变化曲线

获得的峰值结果如下：

表 2: 手动测量拟合峰值点

峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	7
$U_{G2K}/V$	18.2	27.9	38.9	50.3	62.2	74.4	87.2

使用逐差法计算测定的第一激发电势：

$$U = \frac{(U_5 + U_6 + U_7) - (U_2 + U_3 + U_4)}{3^2} = 11.86V$$

通过线性拟合方法，计算得到接触电势差为： $U_c = 5.110V \pm 0.932V$

## 2. 自动测量实验结果

实验中的仪器参数： $U_{F1F2}=3.10V$ ， $U_{G1K}=1.25V$ ， $U_{G2A}=3.5V$

微电流测量量程： $\times 10^{-9}A$

自动测量数据如下：

表 3: 自动测量实验数据记录表

第一组实验数据						
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6
$U_{G2K} V$	27.9	38.8	50.1	61.7	74.0	86.9
第二组实验数据						
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6
$U_{G2K} V$	27.7	39.3	50.2	61.8	74.4	87.1
第三组实验数据						
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6
$U_{G2K} V$	28.1	39.2	49.5	61.9	74.6	87.1
第四组实验数据						
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6
$U_{G2K} V$	27.6	38.9	50.1	62.0	73.9	87.3
第五组实验数据						
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6
$U_{G2K} V$	27.9	39.2	49.6	62.0	74.4	86.9

使用逐差法求出每组测得的第一激发电势：

$$U_1 = 11.76V \quad U_2 = 11.79V \quad U_3 = 11.87V \quad U_4 = 11.89V \quad U_5 = 11.84V$$

$$U_{average} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5}{5} = 11.83V$$

## 2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

### 1. 手动测量实验误差：

相对误差：

$$E_1 = \frac{11.86V - 11.61V}{11.61V} \times 100\% = 2.15\%$$

### 2. 自动测量实验误差：

相对误差：

$$E_2 = \frac{11.83V - 11.61V}{11.61V} \times 100\% = 1.89\%$$

不确定度：

取样本标准差（不偏估计）：

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

先计算偏差平方和：

$$\sum (U_i - \bar{U})^2 = (-0.070)^2 + (-0.040)^2 + (0.040)^2 + (0.060)^2 + (0.010)^2 = 0.014800 (V^2).$$

于是

$$s = \sqrt{\frac{0.014800}{5-1}} = \sqrt{0.003700} \approx 0.05431 \text{ V.}$$

平均值的 a 类不确定度为：

$$u_{\bar{U}} = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{0.05431}{\sqrt{5}} \approx 0.02429 \text{ V.}$$

误差原因分析：

1. 氩原子的基态与第一激发态之间有两个亚稳态。氩原子的基态电势（电离电势）是  $U_0 = 15.76\text{V}$ ；两个亚稳态的电势分别是  $U'_1 = 4.21\text{V}$ ,  $U''_1 = 4.04\text{V}$ ；第一激发态的电势是  $U_1 = 2.68\text{eV}$ ；基态与两个亚稳态的电势差分别是  $\delta U'_1 = U_0 - U'_1 = 11.55\text{V}$ ,  $\delta U''_1 = U_0 - U''_1 = 11.72\text{V}$ ；两个亚稳态与基态的能量差分别是  $\delta E'_1 = 11.55\text{eV}$ ,  $\delta E''_1 = 11.72\text{eV}$ 。

实际碰撞中，可能出现三种跃迁路径的混合。如果测得的“第一激发能”实际上是多个跃迁能量的加权平均，测得值会偏离单一理论值（11.61 eV）

2. 电子发射极和加速极材料不同，存在接触电势差。如果修正不足，会导致第一激发电势系统性偏移。
3. 测量过程中， $U_{G2K}$  一直存在较大的波动，可能对测得的电流造成一定的影响。
4. 电流变化较小时，信号可能淹没在噪声中，导致峰值点判读不够准确。
5. 我在数据处理时使用的峰位判读/检测算法（平滑窗口、峰检测阈值）会引入一定的不确定度。

### 3. 实验探讨（10 分）

本实验利用氩气弗兰克-赫兹管，观察到输出电流随加速电压呈周期性波动，反映电子与氩原子的非弹性碰撞与氩原子的能级跃迁。通过测量相邻峰谷电压差，得到了第一激发电势并验证原子能级的离散性，同时认识了实验中接触电势差等因素对结果的影响。

## 四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

**思考题：探究拒斥电压  $U_{G2A}$  大小对测得第一激发电势的影响**

我更改了拒斥电压  $U_{G2A}$  的大小，分别检测了  $U_{G2A} = 0.5\text{V}$ ,  $2.5\text{V}$ ,  $10\text{V}$ ；时的峰值变化，结果如下：

表 4: 不同拒斥电压下的峰值变化

$U_{G2A}=0.5\text{V}$							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	逐差法计算结果
$U_{G2K} \text{ V}$	28.0	39.0	50.2	61.5	74.2	86.9	11.9
$U_{G2A}=2.5\text{V}$							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	逐差法计算结果
$U_{G2K} \text{ V}$	28.4	38.7	50.1	61.5	74.2	87.9	11.82
$U_{G2A}=10.0\text{V}$							
峰值序号 n	1	2	3	4	5	6	逐差法计算结果
$U_{G2K} \text{ V}$	27.1	38.5	49.3	61.2	74.4	86.7	11.93

**分析：**几种不同拒斥电压下得到的  $U_0$  非常接近，说明拒斥电压  $U_{G2A}$  对峰间距（即第一激发电势）的影响很小，但峰的绝对位置和第一个峰对  $U_{G2A}$  更敏感（变化集中在第 1、2、第 3 峰），且各组峰高和形状会随拒斥电压改变。

**可能原因：**拒斥电压作为能量筛选器，改变了能被阳极收集的电子能谱——当  $U_{G2A}$  增大时，低能电子被滤除，导致某些因非弹性碰撞失能的电子不被计数，从而使峰位微移或峰幅减小；同时第一个峰还受接触电势与初始电子能分布影响更大。

**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。

**浙江大学物理实验教学中心制**

# 弗兰克 / 赫兹实验

1. 计算氩原子第一激发电势实验数据记录表  $U_{F1F2} = 3.10V$   $U_{G1K} = 1.25V$   $U_{G2A} = 3.5V$

第一组 { 峰值序号 1 2 3 4 5 6 }  
 $U_{G2K}(V)$  27.9 38.8 50.1 61.7 74.0 86.9

第二组 { 峰值序号 1 2 3 4 5 6 }  
 $U_{G2K}(V)$  27.7 39.3 50.2 61.8 74.4 87.1

第三组 { 峰值序号 1 2 3 4 5 6 }  
 $U_{G2K}(V)$  28.1 39.2 49.5 61.9 74.6 87.1

第四组 { 峰值序号 1 2 3 4 5 6 }  
 $U_{G2K}(V)$  27.6 38.9 50.1 62.0 73.9 87.3

第五组 { 峰值序号 1 2 3 4 5 6 }  
 $U_{G2K}(V)$  27.9 39.2 49.6 62.0 74.4 86.9

二. 手动测量实验数据记录表

$U_{F1F2} = 3.10V$   $U_{G1K} = 1.25V$  ,  $U_{G2A} = 3.5V$

$U_{G2K}(V)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$I_A(nA)$	0		4		11		21		32	
$U_{G2K}(V)$	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
$I_A(nA)$	47		62		76		90		101	
$U_{G2K}(V)$	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
$I_A(nA)$	112		122		131		139		146	
$U_{G2K}(V)$	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
$I_A(nA)$	152		158		160		158		155	
$U_{G2K}(V)$	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0
$I_A(nA)$	157		166		176		185		193	
$U_{G2K}(V)$	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0
$I_A(nA)$	200		205		209		206		197	
$U_{G2K}(V)$	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0
$I_A(nA)$	183		179		189		204		219	

图 2: 实验原始数据 1





$U_{G2K}(V)$	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0
$I_A(nA)$		229		237		244		246		244
$U_{G2K}(V)$		41.0		42.0		43.0		44.0		45.0
$I_A(nA)$		233		217		204		<del>210</del> 211		227
$U_{G2K}(V)$		46.0		47.0		48.0		49.0		50.0
$I_A(nA)$		246		262		273		280		283
$U_{G2K}(V)$		51.0		52.0		53.0		54.0		55.0
$I_A(nA)$		283		278		264		244		238
$U_{G2K}(V)$		56.0		57.0		58.0		59.0		60.0
$I_A(nA)$		248		268		287		303		313
$U_{G2K}(V)$		61.0		62.0		63.0		64.0		65.0
$I_A(nA)$		320		323		322		316		300
$U_{G2K}(V)$		66.0		67.0		68.0		69.0		70.0
$I_A(nA)$		283		278		289		307		325
$U_{G2K}(V)$		71.0		72.0		73.0		74.0		75.0
$I_A(nA)$		341		353		362		366		367
$U_{G2K}(V)$		76.0		77.0		78.0		79.0		80.0
$I_A(nA)$		361		348		334		329		335
$U_{G2K}(V)$		81.0		82.0		83.0		84.0		85.0
$I_A(nA)$		349		366		382		396		408
$U_{G2K}(V)$		86.0		87.0		88.0		89.0		90.0
$I_A(nA)$		416		420		418		411		400
$U_{G2K}(V)$		91.0		92.0		93.0		94.0		95.0
$I_A(nA)$		394		396		405		417		433
$U_{G2K}(V)$		96.0		97.0		98.0		99.0		100.0
$I_A(nA)$		449		463		474		485		488

### 三. 更改栅极电压

① 山平值序号	1	2	3	4	5	6
② $U_{G2A} = 2.5V$						
$U_{G2K}(V)$	28.4	38.7	50.1	61.9	74.5	87.9
③ $U_{G2A} = 0.5V$						
$U_{G2K}(V)$	28.0	39.0	50.2	61.5	74.2	86.9
④ $U_{G2A} = 10V$						
$U_{G2K}(V)$	27.1	38.5	49.3	61.2	74.4	86.7
						99.8

图 3: 实验原始数据 2