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： 12

指导教师： _____

班级： _____

姓名： _____

学号： _____ _____

实验日期： 2025 年 12 月 2 日　　**星期** 二 **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。）

本实验利用弗兰克-赫兹管研究电子与氩原子的碰撞规律，旨在验证原子能级的存在。实验装置原理如图 1所示。弗兰克-赫兹管是一个充氩四极管，电子由热阴极 K 发射，在第二栅极 G_2 与阴极 K 之间的加速电压 U_{G2K} 作用下获得动能。在板极 A 与 G_2 之间施加一个反向的拒斥电压 U_{G2A} 用于筛选电子。

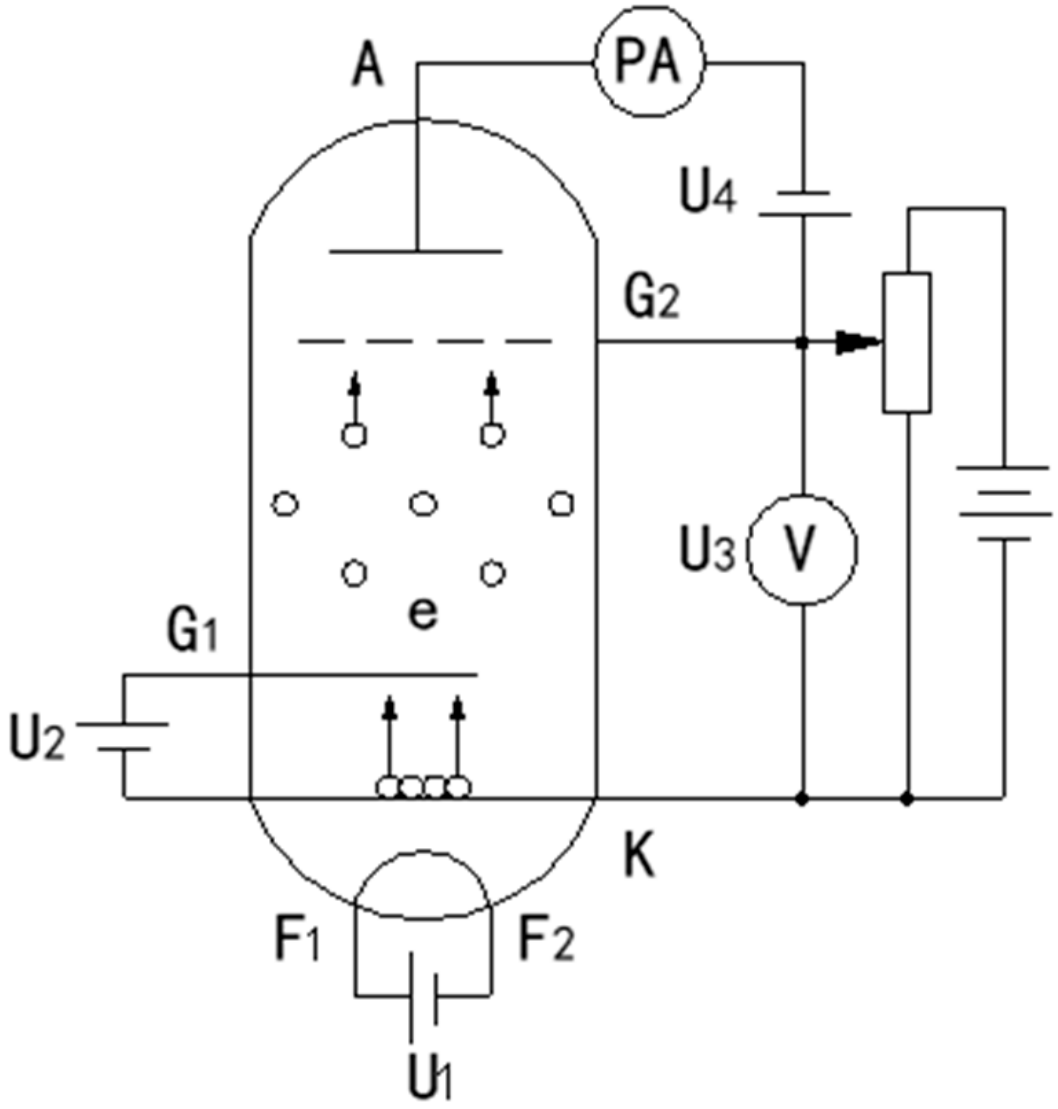


图 1: 弗兰克-赫兹管电路原理图

根据玻尔原子理论，原子能级是分立的，跃迁能量满足公式：

$$h\nu = E_m - E_n \tag{1}$$

实验现象表现为板极电流 I_A 随加速电压 U_{G2K} 的增加呈现周期性的起伏变化（如图 2所示）。当电子能量较低时，与氩原子发生弹性碰撞，能量损失极小；当电子能量达到氩原子的第一激发电势时，与原子发生非弹性碰撞，电子将能量传递给原子使其跃迁，自身能量急剧减小。若碰撞后的电子能量不足以克服拒斥电压 U_{G2A}，则无法到达板极，导致电流 I_A 下降（对应图中 ab、cd 段）。通过测量曲线中相邻峰（或谷）对应的电压差，即可测定氩原子的第一激发电势。

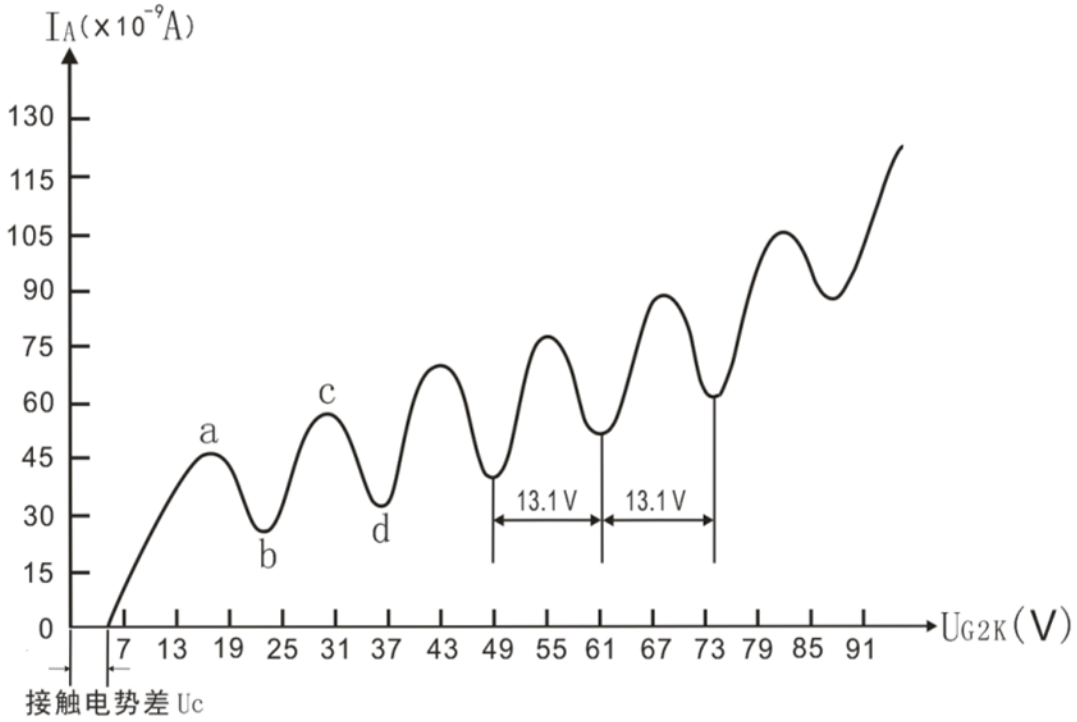


图 2: $I_A - U_{G2K}$ 实验特性曲线

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

1. 加深对“能级量子化”概念的理解，验证玻尔原子理论。
2. 掌握测量气体原子第一激发电势的实验方法（利用慢电子碰撞）。
3. 观测并分析 $I_A - U_{G2K}$ 曲线的物理意义，特别是峰谷形成的物理机制。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

1. 理解拒斥电压 U_{G2A} 的作用及其对电流曲线峰谷明显程度的影响。
2. 分析电子在不同加速阶段（如 oa、ab 段）与原子的碰撞类型（弹性与非弹性）及其能量变化。
3. 实验连线较为复杂，需准确连接各组电源（灯丝、扫描、拒斥等）与测量仪表。

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。）

原始数据如图3和图4所示。

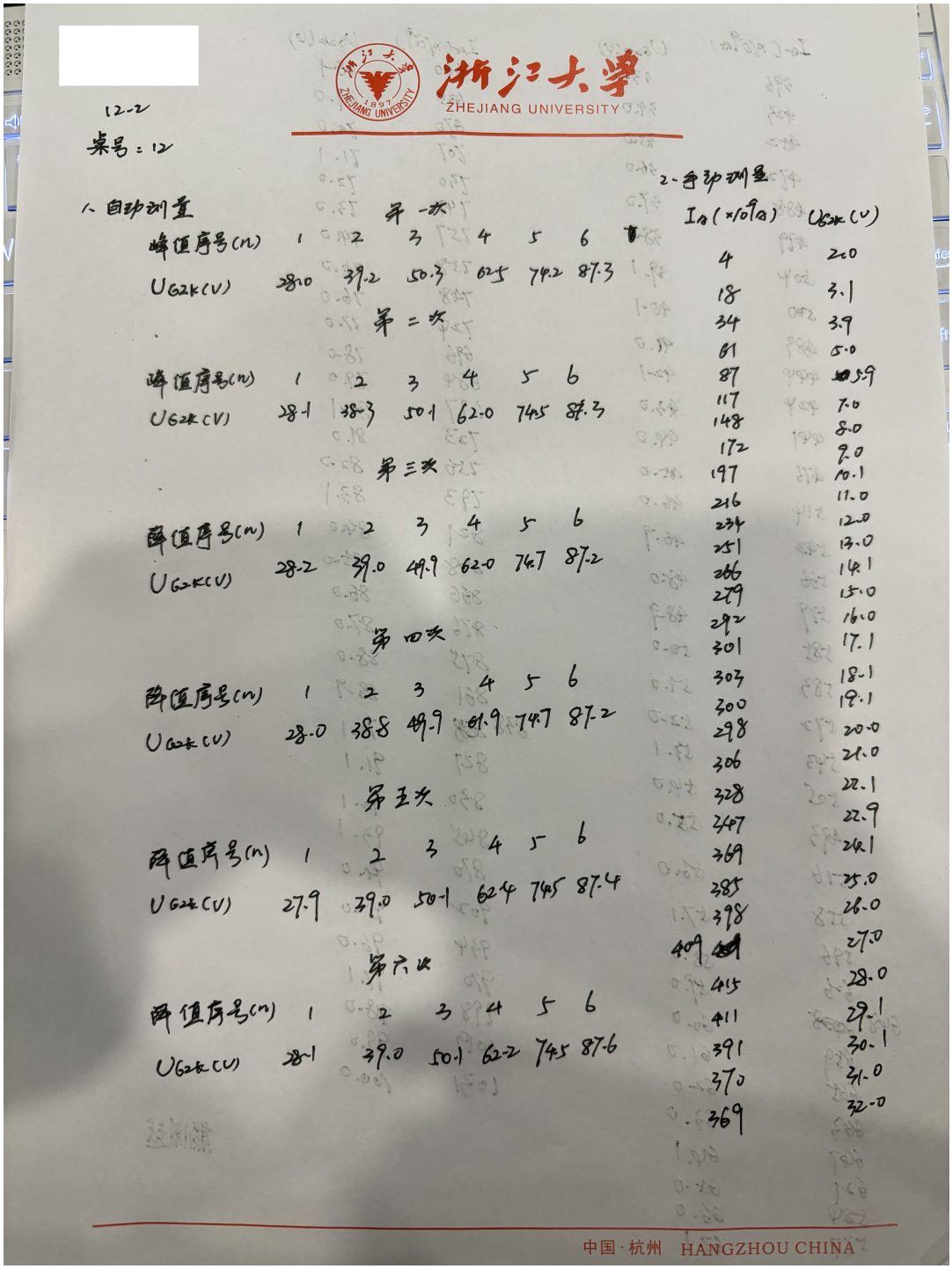


图 3: 原始数据记录 1

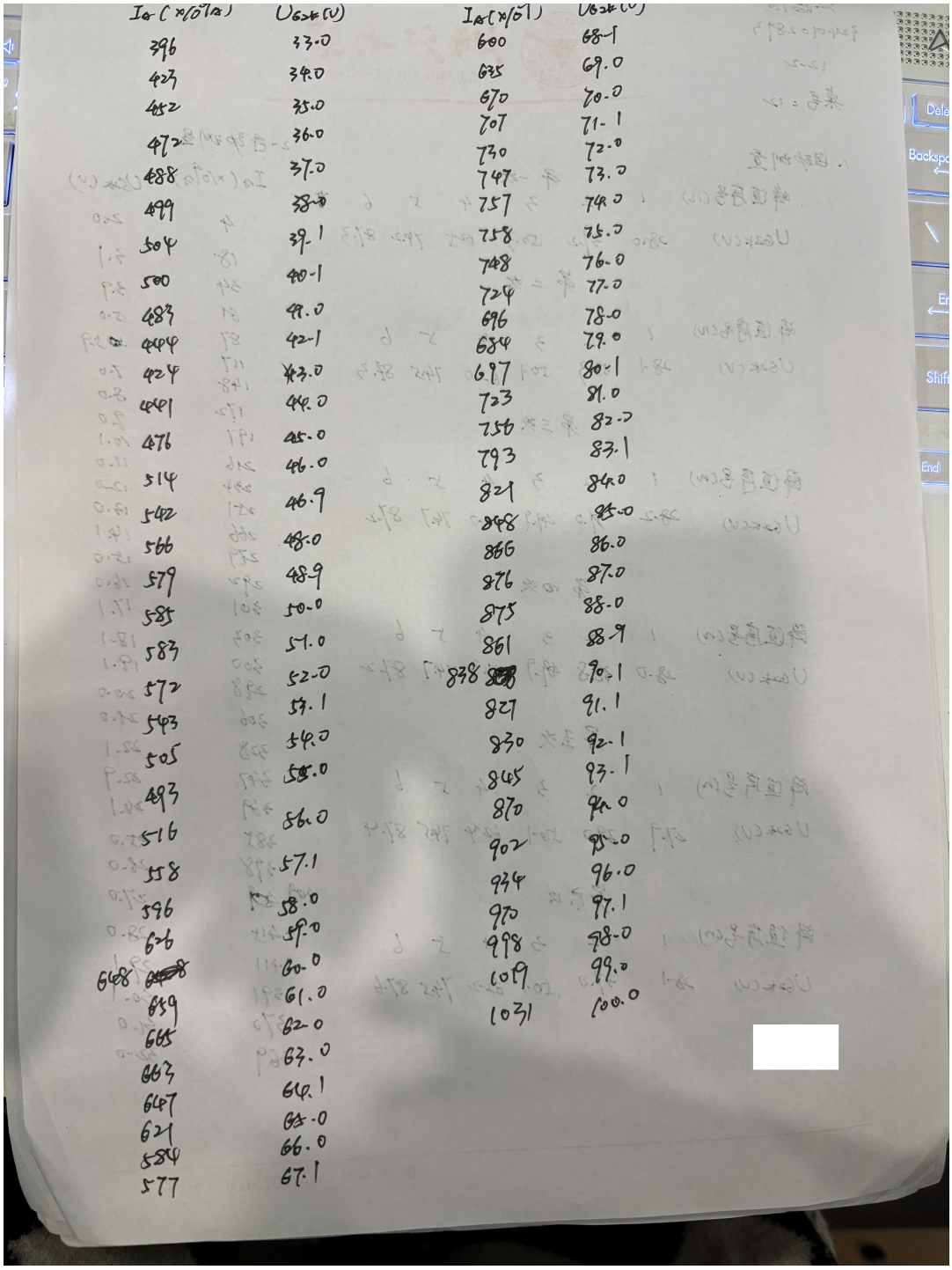


图 4: 原始数据记录 2

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。）本次实验共进行两部分测量。第一部分测量了 6 组不同梯度的峰值电压，数据记录如表 1所示；第二部分测量了完整的 $I_A - U_{G2K}$ 特性曲线，数据记录如表 2所示。

表 1: 氩原子第一激发电势测量数据（峰值电压）

测量次数	峰值电压 U_{G2K} (V)					
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
1	28.0	39.2	50.3	62.5	74.2	87.3
2	28.1	38.3	50.1	62.0	74.5	87.3
3	28.2	39.0	49.9	62.0	74.7	87.2
4	28.0	38.8	49.9	61.9	74.7	87.2
5	27.9	39.0	50.1	62.4	74.5	87.4
6	28.1	39.0	50.1	62.2	74.5	87.6

表 2: $I_A - U_{G2K}$ 特性曲线测量原始数据

U_{G2K} (V)	I_A (读数)	U_{G2K} (V)	I_A (读数)	U_{G2K} (V)	I_A (读数)
2.0	4	35.0	452	68.1	600
3.1	18	36.0	472	69.0	635
3.9	34	37.0	488	70.0	670
5.0	61	38.0	499	71.1	707
5.9	87	39.1	504	72.0	730
7.0	117	40.1	500	73.0	747
8.0	148	41.0	483	74.0	757
9.0	172	42.1	444	75.0	758
10.1	197	43.0	424	76.0	748
11.0	216	44.0	441	77.0	724
12.0	234	45.0	476	78.0	696
13.0	251	46.0	514	79.0	684
14.1	266	46.9	542	80.1	697
15.0	279	48.0	566	81.0	723
16.0	292	48.9	579	82.0	756
17.1	301	50.0	585	83.1	793
18.1	303	51.0	583	84.0	821
19.1	300	52.0	572	85.0	848
20.0	298	53.1	543	86.0	866
21.0	306	54.0	505	87.0	876
22.1	328	55.0	493	88.0	875
22.9	347	56.0	516	88.9	861
24.1	369	57.1	558	90.1	838
25.0	385	58.0	596	91.1	827
26.0	398	59.0	626	92.1	830
27.0	409	60.0	648	93.1	845
28.0	415	61.0	659	94.0	870
29.1	411	62.0	665	95.0	902
30.1	391	63.0	663	96.0	934
31.0	370	64.1	647	97.1	970
32.0	369	65.0	621	98.0	998
33.0	396	66.0	584	99.0	1019
34.0	423	67.1	577	100.0	1031

(1) 1. 第一激发电势的逐差法计算

利用逐差法处理表 1中的数据。对于具有 $2n$ 个数据点的等间距测量序列，为充分利用数据并减小误差，采用将数据分为前后两组进行逐差的方法。本实验中测量了 $n = 1 \sim 6$ 共 6 个峰值电压。根据逐差法原理，将数据分为 U_1, U_2, U_3 和 U_4, U_5, U_6 两组。由于相邻峰值之间的电压差对应一个第一激发电势 U_0，则 $U_{i+3} - U_i \approx 3U_0$。

单次测量的计算公式为：

$$U_0 = \frac{(U_4 - U_1) + (U_5 - U_2) + (U_6 - U_3)}{3 \times 3} = \frac{1}{9}\sum_{k=1}^{3}(U_{k+3} - U_k) \tag{2}$$

根据表 1中的 6 次测量数据，分别计算每一次的 U_0 值，结果如表 3所示。

表 3: 逐差法计算第一激发电势 U_0 结果表

测量次数	$U_4 - U_1$ (V)	$U_5 - U_2$ (V)	$U_6 - U_3$ (V)	$\sum \Delta U$ (V)	计算值 $U_{0,i}$ (V)
1	34.5	35.0	37.0	106.5	11.83
2	33.9	36.2	37.2	107.3	11.92
3	33.8	35.7	37.3	106.8	11.87
4	33.9	35.9	37.3	107.1	11.90
5	34.5	35.5	37.3	107.3	11.92
6	34.1	35.5	37.5	107.1	11.90
				平均值 $\bar{U}_0 =$	**11.89**

计算 6 次测量的平均值得：

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} U_{0,i} = 11.89 \text{ V} \tag{3}$$

(2) 2. 实验曲线拟合

利用 Python 程序对表 2 中的测量数据进行数值拟合，绘制出的 $I_A - U_{G2K}$ 特性曲线如图 5 所示。

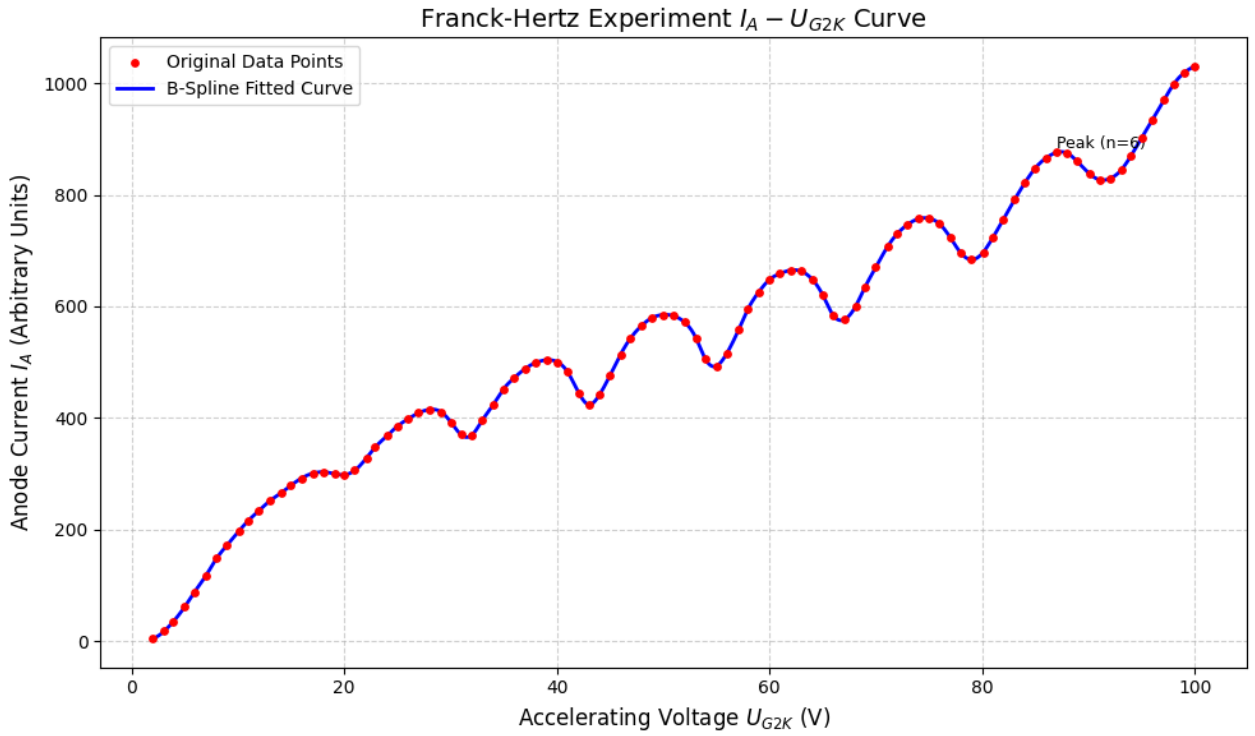


图 5: $I_A - U_{G2K}$ 实验特性拟合曲线

(3) 3. 接触电势差的计算

根据表 2 的 I-U 扫描数据，提取各个电流峰值对应的加速电压 $U_{p,k}$。由于弗兰克-赫兹管中阴极和栅极材料不同，存在接触电势差 U_c。理论上第 k 个峰值电压满足关系式：

$$U_{p,k} = k \cdot U_0 + U_c \implies U_c = U_{p,k} - k \cdot \bar{U}_0 \tag{4}$$

式中 $\bar{U}_0 = 11.89$ V。根据表 2 数据，可以识别出 7 个明显的峰值点（其中 $k = 1$ 为第一个物理峰，表 1 中的 $n = 1$ 对应物理上的 $k = 2$）。计算结果如下：

- $k = 1$: $U_{p,1} \approx 18.1$ V, $U_c = 18.1 - 11.89 = 6.21$ V
- $k = 2$: $U_{p,2} \approx 28.0$ V, $U_c = 28.0 - 23.78 = 4.22$ V
- $k = 3$: $U_{p,3} \approx 39.1$ V, $U_c = 39.1 - 35.67 = 3.43$ V
- $k = 4$: $U_{p,4} \approx 50.0$ V, $U_c = 50.0 - 47.56 = 2.44$ V
- $k = 5$: $U_{p,5} \approx 62.0$ V, $U_c = 62.0 - 59.45 = 2.55$ V
- $k = 6$: $U_{p,6} \approx 75.0$ V, $U_c = 75.0 - 71.34 = 3.66$ V
- $k = 7$: $U_{p,7} \approx 87.0$ V, $U_c = 87.0 - 83.23 = 3.77$ V

计算上述 7 个结果的平均值，得到本实验条件下的接触电势差：

$$\bar{U}_c = \frac{6.21 + 4.22 + 3.43 + 2.44 + 2.55 + 3.66 + 3.77}{7} \approx 3.75 \text{ V} \tag{5}$$

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。）

本次实验主要通过重复测量来分析统计误差。根据表 3中 6 次测量的 $U_{0,i}$ 值，采用贝塞尔公式计算样本标准偏差 s：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(U_{0,i} - \bar{U}_0)^2}{6-1}} \approx 0.034 \text{ V} \tag{6}$$

由此得到测量结果的 A 类不确定度 u_A：

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{6}} = \frac{0.034}{\sqrt{6}} \approx 0.014 \text{ V} \tag{7}$$

最终结果表达式：氩原子的第一激发电势为：

$$U_0 = \bar{U}_0 \pm u_A = (11.890 \pm 0.014) \text{ V} \tag{8}$$

相对不确定度为：

$$E_r = \frac{u_A}{\bar{U}_0} \times 100\% = \frac{0.014}{11.89} \times 100\% \approx 0.12\% \tag{9}$$

本实验测得氩原子的第一激发电势为 11.89 V，与公认的标准值（11.61 V）相比，相对误差约为 2.4%，结果在合理误差范围内，符合实验预期。导致误差的主要原因包括：金属电极功函数的差异导致的**接触电势差**使曲线整体偏移；**电子能量分布的统计性**及**氩原子亚稳态能级**的影响导致峰谷展宽；手动测量时加速电压 U_{G2K} 的**调节步长**（0.5 V）限制了峰值的精确定位；此外，**仪器参数**（如灯丝电压、拒斥电压）的优化程度、管内**气体纯度**以及微电流测量中的**背景噪声**等因素也会对测量精度产生影响。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验通过测量弗兰克-赫兹管的 $I_A - U_{G2K}$ 特性曲线，清晰观测到了板极电流随加速电压变化的周期性起伏现象。实验测得氩原子的第一激发电势为 11.89 V，且峰值间距基本恒定，同时也确认了约 3.75 V 接触电势差的存在。该结果直观且有力地验证了玻尔原子能级理论及能量量子化的物理本质。

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。）

1. 第一激发电位的物理意义是什么

第一激发电位 U_0 在物理上代表了原子从基态跃迁到第一激发态所需的最小能量对应的电势差。根据玻尔原子理论，该能量 $E = eU_0$。通过测量这一电位，可以直接证实原子内部能级结构是离散的（量子化的），而非连续的。在弗兰克-赫兹实验曲线中，它对应着相邻两个电流峰（或谷）之间的电压差，宏观上反映了电子与原子发生非弹性碰撞时损失的能量量子。

2. 温度对 FH 管的 U-I 曲线有什么影响

温度对弗兰克-赫兹管 $I_A - U_{G2K}$ 曲线的影响主要体现在以下两个方面：

(1) **阴极温度（由灯丝电压控制）**：这是最直接的影响因素。阴极温度决定了热电子的发射密度。

- **电流幅度**：温度越高，单位时间内发射的电子数越多，板极电流 I_A 的整体幅度会显著增大。

- **分辨率（峰谷清晰度）**：温度过高会导致发射电子的初动能分布变宽（热运动加剧）。这意味着参与碰撞的电子能量一致性变差，导致实验曲线中的峰值变宽、谷值变浅，峰谷起伏的对比度（反差）降低，分辨率下降。

(2) **管内环境温度：**

- 对于**充汞**的 FH 管，环境温度决定了管内的饱和蒸气压和平均自由程，温度必须严格控制在特定范围内才能观测到现象。
- 对于本实验的**充氩** FH 管，气体密度受温度影响较小，但过高的环境温度可能会增加系统的热噪声或漏电流，微弱影响曲线的基线。

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