

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉	学号：	2344016
日期：	2024/5/1	教师签名：	

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

【实验报告注意事项】

- (1) 实验报告由三部分组成：
- (1) 预习报告：（提前一周）认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（第一循环实验已由教师提供模板，可以打印）。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。

(2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（**用铅笔记录的被认为无效**）。**保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。**（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。

(3) 分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。
- 实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。
- (2) 每次完成实验后的一周内交**实验报告**（特殊情况不能超过两周）。
- (3) 实验报告注意事项
- i. 连线时务必注意，接错线路容易毁坏 F-H 管。

ii. 连线时， V_{G2K} 加速电压端接高压，使用过程中请勿触碰接线端。

目录

1	CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 预习报告	3
1.1	实验目的	3
1.2	仪器用具	3
1.3	原理概述	3
1.4	实验前思考题	4
2	CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 实验记录	7
2.1	实验内容和步骤	7
2.1.1	实验一 选择合适电流量程，设置氩管工作电压	7
2.1.2	实验二 分析灯丝电压对 $I_P-V_{G_2K}K$ 关系曲线的影响	7
2.1.3	实验三 氩原子第一激发电位测量	8
2.2	实验数据记录	8
2.3	实验过程中遇到的问题记录	8
3	CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 分析与讨论	11
3.1	实验数据分析	11
3.1.1	实验一 选择合适电流量程，设置氩管工作电压	11
3.1.2	实验二 分析灯丝电压对 $I_P-V_{G_2K}K$ 关系曲线的影响	11
3.1.3	实验三 氩原子第一激发电位测量	12

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 预习报告

1.1 实验目的

- (1) 从实验了解原子定态能级（量子化），更好掌握量子力学的基础知识。
- (2) 训练建立微观物理过程与宏观物理量之间关系的能力。
- (3)（选）学习分解多因素，研究独立因素影响实验现象的规律。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	FH-Ar 实验管	1	具体见实验管上说明
2	可编程直流稳压电源	1	GWINSTEK GPP-4323 4 通道独立输出：CH1、CH2: 0 32V/0 3A；CH3: 0 5V/0 1A CH4: 0 15V/ 0 1A 串联同步电压 0 64V 并联同步电流 0 6A；
3	多量程直流电源	1	GWINSTEK PFR-100M 电压 0-250V，电流 0-2A，额定输出功率 100W；
4	微电流放大器	1	BroLight BEM-5710 电流测量范围：10 ⁻⁸ 10 ⁻¹³ A，共分 6 档
5	NI myDAQ 数据采集器	1	提供模拟输入 (AI)、模拟输出 (AO)、数字输入和输出 (DIO)、音频、电源和数字万用表 (DMM) 功能

1.3 原理概述

夫兰克-赫兹实验是一种重要的实验，用于验证原子能级的量子化。实验基本原理如下：

- (1) 实验装置：实验装置由一个真空管组成，管内充有氩气。管内有热阴极和一个阴极网格，以及一个收集电子的阳极。阴极和阳极之间有两个栅极，分别称为第一栅极 G_1 和第二栅极 G_2 。
- (2) 在充氩气的夫兰克-赫兹管中，电子由热阴极发射出来。施加第一栅极 G_1 电压 V_{G_1K} 的作用就是将电子从阴极周围拉出，使之持续发射电子；施加第二栅极 G_2 电压 V_{G_2K} 使进入两栅极区间的电子加速，直到穿过 G_2 后，受板极 P 和第二栅极 G_2 之间的反向拒斥电压 V_{G_2P} 作用而减速；如果电子穿过 G_2 时的动能 $\geq eV_{G_2P}$ ，它就能冲过反向拒斥电场而到达板极形成板极电流 I_P ，被微电流计检出。

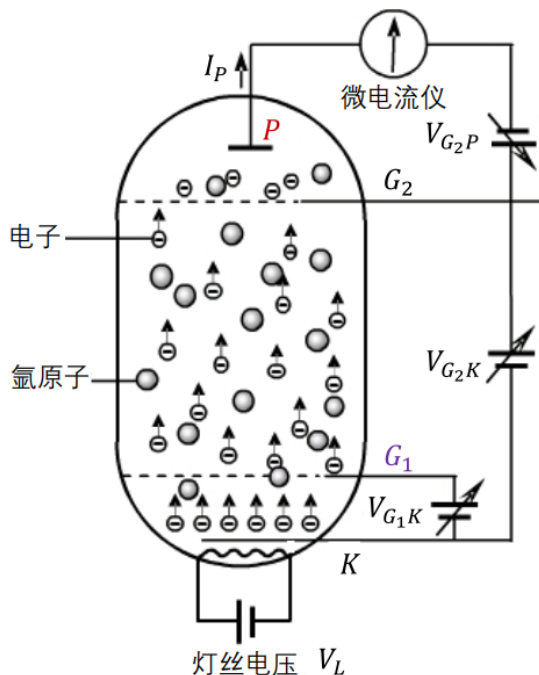


图 1: 夫兰克赫兹实验原理图

如果电子加速后与氩原子发生非弹性碰撞后损失的能量使氩原子激发的话，电子本身所剩余的能量就会小于 eV_{G_2P} ，不足以克服拒斥电场而被折回到第二栅极，通过微电流计的读数将显著减小。

- (3) 当第二栅极电压 V_{G_2K} 逐渐增大时，如果 $V_{G_2K} - V_{G_1K_{min}}$ 小于或等于 V_{G_2P} ，电子不能抵达板极；如果大于 V_{G_2P} ，板极电流 I_P 将随 V_{G_2K} 的增加而增大。当电子与氩原子发生非弹性碰撞，损失能量 $E_n - E_m$ 时，板极电流 I_P 将显著减小。随着 V_{G_2K} 进一步增加，电子继续加速，能量增加，使之可以克服反向拒斥电场而达到板极 P ，这时 I_P 又再次上升，直到 V_{G_2K} 达到氩原子第一激发电位的二倍以上时，电子因二次碰撞而又失去能量，导致 I_P 的第二次下降。当 V_{G_2K} 的增量达到氩原子第一激发电位整数倍时，电流 I_P 会开始下降，形成规则起伏变化的 $I_P \sim V_{G_2K}$ 曲线。
- (4) 综上所述，通过改变第二栅极的电压，可以观察到电流的周期性变化。这种变化是由于氩原子的能级是量子化的，只有当电子的能量足以激发氩原子的能级时，电子才能到达阳极。这种现象验证了原子能级的量子化理论。

这个实验提供了直接的实验证据，证明了玻尔提出的氢原子能级量子化理论的正确性，为量子力学的发展做出了重要贡献。

1.4 实验前思考题

思考题 1.1: 是否只要与原子发生碰撞的电子能量达到 $E_n - E_m$ ，原子就会发生能级跃迁？

当电子与原子发生碰撞时，如果电子的能量等于或大于原子能级之间的能量差 $E_n - E_m$ ，原子就会发生能级跃迁。这是因为原子吸收了足够的能量来促使一个电子从较低的能级跃迁到较高的能级。如果电子的能

量正好等于两个能级之间的差值，那么这部分能量将被用于跃迁，而电子的其余动能将以散射的形式保留。如果电子的能量大于所需的能级差，那么超出的部分将转化为电子的动能或可能导致原子电离。

思考题 1.2: 从阴极发射出来的，但又不能抵达板极的那些电子，最后跑到哪里去了？

从阴极发射出来但不能抵达板极的电子，通常会返回到阴极或者被其他部件（如栅极）捕获。在电子管中，如果电子没有足够的能量穿过加速区域或者被反向电场所阻挡，它们就会被重新吸引回阴极。这种现象是由于电子和晶格离子之间的静电力作用形成的势垒，使得电子不能轻易离开电极表面。为了克服这个势垒，需要施加一定的逸出功。如果电子没有获得足够的逸出功，它们就会回到阴极表面。

此外，电子也可能在真空管内部的其他部件上产生影响，例如在玻璃壁上产生磷光，或者在阴极和阳极之间的金属板上形成阴影，这些都是电子与物质相互作用的结果。

思考题 1.3: （选）依据电荷守恒定理，本实验是否可以不测板极电流而监测 G_2 极电流？为什么实验没有这样设计？（深入）

根据电荷守恒定律，理论上可以通过监测 G_2 极电流来间接测量板极电流 I_P ，因为在一个封闭系统中，电荷的总量是守恒的。这意味着，如果没有电荷从系统中逃逸，那么流入 G_2 极的电流应该等于流出板极的电流。

然而，实验通常没有这样设计，原因可能包括：

- (1) 测量准确性：直接测量板极电流 I_P 可能比监测 G_2 极电流更准确，因为板极电流直接反映了到达板极的电子数量。
- (2) 实验简便性：直接测量板极电流的实验设置可能更简单，更易于实施和解释。
- (3) 电子损失：在实际的电子管中，可能会有电子在到达板极之前被其他部件捕获或者与管壁发生相互作用，这些因素可能导致 G_2 极电流与板极电流不完全相等。
- (4) 实验目的：弗兰克-赫兹实验的目的是观察电子与原子气体碰撞后的能量量子化现象，直接测量板极电流更直接地展示了这一现象。
- (5) 电子动态：在某些情况下，电子可能在 G_2 极和板极之间发生非弹性碰撞，这会改变电子的能量分布，从而影响板极电流，但不一定影响 G_2 极电流。

综上所述，虽然从理论上讲，监测 G_2 极电流是可行的，但直接测量板极电流 I_P 在实验操作和数据解释上可能更为直接和准确。

思考题 1.4: 实验测量为散点值，有什么方法可以精确得到 I_P V_{G_2K} 曲线的峰值和谷值？

- (1) 峰值检测算法：可以使用自动多尺度峰值检测算法（AMPD），它适用于周期性或准周期性信号的峰值查找，具有良好的抗噪能力和自适应性。这种算法通过多尺度滑动窗口比较寻找局部最大值。
- (2) Matlab 的 findpeaks 函数：在 Matlab 中，可以利用 findpeaks 函数来查找波峰和波谷。这个函数可以设置最小峰高和峰间最小距离等参数来过滤噪声和非目标极值。

- (3) 数据平滑和插值：对散点数据进行平滑处理，如使用移动平均或高斯滤波，然后应用插值方法，如样条插值，以获得更平滑的曲线，从而更容易识别峰值和谷值。
- (4) 图形化方法：在某些情况下，可以通过绘制数据点并直观地检查曲线来确定峰值和谷值。这种方法虽然不是最精确的，但可以作为初步分析。

思考题 1.5：假设 F-H 管内没有充装任何原子气体， I_P 随 V_{G_2K} 是怎么变化的？

如果 F-H 管内没有充装任何原子气体，那么电子在从阴极到板极的过程中不会遇到原子而发生碰撞。这意味着电子不会因为非弹性碰撞而失去能量，因此电子能够保持其加速过程中获得的动能。在这种情况下，板极电流 I_P 会随着加速电压 V_{G_2K} 的增加而单调增加，不会出现因碰撞导致的电流峰值和谷值。

思考题 1.6：（选，复习分子运动理论）求在电子与氩原子发生非弹性碰撞时，电子的速度分布和氩原子的速度分布？

思考题 1.7：（选，复习分子运动理论）推导证明，在发生弹性碰撞后，电子损失的能量与碰撞前自身的动能相比可忽略不计。

思考题 1.8：（选）当年没有现在这么精密的微电流放大器，如果是你，你会怎么测量板极电流 I_P ？

在没有精密微电流放大器的情况下，可以采用以下几种方法来测量板极电流 I_P ：

- (1) 伽利略电流计：这是一种高灵敏度的电流计，它利用电流通过线圈产生的磁场来转动一个指针，从而测量电流。
- (2) 电桥法：使用惠斯通电桥或其他类型的电桥来测量电流。通过调整电桥的平衡，可以间接测量通过电路的电流。
- (3) 电荷积累法：通过一个已知电容的电容器积累电荷，然后测量电容器两端的电压变化来计算电流。

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉	学号：	22344016
室温：	26℃	实验地点：	A509
学生签名：		评分：	
实验时间：	2024/5/9	教师签名：	

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

实验记录

2.1 实验内容和步骤

2.1.1 实验一 选择合适电流量程，设置氩管工作电压

根据实验设备上的推荐参数设置，设置 $V_{G_1K} = 2V$ ， $V_{G_2P} = 8V$ ， $V_{G_2K} = 0 \sim 82V$ 。
按照实验讲义正确接线。

2.1.2 实验二 分析灯丝电压对 I_P - V_{G_2K} 关系曲线的影响

(1) 按照厂家推荐参数，设置灯丝电压 $V_L = 1.9V$ ，设置电压步长为 1V，得到图 2：

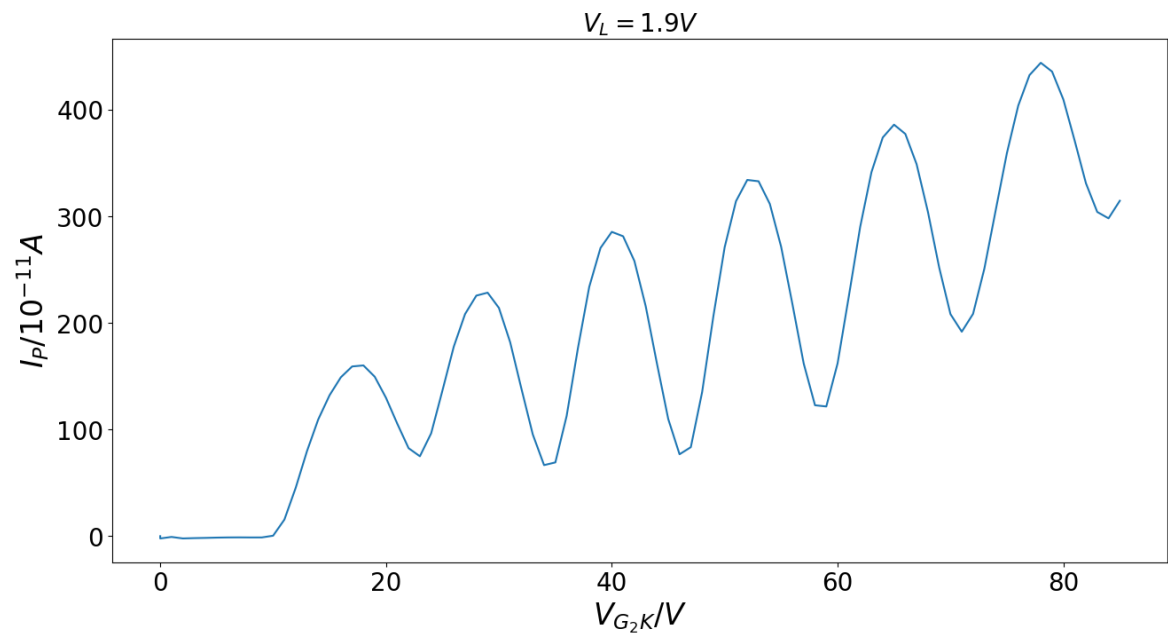


图 2: $V_L = 1.9V$ 时的 I_P - V_{G_2K} 关系曲线

(2) 灯丝电压大于厂家推荐参数时，设置 $V_L = 2.3V$ ，设置电压步长为 1V，得到图 3：

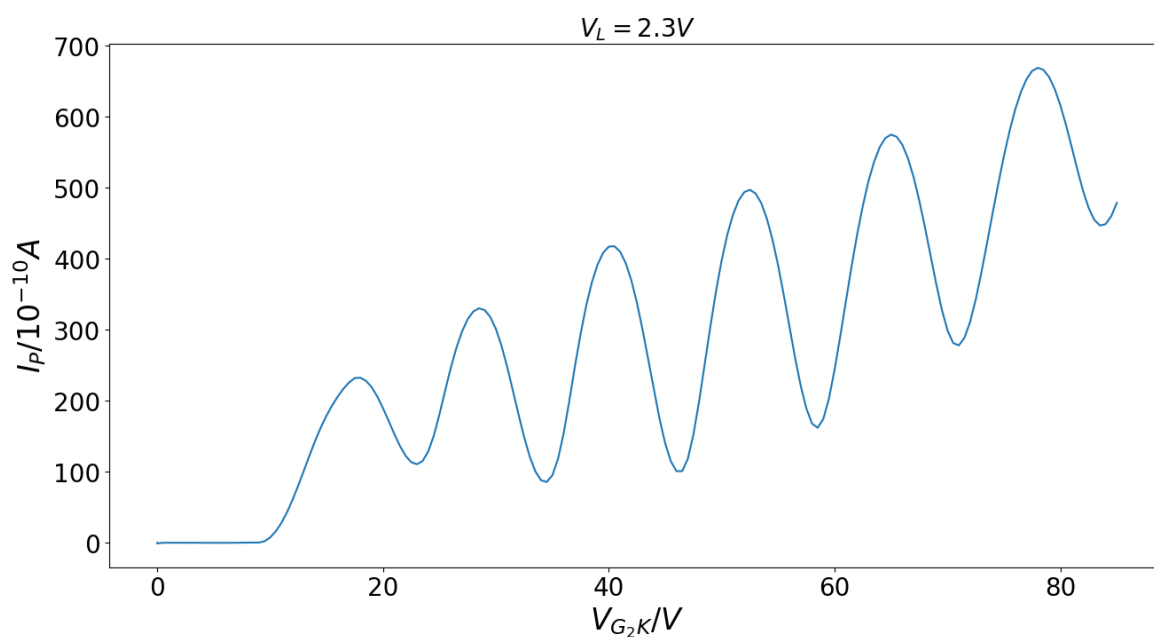


图 3: $V_L = 2.3V$ 时的 I_P - V_{G_2K} 关系曲线

(3) 灯丝电压小于厂家推荐参数时，设置 $V_L = 1.5V$ ，设置电压步长为 $1V$ ，得到图 4：

2.1.3 实验三 氩原子第一激发电位测量

按照出厂参数手动逐点测量 I_P - V_{G_2K} 关系曲线，测量过程中从小到大单向调节，不要在测量过程中反复；记录完最后一组数据后，立即将 V_{G_2K} 归零，保护氩管。

得到实验图像为图 5：

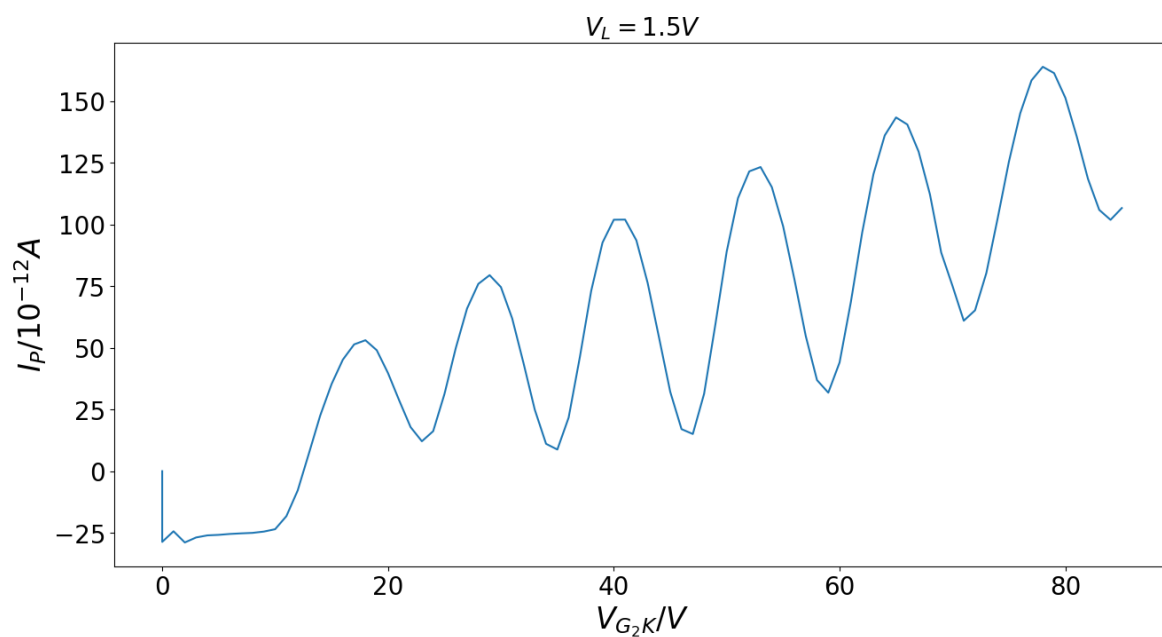
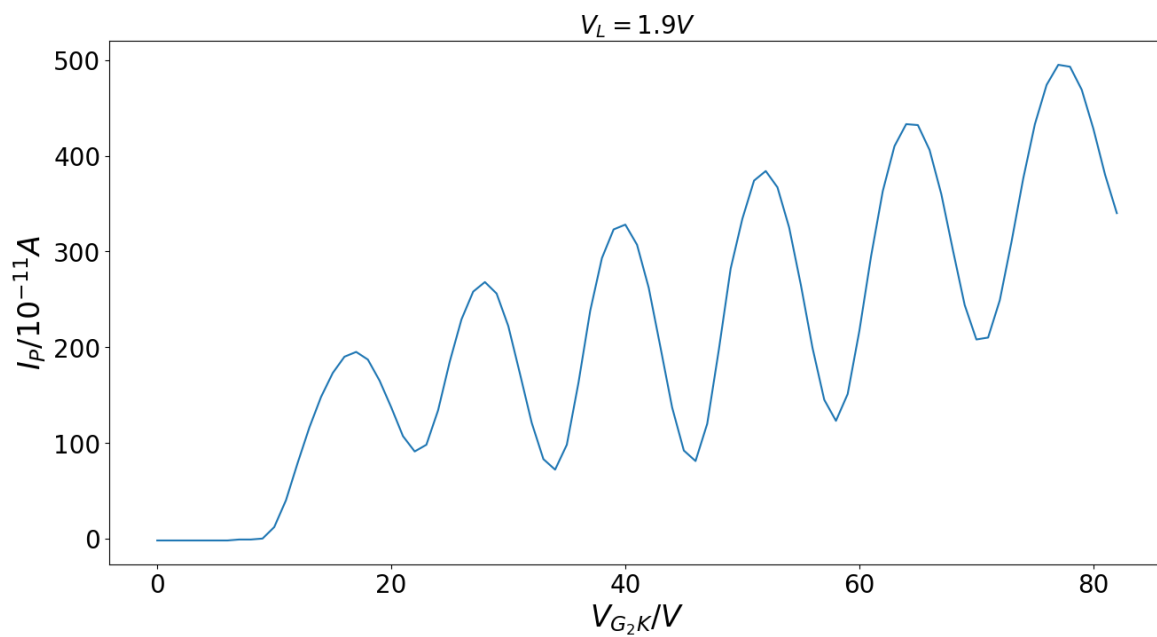
由于测得的实际是一个电流负值，所以作图时手动添加了负号。

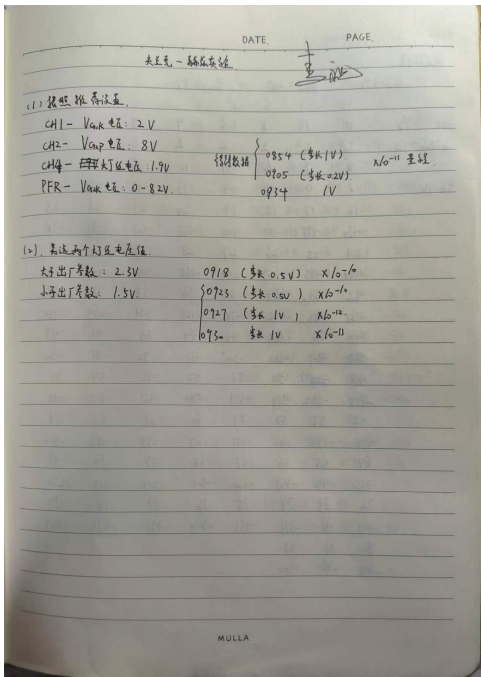
2.2 实验数据记录

见图 6

2.3 实验过程中遇到的问题记录

- (1) 注意正确接线，错误接线极易损坏实验设备。
- (2) 注意记录微电流计的量程，软件自动记录的是微电流计的显示数值，实际电流值还需要乘上量程。
- (3) 手动测量时，电压的调节应保证单向，不可往复。

图 4: $V_L = 1.5V$ 时手动调节的 I_P - V_{G2K} 关系曲线图 5: $V_L = 1.9V$ 时的 I_P - V_{G2K} 关系曲线



(a) 原始数据 1

夫兰克-赫兹实验

$V_{\text{acc}} = 6.7V$ $V_{\text{acc}} = 2V$ $V_{\text{amp}} = 8V$

V_{acc} / V	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_p \times 10^{-10} / A$	2	2	2	2	2	2	2	1
数据 1V	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-12	-40	-79	-116	-148	-173	
16	17	18	19	20	21	22	23	
-170	-175	-181	-165	-151	-167	-91	-78	
24	25	26	27	28	29	30	31	
-159	-185	-229	-258	-268	-256	-222	-172	
32	33	34	35	36	37	38	39	
-121	-83	-72	-78	-163	-238	-293	-323	
40	41	42	43	44	45	46	47	
-328	-307	-262	-200	-137	-72	-81	-120	
48	49	50	51	52	53	54	55	
-198	-282	-314	-374	-384	-367	-325	-245	
56	57	58	59	60	61	62	63	
-193	-145	-123	-151	-217	-293	-363	-410	
64	65	66	67	68	69	70	71	
-433	-432	-406	-360	-301	-244	-208	-210	
72	73	74	75	76	77	78	79	
-247	-310	-376	-433	-474	-495	-473	-467	
80	81	82						
-428	-380	-340						

(b) 原始数据 2

图 6: 原始数据

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉	学号：	22344016
日期：	2024/5/12	评分：	

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

分析与讨论

3.1 实验数据分析

3.1.1 实验一 选择合适电流量程，设置氩管工作电压

- 在设置 F-H 管电极电压以观测氩原子的第一激发时，需要考虑以下几个关键参数：
- (1) 灯丝电压 V_L : 控制热电子的发射量。需要调整以确保有足够的电子参与碰撞过程。
 - (2) 第一栅极电压 V_{G_1K} : 用于消除热电子在阴极附近的堆积，提高热发射效率。
 - (3) 加速电压 V_{G_2K} : 形成加速电场，使热电子获得动能。这个电压需要逐渐增加，以便电子能量达到氩原子第一激发所需的能量。
 - (4) 拒斥电压 V_{G_2P} : 形成斥电场，只有能量大于 $V_{G_2P}eV$ 的电子才能到达板极形成板极电流。

3.1.2 实验二 分析灯丝电压对 I_P - V_{G_2K} 关系曲线的影响

- 将三个不同的灯丝电压所测得的数据，绘制在一张图上，如图 7
- 可以看到在曲线最开始的部分，电流基本趋于零（实际上甚至是反电流），这是因为电子需要克服 V_{G_2P} ，只有能量大于这个电压的电子才能到达板极形成板极电流。
- 从图中可以看出，低于厂家推荐电压的 $V_L = 1.5V$ 所得到的曲线，电流要远小于其他两个电压值。高于厂家推荐电压的 $V_L = 2.3V$ 所得到的曲线，电流明显增加。因为灯丝电压设置过低时，无法产生足够的电子形成电流；电压设置过高，电子又会生成太多导致影响实验测量。
- 当电子与氩原子发生非弹性碰撞时，电子会将其能量传递给氩原子，使氩原子从基态跃迁到激发态。这个过程中，电子失去了部分或全部能量，因此无法克服之后的拒斥电场，导致板极电流 I_P 出现下降，形成波谷。但是，这个波谷点的电流不会降为零，原因如下：
- (1) 非弹性碰撞的概率：并非所有电子都会与氩原子发生非弹性碰撞。有一部分电子在加速电压 V_{G_2K} 的作用下，能够避免碰撞，直接到达板极。因此，即使在波谷点，也仍然有一定数量的电子贡献了电流。
 - (2) 电子能量分布：即使电子与氩原子发生了非弹性碰撞，它们失去的能量也不是固定的。一些电子可能只是失去了部分能量，仍然有足够的能量克服拒斥电场到达板极。
 - (3) V_{G_2K} 的增大：随着加速电压 V_{G_2K} 的增大，即使电子发生了非弹性碰撞，它们在碰撞后仍然可能具有足够的剩余能量来克服拒斥电场。因此，随着 V_{G_2K} 的增大，波谷点的电流也会随之增大。

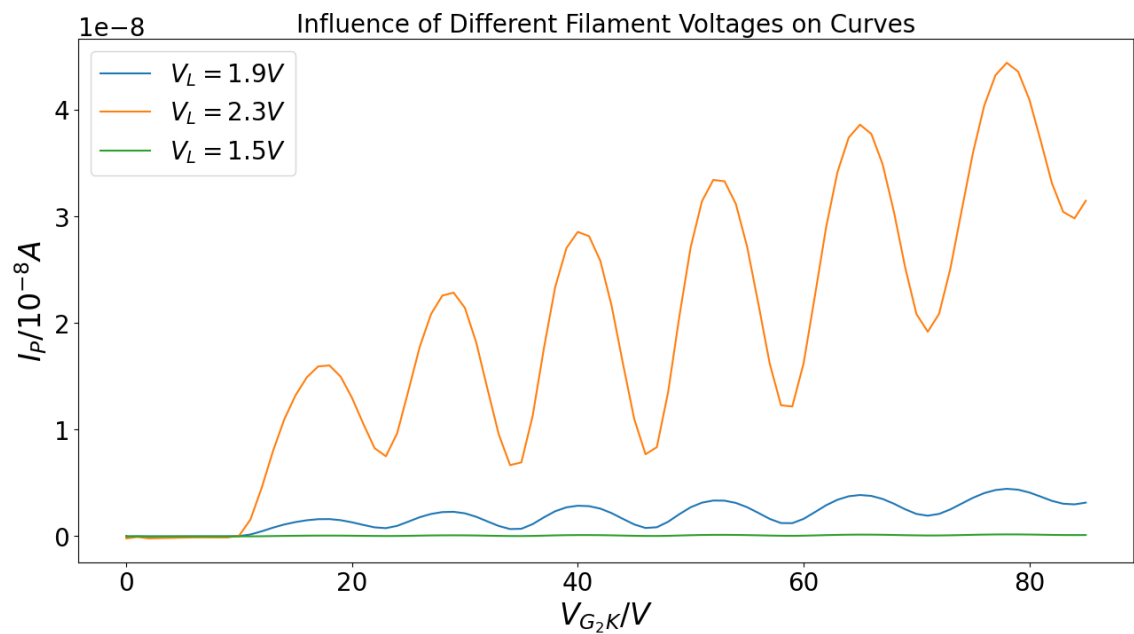


图 7: 不同灯丝电压的 $I_P \sim V_{G_2K}$ 关系曲线

峰值电压/V	18	29	40	52	65	78
谷值电压/V	23	34	46	59	71	

表 1: 峰值电压和谷值电压

这些因素共同作用，导致在 $I_P \sim V_{G_2K}$ 曲线上，波谷点的电流不会下降为零，且随着 V_{G_2K} 的增大而增大。

3.1.3 实验三 氩原子第一激发电位测量

对实验所的图像进行寻峰寻谷，得到的图像如图 8

得到峰值电压和谷值电压为表 1

使用逐差法计算平均间隔电压，将峰值电压间隔和谷值电压间隔同时考虑，计算过程如下：

$$\Delta \bar{V} = \frac{1}{2} \left(\frac{(52 - 18) + (65 - 29) + (78 - 40)}{3 \times 3} + \frac{(59 - 34) + (71 - 46)}{2 \times 2} \right) = 12.20V$$

计算标准差：

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\Delta V_i - \Delta \bar{V})^2} = 0.54V$$

查询资料得知，Ar 原子的第一激发电位为 11.6V，则计算相对误差为： $\eta = \frac{|12.2-11.6|}{11.6} = 5.17\%$ ，可以发现实验测量值偏大。

处于激发态的原子不稳定，退回基态时会发射光子。已知 Ar 原子的第一激发电位为 11.6V，则根据光电效应公式 $h\nu = \Delta E = 11.6eV$ ，可计算出这些光子的波长为 $\lambda = \frac{hc}{\nu} = 108.1nm$ ，这是紫外波段。

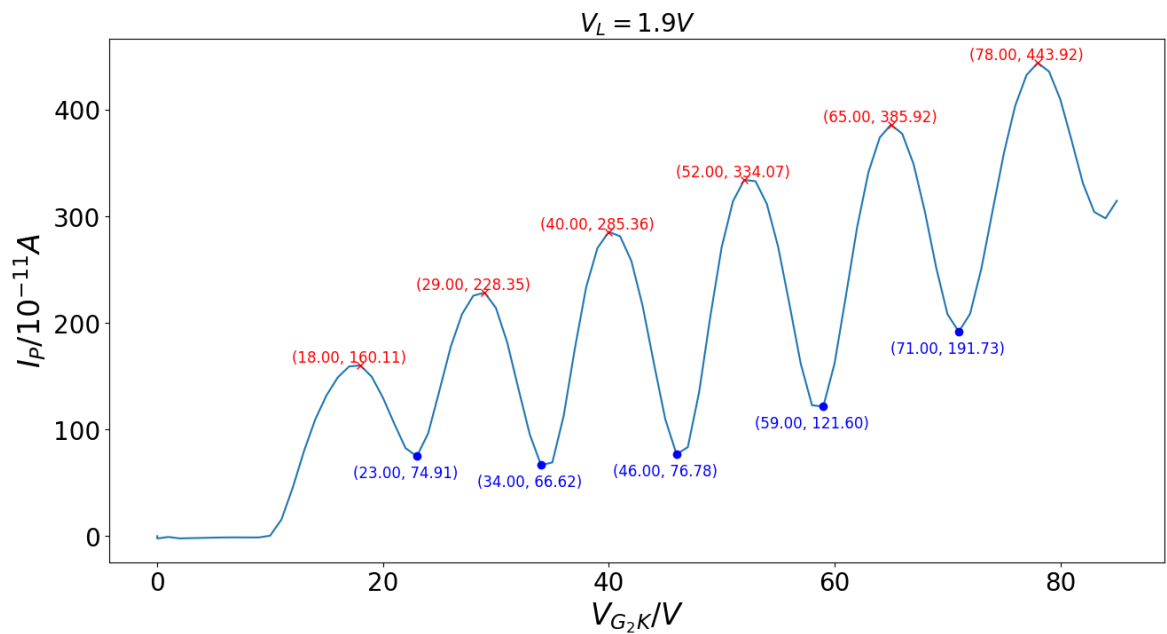


图 8: $V_L = 1.9$ 时 I_P - V_{G2K} 关系曲线寻峰寻谷

原子对电子的弹性散射会改变电子的运动方向，但不会改变电子的动能，因为原子的质量远远大于电子质量。而电子在电场中的加速不受弹性散射的影响，因为弹性散射不涉及能量的转移。对于所测量的电流，弹性散射会导致电子运动方向的随机化，但由于电子的动能保持不变，电子仍然能够到达检测器。因此，弹性散射不会直接导致电流的减少。然而，如果散射导致电子偏离了原本到达检测器的路径，那么这些被偏转的电子可能不会被检测器捕获，从而间接影响到电流的测量结果。