

## 实验 CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

### 【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。

### 【实验内容】

1. 用分立仪器和夫兰克-赫兹实验（氩）管搭建实验系统。（基础必做）
2. 测量氩原子的阳极电流与第二栅极加速电压关系曲线，计算第一激发电位。（基础必做）
3. 研究阴极温度、第一栅极电压等因素怎样影响板极电流、以及第一激发电位。（选，深入、研究型）
4. 参考夫兰克-赫兹实验氩管的（解剖）结构，设计实验优化用汞管测量汞原子第一激发电位精度。（选，提升、设计性实验）
5. 夫兰克-赫兹实验得到的氩原子第一激发电势能发光光谱验证吗？汞原子呢？要选哪个频段的光谱仪？（选，拓展）

### 【仪器用具】

表 1 CA2-1 实验仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
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：10-8~10-13A，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

### 【实验安全注意事项】

- 1、连线时务必注意，接错线路容易毁坏 F-H 管。

2、 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。

### 【原理概述】

通过光电效应实验，我们已认识到光的量子化。那么原子的量能是否也是量子化呢？我们如何通过实验证明或验证其量子化呢？

1911 年提出了原子的核模型结构后，玻尔在 1913 年发展了氢原子理论，提出氢原子能级量子化。1914 年，弗兰克(J. Frank)和赫兹(G. Hertz)利用低能电子碰撞原子，直观地证明了汞原子的量子化能级的存在，同时还得出汞原子第一激发态与基态间的能量差为  $4.9\text{eV}$ ，为玻尔理论提供了直接而独立的实验证据。这一卓有成效的实验使他们荣获 1925 年诺贝尔物理奖。

原子吸收一定频率的光子后，能从一个定态跃迁到另一个定态（详见原子吸收光谱实验）。能级的跃迁必须满足能量守恒：

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1)$$

式中  $h$  为普朗克常数， $\nu$  为辐射频率， $E_n$ 、 $E_m$  为原子的能级。

原子状态的改变、即原子能级的跃迁，也可以是原子与其它粒子发生碰撞而交换能量来实现。弗兰克—赫兹实验就是利用原子与电子发生碰撞来改变原子状态的，原子从电子获得能量 ( $E_n - E_m$ ) 的同时，电子也损失相等的能量；电子可以通过在电场中的加速重新获得这部分能量，其加速电压  $V = (E_n - E_m)/e$ ，即：

$$e\Delta V = E_n - E_m \quad (2)$$

若原子吸收由电子传递的能量  $e\Delta V$  从基态跃迁到第一激发态，则相应的  $\Delta V$  称为第一激发电位。弗兰克-赫兹实验原理如图 1 所示。在充氩气的弗兰克—赫兹管中，电子由热阴极发射出来，阴极带正电形成的吸引电子的电场，将电子拉回阴极，因此，热发射电子只能聚在阴极周围。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（思考：此时的电流  $I_P$  应该是正还是负的？）。管内空间电位分布通过施加电极电压控制（如图 2 所示）。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。

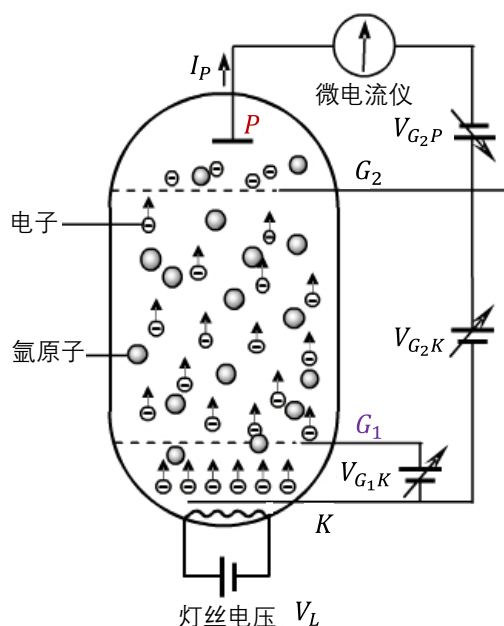


图1. 弗兰克赫兹实验原理图

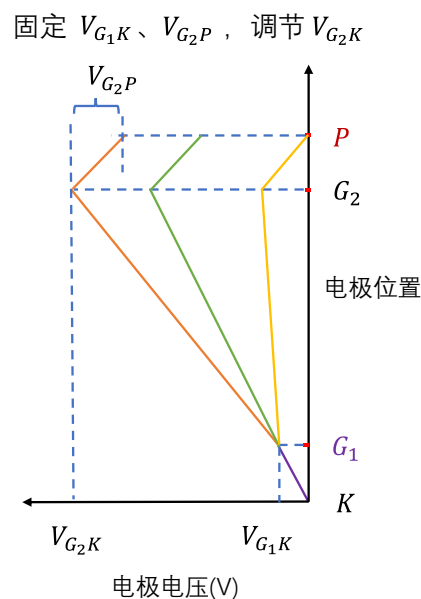


图2. F-H 管内空间电位分布

按定义，电流为单位时间内通过的电子数，与到达板极电子的密度 $\rho_e$ 和电子速度 $v_e$ 成正比（ $I_P = A\rho_e v_e$ ）。在非相对论极限，电子的动能与电子速度的平方成正比。为了通过 $I_P$ 更好地反映电子动能的变化，最好能控制电子密度基本不变。对于特定的阴极温度（对应特定的灯丝电压），存在一个最小的第一栅极电场（电压 $V_{G1K\_min}$ ，它与阴极的电子亲和势有关），它可将阴极发射的电子及时拉出，使之在后面的加速-碰撞过程中，无论第二栅极电压 $V_{G2K}$ 如何变化，进入两栅极之间的电子密度 $\rho_e$ 基本不变；但如果 $V_{G1K}$ 过大，它又会把更多的电子拉到 $G_1$ ，使进入加速区的电子密度下降（厂家给出了本实验管 $V_{G1K}$ 的建议范围如表 2 所示）。当 $V_{G2K}$ 逐渐加大时，如果 $V_{G2K} - V_{G1K\_min} \leq V_{G2P}$ ，电子不能抵达板极（对应于图 3 的  $a$  点）；当 $V_{G2K} - V_{G1K\_min} > V_{G2P}$ 时，板极电流 $I_P$ 将随 $V_{G2K}$ 的增加而增大（如图 3 的  $ab$  段）；当 $(V_{G2K} - V_{G1K\_min})e > E_n - E_m$ 时，电子与氩原子发生非弹性碰撞，电子损失的能量 $(E_n - E_m)$ ，电子即使穿过了 $G_2$ 也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极，则板极电流 $I_P$ 将显著减小（图 3 所示  $bc$  段）；随着 $V_{G2K}$ 进一步增加，电子继续加速，能量再次随之增加，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（ $cd$  段），直到 $V_{G2K}$ 二倍于氩原子的第一激发电位以上时，电子因二次碰撞而又失去能量，造成第二次 $I_P$ 的下降（ $de$  段）。以此类推当 $V_{G2K}$ 的增量达到氩原子第一激发电位整数倍时，微电流计检测出的电流都 $I_P$ 都会开始下降，形成规则起伏变化的 $I_P \sim V_{G2K}$  曲线。

具体可参考《基础物理实验（沈韩主编）》中第 11 章 311 页。

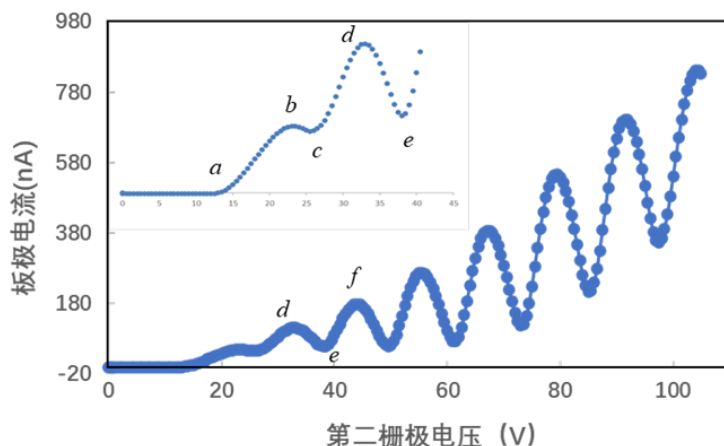


图 3 弗兰克-赫兹管  $-I_P \sim V_{G_2K}$  曲线（来自于氩管实验， $V_L 3.1V$ ,  $V_{G_1K} 2V$ ,  $V_{G_2P} 10V$ ）

（以下原理选看）上述分析电子加速-碰撞-再加速-再碰撞的过程，如果是对一维的电子加速-碰撞过程，那么预期看到的板极电流应该像三角波（缓升-陡降），这与我们看到了板极电流的峰-谷变化（见图 3）不符，考虑三维空间的碰撞和动量守恒定律的约束：弹性碰撞会改变电子的速度方向，而板极电流大小只取决于电子在加速电场方向的速度，因而需要更高的加速电压才能使电子的克服拒斥电压抵达板极。对某一电子的散射角  $\theta$  并不确定，设各散射方向电子密度存在分布  $\rho_e(\theta)$ ，则  $I_P = A\rho_e(\theta)v_e\cos\theta$  也存在一个分布而不会出现陡降。由于原子是均匀分布于 F-H 管内，电子与原子的碰撞自由程存在分布，那些自由程长的电子，从加速电场获得的能量会明显高于氩原子的第一激发能，使得板极电流不会降回零，贡献给谷底不为零的“本底”电流。另一方面，一些自由程更长的电子能量甚至可以高于氩原子的第一电离能（15.78eV），它们再与氩原子发生碰撞时就会使氩原子电离，电离的氩离子和电子（ $Ar^+ + e^-$ ）在加速电场下进一步获能、碰撞，使包括峰值、谷值、以及峰-谷差值在内的板极电流  $I_P$  不断加速上升，表现出类似“雪崩”效应。板极电流  $I_P$  受许多因素影响，是一个研究型实验的不错的研究对象，有兴趣的同学可以通过模拟和实验深入探讨。

从上述分析，我们还可以大致给出反向拒斥电压  $V_{G_2P}$  的限定范围：最好在第一激发势附近，其最大值不能大于原子的第一电离势，（本实验对氩原子定为 15eV）；因为高的  $V_{G_2P}$  要求更高能量的电子才能抵达板极，而这些能量更高的电子碰撞使原子电离，电离后的离子和电子使电荷密度发生明显的改变，电子与原子的碰撞不再是简单的原子激发造成的非弹性碰撞，甚至原子与离子之间的碰撞，电离所产生的电流主导板极电流，使物理过程及其分析变得复杂；另一方面，拒斥电压  $V_{G_2P}$  又不能小于原子第一激发势与电子“拉出电势”

之差  $\frac{E_n - E_m}{e} - V_{G_1K\_min}$ ，否则本底电流过高，不利于准确测量第一激发能。

### 【实验前思考题】

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？
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？
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）
4. 实验测量为散点值，有什么方法可以精确得到  $I_P \sim V_{G_2K}$  曲线的峰值和谷值？
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？
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？
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。
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（ $I_P$ ）？

### 【实验系统与操作】

1. 实验系统接线，如图 4 所示。

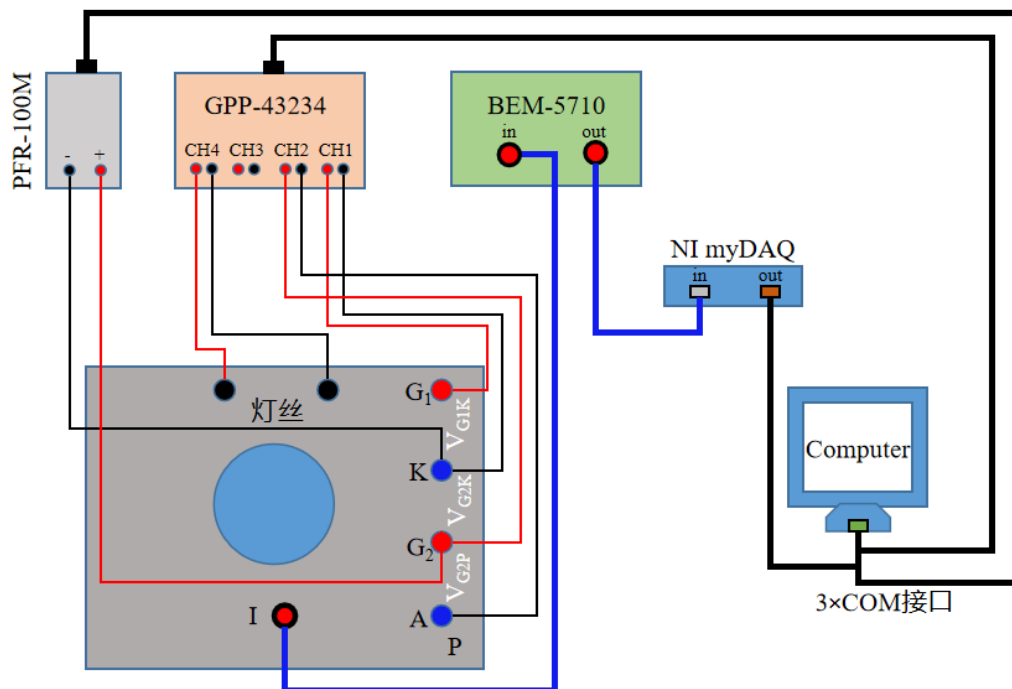


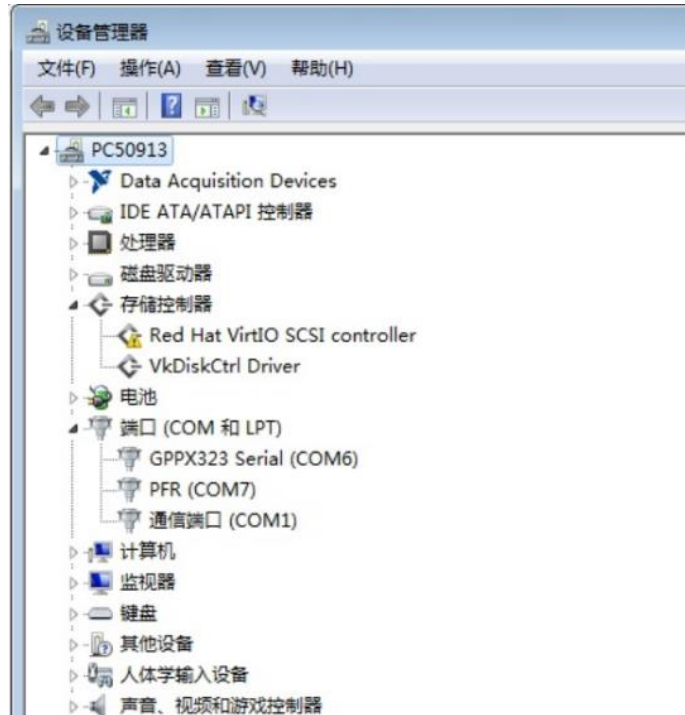
图 4 实验系统接线

F-H 管灯丝电流电压（连 CH4）、 $V_{G_1K}$  电压（连 CH1）、 $V_{G_2P}$  电压（连 CH2）， $G_2$ （连

仪器 GWINSTEK PFR +极), K (连仪器 GWINSTEK PFR -极)。

## 2. 选择正确 VISA 口:

连好电路打开 3 台仪器, 点击计算机右键->管理->设备管理器->端口, 如果出现 “GPPX323 Serial (COM#6), PFR(COM#7)” 表示仪器 GPP 对应端口 COM#6, 仪器 PFR 对应端口 COM#7。不同计算机端口号可能不同, 记录下来在 Labview 程序界面输入。



## 3. 实验程序主界面

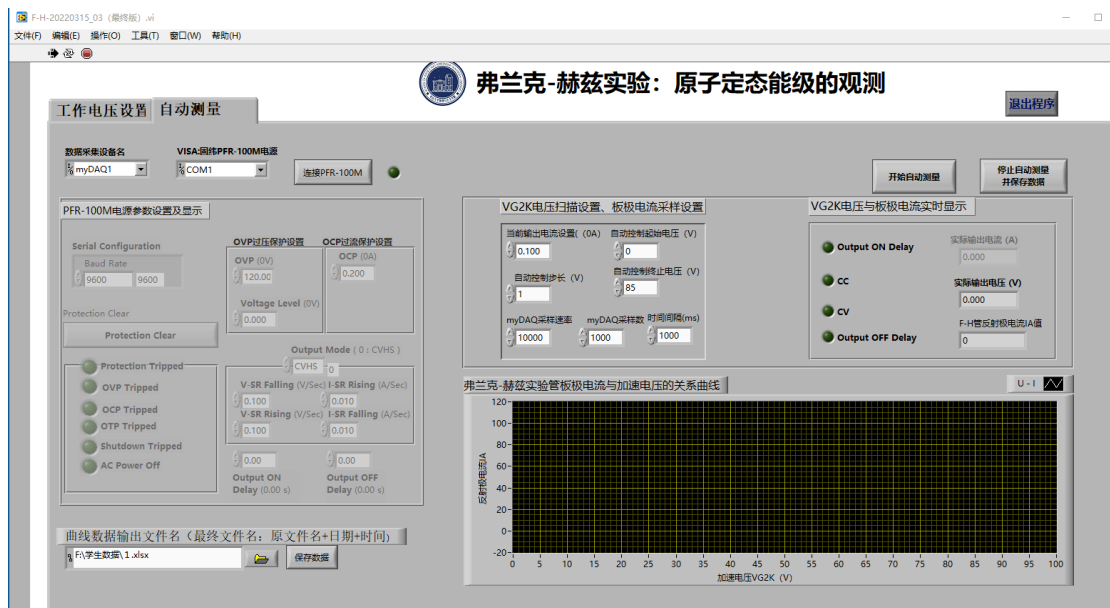


图 5 实验程序主界面



软件分为三个主菜单：工作电压设置、自动测量。

### 1) 工作电压设置值

F-H 管灯丝电流电压 (CH4)、 $V_{G_1K}$  电压 (CH1)、 $V_{G_2P}$  电压 (CH2)， $G_2$  连 PFR + 极， $K$  连 PFR + 极。具体参数设备见 FH-Ar 实验管上参数说明。



图 6 厂家提供的弗兰克-赫兹管参数

工作电压设置界面如图 7 所示。



图 7 工作电压设置界面

- (1) 在电源面板上设置 USB 口采样率为 9600 (默认值)：按下 “system” 按键，选择 “interface” 菜单 → “USB”，选中 “9600” 值，Return 键返回。
- (2) 分别选择对应通道，参照表 2 推荐填入相关设置参数值：当前电压设置值 Voltage Level(V)，电流设置值 Current Level(A)。过压电压值 OVP (V)；过流值 OCP(A)可使用默认值，如报错，按下表设置。
- (3) 灯丝电压 (CH4)， $V_{G_1K}$  电压 (CH1)， $V_{G_2P}$  电压 (CH2) 参见 F-H 管上的参数，每

台仪器最优值都不同。在实验过程中改变设置电压参数时，注意电压不能过大。

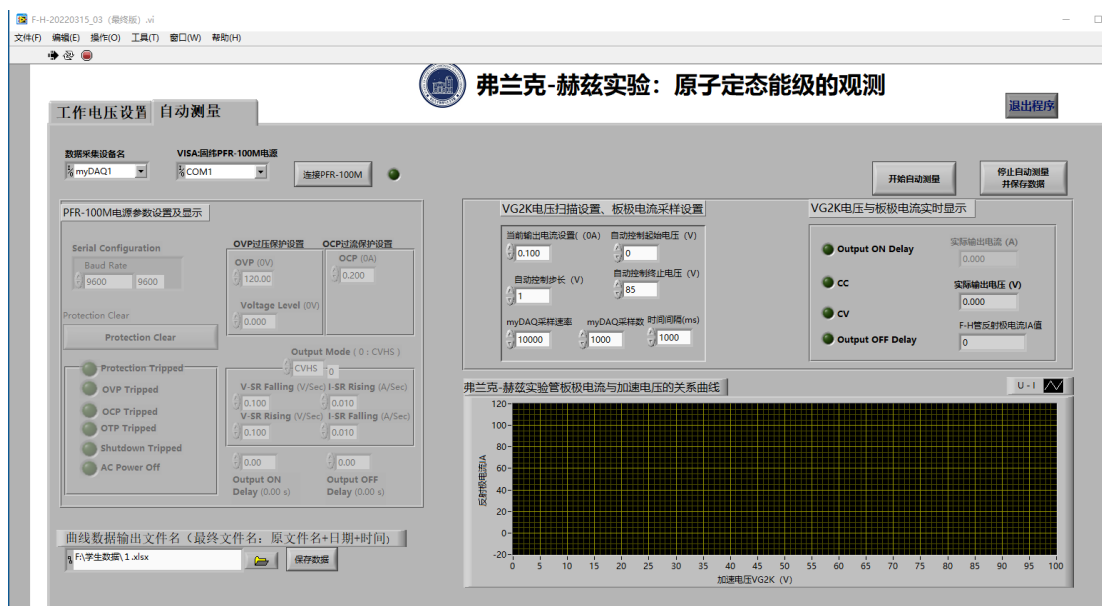
表 2 电压及电流参数设置参考值

设置值				
Channel	Voltage Level(V)	Current Level(A)	OVP(V)	OCP(A)
CH4/ $V_L$	2V~5V	1.2A	5V	1.5A
CH1/ $V_{G_1K}$	1V-2.5V	0.02A	2.5V	0.05A
CH2/ $V_{G_2P}$	8V-15V	0.02A	15V	0.05A
$V_{G_2K}$	0V-100V	0.100 A	100V	0.200A

- (4) 程序运行，选择对应的电源通道(如 CH1 等),按下 Output 按钮，使按钮变为绿色，则输出打开（ON）。
- (5) 关闭电源时，点击 Output 按钮颜色为灰色，则输出关闭（OFF）。
- (6) 对某一工作电压组合测量后，改变某个电压参数设置，观察测量结果有何变化。


**注意：**实验结束时，一定要关闭电源输出，可选择用软件关闭，也可直接在仪器面板上操作。

## 2) 自动测量模式



- (1) 在“数据采集设备名”下拉菜单选择对应出现的 myDAQ 接口。如果没有正确选择，将无法采集到数据。



- (2) 在 VISA 下拉菜单，电源选择正确的 COM 接口，会有小窗口弹出提示说明。选择正确后，点击连接相关设备，指示灯亮。
- (3) 设置当前电流值 Current Level(A) (建议用默认值)；
- (4) 设置自动控制终止电压 (V)；自动控制起始电压 (V)；自动控制步长 (V)；
- (5) 设置 myDAQ 采样速率、采样数和时间间隔 (建议用默认值)；
- (6) 选择程序运行，按下开始输出，则  $V_{G_2K}$  电压将自动加压；
- (7) 文件存储：按“保存数据”键，文件会自动存储为 excel 文件，文件名将会以路径+日期+时间自动保存。按  可更改数据文件的保存路径。

### 3) 手动测量

直接通过电源 (GWINSTEK PFR-100M) 面板设置  $V_{G_2K}$ ，在微电流放大器 (BroLight BEM-5710) 面板读电流值、记录电流档位。

由于电流峰 (谷) 值与自动测量设置的停留时间有关，手动测量有足够的时间让电流稳定，因此，手动测量的峰 (谷) 值与自动测量的不同。若通过手动测量寻峰 (谷)，请注意这个差别。

## 【实验方案】

- 1、选择合适电流量程，设置氩管工作电压。(见实验报告指引)
- 2、分析灯丝电压对  $I_P \sim V_{G_2K}$  关系曲线的影响。
  - 1) 按照出厂参数自动测量  $I_P \sim V_{G_2K}$  关系曲线。
  - 2) 除出厂参数外，另外选择两个灯丝电压值 (一个大于出厂参数，一个小于出厂参数)，测量不同灯丝电压下  $I_P \sim V_{G_2K}$  关系曲线，并作图进行比较，详述不同灯丝电压下曲线的异同。
- 3、氩原子第一激发电位测量
  - 1) 按照出厂参数手动逐点测量  $I_P \sim V_{G_2K}$  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。
  - 2) 与自动测量比较，并计算氩的第一激发电位。
- 4、数据处理
  - 1) 寻峰、寻谷；
  - 2) 计算峰-峰间距、谷-谷间距；
  - 3) 是等峰-峰间距 (谷-谷间距) 吗？分析误差。

**【思考题】**

（不单独回答）

1. 电子与氩原子碰撞会涉及到原子电离等物理过程，怎样设置 F-H 管各电极的电压（工作点），使测量的  $I_P \sim V_{G_2K}$  曲线更多地反映出发生氩原子第一激发的电子-氩原子非弹性碰撞？（请在选择工作点时回答）
2. 为什么  $I_P \sim V_{G_2K}$  波谷点的电流不会下降为零，且随  $V_{G_2K}$  的增大而增大？（在分析 F-H 曲线时回答）
3. （选）处于激发态的原子不稳定，退回基态时会发射光子（复习原子光谱），那么，这些光子处于哪个波段？它能产生光电效应吗？
4. （选）原子对电子的弹性散射会改变电子运动方向，它对电子动能有何影响？对电子继续从电场中获得能量有何影响？对所测量的电流呢？
5. （选）如何（数学）定量描述 F-H 管各电极电压对  $I_P \sim V_{G_2K}$  曲线的影响。