

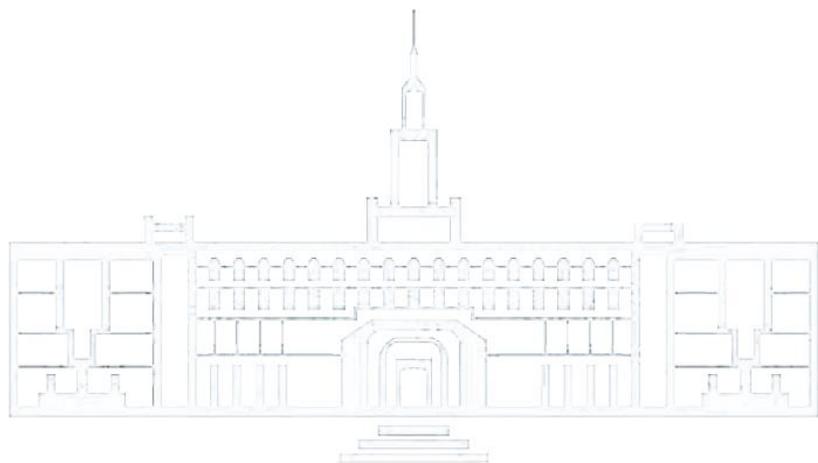


物理学国家级实验教学示范中心

National Demonstration Center for Experimental Physics Education



弗兰克—赫兹实验



堅守·奮斗



◀ 目 录 ▶

01 背景知识

02 实验目的

03 实验原理

04 实验仪器

05 实验内容

06 注意事项

07 实验问题

08 参考资料

堅守 · 奮斗



01

背景知识





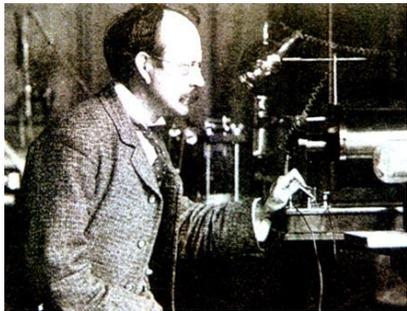
弗兰克—赫兹实验 Franck-Hertz experiment

几个历史事件

黑体辐射

光电效应

康普顿效应



1897年发现电子

$$e = -1.60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.1093826(16) \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

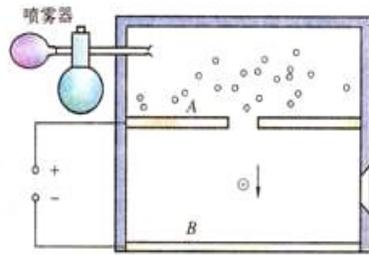
电子质量 \ll 原子质量

几个诺贝尔奖

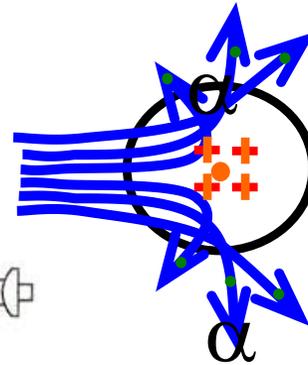
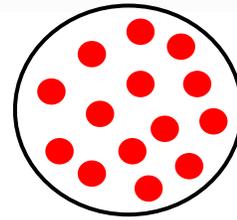
1918年获诺贝尔物理学奖。

1921年因此获诺贝尔奖。

1927年获诺贝尔奖。



密立根油滴实验示意图



- 不能解释正负电荷不中和；
- 不能解释氢原子光谱存在的谱线系；
- 不能解释α粒子大角度散射。
- 原子坍塌，电子绕核做椭圆运动，这是一种加速运动，按经典电动力学理论电子在运动过程中必然辐射能量，电子能量逐渐减少，轨道半径随之变小，只要 10^{-8} 秒，电子就会落到核上，发生坍塌；
- 在坍塌前原子连续辐射，应得连续的原子光谱。



$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad n = 3, 4, 5, 6$$

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$



弗兰克—赫兹实验 Franck-Hertz experiment

赖曼系(1916)紫外部分

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

氢原子光谱规律

巴耳末系(1885)可见光

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

帕邢系(1908)近红外

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

布喇开系(1922)近红外部分

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$$

普丰德系(1924)红外部分

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 6, 7, 8, \dots$$

汉弗莱系(1953)远红外部分

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 7, 8, 9, \dots$$

$$\tilde{\nu}_{kn} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$



弗兰克—赫兹实验 Franck-Hertz experiment

玻尔的基本假设

• 卢瑟福的原子核模型，氢原子光谱的巴耳末公式，普朗克能量量子概念

定态假说：电子在原子中，可以在一些特定的圆轨道上运动，而不辐射电磁波，这时原子处于稳定状态（定态）并具有一定的能量。

量子化条件：电子以速度 v 在半径为 r 的圆周上绕核运动时，只有电子角动量 L 等于 $h/(2\pi)$ 的整数倍的那些轨道才是稳定的

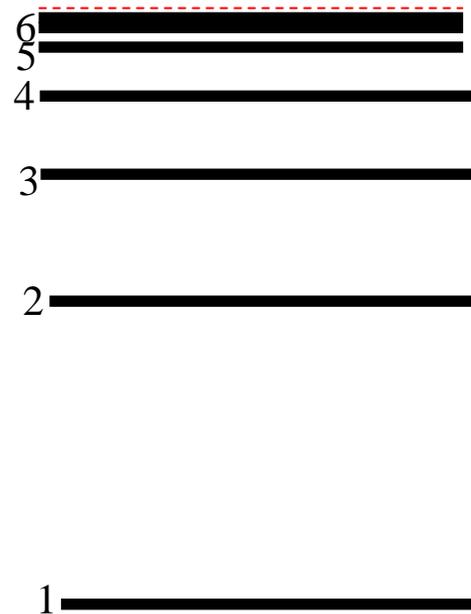
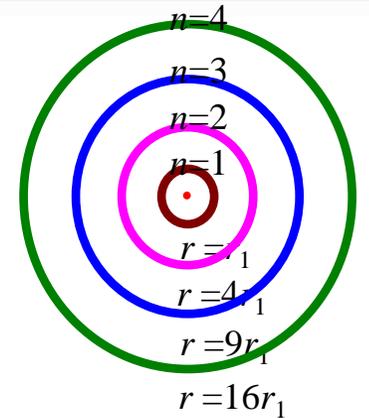
$$L = mrv = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

其中 $n=1,2,3,\dots$ 称为主量子数

跃迁假设：当原子从高能量的定态跃迁到低能量的定态，即电子从高能 E_i 的轨道跃迁到低能量 E_f 的轨道上时，要发射能量为 $h\nu$ 的光子：

$$h\nu = E_i - E_f$$

玻尔于1922年12月10日诺贝尔诞生100周年之际，在瑞典首都接受了当年的诺贝尔物理学奖金。



氢原子能级图



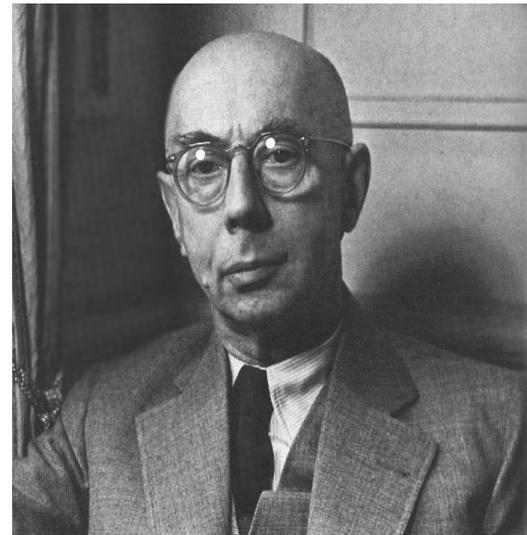
弗兰克—赫兹实验 Franck-Hertz experiment

1914年，詹姆斯·弗兰克（James Franck, 1882~1964）和古斯塔夫·路德维希·赫兹（Gustav Ludwig Hertz, 1887~1975）采用慢电子和稀薄气体原子碰撞，发现电子与原子发生非弹性碰撞时能量的转移是量子化的。他们的精确测定表明，电子与汞原子碰撞时，电子损失的能量严格地保持 4.9eV ，即汞原子只接收 4.9eV 的能量。即原子吸收或发射的能量是不连续的，从而证明了原子能级的存在，由于他们的工作对原子物理学的发展起了重要作用，**共同获得1925年的诺贝尔物理学奖。**

通过实验，能学习弗兰克、赫兹为揭示原子量子化能级所作的巧妙构思和采用的方法，了解气体放电中低能电子和原子间相互作用的机理，电子与原子碰撞的微观过程怎样和实验中的宏观量相联系，并可研究原子内部能量状态与能量交换的微观过程。



JAMES FRANCK (夫兰克)



GUSTAV HERTZ (赫兹)



02

实验目的





目的

1

了解夫兰克-赫兹实验的原理和方法

2

通过测量氩原子的第一激发电位,证明原子能级的存在,加深对原子结构的了解

3

掌握测量氩原子第一激发电位的方法

4

了解原子能级的量子化结构



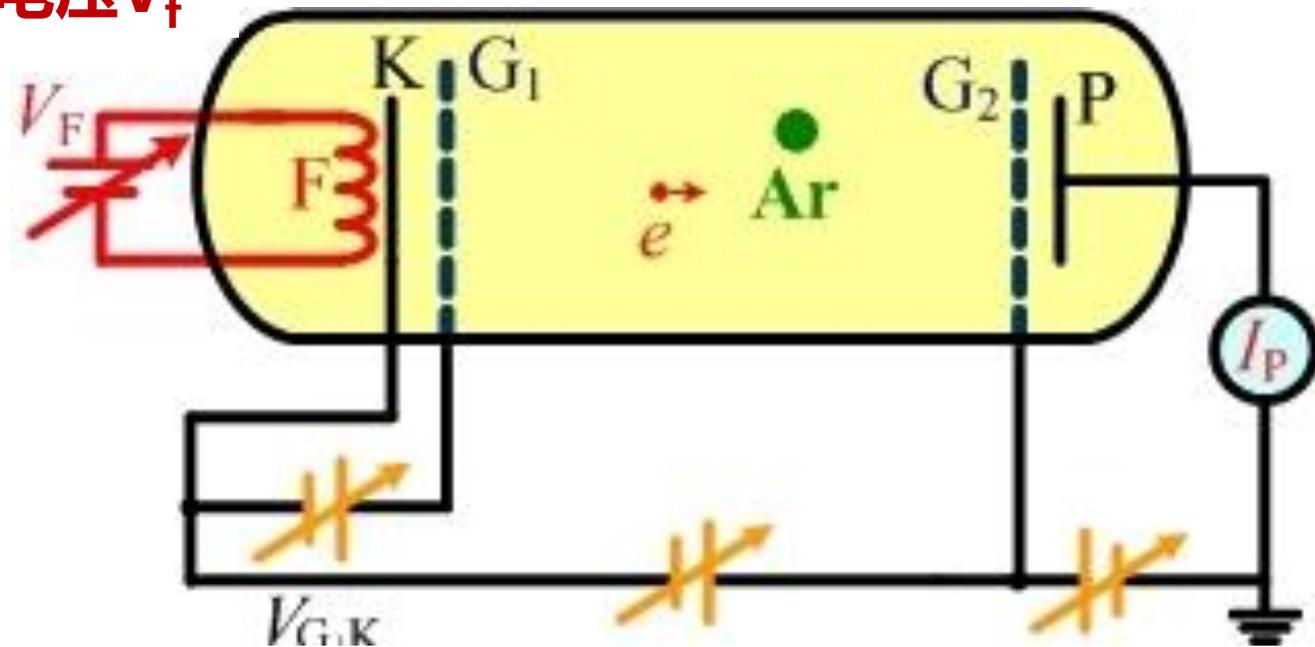
03

实验原理





灯丝电压 V_f

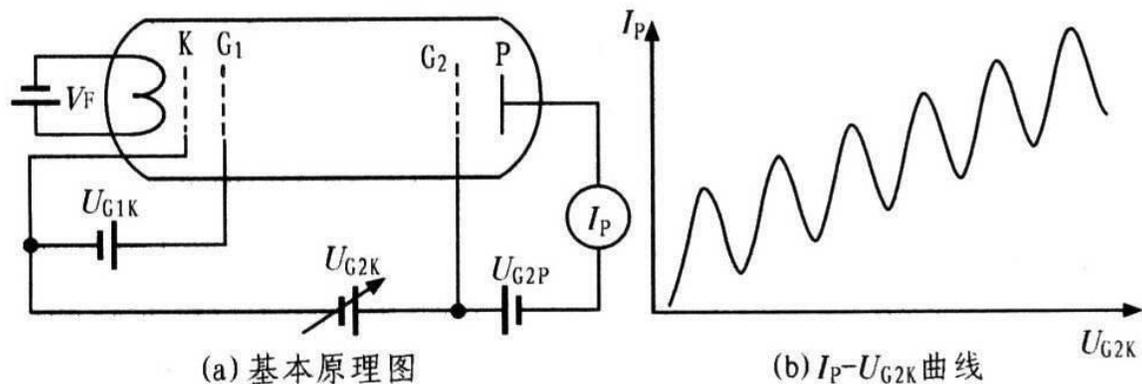


栅极-阴极电压 V_{G_1}

V_{G_2}

减速电压 V_P

弗兰克-赫兹实验装置示意图



(a) 基本原理图

(b) I_P-U_{G2K} 曲线

图 1 基本原理图

<http://www.go-gddq.com>

一般情况下，原子的最外层电子都是处于基态的。

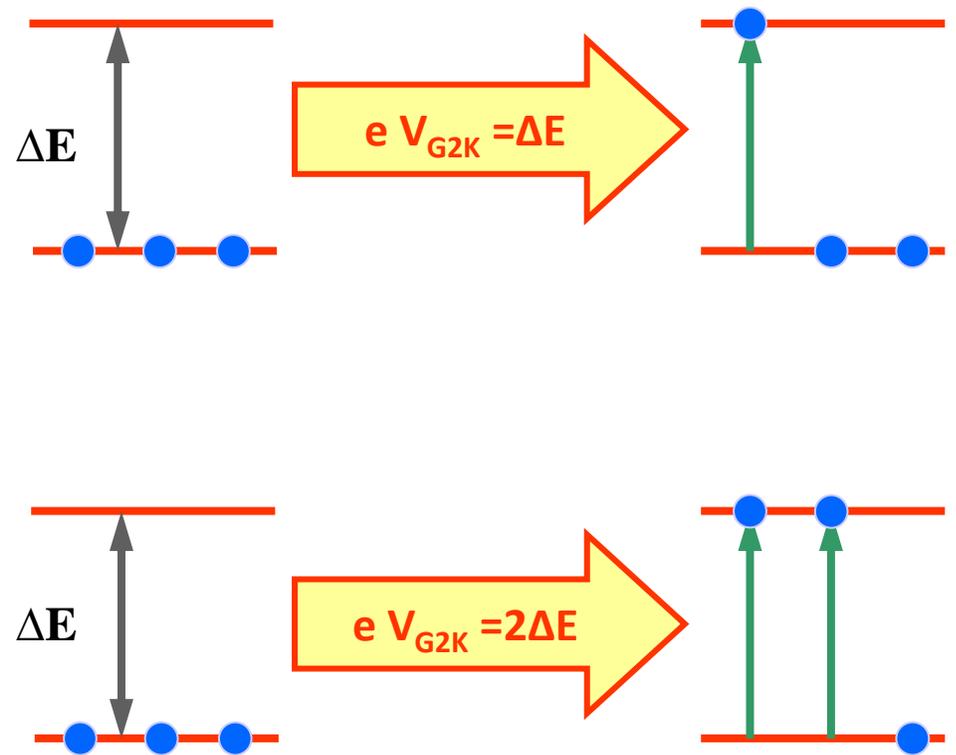
当原子受到外部能量的作用后，其最外层电子就会跃迁到高能级上，变为激发态原子， $eU_0 = E_2 - E_1$ 。

激发态原子极不稳定，在极短时间内就会重新跃迁回基态，并将其吸收的能量以光子形式释放出去， $h\nu = E_2 - E_1$ 。每一种跃迁都会发射出一种波长的光，在光谱中相应的产生一种谱线。



原子的激发电位

随着 V_{G2K} 的增加，电子能量增加。当电子与氩原子碰撞后还留下足够的能量，可以克服 G_2P 空间的减速场而到达板极P，此时板极电流将开始上升。如果电子在 KG_2 空间得到的能量 $eU_2 = 2 \Delta E$ ，电子在KG空间会因二次非弹性碰撞而失去能量，而造成第二次板极电流下降。在 U_2 较高的情况下，电子在飞向栅极的路程中，将与原子发生多次非弹性碰撞、只要 $U_2 = n \Delta E$ ($n=1, 2, \dots$)，就发生这种碰撞。在 $IP \sim U_2$ 曲线上将出现多次下降。对于氩，曲线上相邻两峰（或谷）对应的 U_0 之差，即为原子的第一激发电位。





第一激发电位

$$eU_0 = E_2 - E_1$$

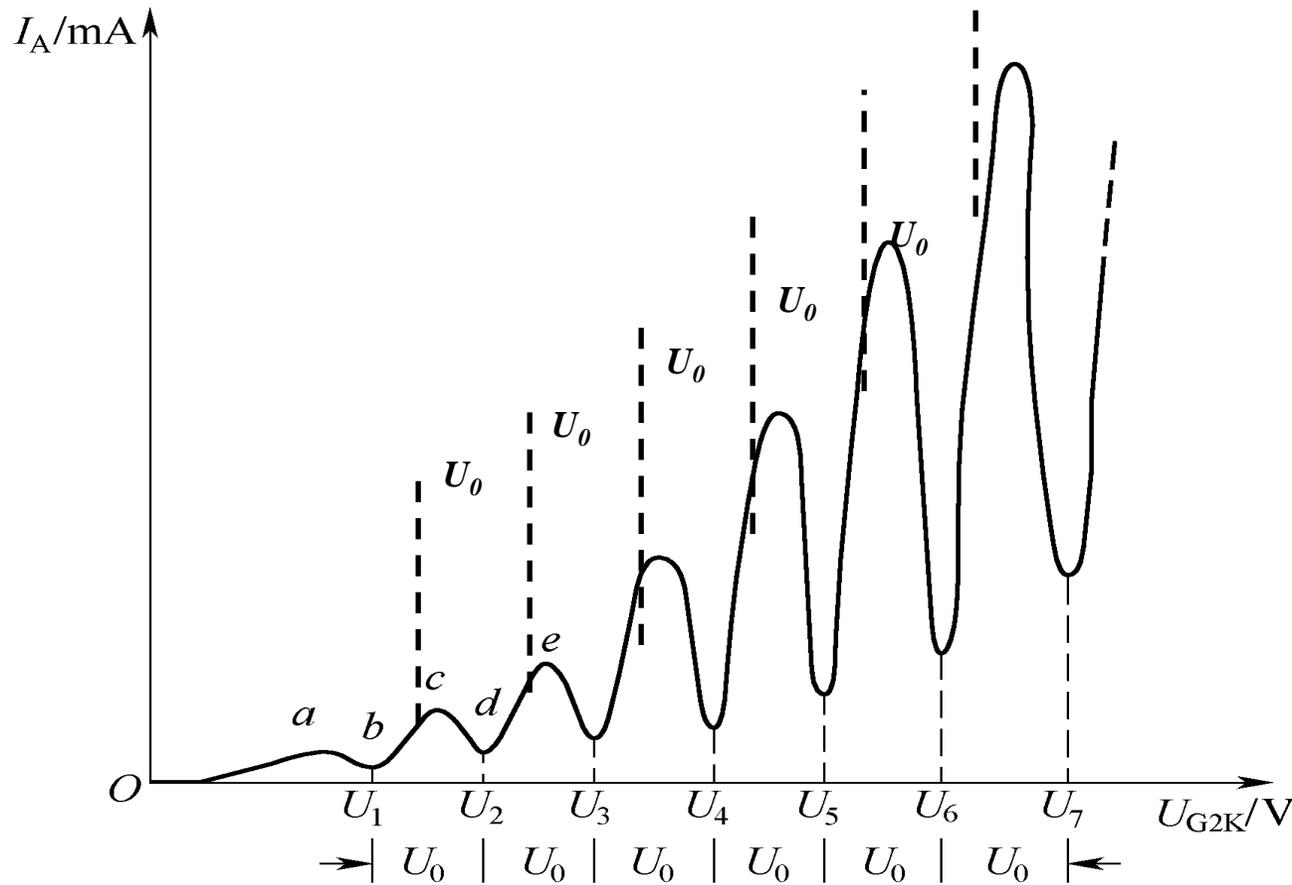
$$h\nu = E_2 - E_1$$

元素	汞 (Hg)	钠 (Na)	钾 (K)	锂 (Li)	镁 (Mg)	氖 (Ne)	氩 (Ar)
U_0 (V)	4.9	2.12	1.63	1.84	3.2	18.6	13.1
λ (Å)	2537	5890 5896	7664 7699	6707.8	4571	6402.2	8115.3



第一激发电位与电流变化的关系

原子第一激发电位等于相邻两个峰电流（或谷电流）对应的电压差。



I_A-U_{G2K} 曲线



具体物理过程

原子从低能级向高能级跃迁，也可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换来实现。本实验即让电子在真空中与惰性气体Ar原子相碰撞。

设Ar原子的基态能量为 E_1 ，第一激发态的能量为 E_2 ，从基态跃迁到第一激发态所需的能量就是 $E_2 - E_1$ 。

初速度为零的电子在电位差为 U 的加速电场作用下具有能量 eU ，若 $eU < E_2 - E_1$ 这份能量，则电子与Ar原子只能发生弹性碰撞，二者之间几乎没有能量转移。



具体物理过程

当电子的能量 $eU \geq E_2 - E_1$ 时，电子与Ar原子就会发生非弹性碰撞，Ar原子将从电子的能量中吸收相当于 $E_2 - E_1$ 的那一份，使自己从基态跃迁到第一激发态，而多余的部分仍留给电子。

设使电子具有 $E_2 - E_1$ 能量所需加速电场的电位差为 U_0 ，则

$$eU_0 = E_2 - E_1$$

式中： U_0 为Ar原子的第一激发电位，即本实验要测的物理量。

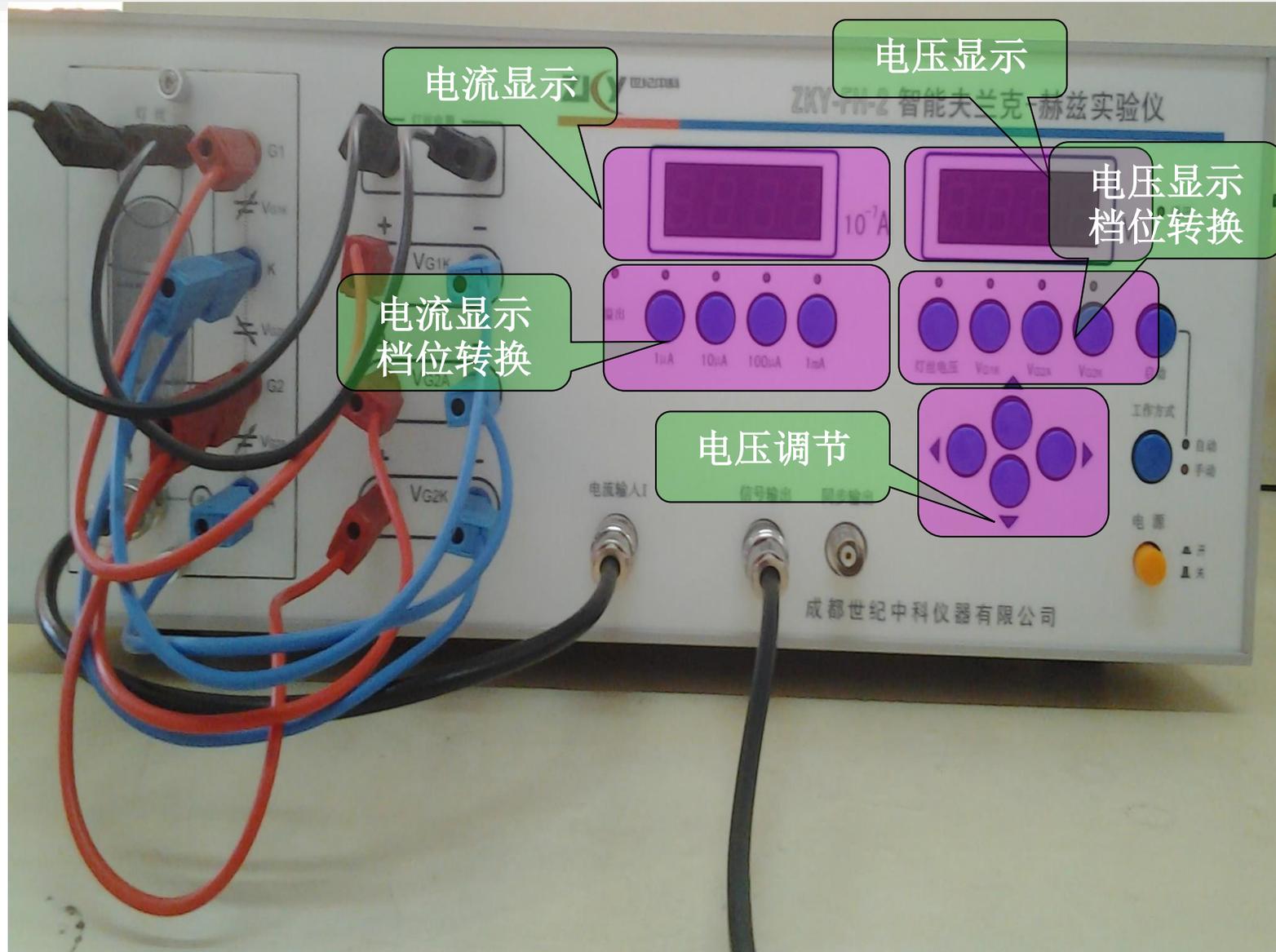
$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad \text{称为临界能量}$$

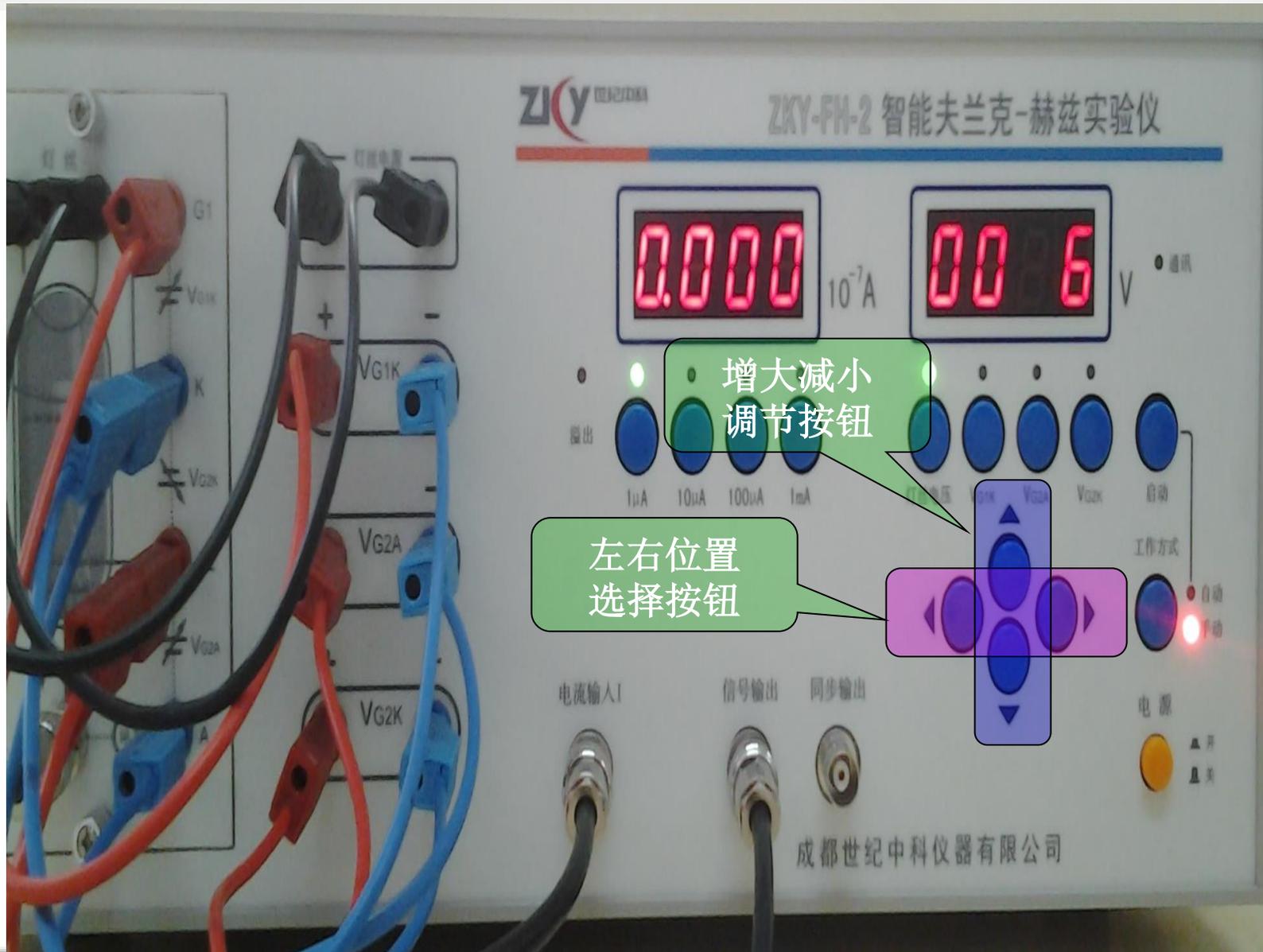


04

实验仪器

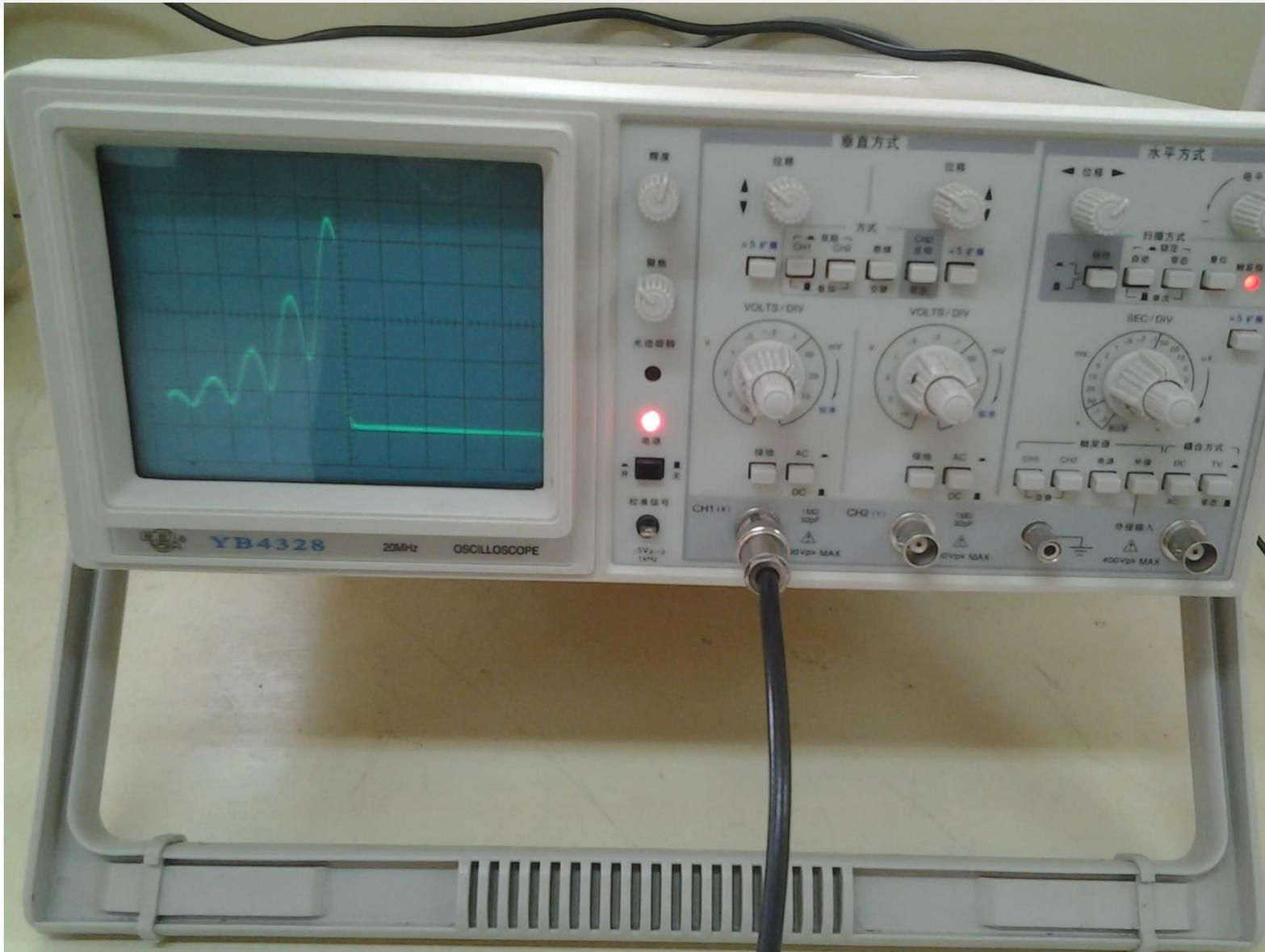


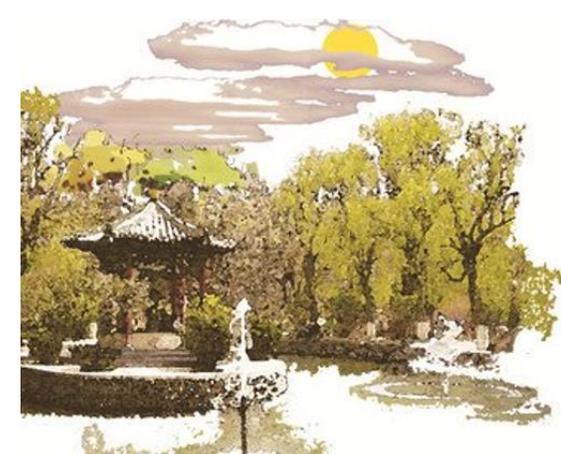






夫兰克-赫兹管参考参数	
电流量程	1 μ A 档
灯丝电源电压	2.6 V
V _{G1K} 电压	1.5 V
V _{G2A} 电压	1.0 V
V _{G2K} 电压	82 V
注：预热条件见说明书附页	





蘭州大學
蘭州大學
蘭州大學

05

实验内容





- (1) 测定F-H汞管的 $V_{G2K}-I_p$ 曲线，观察原子能量量子化情况，利用逐差法求出汞原子第一激发电位；
- (2) 自行选定不同炉温 T 、反向拒斥电压 V_{G2P} 、灯丝电压 V_F 等参数，研究上述参量对F-H实验曲线的影响，如曲线形状、峰数等。
- (3) 测量汞原子高激发态电位，观察 6^3P_1 态、 6^3P_2 态及 6^1P_1 态等。
- (4) 通过离子流探测法对汞原子电离电位进行了测量。



实验一：汞原子第一激发电位测量

1、设置加热炉温度

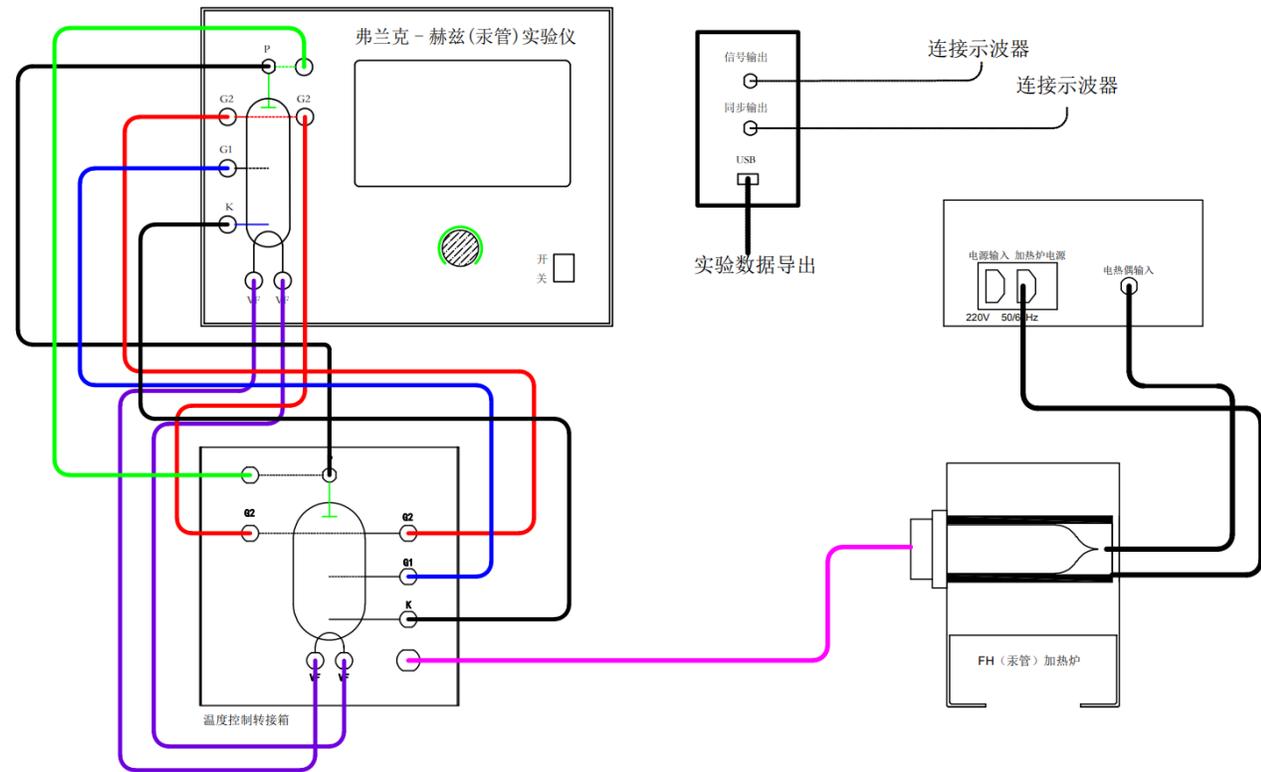
(1) 打开温控转接箱电源开关；设置温控器温度，一般可根据每台仪器标识的温度设定温度，一般是设定在 220°C 。温控器使用说明：（参照仪器配发的温控器使用说明）改变设定温度；

(2) 加热炉升温过程约需要15-20分钟左右，注意观察温控显示器；

2、连线

按图连接电路。注意：连线时暂不接通仪器电源。

汞原子第一激发电位接线图





实验一：汞原子第一激发电位测量

3.汞原子第一激发电位测试操作

(1) 调节仪器

- 1) 待炉温达到预定的温度后，接通弗兰克-赫兹（汞管）实验仪电源；
- 2) 根据仪器背板上提供的F-H汞管工作电压数据，分别设定 V_F 、 V_{G1K} 、 V_{G2K} 。
- 3) 定性观察：可以采用“自动”方式观察曲线；

(2) 手动测量

1.适当调整实验参数，然后开始测量 V_{G2K} — I_p 关系。从0V开始仔细调节栅压 V_{G2K} ，每改变1.0V记录一次板极电流 I_p 。在4.0V以后，每改变0.5V，记录一次 I_p 值，测量至60V左右。此外，在板极电流 I_p 的每一个峰值或谷值处，要仔细调节，力求较准确地测出对应的栅极电压 V_{G2K} 值。

2.自行选定炉温、反向拒斥电压、灯丝电压（注意不能超过仪器给出的最大灯丝电压）等参数，测量不同参数下 V_{G2K} — I_p 关系。

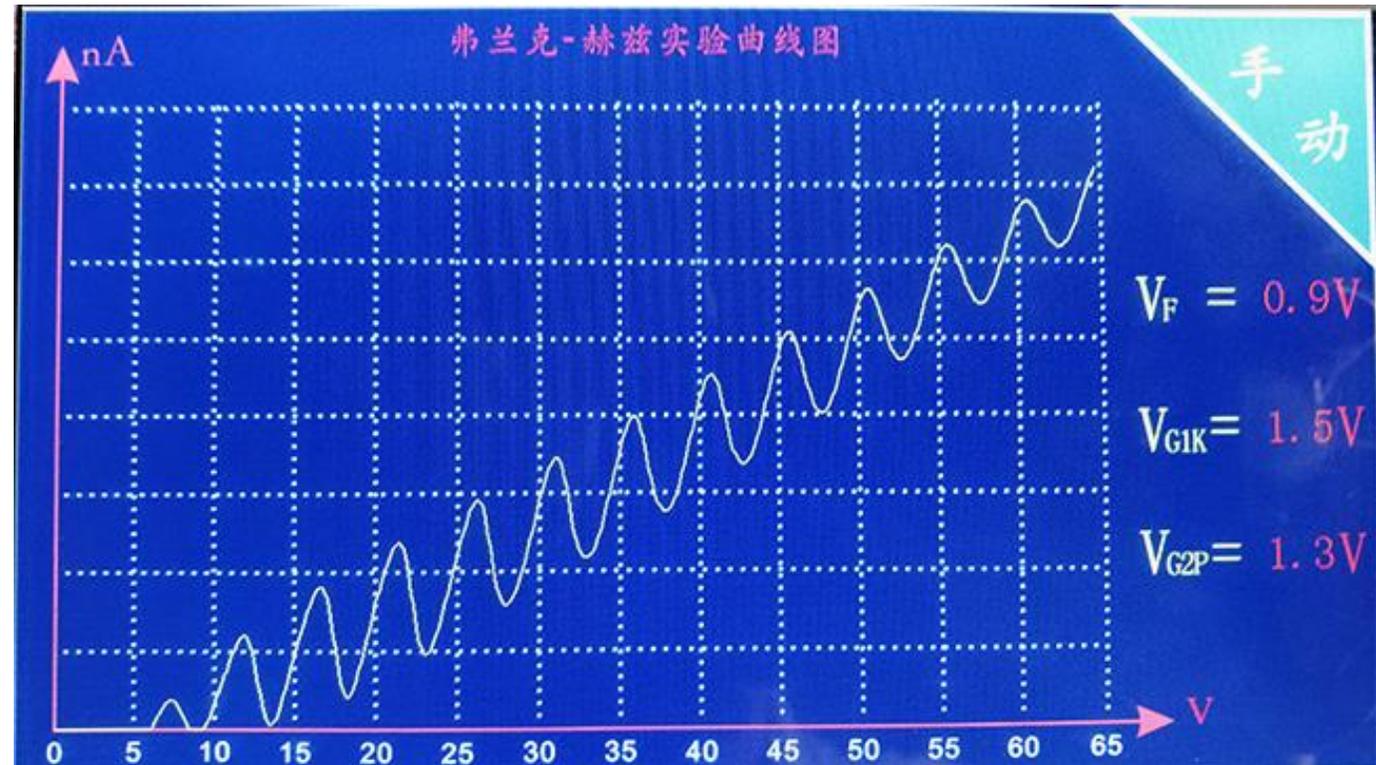


实验一：汞原子第一激发电位测量

(3) 数据分析

数据记录表格由学生自行设计。由实验数据得到诸 $nV_0 + V_c = V_{G2K}$ 峰方程，用Excel或Origin软件作 V_{G2K} 峰 - n 图。通过直线拟合确定第一激发电位 V_0 和接触电位差 V_c ，并计算相应不确定度。讨论炉温、反向拒斥电压、灯丝电压等参数对 $V_{G2K} - I_p$ 曲线的影响。

(4) 实验数据导出：弗兰克-赫兹（汞管）实验仪主机背板上设有USB接口，可以将实验数据导出到电脑和存储卡上，存储格式是TXT 文本文件。学生可以根据自己的实验数据在电脑上利用Excel或Origin等软件作 V_{G2K} 峰 - n 图。



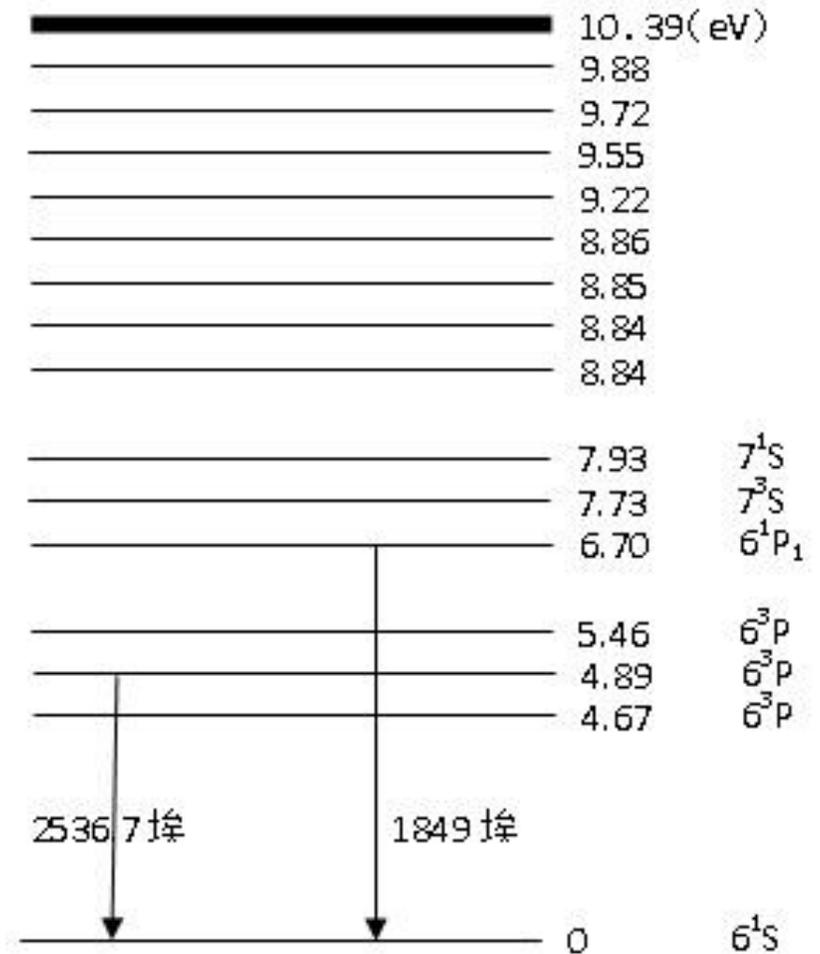
汞管第一激发电位实测图 (灯丝0.9V V_{G1K} 1.5V V_{G2P} 1.3V 炉温220°C)



实验二：测量汞原子的较高激发能级

1、汞原子能级结构

汞原子是由原子核和核外80个电子组成。最外层的2个价电子的伏态决定了原子的能量状态。能量最低的状态 $6^1 S_0$ 称为基态， $6^3 P_0$ 、 $6^3 P_1$ 、 $6^3 P_2$ 是三重态中能量最低的一组激发态， $6^1 P_1$ 是单重态中最低激发能级，最高者为电离能级。图1是简化了的汞原子能级图，因中标出了部分能级符号。由光谱测量知道。 $6^3 P_1$ 和 $6^1 P_1$ 具有较强的吸收特性。

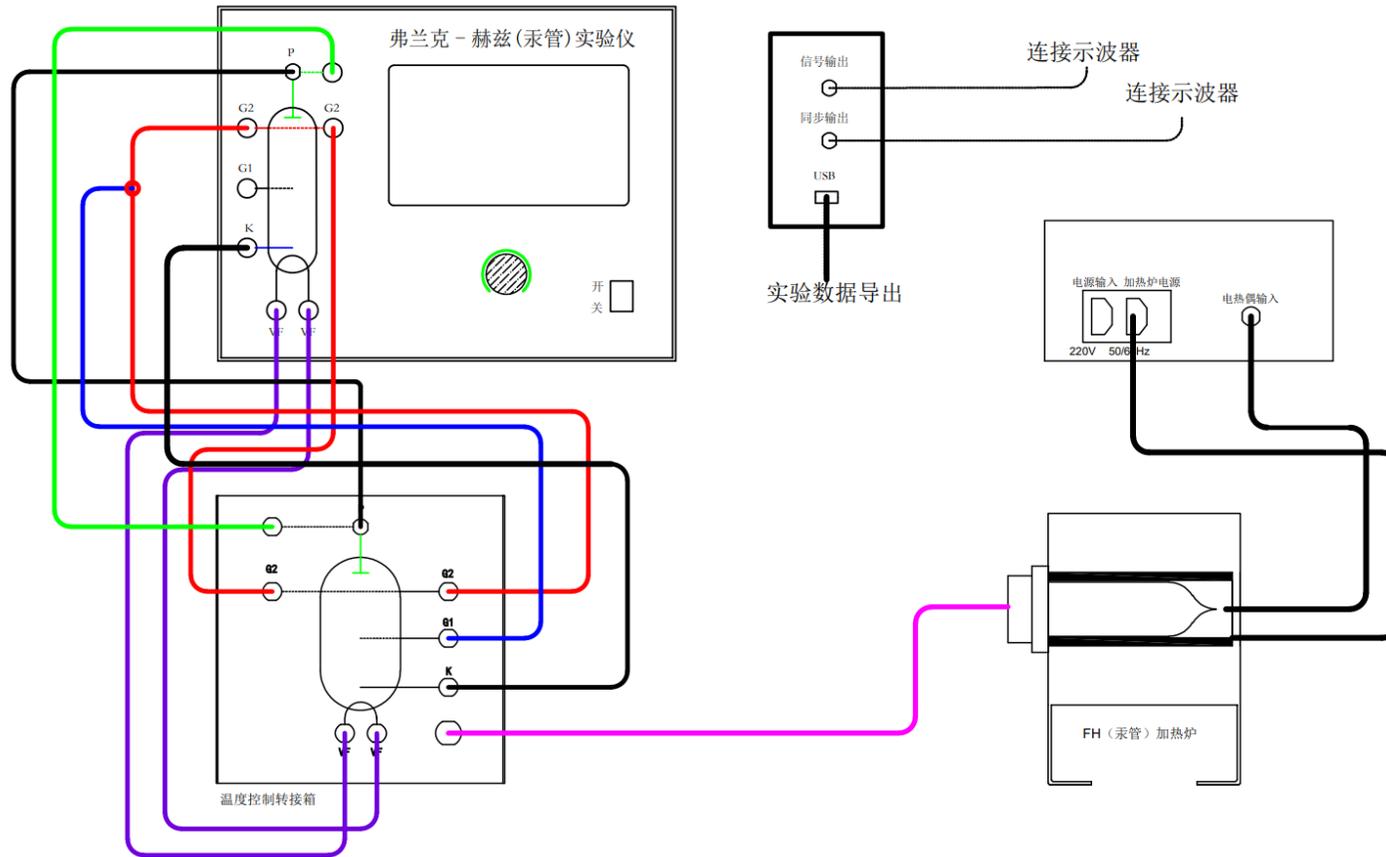


汞原子光谱能级图



实验二：测量汞原子的较高激发能级

汞原子高激发态接线图



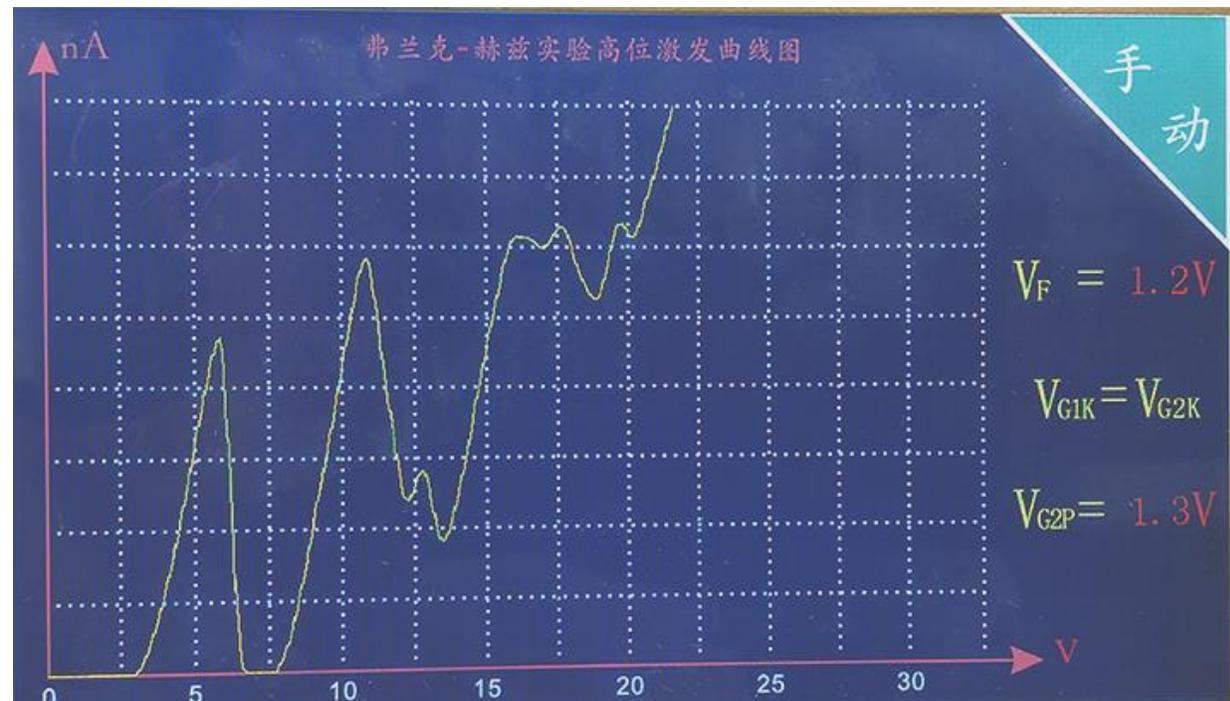
汞原子较高激发能级的测量连接方式图，在仪器面板上将K和K短接，G1和G2短接



实验二：测量汞原子的较高激发能级

做汞原子高能级实验时要先做汞原子第一激发电位实验结束后，将炉温从220降温至100-135°C，连接导线开启仪器电源，设置合适的电源 V_F 、 V_{G2P} 参数，每个F-H管最佳工作条件应由实验仔细确定。

实验中，将 G_1 和 G_2 短接，使其间形成等势空间，F-H管被划分区加速区（K- G_2 ），碰撞区（ G_1 - G_2 ）和收集区（ G_2 -P）三部分。控制恒温加热炉温度可以选择汞原子蒸汽密度。通常在第一激发能测量中，往往选用高的原子密度（恒温加热炉温200-220°C），碰撞区与加速区公用，电子加速路径远大于其平均自由程，电子几乎只能引起 6^3P_1 能级的激发。



典型的 I_P-U_{KG1} 曲线，从中可以观察到 6^3P_1 态和 6^1P_1 态



06

注意事项





1. 线路连好后检查无误，方可开启电源。关闭电源前应启动键使扫描电压迅速归零。
2. 实验仪器需预热20-30分钟，加热炉外壳温度很高，操作时一定要注意安全，以免灼伤。
3. 温度数据出现大幅偏差时，请关闭温控电源检查温控探头是否脱落和松动
4. 各参考电压一定要在给定的数据范围之内，否则将造成管子的老化或激穿。
5. 实验完毕，立即将VG2K电压快速归零（可按启动键迅速归零），关闭电源，拆除导线。
6. 实验报告中的数据分析要求认真完成



07

实验问题





- 1、为什么相邻电流峰值对应的电压之差就是第一激光电位?
- 2、谷电流为什么不为零?
- 3、为什么随着UG2K的增加, IA的峰值越来越高?
- 4、为什么第一激发电位 (~11.6V) 不等于曲线第一个峰的电压 (~22V) ?
- 4、为什么曲线的峰值是缓慢过渡的, 而不是瞬间达到的?



08

参考资料





1. 理科物理实验教程 吴平主编 冶金工业出版社
2. 汞原子较高能级测量的研究 刘复汉
3. 汞原子的激发电位电离电位的测定, 康世秀、吴永华, 物理实验, 1981



本次课程结束，祝同学们
学业有成！

