

# 实验五 弗兰克-赫兹实验中弱电流的测量

## ——集成运算放大器的应用

1914年弗兰克(F. Franck)和赫兹(G. Hertz)在研究气体放电现象中低能电子与原子间相互作用时,在充汞的放电管中发现:透过汞蒸汽的电子流随电子的能量呈现有规律的周期性变化,间隔为4.9 eV,并拍摄到与能量4.9 eV相对应的波长为253.7 nm的光谱线.

该实验证实了原子内部能量是量子化的,为玻尔于1913年发表的原子理论提供了新的实验事实.

1920年弗兰克及其合作者对原先实验装置作了改进,提高了分辨率,测得了汞的除4.9eV以外的较高激发能级和电离能级,进一步证实了原子内部能量是量子化的.1925年弗兰克和赫兹共同获得诺贝尔物理学奖.

通过这一实验可以了解原子内部能量量子化的情况,学习和体验弗兰克和赫兹研究气体放电现象中低能电子和原子之间相互作用的实验思想和实验方法.同时学习用集成运算放大器测量弱电流.

### 【实验目的】

1. 了解原子能量量子化,测定汞或氩原子的第一激发电势;
2. 了解集成运算放大器的基本单元电路原理;
3. 利用运算放大器的放大作用,组成测量电路进行弱电流测量;

### 【实验原理】

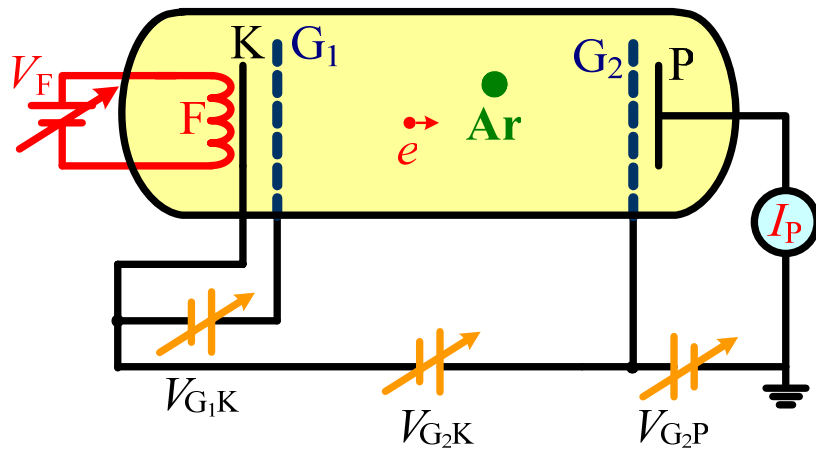
#### 1. 弗兰克-赫兹实验

根据量子理论,原子只能处在一系列不连续的能量状态,称为定态.相应的定态能量称为能级.原子的能量要发生变化,必须在两个定态之间以跃迁的方式进行.当基态原子与带一定能量的电子发生碰撞时,可以使原子从基态跃迁到高能态

$$eV_1 = E_1 - E_0 \quad (1)$$

式(1)中, $E_1$ 为第一激发态能量(第一激发态是距基态最近的一个能态), $E_0$ 为基态能量, $eV_1$ 为该原子第一激发能.

弗兰克-赫兹实验的原理可由图1来说明,各电位分布如图2所示.电子由阴极发出经由电压 $V_{G2K}$ 形成的电场加速而趋向板极P,只要电子能量足以克服减速电压 $V_{G2P}$ 形成的电场时,就能穿过栅极 $G_2$ 到达板极形成电流 $I_p$ .由于管中充有气体原子,电子前进的途中要与原子发生碰撞.如果电子能量小于第一激发能 $eV_1$ ,它们之间的碰撞是弹性的,根据弹性碰撞前后系统动量和动能守恒原理不难推得,电子损失的能量极小,电子能如期的到达板极,形成电流 $I_p$ , $I_p$ 将随着 $V_{G2K}$ 的增大而增大.但当电子能量达到 $eV_1$ 时,电子与原子将在 $G_2$ 附近发生第一次非弹性碰撞,电子把能量 $eV_1$ 传给气体原子.碰撞后电子失去动能,损失了能量的电子将无法克服减速场到达板极,造成了电流 $I_p$ 的第一次下降.若使 $V_{G2K}$ 继续增大,电



$V_F$ : 灯丝加热电压     $V_{G1K}$ : 正向小电压     $V_{G2K}$ : 加速电压     $V_{G2P}$ : 减速电压  
 F: 灯丝    K: 阴极     $G_1$ : 栅极 (控制栅极)     $G_2$ : 栅极 (加速栅极)    P: 板极

图 1 弗兰克-赫兹实验原理图

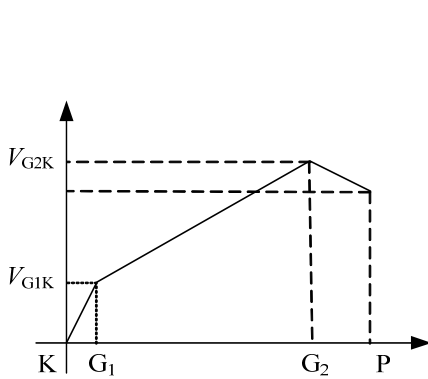


图 2 电位分布

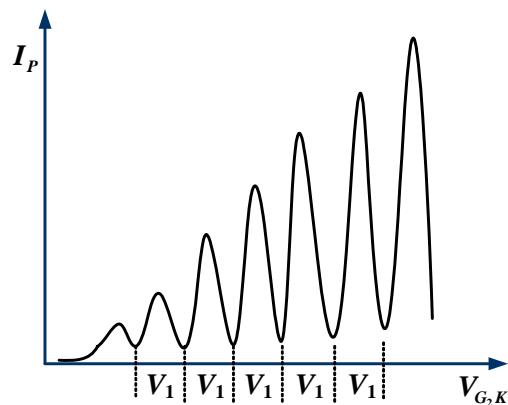


图 3 弗兰克-赫兹实验曲线

子在经历了第一次非弹性碰撞后，仍有剩余动能到达板极，电流又会上升，直到  $V_{G2K}$  达到两倍的  $eV_1$  时，使电子与原子发生两次非弹性碰撞，电流又再度下跌，余可类推。如此反复将出现图 3 的曲线。

曲线极大极小的出现呈明显的规律性，它是原子能级量子化的体现。就图 3 的规律来说，每相邻极大或极小值之差即为第一激发能。

进行 F-H 实验通常使用的碰撞管是充汞的。这是因为汞是原子分子，能级较为简单，常温下是液态，饱和蒸汽压很低，加热就可改变它的饱和蒸汽压。汞的原子量较大，和电子作弹性碰撞时几乎不损失动能。汞的第一激发能级较低，为 4.9 eV，因此只需几十伏电压就能观察到多个峰值。当然除充汞蒸汽以外，还常充以惰性气体如氩、氙等的。用这些

碰撞管作实验时，温度对气压影响不大，在常温下就可以进行实验。

## 2. 集成运算放大器简介

集成运算放大器是一种能够检测和放大直流与交流信号的固体器件。它具有输入阻抗高，开环增益高以及输出阻抗小等特点。目前广泛应用于计算机、自动控制、无线电技术和各种非电量的电测线路中。

运算放大器内部电路通常都是很复杂的，但是不管其内部电路如何复杂，它与外界的

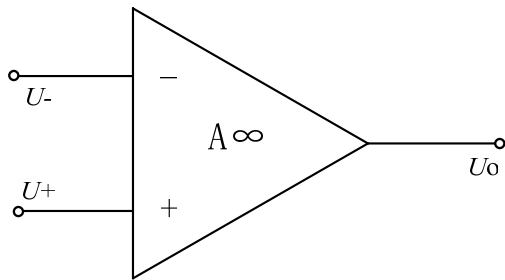


图4 集成运算放大器的电路常用符号

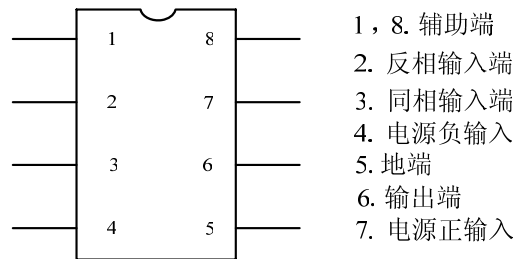


图5 常用集成运算放大器的引脚图

连接是简单的。大多数集成运算放大器都是双输入、单输出的高增益直流放大器。除了两个信号输入端和一个输出端外，还有两个正负电源引入端和调零端，有时还有相位补偿以及一些特殊引出端。讨论由运放构成的电路时，运放的内部电路一般无关紧要，通常用一个电路图形符号来表示运放（如图4所示）。在运放图形符号中，标有“+”号的信号输入端称为同相输入端，即信号从这一端口引入时，输入信号和输出信号相位相同；标有“-”的信号输入端称为反相输入端，即信号从这一端口引入时，输入信号和输出信号相位相差180度。

## 3. 集成运算放大器的等效电路

运算放大器的简化等效电路如图6所示。使用集成运放，首先需要知道的是它有关参数和各个管脚的用途（见图5）。集成运算放大器的主要参数如下：

(1) 输出最大电压  $U_{opp}$

在额定电源电压下，集成运放所输出的最大不失真电压的峰-峰值为  $U_{opp}$ ，一般  $U_{opp}$  总是小于电源电压。

(2) 开环电压放大倍数  $A_d$

它定义为运算放大器在没有任何外部反馈情况下的差动直流电压放大倍数，即它是在放大器开环情况下，输出电压与输入差动电压的比值，即

$$A_d = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_o}{U_+ - U_-} \quad (2)$$

$A_d$  可达  $10^5$  以上

(3) 输入阻抗  $R_i$

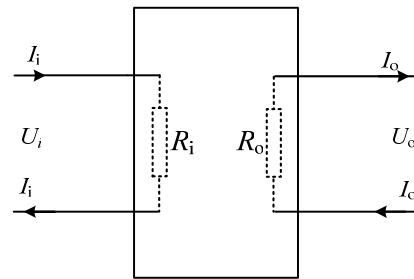


图6 运算放大器的等效电路

集成运放的输入阻抗 $R_i = U_i / I_i$ ，其数值较大，一般为几兆欧，这样输入电流可忽略。

(4) 输出阻抗 $R_o$

集成运放的输出阻抗 $R_o = U_o / I_o$ ，其数值较小，一般最多几百欧，这样放大器的输出受负载的影响较小。

综上所述，集成运放具有开环电压放大倍数高、输入阻抗高、输出阻抗低、漂移小、可靠性高、体积小等优点。

运算放大器中开环放大倍数 $A_d$ 、输入阻抗 $R_i$ 和输出阻抗 $R_o$ 这几个特性参数是最主要的。对于理想的运算放大器而言，一般认为 $A_d = \infty$ ， $R_i = \infty$ ， $R_o = 0$ ，则可得出下列两条重要结论：

- (1) 运算放大器同相端和反相端可视为虚短路，既有 $U_+ = U_-$ ；
- (2) 流入运算放大器两输入端的信号电流为零。

在实际运用中，大多数运算放大器都工作在线性区，故通常将其视为理想运算放大器加以分析。

4. 弱电流测量

集成运放构成运算或信号处理等电路时，需要引入反馈网络，即运放是闭环工作。运放电路加入反馈的目的是增大运放的线性工作范围和改善电路性能或实现某些特殊要求。

当运放的输出信号从反相端馈入，这时电路引入的是负反馈。图 7 即为负反馈放大电路。有反馈的放大电路，放大倍数用 $A_f$ 表示，称为闭环放大倍数。运用上述两个结论，可得出其电压放大倍数为

$$A_f = -R_f / R_1 \tag{3}$$

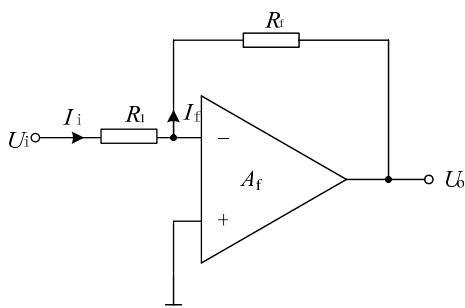


图 7 负反馈放大电路

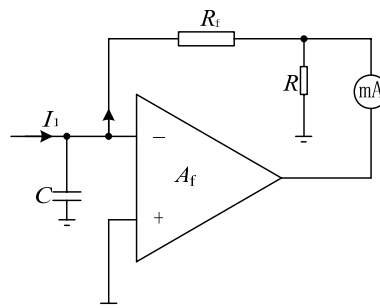


图 8 实际测量电路

在实际电路中的 $R_1$ 和 $R_f$ 值并不是可以任意取值的。例如对于图 7 的放大电路，使其 $A_f = -10$ ，此时 $R_1$ 和 $R_f$ 的阻值可分别取为  $1 \Omega$  和  $10 \Omega$ ，也可以取为  $10 \text{ M}\Omega$  和  $100 \text{ M}\Omega$ 。如果 $R_1$ 太小，会从信号源取走较大电流，该电流在信号源的内阻上要产生压降，会对运算带来误差，同时还限制了输入信号 $U_i$ 的最大幅度。 $R_1$ 和 $R_f$ 的取值也不能太大，因阻值高的电阻器热稳定性差，内部噪声也大。所以，通常 $R_1$ 和 $R_f$ 的取值范围在  $1 \text{ k}\Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$ 。考虑到以上这些因素，同时也考虑到本实验测量的是电流值，故采用图 8 的电路作为本实验的测量电路，此时电路呈电流放大。同时在电路中增加了电阻 $R$ ，这样反馈电阻 $R_f$ 就可以取得小一些。同时电路中增加了一个电容，也是为了消除噪声的影响。

### 5. 弗兰克-赫兹 (F-H) 实验中弱电流的测量

弗兰克-赫兹实验中达到板极的电流极弱, 约为  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{A}$ , 对电流计的灵敏度要求较高, 若采用电流计, 则它的内阻较大 ( $10^2 \sim 10^3 \Omega$ ), 对原电路有影响. 故本实验采用运算放大电路 (图 8) 对弗兰克-赫兹实验中的板极电流进行测量.

### 【实验仪器】

弗兰克-赫兹实验组合仪, 运算放大器 (LF3140),  $\pm 15 \text{V}$  稳压电源, 数字万用表, 实验接线板, 电阻和电容等.

弗兰克-赫兹实验组合仪 (图 9) 包括:

1. F-H 管电源组: 用来提供 F-H 管各极所需的工作电压  
灯丝电压  $V_F$  直流  $1 \sim 5 \text{V}$  连续可调  
正向小电压  $V_{G1K}$  直流  $0 \sim 5 \text{V}$  连续可调  
减速电压  $V_{G2P}$  直流  $0 \sim 15 \text{V}$  连续可调

2. 扫描电源及微电流放大器:

提供  $0 \sim 90$  伏的可调直流电压或扫描输出锯齿波电压, 作为 F-H 管的加速电压. 该装置具有“手动”, “自动扫描”两种工作方式, 在“手动”方式时

- |                |  |
|----------------|--|
| 加速电压 $V_{G2K}$ | 直流 $0 \sim 90$ 伏连续可调   |
| 微电流放大器         | $10^{-6} \text{A}$ , $10^{-7} \text{A}$ , $10^{-8} \text{A}$ 档 |

3. F-H 管、加热炉和控温装置装置

实验中使用的 F-H 管有两种. 一种是充氩气, 另一种是充汞的 (高纯汞液), 它需要加热如炉和控温装置配合才能正常工作. 汞管安装在加热炉内. 前面板画有 F-H 管示意图. F-H 管内各电极已引到前面板的接线柱上. 炉顶有小孔安装温度计, 温度计须和控温装置配合使用. 通过后面板的玻璃窗口可观察到内部的 F-H 管.

温控范围  $120^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$

### 【实验内容】

实验测定氩管的  $I_P \sim V_{G2K}$  曲线, 观察原子能量量子化情况, 并由此求出管中 Ar 原子的第一激电位.

1. 连接弗兰克-赫兹实验组合仪电路;

2. 根据图 8 连接放大电路, 将从 F-H 管板极输出的电流作为运算放大器的输入电流;

3. 根据仪器说明书提供的参数设置电源组各电压值 (实验条件如  $V_F \sim 2 \text{V}$ ,  $V_{G1K} \sim 1 \text{V}$ );

4. 用手动方法改变  $V_{G2K}$ , 同时观察万用表上的  $I_P$  变化;

5. 适当调整实验条件使微电流计能出现  $5 \sim 6$  个峰, 且峰谷明显;

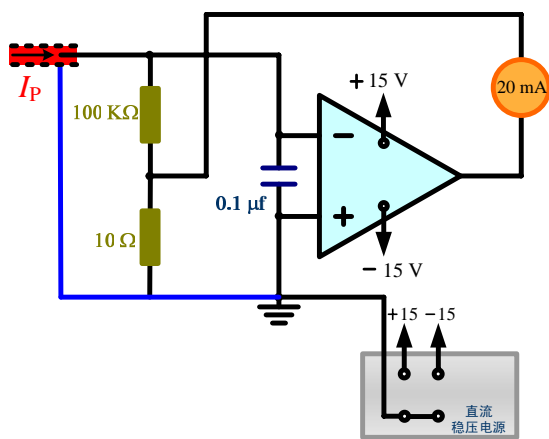


图 9 实验装置图

6. 选取合适的实验点记录数据使之能完整真实地绘出 $I_P \sim V_{G2K}$ 曲线（每个峰部或谷部处的数据测量点数不得少于2点）；

7. 利用逐差法处理 $I_P \sim V_{G2K}$ 曲线求出氩的第一激发电位。

### 【注意事项】

1. 每次实验接线后，必须仔细检查线路，确保无误时，才能接入 $\pm 15\text{ V}$ 电源及输入端的信号源。更换电路元件时，必须先切断电源。

2. 接线要牢固、整齐、合理，信号源的“地”、运算放大器的“地”及万用表的“地”线要相连接。用充汞的F-H实验管做实验时，应先加热电炉至指定温度，再开启其它电源。

4. 应密切关注电流值，以防止F-H管击穿。一旦击穿发生，则应立即调低加速电压，以免F-H管受损。

5. 如用充汞管则应先开启加热电炉至指定温度，再开启其它电源。

2. 不同实验条件有不同的 $V_{G2K}$ 击穿值。击穿发生后应立即调低 $V_{G2K}$ 值，以免F-H管受损。

3. 灯丝电压不宜放得过大，宜在 $2 \sim 3\text{ V}$ 左右。

### 【思考题】

1. 考察实验条件对曲线的影响（如曲线形状、击穿电压等）。

2. 考察 $I_P \sim V_{G2K}$ 周期变化与能级关系，如果出现差异估计是什么原因？

3. 第一峰位位置为何与第一激发电位有偏差？

4. 对于本实验的放大电路，其电流放大倍数为多少？请解释？

5. 万用表的内阻是否需要考虑，为什么？

### 【参考文献】

[1] 钱国飞编. 集成运算放大器基本原理及应用. 上海: 上海交通大学出版社, 1992

[2] 王鸿明. 电工技术与电子技术. 北京: 清华大学出版社.

[3] 吕斯骅, 段家祗主编. 基础物理实验. 北京: 北京大学出版社, 2002