# 夫兰克-赫兹实验条件选择研究

刘文斌
（复旦大学物理系 05 级本科生，学号：0556023）

摘要：本文介绍在夫兰克-赫兹实验中影响 $I_P$ - $U_{G_2K}$ 的几种重要因素，得出了这些因素变化时的实验曲线变化规律，详细分析了原因，进而总结出各参量的最佳值。

关键词：夫兰克—赫兹实验；汞原子激发态；温度；灯丝电压；第一栅极电压；减速电压

## 1 引言

1914 年，夫兰克和赫兹设计了一个简单精巧的实验装置，用低速电子轰击原子，观察他们之间的相互作用和能量传递过程，并观察受激原子所发出的辐射，直接证明了原子能部量子化能级的存在，验证了玻尔原子理论。至今，夫兰克—赫兹实验依然是探索原子结构的重要手段，是了解原子微观过程和宏观表现的纽带。通过实验，可以了解夫兰克和赫兹研究气体放电现象中低能电子和原子间相互作用，将看不见的微观量子状态转换成宏观的可测量量。实验中，影响夫兰克—赫兹实验曲线的因素很多，为了得到理想的实验结果，选择合适的实验条件就显得非常重要。

## 2 实验原理

图 1 是夫兰克—赫兹实验测量汞原子的第一激发能的原理图。图中上方位为一个专用的充气管（$F-H$ 管）。在阴极 $K$ 与栅极 $G_1$ 之间加控制电压 $U_{G_1K}$，$K$ 极与栅极 $G_2$ 之间的加速电压 $U_{G_2K}$，使电子加速获得动能 $E=mv^2/2=eU$，加在栅极 $G_2$ 与板极 $P$ 之间的是减速电压 $U_{G_2P}$，电子穿过栅极 $G_2$ 后，如能量仍大于 $eU_{G_2P}$，就可以到达板极 $P$，形成板极电流 $I_P$。

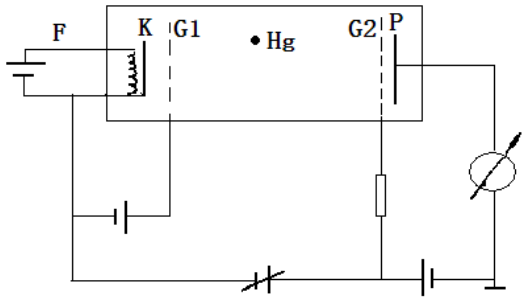


图 1 测量汞原子第一激发态示意图

设原子的基态能量为 $E_1$，第一激发态能量为 $E_2$，初速为零的电子在电位差为 $U_0$ 的加速电场作用下，获得的能量为 $eU_0$。具有这种能量的电子与原子发生碰撞，当电子能量低于原子的临界能量 $\Delta E=E_2-E_1$ 时，即 $eU_0<\Delta E$ 时，电子与原子只能发生弹性碰撞。设碰撞前电子速度为 $v$，动能 $\varepsilon=mv^2/2$，根据弹性碰撞前后动能守恒和动量守恒原理，电子在弹性碰撞过程中的能量损失为 $\Delta\varepsilon=[4mM/(m+M)^2]\varepsilon$。由于电子的

质量比原子质量小得多，即$m \ll M$，所以$\Delta\varepsilon \approx (4m/M)\varepsilon$，此式对应的是电子与原子发生正碰的情况。在非正碰的情况下，能量的损失较正碰时给出的值要小。平均起来，可以认为经过一次弹性碰撞，电子损失的能量为$\overline{\Delta\varepsilon} = (2m/M)\varepsilon = f\varepsilon$，式中$f$为远小于1的分数，对于汞原子$f = 5.5\times10^{-5}$。[1]这就是说，电子经历一次弹性碰撞所损失的能量是很小的。如果$eU_0 > \Delta E$，电子与原子会产生非弹性碰撞。原子从电子中取得$\Delta E$的能量，而由基态跃迁到第一激发态。相应的电位差$(U = \Delta E/e)$即为原子的第一激发电位。

## 3 实验装置

本实验使用复旦大学生产的双栅柱面型四极式夫兰克-赫兹管，结构图如图2所示，管中充汞。

极板$P$的直径约为$14mm$的敷铝的铁皮圆筒，控制栅$G_1$和加速栅$G_2$分别是用钼丝绕制的直径为$1.8mm$和$12mm$的螺旋线，阴极$K$是直径为$1.14mm$的镍管，管的外壁则敷有三元氧化物$(BaO, SrO, CaO)$，涂层厚约$0.05mm$；管内有加热用的热子$F$，它是双向绞绕的钨丝，钨丝表面涂敷有氧化铝绝缘层。$K$与$G_1$，$G_1$与$G_2$和$G_2$与$P$的间距分别约为$0.3mm$，$5.0mm$和$1.0mm$。

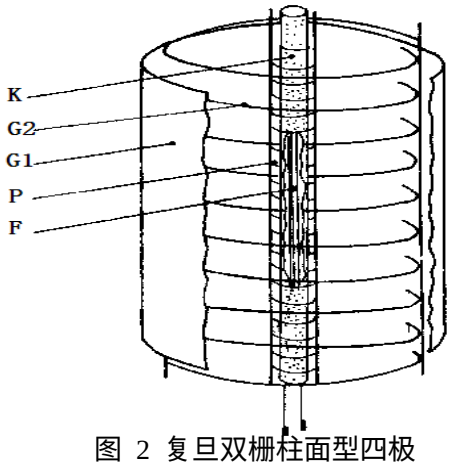


图 2 复旦双栅柱面型四极式夫兰克-赫兹管结构图[2]

## 4 实验方法

以汞气为被测气体，分别改变夫兰克-赫兹管温度$T$、灯丝电压$U_F$、第一栅极电压$U_{G_1K}$和减速电压$U_{G_2P}$，得出不同条件下的$I_P$ - $U_{G_2K}$曲线，以有利于汞原子激发到$^3P_1$态，并使汞原子被激发到高能态限制到最小为依据，实验中以测量到$I_P$ - $U_{G_2K}$曲线上峰、谷间差值大，曲线上包含的峰、谷数目多[3]为目的来选择最佳实验参数。

## 5 实验结果及分析

### 5.1 温度$T$对实验曲线的影响

如图3所示为在不同温度下测得的曲线，其他参数为$U_F = 1.7V$，$U_{G_1K} = 1.0V$，$U_{G_2K} = 1.5V$，可见温度

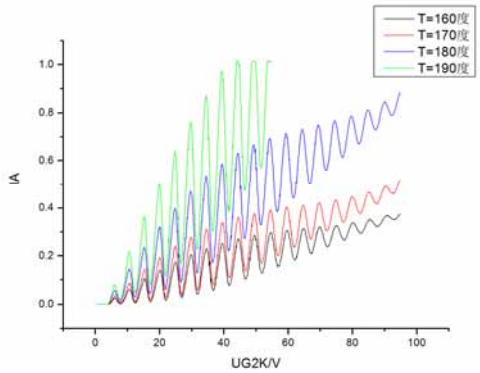


图 3 不同温度下的实验曲线

越高，峰与谷之间的差别越大，从而曲线的分辨率也越高。从每条曲线上也可以看出，峰与谷之间的差值是先增大再减小，如果温度过低，曲线上后面的峰的分辨率会变得很低甚至于看不出来，就会导致曲线上峰谷的数目也减小。

分析其原因如下：汞的饱和蒸汽压 $P_{饱}$ 与温度 $T$ 之间满足[2]：

$$\log P_{饱} = -3200/T(K) + 10.125$$

由此看出温度越高，汞原子的饱和密度急剧增大，而且自身动能也增大，电子与之碰撞的几率增加，峰和谷的形成就是由于电子与汞原子发生非弹性碰撞使得电子的能量骤然减小引起的，因此，在其余条件相同的情况下，这样便使得曲线的分辨率得到提高；同时电子的平均自由程快速变短，有会导致电子与汞原子碰撞前很难获得足够能量，使得汞原子的激发率降低。如果温度过低，电子自由程过长，这样容易使电子获得过高的能量，与汞原子发生非弹性碰撞时容易将其激发到高能态，甚至电离。因此为了得到分辨率更高、峰值数较多的实验曲线，选择和控制管内温度是很重要的。由图 3 可看出，温度在 $170 \sim 180^{\circ}C$ 比较合适。

## 5.2 灯丝电压 $U_F$ 对实验曲线的影响

如图 4 所示，其他实验参数为 $T = 180^{\circ}C$，$U_{G_1K} = 1.0V$，$U_{G_2P} = 1.5V$，改变灯丝电压，会发现随灯丝电压的增大，实验曲线向上移。

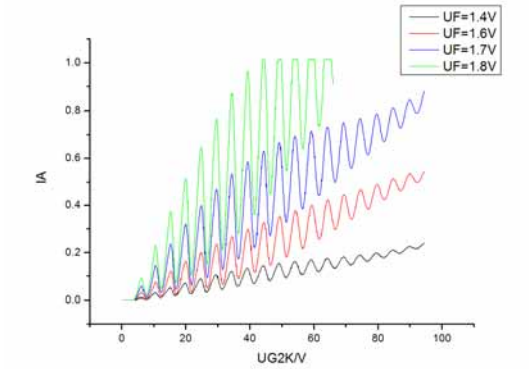

图 4 不同灯丝电压下的实验曲线

我们知道，电流密度与阴极温度遵从 $J_0 = AT^2 e^{-\phi/kT}$，式中 $J_0$ 为电流密度，$A$ 为电子发射常数，$A = 4\pi emk^2/h^2$，$T$ 为金属工作温度，$\phi$ 为阴极表面逸出功，$k$ 为玻尔兹曼常数[2]。增加灯丝电压，可以提高阴极温度，加大发射电流,同时发射的热电子的速度分布发生改变，平均初动能也增加，从而板极电流增大，使实验结论中出现实验曲线上移的现象。应当注意，灯丝电压不可过高，否则会使阴极受热过高，致使阴极发射物质因蒸发太快而剥落，管子易于老化而寿命减小。因此实验操作时必须选择适当的灯丝电压，从图 4 可看出，灯丝电压 $U_F = 1.8V$ 为比较合适的电压值。

## 5.3 第一栅极电压 $U_{G_1K}$ 对实验曲线的影响

不同第一栅极电压 $U_{G_1K}$ 的实验曲线如图 5 所示，其他实验参数为 $T = 180^{\circ}C$，$U_F = 1.7V$，$U_{G_2P} = 1.5V$。

从阴极发射出的电子，由于动能小，包围在阴极 $K$ 附近，形成电子云层，阻挡阴极 $K$ 进一步发射电子。加 $U_{G_1K}$ 的作用就是让阴极附近的电子做定向移动，抵消阴极 $K$ 附近的电子云，提高阴极 $K$ 发射电子的效率。$U_{G_1K}$ 相对

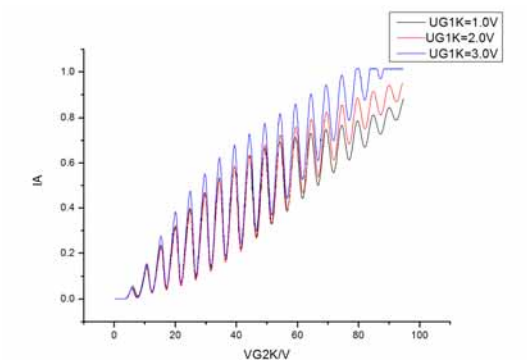


图 5 不同第一栅极电压下的实验曲线

于 $U_{G_2K}$ 也比较小，对电子的能量贡献不明显，因而第一栅极电压对实验曲线的影响不大。改变 $U_{G_1K}$ 可以控制阴极 $K$ 发射电流的大小，但电流不能太大，还要同其他实验参数相互配合，使整体曲线质量达到最好，由实验得出，$U_{G_1K}=2.0V$ 比较合适。

## 5.4 减速电压 $U_{G_2P}$ 对实验曲线的影响

减速电压为加在板极 $P$ 及第二栅极 $G_2$ 的反向电压，当电子穿过栅极后，$U_{G_2P}$ 将起阻碍电子到达板极的作用。如图 6 所示，其他实验参数为 $T=180^{\circ}C$，$U_F=1.7V$，$U_{G_1K}=2.0V$，$U_{G_2P}$ 绝对值越大，则曲线下移。反之，$U_{G_2P}$ 绝对值越小，则曲线上移。

分析原因如下：$U_{G_2P}$ 绝对值越大，穿越栅极想要到达板极的电子所需动能越大，则在其余条件相同的情况下，单位时间到达板极的电子数减小，即板极电流 $I_P$ 减小。由图 6 可得，减速电压控制在 $1.0V$ □ $2.0V$ 之间比较合适。

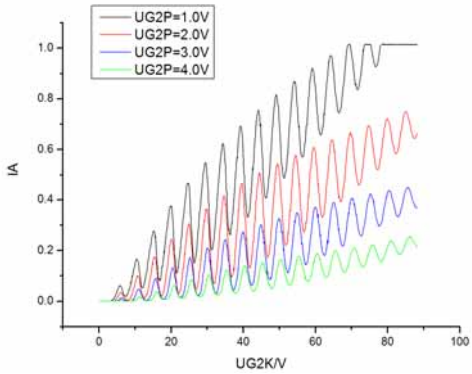


图 6 不同减速电压下的实验曲线

## 6 结束语

通过对实验曲线的分析可知，为提高曲线分辨率，应尽可能增加曲线的峰谷数和峰谷值间的差。因此，实验温度应选择在 $170^{\circ}C$ 左右，灯丝电压在 $U_F=1.8V$ 左右，第一栅极电压在 $U_{G_1K}=2.0V$ 左右，减速电压控制在 $1.0V$ □ $2.0V$ 之间，此时曲线位置相对较高，峰谷数目表较多判断峰谷值位置较容易。

## 参考文献：

[1] 吴思诚，王祖铨主编。近代物理实验（第二版）。北京大学出版社，1995：33-40。

[2] 戴乐山，戴道宣。近代物理实验。上海：复旦大学出版社，1995：45-68。

[3] 张明长，刘海风，优化夫兰克-赫兹实验条件，物理实验，第 28 卷第 4 期，2008 年