

文章编号: 1007-2934(2018)05-0087-05

# 确定弗兰克-赫兹实验最佳工作参数的方法改进

王杰, 司嵘嵘\*

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 文章研究了弗兰克-赫兹实验的最佳实验条件和氩原子的第一激发电位, 通过分析不同实验条件下的板极电流随加速电压的变化曲线, 并结合不同实验条件下峰值序数与对应加速电压进行最小二乘法拟合所得直线的相关系数以及氩原子第一激发电位的标准偏差, 确定使用该弗兰克-赫兹管进行实验时的最佳实验条件为: 灯丝电压 3.1 V, 正向电压 1.4 V, 拒斥电压 6.0 V。最后, 在最佳实验条件下测定了氩原子的第一激发电位为 11.537 V。

**关键词:** 弗兰克-赫兹实验; 第一激发电位; 灯丝电压; 正向电压; 拒斥电压; 相关系数; 标准偏差

**中图分类号:** O 562.2

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2018.05.021

1914年, 德国著名科学家弗兰克和赫兹使用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法, 激发稀薄气体原子, 使其从低能级跃迁到高能级。通过研究电子与原子碰撞时的能量交换所发现的规律, 直接证明了原子能级的存在, 即原子能量的量子化现象。目前, 弗兰克-赫兹实验已成为很多高校物理实验教学的重要内容。前人在确定实验最佳条件时, 往往采用观察板极电流大小和实验曲线分辨率的方式, 即认为板极电流大、分辨率高的曲线所对应的实验条件就是实验最佳条件<sup>[1-4]</sup>。但是这种方式带有一定的主观因素。而本文通过观察实验曲线, 并结合不同实验条件下峰值序数与对应加速电压进行最小二乘法拟合所得直线的相关系数(下文简称为“相关系数”)以及该实验条件下所得的氩原子第一激发电位的标准偏差(下文简称为“标准偏差”), 来确定最佳实验条件, 使得最佳实验条件的确定更加科学合理。

## 1 基本实验原理

弗兰克-赫兹实验原理如图1所示, 弗兰克-赫兹管(简称F-H管)中充以氩气。F-H管内有4个电极: 阴极K、第一栅极 $G_1$ 、第二栅极 $G_2$ 、板极A。各极之间施加4个电压, 分别为灯丝电压 $U_F$ 、

正向电压 $U_{G_1K}$ 、加速电压 $U_{G_2K}$ 和拒斥电压 $U_{G_2A}$ 。

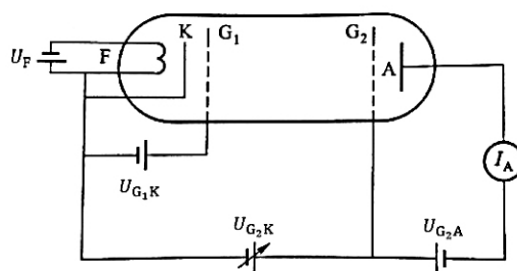


图1 弗兰克-赫兹实验原理图

电子由阴极K发出, 在 $U_{G_1K}$ 的作用下穿过 $G_1$ ,  $U_{G_2K}$ 使电子被加速并向 $G_2$ 运动。在此过程中, 电子可能与氩原子发生碰撞。 $U_{G_2K}$ 刚开始增加时, 电子的能量小于氩原子的第一激发能 $eU_1$ , 则其不会与氩原子发生碰撞或只发生弹性碰撞(损失能量极小), 随着 $U_{G_2K}$ 的增加, 板极电流 $I_A$ 也逐渐增大。当 $U_{G_2K}$ 达到氩原子的第一激发电势时, 在 $G_2$ 附近电子将与氩原子发生非弹性碰撞。这会使氩原子从基态跃迁到第一激发态。损失了能量的电子无法克服 $U_{G_2A}$ 的阻碍作用到达A, 所以 $I_A$ 将显著减小。继续加大 $U_{G_2K}$ , 电子与氩原子发生非弹性碰撞后剩余的能量也随之增大, 电子逐渐克服 $U_{G_2A}$ 到达板极A,  $I_A$ 又开始增大。当 $U_{G_2K}$ 增大到氩原子第一激发电势的2倍时, 电子

收稿日期: 2018-07-12

\* 通讯联系人

会与氩原子发生第二次非弹性碰撞,从而再次损失能量,导致  $I_A$  再次下降。以此类推,随着加速电压  $U_{G2K}$  的不断增加,在  $G_2$  附近电子会与氩原子发生多次非弹性碰撞,使  $I_A$  出现周期性起伏变化而形成图 2 所示的曲线。在图 2 中,相邻两峰值所对应的加速电压之差即氩原子的第一激发电势  $U_1^{[5]}$ 。

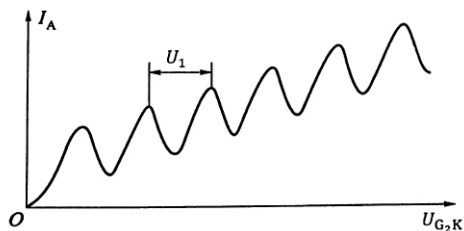


图 2  $I_A-U_{G2K}$  曲线

## 2 实验探究

影响弗兰克-赫兹实验的主要参量是灯丝电压  $U_F$ 、正向电压  $U_{G1K}$  和拒斥电压  $U_{G2A}$ 。使用的实验仪器铭牌上的参考工作参量为:  $U_F=3.0\text{ V}$ 、 $U_{G1K}=1.5\text{ V}$ 、 $U_{G2A}=8.0\text{ V}$ 。分别保持其中两个参量为参考工作参量不变,改变第三个参量进行多次实验。为了保证数据的精确度与曲线的平滑性,从  $0\sim 80\text{ V}$  改变加速电压  $U_{G2K}$  进行高密度测量。在大量实验数据的基础上,使用 MATLAB 软件绘制相应的  $I_A-U_{G2K}$  曲线。然后从每组数据中找出对应曲线上的峰值电压(由于该实验弗兰克-赫兹管的加速电压最大不可超过  $82\text{ V}$ ,所以实验中最多可得到 6 个峰值电压),再依据最小二乘法对这 6 个峰值电压进行拟合,并计算拟合直线的相关系数。最后依据这 6 个峰值电压计算出 5 个氩原子的第一激发电位值(6 个峰值电压中,任意相邻两个峰值电压之差即为氩原子的第一激发电位),再使用贝塞尔公式:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

计算氩原子的第一激发电位的标准偏差。通过观察实验曲线,并结合不同实验条件下所得的相关系数和标准偏差,来确定相应工作参量的最佳值。

### 2.1 确定灯丝电压 $U_F$ 的最佳值

图 3 是保持正向电压  $1.5\text{ V}$ 、拒斥电压  $8.0\text{ V}$  不变,在不同的灯丝电压  $U_F$  下测得的  $I_A-U_{G2K}$  曲线。

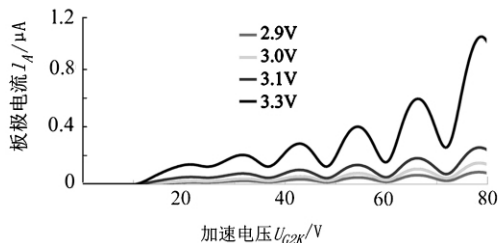


图 3 不同灯丝电压下的  $I_A-U_{G2K}$  曲线

由图 3 可见,灯丝电压对弗兰克-赫兹管的导通电压( $I_A \neq 0$ )和波峰波谷处对应的加速电压值没有影响;灯丝电压增加,波峰与波谷处对应的加速电压值不变,但板极电流增大,曲线整体上移,实验曲线的波峰和波谷的电流差值明显增大,曲线分辨率明显提高。产生上述现象的原因是:阴极单位面积所发射的电流与阴极温度遵从:

$$J = aT^2 e^{-\frac{\omega_0}{kT}} \quad (2)$$

式中  $J$  为阴极单位发射面积所发射的电流,  $a$  为电子发射常数,  $T$  为金属工作温度,  $\omega_0$  为金属逸出功,  $k$  为玻尔兹曼常数<sup>[6]</sup>。所以,灯丝电压的增加会导致阴极温度升高,进而从阴极发射的电流增加,实验曲线的板极电流增大。

由于此时无法依据实验曲线直接选出灯丝电压的最佳值,所以再分别依据当灯丝电压等于  $2.9\text{ V}$ 、 $3.0\text{ V}$ 、 $3.1\text{ V}$ 、 $3.3\text{ V}$  时所得数据,计算对应条件下的相关系数和标准偏差,如表 1 所示。

表 1 不同灯丝电压下的相关系数和标准偏差

灯丝电压 $U_F/\text{V}$	相关系数	标准偏差
2.9	0.999 5	0.822 8
3.0	0.999 4	0.875 8
3.1	0.999 5	0.784 2
3.3	0.999 5	0.791 8

从表 1 中可以看到当灯丝电压  $U_F=2.9\text{ V}$ 、 $3.1\text{ V}$ 、 $3.3\text{ V}$  时,相关系数的值均为 0.999 5。但灯丝电压  $U_F=3.1\text{ V}$  时的标准偏差最小,对应的氩原子的第一激发电位的偏差最小。而且当灯丝电压过大时,不仅会出现板极电流超出量程而无法测量的问题,还会加快 F-H 管的衰老。

因此,结合对图 3 和表 1 的分析,可知:使用

该弗兰克-赫兹管进行实验时,灯丝电压宜采用  $U_F = 3.1 \text{ V}$ 。

## 2.2 确定正向电压 $U_{G1K}$ 的最佳值

图 4 是保持灯丝电压  $3.0 \text{ V}$ 、拒斥电压  $8.0 \text{ V}$  不变,在不同的正向电压  $U_{G1K}$  下测得的  $I_A-U_{G2K}$  曲线。

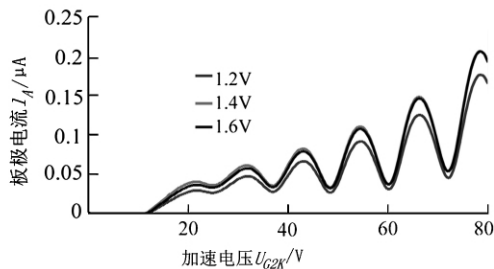


图 4 不同正向电压下的  $I_A-U_{G2K}$  曲线

由图 4 可知,正向电压的改变对弗兰克-赫兹管的导通电压 ( $I_A \neq 0$ ) 和波峰波谷处对应的加速电压值没有影响,图中 3 条实验曲线的波峰与波谷处对应的加速电压基本一致。在第一栅极  $G_1$  上加较小的正向电压,可以用来驱散阴极附近堆积的电子云,消除空间电荷效应对阴极电子发射的影响,从而提高发射效率<sup>[4]</sup>。实验中,在  $1.2 \sim 1.8 \text{ V}$  范围内改变正向电压值,每隔  $0.1 \text{ V}$  进行一次测量,结果发现依据这些数据绘制的实验曲线均十分相近。因此,正向电压较小的改变,对该弗兰克-赫兹管的工作状态影响不大。在图 4 中仅列出具有代表性的 3 条实验曲线。可以看到,当正向电压  $U_{G1K} = 1.4 \text{ V}$  时,板极电流的幅值以及峰值电流与谷值电流之差达到最大,曲线的分辨率达到最高。再继续增加正向电压,板极电流反而会减小,并且波峰与波谷的差距也逐渐减小,曲线分辨率下降。

依据当正向电压等于  $1.2 \text{ V}$ 、 $1.4 \text{ V}$ 、 $1.6 \text{ V}$  时所得数据,计算对应条件下的相关系数和标准偏差,结果发现不同条件下的相关系数、标准偏差的值均十分接近,此时无法体现出不同实验条件对相关系数和标准偏差的影响。

因此,依据对图 4 分析,可知:使用该弗兰克-赫兹管进行实验时,正向电压宜采用  $U_{G1K} = 1.4 \text{ V}$ 。

## 2.3 确定拒斥电压 $U_{G2A}$ 的最佳值

图 5 是保持灯丝电压  $3.0 \text{ V}$ 、正向电压  $1.5 \text{ V}$

不变,在不同的拒斥电压  $U_{G2A}$  下测得的  $I_A-U_{G2K}$  曲线。

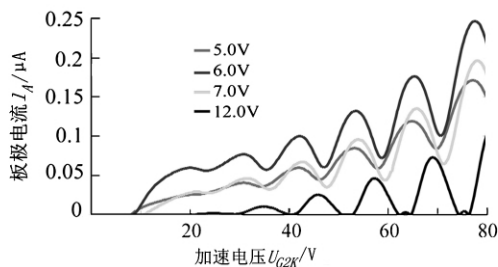


图 5 不同拒斥电压下的  $I_A-U_{G2K}$  曲线

由图 5 可见,拒斥电压增加会使得弗兰克-赫兹管的导通电压 ( $I_A \neq 0$ ) 增大。由于电子与电场所组成的体系的能量守恒,因此只有具有一定动能的电子才能穿过  $G_2$  参与板极电流的形成。所以当拒斥电压增加时,实验曲线的峰宽度变小、谷宽度变大,并且整个实验曲线向右移动。当拒斥电压较小时,其对电子筛选作用小,从而曲线的峰值电流与谷值电流之差较小,曲线分辨率较低。当拒斥电压增大时,其对电子的筛选作用增大,从而曲线的峰值电流与谷值电流之差增大,曲线分辨率提高。但是增大的拒斥电压也会过滤掉更多的低能电子,使得曲线的谷变宽。当拒斥电压过大时,更多的电子被筛选掉,使得峰值电流减小。由图 5 中的曲线可以看出,拒斥电压等于  $6.0 \text{ V}$  时,对应曲线的板极电流最大,曲线的峰谷差值最大、分辨率最高,曲线形状最好。

由图 5 已经可以确定拒斥电压的最佳值为  $6.0 \text{ V}$ 。为了检验选择的可靠性,可以再从相关系数和标准偏差的角度出发选择拒斥电压的最佳值。最后再将两次选择结果比较。

为此分别依据当拒斥电压等于  $5.0 \text{ V}$ 、 $6.0 \text{ V}$ 、 $7.0 \text{ V}$ 、 $12.0 \text{ V}$  时所得数据,计算对应条件下的相关系数和标准偏差,如表 2 所示。

表 2 不同拒斥电压下的相关系数和标准偏差

拒斥电压 $U_{G2A} / \text{V}$	相关系数	标准偏差
5.0	0.999 7	0.525 2
6.0	0.999 7	0.529 1
7.0	0.999 5	0.773 3
12.0	0.984 5	0.630 9

从表 2 可以看出当拒斥电压等于  $5.0 \text{ V}$  和  $6.0 \text{ V}$  时,相关系数均为最高,相关系数的值为  $0.999 7$ 。

当拒斥电压等于 5.0 V 时,计算的氩原子第一激发电位值的标准偏差最小,其次是拒斥电压等于 6.0 V 时的标准偏差值,而且这两个值十分接近。但是当拒斥电压等于 5.0 V 时,曲线只有 5 个完整的波峰,这会使实验结果出现随机误差的概率增大。因此,可以确定拒斥电压的最佳值为 6.0 V,与根据图 5 分析所得结论一致。

因此,结合对图 5 和表 2 的分析,可知:使用该弗兰克-赫兹管进行实验时,拒斥电压宜采用  $U_{G2A}=6.0$  V。

综合以上分析可知,使用该弗兰克-赫兹管进行实验时,宜选取灯丝电压  $U_F=3.1$  V、正向电压  $U_{G1K}=1.4$  V、拒斥电压  $U_{G2A}=6.0$  V,这样获得的实验效果最佳。

### 3 最佳实验条件下的实验结果

在上述最佳实验条件下测得的实验曲线如图 6 所示。其峰位序数  $n$  和对应的加速电压  $U_{G2K}$  数据见表 3。

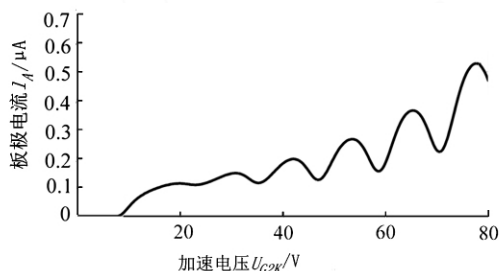


图 6 最佳实验条件下的实验曲线

表 3 峰位序数  $n$  和对应的加速电压  $U_{G2K}$

峰位序数/ $n$	1	2	3	4	5	6
加速电压 $U_{G2K}/V$	19.9	30.7	42.0	53.5	65.3	77.6

知道弗兰克-赫兹管的阴极、栅极和板极一般使用不同的金属材料制造而成,因此会产生接触电势差,使得实际加在电子上的加速电压不等于  $U_{G2K}$ ,而等于  $U_{G2K}$  与接触电势差的代数和,所以整个实验曲线会向右偏移。峰位序数  $n$  与对应加速电压  $U_{G2K}$  之间具有线性关系:

$$U_{G2K} = a + bn \quad (3)$$

式中  $a$  为接触电势差,  $b$  为氩原子的第一激发电位。

在对表 3 的数据进行处理时,选用最小二乘法,使用 MATLAB 软件绘制的线性拟合直线如图 7 所示。通过编程计算可得  $a = 7.7867$  V,  $b = 11.537$  V, 相关系数  $r = 0.9997$ 。

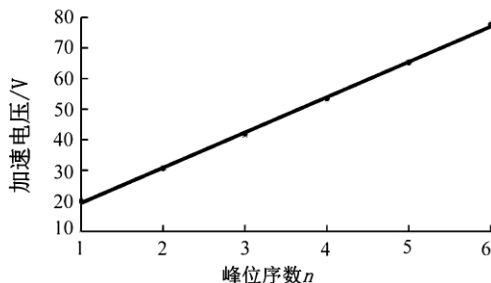


图 7 线性拟合直线图

根据上述计算结果可知,实验测得的氩原子第一激发电位为 11.537 V,与标准值 13.06 V 相差较大。依据实际氩原子的能量模型,可知最终得到的第一激发电位应是基态与其两个亚稳态(与基态的能量差分别为 11.55 V 和 11.72 V)之间的电势差<sup>[1]</sup>。也就是说测得的氩原子第一激发电位值应该大于 11.55 V 且小于 11.72 V。但由于实验误差的影响,实际测得的激发电位值为 11.537 V,小于 11.55 V。因此,可知:在实验中,电子与氩原子的非弹性碰撞使得氩原子跃迁到能量差值为 11.55 eV 的亚稳态上的概率更大。所以实际上通过实验和计算,得到的是氩原子第一亚稳态的激发电位<sup>[7]</sup>。

### 4 结 论

文章首先在大量实验的基础上研究分析了各工作参数对实验结果的影响。之后结合实验曲线、相关系数以及标准偏差,确定了该弗兰克-赫兹管的最佳实验参数为灯丝电压  $U_F=3.1$  V、正向电压  $U_{G1K}=1.4$  V、拒斥电压  $U_{G2A}=6.0$  V。最后使用 MATLAB 软件编程,采用最小二乘法对最佳实验条件下的测量结果进行处理,得到氩原子的第一激发电位为 11.537 V。更加深入的分析表明,通过该实验得到的氩原子的第一激发电位实际上是氩原子第一亚稳态的激发电位。

#### 参考文献:

- [1] 张里荃,马艳梅,郝二娟.弗兰克-赫兹实验最佳实验

- 条件及第一激发电位的研究[J].物理实验,2011,31(8):37-38.
- [2] 孙桂芳,阮树仁,盛淑芳,等.弗兰克-赫兹实验中氩原子第一激发电位的研究[J].物理实验,2017,12(增):1-3.
- [3] 朱筱玮,陈永丽.充氩弗兰克-赫兹实验研究[J].大学物理,2007,26(7):46-48.
- [4] 安可,高松松,林上金,等.如何选择弗兰克-赫兹实验的工作参量[J].大学物理实验,2014,27(6):34-36.
- [5] 谭伟石.近代物理实验[M].南京:南京大学出版社,2013:1-3.
- [6] 金哲.弗兰克-赫兹实验最佳条件的确定[J].延边大学学报,2006,32(3):169-171.
- [7] 赵玉娜,马俊刚,丛红路,等.弗兰克-赫兹实验中两种测量模式及数据处理探讨[J].大学物理实验,2017,30(3):121-124.

## An Improved Method of Determining the Best Working Parameters of Franck-Hertz Experiment

WANG Jie, SI Rong-rong\*

(Nanjing University of Science & Technology, Jiangsu Nanjing 210094)

**Abstract:** The optimal experimental condition and the first excitation potential of argon atom were studied. Through the analysis of the  $I_A-U_{G_2K}$  curve of different experimental conditions and the connection of peak positions with the linear correlation coefficient by the least squares fitting and the standard deviation of the first excitation potential of argon atom, optimized parameters of the Franck-Hertz experiment was determined. Optimum parameters were as follows: the filament voltage 3.1 V, the forward voltage 1.4V and the spurn voltage 6.0 V. Finally, the first excitation potential of argon atom was determined to be 11.537V under the optimal experimental condition.

**Key words:** Franck-Hertz experiment; the first excitation potential; filament voltage; forward voltage; spurn voltage; correlation coefficient; standard deviation