

文章编号:1005-4642(2019)02-0019-05

充氩弗兰克-赫兹实验波谷处加速电压及最佳实验参量

窦欣悦, 司嵘嵘

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要:给出了弗兰克-赫兹管的导通电压及波谷处加速电压的表达式, 并且讨论了灯丝电压、正向电压及减速电压对实验曲线的影响. 通过分析实验曲线及数据得出最佳实验参量为: 灯丝电压 2.8 V, 正向电压 1.6 V, 减速电压 8.0 V. 在最佳参量下测得氩原子第一亚稳态的激发电位为 11.59 V.

关键词: 弗兰克-赫兹实验; 加速电压; 灯丝电压; 正向电压; 减速电压; 第一激发电位

中图分类号: O562

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2019.02.003

弗兰克-赫兹实验以慢速电子与稀薄气体中原子的碰撞揭示了原子内部的能量量子化, 为玻尔理论提供了直接的实验证据^[1]. 通过弗兰克-赫兹实验, 可以了解电子与原子相互作用的过程, 并最终得到原子第一亚稳态的激发电位. 在弗兰克-赫兹实验中, 多种因素共同对实验曲线起作用, 要想得到最佳的实验结果, 选择合适的实验参量至关重要^[2]. 本文推导了导通电压以及波谷对应的加速电压的表达式, 利用充氩弗兰克-赫兹管进行了不同情况下的多次实验测量, 对得到的不同形状的实验曲线进行对比分析, 给出该弗兰克-赫兹管的最佳实验参量, 并测得该参量下的氩原子第一亚稳态的激发电位.

1 实验原理分析

弗兰克-赫兹实验原理如图 1 所示. F-H 管中充以待测量的气体氩气. F-H 管内有 4 个电极: 阴极 K、第一栅极 G_1 、第二栅极 G_2 以及板极 A. 各极之间施加电压, 分别为灯丝电压 U_F 、正向电压 U_{G_1K} 、加速电压 U_{G_2K} 和减速电压 U_{G_2A} .

在 U_{G_2K} 的作用下, 电子会被加速并向第二栅极运动. 在此过程中, 电子可能会与 F-H 管中的氩原子碰撞. 假设氩原子的第一激发电位为 U_0 . 当 U_{G_2K} 较小时, 电子与氩原子发生弹性碰撞, 能量损失极小, 板极电流 I_A 随加速电压 U_{G_2K} 的增

大而上升. 当 U_{G_2K} 增加到 U_0 时, 一部分电子会与氩原子发生非弹性碰撞, 氩原子得到了电子的全部能量后, 由基态跃迁到第一激发态, 而电子本身由于损失了能量, 不能克服 U_{G_2A} 的作用到达板极 A, 板极电流减小. 随加速电压 U_{G_2K} 的不断增大, 电子在 G_2 附近发生多次非弹性碰撞, 导致板极电流下降, 形成周期性起伏变化的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线, 如图 2 所示. 该曲线是能量量子化导致能量被吸收的结果, 也是原子能级量子化的体现^[3].

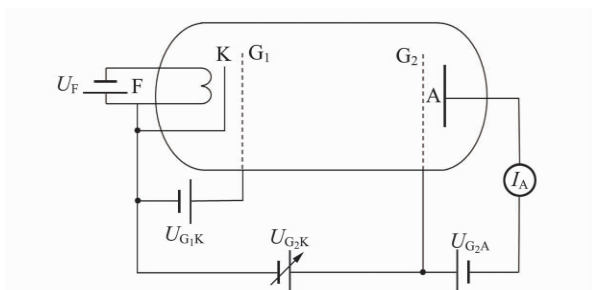
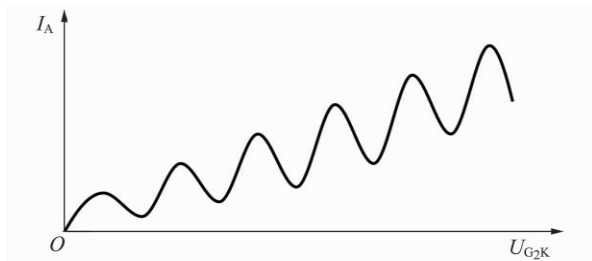


图1 弗兰克-赫兹实验原理图

图2 周期性起伏的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线

收稿日期: 2018-11-06

作者简介: 窦欣悦(1998—), 女, 黑龙江拜泉人, 南京理工大学理学院 2015 级本科生.

通讯作者: 司嵘嵘(1981—), 女, 江苏南京人, 南京理工大学理学院讲师, 硕士, 从事近代物理教学工作.



2 特征点的加速电压分析

2.1 导通电压 $U_{\text{导}}$

加速电压从 0 开始增加,若电子具有的能量刚好能克服第二栅极 G_2 与板极 A 之间减速电压 U_{G_2A} 的作用从而到达板极 A,使得板极电流由 0 开始缓慢增加,此时 U_{G_2K} 的值即为导通电压. 假设电子从阴极发射出来后,初始能量为 w_0 ,接触电势差 a 对电子做负功,加速电压 U_{G_2K} 对电子做正功,减速电压 U_{G_2A} 对电子做负功,最终电子到达板极时,能量为 0,可列等式:

$$w_0 - ea + eU_{G_2K} - eU_{G_2A} = 0, \quad (1)$$

此时,导通电压

$$U_{\text{导}} = -\frac{w_0}{e} + U_{G_2A} + a. \quad (2)$$

2.2 波谷对应的加速电压 $U_{\text{谷}}$

由图 2 可知,当加速电压 U_{G_2K} 的值刚好大于 $U_{\text{谷}}$ 时,板极电流开始重新增加,所以波谷处恰好是电子与氩原子发生非弹性碰撞导致损失掉能量 neU_0 ($n=1,2,3\cdots$) 后,剩余的能量刚好能够克服减速电压 U_{G_2A} 的作用从而到达板极 A,导致电流再次回升. 由上述分析可得,序号为 n 的波谷处对应的电子能量是 $neU_0 + eU_{G_2A}$ ($n=1,2,3\cdots$),在电子从阴极到达第二栅极 G_2 的过程中,初始能量为 w_0 ,接触电势差 a 对电子做负功,加速电压 U_{G_2K} 对电子做正功,则

$$neU_0 + eU_{G_2A} = w_0 - ea + eU_{G_2K}, \quad (3)$$

此时

$$U_{\text{谷}} = -\frac{w_0}{e} + a + nU_0 + U_{G_2A}, \quad n=1,2,3\cdots \quad (4)$$

由(4)式可以看到,2 个相邻波谷之间的加速电压的差值即为氩原子的第一激发电位 U_0 .

3 实验探究

在实验前,预先设定仪器的灯丝电压 $U_F = 2.8 \text{ V}$,正向电压 $U_{G_1K} = 1.5 \text{ V}$,减速电压 $U_{G_2A} = 7.0 \text{ V}$,电流量程 $10.0 \mu\text{A}$,终止电压 80.0 V ,电压步距 0.2 V .

由于每个 F-H 管连续使用,其性能会发生改变,所以工作参量也需要做出相应的调整. 在实验参量预置值的基础上分别改变 U_F , U_{G_1K} 和 U_{G_2A} 这 3 个实验条件进行多次测量. 在测得大量原始数据的基础上,利用 Matlab 软件作出 I_A -

U_{G_2K} 曲线.

3.1 灯丝电压 U_F 对 I_A - U_{G_2K} 曲线的影响

保持 $U_{G_1K} = 1.5 \text{ V}$ 和 $U_{G_2A} = 7.0 \text{ V}$ 不变,在不同灯丝电压 U_F 下测得的 I_A - U_{G_2K} 曲线如图 3 所示.

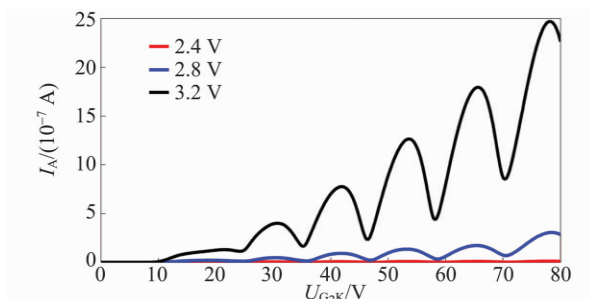


图 3 不同灯丝电压 U_F 下的 I_A - U_{G_2K} 曲线

由图 3 可知,板极电流的值随着 U_F 的增大而增大,且呈指数规律上升,类似于二极管中热电子发射的理查逊定律^[4]. 随着灯丝电压的增加,波谷处对应的加速电压的值基本不变. 由(4)式可以得到,在电子的初始能量 w_0 以及接触电势差 a 不变的情况下, $U_{\text{谷}}$ 与 U_F 无关,所以 U_F 的改变并不影响波谷处加速电压的值. 由图 3 还可以看到,随着 U_F 的增加, I_A 的值随之增加,相邻峰谷间板极电流的差值也会增大,实验曲线分辨率更高.

2.4, 2.8, 3.2 V 灯丝电压下的相邻峰谷值的板极电流之差如表 1 所示.

表 1 不同灯丝电压下的相邻峰谷板极电流之差

序号	$\Delta I / (10^{-7} \text{ A})$		
	2.4 V	2.8 V	3.2 V
1	0.04	0.23	1.31
2	0.04	0.37	2.87
3	0.07	0.79	6.13
4	0.09	1.13	10.33
5	0.09	1.40	13.57
6	0.10	2.37	16.18

随着灯丝电压的增大,实验曲线分辨率不断提高,其原因是从阴极发射出来电子的数目与灯丝温度成正比,灯丝的温度随着灯丝电压的增大而升高,发射出来的电子数目也随之增多,板极电流增大. 但是过大的灯丝电压一方面会导致发生溢出现象,从而无法测量氩原子的第一激发电位;

另一方面会加快 F-H 管的老化速度,导致其寿命变短^[5]. 该 F-H 管最佳的灯丝电压值为 2.8 V.

3.2 正向电压 U_{G_1K} 对 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线的影响

保持 $U_F=2.8$ V 和 $U_{G_2A}=7.0$ V 不变,在不同正向电压 U_{G_1K} 下测得 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线如图 4 所示.

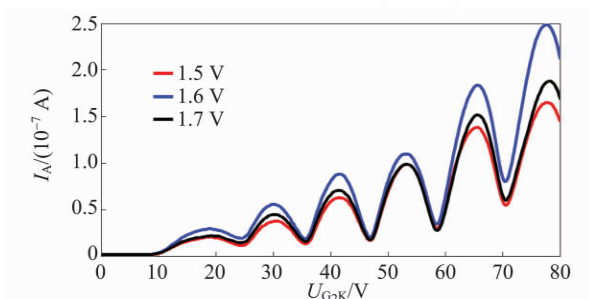


图 4 不同正向电压 U_{G_1K} 下的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线

在阴极附近存在空间电荷效应. 电子由阴极发射出来后,具有的绝大多数能量被用来克服逸出功,导致其初速度很小. 电子集中在阴极周围,形成空间电荷层,其电势低于灯丝电势^[4]. 此空间电场的作用表现为抑制电子发射. 在第一栅极 G_1 上加小的正向电压后,在阴极附近堆积的电子会在 U_{G_1K} 的作用下,由阴极向第一栅极运动,提高了电子的发射效率^[6]. 所以可以通过控制 U_{G_1K} 的大小来改变阴极发射电子数目.

由图 4 可知,在不同的正向电压下, F-H 管的导通电压 $U_{导}$ 的值不会发生改变. 由(2)式可以得到,在电子的初始能量 ω_0 以及接触电势差 α 不变的情况下,改变正向电压对实验曲线的导通电压并不产生影响. 还可以看到,正向电压发生变化,波谷对应的加速电压也不变. 由(4)式可以得到,在 ω_0 以及 α 不变的情况下, $U_{谷}$ 与 U_{G_1K} 无关,所以 U_{G_1K} 的改变并不影响波谷处加速电压的大小.

1.5, 1.6, 1.7 V 正向电压下,相邻峰谷值的板极电流之差如表 2 所示. 由表 2 中数据可得, 1.6 V 与 1.5 V 的曲线相比较,差值变大,实验现象更明显. 这是由于当 $U_{G_1K}=1.5$ V 时,正向电压很小,不足以使绝大多数电子克服空间电荷层对电子的拉回作用,导致到达第一栅极 G_1 的电子数量较小,最终到达板极 A 的电子数目少,板极电流小,峰与谷之间的差距小; 1.7 V 与 1.6 V 的曲线相比较,曲线的分辨率明显下降,这是由于此时发射的电子数量达到饱和,空间电荷层对电

子的发射不再有抑制作用,若继续增大 U_{G_1K} ,到达板极 A 的电子数目将减少, I_A 减小,峰谷值之差也会减小. 所以,只有取合适的正向电压值,才会得到最佳的实验曲线分辨率. 该 F-H 管最佳的正向电压值为 1.6 V.

表 2 不同正向电压下的相邻峰谷板极电流之差

序号	$\Delta I / (10^{-7} \text{ A})$		
	1.5 V	1.6 V	1.7 V
1	0.19	0.28	0.21
2	0.26	0.37	0.30
3	0.50	0.70	0.55
4	0.82	0.90	0.81
5	1.09	1.49	1.24
6	1.11	1.69	1.29

3.3 减速电压 U_{G_2A} 对 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线的影响

保持 $U_F=2.8$ V 和 $U_{G_1K}=1.5$ V 不变,在不同减速电压 U_{G_2A} 下测得的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线如图 5 所示.

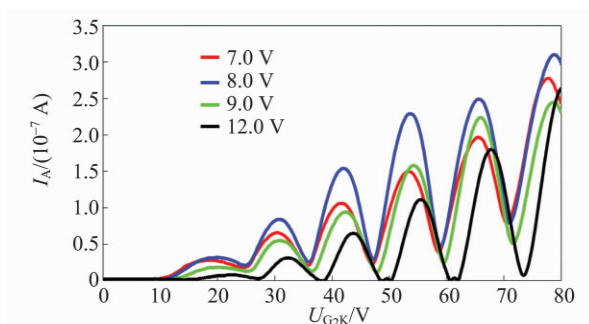


图 5 不同减速电压 U_{G_2A} 下的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线

由图 5 可见, 12.0 V 对应曲线的第 2, 3, 4 个波谷在图中不完整,说明减速电压增加到一定程度会使 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线截止,所以减速电压的取值须在合适的范围内,不能过大. 接下来的讨论仅针对 7.0, 8.0, 9.0 V 3 条曲线. 减速电压的增大,在实验曲线的波峰两侧,板极电流改变的速度快,改变的幅值大;波谷两侧板极电流改变的速度慢,改变的幅值小;实验曲线整体向右移动. 由(4)式可知,在 n 值相同的情况下,即 3 条完整曲线相同序号的波谷处,加速电压的值随着减速电压 U_{G_2A} 的增大而增大,在图 5 中表现为曲线整体向右移动. 由图 5 还可以看到,当减速电压较小时,峰谷对应的板极电流差值很小;随着减速电压的增加,电流之差变大;但当减速电压过大时,差

值又会变小.

相邻峰谷的板极电流之差如表 3 所示.

表 3 不同减速电压下的相邻峰谷板极电流之差

序号	$\Delta I / (10^{-7} \text{ A})$		
	7.0 V	8.0 V	9.0 V
1	0.26	0.30	0.17
2	0.48	0.63	0.42
3	0.85	1.29	0.82
4	1.27	2.00	1.47
5	1.58	2.02	1.99
6	1.99	2.31	1.95

当 U_{G_2A} 较小时, 减速电压对电子的减速作用较小, 电子与氩原子发生非弹性碰撞损失能量 neU_0 ($n=1, 2, 3 \dots$) 后剩余的能量只需很小便能克服 U_{G_2A} 的作用到达板极 A, 引起电流的再次回升, 表现为峰谷对应的电流差值不大; 随着 U_{G_2A} 的增大, 只有剩余能量较大的电子才能到达板极 A, 使得峰谷电流之差变大, 实验曲线分辨率提高; 当 U_{G_2A} 过大时, 绝大部分的电子不能克服减速电压的作用到达板极 A, 板极电流减小.

在同一减速电压下, 随着加速电压的增大, 相邻 2 个峰的加速电压之差也不断增大. 当 $U_{G_2A} = 8.0 \text{ V}$ 时, 5 组峰间距值依次为 10.8, 11.2, 11.7, 11.9, 13.2 V.

在 F-H 管中运动的电子可以分为与氩原子发生非弹性碰撞的电子 (占电子总数的百分比为 α)、与氩原子发生弹性碰撞的电子以及不与氩原子发生碰撞的电子. 实验曲线呈现出波峰是由于板极电流的下降与上升达到了平衡. 电流的下降是与氩原子发生非弹性碰撞的电子引起的, 而电流的上升源于其他 2 种电子速度的增加.

首先对第 1 个波峰的形成进行分析. 在 U_{G_2K} 从 0 开始增加直到等于 U_0 时, 一部分电子会与氩原子发生非弹性碰撞, 从而损失能量 eU_0 . 这些电子剩余的能量不足以克服减速电压的作用, 从而不能到达板极 A, 导致板极电流的下降. 同时, 随着 U_{G_2K} 的逐渐增加, 电子的动能也在增加, 其速度变大, 未与氩原子发生非弹性碰撞的电子在单位时间内通过板极 A 某一横截面的电荷量增加, 从而使得板极电流增大. 如果电流下降的程度大于电流上升的程度, 则电流开始下降.

第 2 个波峰处板极电流的下降, 是由与氩原

子连续发生 2 次非弹性碰撞的电子引起的. 设从阴极发射出的电子的总数为 m , 且与氩原子发生非弹性碰撞的电子占总电子数的百分比仍为 α , 则上述电子的数量为 $m\alpha^2$, 相比于只与氩原子发生 1 次非弹性碰撞的电子数目减少. 若板极电流再次下降, 则需要更大的加速空间, 以增加上述电子的数量, 使得电流下降的程度大于上升的程度. 以此类推, 每个峰值的形成都需要比前一个峰值更大的加速空间, 所以峰间距会随着 U_{G_2K} 的增加而增大. 该 F-H 管最佳的减速电压值为 8.0 V.

4 实验数据处理及分析

在上述最佳实验参量下得到的 $I_A - U_{G_2K}$ 曲线如图 6 所示. 由前述分析可得, 2 个相邻波谷的加速电压之差即为氩原子的第一激发电位 U_0 . 谷位序数 n 与对应的加速电压具有线性关系, 即 $U_{G_2K} = a + U_0 n$, 其中 a 为接触电势差等因素引起的电势差, U_0 为氩原子的第一激发电位^[7].

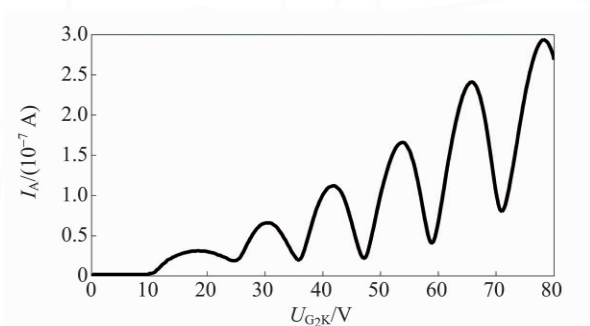


图 6 最佳参量下的 $I_A - U_{G_2K}$ 曲线

利用 Excel 数据处理软件, 基于最小二乘法对最佳实验参量情况下的实验数据进行处理, 得到的线性拟合曲线如图 7 所示.

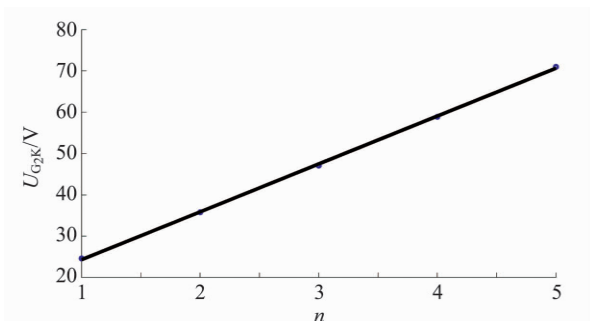


图 7 线性拟合曲线

由 Excel 给出的参量可得, $a = 12.71 \text{ V}$, $U_0 = 11.59 \text{ V}$, 线性相关系数 $r = 0.9997$. 所以氩

原子的第一激发电位为 11.59 V,与真实值 13.06 V相比,差距较大.实际上,11.59 V 不是氩原子的第一激发电位.这是由于在氩原子的基态与第一激发态之还存在着 2 个亚稳态,它们与基态的能量差值分别为 11.55 eV 和 11.72 eV.电子在 2 个亚稳态上的停留时间(10^{-3} s)要比其在第一激发态的停留时间(10^{-8} s)长得多^[8].在此 F-H 管最佳实验参量下,氩原子的激发电位为 11.59 V,在 11.55 V 与 11.72 V 之间,并且离亚稳态 11.55 V 更为接近,所以电子在与氩原子发生非弹性碰撞后,被激发到第一激发态上的氩原子跃迁到电势为 11.55 V 的亚稳态上,也可以说,相比于电势为 11.72 V 的亚稳态,电子跃迁到与基态能量差值为 11.55 eV 的亚稳态上的概率更大.所以,实验中测得的结果是氩原子第一亚稳态的激发电位.

5 结束语

给出了弗兰克-赫兹实验的导通电压及波谷对应的加速电压的表达式,探究了 U_F , U_{G_1K} 以及 U_{G_2A} 对 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线的影响,最终得到氩原子第一亚稳态的激发电位为 11.59 V.在得到波谷处 U_{G_2K} 表达式的前提下对 3 种情况的实验曲线进行

分析.在此基础上,可以对波峰处加速电压的表达式进一步探究,以期对弗兰克-赫兹实验的原理理解得更为透彻.

参考文献:

- [1] 张孔时,丁慎训.物理实验教程[M].北京:清华大学出版社,2002:330-334.
- [2] 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.
- [3] 谭伟石.近代物理实验[M].南京:南京大学出版社,2013:1-3.
- [4] 王丽香,李宝胜.弗兰克-赫兹实验最佳工作参量的确定[J].物理实验,2006,26(10):38-40.
- [5] 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,2017,37(增):1-3.
- [6] 蒲贤洁,刘高斌,何光宏,等.弗兰克-赫兹实验中不稳定状态的对应措施[J].物理实验,2017,37(7):1-5.
- [7] 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.
- [8] 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.

Accelerating voltage at valleys and the optimal condition of argon-filled Franck-Hertz experiment

DOU Xin-yue, SI Rong-rong

(School of Science, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The equations of the break-over voltage and the accelerating voltage at valleys were given, and influences of filament voltage, the forward voltage and the exclude voltage on the curve were also discussed. Through the analysis of the $I_A-U_{G_2K}$ curve and other experimental data, optimized parameters of the experiment were determined: the filament voltage 2.8 V, the forward voltage 1.6 V and the exclude voltage 8.0 V. Argon atom's excitation potential of the first metastable state was determined to be 11.59 V under the optimal experimental condition.

Key words: Franck-Hertz experiment; accelerating voltage; filament voltage; forward voltage; exclude voltage; first excitation potential

[责任编辑:任德香]