

实验1.2 弗兰克-赫兹实验

根据光谱分析等建立起来的玻尔原子结构模型指出原子的核外电子只能量子化的长存于各稳定能态 E_n ($n=1, 2, \dots$), 它只能选择性地吸收外界给予的量子化的能量差值($E_n - E_k$), 从而处于被激发的状态; 或电子从激发态选择性地释量子化的能量 $E_n - E_k = h\nu_{nk}$, 回到能量较低的状态, 同时放出频率为 $h\nu_{nk}$ 的光子。其中 h 为普朗克常数。

1914年, 德国科学家弗兰克(J. Franck)和赫兹(G. Hertz)用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法, 使原子从低能级激发到高能级。并通过对电子与原子碰撞时能量交换的研究, 直接证明了原子内部能量的量子化。弗兰克和赫兹的这项工作获得了1925年度的Nobel物理学奖金。

弗兰克——赫兹实验仪重复了上述电子轰击原子的实验, 通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换, 使原子从低能级跃迁到高能级, 直接观测到原子内部能量发生跃变时, 吸收或发射的能量为某一定值, 从而证明了原子能级的存在及波尔理论的正确性。

一、实验目的

1. 通过测氩原子第一激发电位, 了解Franck和Hertz在研究原子内部能量量子化方面所采用的实验方法。
2. 了解电子和原子碰撞和能量交换过程的微观图像。

二、实验仪器

FH-1A Franck-Hertz 实验仪、示波器等。

三、实验原理

图1是充氩四极 Franck-Hertz 实验原理图。

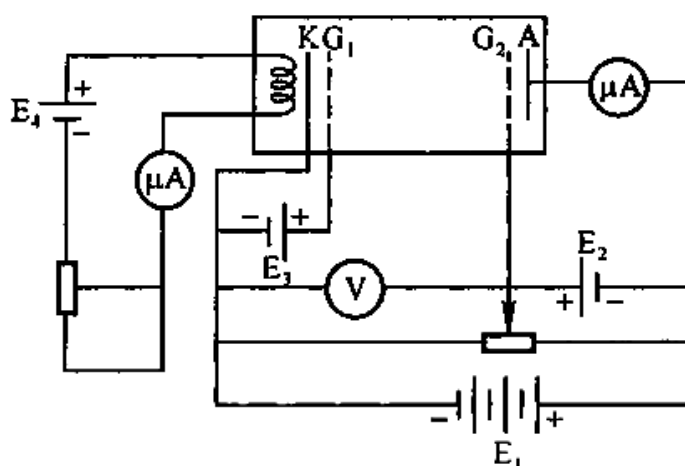


图1 Franck-Hertz 实验原理图

电子与原子的碰撞过程可以用一下方程描述:

$$1/2m_e v^2 + 1/2MV^2 = 1/2m_e v'^2 + 1/2MV'^2 + \Delta E \quad (2.1)$$

式中：

- m_e ——原子质量；
- M ——电子质量；
- v ——电子碰撞前的速度；
- v' ——电子碰撞后的速度；
- V ——原子碰撞前的速度；
- V' ——原子碰撞后的速度；
- ΔE ——原子碰撞后内能的变化量。

按照波尔原子能级理论，

$$\begin{aligned} \Delta E=0 & \quad \text{弹性碰撞；} \\ \Delta E=E_1-E_0 & \quad \text{非弹性碰撞；} \end{aligned} \quad (2.2)$$

式中： E_0 ——原子基态能量； E_1 ——原子第一激发态能量。

电子碰撞前的动能 $1/2m_e v^2 < E_1-E_0$ 时，电子与原子的碰撞为完全弹性碰撞， $\Delta E=0$ ，

原子仍然停留在基态。电子只有在加速电场的作用下碰撞前获得的动能 $1/2m_e v^2 \geq E_1-E_0$ ，才能在电子产生非弹性碰撞，使得电子获得某一值（ E_1-E_0 ）的内能从基态跃迁到第一激发态，调整加速电场的强度，电子与原子由弹性碰撞到非弹性碰撞的变化过程将在电流上显现出来。 Franck-Hertz 管即是为此目的而专门设计的。

在充入氩气的 F-H 管中（如图 2 所示），阴极 K 被灯丝加热发射电子，第一栅极（G1）与阴极 K 之间的电压 V_{G1K} 约为 1.5V，其作用是消除空间电荷对阴极 K 的影响。当灯丝加热时，热阴极 K 发射的电子在阴极 K 与第二栅极（G2）之间正电压形成的加速电场作用下被加速而取得越来越大的动能，并与 V_{G2K} 空间分布的气体氩原子发生如 (2.1) 式所描述的碰撞而进行能量交换。第二栅极（G2）和 A 极之间的电压称为拒斥电压，起作用使能量损失较大的电子无法达到 A 极。

阴极 K 发射的电子经第一栅极（G1）选择后部分电子进入 G1G2 空间，这些电子在加速下与氩原子发生碰撞。初始阶段， V_{G2K} 较低，电子动能较小，在运动过程中与氩原子作弹性碰撞，不损失能量。碰撞后到达第二栅极（G2）的电子具有动能 $1/2m_e v'^2$ ，穿过 G2 后将受到 V_{G2K} 形成的减速电场的作用。只有动能 $1/2m_e v'^2$ 大于 eV_{G2A} 的电子才能到达阳极 A 形成阳极电流 I_A ，这样， I_A 将随着 V_{G2K} 的增加而增大，如图 I_A-V_{G2K} 曲线 Oa 段所示。

当 V_{G2K} 达到氩原子的第一激发电位 13.1V 时，电子与氩原子在第二栅极附近产生非弹性碰撞，电子把从加速电场中获得的全部能量传给氩原子，使氩原子从较低能级的基态跃迁到较高能级的第一激发态。而电子本身由于把全部能量给了氩原子，即使他能穿过第二栅极也不能克服 V_{G2A} 形成的减速电场的拒斥作用而被拆回到第二栅极，所以阳极电流将显著减少，随着 V_{G2A} 的继续增加，产生非弹性碰撞的电子越来越多， I_A 将越来越小，如图 2.2 曲线 ab 段所示，直到 b 点形成 I_A 的谷值。

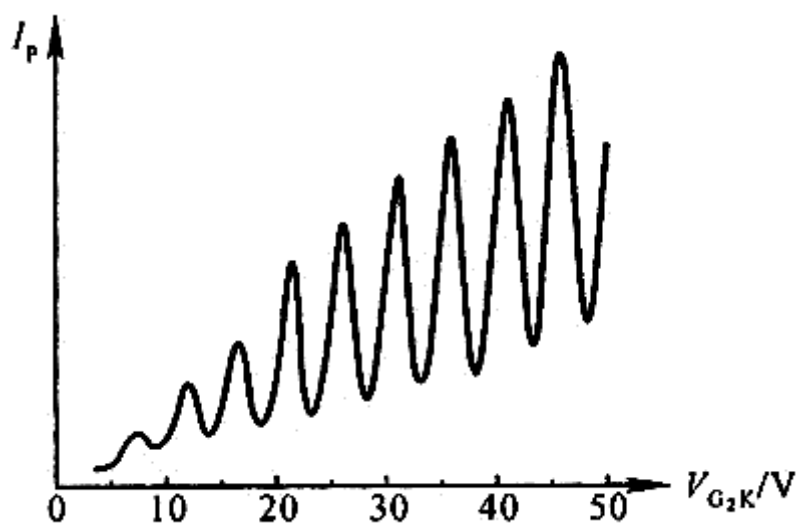


图 2 I_A — V_{G2K} 曲线

b 点以后继续增加 V_{G2K} ，电子在 $G2K$ 空间与氩原子碰撞后到达 $G2$ 时的动能足以克服 V_{G2A} 加速电场的拒斥作用而到达阳极 (A) 形成阳极的电流 I_A ，与 Oa 段类似，形成图 2.2 曲线 bc 段。

直到 V_{G2K} 为 2 倍氩原子的第一激发电位时，电子在 $G2K$ 空间有回音第二次非弹性碰撞而失去能量，因此又形成第二次阳极电流 I_A 的下降，如图 2.2 曲线 cd 段，以此类推， I_A 随着 V_{G2K} 的增加而呈周期性的变化。相邻两峰（或谷），对应的 V_{G2K} 的差即为氩原子的第一激发电位值。

四、实验仪面板说明

FH-1A 弗兰克—赫兹实验仪面板布置如图 3 所示：

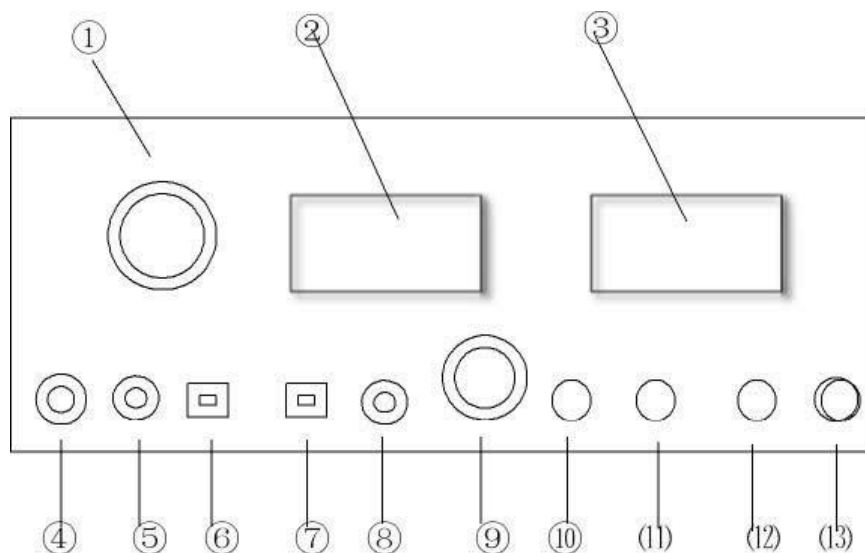


图 3 FH-1A Franck-Hertz 实验仪面板布置图

其中：

- ① 是 I_A 的量程切换开关，分 4 档：1 μ A/100nA/10nA/1nA
- ② 是电流表，指示 I_A 的电流：

$I_A = I_A$ 的量程切换开关①指示值 \times 电流表②读数/100

例如: ①指示 100nA, 本电流表的读数 10, 则 $I_A = 100\text{nA} \times 10 / 100 = 10\text{nA}$

- ③ 是电压表, 与电压指示切换开关⑨配合使用, 可分别指示 V_H , V_{G1K} , V_{G2A} , V_{G2K} , 指示 V_H , V_{G1K} , V_{G2A} . 满量程为 19.99V, 指示 V_{G2K} 满量程为 199.9V
- ④ 是带灯自锁按键电源开关, 仪器接入 AC220V 电压后, 按入此开关, 红灯亮, 表示接通电源; 红灯灭, 表示电源断开, 关机。
- ⑤ 是 V_{G2K} 输出端口, 接至示波器或其他记录设备 X 轴输入端口, 此端口输入电平为 V_{G2K} 的 1/10。
- ⑥ 是自动/手动切换开关。接入则为“自动”, 与快速/慢速切换开关⑦及 V_{G2K} 调节按钮⑬配合使用, 可选择电压扫描速度及范围; 按出则为“手动”位置, 与⑬配合使用, 手动选择电压扫描范围。
- ⑦ 是快速/慢速切换开关, 用于选择电压扫描速度, 按入为“快速”位置, 按出为“慢速”位置, 只有⑥选择在“自动”位置, 此开关才有作用。
- ⑧ 是 I_A 输出端口, 接至示波器或其他记录设备 Y 轴输入端口
- ⑨ 是电压指示切换开关, 与电流表③配合使用, 可分别指示 V_H , V_{G1K} , V_{G2A} , V_{G2K}
- ⑩ 是灯丝电压 V_H 调节按钮, 调节范围 3—6.3V, 不可过高过低, 调程过程要缓慢, 便调节边观察图 2.2 所示的 I_A — V_{G2K} 曲线变化, 不可出现波形上端切顶的现象, 不然应降低灯丝的电压 V_H
- ⑪ 是 V_{G1K} 调节按钮, 调节范围 1.3-5V, 开始调到 1.7V 左右, 待图 2.2 I_A — V_{G2K} 曲线出现 6 个以上的峰值时, 分别进行 V_{G1K} 和 V_{G2A} 调节, 使从左至右, 曲线的 I_A 谷值逐个抬高。
- ⑫ 是 V_{G2A} 调节旋钮, 调节范围 1.3-15V, 开始调至 8V 左右, 待图 2.2 I_A — V_{G2K} 曲线出现 6 个以上的峰值时, 分别进行 V_{G2A} 和 V_{G1K} 调节, 使从左至右, 曲线的 I_A 谷值逐个抬高。
- ⑬ 是 V_{G2K} 调节旋钮, 自动/手动切换开关⑥至于“手动”时调节范围 1—100V, 置于“自动”时, 调程范围 0—80V 左右。

五、实验内容及仪器调试步骤

1. 熟悉夫兰克——赫兹实验仪各开关按钮的作用及示波器的使用方法。
2. 不要急于接入电源开关 ④, 应先将⑩--⑬四个电压调节旋钮逆时针旋到底, 并把 I_A 量程切换开关①置于“ $\times 10^{-7}$ (100nA)”, V_{G2K} 输出端口⑤和 I_A 输出端口⑧分别用带 Q9 连接头的电缆连接至示波器或其他设备 X 轴输入端口和 Y 轴输入端口。
3. 如果输出端口⑤和⑧连接的是示波器, 自动/手动切换开关⑥置于“自动”, 快速/慢速切换开关⑦置于“快速”, 否则切换开关⑦置于“慢速”。
4. 按入电源开关④, 接通仪器电源, 配合使用电压指示切换开关⑨调节电压调节旋钮⑩--⑫, 使 V_H 约为 5V (数值不可太小, 以免逸出电子数量少、能量低), 并重复操作依次调节电压调节旋钮⑪和⑫, 分别使 V_{G1K} 约为 1.7V, V_{G2A} 约为 8V (数值过高易使拒斥电压过高, 能量损失较大的电子无法到达 A 极)。
5. 逐渐调节⑬, 改变电压 V_{G2K} , 调节示波器 X 和 Y 各相关旋钮, 使波形正向, 清晰稳定, 无重叠, 并要求 X 轴满屏显示, Y 轴幅度适中。
6. 再次调节电压调节旋钮 ⑩—⑬, 使波形如图 2 所示的 I_A — V_{G2K} 曲线, 并保证可观察到 6 个以上的 I_A 峰值 (或谷值), 且峰谷幅度适中, 无上端切顶现象, 从左至右, I_A 各谷值逐个抬高。
7. 测量示波器上所示波形图中相邻 I_A 谷值 (或峰值) 所对应的 V_{G2K} 之差 (即显示屏上相邻谷值或峰值的水平距离) 求出氩原子的第一激发电位。
8. 选择手动, 慢速测量 (此内容可以不使用示波器), 使 V_{G2K} 从最小开始, 每间隔 5V 逐

渐增大，在随着 V_{G2K} 的值改变 I_A 剧烈变化时，应该减少采样点之间的电压值间距，使所采样的点值能够尽量反映出电流与电压的波形曲线轮廓，在极值点附近进行密集采样。记录 I_A 与 V 值，测量至少包括 6 个峰值（5 个谷值），按记录数据画出图形。

9. 根据图形计算出相邻 I_A 谷值（或峰值）所对应的 V_{G2K} 之差（求出 6 个峰值之间的 5 个 V_{G2K} 之差，再求取平均值，以使测量结果更精确。）求出氩原子的第一激发电位。

六、注意事项

1. 调节 V_{G2K} 和 V_H 时应注意 V_{G2K} 和 V_H 过大会导致氩原子电离而形成正离子，而正离子到达阳极会使阳极电流 I_A 突然骤增，直至将夫兰克—赫兹管烧毁。所以一旦发现 I_A 为负值或正值超过 $10\mu A$ ，应迅速关机，5 分钟以后再重新开机使用。注意，由于原子电离后的自持放电是自发的，此时将 V_{G2K} 和 V_H 调至零都将无济于事。
2. 每个夫兰克—赫兹管的参数各不相同，尤其是灯丝电压，使用每一台仪器都要按调试步骤认真地进行操作。
3. 图 2 I_A-V_{G2K} 曲线的变化对调节 V_H 的反应较慢，所以，调节 V_H 一定要缓慢进行，不可操之过急，峰谷幅度过低，增加 V_H ，一旦出现波形上端切顶则适当降低 V_H ，或者增大反向电压 V_{G2A} ，以使峰顶值有所下降，从而可以观测到完整的波形，还有一个方法就是选择尽量大量程，也可以得到完整的波形图。需要说明的一点是，降低峰值不会改变峰值之间的间距，也就是说不会影响实验结果的测量。
4. 在 V_{G2K} 保持不变的情况下，对应的各档位电流不是线形变换的，这是由于本底电流的存在而引起的，在两个 V_{G2K} 采样电压之间，电流的变化量在各档位之间是一样大的。

七、思考题：

1. 为什么常用电子来研究原子的特性？
2. F—H 管内所充的原子有何要求？除用氩原子外还能用其它原子吗？试举例说明。
3. 在不对实验装置做大的改动的情况下，如何测量原子高能级的激发电位或电离电位？
电流对阴极电压十分敏感。