

夫兰克—赫兹实验

1913 年, 丹麦物理学家波尔(N.BOHR)提出了一个氢原子模型, 并指出原子存在能级。该模型在预言氢光谱的观察中取得了显著的成功。根据波尔的原子理论, 原子光谱中的每根谱线表示原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时的辐射。1914 年, 德国物理学家夫兰克(J.FRANCK)和赫兹(G.HERTZ)对勒纳用来测量电离电位的实验装置作了改进, 他们同样采取慢电子(几个到几十个电子伏特)与单元素气体原子碰撞的办法, 但着重观察碰撞后电子发生什么变化(勒纳则观察碰撞后离子流的情况)。通过实验测量, 电子和原子碰撞时会交换某一定值的能量, 且可以是原子从低能级激发到高能级。直接证明了原子发生跃变时吸收和发射的能量是分立的、不连续的, 证明了原子能级存在, 从而证明了波尔理论的正确。因而获得了 1925 年诺贝尔物理学奖金。

夫兰克-赫兹实验至今仍是探索原子结构的重要手段之一, 实验中用的“拒斥电压”筛去小能量电子的方法, 已成为广泛应用的实验技术。

[实验目的]

通过测定氩原子等元素的第一激发电位(即中肯电位), 证明原子能级的存在。

[实验原理]

波尔提出的原子理论指出:

1、原子只能较长的停留在一些稳定状态(简称为定态)。原子在这些状态时, 不发射或吸收能量; 各定态有一定的能量, 其数值是彼此分离的。原子的能量不论通过什么方式发生改变, 它只能从一定态跃迁到另一定态。

2、原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收辐射时, 辐射频率是一定的。如果用 E_m 和 E_n 分别代表有关两定态的能量的话, 辐射的频率 ν 决定于如下关系:

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1-1)$$

式中, 普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$

为了使原子从低能级向高能级跃迁, 可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换的办法来实现。

在正常的情况下原子所处的定态是低能态, 称为基态, 其能量为 E_1 。当原子以某种形式获得能量时, 它可由基态跃迁到较高的能量的定态。称为激发态, 激发态能量为 E_2 的称为第一激发态, 从基态跃迁到第一激发态所需的能量称为临界能量, 数值上等于 $E_2 - E_1$ 。

通常在两种情况下可让原子状态改变, 一是当原子吸收或发射电磁辐射进, 二是用其他粒子碰撞原子而交换能量时。用电子轰击原子实现能量交换最方便, 因为电子的能量 eu , 可通过改变加速电势 u 来控制。夫兰克-赫兹实验就是用这种方法证明原子能级的存在。

如果电子的能量 eu 很小时, 电子和原子只能发生弹性碰撞, 几乎不发生能量交换; 设初速度为零的电子在电位差为 u_0 的加速电场作用下, 获得能量 eu_0 。当具有这种能量的电子与稀薄气体原子(比如十几个毫的氩原子)发生碰撞时, 电子与原子发生非弹性碰撞, 实现能量交换。如以 E_1 代表氩原子的基态能量、 E_2 代表氩原子的第一激发态能量, 那么当氩原子吸收从电子传递来的能量恰好为

$$e u_0 = E_2 - E_1 \quad (1-2)$$

这时，氩原子就会从基态跃迁到第一激发态。而且相应的电位差称为氩的第一激发电位（或称压得中肯电位）。测定出这个电位差 u_0 ，就可以根据（1-2）式求出氩原子的基态和第一激发态之间的能量差了（其他元素气体原子的第一激发电位亦可依此法求得）。夫兰克赫兹实验的原理图如（图 1）所示。

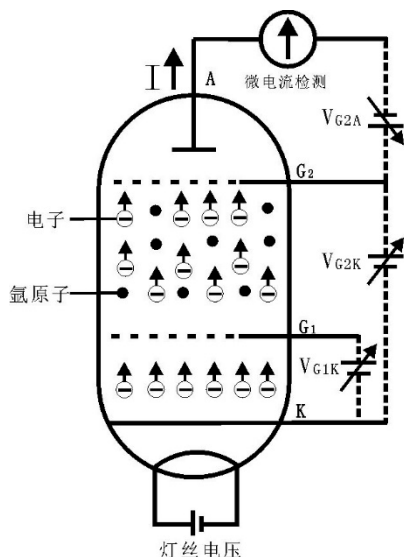


图 1. 夫兰克赫兹原理图

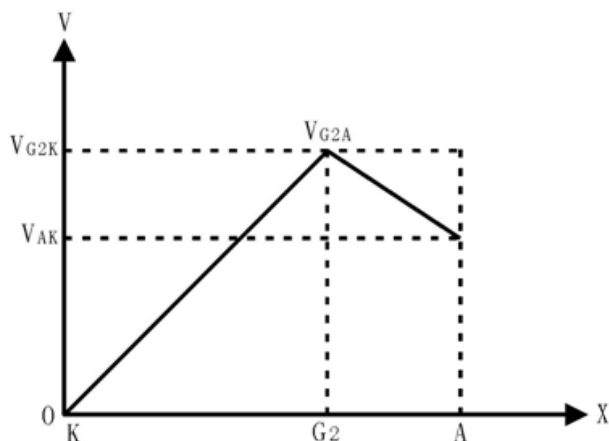


图 2. 夫兰克赫兹管管内空间电位分布

在充氩的夫兰克-赫兹管中，电子由热阴极出发，阴极 K 和第二栅极 G_2 之间的加速电压 V_{G2K} 使电子加速。在板极 A 和第二栅极 G_2 之间加有反向拒斥电压 V_{G2A} 。管内空间电位分布如（图 2）所示。当电子通过 KG_2 空间进入 G_2A 空间时，如果有较大的能量（ $\geq eV_{G2A}$ ），就能冲过反向拒斥电场而达板极形成板流，为微电流计表检出。如果电子在 KG_2 空间与氩原子碰撞，把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发的话，电子本身所剩余的能量就很小，以致通过第二栅极后已不足于克服拒斥电场而被折回到第二栅极，这时，通过微电流计表的电流将显著减小。

实验时，使 V_{G2K} 电压逐渐增加并仔细观察电流计的电流指示，如果原子能级确实存在，而且基态和第一激发态之间存在确定的能量差的话，就能观察到如（图 3）所示的 $I_A \sim V_{G2K}$ 曲线。（图 3）所示的曲线反映了氩原子在 KG_2 空间与电子进行能量交换的情况。当 KG_2 空间电压逐渐增加时，电子（图三）充氩的夫兰克-赫兹管 $I_A \sim V_{G2K}$ 曲线在 V_{G2K} 空间被加速而取得越来越大的能量。但起始阶段，由于电压较低，电子的能量较少，即使在运动过程中它与原子相碰撞也只有微小的能量交换（为弹性碰撞）。穿过第二栅极的电子所形成的板流 I_A 将随第二栅极电压 V_{G2K} 的增加而增大；如（图 3）的 oa 段，当 KG_2 间的电压达到氩原子的第一激发电位 U_0 时，电子在第二栅极附近与氩原子相碰撞，将自己从加速电场中获得的全部能量交给后者，并且使后者从基态激发到第一激发态。而电子本身由于把全部能量交给了氩原子，即使穿过了第二栅极也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极（被筛选掉）。

所以板极电流将显著减小（图 3 所示 ab 段）。随着第二栅极电压的增加，电子的能量也随之增加，在与氩原子相碰撞后还留下足够的能量，可以克服反向拒斥电场而达到板极 A，这时电流又开始上升（bc 段）。直到 KG_2 间电压是二倍氩原子的第一激发电位时，电子在 KG_2 间又会二次碰撞而失去能量，因而又会造成第二次板极电流的下降（cd 段），同理，

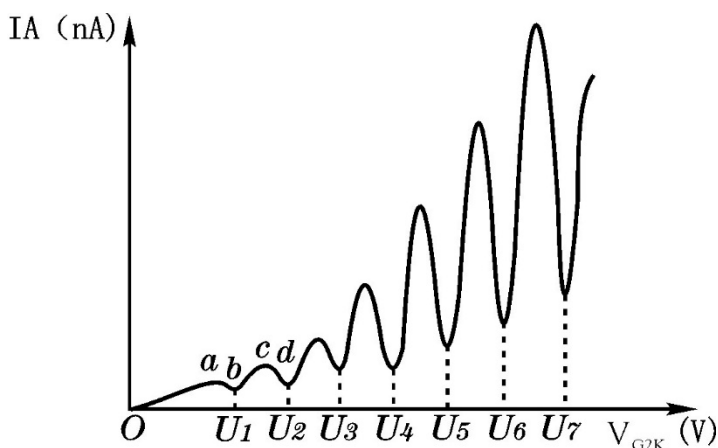


图 3. 夫兰克-赫兹管 $I_A \sim V_{G2K}$ 曲线

凡在

$$V_{G2K} = nU_0 \quad (n=1,2,3\cdots) \quad (1-3)$$

的地方板极电流 I_A 都会相应下跌，形成规则起伏变化的 $I_A \sim V_{G2K}$ 曲线。而各次板极电流 I_A 下降相对应的阴、栅极电压差 $U_{n+1}-U_n$ 应该是氩原子的第一激发电位 U_0 。

本实验就是要通过实际测量来证实原子能级的存在，并测出氩原子的第一激发电位（公认值为 $U_0=11.5V$ ）。

原子处于激发态是不稳定的。在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态，进行这种反跃迁时，就应该有 eU_0 电子伏特的能量发射出来。反跃迁时，原子是以放出光量子的形式向外辐射能量。这种光辐射的波长为：

$$eU_0 = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (1-4)$$

$$\text{对于氩原子 } \lambda = \frac{hc}{eU_0} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} \times 11.52} \quad (m=1081A)$$

如果夫兰克赫兹管中充以其他元素，则可以得到它们的第一激发电位（表一）

表一 几种元素的第一激发电势

元 素	钠(Na)	钾(K)	锂(Li)	镁(Mg)	汞(Hg)	氦(He)	氩(Ar)
第一激发电势 U_0 (V)	2.12	1.63	1.84	3.20	4.90	21.2	11.5
λ (A)	5898	7664	6707.8	4571	2500	584.3	1081

实验仪器

1) 实验仪器由夫兰克赫兹管、测试仪、示波器组成。

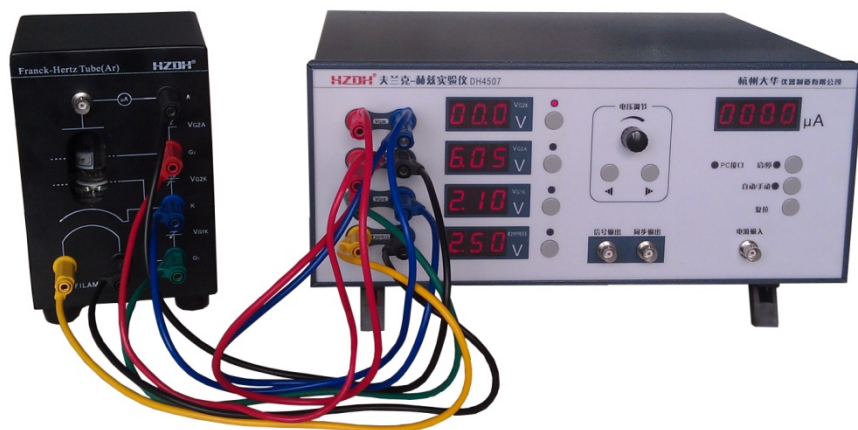


图 4 夫兰克-赫兹实验仪

2) 测试仪功能说明

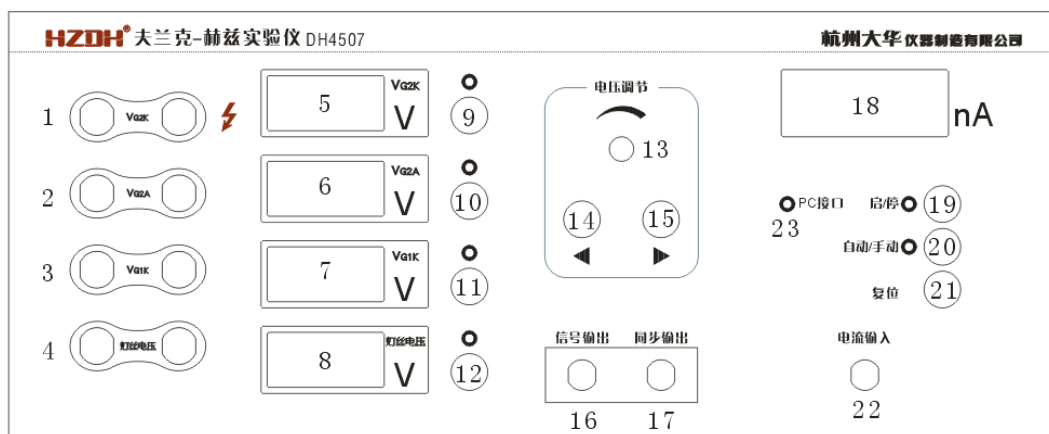


图 5 测试仪面板功能图

1. V_{G2K} 电压输出，与夫兰克赫兹管对应插座相连；
2. V_{G2A} 电压输出，与夫兰克赫兹管对应插座相连；
3. V_{G1K} 电压输出，与夫兰克赫兹管对应插座相连；
4. 灯丝电压输出，与夫兰克赫兹管对应插座相连；
5. V_{G2K} 电压显示窗； 6. V_{G2A} 电压显示窗； 7. V_{G1K} 电压显示窗； 8. 灯丝电压显示窗；
- 9, 10, 11, 12. 四路电压设置切换按钮，仅被选中的电压可以通过电压调节进行设置；
13. 调节电压值大小；
- 14, 15. 移位键，改变电压调节步进值大小；
- 13, 14. 组合功能，在手动模式 V_{G2K} 设定时，按住 14 键不放，顺时针旋转 13 设定 V_{G2K} 最小步进值，可以设定为 0.1V, 0.2V 和 0.5V 步进，默认为 0.1V；
16. 波形信号输出，与示波器 CH1 或 CH2 相连；
17. 同步输出，与示波器触发通道相连；
18. 微电流显示窗；
19. 启停键，自动模式下控制采集的开始或暂停；开启时，指示灯亮；
20. 自动/手动模式选择，按下自动后，功能指示灯亮；自动模式下按 19 键可以开启自动

测量，仪器按照固定的最小电压步进(0.2V)输出 V_{G2K} ，并采集微电流信号，同时把采集的数据信号输出到示波器上；手动模式下需手动调节 V_{G2K} 开展实验，信号输出接口将同步输出采集的数据波形，增加或减小 V_{G2K} ，波形输出将同步变化，实时动态显示，便于寻找极点；

21. 复位功能，当系统出现意外死机后，按此键复位系统；
22. 微电流输入接口，与夫兰克赫兹管微电流输出接口相连；

3) 夫兰克赫兹管测试架

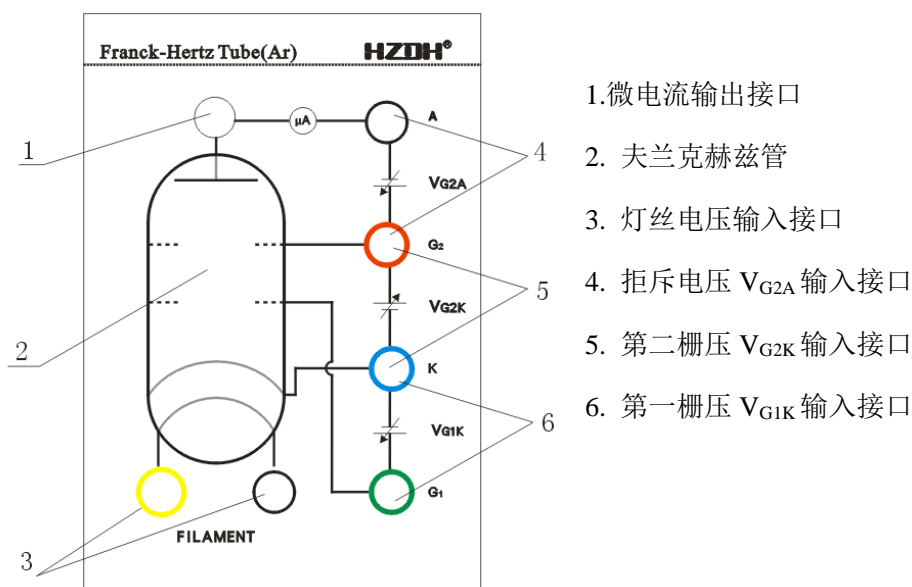


图 6. 夫兰克赫兹管测试架

实验步骤

1) 将夫兰克-赫兹实验仪前面板上的四组电压输出（第二栅压 V_{G2K} ，拒斥电压 V_{G2A} ，第一栅压 V_{G1K} ，灯丝电压）与电子管测试架上的插座分别对应连接；将电流输入接口与电子管测试架上的微电流输出口相连。**注意：仔细检查，避免接错损坏夫兰克-赫兹管；**

2) 将夫兰克-赫兹实验仪前面板上“信号输出”接口与示波器 CH1 通道相连，“同步输出”与示波器触发端接口相连；

3) 开启电源，默认工作方式为“手动”模式；

4) 将电压设置切换按钮选择为“灯丝电压”设定，调节“电压调节”，使与出厂参考值一致（详见夫兰克赫兹管测试架标示），灯丝电压调整后，中途不再变动。**注意：灯丝电压不要超过出厂参考值（详见夫兰克赫兹管测试架标示），否则会加快灯管老化，连续工作不要超过 2 小时；**

5) 将电压设置切换按钮选择为第一栅压“ V_{G1K} ”设定，调节“电压调节”，使与出厂参考值一致（详见夫兰克赫兹管测试架标示），一般设定在 2-3V 之间；

6) 将电压设置切换按钮选择为拒斥电压“ V_{G2A} ”设定，调节“电压调节”，使与出厂参考值一致（详见夫兰克赫兹管测试架标示），一般设定在 5-9V 之间；

7) 将电压设置切换选择为第二栅压“ V_{G2K} ”设定, 调节“电压调节”使输出为零。

注意: 不同的电子管, 设置的最佳参数会不一样, 出厂时一般设定了一个参考值, 标记在夫兰克—赫兹测试架上; 为了得到更好的爬坡曲线, 用户可以自行反复调整参数。

8) 预热仪器 10-15 分钟, 待上述电压都稳定后, 即可开始实验;

9) 将电压设置切换选择为第二栅压“ V_{G2K} ”设定, 调节“电压调节”, 使第二栅压从 0V 到 90V 按最小步进电压值依次增加, 一边调节, 一边观察示波器上显示的波形曲线和实验仪面板上的电流示值, 当波形处于谷值附近时放慢调节节奏, 在电流反转的电压点上顺时针和逆时针调节电压多次, 确定谷值点 (顺时针和逆时针调节均电流增大的点), 用同样的方法确定后面的 5 个谷值电压点; 实验前, 可以通过“电压调节”组合键设置 V_{G2K} 最小电压步进值为 0.1V, 0.2V 或 0.5V (实验过程中请不要再改变最小步进值), 建议步进值为 0.1V (方法是按 14 键不放, 顺时针旋转编码开关 13);

10) 将拒斥电压增加或减小 0.5V, 重复步骤 9, 作出另外一条 $V_{G2K}-I_A$ 曲线, 然后比较上述两条曲线;

11) 求出各峰值所对应的电压值, 用逐差法求出氩原子第一激发电位, 并与公认值相比较, 求出相对误差;

数据处理

1. 氩原子第一激发电势及接触电势差:

绘制出实验曲线, 确定各峰位的电压值 $V(i)$ ($i=1, 2, 3, \dots$), 由 $V(i) = V_{ao} + iV_{el}$, 用最小二乘法进行直线拟合 ($y=a+bx$) 得出第一激发电势 V_{el} 及接触电势差 V_{ao}

思考题

- 1、试分析实验中影响 $I_A \sim V_{G2}$ 曲线形状, 如峰宽、峰位、峰谷起伏大小及本底电流等的各种因素。影响第一激发电势测量精度的主要原因是什么?
- 2、试分析电子同原子碰撞时的能量转移和电子动能关系, 解释夫兰克—赫兹实验观察原子第一激发态的物理过程。