

弗兰克赫兹实验的计算与分析

汤玮昭

(复旦大学 物理系, 上海 200433)

摘要: 通过变量控制, 探究灯丝电压, 加速电压等因素对弗兰克赫兹激发能态曲线的影响。计算汞原子的第一激发能、较高级激发能及电离电压, 重点分析温度对弗兰克赫兹曲线的影响。

关键词: 汞原子; 激发态; 温度; 平均自由程

弗兰克、赫兹为了研究气体放电中的低能电子和原子之间的相互作用, 设计了电子与原子碰撞的实验, 即弗兰克赫兹实验。弗兰克赫兹实验证明了原子量子化能级的存在, 并与波尔原子结构理论相符。通过实验, 我们可以测量原子各激发态的能量, 以及最终的电离能。而分析实验中各个因素对实验曲线的影响, 则是对实验理论分析能力很好的训练。

I. 实验原理

a) 波尔原子结构理论

根据波尔的原子结构理论, 原子是由原子核和核外电子所组成, 原子核位于原子的中心, 电子沿着以核为中心的各种不同直径的轨道运动。当电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时, 会产生能量的变化。若原子吸收能量, 则电子从低能级跃迁到高能级; 而当电子从高能级跃迁到低能级时, 原子会放出能量。

b) 电子与原子的相互作用

电子与原子的相互作用有亲和、弹性碰撞和非弹性碰撞等形式。当电子的能量小于临界能量时, 电子与原子的碰撞是非弹性碰撞, 电子与原子之间几乎不交换能量或交换极少的能量; 当电子的能量大于临界能量时, 电子与原子发生非弹性碰撞, 电子将临界能量交给原子, 保留剩余的能量, 使原子激发, 从低能级跃迁到高能级。

原子被激发后, 由于处在高能级不稳定, 退激发出光子。当退激辐射产生的光子打在金属栅极上时, 若光子频率大于极限频率时, 将产生光电效应, 极板上产生正电流。

II. 实验线路

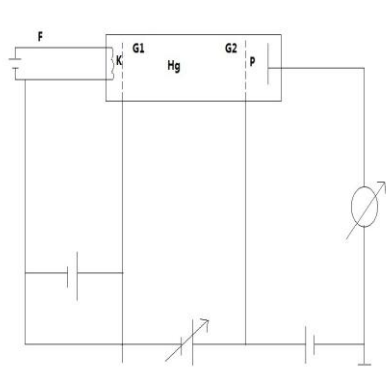


图 1. 测量汞原子第一激发能实验线路图

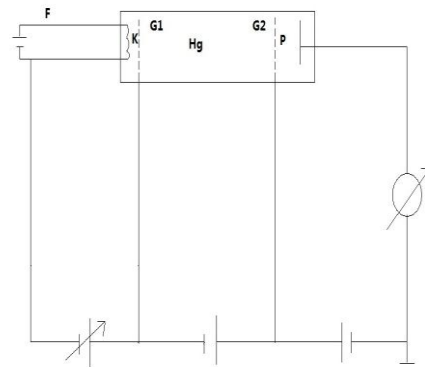


图 2. 测量汞原子较高激发态实验线路图

III. 实验结果与讨论

a) 测定汞原子的第一激发能

选择实验条件为 $V_{G2P}=2.0V$, $V_{G1K}=1.0V$, $V_F=2.0V$, $T=160^\circ C$, 并读取峰位, 得下图:

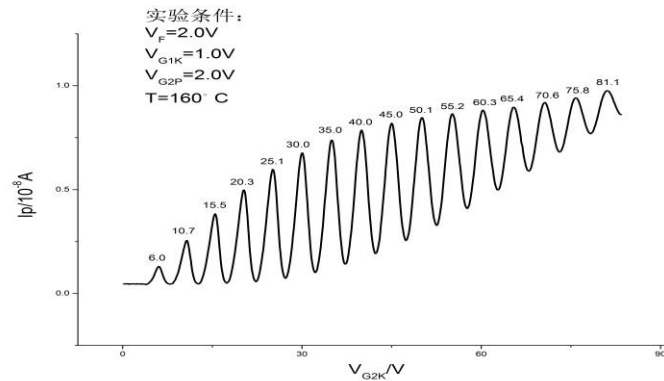


图 3.测量汞原子第一激发能 I_p-V_{G2K} 曲线

利用图中读出的电流峰位进行直线拟合, 所得到的拟合直线方程为:

峰位电压=5.011*峰数+0.288, 拟合优度 $R^2=0.99975$ 。根据拟合结果, 缝间距为 **5.011V**, 即汞原子的第一激发电压为 **5.011V**。而汞原子第一激发能参考值为 **4.89V**, 因而实验值与参考值的偏差为 $\eta = (5.011-4.89)/4.89*100\%=2.474\%$ 。

b) 测定汞原子的高激发态能级

选择实验条件为 $V_{G2P}=2.9V$, $V_{G1G2}=1.0V$, $V_F=1.9V$, $T=110^\circ C$, 并读取峰位, 得下图:

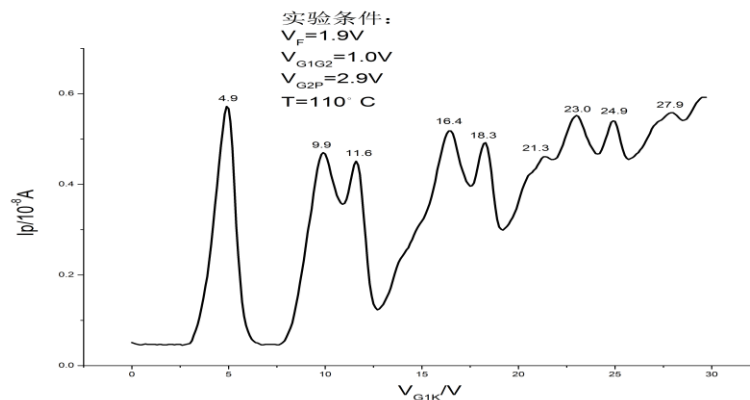


图 4.测量汞原子高激发态能级 I_p-V_{G2K} 曲线

汞原子 63P1,63P2, 61P1 的能级能值为 4.9, 5.46, 6.7eV, 分别用 a, b, c 来表示, 则图中的 9 个峰位可以用下表来表示:

峰数	测量值/V	组合方式	理论值/V	偏差/V
1	4.9	a	4.9	0
2	9.9	2a	9.8	0.1
3	11.6	a+c	11.6	0
4	16.4	2a+c	16.5	-0.1
5	18.3	a+2c	18.2	0.1
6	21.3	3a+c	21.4	-0.1
7	23.0	2a+2c	23.2	-0.2
8	24.9	a+3c	25.0	-0.1

9	27.9	3a+2c	28.1	-0.2
---	------	-------	------	------

c) 观察灯丝电压 V_F ，减速电压 V_{G2P} 以及控制栅电压 V_{G1K} 对 I_p-V_{G2K} 曲线的影响

- ① 设置变量为 V_{G1K} ，分别取值 0, 1, 2, 3V。固定 $V_F=2.0V$ ， $V_{G1P}=1.0V$ ， $T=160^\circ C$
不同实验条件下的扫描曲线如下：

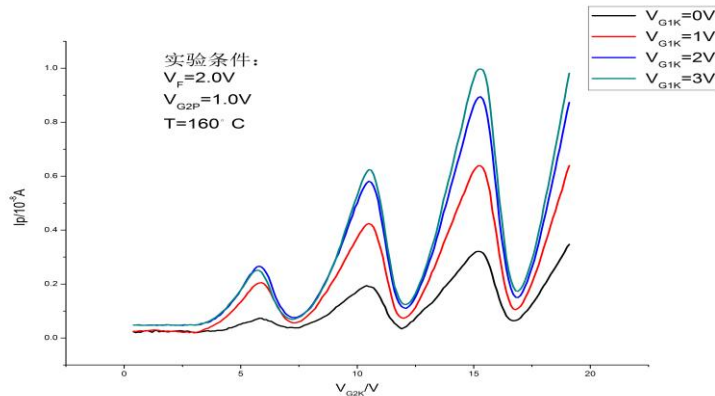


图 5.不同控制栅电压下的 I_p-V_{G2K} 曲线

从实验曲线中可以观察到， V_{G1K} 越大，到达 P 极板的电流值也越大，且 V_{G1K} 的变化对曲线峰位影响较小。 V_{G1K} 是控制栅电压，其作用是消除电子在阴极附近的堆积效应，适当增大 V_{G1K} 有利于将电子从阴极附近抽出，从而使得达到 P 极板的电流增大。另外，图中可以观察到，控制栅电压 V_{G1K} 从 0 \rightarrow 2.0V 变化十分明显，即电流差值较大。而从 2.0V \rightarrow 3.0V 的变化较小。这说明增大 V_{G1K} 对实验的作用存在饱和效应，可以推测当 V_{G1K} 增加到 3V 以上时，大部分电子应已从阴极附近抽运出来，继续增加 V_{G1K} 对曲线的影响效果不再明显，效果等同于增加 V_{G2K} 。

- ② 设置变量为 V_{G2P} ，分别取值 0.5, 1.0, 1.5, 2.0V。固定 $V_F=2.0V$ ， $V_{G1K}=1.0V$ ， $T=160^\circ C$ 。不同实验条件下的扫描曲线如下：

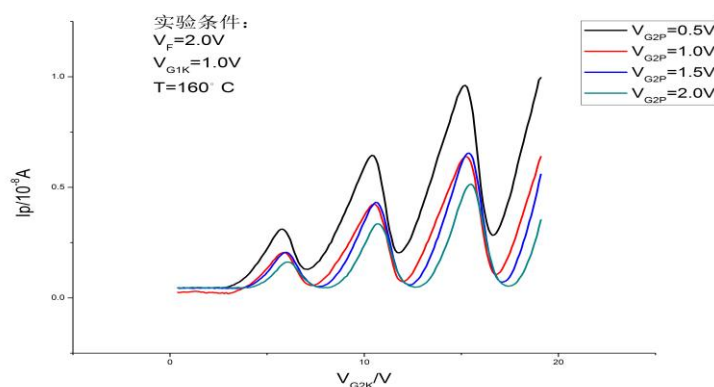


图 6.不同减速电压下的 I_p-V_{G2K} 曲线

从实验曲线中可以观察到， V_{G2P} 越大，到达 P 极板的电流值越小，电流峰位逐渐向右移动。 V_{G2P} 是减速电压，电子与汞原子碰撞后需克服 V_{G2P} 才能到达 P 极板，增大 V_{G2P} 后，剩余能量足够克服减速电压的电子减少，即表现为电流值减小。由于增大 V_{G2P} 会导致 K 与 P 之间的净电势减小，即达到同样电流所需的 V_{G2K} 增大，在图中体现为电流

峰位向右移动。

- ③设置变量为 V_F ，分别取值 1.0, 1.5, 1.8, 2.0V。固定 $V_{G2P}=2.0V$, $V_{G1K}=1.0V$, $T=160^\circ C$ 。不同实验条件下的扫描曲线如下：

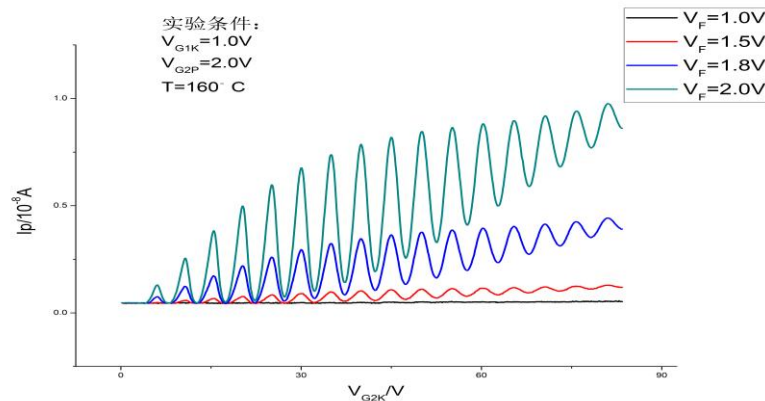


图 7.不同灯丝电压下的 I_p-V_{G2K} 曲线

从实验曲线中可以观察到， V_F 越大，到达 P 极板的电流值也越大，曲线峰位向左移，但不明显。 V_F 是灯丝电压，当灯丝电压增大时，灯丝温度升高，阴极发射热电子的能力相应提高，因此在相同时间内阴极发射的电子数增加，在其他条件不变的情况下，到达 P 极板的电流增大。同时，由于灯丝温度上升，发射电子的能量也相应上升，因而到达 P 极板所需的加速电压也相应下降，在实验曲线中体现为电流峰位向左移。另外我们可以观察到，当 V_F 改变值很小，如 0.1V 时，电流便发生了较大变化，这说明，灯丝电压值的改变对灯丝温度影响十分明显。

- ① 观察温度 T 对 I_p-V_{G2K} 曲线的影响

首先分别设定汞蒸气的温度为 $130^\circ C$, $140^\circ C$, $150^\circ C$ 。选取测量第一激发态的实验线路获得扫描曲线：

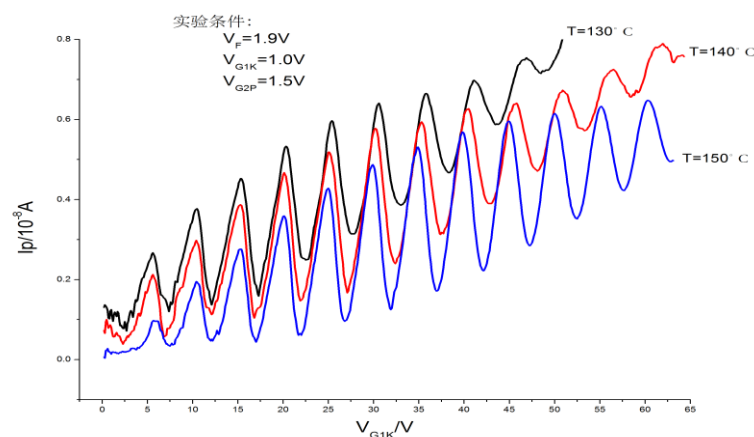


图 8.汞蒸气温度分别为 $130^\circ C$, $140^\circ C$, $150^\circ C$ 时的 I_p-V_{G2K} 曲线

从图中我们可以明显地看出，P 极板上的电流随着温度的升高呈下降趋势。从理论上分析，当汞蒸气的温度上升时，蒸汽压上升，汞蒸气密度增大，电子直接打到 P 极板上的概率减小，因而本底电流下降，在 I_p-V_{G2K} 曲线上表现为电流减小。

当我们继续上调温度时，情况发生了一些变化，如下图：

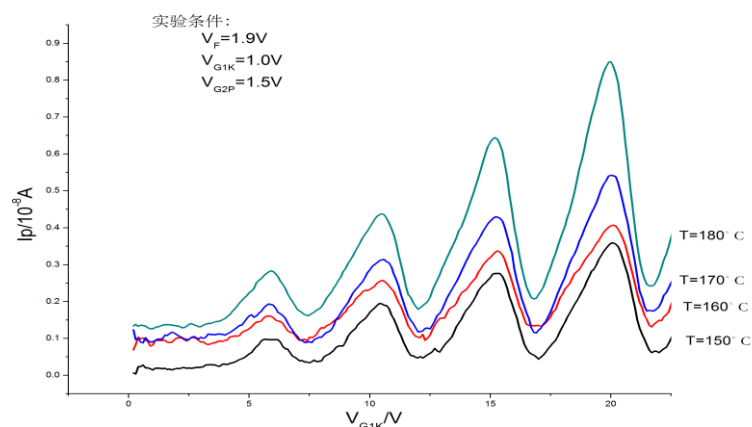


图 9.汞蒸气温度分别为 150° C, 160° C, 170° C, 180° C 时的 I_p-V_{G2K} 曲线

从这幅图中我们看到的情况是，极板电流随着汞蒸气温度的上升而下降，这与温度较低的情况有所不同，因而之前作出的关于温度的实验曲线影响的理论分析有必要作出一定的修正。

直观上来看，温度上升后，汞蒸气密度增大，出射电子与汞蒸气发生碰撞的概率增大。当电子能量足够大时，则很容易便与汞原子发生能量交换，因而导致本底电流下降，这能够很好地解释低温情况下实验曲线的变化，但与高温时的实验现象相矛盾。对此，我们可以考虑另外一个重要的因素——平均自由程。当温度上升，平均自由程变短，电子与原子的碰撞变得十分频繁。根据《近代物理实验》一书中的描述：“电子与汞原子碰撞时，电子损失的能量极小。”因而，但碰撞次数较少时，由碰撞产生的能量损失的影响不明显。但温度升高后，碰撞次数大幅度改变，电子能量可能发生大量损失。由于一定的加速电压提供给电子的能量是固定的，因而当碰撞次数足够大时，大多数电子到达 G_2 栅极时的能量还不足以激发汞原子，因而只有少数电子发生了能量交换，大多数电子都到达了 P 极板，因而本底电流上升。这是对这一实验现象的一个解释，如果这一解释成立，则说明温度超过 150° C 时，电子在汞蒸气内的平均自由程是急剧减小的，导致大量电子在碰撞中损失较多能量，因而无法激发汞原子。

IV.结论

通过对不同实验线路的选择，我们测得了汞原子各激发态的能级，更重要的是对影响实验结果的各因素进行了分析，其中重点分析了汞蒸气温度对实验的影响分为两个阶段。当温度低于 150° C 时，实验曲线高度随着温度的上升而下降；当温度高于 150° C，实验曲线的高度随着温度的上升而上升。我们用平均自由程的观点定性地进行了分析，提出了猜想。如果需要定量分析，则需要用到较为复杂的理论知识以及获得实验仪器的各种参数（如充汞实验管体积），可以在今后的科研实践中进一步加以研究。

V.致谢：

感谢杨新菊老师在实验中提供帮助指导，也感谢谢景福同学在讨论过程中提供的建设性意见。

参考文献：

- [1] 戴道宣，戴乐山，近代物理实验（第二版）.北京：高等教育出版社.
- [2] 杨福家，原子物理学.北京：高等教育出版社.