

# $G_2$ 栅网对 F—H 实验图像影响的探讨

田岱 06300190024

## 摘要

在弗兰克赫兹实验中，本文研究  $G_2$  栅网的吸收作用，通过改变连接电路图的方法粗略解释了在弗兰克赫兹实验中减速电压为零时震荡图像出现的原因。

It is noticed that in F-H experiment, if  $G_2$  and P anode retain at the same potential, which makes the decelerate voltage become zero, the oscillation of ordinary F-H curve can still be observed, while it is believed the oscillation is caused by the decelerate voltage. This passage gave an explanation to this phenomenon on the assumption that  $G_2$  can trap low energy electrons.

## 关键词

弗兰克-赫兹实验，零减速电流， $G_2$  栅网的吸收。

## 前言

在正常的弗兰克赫兹实验中认为，由于反向电压  $V_{G_2P}$  的作用，有部分电子不能打到 P 极上，从而

导致电流下降可以轻松的观察到震荡曲线。但在实验中我们也能注意到，如果反向电场加为 0V，甚至不小心把反向电场的方向加反，变成了加速电场，也仍然能看到上下振荡的 F-H 曲线。

传统的观念认为，在一个零电场的区域中，由于弹性碰撞的影响，一个电子从一极产生并顺利地到达另一极的概率与平均自由程有关[1]。那么，随着电子能量的周期性震荡，自由程也会出现周期性的变化。不过，电子如果打到  $G_2$  栅网必然会有损耗，在本次实验中，将通过改变电路连接、软件模拟的简单方法来研究  $G_2$  栅网对于震荡曲线出现的影响。

## 实验装置及基本过程

实验采用复旦双栅柱面型四极式充汞弗兰克—赫兹管[2]。该仪器可以控温，非常适合研究。F 为

灯丝，K 为抽取极板， $G_1$  与  $G_2$  是由细金属丝构成的栅网，P 为金属极板。实验电流接线如图 a。

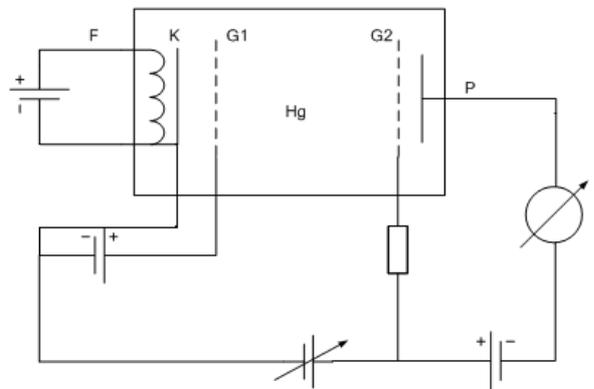


图 a: 实验接线图。其中  $V_F$  为灯丝电压， $V_{G_1}$  为抽取电压， $V_{G_2}$  为加速电压， $V_P$  为反向电压。

灯丝上加上电压后便会发射出电子，初始能量几乎为零，弥漫在灯丝周围而被 K 板吸附。抽取电压  $V_{G_1}$  将会把电子从 K 板上抽取出来，获得一定的

动量。加速电压使电子加速，从而达到更高的能量。由于管中充满气体分子，电子将会与之发生作用。当电子穿过 $G_2$ 后遇到反向电场 $V_{G2}$ 的作用，因此只有部分电子会打在P板上，电流将由微安表测出。

### 实验现象及讨论

选取实验条件： $T=160$ 度  $V_F=1.5v$   $V_{G1}=1.75v$

#### 1. 正常的 F-H 震荡曲线

根据一般教科书当中的实验方案，连接电路，选取减速电压为  $0V$  可观察到正常的 F-H 曲线，如图 b 所示：

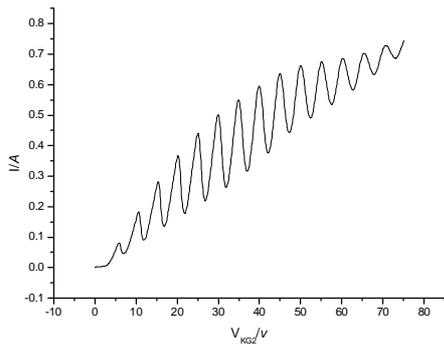


图 b. 测量条件：

$T=160$ 度； $V_F=1.5v$ ； $V_{G1}=1.75v$ ； $V_{G2}=0v$

电流表量程为 $10^{-8}$

n	1	2	3	4	5	6
V/v	5.9	10.6	15.4	20.2	25.1	30
n	7	8	9	10	11	12
V/v	34.9	39.9	45	50	55	60.2

计算可得汞原子的第一激发能级为  $4.97 \pm 0.0208eV$

与普通实验中在最优条件下测量的第一激发能  $4.96 \pm 0.0205eV$  (我的 F-H 实验报告) 相比，差别

并不大。从而减速电压 $V_{G2}$ 不是造成振荡的绝对因素。

#### 2. 去除 G2 的影响

如图 c 所示修改电路：

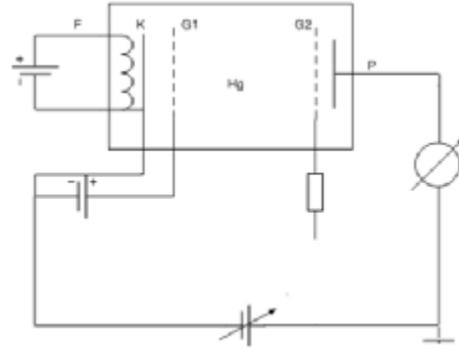


图 c. 将减速电压去除，把加速电压的区域 KG2 加大到 KP，从而  $G_2$  栅网在 vapor 中不接入电路。

观测到以下图像(图 d)：

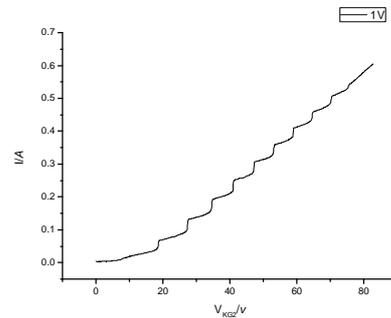


图 d. 测量条件： $T=160$ 度； $V_F=1.5v$ ； $V_{G1}=1.75v$ ；

电流表量程为 $10^{-7}$

回看原电路图(图 a)当中震荡曲线出现的条件，当一部份电子发生了非弹性碰撞随后，由于有减速电压的作用，所以这部分损失能量的电子不能到达P极，从而导致了P端电流出现下降情况(斜率小于零)。在修改过后的电路图(图c)中，电子基本上都可以(拥有径向速度的电子)可以打到极板上，所以在图d中电流持续呈现逐渐上升趋势(保持曲线

每一点斜率大于零)。

在一个阶梯出现的周期中，借用 Drude 模型[3]的概念,由  $\vec{J} = s \vec{E}$ , 于是在图 d 中,

$$\frac{dJ}{dE} = s = \frac{n^2 e t}{m^*} = \frac{n^2 e l}{m^*} \left( \frac{1}{V_d + V_T} \right),$$

其中  $V_d$  为电子由于电场加速而得到的漂移速度,  $V_T$  为电子的热运动速度,  $l$  为平均自由程。

故对于一个阶梯周期中, 电流上升较快的一段(斜率较大), 电子运动速度小, 故在这一段时, 电子速度达到 4.9eV 从而碰撞损失能量  $V_d$  减小导致斜率上升。电流上升较慢的一段(斜率较小), 电子运动速度大则对应着电子重新加速的过程。

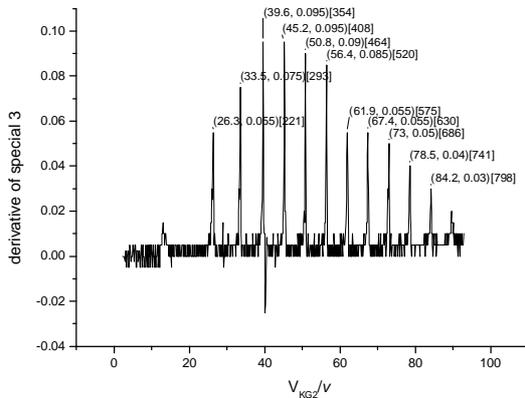


图 e. 图 d 的微分图像

上图 d 中, 每一个峰值的位置都代表了图 d 中阶梯上升阶段出现的位置, 根据图 e 的峰峰差值即可得到图 d 中每一个阶梯的宽度

n	1	2	3	4	5
V/v	26.3	33.5	39.6	45.2	50.8
n	6	7	8	9	10
V/v	56.4	61.9	67.4	73	78.5

台阶宽度平均值为 5.575v, 根据资料可知 Hg

原子第一激发能级碰撞概率最大值出现的位置即位电子能量为 5.5eV 时。当电子达到这一能量后,  $3P_1$  (4.89eV) 和  $3P_2$  (5.46eV) 的激发截面同时达到最大, 所以碰撞大规模的发生, 速度大幅下降, 从而直接导致了斜率的大幅上升。

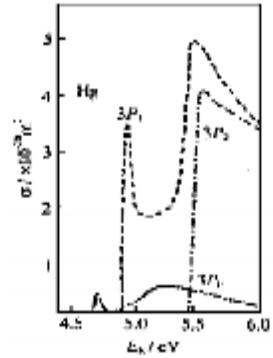


图 f. [4]汞原子三重态激发截面与电子能量的关系

事实上, 由于  $G_2$  栅网的存在, 栅网附近的电场线会弯曲, 从而使得电子受到栅网的吸引势, 如果栅网外接电路则, 在网格边缘的某一区域内, 电子会持续的从栅网中流出, 从而产生了电子在  $G_2$  栅网上的损耗。(simion 模拟补充)

在本电路当中,  $G_2$  并没有联入电路, 所以电子不会因为碰撞损失能量而持续的被  $G_2$  栅网俘获, 所以可以看到, 观测到的电流曲线当中, 并没有电流下降段, 即不存在电子的大量损失。

### 3. 同时测量 $G_2$ 栅网及 P 极板电流

如下改装电路图 g

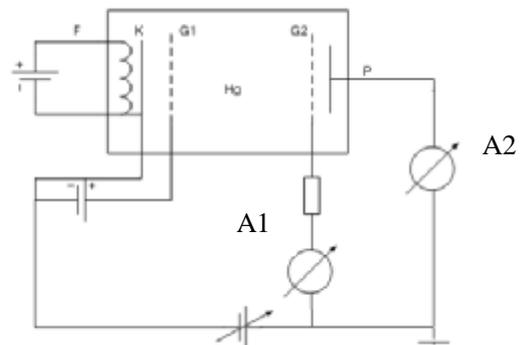
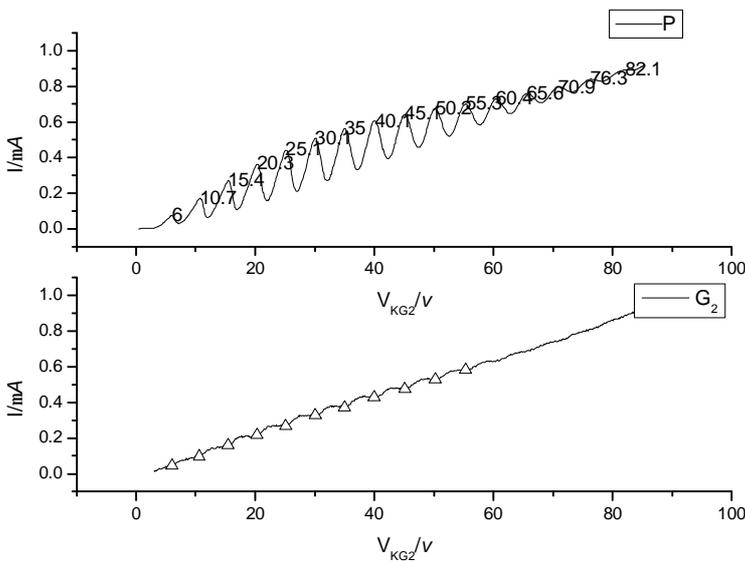


图 g. 同样将减速电压去除, 把加速电压的区域  $G_2$  加

大到KP，但是把  $G_2$  栅网通过电流表A1 连接入电路图。

$G_2$  被联入电路则电子可以源源不断的被俘获。

$G_2$  栅网测到电流及 P 极板测到的电流曲线如下图所示：（图 h）



对  $G_2$  栅网电流：每发生一次碰撞，电子的速度就会减少，能量降低，则易于被  $G_2$  栅网俘获，进而  $G_2$  栅网上的电流上升就快。而电子重新被加速后， $G_2$  栅网能够俘获的电子数就会减少，就会出现电流上升较慢的情况。所以在  $G_2$  栅网上能看到电流出现震荡。

P 极板电流是正常的 F—H 曲线，从而可知，无论  $G_2$  栅网是接入反向电压或者正向加速电压，只要  $G_2$  栅网接入电路，就会出现正常的震荡曲线。进一步可以认为电子源源不断的从  $G_2$  中流入电路，是震荡出现的主要原因。

图 h 表现出震荡最高点的关系。 $G_2$  图中  $\Delta$  标示的位置就是 P 图中峰值出现的位置。对于 P 电

流图，经过一个峰值后，大量的电子由于能量减损，所以会被  $G_2$  吸收掉从而不能达到 P 极，电流迅速减小。对于  $G_2$  电流图，当经过位置  $\Delta$  后，电子能量迅速下降，栅网俘获的电子增多，从而  $G_2$  的电流快速上升。

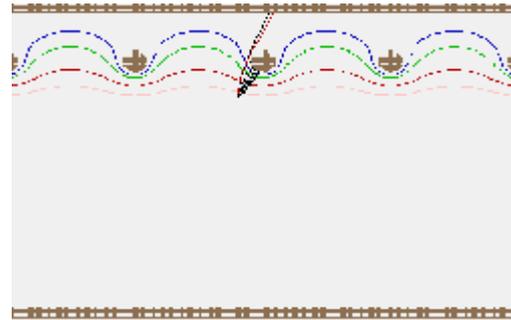


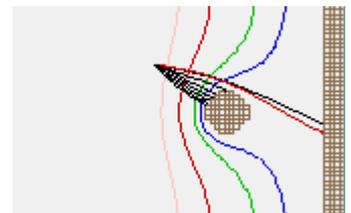
图 i. Simion8 软件模拟电势分布图

$G_2$  与 P 保持等电势为 40V， $G_1$  电势为 0V  
蓝色电势线为 39V；绿色电势线为 38V  
粉色电势线为 34V；红色电势线为 31V

上图（图 i）为用 Simion8 软件模拟出的  $G_2$  栅网附近的电势分布图。

可以看出，电势线在  $G_2$  附近有强烈的弯曲，而在附近运动的电子会感受到一个向  $G_2$  栅网加速的弯曲电场。如果电子的径向速度足够大，这可以成功的脱离这个势场的

作用，仍然打在 P 极板，产生电流。但如果电子在势场的作用范围内正好发生了一次碰撞、损失了能量的话，则易于被势



场俘获，打到  $G_2$  栅网上，并顺着电路流出（本电路中， $G_2$  栅网接地）。而在 P 端的电流则表现为电流迅速下降，这样也就解释了为何在试验当中，减速电压减为 0V 时，甚至减速电压不小心接反了变成

了加速电压也仍然能看到 F-H 振荡曲线。右图中的黑线部分显示的是不同角度的电子在势场附近飞行轨迹的不同。可以看出在一定的角度、能量范围内，电子确实会打到  $G_2$  栅网上。

## 总结

本文中对于  $G_2$  栅网对于电子俘获的影响作了初步的假设：认为由于  $G_2$  栅网的存在，栅网附近的电场线会弯曲，从而使得电子受到栅网的吸引势，能量小的电子易被栅网俘获并流入电路，从而导致了 F-H 振荡曲线中电流下降。解释了为何在减速电压  $V_{G_2}$  为零甚至反向时仍能看到振荡曲线。并粗略的使用程序模拟定性的验证了这个想法。

## 参考文献：

- [1] I. Langmuir, Phys. Rev. 38.1656 (1931)
- [2] 《近代物理实验》 高等教育出版社
- [3] 《固体物理基础》 阎守胜 北京大学出版社
- [4] 《弗兰克赫兹实验中的峰间距问题》 物理实验 第 21 卷, 11 期 图 2
- [5] Simion8 使用手册
- [6] 弗兰克-赫兹实验中逆向电流现象研究 董必勤, 丁玄峰, 乐永康