

探讨 Franck—Hertz 实验曲线峰间距逐渐增加现象

眭孟乔 06300300005

(复旦大学物理系, 上海 200433)

摘要: Franck—Hertz 实验中, I_p — V 信号峰间距随电压上升呈逐步增加趋势。本文通过对实验装置内电子、汞原子估计, 提出该曲线应是由多个激发态共同导致, 并通过图形上拟合实验微分曲线进一步证明本文的观点: Franck—Hertz 实验所得周期性曲线中峰间距逐渐增大是由汞原子的多个激发态共同作用导致的。

关键词: Franck—Hertz 实验; 峰间距; 曲线微分; 多能级激发

A discussion about the gradual increase of distance between peaks of the I_p - V curve of Frank-Hertz Experiment

ABSTRACT: In the Franck—Hertz experiment, the distance between peaks of the I_p - V curve increases gradually. We estimated the density of electrons and Hg atoms and, based on the calculation, concluded that the increase of peak distance might contribute to different excitation levels of Hg added together. We simulated the process by adding curves analogy to the differential curve together to support our conclusion.

KEYWORD: Frank-Hertz experiment; peak distance; differential; excitation level

1 引言

Franck—Hertz 实验是利用加速阴极发射出的电子撞击 Hg 蒸汽原子, 通过观测阳极最终接收到的电流 I_p 和加速电压 V 的关系, 来观察 Hg 原子能级信号的重要实验。实验中观测到峰间距约为 4.9 eV, 与汞的第一激发能级一致, 从而证明能量量子化。然而, 实验观测到峰间距并不严格等于 4.9 eV, 而是随加速电压逐渐增加。有关该现象有文章提出是由低能级激发造成前几个间距变小 [1], 但一直没有一个完整的解释, 同时该现象与仪器本身也有很大关系 [2], 本文通过计算实验装置中电子、汞原子数来推论实验曲线是由汞原子不同激发态叠加得到的, 并通过图形拟合实验微分曲线来进一步证明这样的叠加将导致峰间距逐渐增加。从而希望进一步解释 Franck—Hertz 实验峰间距增加的现象。

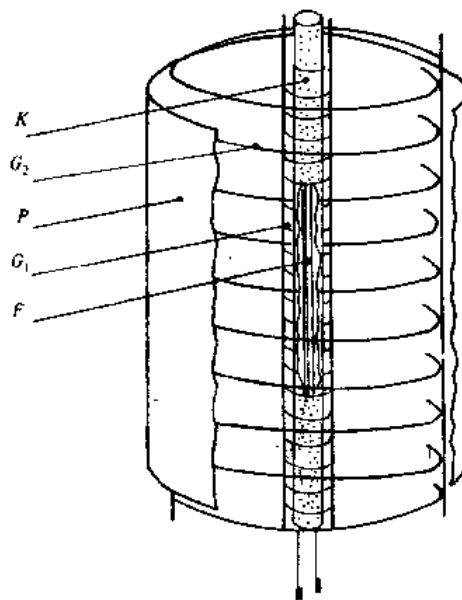
2 实验原理和实验装置

实验采用复旦双栅柱面型四极式 Franck-Hertz 管, 如右图所示, 其中 G_1 、 G_2 分别为控制极栅和加速极栅, P 为敷铝的铁皮圆筒。F 为热子, 由双向绞绕的钨丝构成, 阴极 K 和热子 F 构成傍热式阴极, 加热时可发射大量电子。此外, 抽成真空的 Franck—Hertz 管中还安放有 Hg 源, 一旦对管体进行加热, 即会有 Hg 原子脱离束缚, 形成 Hg 蒸汽。具体尺寸如下:

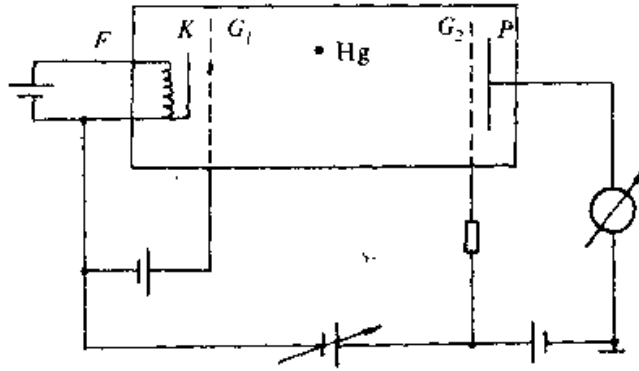
P 板直径: 14 mm

G_1 直径: 1.8 mm

G_2 直径: 12 mm



实验电路图如右图所示，对灯丝加电压 V_F （1~5V），对其加热从而使之发射电子； V_{KG1} 为抽取电压（0~5V），用以消除电子在阴极附近的堆积效应； V_{KG2} （0~100V）为电子加速电压； V_{G2P} （0~15V）为反向电压，用以控制能够到达阳极P的电子的最小动能。



电子由灯丝发出之后，进入加速区加速，并在此过程中与Hg原子进行碰撞。电子与Hg原子发生弹性碰撞时，其动能几乎无损失。而当电子动能达到Hg的某一激发态能量时，其与Hg原子发生非弹性碰撞，其能量被Hg原子共振吸收，从而损失全部动能，电流迅速下降；当加速电压继续增大时，失去动能的电子又被重新加速，从而使电流又重新增大，这样便在 I_p-V 曲线上形成峰和谷。

3 实验

3.1 实验方法

按电路图连接各极板电路。选择合适参数进行实验，由计算机收集数据。

3.2 实验分析

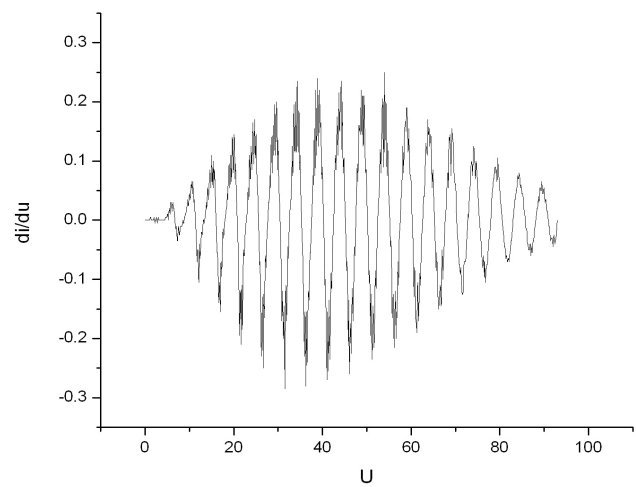
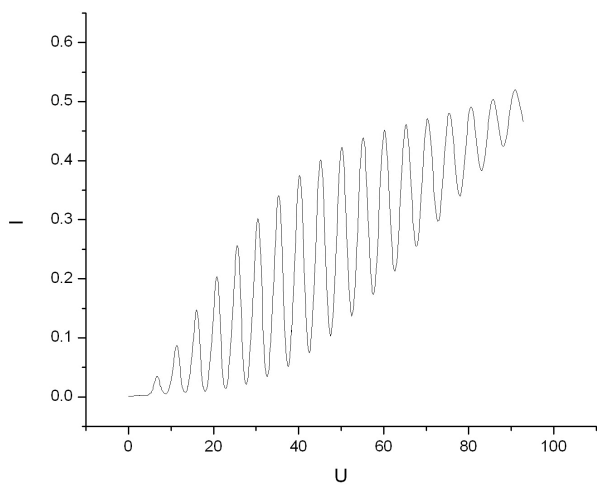
3.2.1 装置内电子、汞原子数估计

由上述Franck—Hertz管直径及其长度算出汞蒸汽体积，170度汞饱和蒸汽压6.125mmHg[3]，代入理想气体方程粗略估计整个管中汞原子数量在 10^{19} 量级。同时由灯丝电压以及电流可以估计出灯丝发射电子速率在 10^{18} /秒量级，然而在接收端电子接受速率为 10^{12} /秒量级，说明电子在管中损失大部分，并且知道汞 6^3P_0 态(4.67eV)是亚稳态，电子在其上寿命为 10^{-5} 秒，是汞第一激发态

6^3P_1 态(4.89eV)上寿命 10^{-8} 秒的1000倍，因此观测到4.67eV被忽略而体现为4.9eV左右的峰间距。但是，即使是亚稳态，每秒中也最多可以进行 10^5 吸收，也就是说汞原子数需要相应乘以 10^5 ，由此可见实验过程中汞原子数始终是远远大于电子数的。除了4.89eV起主要作用外，其他能级如4.67eV, 5.46eV, 6.70eV都会参与到其中，并且其作用不能被忽略。

3.2.2 实验数据处理

选取在 $V_f=1.6V$, $T=170^\circ C$, $V_{g1k}=1.6V$, $V_{g2p}=2.0V$ 条件下的数据点作图，得到经典的实验图(图1)，然而除了峰间距逐渐增加外，整个图形为何呈纺锤状也是没有定论的，在此为了避开这个



本底为何的问题,我采用了将原图微分的方法.微分后得到电流在不同加速电压下的变化快慢图(图2),而此时的峰对应原图中增长最快的点,统计这里的峰值如表1所示:

图一

图二

峰号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
峰值	6.6	11.3	16.0	20.8	25.5	30.4	35.3	40.2	45.2	50.2	55.2	60.2	65.2	70.3	75.3	80.5	85.7	90.8
间距		4.7	4.7	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.0	5.2	5.2	5.1
	微分图																	
峰值	6.3	10.5	15.0	20.0	24.7	29.6	34.3	38.9	44.2	48.7	53.9	59.0	63.8	69.2	74.1	79.5	84.3	89.5
间距		4.2	4.5	5.0	4.7	4.9	4.7	4.6	5.3	4.5	5.2	5.1	4.8	5.4	4.9	5.4	4.8	5.2

表一

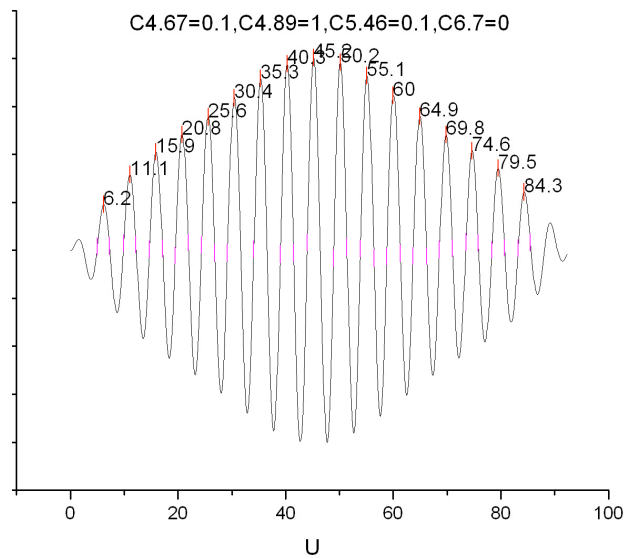
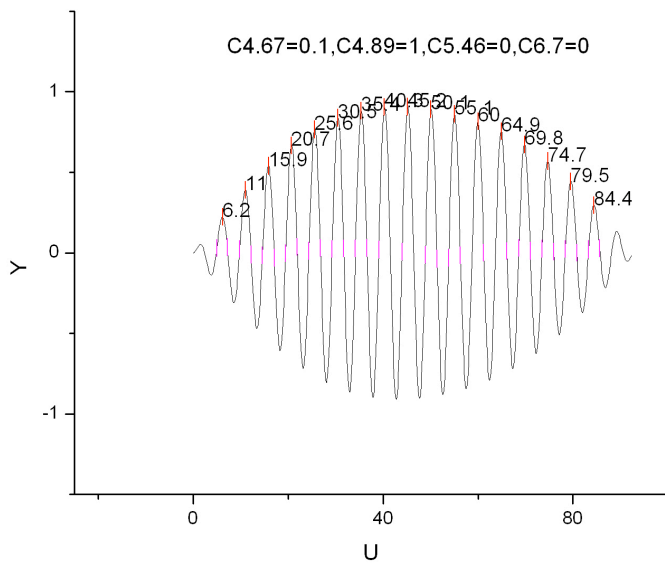
由表一数据分析可见,原图峰间距呈逐渐增加变化,微分后的峰间距则没有这个规律,而是大致成以4.9为中心,忽大忽小间隔分布,其平均值比原平均值稍小.值得关注的是微分图与两个正弦函数相乘所得图非常相似.

3.2.3 图形模拟

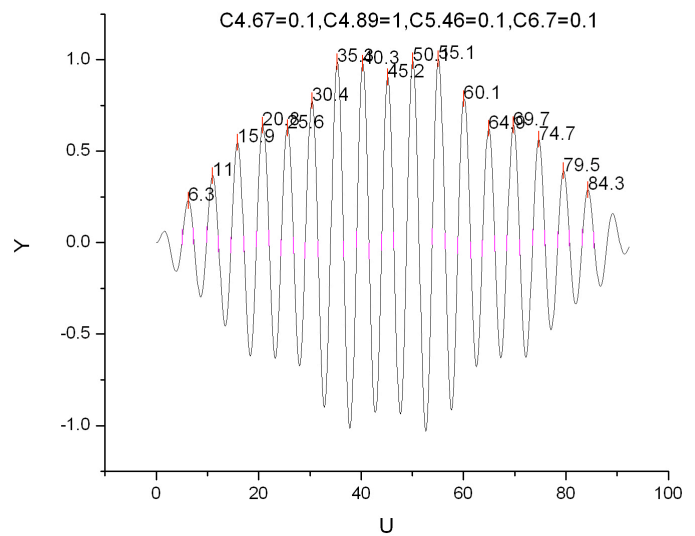
由最初分析管内过程应是4.89eV激发为主,辅以其他激发态共同形成的,各激发态所形成的峰应是等间距的.我们希望通过一系列的正弦函数相乘后叠加起来模拟这个多能级共同作用的过程,不过这仅仅是几何图形上的模拟,并不代表任何物理过程.

假设这是由两个不同周期的正弦函数相乘, $Y = \sin(6.28U/T_1) * \sin(6.28U/T_2)$,式中 T_1 为激发能级, T_2 为整个测量长度的两倍.如此将 T_1 分别用4.67, 4.89, 5.46, 6.7代入则可以模拟出各能级的微分图形.显然对于各个值,单一作图均可得到等间距的图形,这好比是管中只有一个激发能

级的情况. 总的作用即这几个函数相加得到:



$$Y=C4.67*\sin(6.28U/4.67)*\sin(6.28U/186.8)+C4.89*\sin(6.28U/4.89)*\sin(6.28U/185.8)$$



$$+C5.46*\sin(6.28U/5.46)*\sin(6.28U/185.6)+C6.70*\sin(6.28U/6.70)*\sin(6.28U/187.6)$$

其中 T_2 的取值仅仅以为对应 T_1 的整数倍为标准, 从而达到图形的统一. $C4.67-C6.70$ 分别表示对应函数的权重, 0表示没有该能级作用, 1表示该能级权重最大. 取不同C值作图, 如下:

图三

图四

分析模拟图可以看出, 当只有4.67与4.89有贡献时(图三), 此时峰间距出现了少许的4.8, 偏离原来的4.9; 当加入5.46的贡献后(图四), 峰间距中偏离4.9的项更多, 且出现了5.0; 当加入6.7

的贡献后(图五), 峰间距的组成更接近实验的分布, 且出现了4.7, 4.8, 4.9, 5.0. 由此从图像的叠加上表明微分图峰间距的不同有可能是多个等间距的过程叠加而成, 最终反映在实验原图上呈逐渐递增关系. 表二列出了各图中峰间距.

图五

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
图三	4.8	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.9
图四	4.9	4.8	4.9	4.8	4.8	4.9	5.0	4.9	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.9	4.8
图五	4.7	4.9	4.9	4.8	4.8	4.9	5.0	4.9	4.9	5.0	5.0	4.8	4.8	5.0	4.8	4.8

表二

同时我们可以想象, 权重越大的过程将使最终的峰间距越接近该过程的峰间距. 表三列出不同权重下峰间距的平均值, 结果也是符合我们的设想的.

C4.67	C4.89	C5.46	C6.7	峰间距
0.1	1	0.1	0.1	4.893
0.1	1	0.3	0.3	4.903
0.1	1	0.001	0.001	4.890

表三

4 结论

我们首先估计出在Franck—Hertz 管内汞原子数远大于电子数, 从而推论整个过程应是由多个等间距的汞的不同激发态叠加而成, 由此我们采用从图像上模拟实验微分曲线的方法从一个侧面证明了这个推论的可能性. 当然这只是非常粗糙以及非物理的证明, 在后续研究中需要对整个物理过程做出估计, 列出各个独立的激发态对应的过程, 从而从实验数据中分离出各个激发态的贡献, 达到最终解决该问题的目的.

5 感谢

感谢张新夷老师热心的指导, 感谢B10, B11, B12组同学在讨论中提出的种种建议.

6 参考文献

- [1]Gerald Rapior,“ New features of the Franck-Hertz experiment ” Am. J. Phys. 74(5), May 2006.
- [2]G.F. Hanne,“ What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?” Am. J. Phys. 56(8), August 1988.
- [3]吴思诚 王祖铨. 近代物理实验. 北京大学出版社.