从一般弗兰克赫兹实验与电子能量分布实验的角度看实验参数对弗兰克赫兹实验结果的影响

杜秉俊
（复旦大学物理系，上海 200433）

摘要：本论文通过一般弗兰克赫兹实验与电子能量分布的测定实验，针对灯丝电压、抽取电压、加速电压、减速电压、温度五个实验参数对实验结果的影响进行了对比分析，试图从两个角度加深对该实验原理与现象的理解。

关键词：弗兰克赫兹实验，电子能量分布，实验参数

引言

在一般弗兰克赫兹实验中，灯丝电压、抽取电压、加速电压、减速电压、温度五个实验参数对实验结果有着非常大的影响，可以通过控制变量的方法，在对实验图像分析对比的基础上，结合实验原理说明各参量对实验结果产生影响的原因。同时，也可以通过对实验管中电子能量分布的测定来研究各实验参量对实验结果的影响，为更好地解释实验结果提供了一个新的角度。在选修近代物理实验之前，曾参与了对弗兰克赫兹实验中电子能量分布的研究，但当时对一般弗兰克赫兹实验并没有实际的了解，本学期在完成了一般弗兰克赫兹实验后，结合之前已完成的弗兰克赫兹实验中电子能量分布的研究，从两个不同的角度来看弗兰克赫兹实验中实验参数对实验结果的影响。

实验背景

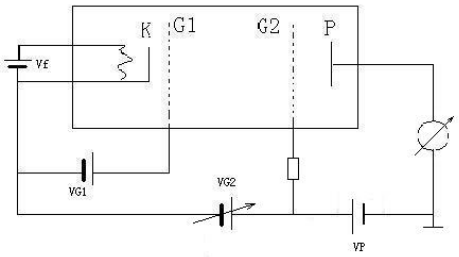
1913 年,丹麦物理学家玻尔根据光谱学的研究、卢瑟福的原子核模型和普朗克、爱因斯坦的量子理论提出了一个氢原子模型并指出原子存在能级。该模型在预言氢光谱以及观察中都取得了显著的成功。根据玻尔的氢原子理论，原子光谱中的每根谱线表示原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时产生的辐射。弗兰克赫兹实验是弗兰克和赫兹在 1914 年也就是在玻尔发表他的氢原子理论后的第二年做的。他们采用慢电子(几个到几十个电子伏特)轰击单元素气体原子的办法，利用两者的非弹性碰撞将原子激发到较高能态，证明了原子内部能量量子化的存在，给玻尔理论提供了独立于光谱研究之外的直接的实验证据。由此他们获得了 1925 年的诺贝尔物理学奖，玻尔也因为他的氢原子理论获得了 1922 年的诺贝尔物理学奖。

实验原理

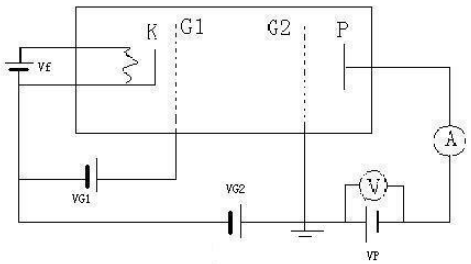
一般弗兰克赫兹实验原理可参看《近代物理实验》，实验接线如图一，Vf 是灯丝电压（0-5V）、VG1 是抽取电压（0-5V），VG2 是加速电压（0-100V）、VP 是反向截止电压（0-100V），实验设备中较为重要的是复旦双栅柱面型四极式弗兰

克赫兹充汞管，板极 P 是直径为 14mm 的敷铝铁皮圆筒，控制栅 G1 和加速栅 G2 分别是用钼丝绕制的直径分别 1.8mm 和 12mm 的螺旋线，阴极 K 是直径为 1.14mm 的镍管，管内加热用的热子 F 是双向绞绕的钨丝；K 和 G1，G1 和 G2，G2 和 P 的间距分别为 0.3mm，5mm，1mm。

研究弗兰克赫兹实验中电子能量分布的实验接线如图二，与一般弗兰克赫兹实验不同的是电压通过 cassy lab 直接接入电脑，电流经过放大后输出电压信号由 cassy lab 接入电脑，数据均由电脑采集，处理。由图可以看出接线主要在接地上进行了改进，为此改装了仪器内部接线，用以促进电路稳定性。这样只要测出电流值随反向截止电压的变化，然后做一微分处理就可以得到电子能量分布。实验中主要用到的仪器是弗兰克赫兹管、弗兰克赫兹仪、cassy lab（精度为 12bit）、电脑、稳压电源和其他辅助设备等。



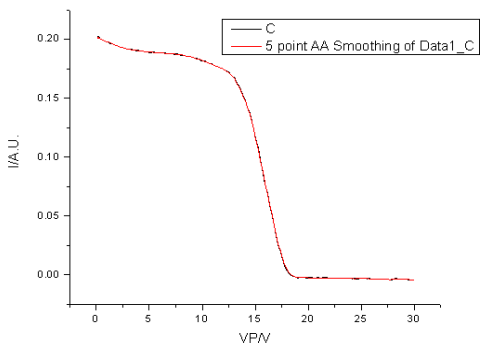
图一



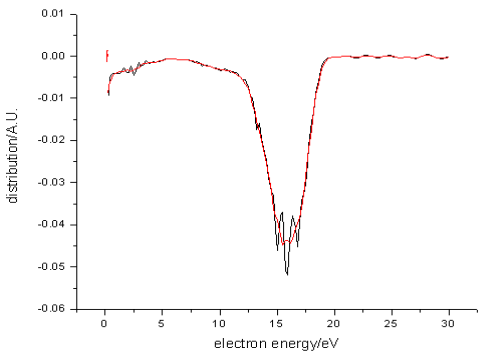
图二

实验部分

一般弗兰克赫兹实验步骤可参看《近代物理实验》。在研究弗兰克赫兹实验中电子能量分布的实验中，接好电路后，对反向截至电压进行一次扫描，得到如图三的所示的 I-VP 图，其中温度为室温，Vf=1.3V、VG1=2V、VG2=20，量程为 10^{-7}A 下测量。如图三，黑线为实际测量的图，红线是平滑后的结果，由于平滑的结果较好所以黑线和红线大部分重合，如此做两次平滑并求导后可得到了如图四的电子能量分布，取绝对值并归一化后就是电子能量分布的概率密度。如图四，黑线为求导后的直接结果，红线是平滑后的结果。



图三



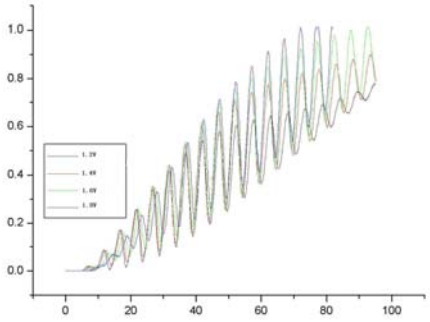
图四

结果与讨论

以下是对实验中各实验参数对实验结果影响的分析。

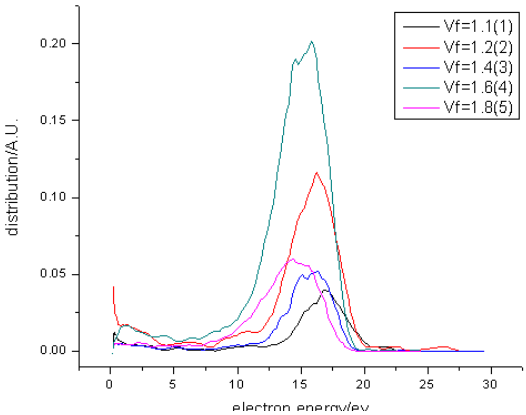
一、灯丝电压

从一般弗兰克赫兹实验中，设定实验条件为温度 170℃，加速电压 1.0V，减速电压 1.0V，改变灯丝电压从 1.2V 到 1.8V，从结果图五中可见，随着灯丝电压的增大，灯丝电压增大使得发射电子能力增强，板极电流相应增大，曲线明显上移且峰谷之间差值增大。但在实验中，当灯丝电压进一步增大后，曲线反而下移，只是因为从阴极发射的电子如果太多，在小的加速电压下不足以将电子全部抽取出来，使电子在阴极周围发生堆积效应，形成了虚阴极，虚阴极的存在使阴极发射的电子受到阻滞而不能全部参与导电，从而造成了灯丝电压增大而实验曲线反而下移的结果。



图五

电子能量测量中结果随灯丝电压的变化，实验中由于量程关系电流大小随灯丝电压的变化较快为了确保测量在仪器的量程范围内故取Vf从1.1V到1.8V，如图六为电子能量分布随灯丝电压变化的变化曲线，其中温度为室温、VG1=2V、VG2=20V，Vf=1.1V、1.2V时在电流表量程为10^{-8}下测量，Vf=1.4V、1.6V时在电流表量程为10^{-7}下测量，Vf=1.8V时在电流表量程为10^{-6}下测量。从量程的变化可知电流随灯丝电压的增大明显增大，从图中可以看出电子能量分布的峰值随灯丝电压变化较为明显左移。表一是电子能量分布峰值、半高宽与灯丝电压的关系。当灯丝电压从1.1V变到1.8V时，分布的峰值左移了差不多2V，照理说灯丝电压的增大会使发射的电子初始能量增大，从而使分布右移，实验结果与之相反，这是由于随着灯丝电压的增大，出射电子的增多，电流也增大，在K极板堆积电子数增多，从而产生附加堆积效应所致，这一点与一般弗兰克赫兹实验中得到的结果是一致的。从表一中还可以看出，随着灯丝电压的增大，半高宽也随着增大，这说明电子能量分布更加趋于分散。以下实验过程中基本保持灯丝电压不变，所以这部分的影响一般不用考虑。



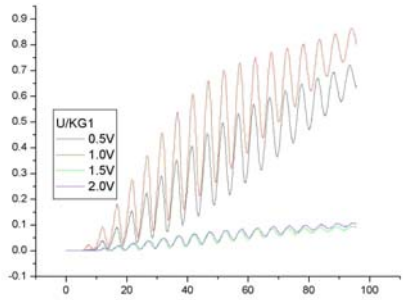
图六

表一 能量分布峰值、半高宽与灯丝电压的关系

灯丝电压/V	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8
分布峰值/eV	16.9	16.2	15.9	15.5	14.7
半高宽/eV	3.8	4.4	3.9	4.5	5.3

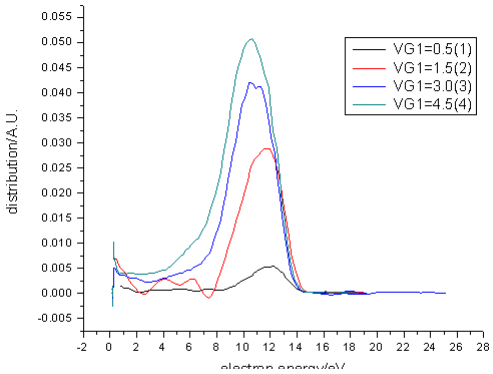
二、抽取电压

抽取电压用于消除电子在阴极附近的堆积效应，在一般弗兰克赫兹实验的结果图七中可见，随着抽取电压的增大，板极电流总体上移，且峰谷差明显，这是由于抽取电压驱散了阴极附近堆积的电子云，消除了空间电荷效应对阴极电子发射的影响，提高了电子流的大小。担当抽取电压过大时，电子的发射达到饱和，此时抽取电压会减小电子流的大小，使曲线分辨率下降，不利于得到理想的实验结果。



图七

电子能量分布实验在Vf=1.3V、VG2=15V的条件下进行测量，量程采用10^{-7}。如图是抽取电压分别为0.5V、1.5V、3V、4.5V时的电子能量分布。从图八中可以看出其中能量分布的峰值均小于15eV（加速电压为15V），而且随着抽取电压的变化电子能量分布峰值减少（如表二是电子能量分布峰值、半高宽与抽取电压的关系），但是并没有呈现线形变化。这是由于当抽取电压增大时电子中能量较少的一部分电子也被抽取出来了，且电子流减小因而峰值往左偏移，但是灯丝发射的电子仍然会在k极板堆积一部分形成附加电场所以能量会小于15ev。半高宽没有呈现一定的变化趋势。



图八

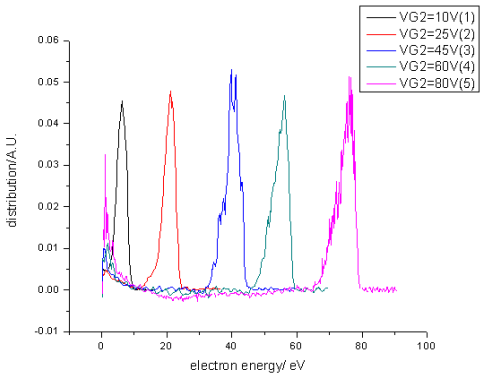
表二 能量分布峰值、半高宽与抽取电压的关系

抽取电压/V	0.5	1.5	3. 0	4.5
分布峰值/eV	11.9	11.5	10.7	10.5
半高宽/eV	4	3.6	3.8	4.2

三、加速电压

一般弗兰克赫兹实验中不需要进行加速电压的测量，在电子能量分布实验中取加速电压分别为10V、25V、45V、65V、80V。如图九是电子能量分布随加速电

压的变化，实验在Vf=1.3V，VG1=2V，室温条件下测量，量程采用10^{-7}。从图中可以看出当加速电压增大时，电子能量分布峰值也随之增大，并且呈现线形分布，比较每条曲线可以看出当加速电压变化时基本上就是能量分布的平移，形状变化并不是非常明显，由于加速电压的理论目的是增加电子能量，这一结果与理论比较相符。对每个峰的半高宽进行测量我们将发现随着加速电压的变化半高宽也将增大。如表三是是电子能量分布峰值、半高宽与加速电压的关系。表三中虽然半高宽变化不是特别明显，但是从图中仍可以看出半高以下的部分宽度变化相当明显。这说明加速电压的增大也会使能量分布趋于分散。



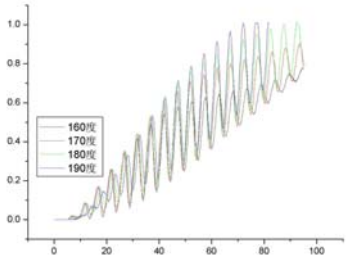
图九

表三 能量分布峰值、半高宽与加速电压电压的关系

加速电压/V	10	25	45	60	80
分布峰值/eV	6.39	21.1	39.8	56.1	76.0
半高宽/eV	3.7	4.0	4.2	4.4	4.4

四、温度

在一般弗兰克赫兹实验中（图十），随着温度的升高曲线整体上移，这是由于温度上升使得汞原子的饱和密度和自身动能增大，电子的平均自由程变短使得汞原子的激发率减低，电子与汞原子的碰撞机会大增，到达板极电子相应减少。



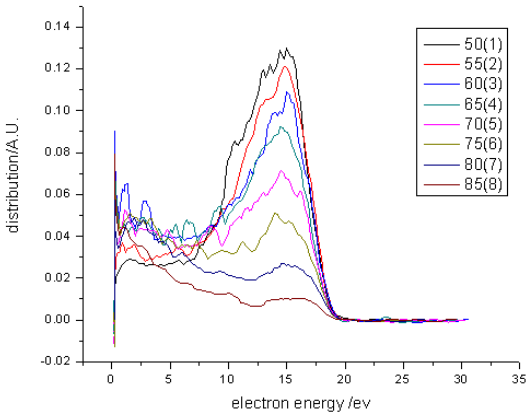
图十

在电子能量分布测量中，由于温度控制仪最低的控制温度为 50 度，而温度高时气压增大，容易发生非弹性碰撞影响测量结果，所以温度取值范围是 50 度到 85 度，每隔 5 度测量一次。如图十一是电子能量分布随温度的变化，本次实验在 vf=2V、vg1=2V、vg2=20V，量程采用 10^{-6} 下测量。从图中可以看出温度低时（50-65）电子能量分布变化不明显，当温度再升高时，低能量的电子所占比重将增大，在 15eV 左右仍有一个峰存在，但是电流大小明显降低。这是由于采用的弗兰克赫兹管的电场是径向非匀强分布，当温度升高时汞的蒸汽压也随之升高，这样增大了碰撞的概率，虽然弹性碰撞对电子能量的影响比较小但会对电子运动方向产生影响使一部分电子径向运动能量减少，到达 P 极板的电子数也会减少，所以会产生图中的变化。由参考文献[1]可知汞的饱和蒸汽压和温度之间的关系有式（1）

$$\lg\frac{p_{饱}}{p_a}=-\frac{3200}{T/K}+10.125$$

根据式（1）实验中当温度从 50 度到 85 度时，饱和蒸汽压差不多变化了 10 倍，又由电子在稀薄气体中的平均自由程式（2）

$$\lambda_e = \frac{4kT}{\pi d^2 p}$$

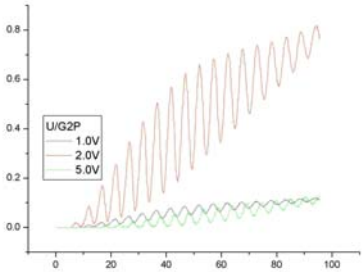


图十一

可知平均自由程大约变为原来的 9 倍，明显增加了碰撞的概率。这一变化也体现在图八种。当温度升高到一定程度（如 150），汞的蒸汽压大约是 300Pa，而由（2）计算得平均自由程大约为 1mm，由此可算得碰撞概率大于 98%，也就是说当温度大到 150 时基本上大部分电子都参与了碰撞，温度再高时对碰撞的概率不再发生太大变化，但对非弹性碰撞或许仍会有一定的影响。

五、减速电压

减速电压使能量较低的电子无法到达板极形成电流，减速电压越大，能够到达板极的电子数越少，板极电流越小，随着减速电压的增大（图十二），曲线峰谷值减小，峰值位置明显增大，但峰间距与减速电压大小没有明显关系。在电子能量分布测量中不需要进行减速电压的测量。



图十二

小结

本文通过在一般弗兰克赫兹实验与电子能量分布的测定实验中，灯丝电压、抽取电压、加速电压、减速电压、温度五个实验参数对实验结果的影响的研究，加深了对实验原理与现象的理解，在文章中力求使两种实验得到的结果互相参证，从不同的角度使实验结果得到更全面的理解与分析。

近代物理实验与普通物理实验最大的区别在于它不再是照着书本进行操作，而是更强调学生的独立思考与对实验的整体把握能力，要做好一个实验就需要参考前人的论文与资料，在原理上吃透并带着问题目的明确地走进实验室，清楚地知道自己要做什么，并在讨论与思考中探索该怎么做以及为何这样做，可以说是对实验能力与思维能力的一次升华，通过一学期的实验使我受益匪浅，在此向所有本学期指导并关心过我的老师致以诚挚的感谢！

参考文献:

[1] 戴乐山, 戴道宣. 近代物理实验[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995
[2] 王丽香,李宝胜.夫兰克-赫兹实验最佳工作参量的确定.物理实验，Vol. 26 No. 10 Oct,2006
[3] 朱筱玮,陈永丽.充氩弗兰克- 赫兹实验研究.大学物理，Vol. 26 No. 7 July 2007

Looks at the experiment parameter from a general Franker Hertz experiment and the electron energy distribution experiment's angle to the franker hertz experiment result influence

Du Bingjun
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The present paper through a general Franker Hertz experiment and the electron energy distribution's determination experiment, in view of the filament voltage, the extraction voltage, the accelerating voltage, the decelerating voltage, the temperature five experiment parameters has carried on the contrastive analysis to experimental result's influence, attempts to deepen from two angles to this experiment principle and the phenomenon understanding.

Key word: Franker Hertz experiment, electron energy distribution, experiment parameter