

弗兰克 - 赫兹实验中电流信号强度随温度变化的现象

唐爽^{1,2}, 白翠琴², 马世红²

(1. 麻省理工学院 材料科学与工程系 美国马萨诸塞州 剑桥市 02139; 2. 复旦大学 物理系, 上海 200433)

摘要: 弗兰克 - 赫兹实验中 $I_p - V_{G2K}$ 信号的强度会随温度和灯丝电压而变化. 本文发现在温度低于 160°C 时 $I_p - V_{G2K}$ 信号强度随温度的升高而减小; 当温度超过 170°C 后, 信号随温度的升高而增大. 本文提出了电场中 Hg 蒸气被热电离的模型, 利用热力学平衡定律和 Le Châtelier 原理, 对此现象提出了合理的解释并通过了实验的验证.

关键词: 弗兰克 - 赫兹实验; $I_p - V_{G2K}$ 信号强度; 热电离

中图分类号: O 562.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0712(2012)09-0050-03

弗兰克 - 赫兹 (Franck - Hertz, 缩写为 F - H) 实验是利用加速阴极发射出的电子撞击 Hg 蒸气原子, 通过观测阳极最终接收到的电流 I_p 和加速电压 V_{G2K} 的关系, 来观察 Hg 原子能级信号的重要实验. 其信号的大小受到温度、灯丝电压、反向电压等诸多因素的影响.

对于温度对 $I_p - V_{G2K}$ 信号强度的影响, 现有文献中并无明确描述^[1,2]. 一般认为, 温度升高会使电子在 Hg 原子蒸气中的平均自由程变小, 从而使信号减弱. 但本文通过在不同灯丝电压下, 对不同温度时的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线做的系统测量, 并经过仔细分析, 发现 $I_p - V_{G2K}$ 信号强度随温度的变化趋势并非简单的单调变化. 由于在不同的温度区间内, 决定信号强度的主要物理过程不一样, 故其随温度的增减趋势亦会发生相应的变化.

1 实验原理和实验装置

实验采用复旦双栅柱面型四极式 F - H 管, 电路连接如图 1 所示, 其中 G1、G2 分别为控制极栅和加速极栅, P、F、K 各为阳极、灯丝和阴极. 此外, 抽成真空的 F - H 管中还安放有 Hg 源, 一旦对管体加热, 即会有 Hg 蒸气形成. V_F (1 ~ 5 V), V_{G1K} (0 ~ 5 V), V_{G2K} (0 ~ 100 V), V_{G2P} (0 ~ 15 V) 分别为灯丝电压、抽取电压、加速电压和反向电压. 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. 到达 P 的电子携带有 Hg 的能态信息, 最终以电流信号的形式被检测到. 电流信号的强度受

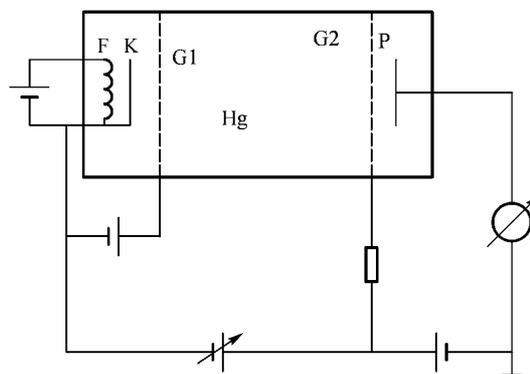


图 1 弗兰克 - 赫兹实验电路图

到阴极电子流密度、电子与 Hg 原子碰撞频率等多方面因素影响. 本实验对此作了系统研究.

2 实验方法

按图 1 连接 F - H 管的各极板电路. 固定实验参数 $V_{G1K} = 5 \text{ V}$, $V_{G2P} = 1.5 \text{ V}$, 分别在灯丝电压 V_F 为 1.2 V、1.4 V、1.6 V、1.8 V 时, 测量 $T = 30 \sim 190^\circ\text{C}$ 温度范围内 $I_p - V_{G2K}$ 曲线.

3 实验结果和分析

实验结果表明, 在 V_F 分别为 1.2 V、1.4 V、1.6 V、1.8 V 时 $I_p - V_{G2K}$ 曲线总体强度随温度的变化趋势都相同. 其均可分为 3 个阶段, 以 $V_F = 1.2 \text{ V}$ 为例. 第一阶段: 温度较低时, Hg 原子尚未获得足够动

能摆脱束缚状态形成蒸气,此时 F - H 管中几乎无 Hg 原子与电子发生碰撞 $I_p - V_{G2K}$ 曲线为电子二极管的伏安特性曲线. 图 2 所示为温度在 30 ~ 70℃ 间的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线.

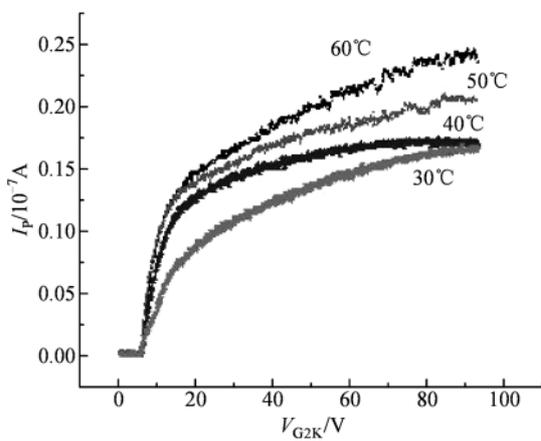


图 2 30 ~ 70℃ 间不同温度下的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线

第二阶段: 随着温度的升高,大量 Hg 原子脱离束缚形成蒸气, F - H 管中的 Hg 原子蒸气压力迅速上升,电子在加速过程中与大量的 Hg 原子发生碰撞,开始出现能态信号. 笔者观察到此时整个 $I_p - V_{G2K}$ 曲线的信号强度是随温度的升高而降低的. 图 3 所示为温度在 70 ~ 150℃ 间的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线.

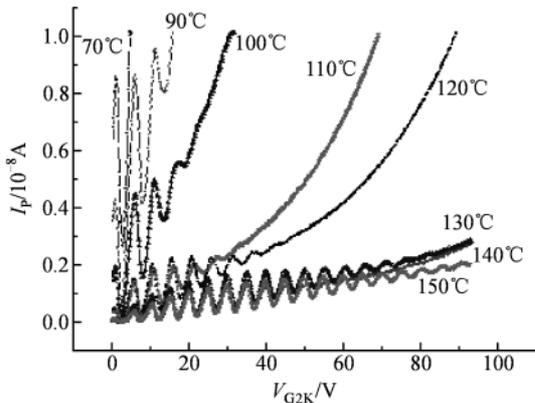


图 3 70 ~ 150℃ 间不同温度下的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线

第三阶段: 当温度继续升高达到一定值后 $I_p - V_{G2K}$ 曲线的信号强度又开始随温度的升高而增大. 图 4 所示为温度在 170 ~ 190℃ 时的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线.

在各灯丝电压下 $I_p - V_{G2K}$ 曲线强度随温度的变化趋势如表 1 所示:

当温度升高时,一旦出現能态信号,就标志着 Hg 原子开始与电子发生相互作用,从而影响最终到达阳极 P 的电流. 其对电流并非单一作用,而是因温

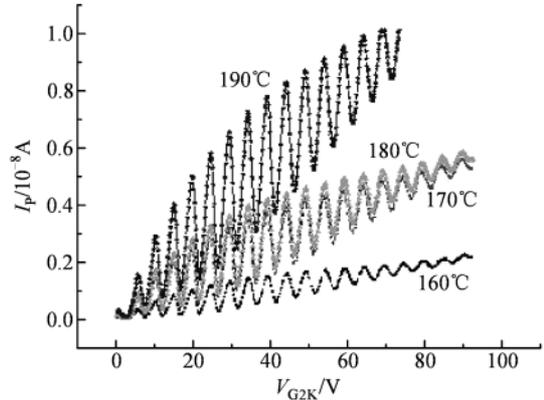


图 4 160 ~ 190℃ 间不同温度下 $I_p - V_{G2K}$ 曲线

表 1 各灯丝电压下 $I_p - V_{G2K}$ 曲线强度随温度变化趋势表 (表中,简箭头所指方向为信号强度升高的方向,斜杠表示电流计超量程.)

强度 V_F/V	1.2	1.4	1.6	1.8
30	电子管 信号	电子管信号↑	电子管信号↓	/
40		/	/	/
50		/	/	/
60		/	/	/
70		能态 信号	能态 信号	能态 信号
90				
100				
110				
120				
130	能态 信号	能态 信号	能态 信号	能态 信号
140				
150				
160				
170				
180	能态 信号	能态 信号	能态 信号	能态 信号
190	能态 信号	能态 信号	能态 信号	能态 信号

度不同,突显出不同的情况. 当温度较低时, Hg 原子主要通过改变电子的平均自由程来影响电流,其趋势为温度越高,信号强度越小. Hg 原子的蒸气压 p 可以描述为: $\lg(p/Pa) = -\frac{3200}{T/K} + 10.125$,其随温度的升高而指数增加. 而由气体动力学理论,电子在 Hg 蒸气中的平均自由程为 $\lambda = \frac{4kT}{\pi d^2 p}$,在所涉及的温度范围内, λ 随 T 的增加而减小^[3]. 这样,一方面电子在相邻两次碰撞之间,所能在路径上经加速获得的动能就减小;另一方面,其在到达 G2 极板前,与 Hg 原子碰撞而失去动能的机会增多. 因此,最终能够越过 V_{G2P} 的势垒,到达阳极 P 的电子的数量和能量都相应减少,从而使得整体的信号强度减小.

而当体系中温度较高时,具有较高动能的粒子数目迅速增加. 这些高能运动粒子之间的相互作用,能使其动能转变为相互之间的势能,于是气体离子被激发或电离. 这种现象称为热电离. 在高温下的 Hg 蒸气

中除了 Hg 原子与少数的高能电子发生碰撞而电离外,还可能发生一系列其他电离过程,如 Hg 原子彼此之间碰撞可以造成电离.由于 F-H 管温度很高, Hg 原子的动能较大,当两个高能原子碰撞时,其能量转移可以使 Hg 原子电离.另外,上述过程中产生的高能电子与 Hg 原子碰撞,亦能使之电离.

此 F-H 管中的气体可以认为是由电子、离子和中性 Hg 原子组成的混合气体,其各自分压必须满足热力学平衡条件.设气体的总压为 P_t ,未电离的中性 Hg 原子分压为 P_n ,电子、Hg⁺ 的分压分别为 P_e 、 P_i ,则有

$$P_t = P_n + P_e + P_i, \quad \text{且} \quad \frac{P_e P_i}{P_n} = K(T) \quad (1)$$

式(1)中 $K(T)$ 是热力学平衡常数,为温度的增函数,其表达式^[4,5]可由下式给定:

$$K(T) = \left(\frac{2\pi m}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT} \right) \quad (2)$$

于是,温度越高, Hg 蒸气的热电离程度就越高.虽然热电离效应在本实验温度下并不显著,但是由于整个体系处于电场 E 中,一旦有电子和 Hg⁺ 产生,其马上会被加速电场、反向电场加速,从而离开体系.这样一来,相当于 P_e 和 P_i 都有减少的趋势.由 Le Châtelier 原理,热力学平衡向阻止这种趋势的方向移动,这样就大大促进了电离.形式上,由电离所提供的电流 I 可以表示为 $I_i = I_i(E, T)$, 并有 $\frac{\partial I_i}{\partial E} > 0$

且 $\frac{\partial I_i}{\partial T} > 0$. 故而升高温度、增大空间电场都可以增加电离所提供的电流信号的强度.

纵上所述,温度上升所带来的主要效应是,减小电子平均自由程增加电流阻尼和提高热电离度.在温度上升的第一、第二阶段,前者占主导地位;而到了第三阶段,后者的作用开始突显,超过前者成为主要因素.

4 结果与讨论

由上述分析,可知在 F-H 实验中,温度对 $I_p - V_{G2K}$ 能态曲线信号强度的影响是:温度较低时,升高温度可以增加 Hg 的蒸气压、减小电子自由程,增加电子信号阻尼,从而使信号强度降低;温度较高时,升高温度可以加剧 Hg 的热电离,从而使信号强度升高.

为了验证高温时热电离的存在,实验中不加 F-H 管的灯丝电源($V_F = 0$),使其不发射电子,再将管温加到 170 ~ 190℃,调节加速电压.此时仍能观

察到较强电流,且电流变化的趋势为:在 160℃ 以下时基本为 0;在 160 ~ 180℃ 之间缓慢增加;在 180 ~ 190℃ 间迅速增加.图 5 所示为各温度下,不加灯丝电压,完全由热电离所致的电流信号.

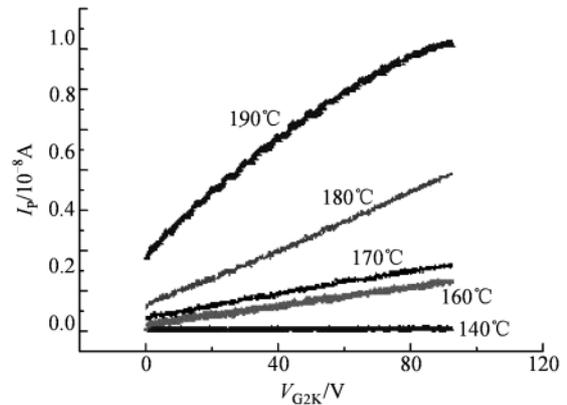


图 5 $V_F = 0$ 时热电离所致电流信号

另外,笔者还注意到在表 1 中,能态曲线信号强度随温度升高而表现为增加或减少趋势的临界温度刚好是 160 ~ 170℃ 之间,这也与此现象吻合.说明达到该温度时, Hg 原子的热电离过程开始突显,成为影响信号强度的主要因素.

5 结束语

本文通过在不同灯丝电压下,对不同温度时弗兰克-赫兹实验中 $I_p - V$ 信号强度变化的系统研究,发现了在高温时,信号强度随温度的升高而减小的异常现象.随即提出了电场中 Hg 蒸气热电离的模型,利用热力学平衡定律和 Le Châtelier 原理,对此现象提出了合理的解释并通过了实验的验证.

参考文献:

- [1] Gerald Rapior, Klaus Sengstock, Valery Baev. New features of the Franck-Hertz experiment [J]. Am J Phys, 2006, 74(5): 425-428.
- [2] 张明长, 刘海凤. 优化弗兰克-赫兹实验条件 [J]. 物理实验, 2008, 28(4): 36-38.
- [3] 戴乐山, 戴道宣. 近代物理实验 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995: 45-68.
- [4] 田荫棠. 热物理学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1991: 150-154.
- [5] [美] J R 罗沙. 磁流体发电 [M]. 北京: 科学出版社, 1975: 18-36.

(下转 60 页)

而用于大学物理实验教学. 本项目获 2011 年北京市大学生物理实验竞赛二等奖.

参考文献:

- [1] 晏敏, 彭楚武, 颜永红, 等. 红外测温原理及误差分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版) 2004, 31(5): 110.
- [2] 郑子伟. 红外测温仪概述 [J]. 计量与测试技术, 2006, 33(10): 22.
- [3] 吕斯骅, 段家恫. 新编基础物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] 李伟斌, 熊永红. 热辐射基础实验 [J]. 物理实验, 2003, 23(1): 9.
- [5] 汪涛, 贾功贤, 袁祥辉. 非致冷微测热辐射计阵列的设计 [J]. 半导体光电, 2001, 22(2): 78.
- [6] Hanson C M. Infrared detectors [J]. Proc. of SPIE, 1992, 1735: 17.
- [7] William J P, James T W. Methods and circuitry for correcting temperature-induced errors in microbolometer focal plane array [P]. US Patent: 1998, 5756: 999.
- [8] 赵镇南. 传热学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.

A platform for the integrated research of thermal radiation

JIA Fei-lin¹, GAO Li-li², LIU Xiao², SHI Qing-fan²

(1. School of Astronautics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An experimental platform about thermal radiation is designed in this paper. Three basic principles of thermal radiation, including inverse square law of radiation, Stefan-Boltzmann radiation law and Lambert cosine law, are studied quantitatively. The results obtained agree with the theory well. The Kirchoffs law is also studied qualitatively and it demonstrates the positive relativity between radiating capacity and absorbing capacity.

Key words: thermal radiation; radiant exit; radiation law; infrared temperature measurement

(上接 52 页)

Study on the variation of current signal intensity in Franck – Hertz experiment

TANG Shuang^{1,2}, BAI Cui-qin², MA Shi-hong

(1. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA;

2. Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In the Franck – Hertz experiment, the intensity of $I_p - V$ varies with the temperature of the oven and the voltage of the filament. We find that the intensity of $I_p - V$ signal decreases with the temperature when the temperature is below 160 °C, and increases with the temperature when the temperature is higher than 170 °C. We then introduce the model of thermal excitation and ionization, which explains such phenomenon when the law of thermal-dynamic equilibrium and the Le Châtelier's law are applied. After that, we have designed some additional experiments, whose results support our postulation.

Key words: Frank – Hertz experiment; $I_p - V$ signal; thermal ionization