

Study on the Effect of Filament Voltage in the J. Frank-G. Hertz Experiment on the Experimental Results

Gaoyao Wei, Xingyu Bao, Zhong Lu

College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang
Email: wgy@zjut.edu.cn

Received: Jul. 31st, 2018; accepted: Aug. 15th, 2018; published: Aug. 22nd, 2018

Abstract

The influence of the filament voltage variation on the experimental results of J. Frank-G. Hertz Experiment is investigated. The approximate temperature of the filament can be obtained. With the curve I_A-U_{G2K} measured, it is found that in the J. Frank-G. Hertz Experiment with the same U_K , the maximum positions of the characteristic curve I_A-U_{G2K} could be linked together as a straight line, and the intersection of the lines with different filament voltages is just the same as the size of the spurn voltage U_{G2A} .

Keywords

The J. Frank-G. Hertz Experiment, The Filament Voltage, Least Square Method

弗兰克 - 赫兹实验灯丝电压对实验结果影响的研究

魏高尧, 鲍星宇, 卢 忠

浙江工业大学理学院, 浙江 杭州
Email: wgy@zjut.edu.cn

收稿日期: 2018年7月31日; 录用日期: 2018年8月15日; 发布日期: 2018年8月22日

摘 要

本文探究了灯丝电压变化对弗兰克 - 赫兹实验实验结果影响, 可以得出大致的灯丝工作温度, 通过所测

I_A-U_{G2K} 曲线, 得知弗兰克 - 赫兹实验在相同 U_K 下 I_A-U_{G2K} 特征曲线极大值位置连线成一条直线, 不同灯丝电压各条直线的交点恰好为拒斥电压 U_{G2A} 的大小。

关键词

弗兰克 - 赫兹实验, 灯丝电压, 最小二乘法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1913年, 丹麦物理学家玻尔(N. Bohr)提出了氢原子的量子模型, 指出原子存在能级, 原子光谱中的每条谱线来自于原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时的辐射, 从而成功地解释了氢原子光谱规律。1912~1914年弗兰克和赫兹进行了一系列实验来证明这一理论。他们利用电场使热阴极电子加速获得能量, 与管中汞蒸气原子发生碰撞, 实验发现电子能量未达到某一临界值时, 电子与汞原子发生弹性碰撞, 电子不损失能量; 当电子能量达到某一临界值时, 发生非弹性碰撞, 电子的一定能量传递给汞原子, 使后者激发, 并观察到汞原子跃迁发射的谱线。弗兰克 - 赫兹实验(简称 F-H 实验)表明原子的能量只能是一系列离散值, 这说明原子的能级的存在, 从而直接证明了原子的量子理论的正确性。这一研究成果使弗兰克和赫兹同获 1925 年诺贝尔物理学奖[1]。

F-H 实验至今仍是探索原子结构的重要手段之一, 实验中用的“拒斥电压”筛去小能量电子的方法, 已成为广泛应用的实验技术, 并已成为一个传统而重要的大学物理实验项目。该实验除了能验证原子能级的存在, 还涉及到热电子发射、电子与原子的碰撞过程, 以及原子能级跃迁与光的发射、光电效应等物理过程, 可以为学生提供多方面的观察与研究。因此, 在 F-H 实验中, 影响实验结果的因素十分复杂, 影响弗兰克 - 赫兹法测能级的因素有很多, 主要的有灯丝电压、第一栅极电压、拒斥电压、靶原子浓度、弗兰克 - 赫兹管尺寸、温度等, 要得到理想的实验结果, 选择合适的工作参量十分重要[2] [3] [4] [5] [6]。本文主要分析研究灯丝电压对实验结果的影响。

2. 实验装置

弗兰克 - 赫兹实验装置如图 1 所示, 电子由热阴极发出, 阴极 K 和第一栅极 G_1 之间的加速电压主要用于消除阴极电子散射的影响, 阴极 K 和栅极 G_2 之间的加速电压 U_{G2K} 使电子加速。在板极 A 和第二栅极 G_2 之间加有反向拒斥电压 U_{G2A} 。如果电子通过 KG_2 进入 G_2A 空间时, 能量大于 eU_{G2A} 则电子能被微安表检出。否则的话, 由于电子束将原子激发, 使得自身能量减小, 从而不足以通过 G_2A , 使得检出电流明显减小。

3. 灯丝电压对实验的影响

3.1. 实验原理

我们假设实验中气体分子从灯丝到栅极 K 的电子几乎没有发生碰撞, 那么根据气体分子运动的模型, 可以构建如下的灯丝到栅极 K 的理论模型[7]:

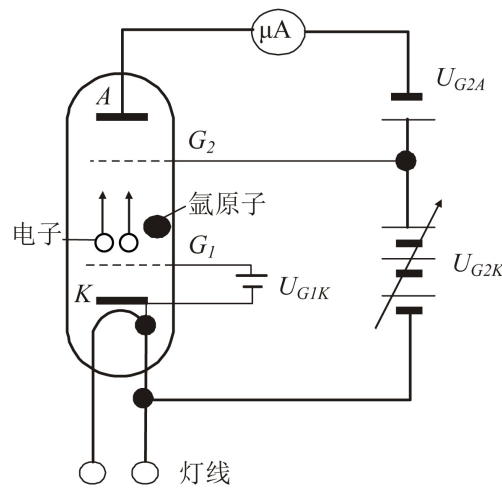


Figure 1. F-H diagram

图 1. F-H 装置图

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{v} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \mathbf{F} = 0 \quad (1)$$

其中 f 表示单位坐标空间单位速度空间中粒子数密度。上述方程表示，在没有碰撞情况下，在外场的作用下，粒子数密度变换。对于稳定状况下， f 不显含时间，此时方程的第一项为 0，则一定有解形如波尔兹曼分布形式

$$f = C \exp \left\{ -\frac{1}{kT} \left[\frac{1}{2} m v^2 + E_p(\mathbf{x}) \right] \right\} \quad (2)$$

其中 E_p 为势能，本实验中为电势能。 T 为灯丝温度。将灯丝到栅极 K 考虑成点源和金属平板，则如图 2 所示。

如果认为灯丝到栅极处没有电子被器壁吸收，且满足能量守恒定律，那么对于灯丝与栅极 K 所组成的系统而言，有

$$f = C \exp \left\{ -\frac{1}{kT} \left[\frac{1}{2} m v^2 - eU(\mathbf{x}) \right] \right\} \quad (3)$$

对于栅极 K 处所有粒子的中心速度满足

$$\frac{1}{2} m v^2 = eU_K \quad (4)$$

这恰好是能量守恒定律所要求的。在式中， C 还需要满足归一化条件，

$$C \int_{V_K} d^3 \mathbf{x} \int_{-\infty}^{+\infty} d^3 \mathbf{v} \exp \left\{ -\frac{1}{kT} \left[\frac{1}{2} m v^2 - eU(\mathbf{x}) \right] \right\} = 1 \quad (5)$$

其中 V_K 表示灯丝与栅极 K 所组成的系统尺寸。由于此尺寸很小，且上式积分之后 C 与 U_K 的多项式有关，而之后的分析表明电流 I 与电压 U_K 呈指数关系，因此我们忽略了不同的 U_K 对常数 C 的影响。

通过对速度空间积分，可以知道改变 U_K 得到通过栅极 K 的粒子数之比应如下述形式：

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp \left[\frac{e}{kT} (U_2 - U_1) \right] \quad (6)$$

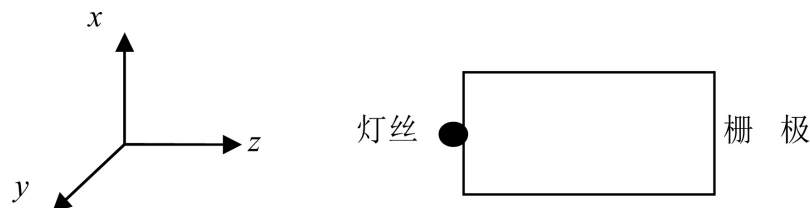


Figure 2. Model of filament to grid K
图 2. 灯丝到栅极 K 模型

其中 U_2, U_1 两次实验中 U_K 的数值。上式的意义在于, 如果我们认定了粒子分布满足波尔兹曼分布, 那么对于处于不同能量状态的粒子, 其可能的粒子数之比满足上式。由于 U_{G1K} 可以增加至很大, 使管中电场强度很高, 同时通过与靶原子的碰撞, 使得大部分的电子都趋于能量交换的平衡下, 此时, 可以认为最终检测的电流应该与输入的电子数成正比。即有,

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_2}{n_1} = \exp\left[\frac{e}{kT}(U_2 - U_1)\right] \quad (7)$$

对上式两边取对数可简化为

$$\ln I = AU + B \quad (8)$$

其中 $A = \frac{e}{kT}$

3.2. 实验条件设置

为进一步的研究影响弗兰克 - 赫兹实验效果的因素, 选择在相同条件下, 对不同的灯丝电压 U_K 进行考量。设置如表 1 参数。

3.3. 实验结果分析

将整个实验的特征曲线绘制成图 3, 可以看到曲线是呈波动上升的。

改变 U_K 测定同一级峰谷下所对应的电流, 表 2 不同灯丝电压各级的极小值处对应的电流, 表 3 不同灯丝电压各级极大值处所对应的电流。

根据式(8), 绘制了图 4、图 5 不同灯丝电压各级峰谷所对应曲线。

可以看出各条直线的 A 系数近似相同, 将各个 A 、 B 系数制成表 4 与表 5。

因此, 我们可以估计灯丝的工作温度, 取

$$\bar{T} = \frac{e}{kA} \approx 1755 \text{ K} \quad (9)$$

$$\Delta T = \left| \bar{T} \frac{\Delta A}{A} \right| \approx 30 \text{ K} \quad (10)$$

则灯丝工作温度大致上在:

$$T = \bar{T} \pm \Delta T \approx (176 \pm 3) \times 10 \text{ K} \quad (11)$$

将整个实验的特征曲线绘制成图 6, 可以看到曲线是呈波动上升的。图 7 用最小二乘法处理, 显示同一曲线下各个极大值所对应的曲线, 每条曲线都形成一条直线。

Table 1. Experimental parameters**表 1.** 实验参数设置

| 电流量程 | 第一栅极电压 U_{G1K} | 拒斥电压 U_A | 灯丝电压 U_K | 第二栅极电压 U_{G2K} |
|-----------|------------------|------------|------------|------------------|
| 1 μ A | 1.5 V | 8.0 V | 2.2~2.6 V | 0~82.0 V |

Table 2. The current ($\times 10^{-7}$ A) at the minimum values with different filament voltages**表 2.** 不同灯丝电压各级极小值处对应的电流($\times 10^{-7}$ A)大小

| U_{G2K} \ U_K | 2.2 V | 2.3 V | 2.4 V | 2.5 V | 2.6 V |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25.5 V | 0.072 | 0.134 | 0.239 | 0.501 | 0.911 |
| 36.5 V | 0.078 | 0.158 | 0.266 | 0.623 | 1.159 |
| 48.0 V | 0.071 | 0.151 | 0.263 | 0.630 | 1.207 |
| 59.5 V | 0.096 | 0.198 | 0.344 | 0.837 | 1.561 |
| 72.0 V | 0.145 | 0.321 | 0.562 | 1.298 | 2.394 |

Table 3. The current ($\times 10^{-7}$ A) at the maximum values with different filament voltages**表 3.** 各级极大值处对应的电流($\times 10^{-7}$ A)大小

| U_{G2K} \ U_K | 2.2 V | 2.3 V | 2.4 V | 2.5 V | 2.6 V |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 32.0 V | 0.190 | 0.355 | 0.570 | 1.258 | 2.219 |
| 43.0 V | 0.282 | 0.550 | 0.901 | 1.995 | 3.528 |
| 54.5 V | 0.385 | 0.728 | 1.196 | 2.669 | 4.772 |
| 66.0 V | 0.439 | 0.922 | 1.382 | 3.292 | 5.917 |
| 79.0 V | 0.506 | 1.088 | 1.727 | 3.860 | 6.939 |

Table 4. AB parameters at the minimum position**表 4.** 极小位置下 AB 系数

| U_{G2K} | 25.5 V | 36.5 V | 48.0 V | 59.5 V | 72.0 V |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| A | 6.395 | 6.769 | 7.095 | 7.019 | 7.005 |
| B | -16.718 | -17.455 | -18.257 | -17.798 | -17.314 |

Table 5. AB parameters at the maximum position**表 5.** 极大位置下 AB 系数

| U_{G2K} | 32.0 V | 43.0 V | 54.5 V | 66.0 V | 79.0 V |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| A | 6.181 | 6.342 | 6.334 | 6.475 | 6.503 |
| B | -15.280 | -15.223 | -14.911 | -15.062 | -14.960 |

通过观察比较可以发现, 图 7 中各条直线的交点恰好为拒斥电压 U_{G2A} 的大小, 在本实验中 U_{G2A} 设置成 8 V。

改变灯丝电压 U_K 可以明显地改善整个特征曲线, 使得观察峰值变得更容易, 但是灯丝电压不能太大, 因为电压过大, 阴极温度过高, 容易导致阴极蒸发太快而剥落。对于本次实验仪器, 灯丝电压 U_K 在 2.5 V 左右较为适宜。

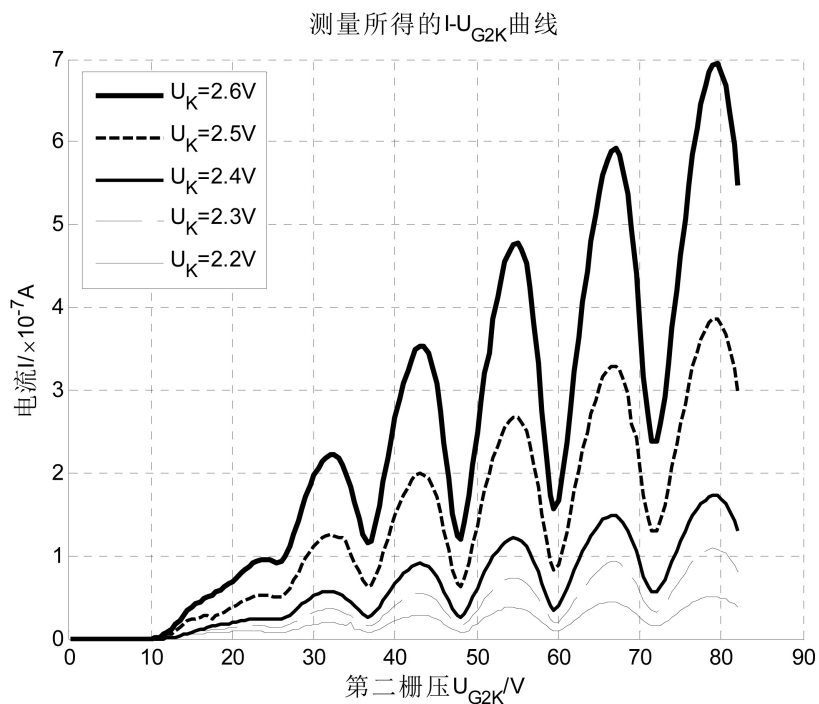


Figure 3. Experimental characteristic curve with various filament voltages
图 3. 各个灯丝电压下实验特征曲线

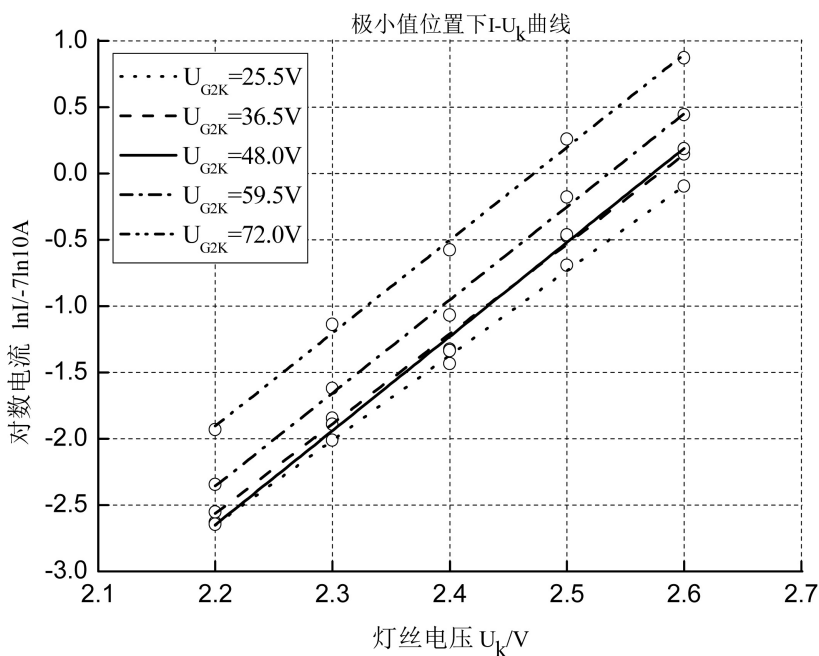


Figure 4. The relationship between current and filament voltage at the minimum position
图 4. 极小位置下电流与灯丝电压的关系

4. 结论

对灯丝电压与弗兰克 - 赫兹实验影响进行研究，有以下结论：

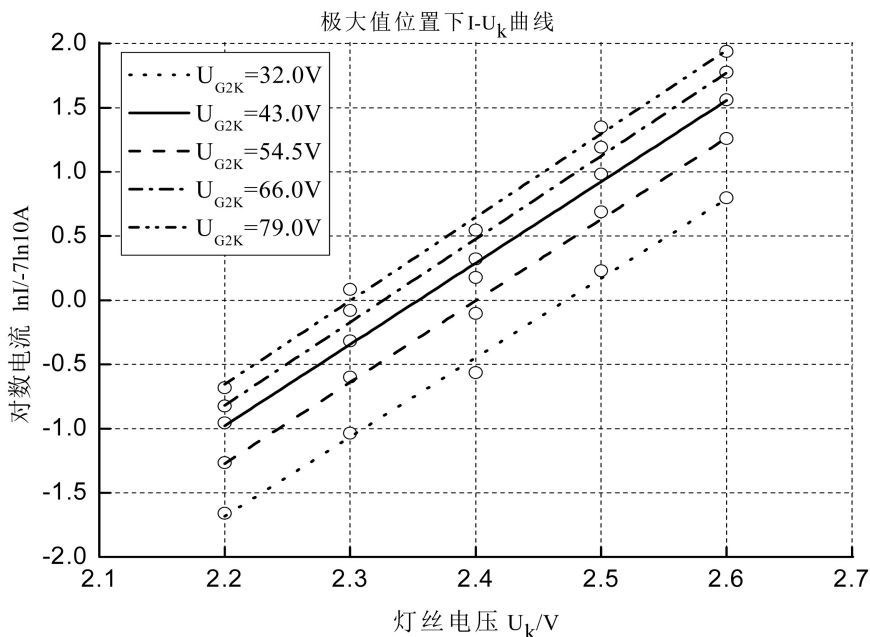


Figure 5. The relationship between current and filament voltage at the maximum position
 图 5. 极大位置下电流与灯丝电压的关系

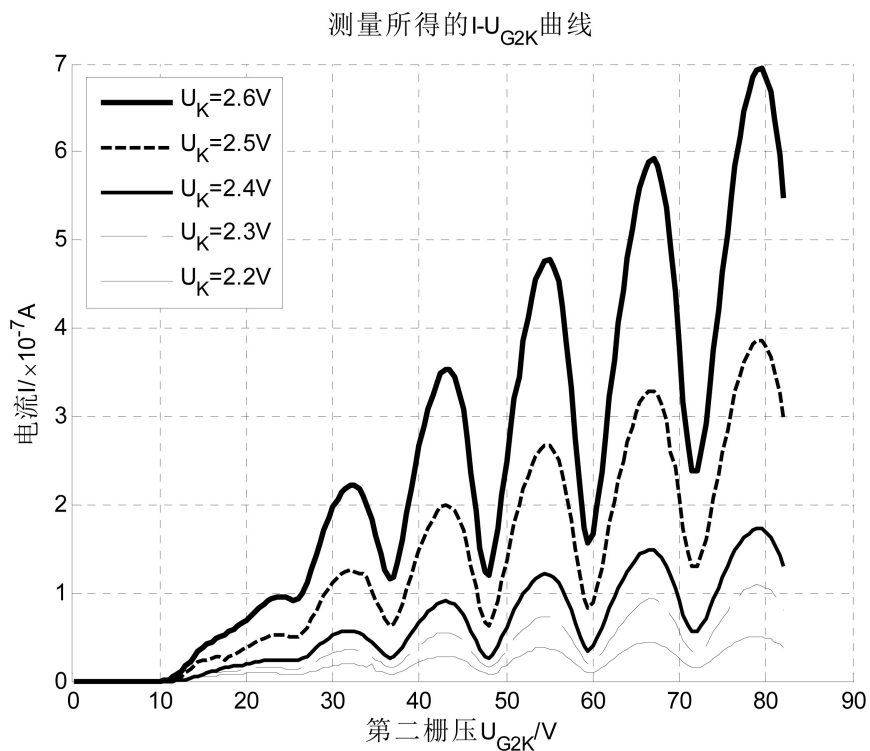


Figure 6. Experimental characteristic curve with each filament voltage
 图 6. 各个灯丝电压下实验特征曲线

① 丝电压 U_k 的增大会使得测量曲线整体的扩大，且检测的电流 I 随电压呈指数变化，灯丝电压不能过大也不能过小。 U_k 过大会损坏灯丝，过小会使得微安表检测不出。

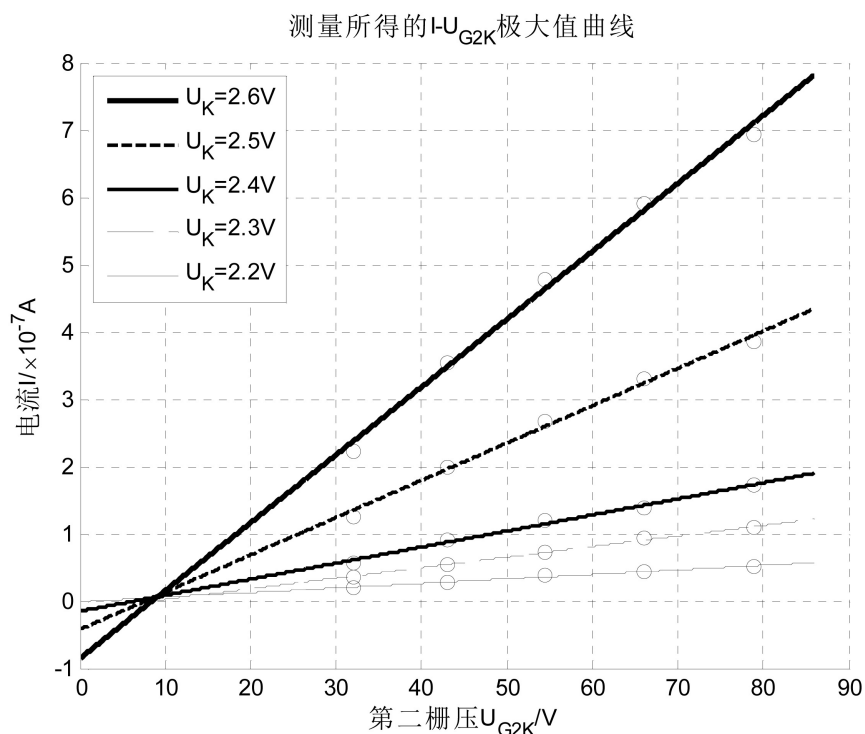


Figure 7. The maximum value curves at different filament voltages

图 7. 不同灯丝电压下测量曲线的极大值对应的曲线

- ② 可以通过检测电流 I 与灯丝电压 U_K 的关系估计灯丝温度。
- ③ 通过观察 $I-U_{G2K}$ 曲线中各个极大值位置可以知道极大值是随 U_{G2K} 线性增加的。

基金项目

本文得到浙江工业大学 2016 创新性实验教学改革项目资助。

参考文献

- [1] 隋成华, 魏高尧. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 297-305.
- [2] 孙桂芳, 阮树仁, 盛淑芳, 钱霞. 夫兰克-赫兹实验中氩原子第一激发电位的研究[J]. 物理实验, 2017(37): 1-3.
- [3] 陈小凡. 夫兰克-赫兹实验中的伏安特性曲线[J]. 大学物理实验, 2015, 28(5): 80-81.
- [4] 安可, 高松松, 林上金, 胡澄. 如何选择夫兰克-赫兹实验的工作参量[J]. 大学物理实验, 2014, 27(6): 34-36.
- [5] 金哲. 夫兰克-赫兹实验最佳条件的确定[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2006, 32(3): 169-171.
- [6] 张里荃, 马艳梅, 郝二娟. 夫兰克-赫兹实验最佳实验条件及第一激发电位的研究[J]. 物理实验, 2011, 31(8): 37-38.
- [7] W·泡利. 泡利物理学讲义 4 统计力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982: 11-13.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：oe@hanspub.org