

夫兰克-赫兹实验中影响 Hg 第一激发能曲线的参量及背后原因的探索

06301020014 丑凯亮

摘要:

实验使用充汞的 F-H 实验管进行夫兰克-赫兹实验,通过计算机采集数据绘出 I_p-V_{G2K} 的 Hg 第一激发能曲线图,利用控制变量法,分别改变减速电压 V_{G2P} , 灯丝电压 V_F , 控制栅电压 V_{G1K} , 温度 T 四个参量,观察它们对曲线图的影响,讨论分析产生影响的直接原因,探索背后的根本原因。

关键词:

弗兰克-赫兹实验, 根本原因, 控制变量法, Hg 第一激发能, 改变参量, 去本底曲线

引言:

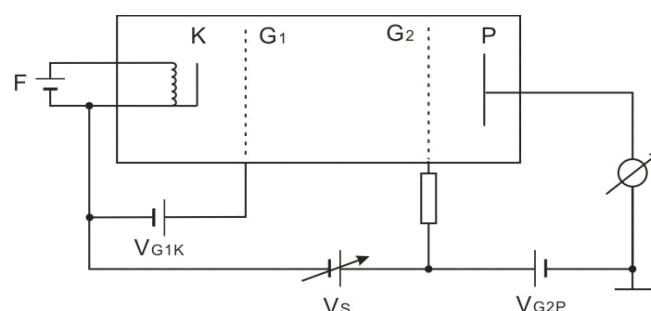
1913 年, 丹麦物理学家玻尔 (N. Bohr) 提出了一个氢原子模型, 并指出原子存在能级。该模型在预言氢光谱的观察中取得了显著的成功。根据玻尔的原子理论, 原子光谱中的每根谱线表示原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时的辐射。

1914 年, 德国物理学家夫兰克 (J. Franck) 和赫兹 (G. Hertz) 对勒纳用来测量电离电位的实验装置作了改进, 他们同样采取慢电子(几个到几十个电子伏特)与单元素气体原子碰撞的办法, 但着重观察碰撞后电子发生什么变化(勒纳则观察碰撞后离子流的情况)。通过实验测量, 电子和原子碰撞时会交换某一定值的能量, 且可以使原子从低能级激发到高能级。直接证明了原子发生跃变时吸收和发射的能量是分立的、不连续的, 证明了原子能级的存在, 从而证明了玻尔理论的正确, 由此而获得了 1925 年诺贝尔物理学奖金。

本文在重复夫兰克-赫兹实验的基础上, 利用控制变量法分别改变减速电压 V_{G2P} , 灯丝电压 V_F , 控制栅电压 V_{G1K} , 温度 T 四个参量, 观察其对 Hg 第一激发能曲线的影响, 并且在思考清楚产生这些影响的直接原因的基础上再深入探索背后的根本原因, 并且通过数据处理进行验证。

实验原理:

夫兰克-赫兹实验利用低能电子与气体原子发生非弹性碰撞时的共振吸收获取气



体原子能级结构的有关信息, 一般使用的充气实验管结构和实验电路如图:

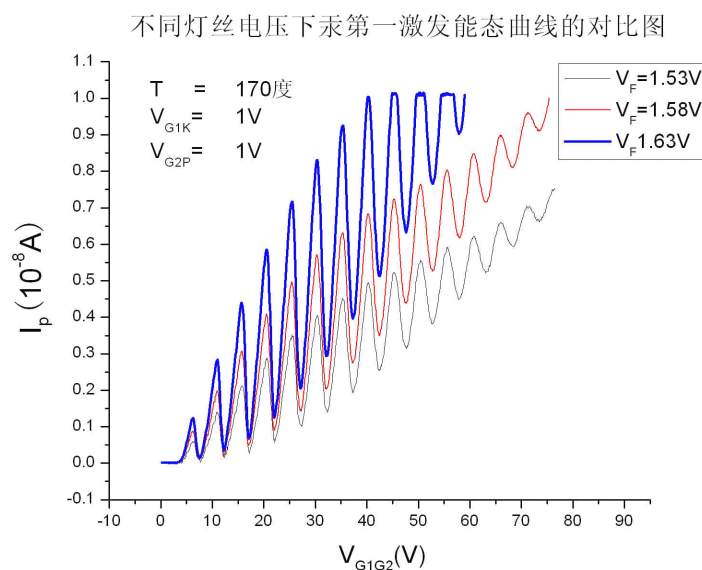
实验管包含这样几个部分：发射电子的阴极K，控制栅极 G_1 ，加速栅极 G_2 ，电子收集极P。要测定原子第一激发能，加速电压加在 G_2K 上。 G_1K 距离很小，电子主要在 G_1G_2 间与原子发生碰撞。 G_1K 间应加上一适当的控制电压，起到清除空间电荷，通过正电压引导阴极发射电子进入加速区的作用。而 G_2P 间加上反向的减速电压，作为控制能到达收集极电子最小能量的阈值。实验中使用充汞蒸汽的复旦双栅柱面型四极式F-H实验管，其收集极P为14mm直径敷铝铁皮筒，控制栅和加速栅分别为直径1.8mm和12mm的钨丝螺旋线，阴极K为直径1.14mm的镍管，外敷厚约0.05mm三元氧化物(BaO , SrO , CaO)涂层，与中心的加热热子F构成傍热式氧化物阴极，具有发射系数大的特点。

当加热阴极时，会有电子发出。电子在加速电压 V_{G_2K} 作用下加速运动。若电子动能小于汞原子第一激发能级，则无法激发原子，只发生弹性碰撞，电子可以不失动能到达 G_2 极，并有较高能量穿过 G_2P 减速区，表现为收集电流无吸收。随着加速电压增大，电子动能达到汞原子第一激发能，可以激发汞原子发生非弹性碰撞，电子动能减小，部分电子无法穿过减速区，收集电流 I_p 减小。若加速电压进一步增大，电子发生碰撞传递能量后仍有较大动能，收集电流又开始增大。碰撞后的电子继续向 G_2 极运动过程中如果再次获得临界能量，则可再次发生共振吸收，表现为随加速电压不断增大，收集电流形成峰谷相间的周期振荡，周期代表汞的第一激发能级大小。注意到阴极和加速栅极 G_2 间有接触电势差，即电子在加速区最终获得的动能并不就是 G_2 极电压，加速电压可表示为 $V_s = V_a + nV_b$ ， V_a 为接触电压，而汞的第一激发能即 $V_b eV$ 。

实验中由扫描电源提供自动扫描电压，范围 0-80V。收集电流经微电流放大器放大后由数据卡采集，进行 A/D 转换并输入计算机，由软件记录。后期数据处理全部使用Origin软件。实验采用控制变量法，分别绘出各参量变化后不同的 $I_p - V_{G_2K}$ 曲线，以供分析讨论。

实验结果及讨论：

1、只改变灯丝电压 V_F ，观察 $I_p - V_{G_2K}$ 曲线的变化。

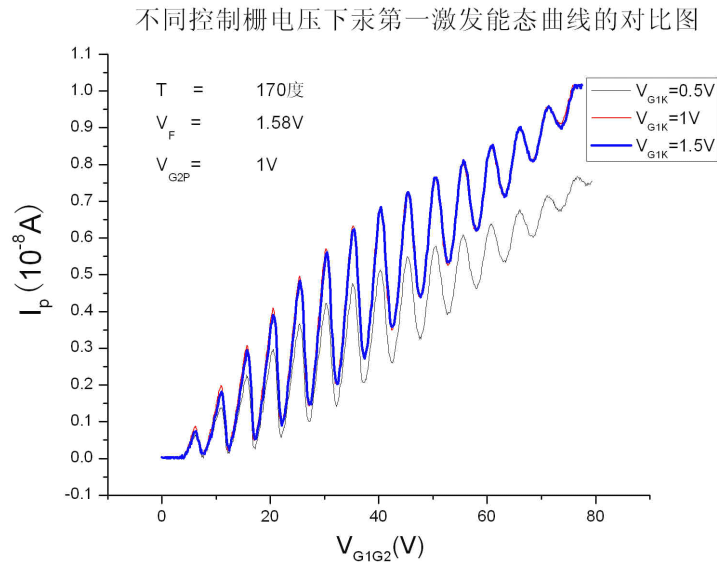


图像变化：此图中 $V_{G_1K}=1V$, $V_{G_2P}=1V$, $T=170$ 度，都为恒定值，唯一的变量即是灯丝电压 V_F ，分别取值 1.53V, 1.58V, 1.63V，图中可以明显看到 $I_p - V_{G_2K}$ 图的峰和谷的

包络线都是随着 V_F 增大而升高的。

原因讨论：灯丝电压 V_F 决定灯丝打出的电子数目， V_F 越高，激发射出的电子数目越大，在其它条件不变的情况下，收集极 P 接收到的电子数目也会越大，因而无论是峰包络线还是谷包络线都因为 V_F 增大而相应的升高。

2、改变控制栅电压 V_{G1K} ，观察 I_p-V_{G2K} 曲线的变化。



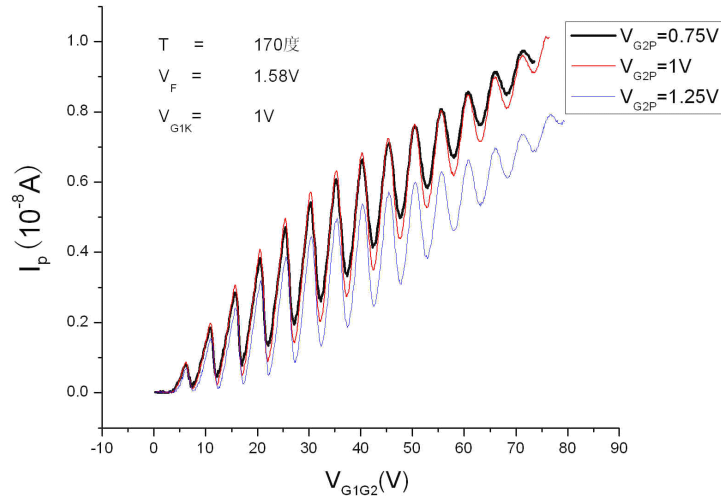
图像变化：此图中 $V_F=1.58V$, $V_{G2P}=1V$, $T=170$ 度，都为恒定值，唯一的变量即是控制栅电压 V_{G1K} ，分别取值 $0.5V$, $1.0V$, $1.5V$ ，图中可以观察到在 V_{G1K} 取 $1V$ 和 $1.5V$ 时， I_p-V_{G2K} 曲线几乎完全重合，而 $V_{G1K}=0.5V$ 时， I_p-V_{G2K} 曲线的整体（包括峰包络线和谷包络线）出现明显的下降。

原因讨论：控制栅电压 V_{G1K} 的作用是通过加一个正向电压引导电子进入 G_1G_2 区域，因为发射出来的电子是散射状的，很大一部分不能进入 G_1G_2 反应区，因而加一个较小的控制栅电压，使电子叠加一个朝 G_1G_2 区的速度，引导其进入反应区。因而推测，当 $V_{G1K} \geq U$ ($0.5V \leq U \leq 1.0V$) 时，已经可以引导几乎全部的电子进入 G_1G_2 反应区与 Hg 原子发生碰撞，在 U 基础上再加大 V_{G1K} 不会增加进入 G_1G_2 反应区的电子数目，因而 I_p-V_{G2K} 曲线不会改变。而 $V_{G1K} < U$ 时，由于控制栅电压不足使部分电子无法进入 G_1G_2 区，因而 I_p-V_{G2K} 曲线整体会随着 V_{G1K} 减小而下降。

$1.0V$, $1.5V$ 都大于 U ，都使几乎全部电子进入 G_1G_2 反应区，所以两个 I_p-V_{G2K} 曲线几乎重合，而 $0.5V < U$ ，部分电子无法进入 G_1G_2 反应区因而 I_p-V_{G2K} 曲线明显下降。

3、改变减速电压 V_{G2P} ，观察 I_p-V_{G2K} 曲线的变化。

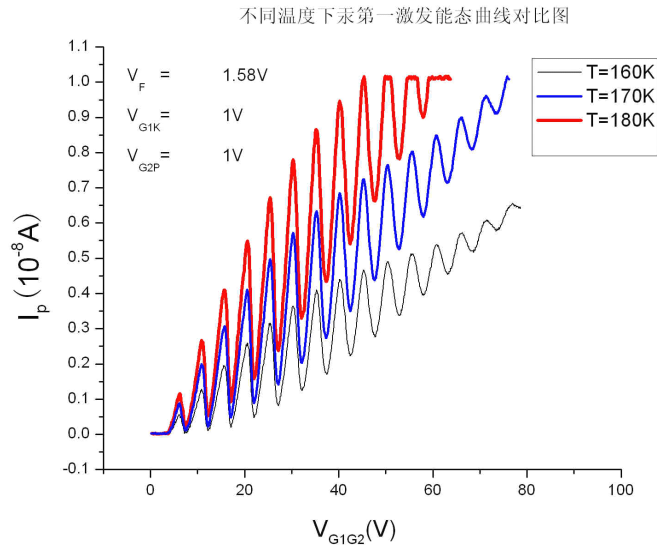
不同减速电压下汞第一激发能态曲线的对比图



图像变化：此图中 $V_F=1.58$ V, $V_{G1K}=1$ V, $T=170$ 度, 都为恒定值, 唯一的变量即是减速电压 V_{G2P} , 分别取值 0.75V, 1.00V, 1.25V。图中观察得到在 V_{G2P} 不是很大的情况下 (对应图中的 $V_{G2P}=0.75$ V 和 1.00V), I_p-V_{G2K} 曲线的峰包络线基本重合, 而谷包络线却随着减速电压 V_{G2P} 升高明显下降。而 V_{G2P} 较大时 (对应图中的 $V_{G2P}=1.25$ V), I_p-V_{G2K} 曲线的整体 (包括峰包络线和谷包络线) 都随着减速电压 V_{G2P} 升高明显下降。

原因讨论：减速电压 V_{G2P} 的作用是控制能到达收集极 P 的电子最小能量的阈值。 I_p-V_{G2K} 曲线的峰包络线代表大部分电子未发生非弹性碰撞, I_p-V_{G2K} 曲线的谷包络线代表大量电子已发生非弹性碰撞。在 V_{G2P} 较小时 (对应图中的 $V_{G2P}=0.75$ V 和 1.00V), 对于不同的减速电压 V_{G2P} , 在峰包络线附近, 电子动能 $U_{动能}$ 都明显大于 $V_{G2P}*e$, 几乎全部的电子都可以到达接受极板 P, 所以到达极板 P 的电子数基本相同, 峰包络线重合; 而在谷包络线附近, 由于大量电子已发生非弹性碰撞, 电子动能 $U_{动能}$ 减小很多, 大小与 $V_{G2P}*e$ 相近, 此时 V_{G2P} 的微小改变会严重影响电子到达接受极 P 的数目, 因而谷包络线随着减速电压升高明显下降。在 V_{G2P} 较大时 (对应图中的 $V_{G2P}=1.25$ V), 电子即使在没有发生碰撞时, 动能 $U_{动能}$ 也和 $V_{G2P}*e$ 相近, 此时 V_{G2P} 的微小改变会严重影响所有电压下的电子到达接受极 P 的数目, 因而无论峰包络线还是谷包络线都随着减速电压 V_{G2P} 的升高而明显下降。

4、改变温度 T , 观察 I_p-V_{G2K} 曲线的变化。

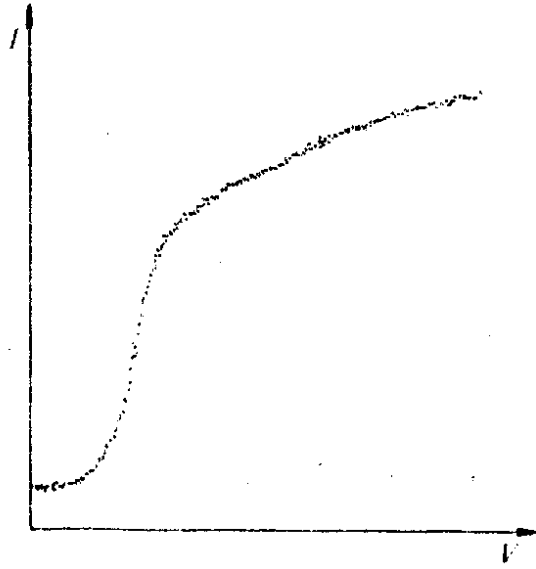


图像变化：此图中 $V_F=1.58V$, $V_{G1K}=1V$, $V_{G2P}=1V$, 都为恒定值, 唯一的变量即是温度 T , 分别取值 160K, 170V, 180V。图中观察得到 I_p-V_{G2K} 曲线的整体（包括峰包络线和谷包络线）都随着温度 T 的升高而上升。

原因讨论：这个讨论我们放在最后的小结来解决。

实验结论：

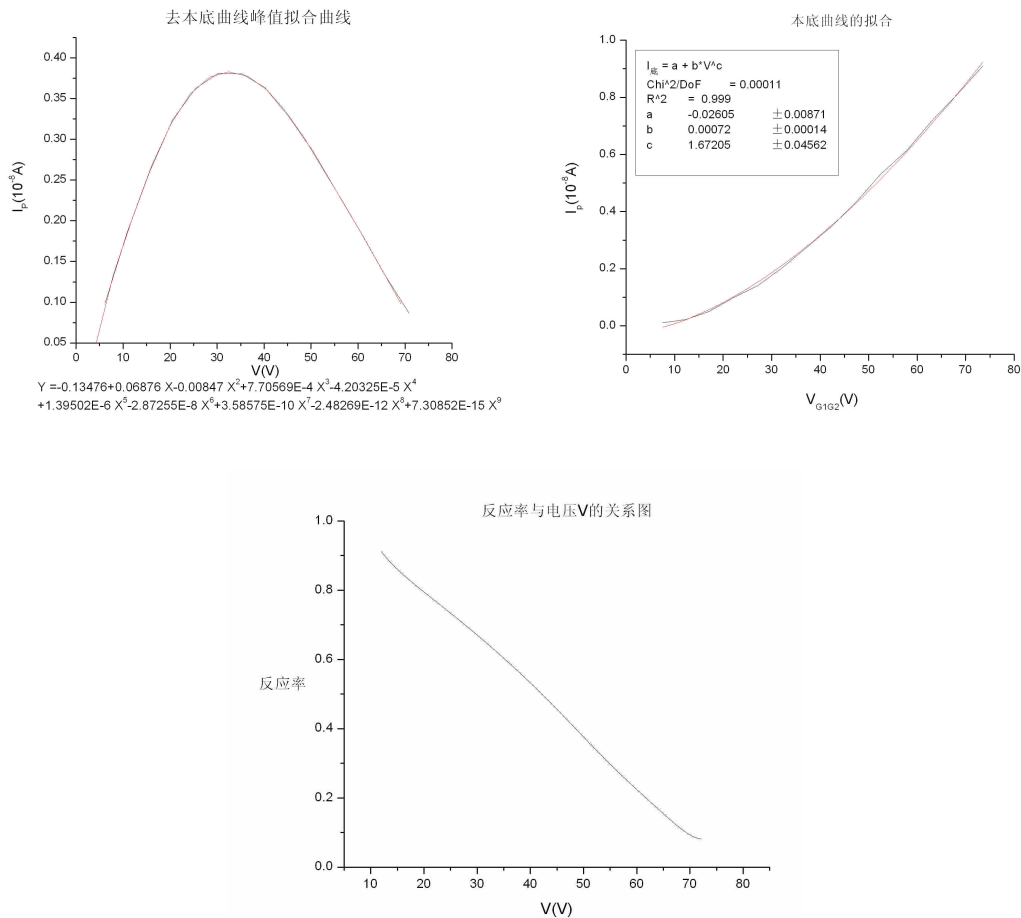
1、从获得的 I_p-V_{G2K} 曲线可见, 峰点和谷点可以分别连成两根不同形状的包络线, 分别称作峰包络线和谷包络线。峰包络线先是迅速上升然后平缓变大; 谷包络线则是先平缓变大然后迅速上升。峰谷之间的幅度是先增大后收缩, 间隔变化开始不明显, 随着扫描电压的增加相邻间隔增大明显。峰值点渐升认为是由于 F-H 实验管有大致类似于理想二极管的发射特性以及氧化物阴极的发射特性所致; 下图给出了实验管在室温时 I_p-V_{G2K} 的关系曲线。汞的第一激发能的 I_p-V_{G2K} 曲线峰包络线基本保持了它的轮廓。然而谷包络线（我们称之为第一激发能多重激发的本底曲线）除了受管子结构影响外, 还强烈依赖各级电源的施加值和控温炉的温度, 炉温越低, 灯丝电压越大, 本底曲线上升的越快。（引文来自《夫兰克_赫兹实验中 hg 的第一激发电位的测量》）



2、通过对上面引文的阅读，我对 I_p-V_{G2K} 曲线代表的含义和各个参量对其影响有了自己的理解：(1) I_p-V_{G2K} 曲线的峰包络线代表几乎全部电子不发生非弹性碰撞全部到达收集极 P 的 I_p-V_{G2K} 关系，而 I_p-V_{G2K} 曲线的谷包络线（也就是本底曲线）代表未发生非弹性碰撞能到达收集极 P 的电子产生的 I_p-V_{G2K} 关系，那么去本底的 I_p-V_{G2K} 曲线（峰包络线-本底曲线的 I_p-V_{G2K} 曲线）代表的是已经与汞原子发生非弹性碰撞而未到达收集极 P 的电子所引起的 I_p-V_{G2K} 关系。(2) 已知电子能与汞原子发生非弹性碰撞的条件是电子动能 $U_{\text{动能}} \geq V_b * e$ (汞原子的第一激发电压)，而且电子与汞原子发生非弹性碰撞的概率随着 $U_{\text{动能}}$ 远离 $V_b * e = 4.89\text{eV}$ 而迅速下降，即电子动能越接近 4.89eV ，越有可能与汞原子发生非弹性碰撞而动能被吸收，这个过程我们姑且称之为相互作用。(3) 我们知道电子在温度 T 下在反应区 G_1G_2 内的平均自由程是恒定的，也就是 $L_{\text{自由程}}$ 不会随着场强 E 改变的。于是电子两次发生相互作用之间动能的平均增量 $\Delta U_{\text{动能}} = (L_{\text{自由程}} * E) * e$ ，这说明电子在与汞原子碰撞时的能量是离散值 $U_{\text{动能}}$ ，而且随着加速电压 V_{G2K} 的增大，E 增大 V， $\Delta U_{\text{动能}}$ 增大，于是 $U_{\text{动能}}$ 偏离 4.89V 的概率增大，因而相互作用的概率会减小，于是电子发生相互作用而无法到达收集极 P 的概率会减小，也就是与汞原子相互作用的电子个数与电子总个数的比值下降，数据上的表示就是（去本底 I_p-V_{G2K} 曲线/峰包络线 I_p-V_{G2K} 曲线）随着 V_{G2K} 增大而减小。

为了验证对 I_p-V_{G2K} 曲线代表的含义的理解的正确性，我们用峰包络线减去本底曲线得到去本底曲线，对其和本底曲线进行拟合，得到拟合曲线，然后两个曲线相加得到峰包络线的拟合曲线。于是我们再（去本底 I_p-V_{G2K} 拟合曲线/峰包络线 I_p-V_{G2K} 拟合曲线），作出比值与 V_{G2K} 的关系曲线，发现曲线随着 V_{G2K} 的增大而下降，这与上段所导出的结果完全吻合，证明了理解的正确性。（拟合与比值见下

图)



3、利用上面我们已经验证过的理解来解释参量温度 T 对 I_p-V_{G2K} 曲线的影响。温度 T 越高,反应区 G_1G_2 内的汞蒸汽密度越大,平均自由程 $L_{自由程}$ 越短,在相同的 V_{G2K} 处, E 相同,而 $\Delta U_{动能} = (L_{自由程} * E) * e$ 会减小, $U_{动能}$ 偏离 4.89V 的概率减小,因而相互作用的概率会增大,于是电子发生相互作用而无法到达收集极 P 的概率会增大,与汞原子相互作用的电子个数与电子总数的比值增大,数据上的表示就是(谷包络线 I_p-V_{G2K} 曲线/峰包络线 I_p-V_{G2K} 曲线)随着 V_{G2K} 增大而减小,但是由于峰包络线是以类似于理想二极管的发射特性而上升的,所以谷包络线依然是随着温度 T 的增大而增大。

致谢:

感谢我的实验合作者王玉萌,实验的准备,过程,问题的讨论都是我们两个人一起完成的,相互的启发是实验得以顺利完成的重要因素。同时非常感谢张新夷老师的批阅和点评。

参考文献:

[1] 夫兰克-赫兹实验中 Hg 的第一激发电位的测量一个人计算机在近代物理实验中的应用,潘玉莲,王煜,潘振元,物理实验, Vol.15 No.4 1995

[2] 夫兰克-赫兹实验的研究,宋文福 冯正南 朱力 大学物理实验, Vol.17 No.2 2004

[3] 夫兰克-赫兹实验曲线的分析,周小莉 刘兴全 孙禹,哈尔滨师范大学自然科学学报, Vol.19 No.1

2003

[4] 夫兰克-赫兹实验中测定 Hg 第一激发能的最优实验条件和数据处理方法的探索, 05学长罗熠。