

# 测定汞原子的第一激发能

张菁

(复旦大学光科学与工程系 06 级, 上海, 200433)

**摘要** 用夫兰克-赫兹实验的方法测定汞原子的第一激发能。改变实验参数, 观察实验曲线的变化并分析原因。用去除本底的方法, 计算汞原子的第一激发能, 与未去除本底的计算结果比较, 得到汞原子的第一激发能的数值为  $4.95(2)V$ 。

**关键词** 物理; 汞原子的第一激发能; 夫兰克-赫兹实验; 去除本底

## 引言

1914 年夫兰克(F. Franck)和赫兹(G. Hertz)用慢电子轰击稀薄气体原子的方法研究了电子与原子碰撞前后电子能量改变的情况, 测定了汞原子的第一激发电位, 从而证明了原子分立态的存在。后来他们又观测了实验中被激发的原子回到正常态时所辐射的光, 测出的辐射光的频率很好的满足了玻尔假设中的频率定则。弗兰克-赫兹实验的结果为玻尔的原子模型理论提供了直接的证据, 他们获得了 1925 年的诺贝尔物理奖。

本实验沿用了夫兰克-赫兹实验的思想和方法, 利用复旦自行设计的双栅柱面型四极式夫兰克-赫兹实验管完成对汞原子的第一激发能的测量。

## 理论/实验部分

### 1. 实验电路及原理

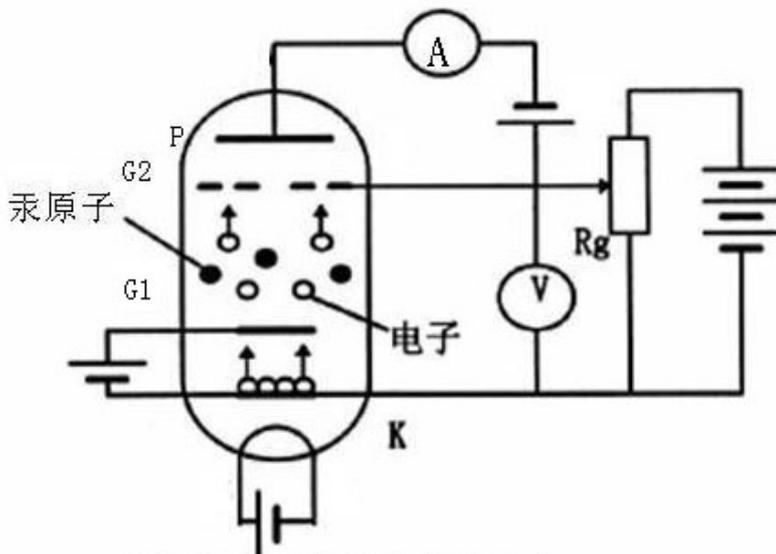


图1 测量第一激发能原理示意图

原理示意图如图 1。充汞  $F-H$  实验管中包括：发射电子的阴极  $K$ ，控制栅极  $G1$ ，加速栅极  $G2$ ，电子收集极  $P$ 。测定原子第一激发能，加速电压  $V_s$  应加在  $G2K$  上。 $G1K$  距离较小，电子主要在  $G1$  极与  $G2$  级之间与原子碰撞。 $G2P$  间应加上反向的减速电压，作为控制到达收集极电子的数量的电压。 $G1K$  间加上一个适当的控制电压，起到清除空间电荷，使阴极发射电子进入加速区的作用。

碰撞管中的电子由热阴极  $K$  发射，经  $K$  与加速栅极  $G2$  之间的电场的加速，电子由  $K$  射向  $G2$ 。栅极  $G2$  与收集极  $P$  之间有一减速电压，作为一个减速电压，使电子减速。当穿越  $G2$  的电子具有较大的能量而足以克服这一减速电场时，就能到达收集极  $P$  形成管流  $I_p$ 。

当发射电子动能小于汞原子第一激发能级时，电子无法激发汞原子，只发生弹性碰撞，电子可以不损失动能到达  $G2$  极，并有较高能量穿越  $G2P$  减速区，表现为管流  $I_p$  的出现。随着加速电压增大，电子动能达到汞原子第一激发能，电子与汞原子发生非弹性碰撞，激发汞原子，电子动能减小，一些电子无法穿过  $G2P$  减速区，收集电流  $I_p$  减小。加速电压进一步增大，使电子发生非弹性碰撞损失能量后仍有能量穿过  $G2P$  减速区，收集电流  $I_p$  又开始增大。碰撞后电子若在前进过程中又获得能量达到汞原子第一激发能，则可再次激发原子。这样，我们不断加大加速电压  $V_s$ ，收集电流  $I_p$  形成峰谷相间的周期振荡，振荡周期即为第一激发能的大小。另外，由于存在接触电位差，真正加在电子上的加速电压不等于  $V_{G2K}$ ，而是  $V_{G2K}$  与接触电位的代数和。

## 2. 实验仪器

- ①TYPE 3036X-Y RECORDER 1 个
- ②F-H- II 夫兰克-赫兹实验仪 1 台
- ③充汞 F-H 实验管 1 个
- ④F-H- II 夫兰克-赫兹实验仪 微电流放大器 1 个
- ⑤F-H- II 夫兰克-赫兹实验仪 F-H 管电源 1 个
- ⑥PEI- I 物理实验接口 1 个
- ⑦计算机 1 台

## 3. 实验内容

用图 1 所示电路测量汞原子的第一激发能。实验时先根据实验室提供的各个参数：炉温

(管内汞蒸气的温度)  $T$ 、灯丝电压  $V_F$ 、控制栅电压  $V_{G1K}$ 、减速电压  $V_{G2P}$ ，测量  $I_p - V_{G2K}$  曲线，用去除本底和不去除本底两种方式，计算汞原子的第一激发能并比较。改变上述参数，观察参数改变对  $I_p - V_{G2K}$  曲线的峰位、峰数、曲线形状的影响，分析原因。

## 结果与讨论

### 1. 测量汞原子的第一激发能的 $I_p - V_{G2K}$ 曲线

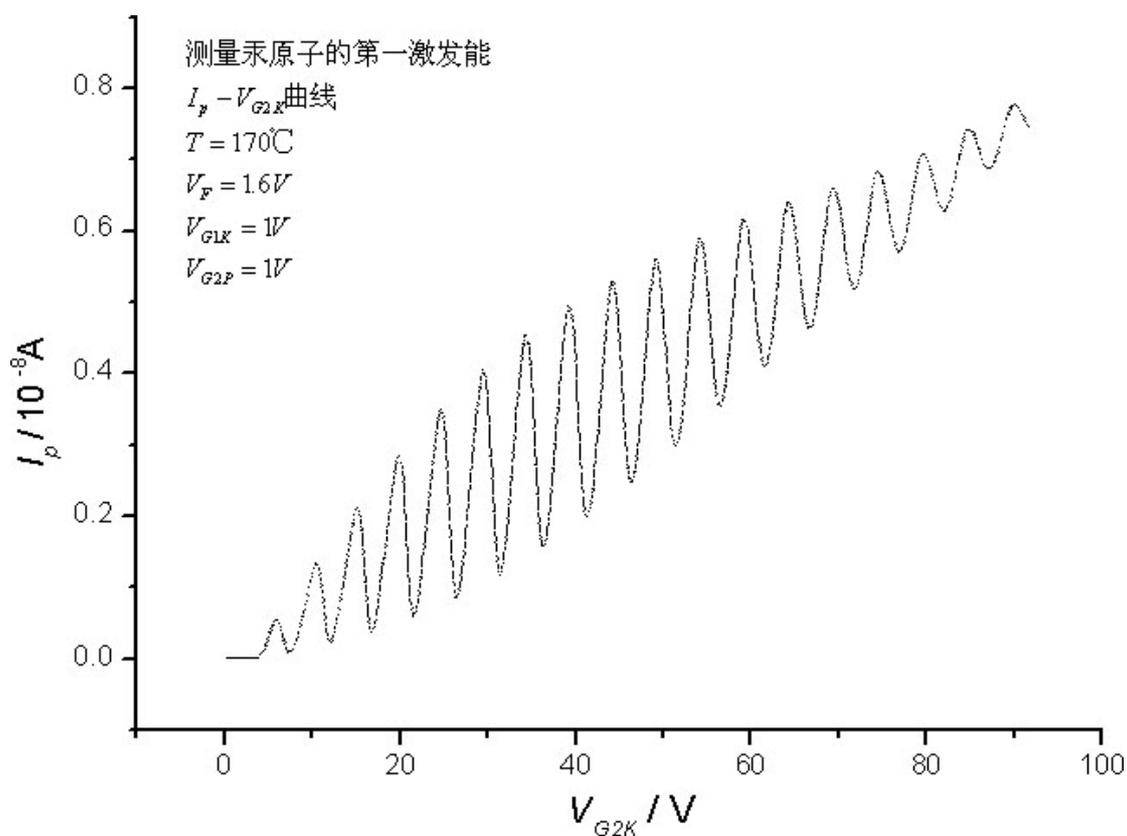


图2

从图 2 看到，随着加速电压  $V_{G2K}$  增大，收集电流  $I_p$  呈峰谷相间的周期振荡，共有 18 个峰。收集电流  $I_p$  整体随  $V_{G2K}$  增大而增大。峰峰包络线表示了  $I_p$  极大值的变化趋势，谷谷包络线表示了在发生非弹性碰撞后仍能到达  $P$  极的电子数目趋势。

谷谷包络线被称为第一激发能多重激发的本底曲线。

### 2. 改变灯丝电压

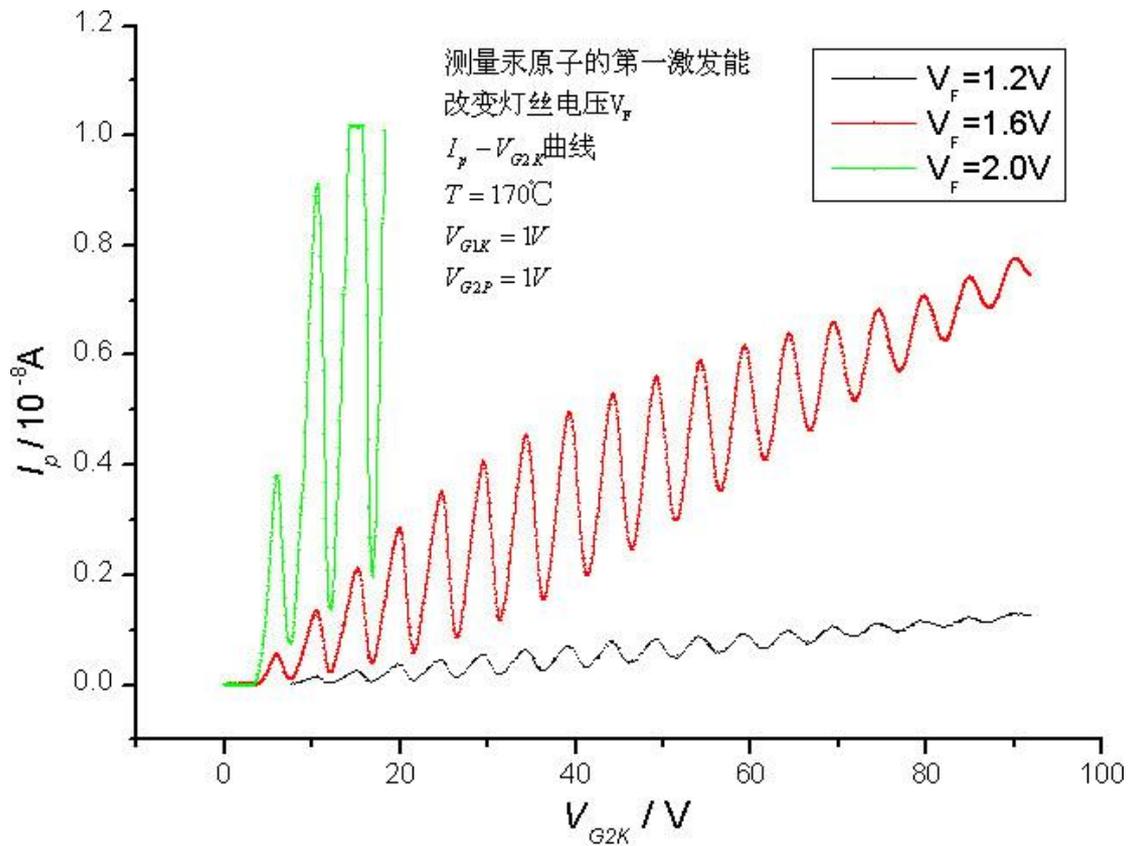


图3

图 3 表示出灯丝电压  $V_F$  越高，收集电流  $I_p$  的本底曲线增长越快， $I_p$  曲线的振荡幅度越大，峰和谷的横坐标基本没有改变。这是因为  $V_F$  越高，灯丝温度越高，阴极发射电子越多，能够在发生非弹性碰撞后到达极板  $P$  的电子数也越多，故本底曲线增长越快， $I_p$  振荡幅度越大。

### 3. 改变控制电压

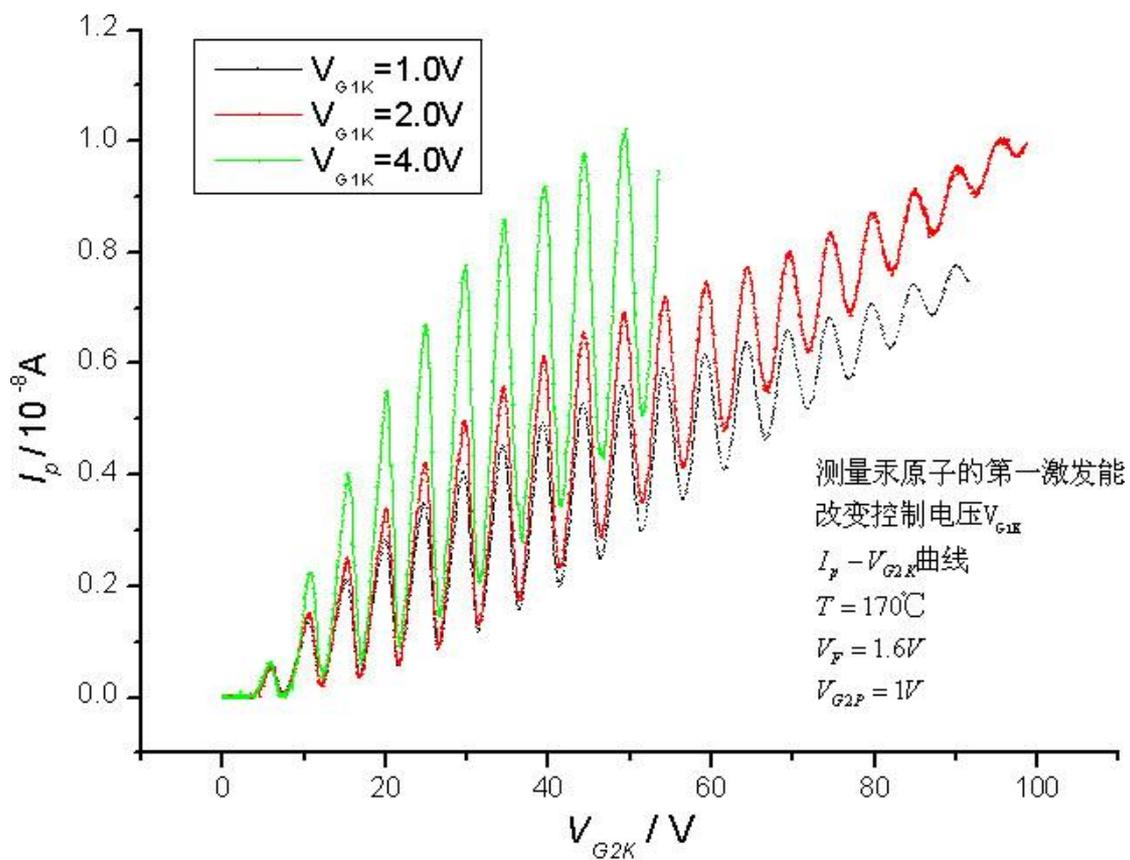


图4

图4表现了控制电压 $V_{G1K}$ 越高,收集电流 $I_p$ 的本底曲线增长越快(但是没有灯丝电压 $V_F$ 增长时涨幅大), $I_p$ 曲线的振荡幅度也越大(但也没有灯丝电压 $V_F$ 增长时涨幅大)。不同 $V_{G1K}$ 时, $I_p$ 曲线的峰位置(峰的横坐标)和谷位置(谷的横坐标)基本上没有改变。控制电压 $V_{G1K}$ 的作用是将阴极发射出的电子引向加速区 $G1G2$ ,清除空间电荷,所以当 $V_{G1K}$ 增大时,进入加速区的电子增多,经过与原子的碰撞后能够到达板极 $P$ 的电子也增多,但增多的程度显然不会比直接增加阴极发射电子数(即提高灯丝电压 $V_F$ )大。

#### 4. 改变减速电压

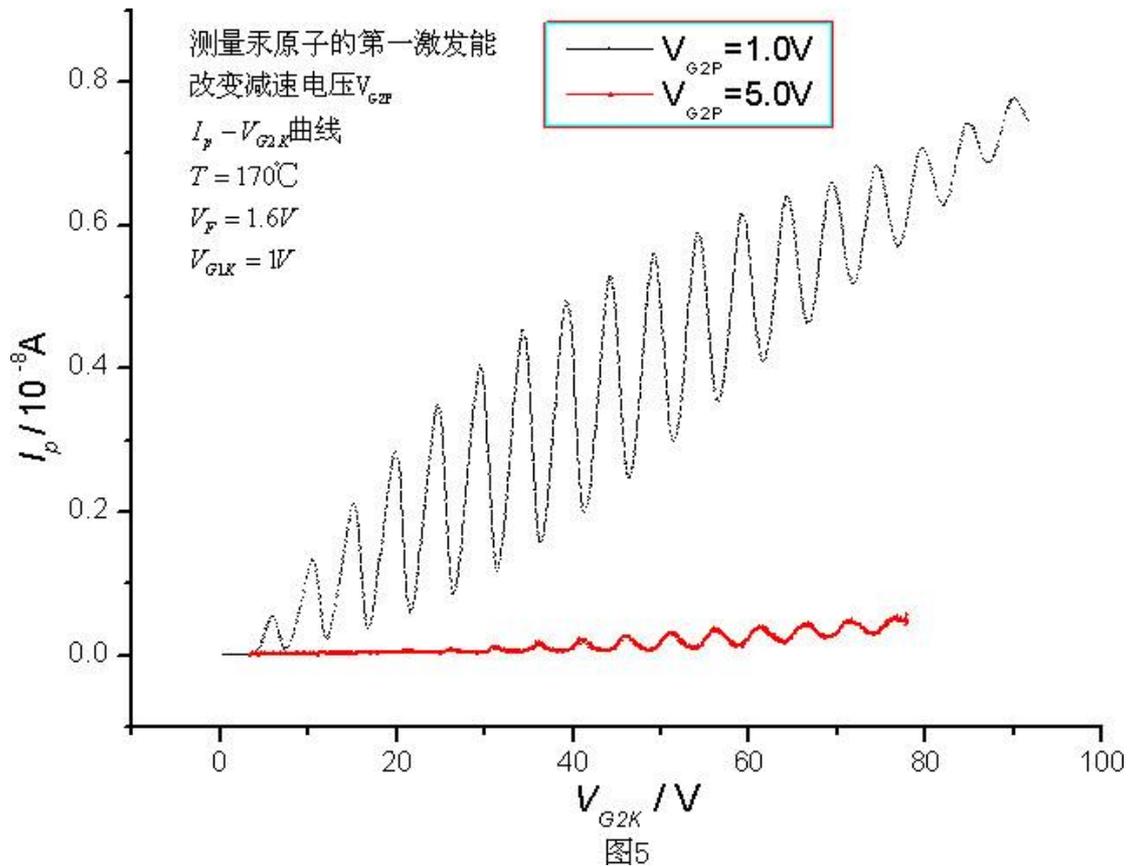


图 5 表现出减速电压  $V_{G2P}$  增大时， $I_p$  曲线的振荡幅度明显减小，本底曲线的增长也明显减小，峰和谷的位置也有明显改变。可以观察到的峰数也减少， $V_{G2P} = 1.0V$  时，0~80V 有 15 个峰， $V_{G2P} = 5.0V$  时，0~80V 有 12 个峰。 $V_{G2P}$  的作用是限制能够到达收集极  $P$  的电子数目，故  $V_{G2P}$  增大时，很多电子因为没有足够的能量去克服反向电压而无法到达收集极  $P$ ，收集电流  $I_p$  明显下降，本底曲线的增长明显减小。（值得注意的一点是，在下面我们将会看到计算得到的汞原子第一激发能约为 4.9V。按道理， $V_{G2P} = 5.0V$  时  $I_p$  不应该是周期振荡的曲线，事实并不尽然。原因是仪器本身有误差，仪器的示数是 5.0V 时，实际的电压可能是小于 5.0V 的，这样就会出现图 5 的情况。）

## 5. 改变炉温

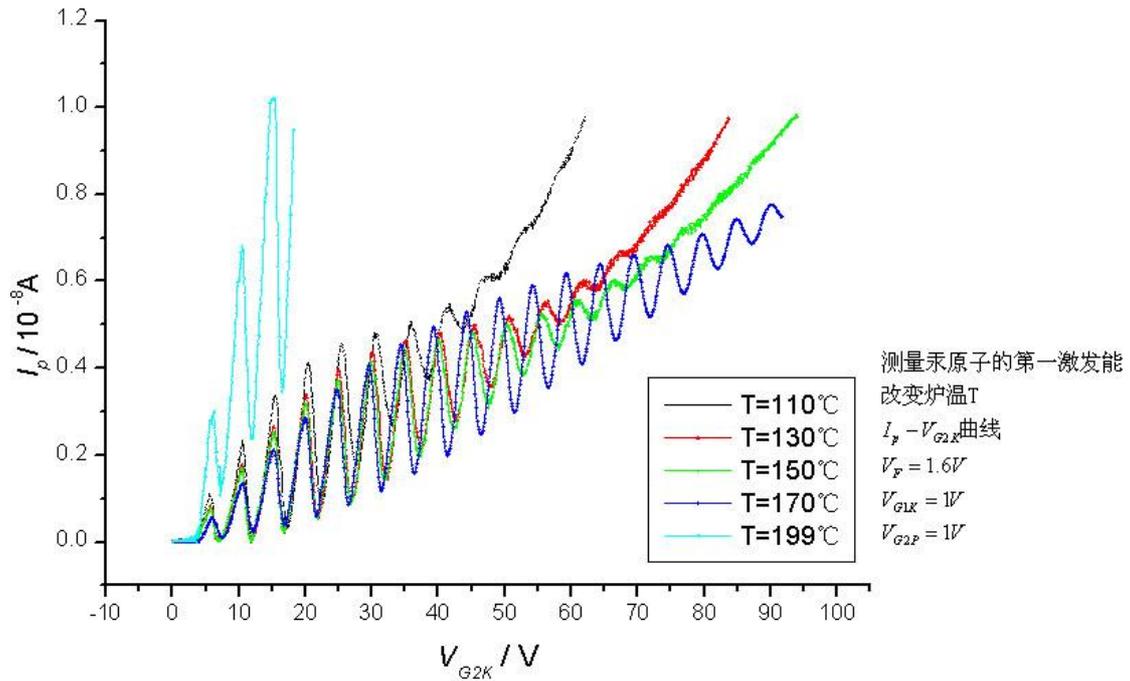


图6

图 6 表现了整体上  $I_p$  曲线随  $V_{G2K}$  增大而升高，温度越高振荡幅度越大。 $T = 110^\circ\text{C}$ 、 $130^\circ\text{C}$ 、 $150^\circ\text{C}$  时，峰峰包络线和谷谷包络线会合较快，温度越低会合越快，在  $V_{G2K}$  较大区域峰谷不明显，且温度越低，本底曲线上升越快。 $T = 170^\circ\text{C}$ 、 $199^\circ\text{C}$  时，峰峰包络线和谷谷包络线会合较慢，在  $V_{G2K}$  较大区域峰谷仍比较明显，温度越高本底曲线上升越快。观察 5 条曲线，看到温度越低，峰峰间距越大，有效峰数越少（ $T = 199^\circ\text{C}$  时的图像不完整暂不考虑）。

改变炉温将改变汞蒸气原子密度，而汞蒸气原子密度将影响电子平均自由程。炉温越高，蒸气密度越大，电子与原子碰撞概率越大，平均自由程越小，可观察到的峰数越多。

$T = 110^\circ\text{C}$ 、 $130^\circ\text{C}$ 、 $150^\circ\text{C}$ ，温度较低时，蒸气原子密度小，电子平均自由程大，很多电子能够不发生碰撞直接到达收集极  $P$ ，故此时峰谷不明显，可观察到的峰数少（温度越低峰数越少）。

$T = 170^\circ\text{C}$ 、 $199^\circ\text{C}$ ，温度较高时，蒸气原子密度大，电子平均自由程小，发生非弹性碰撞的电子很多，故此时峰谷明显，可观察到的峰数多。

第一激发能多重激发的本底曲线的形状受实验管形状影响，还依赖各级电源的附加值和控温炉的温度，炉温越低，灯丝电压越大，本底曲线上升越快。 $T = 199^\circ\text{C}$  时，因为温度太高时汞原子发生热电离，故不符合本规律。（因气体的热状态而引起的电离，称热电离。

热电离的本质是高速运动的气体分子的碰撞电离和光电离，只不过其能量不是来源于电场，而是来源于气体分子本身的热能。）

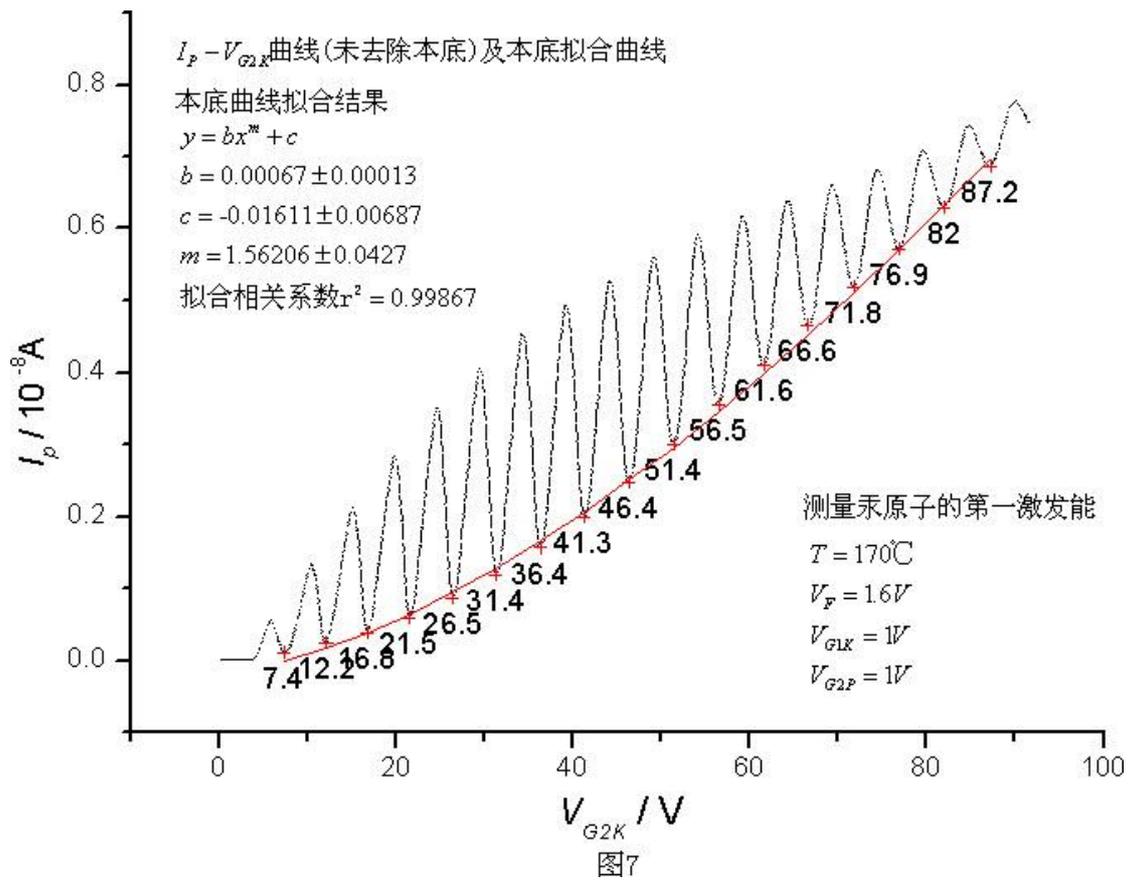
峰峰间距反映第一激发能的大小，温度越低，峰峰间距越大（但增大程度较小），表明温度越低，第一激发能的测量值越大，但增大程度小。

## 结论

因为加速电压为  $V_{G2K}$ ，电子在管子中不断与汞原子碰撞，传递能量，不易到达较高能量，故主要发生最低能级的激发。 $I_p - V_{G2K}$  曲线的峰峰间距就是第一激发能的值。

当加速电压较大时，会有一些未碰撞的高能量电子和已电离的汞原子到达收集极，原子退激时发出的光子也会在收集极上产生光电效应，这些作用的结果就是收集电流的极小值随加速电压的增大很快增大，形成本底。本底与周期振荡的收集电流叠加，使电流峰间距发生变化。为得到更均匀的间距可以设法去掉本底。一般取测量所得振荡电流的极小值作为本底，用方程  $y = bx^m + c$  对本底进行拟合，扣除本底后测量峰间距。以峰位置为纵坐标，峰序数为横坐标，作线性拟合，斜率即为第一激发能的数值。用此结果与未去除本底的结果相比较。

1. 扣除本底，计算汞原子第一激发能



如图 7，寻峰谷，找到  $I_p - V_{G2K}$  曲线极小值，用  $y = bx^m + c$  拟合这些极小值，得本底曲线方程：

$$y = bx^m + c$$

$$b = 0.00067 \pm 0.00013$$

$$c = -0.01611 \pm 0.00687$$

$$m = 1.56206 \pm 0.0427$$

拟合相关系数  $r^2 = 0.99867$

用 Origin 软件中 Analysis/Subtract/Reference Date 功能将本底曲线去除，得到去除本底的  $I_p - V_{G2K}$  曲线。寻峰，得到各峰位置（横坐标）。如图 8。

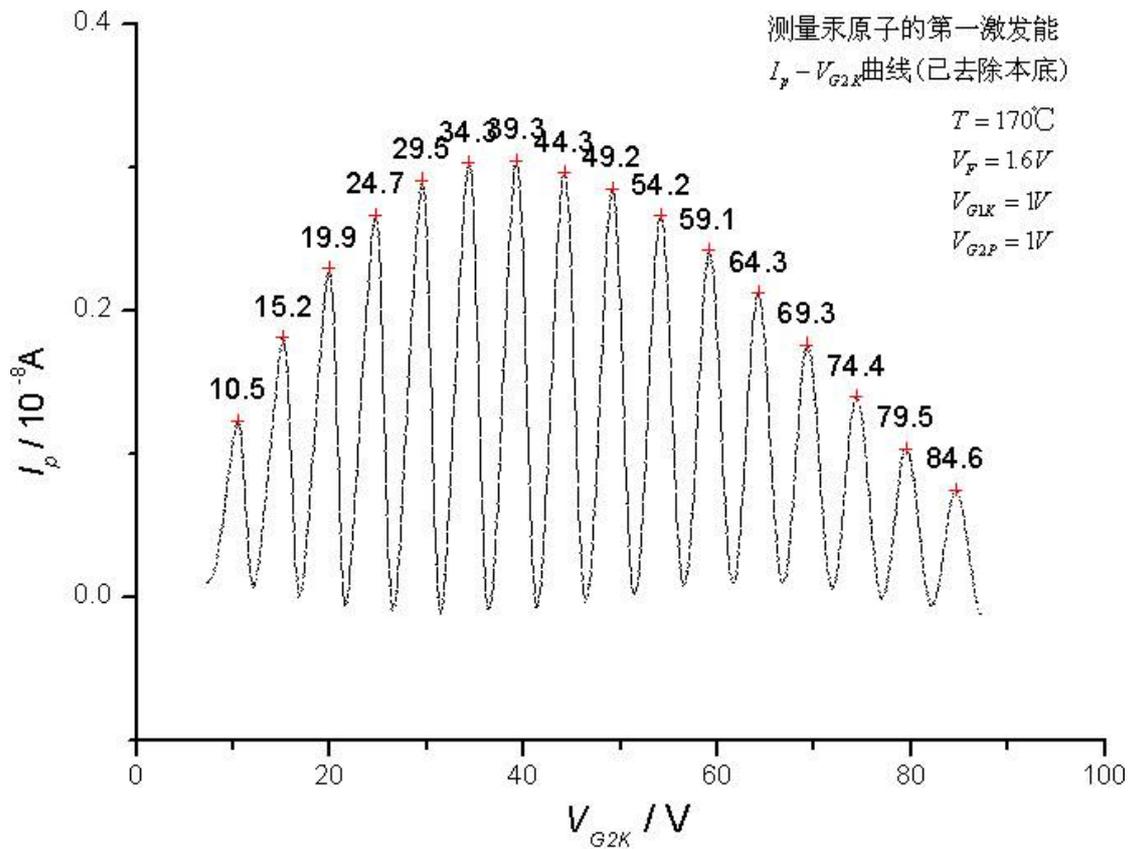


图8

以峰序号为横轴，峰位置为纵轴，线性拟合，得到第一激发能的大小。如图9。

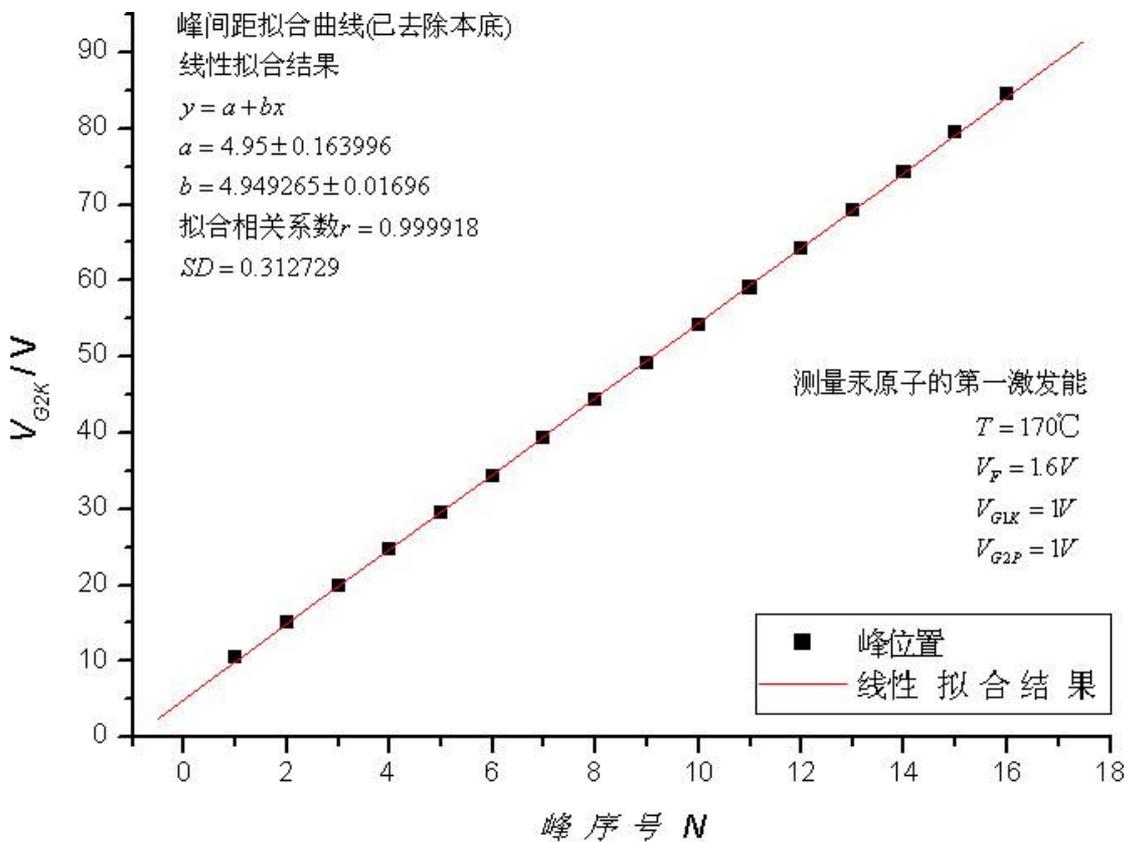


图9

第一激发能=4.949265eV

不确定度=0.01696eV

2. 不扣除本底，计算汞原子第一激发能

如图 10，直接在未去除本底的  $I_p - V_{G2K}$  曲线上寻峰，得到各峰位置（横坐标）。

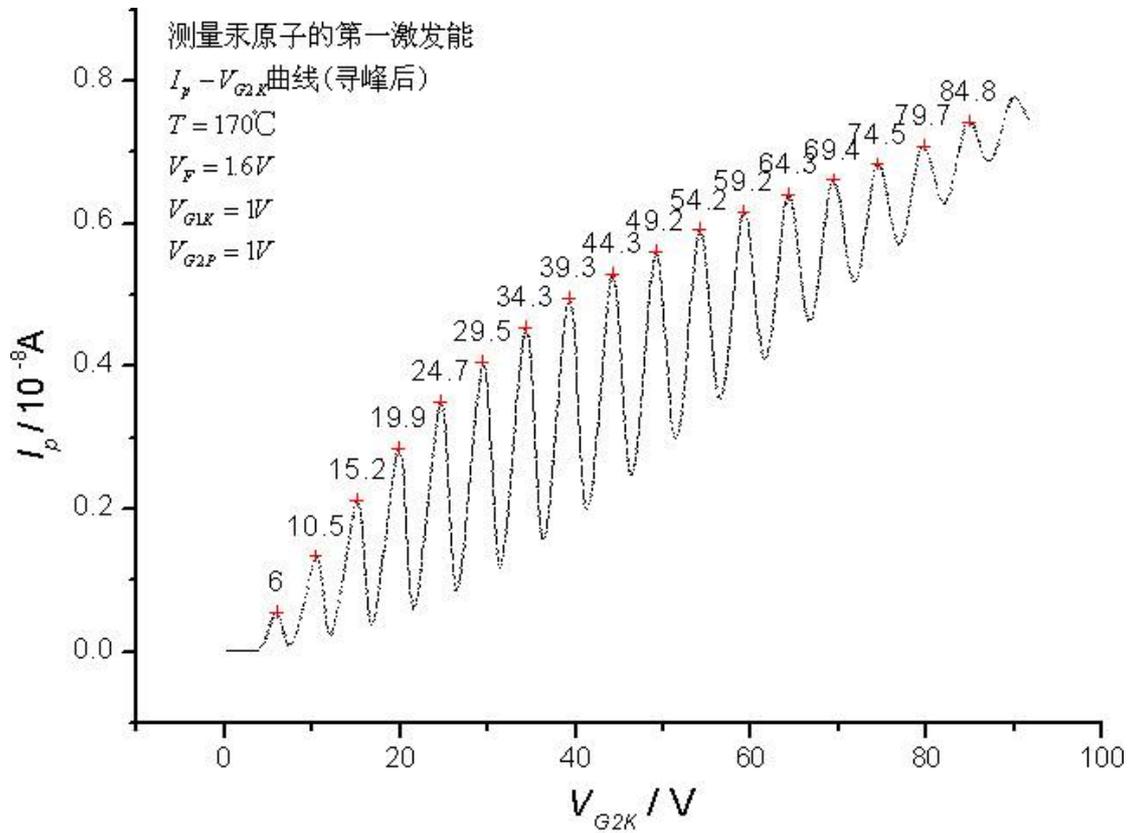


图10

以峰序号为横轴，峰位置为纵轴，线性拟合，得到激发能大小。如图 11。

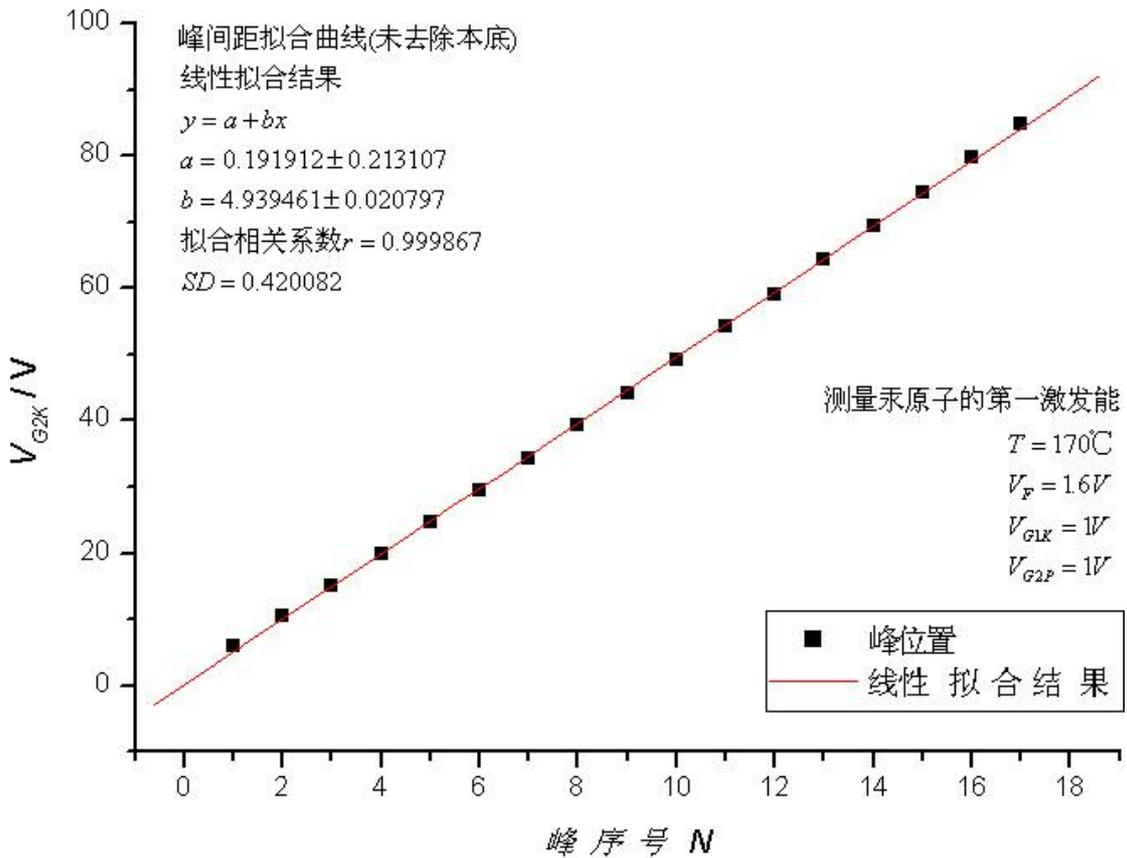


图11

第一激发能=4.939461eV

不确定度=0.020797eV

### 3. 将实验结果与理论值比较

汞原子第一激发能理论值为 4.89eV ,用去除本底的结果和没有去除本底的结果与理论值比较。

	第一激发能/eV	$\left  \frac{\text{实验值}-\text{理论值}}{\text{理论值}} \times 100\% \right  / \%$	拟合相关系数r
去除本底	4.95 ± 0.02	1.2	0.999918
未去除本底	4.94 ± 0.02	1.0	0.999867

可以看到，在实验中去除本底的结果的相对误差大于没有去除本底的结果，但拟合相关性优于后者，二者不确定度相近。可以知道，是否去除本底对汞原子的第一激发能的计算没有太大影响，得到汞原子的第一激发能的数值为 4.95(2)V。

致谢

感谢实验指导老师白翠琴老师的悉心指导，感谢课程的所有指导教师的辛勤工作，你们的努力让我收获很多。感谢我的实验合作者王荣松同学，你给予了我许多无私的帮助。

### 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]杨福家.原子物理学（第三版）[M].北京:高等教育出版社,2000。
- [3]郑广恒.近代物理（上册）[M].上海:复旦大学出版社,1991。
- [4]潘玉莲,王煜,潘正元.夫兰克-赫兹实验中 Hg 的第一激发电位的测量[J].物理实验,1995,15:154-156。
- [5]梁曦东.高电压工程[M].北京:清华大学出版社,2003。