

# 弗兰克-赫兹实验

---

报告人：周四B9组

2016.12.22



# 目录



- 1 实验背景与目的
- 2 实验原理与器材
- 3 实验内容
- 4 实验结论

# 1 实验背景



1914年，德国物理学家弗兰克和赫兹在研究中发现电子与原子发生非弹性碰撞时能量的转移是量子化的，为玻尔理论提供了直接的实验证，对原子理论的发展起到了重大作用，由此获得了1925年诺贝尔。



# 实验目的



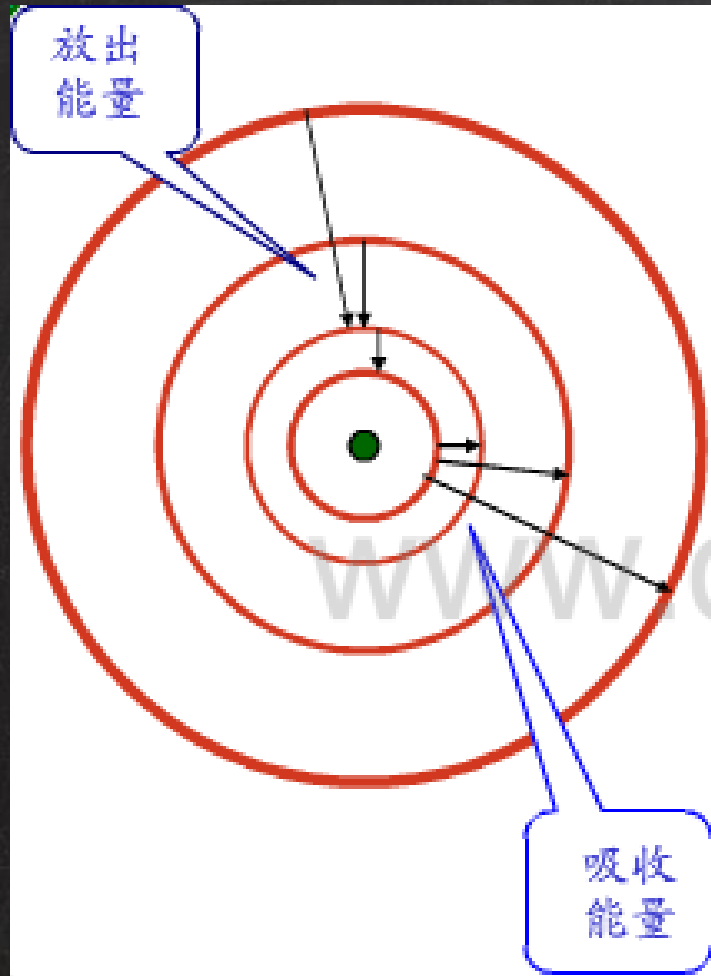
○ 了解弗兰克赫兹实验的原理和方法

○ 通过测量汞原子的第一激发电位、较高能级电位和电离电位，加深对原子结构的了解

# 2 实验原理



# 玻尔理论



原子只能较长久地停留在一些稳定的能量状态（定态），它的能量不可能连续变化而只能是突变，即“跃迁”。原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收能量，辐射的频率是一定的：

$$h\nu = E_m - E_n$$

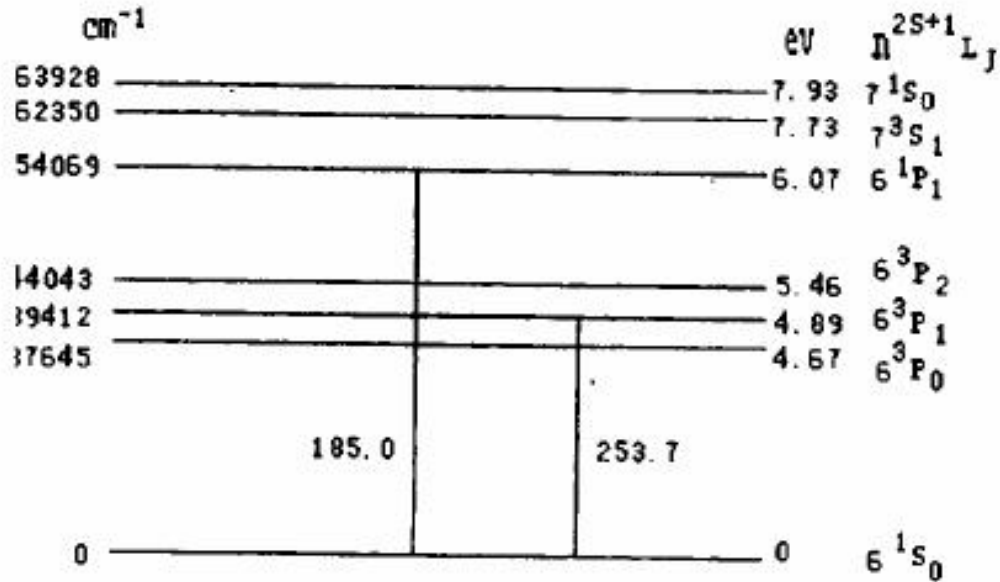
以电量为 $e$ 电子，在电位差为 $U_1$ 的加速电场作用下，来使原子从基态能 $E_0$ 跃迁到第一激发态能 $E_1$ ：

$$eU_1 = E_1 - E_0$$



# 电子与汞原子的相互作用

汞原子的能级图



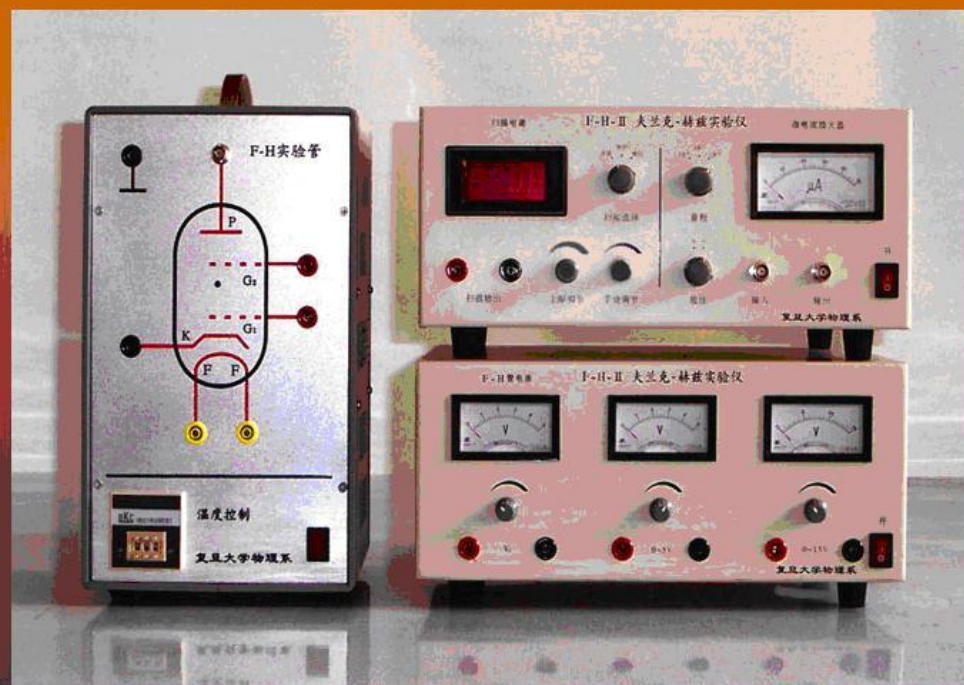
当电子的能量小于临界能量时，电子与汞原子的碰撞是弹性碰撞，电子与汞原子之间几乎不交换能量；

当电子的能量达到临界能量时，电子与原子发生非弹性碰撞，电子几乎把全部能量传递给汞原子，使汞原子激发。

# 实验器材

- ✓ 复旦双栅柱面型四极式夫兰克赫兹实验管
- ✓ 微电流放大器
- ✓ 夫兰克赫兹实验仪
- ✓ x-y记录仪

## 夫兰克-赫兹实验

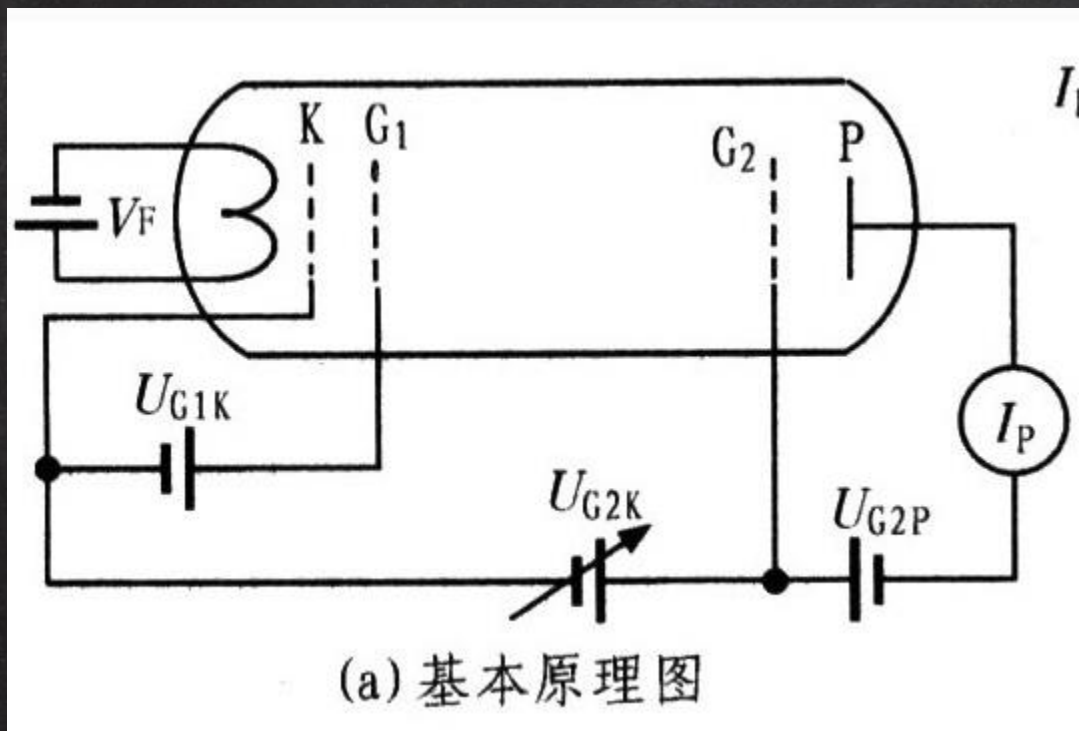




# 3 实验内容



# 测量汞原子的第一激发电位



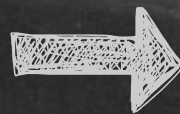
汞的蒸气压  $p: \log(p_{\text{饱}}/Pa) = \frac{-3200}{T/K} + 10.125$

灯丝电压  $V_F$ :

控制栅电压  $V_{G1K}$

电子的加速电压  $V_{G2K}$

减速电压  $V_{G2P}$



$I_P - V_{G2K}$  曲线

# 最佳参数的选择

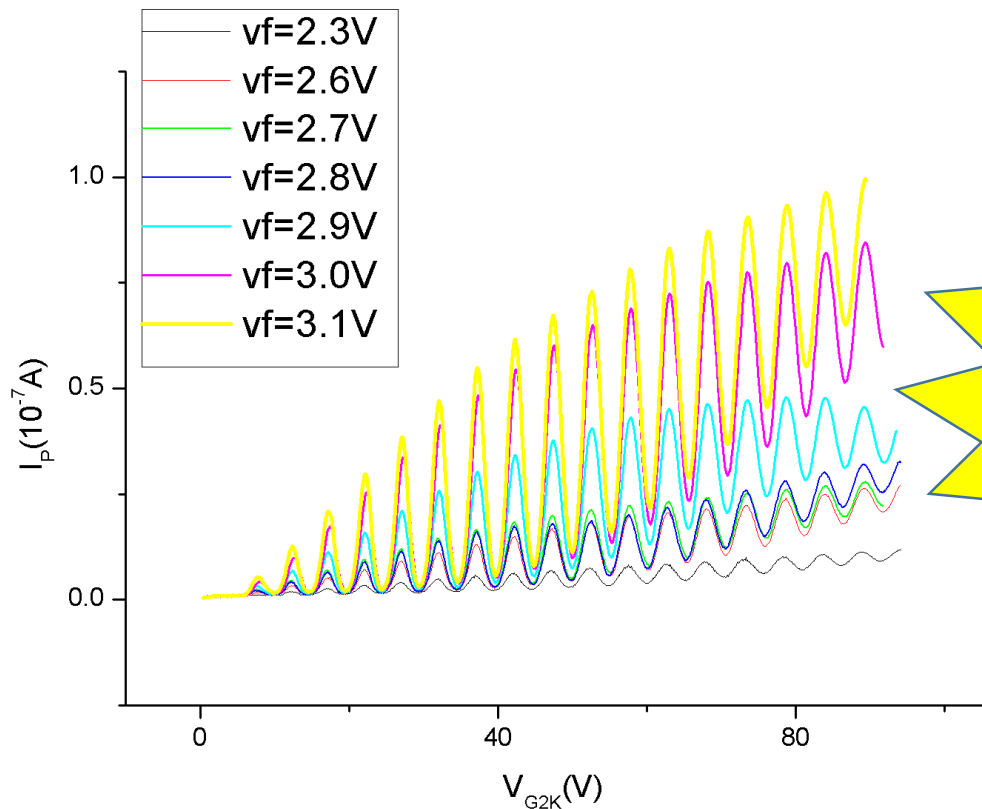
灯丝电压 $V_F$

控制栅电压 $V_{G1K}$

减速电压 $V_{G2P}$

管内汞蒸汽的温度 $T$

$T = 170^\circ\text{C}$ ,  $V_{G1K} = 1.6\text{V}$ ,  $V_{G2P} = 1\text{V}$



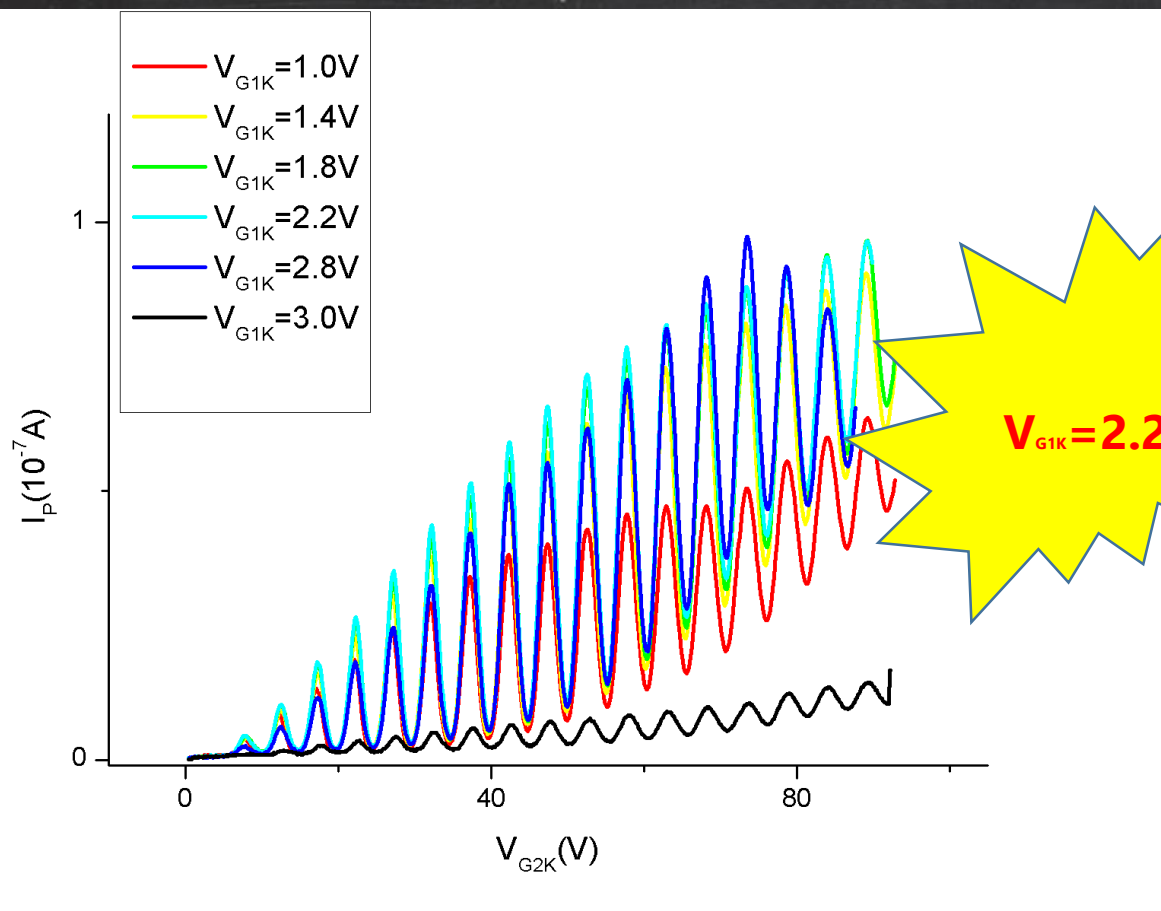
在其他条件不变的情况下，改变灯丝电压，得：随着灯丝电压的增大，板极电流明显增大。

分析：灯丝电压影响灯丝温度，而灯丝温度又影响阴极发射电子的能力。当灯丝电压越高时，阴极发射出的电子越多，能量越大，则到达P概率越大， $I_p$ 也越大。

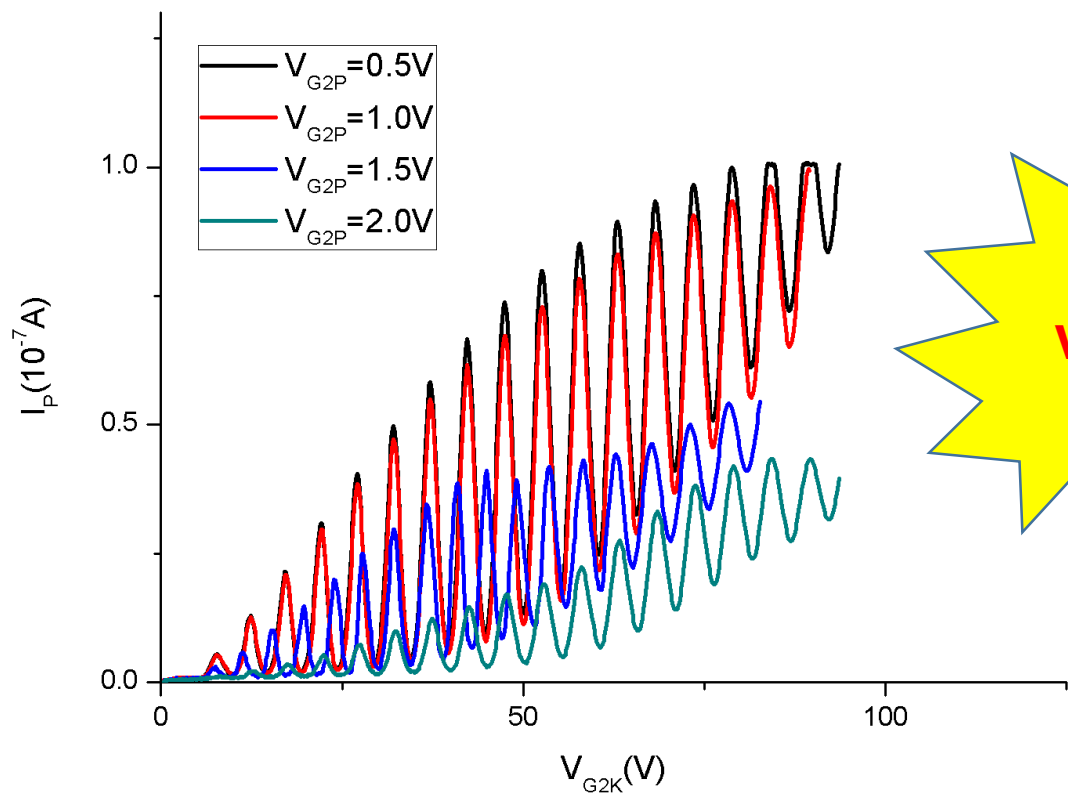
$V_F$ 太低：阴极的热电子发射能力小，不但不能使电子与汞原子在碰撞区保证一定的碰撞几率，而且使板极所检测到的电流也很小。使曲线分辨率下降；

$V_F$ 太高：电子发射多，仪器使用寿命短。

$T = 170^\circ\text{C}$ ,  $V_F = 3.1\text{V}$ ,  $V_{G2P} = 1\text{V}$



在其他条件不变的情况下，改变控制栅电压，得：随着控制栅电压的增大，板极电流先增大后减小。分析：控制栅电压是用于消除电子阴极附近的堆积效应（因为阴极发射的电子由于动能较小，会包围在阴极K附近，形成电子云，阻挡阴极K进一步发射电子。），提高阴极K发射电子的效率，控制阴极发射的电子流的大小。当 $V_{G1K}$ 增大时，到达板极的电子数增多， $I_p$ 也增大。但当 $V_{G1K}$ 过大时，会减小进入碰撞空间的电子流，导致板极电流下降。



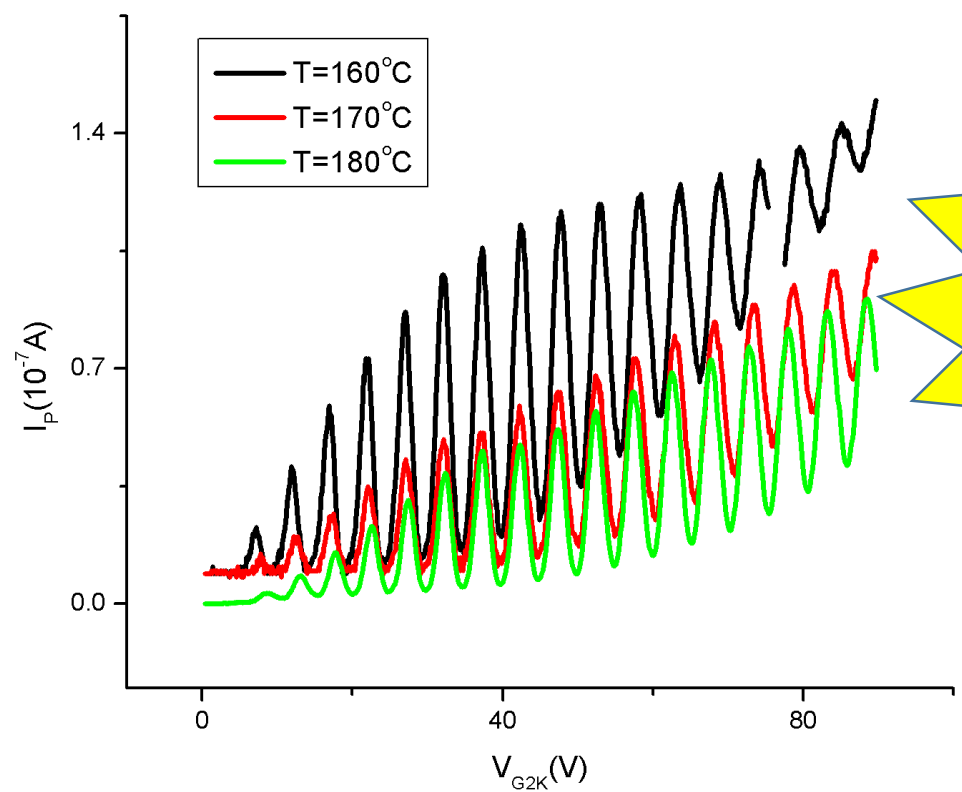
**$V_{G2P} = 0.5 \text{V}$**

在其他条件不变的情况下，改变减速电压，得：  
随着减速电压的增大，板极电流减小。

分析：减速电压是一个反向的电场，是为了使G2处能量较低电子不能到达板极。故其增大，电子动能减小，单位时间内到达板极的电子数也减小，电流下降。

当 $V_{G1K}$ 增大时，到达板极的电子数增多， $I_p$ 也增大。但当 $V_{G1K}$ 过大时，会减小进入碰撞空间的电子流，导致板极电流下降。

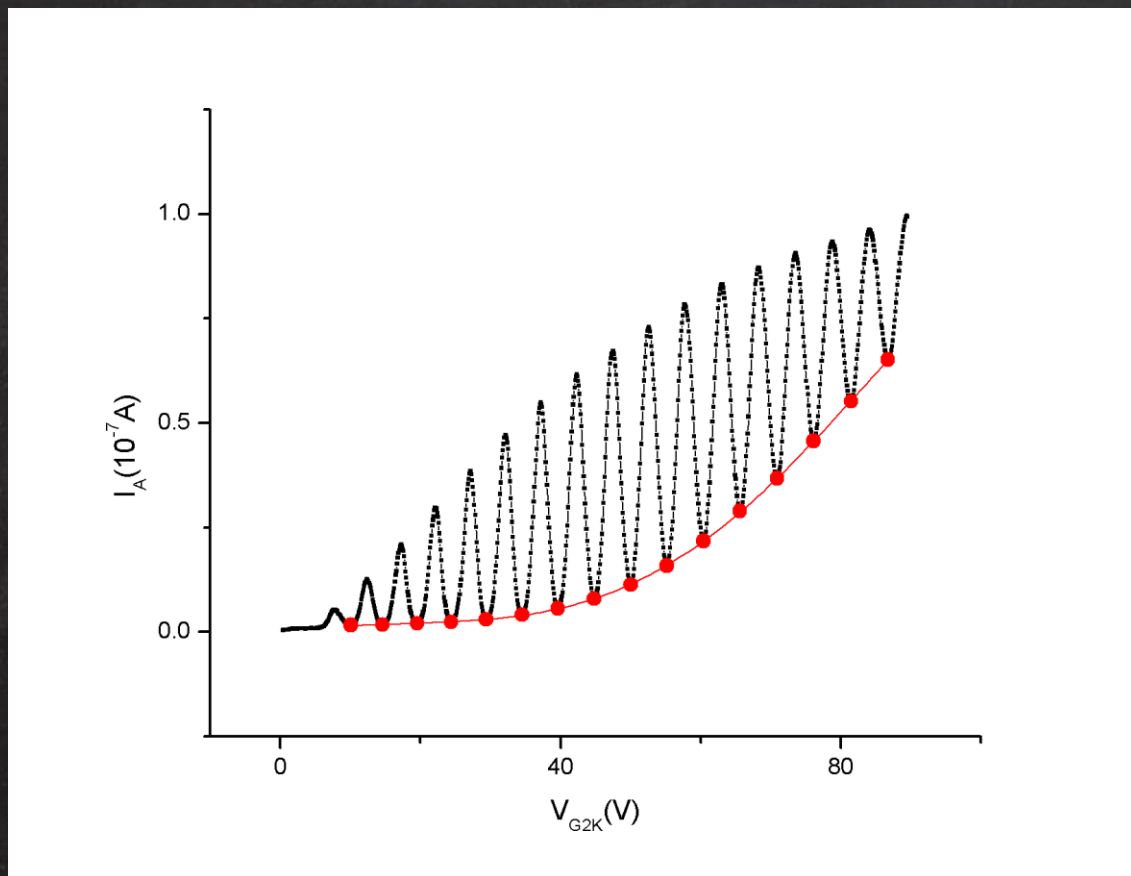
$V_F = 3.1V$ ,  $V_{G1K} = 1.6V$ ,  $V_{G2P} = 0.5V$



在其他条件保持不变的情况下,改变温度,得:  
随着温度的升高,电流幅度逐渐增大;且随着温度的升高,第一激发电位有小幅的下降。

分析:当温度偏低时,蒸气压较小,汞原子的饱和蒸汽密度小,电子与原子的碰撞机会很少,弹性碰撞损失的能量很小,此时电子的平均自由程较大,每个自由程中,电子积聚较大的能量,当一部分电子的能量能够使原子跃迁时,激发的几率增大,此时原子的平均激发能增大,两次有效激发之间的平均电势差值增大。

相反,温度越高,蒸气压越高,汞原子的密度越大,电子的平均自由程就越短,电子与汞原子的碰撞机会增多,激发汞原子较低能级的几率就越大,汞原子的第一激发电态能量就越小。

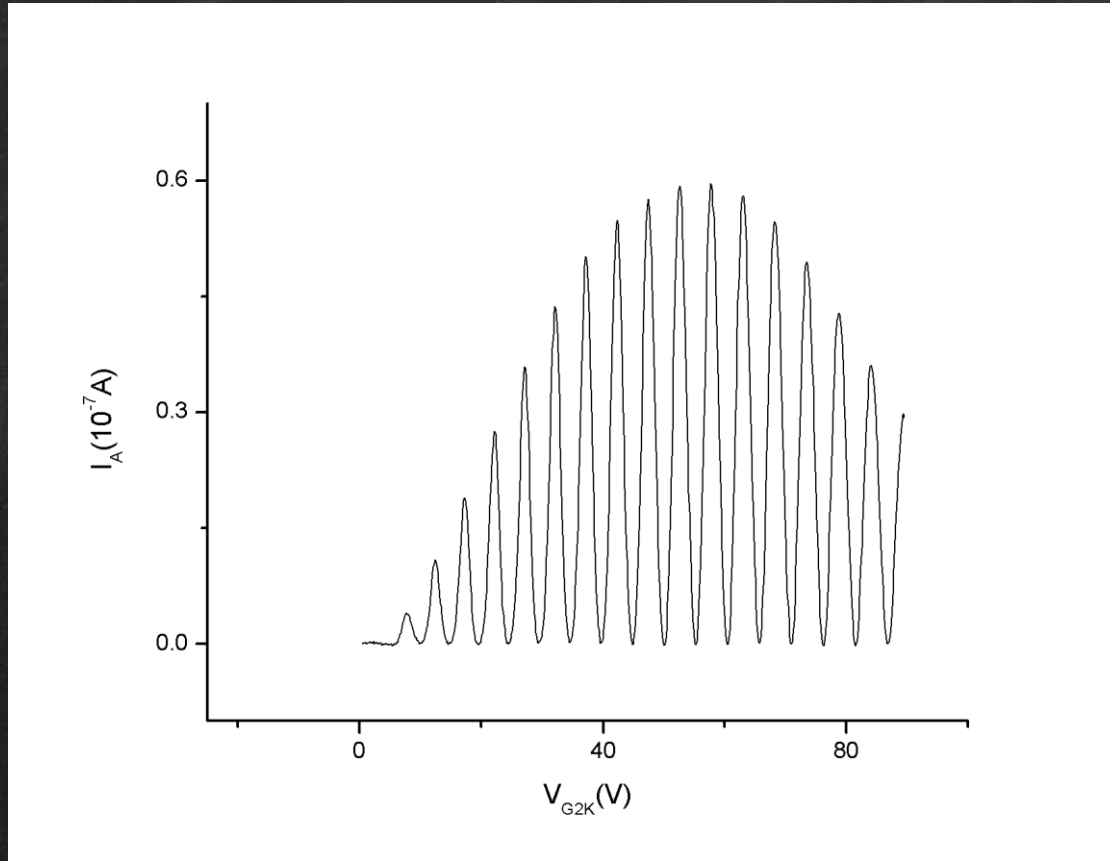


Model	Polynomial		
Adj. R-Square	0.99994		
		Value	Standard Error
C	Intercept	0.00318	0.01078
C	B1	0.00165	0.00169
C	B2	-4.49394E-5	9.13793E-5
C	B3	-4.94541E-7	2.2115E-6
C	B4	4.87535E-8	2.44797E-8
C	B5	-3.24721E-10	1.00904E-10

测得的汞的第一激发态曲线

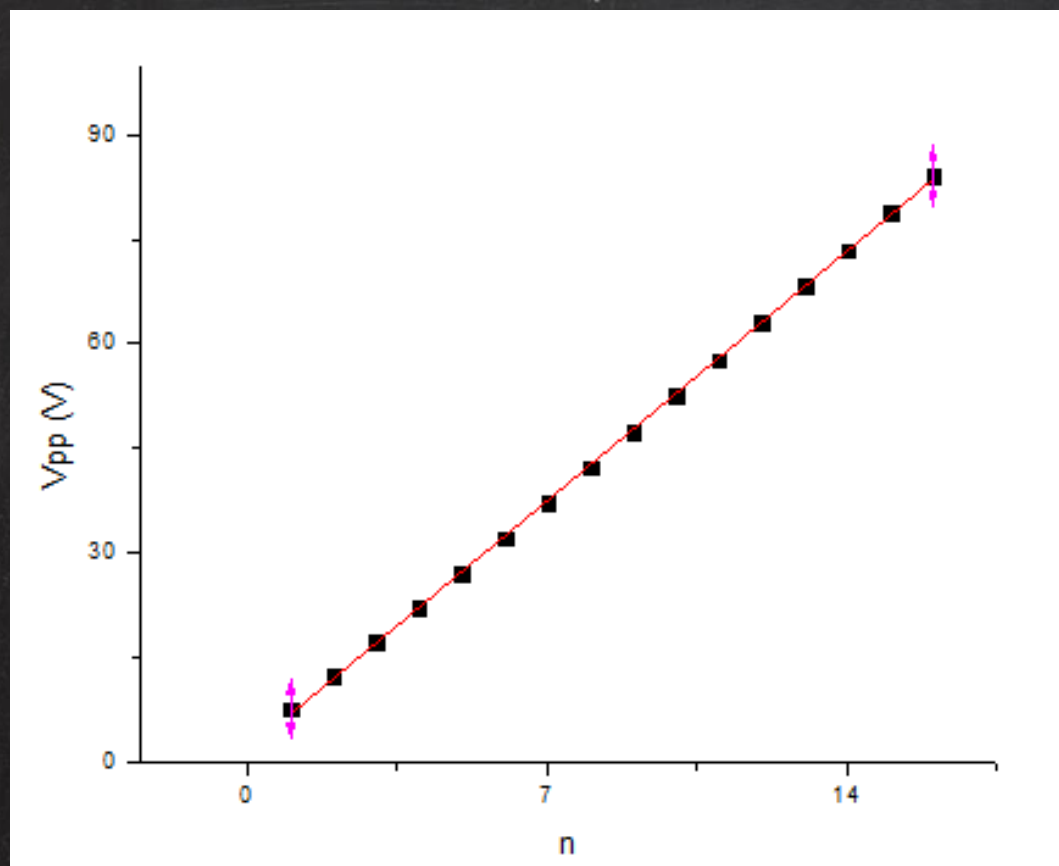


用Origin拾取峰值的下表：



n	Vpp/V	n	Vpp/V
1	7.681	9	47.426
2	12.410	10	52.623
3	17.234	11	57.786
4	22.131	12	63.068
5	27.115	13	68.349
6	32.131	14	73.532
7	37.228	15	78.799
8	42.295	16	84.180

去除本底后汞的第一激发态曲线



拟合得：
$$V_{pp} = (5.11 \pm 0.02)n + (1.79 \pm 0.20)$$
$$R^2 = 0.99976$$

所以斜率即为汞原子的第一激发电位： $U_1 = 5.11\text{V}$ ，与理论值 $4.89\text{V}$ 相比稍微偏大，其相对误差为： $\delta = 4.5\%$ 。

截距为接触电位。且温度越高，接触电位越大，这是因为接触电位来源于金属逸出功，而金属逸出功随着温度的升高而增大。

## 思考题

1.为什么 $I_A - U_{GK}$ 曲线的波谷电流不等于零，并且随着 $U_{GK}$ 的增大而升高？

答：波谷电流不为零是因为：电子在栅极附近跟汞原子发生碰撞存在一定的几率，因此总有部分电子没和汞原子发生碰撞而直接到达A级从而形成电流。故其不为0。

波谷电流随着 $U_{GK}$ 的增大而升高是因：随着 $U_{GK}$ 的增大，在栅极附近没和汞原子发生碰撞，而直接到达A级形成电流的电子数量会不断增多，从而使波谷电流增大。

2.为什么第一个峰对应电位与第一激发电位相差较大？

答：因为实际的F-H的阴极和栅极往往是不同的金属材料制成的，因此会产生接触电位差。而进入加速区的电子已经具有一定的能量，使真正加到电子上的加速电压不等于 $V_{G2K}$ 。这将影响到曲线第一个峰的位置，使它左移或右移。

3.为什么曲线不会从原点开始？

答：电子由热阴极发出，刚开始加速电压主要用于消除阴极电子的散射影响，后来电子加速，使其具有了较大的能量冲过反向拒斥电场而到达板极形成板流，并为微电流计所检验出来，故曲线不是从原点开始的。

# 误差来源

## 预热不足

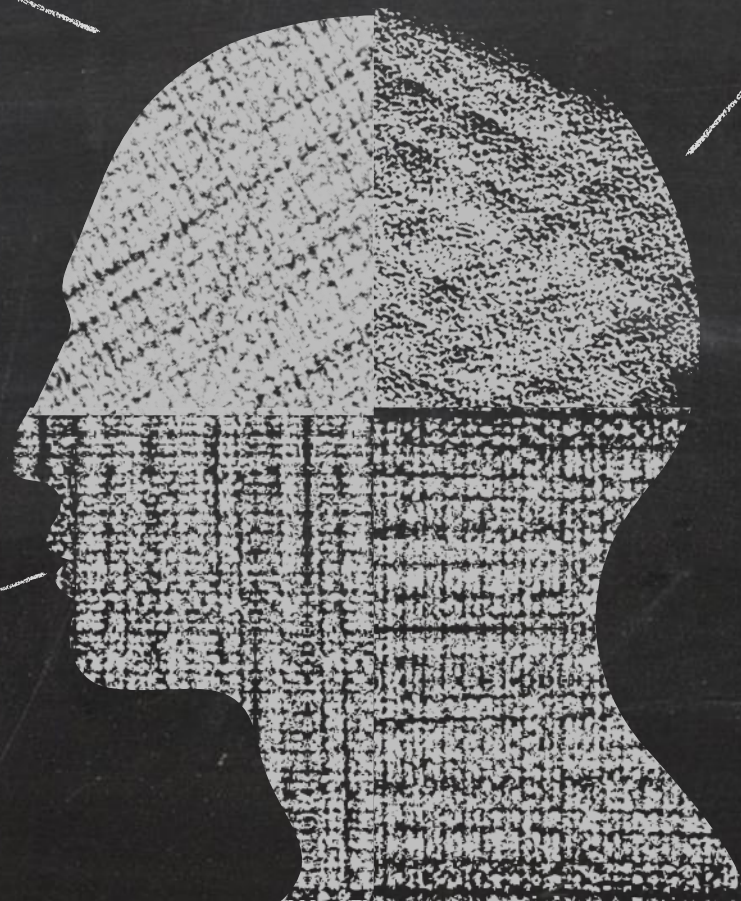
Hg对温度的灵敏度高，需要长时间预热

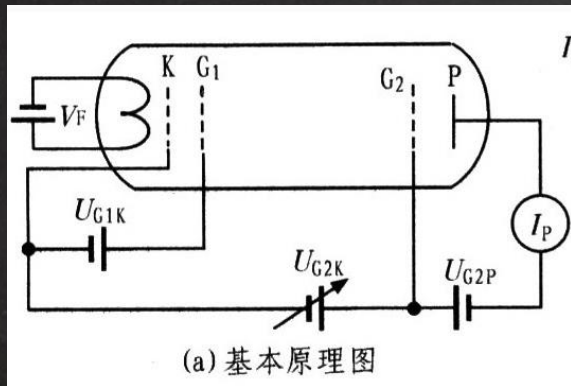
## 电压步差不连续

手动挡难以控制，自动挡步差大。导致分辨率有限。

## 仪器本身

弗兰克赫兹管老化，电压调节不灵敏





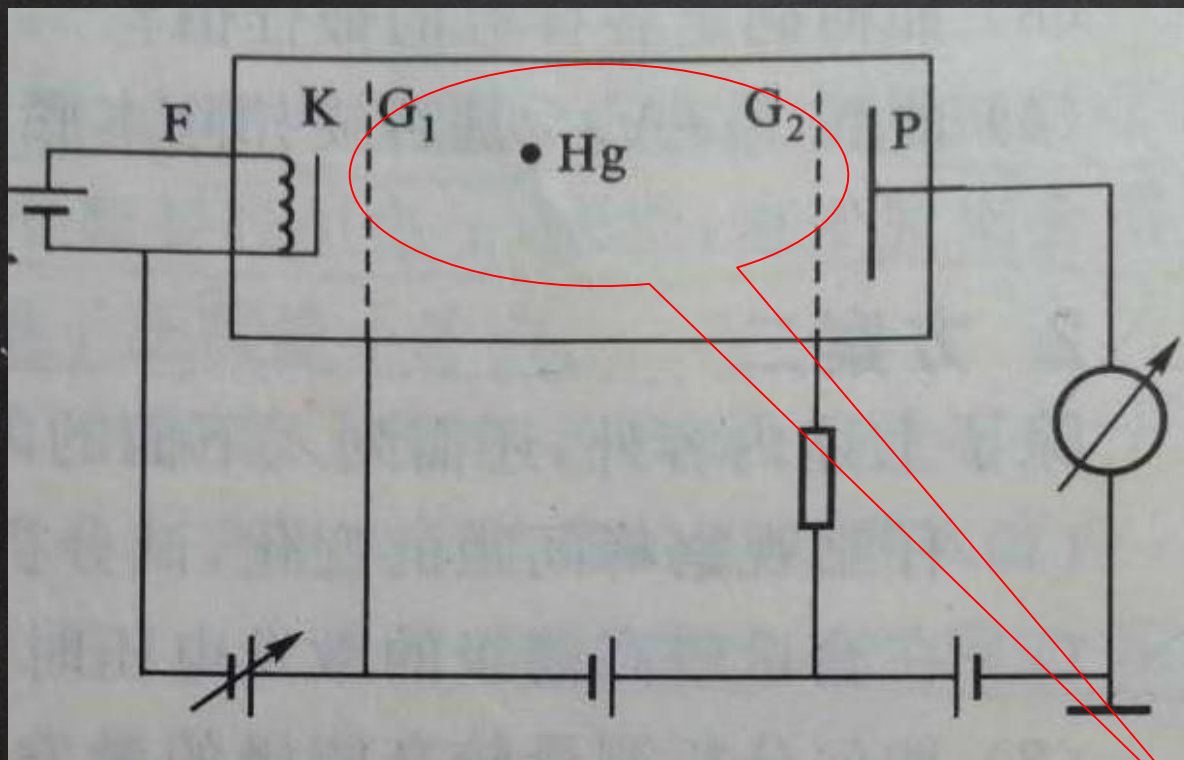
# 测量汞原子较高能级激发态

激发到较高能级 → 电子积累到更高能量

1) 缩短加速距离:  $G2K \rightarrow G1K$

2) 降低Hg原子浓度:

电子平均自由程 >  $G1K$  距离

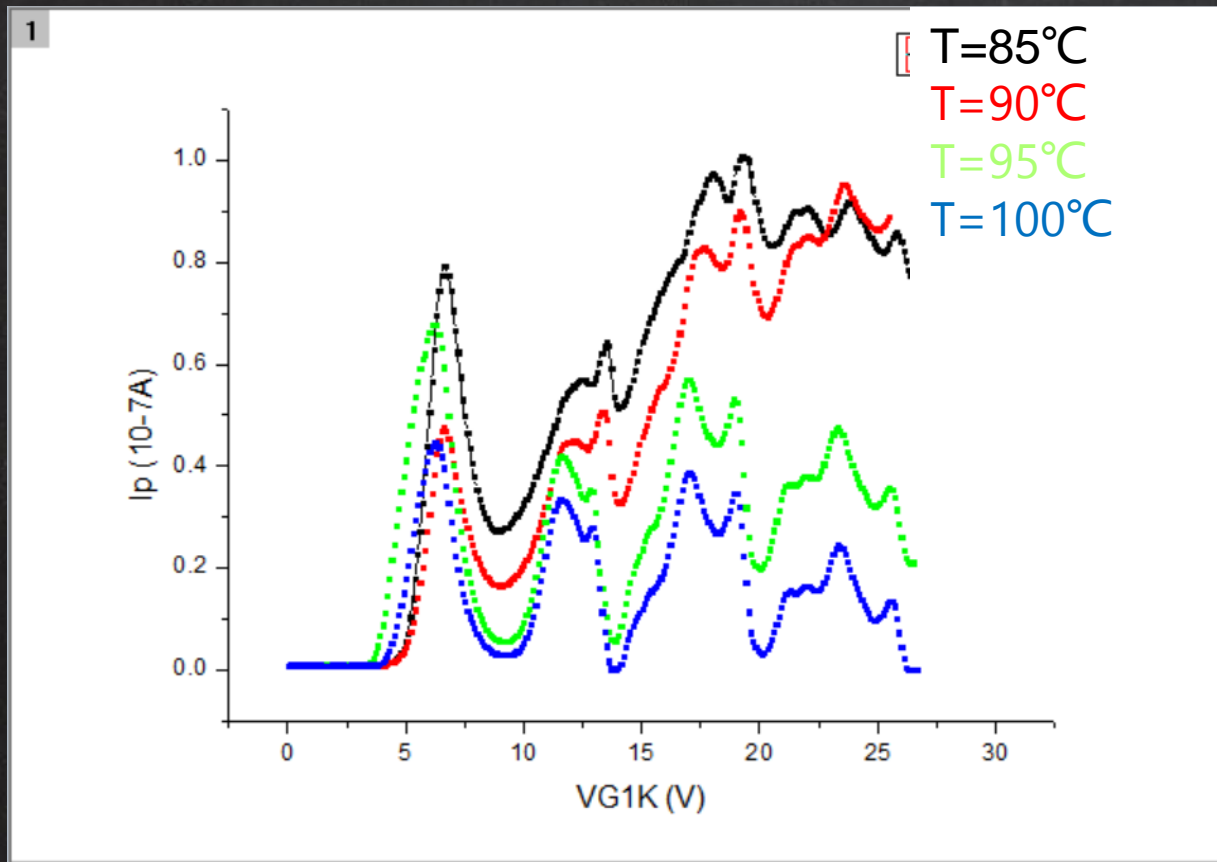


$I_P - V_{G1K}$  曲线

汞原子较高激发电压测量线路图

足够长的等势碰撞区

# 温度 $T$ 对 $I_P \sim V_{G1K}$ 曲线的影响



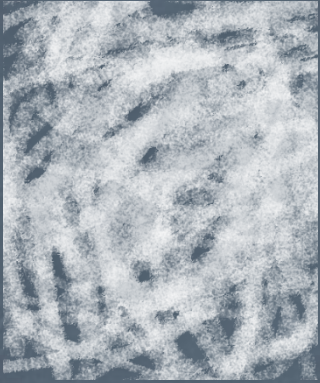
现象：随温度升高，曲线整体下移，峰谷位置有不稳定偏移

温度 $T \downarrow \rightarrow$ 汞原子饱和密度和自身动能 $\downarrow$ ，电子平均自由程 $\uparrow \rightarrow$ 汞原子激发率 $\uparrow$ ，但电子碰撞机会少 $\rightarrow$ 直接到极板， $I_P \uparrow$

能否发生非弹碰撞，仅与电子动能有关，与汞原子浓度无关 $\rightarrow$ 峰无偏移

$$V_F = 2.8V, V_{G1G2} = 0.2V, V_{G2P} = 1.0V$$

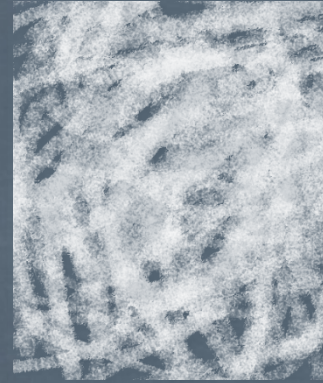
# REMSU



灯丝电压  $V_F$



控制栅电压  $V_{G1K}$



减速电压  $V_{G2P}$



温度  $T$

$$J = aT^2 e^{-\omega_0/kT}$$

减弱空间电荷区影响

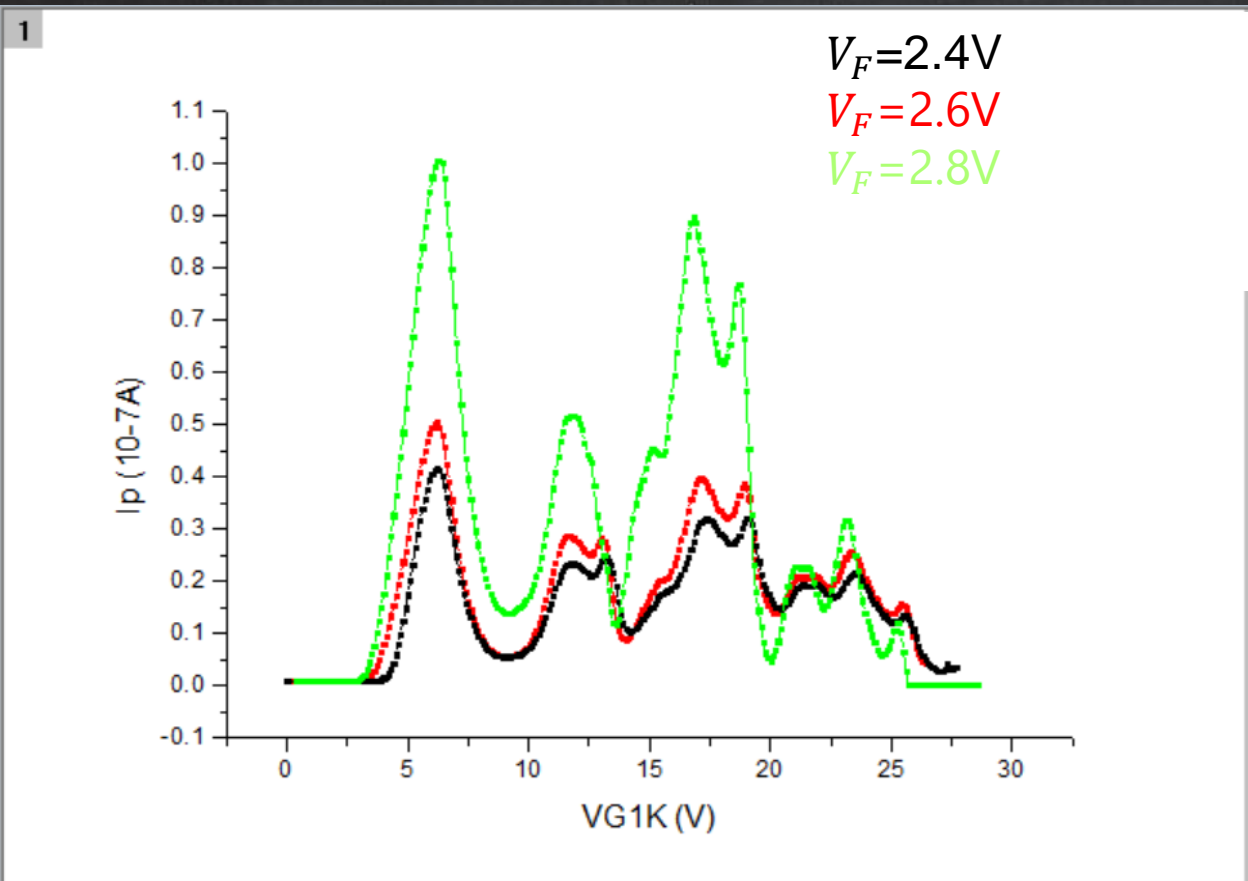
利用峰谷附近电子动能分布的差异使曲线有峰谷轮廓；调整曲线高低得到全貌；让峰谷附近电子通过减速区概率差值最大，以提高“分辨率”。

改变饱和蒸气压，  
电子平均自由程

$$\bar{\lambda} \cdot p = \frac{k}{\sqrt{2}\pi d^2} T$$

→ 获得能量使原子激发

# 灯丝电压 $V_F$ 对 $I_P \sim V_{G1K}$ 曲线的影响



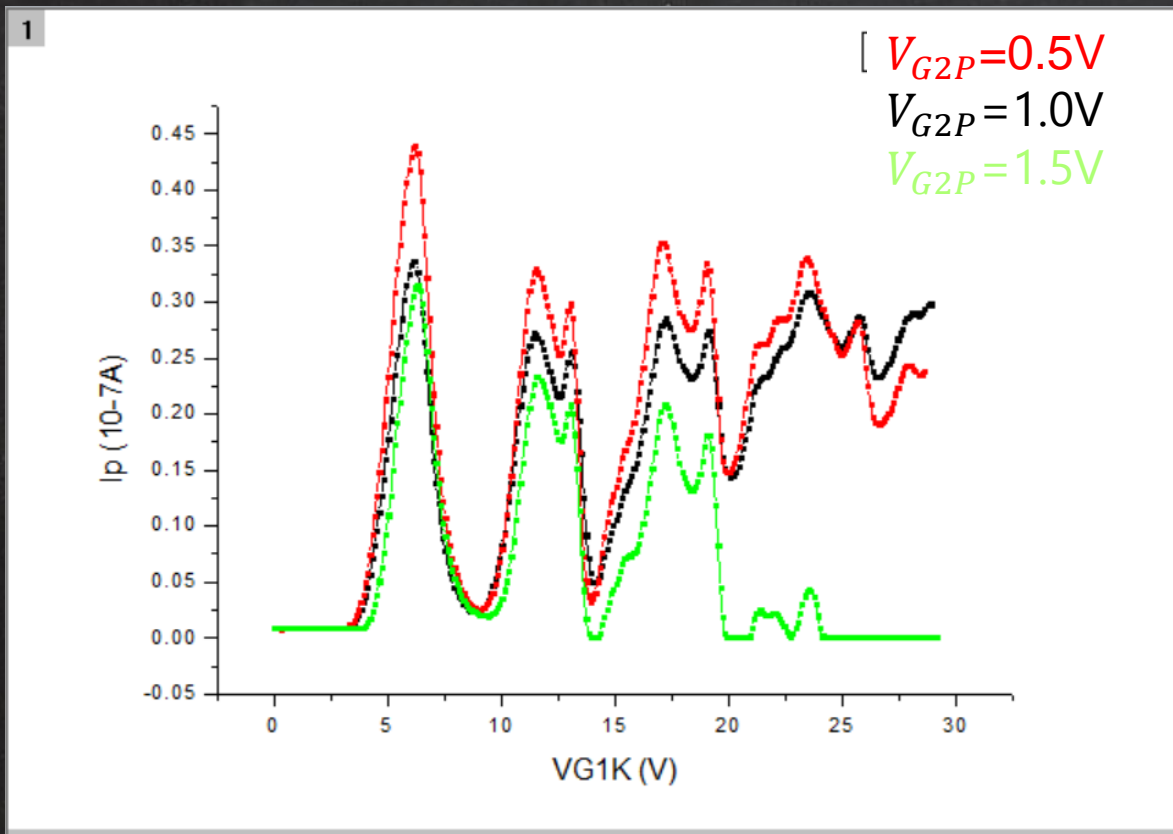
现象：波峰波谷的扫描电位不变，但板极电流增大，曲线整体上移，峰谷间幅度变大

灯丝电压 $\uparrow \rightarrow$ 灯丝温度 $\uparrow \rightarrow$ 发射电子数目 $\uparrow \rightarrow$ 到板极电流 $\uparrow$   
曲线高度、非弹碰撞能力仅与电子的动能有关，与数目无关  
 $\rightarrow$ 无偏移

$T=100^{\circ}C$  ,  $V_{G1G2} = 0.4V$  ,  $V_{G2P} = 1.0V$



# 减速电压 $V_{G2P}$ 对 $I_P \sim V_{G1K}$ 曲线的影响

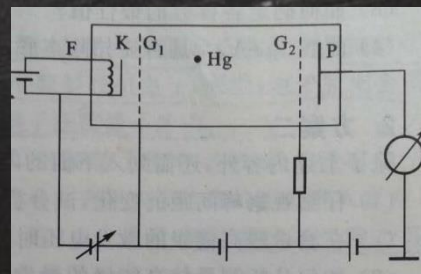


现象：当  $V_{G2P} < U_0$  时，随减速电压增加，曲线整体下移，波峰波谷的扫描电位右移

减速电压  $V_{G2P} \uparrow \rightarrow$  有足够动能到达极板 P 的电子数  $\downarrow \rightarrow$  板极电流  $\downarrow$   
 [太小太大对电子的筛选作用小]

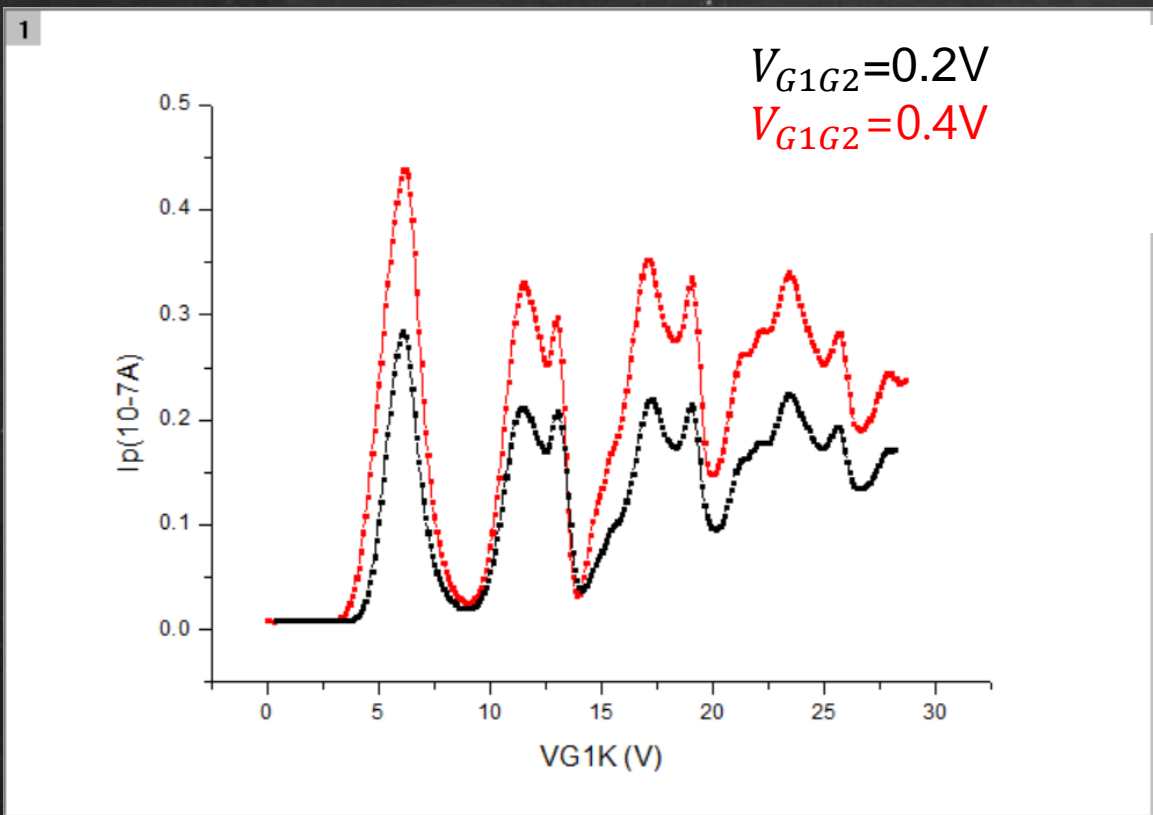
减速场向自由碰撞区渗透  $\rightarrow$  G2 附近电子动能  $\downarrow \rightarrow$  峰右移  
 [用加速电压补偿减速电压的影响]

$$T=100^{\circ}C, V_F=2.5V, V_{G1G2}=0.2V$$



# 补偿电压 $V_{G1G2}$ 对 $I_P \sim V_{G1K}$ 曲线的影响

为什么要补偿？



现象：随补偿电压增加，曲线整体上移，波峰波谷的扫描电位左移

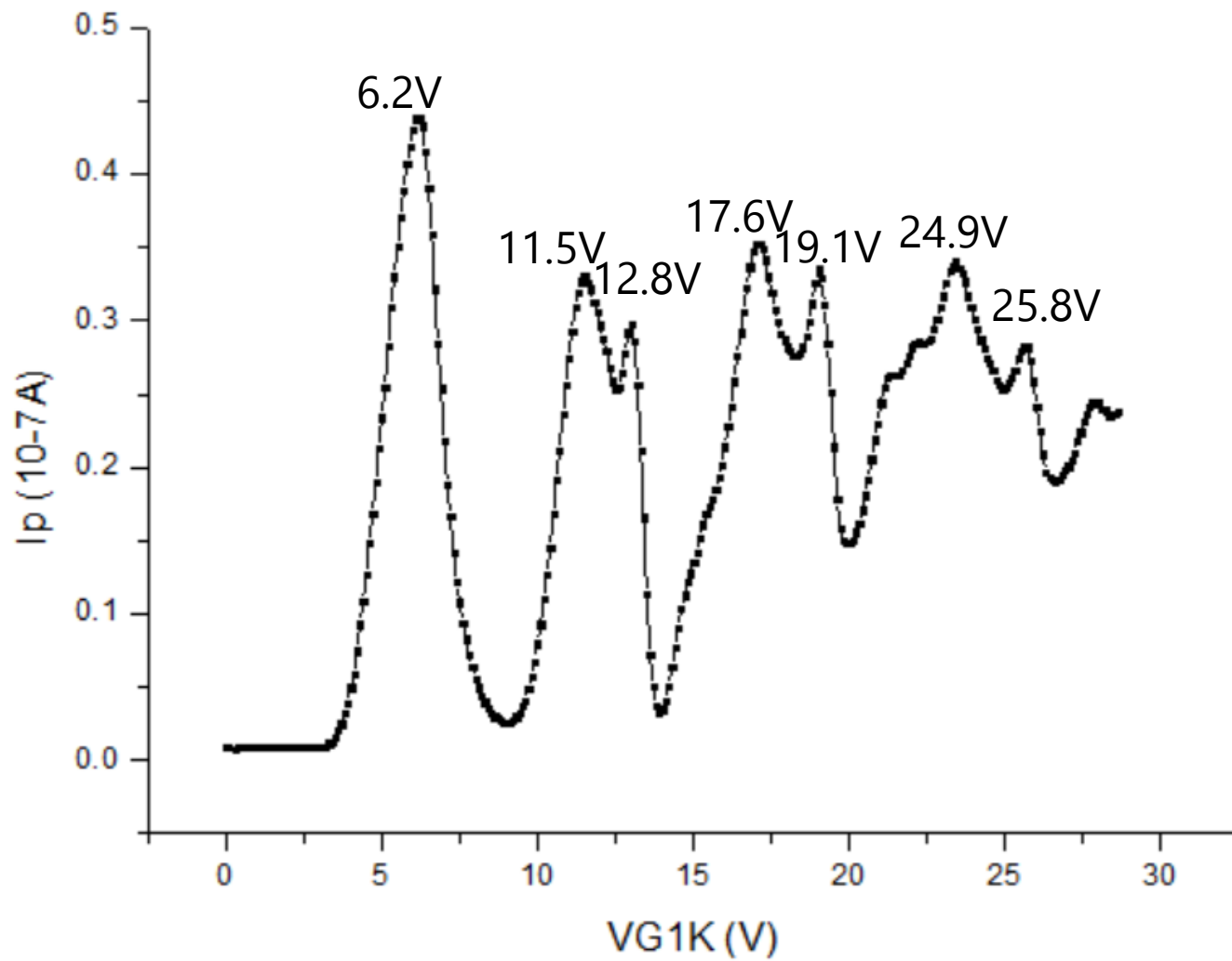
补偿电压 $V_{G1G2} \uparrow \rightarrow$ 电子碰撞时的动能 $\uparrow \rightarrow$ 足够能量到极板的电子数 $\uparrow$

电子提前获得足够能量发生非弹碰撞  
 $\rightarrow$ 峰左移  
[改变了电子在碰撞区发生非弹的概率分布]

$T=100^{\circ}C$ ,  $V_F=2.5V$ ,  $V_{G2P}=1.0V$

1

$T=100^{\circ}\text{C}$  ,  $V_F = 2.5\text{V}$  ,  $V_{G1G2} = 0.2\text{V}$  ,  $V_{G2P} = 1.0\text{V}$  -·- Ip



# 测量值与理论值之间的关系

$$V_{A0} = V_E(6.2) - 5.11 = 1.1V$$

$$E_i = e(V_{Ai} - V_{A0})V$$

- 减去 $V_{A0}$ ：排除初始热发射速度、空间电荷区、正负极接触电压、补偿电压和减速电压等因素对“峰”的位置的影响。

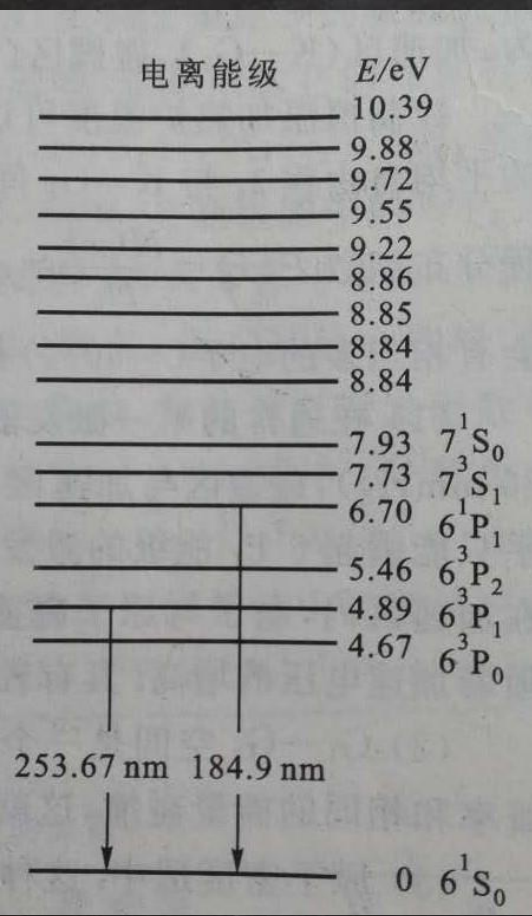
峰位序号	1	2	3	4	5	6	7
$V_{G1K}/V$	6.2	11.5	12.8	17.6	19.1	24.9	25.8

$6^3P_0: 4.67V$ ;  $6^3P_1: 4.89V$ ;  $6^3P_2: 5.46V$ ;  $6^1P_1: 6.70V$ ;

亚稳能级，  
激发截面小

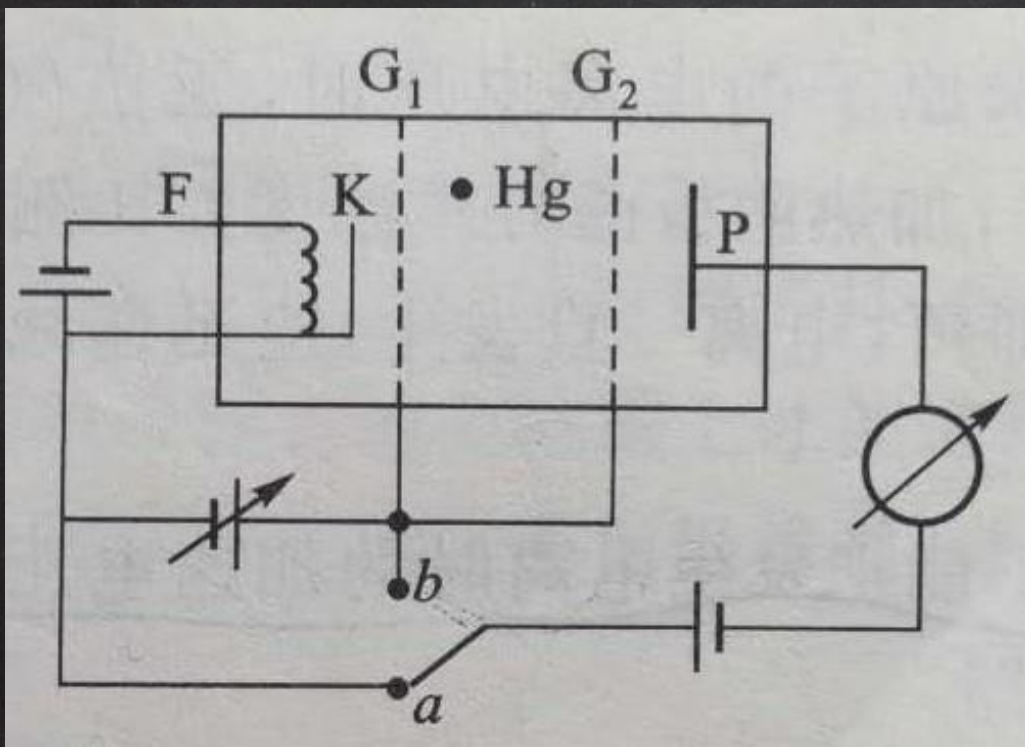
# 测量值与理论值之间的关系

$6^3P_0: 4.67V;$      $6^3P_1: 4.89V;$   
 $6^3P_2: 5.46V;$      $6^1P_1: 6.70V;$



峰位序号	测量值 $E_i/eV$	组合方式	理论值 $E'_i/eV$	绝对误差 $(E_i - E'_i)/eV$
1	5.11	$6^3P_1$	4.89	+0.22
2	10.41	$6^3P_1 + 6^3P_2$	10.35	+0.06
3	11.71	$6^3P_1 + 6^1P_1$	11.59	+0.12
4	16.51	$2 \times 6^3P_1 + 6^1P_1$	16.48	+0.03
5	18.01	$6^3P_1 + 2 \times 6^1P_1$	18.29	-0.28
6	23.81	$6^3P_1 + 6^3P_2 + 2 \times 6^1P_1$	23.75	+0.06
7	24.71	$6^3P_1 + 3 \times 6^1P_1$	24.99	-0.28

# 测量汞原子的电离电压



测量汞原子电离电压的电路

Hg原子的电离能  $>$  第一激发能  
→ 电子具有足够的能量将Hg原子电离之前，就能够将Hg原子激发到第一激发态

→ 原子自发辐射回到基态，辐射出来的光子打到板极P上，激发出光电子，产生板极电流。

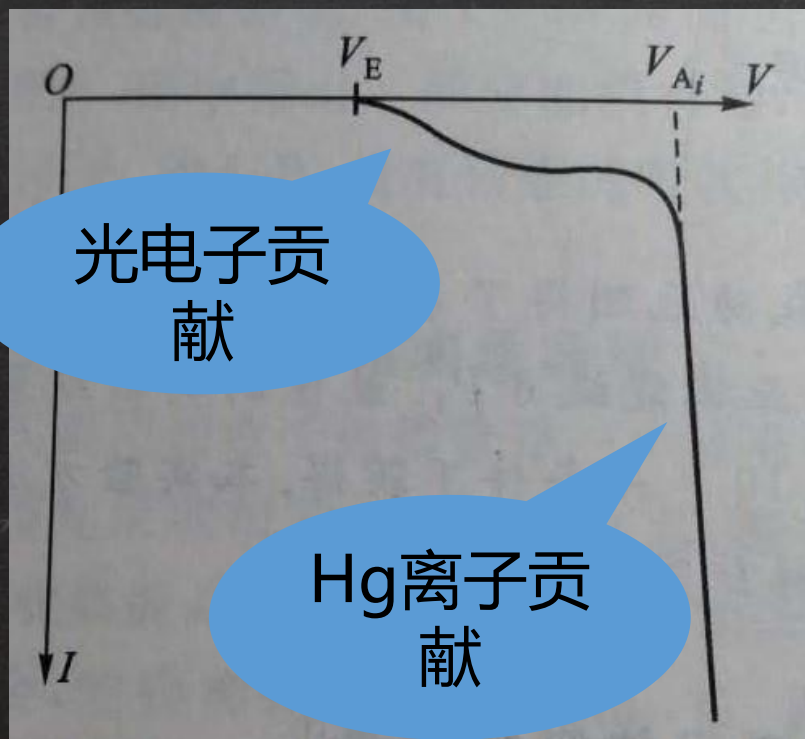
排除热电子导电对板极电流 $I_P$ 的影响，要求板极P电势低于阴极K，这样电子无法到达板极P

→  $I_P - V_{G1K}$  曲线

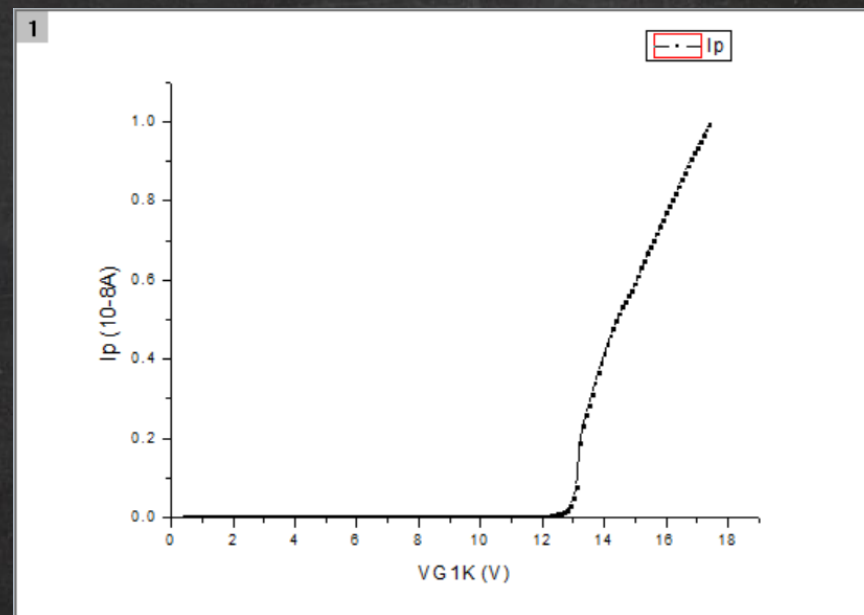
# 测量汞原子的电离电压

- 开关置于a时，板极电流为 $10^{-8}$ 档，极性为“+”
- $T=80^{\circ}\text{C}$ ， $V_F = 2.5\text{V}$ ， $V_{G2P} = 3.0\text{V}$

## 理论图

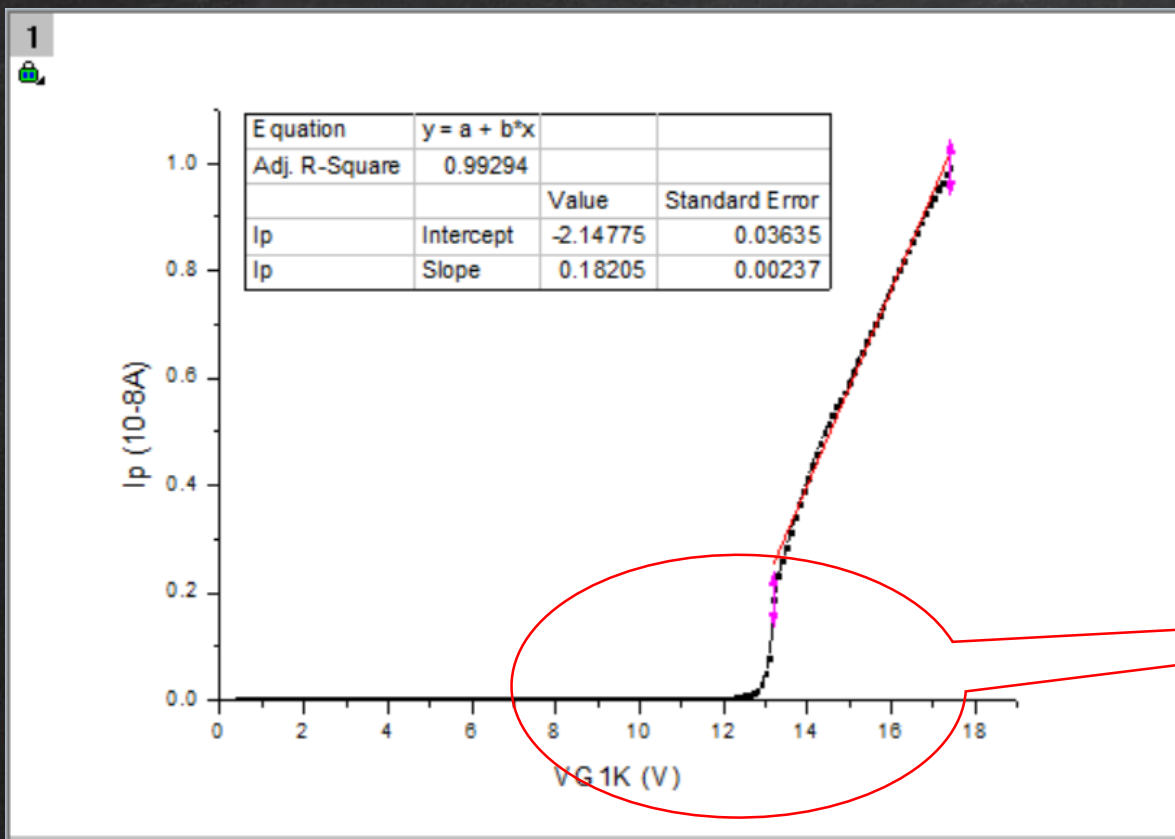


## 测量图



# 测量汞原子的电离电压

Hg原子被电离时处于基态还是激发态？



由Hg离子导电部分的反向延长线

$$y = (-2.148 \pm 0.036) + (0.182 \pm 0.002)x$$

利用第一激发能的测量值修正电离电压  $E_I$

$$V_{A0} = V_E (5.11V) - 4.89 = 0.22V$$

$$E_I = V_{A1} - V_{A0} = \frac{2.148}{0.182} - 0.22 = 11.58V$$

测量Hg电离电压  $I_P \sim V_{G1K}$  曲线





# 实验结论



- [1] 实验中采用“控制变量”法，对各参数对汞原子的第一激发能曲线和较高能级曲线的影响作了定性分析，并确定了最佳实验参数。
- [2] 计算出汞原子的第一激发电位为 $(5.11 \pm 0.02)V$ ，相对误差为4.5%。
- [3] 计算出较高能级的可能组合形式。
- [4] 计算出汞原子的电离电压为11.58V。

## 参考文献

- [1] 戴道宣, 戴乐山. 近代物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 55—77
- [2] 王梅生. 弗兰克—赫兹实验中的峰间距问题. 物理实验, 2001.5: 40-43
- [3] 潘玉莲, 王煜, 潘振元. 弗兰克—赫兹实验中Hg的第一激发电位的测量[J]. 物理实验, 1994.15(4):154-156
- [4] 陈廷侠, 冯绍亮, 刘保福. 温度对夫兰克—赫兹实验的影响. 2004.8(3):127-130
- [5] 安可, 高松松, 林上金. 如何选择弗兰克-赫兹实验的工作参数. 大学物理实验. 2014.12(6): 34-36
- [6] 刘复汉. 汞原子较高激发能级测量的研究[J]. 物理实验, 1985. 5(6): 209-212
- [7] 李斌, 赵维义, 谭鹏. 弗兰克—赫兹实验现象的理论分析[J]. 佛山科学技术学院学报, 2003. 21(3): 17-20





感谢聆听！



感谢姚红英老师在实验中的用心指导