



3.7 弗兰克-赫兹 (F-H) 实验



1914年，德国科学家弗兰克和他的助手赫兹采用慢电子与稀薄气体中原子碰撞的方法(与光谱研究相独立)，简单而巧妙地直接证实了原子能级的存在，并且实现了对原子的可控激发。1925年，由于他二人的卓越贡献，他们获得了当年的诺贝尔物理学奖。



尼尔斯-玻尔简介



尼尔斯-玻尔 (1885-1962)

尼尔斯·亨利克·戴维·玻尔
(Niels Henrik David Bohr,
1885年10月7日 ~ 1962年11月18
日))，丹麦物理学家。他通过
引入量子化条件，提出了**玻尔模
型**来解释氢原子光谱，提出**互补
原理**和**哥本哈根诠释**来解释量子
力学，对二十世纪物理学的发展
有深远的影响。



实验简介

玻尔提出的原子理论有两个基本假设：

(1) 定态假设

原子只能较长久地停留在一些稳定状态中，其中每一状态对应一定的能量值 E_n ($n=1,2,3,\dots$)。这些数值是彼此分立的，不连续的。

(2) 频率定则

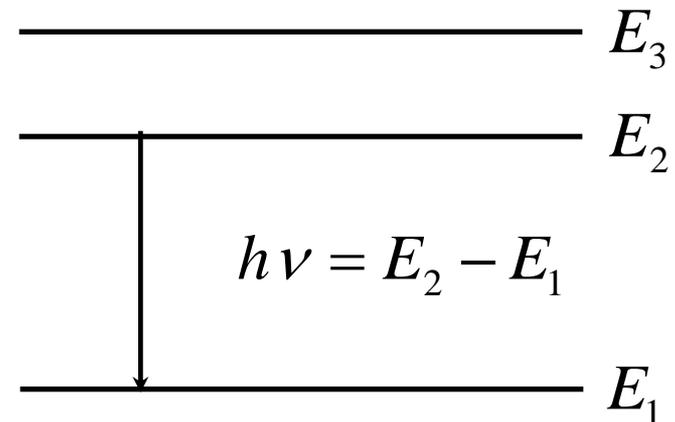
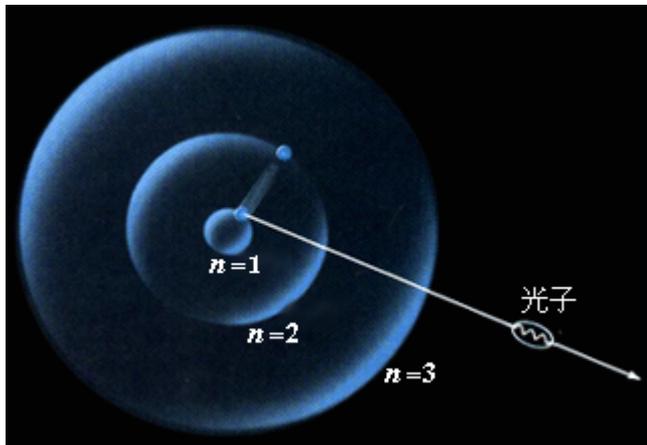
当原子从一个稳定的状态过渡到另一个稳定状态时，就吸收或放出一定频率的电磁波。

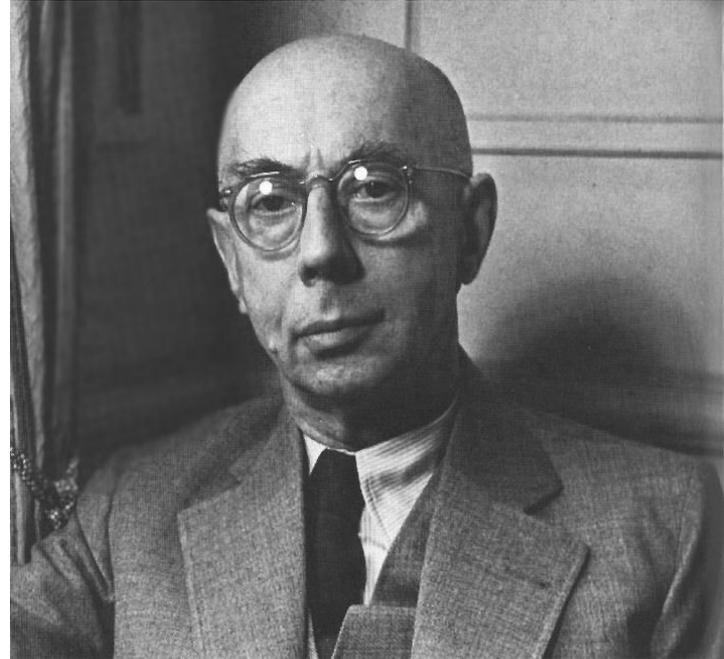


如果用 E_m 和 E_n 代表有关二定态的能量，辐射的频率决定于如下关系：

$$h\nu = E_m - E_n$$

式中 h 为普朗克常量。





通过测量电子与汞原子碰撞前后能量的改变，简单而巧妙地直接证实了汞原子能级的存在，并且实现了对原子的可控激发，这一实验被称为弗兰克-赫兹实验。



电子与原子发生碰撞过程

设 E_2 和 E_1 分别为原子的第一激发态和基态能量。
初动能为零的电子在电位差 U_0 的电场作用下获得能量 eU_0 ,

如果
$$eU_0 = \frac{1}{2} m_e v^2 = E_2 - E_1$$

那么当电子与原子发生碰撞时，原子将从电子攫取能量而从基态跃迁到第一激发态。相应的电位差 U_0 就称为原子的第一激发电位。

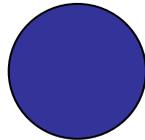


当电子的加速电压 $U <$ 原子第一激发电位 U_0
电子与原子碰撞，没有发生动能与内能的交换。
为“弹性碰撞”

电子：动能 eU



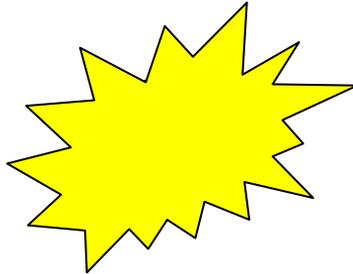
原子



电子碰撞前后速率不变



当电子的加速电压 $U \geq$ 原子第一激发电势 U_0
电子与原子碰撞发生动能与内能的交换为“非弹性碰撞”



电子碰撞后速度变慢，原子会辐射光子



实验目的

1. 了解弗兰克-赫兹实验的原理和方法。
2. 通过测定氩原子的第一激发电位，加深对原子能级的理解。



实验仪器

1. F-H(弗兰克-赫兹)管;
2. MCFH20A型F-H实验仪;
3. GDM-8145型台式数字电表;

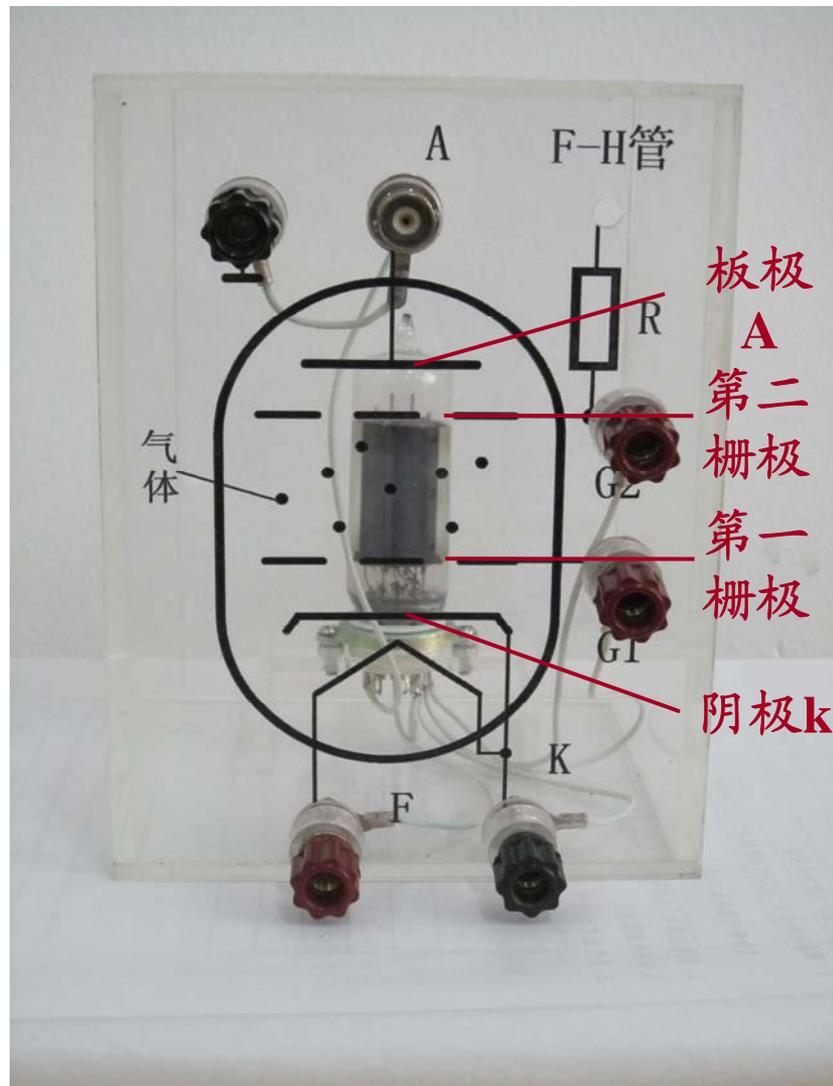


F-H(弗兰克-赫兹)管

弗兰克-赫兹管是四级旁热式电子管。

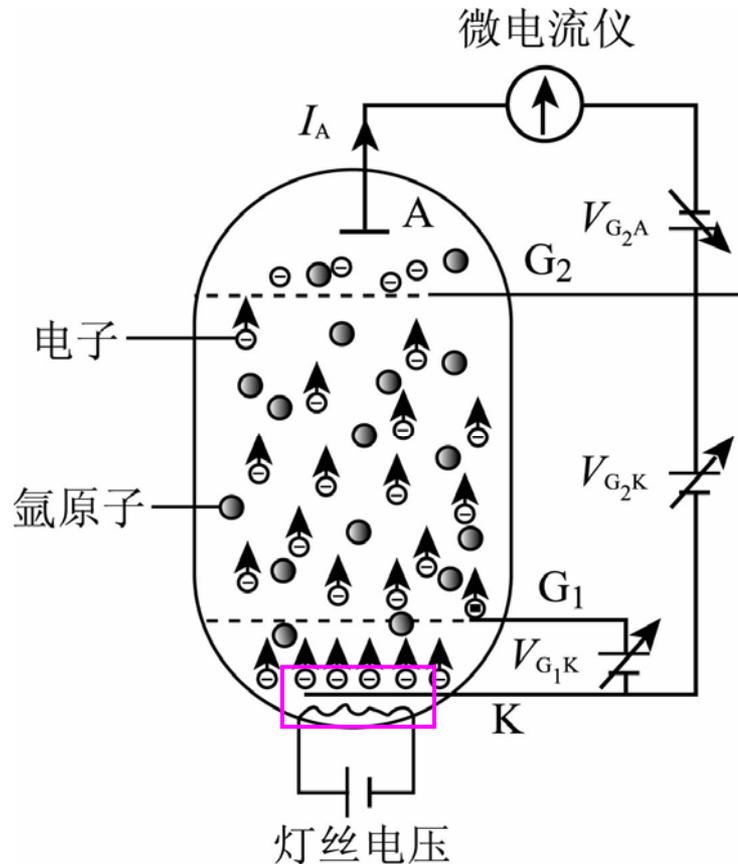
四级是指F-H管由四部分组成:

1. 阴极k;
2. 第一加速栅极 G_1 ;
3. 二加速栅极 G_2 ;
4. 板极A。





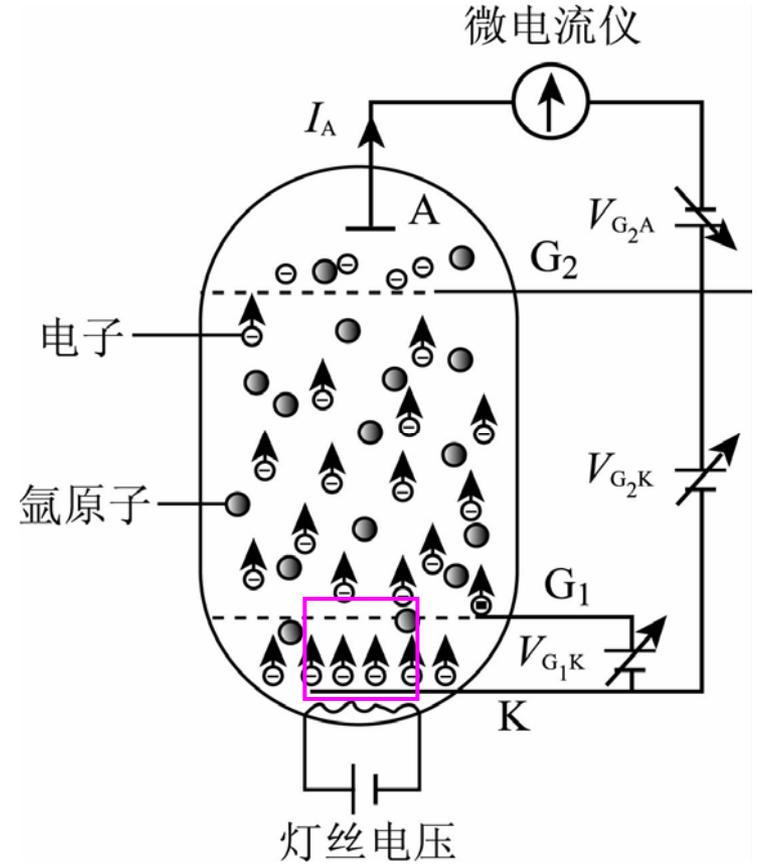
接线柱



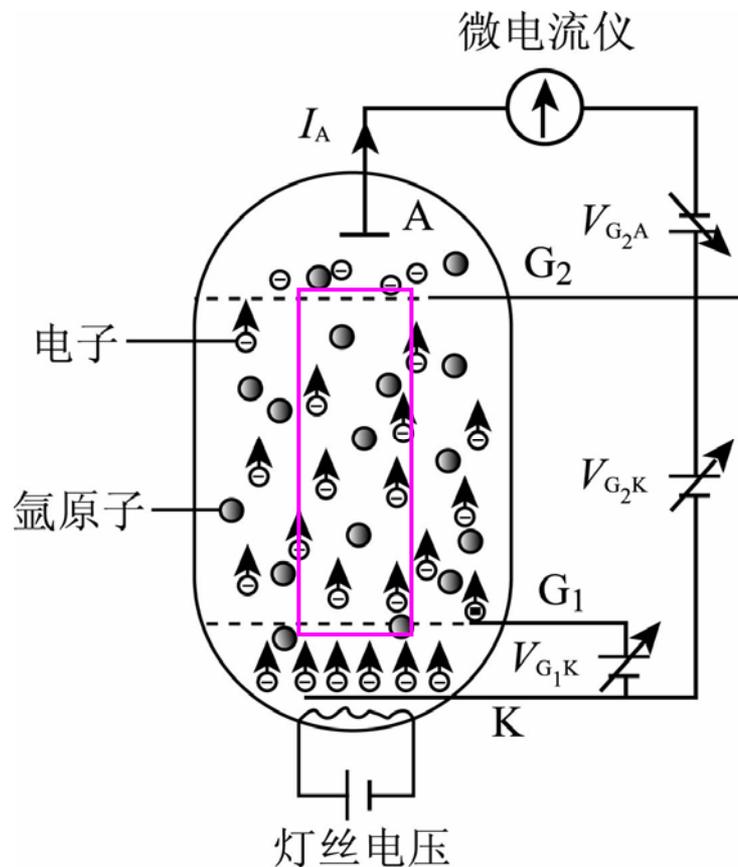
阴极K被灯丝加热产生热发射，热发射的电子一般初速度很小，称为慢电子，其发射热电子的多少可由灯丝电压 V_F 控制。



接线柱



第一栅极 G_1 加正向电压 V_{G_1K} ，用于消除热电子在阴极附近的堆积，以提高阴极热发射效率。第一栅极电压大小由 V_{G_1} 旋钮调节。

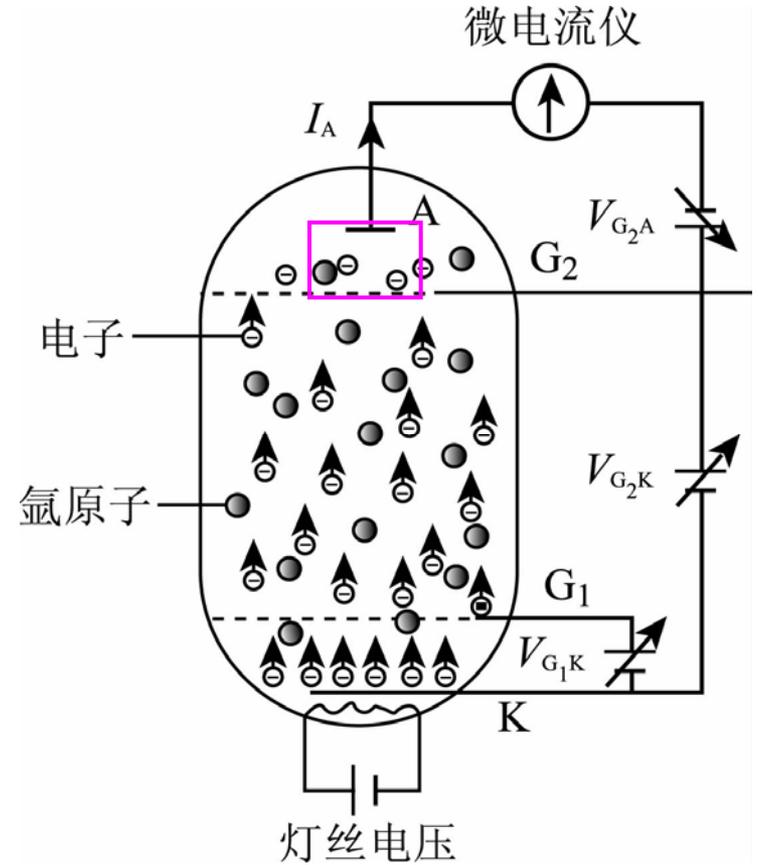


第二栅极 G_2 加可调正向电压 V_{G_2K} (又称扫描电压), 形成加速电场, 使热电子被加速而获得动能 E_k 。“自动”采样时该电压大小由仪器自动控制。

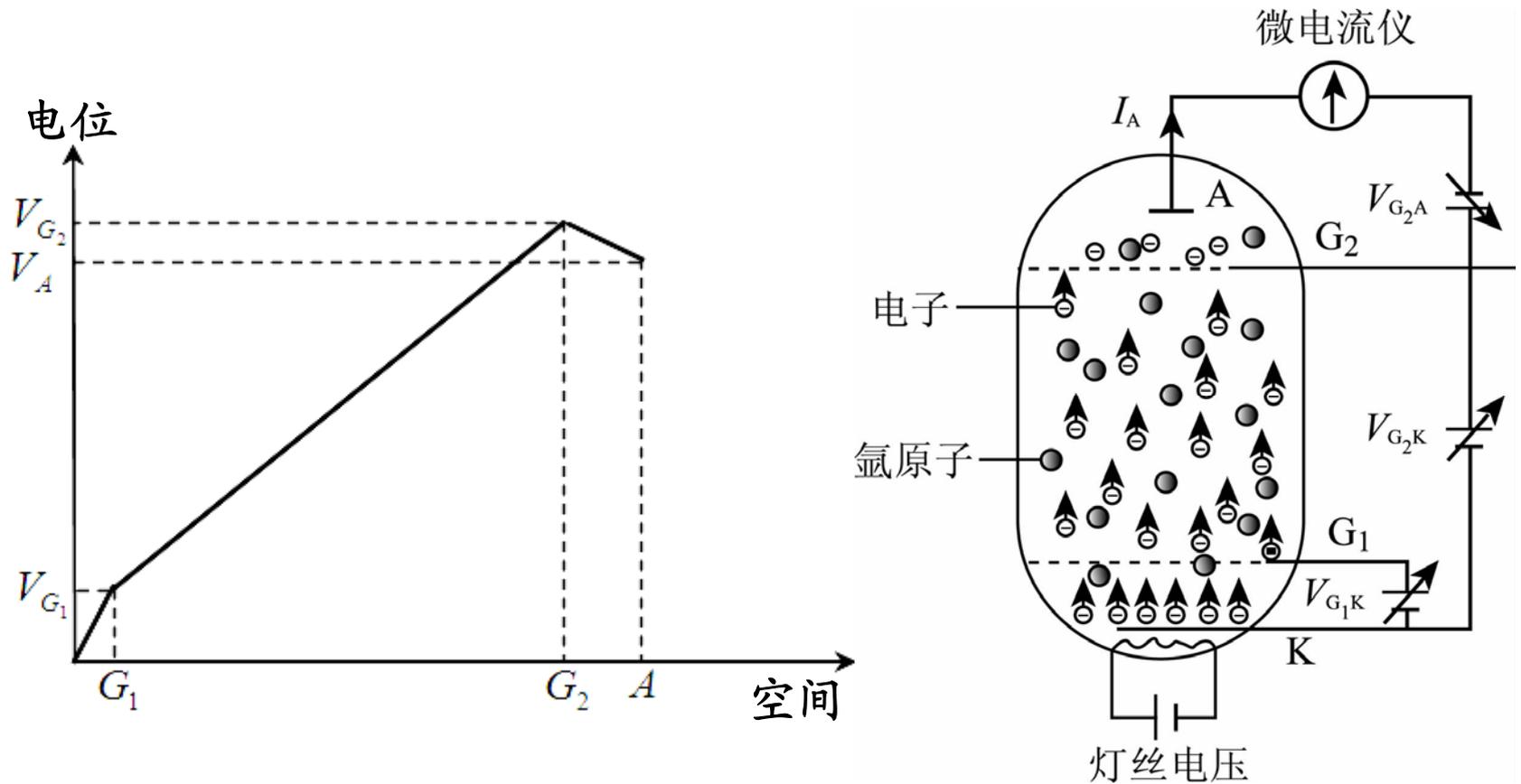


接线柱

V_A 调节



板极A和 G_2 加拒斥电压（反向电压） V_{G_2A} ，形成拒斥电场，使得此区间的电子只有能量大于 eV_{G_2A} 的才能达到板极A形成板极电流 I_A 。



F-H管内空间电位分布如左图所示。



MCFH20A型F-H实验仪



菜单介绍



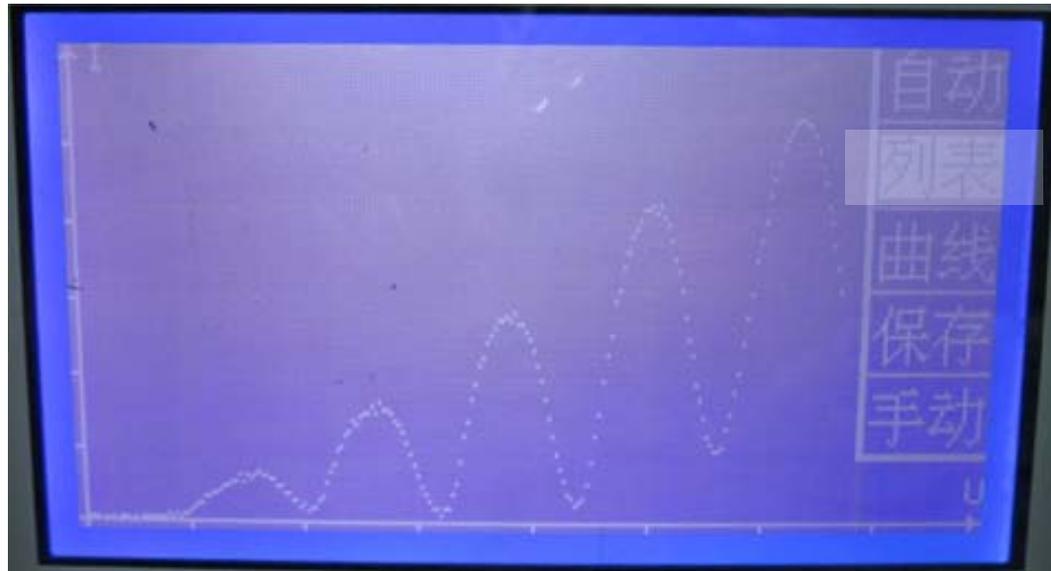
开机后LCD显示器右侧显示主操作菜单，通过“ Δ 、 ∇ ”光标移动键，使光标移动到所选项目，按“Enter”键进入，仪器执行所选功能，按“Quit”键退出。



“自动”表示仪器自动采样。即仪器一面采集板极
 电流值，一面逐渐升高扫描电压，完成采样后仪器
 “自动采样”结束后，仪器会自动显示拟合的F-H
 自动进行数据处理，存储数据并自动显示拟合的F-H
 曲线，也可返回主菜单，光标选中“曲线”选项查看
 曲线，计算并记录曲线各极值点数值。此过程大约
 需要几十秒钟。



“自动采样”所得的数据数据仪器自动存储，可在主菜单“列表”选项中查看。





需要记录

MIN		MAX	
Ua (V)	I (nA)	Ua (V)	I (nA)
0.014	0.000	0.014	0.000
0.028	0.000	0.028	0.000
0.042	0.000	0.042	0.000
0.056	0.000	0.056	0.000
0.070	0.000	0.070	0.000
0.084	0.000	0.084	0.000
0.098	0.000	0.098	0.000
0.112	0.000	0.112	0.000
0.126	0.000	0.126	0.000
0.140	0.000	0.140	0.000
0.154	0.000	0.154	0.000
0.168	0.000	0.168	0.000
0.182	0.000	0.182	0.000
0.196	0.000	0.196	0.000
0.210	0.000	0.210	0.000
0.224	0.000	0.224	0.000
0.238	0.000	0.238	0.000
0.252	0.000	0.252	0.000
0.266	0.000	0.266	0.000
0.280	0.000	0.280	0.000
0.294	0.000	0.294	0.000
0.308	0.000	0.308	0.000
0.322	0.000	0.322	0.000
0.336	0.000	0.336	0.000
0.350	0.000	0.350	0.000
0.364	0.000	0.364	0.000
0.378	0.000	0.378	0.000
0.392	0.000	0.392	0.000
0.406	0.000	0.406	0.000
0.420	0.000	0.420	0.000
0.434	0.000	0.434	0.000
0.448	0.000	0.448	0.000
0.462	0.000	0.462	0.000
0.476	0.000	0.476	0.000
0.490	0.000	0.490	0.000
0.504	0.000	0.504	0.000
0.518	0.000	0.518	0.000
0.532	0.000	0.532	0.000
0.546	0.000	0.546	0.000
0.560	0.000	0.560	0.000
0.574	0.000	0.574	0.000
0.588	0.000	0.588	0.000
0.602	0.000	0.602	0.000
0.616	0.000	0.616	0.000
0.630	0.000	0.630	0.000
0.644	0.000	0.644	0.000
0.658	0.000	0.658	0.000
0.672	0.000	0.672	0.000
0.686	0.000	0.686	0.000
0.700	0.000	0.700	0.000
0.714	0.000	0.714	0.000
0.728	0.000	0.728	0.000
0.742	0.000	0.742	0.000
0.756	0.000	0.756	0.000
0.770	0.000	0.770	0.000
0.784	0.000	0.784	0.000
0.798	0.000	0.798	0.000
0.812	0.000	0.812	0.000
0.826	0.000	0.826	0.000
0.840	0.000	0.840	0.000
0.854	0.000	0.854	0.000
0.868	0.000	0.868	0.000
0.882	0.000	0.882	0.000
0.896	0.000	0.896	0.000
0.910	0.000	0.910	0.000
0.924	0.000	0.924	0.000
0.938	0.000	0.938	0.000
0.952	0.000	0.952	0.000
0.966	0.000	0.966	0.000
0.980	0.000	0.980	0.000
0.994	0.000	0.994	0.000
1.008	0.000	1.008	0.000
1.022	0.000	1.022	0.000
1.036	0.000	1.036	0.000
1.050	0.000	1.050	0.000
1.064	0.000	1.064	0.000
1.078	0.000	1.078	0.000
1.092	0.000	1.092	0.000
1.106	0.000	1.106	0.000
1.120	0.000	1.120	0.000
1.134	0.000	1.134	0.000
1.148	0.000	1.148	0.000
1.162	0.000	1.162	0.000
1.176	0.000	1.176	0.000
1.190	0.000	1.190	0.000
1.204	0.000	1.204	0.000
1.218	0.000	1.218	0.000
1.232	0.000	1.232	0.000
1.246	0.000	1.246	0.000
1.260	0.000	1.260	0.000
1.274	0.000	1.274	0.000
1.288	0.000	1.288	0.000
1.302	0.000	1.302	0.000
1.316	0.000	1.316	0.000
1.330	0.000	1.330	0.000
1.344	0.000	1.344	0.000
1.358	0.000	1.358	0.000
1.372	0.000	1.372	0.000
1.386	0.000	1.386	0.000
1.400	0.000	1.400	0.000
1.414	0.000	1.414	0.000
1.428	0.000	1.428	0.000
1.442	0.000	1.442	0.000
1.456	0.000	1.456	0.000
1.470	0.000	1.470	0.000
1.484	0.000	1.484	0.000
1.498	0.000	1.498	0.000
1.512	0.000	1.512	0.000
1.526	0.000	1.526	0.000
1.540	0.000	1.540	0.000
1.554	0.000	1.554	0.000
1.568	0.000	1.568	0.000
1.582	0.000	1.582	0.000
1.596	0.000	1.596	0.000
1.610	0.000	1.610	0.000
1.624	0.000	1.624	0.000
1.638	0.000	1.638	0.000
1.652	0.000	1.652	0.000
1.666	0.000	1.666	0.000
1.680	0.000	1.680	0.000
1.694	0.000	1.694	0.000
1.708	0.000	1.708	0.000
1.722	0.000	1.722	0.000
1.736	0.000	1.736	0.000
1.750	0.000	1.750	0.000
1.764	0.000	1.764	0.000
1.778	0.000	1.778	0.000
1.792	0.000	1.792	0.000
1.806	0.000	1.806	0.000
1.820	0.000	1.820	0.000
1.834	0.000	1.834	0.000
1.848	0.000	1.848	0.000
1.862	0.000	1.862	0.000
1.876	0.000	1.876	0.000
1.890	0.000	1.890	0.000
1.904	0.000	1.904	0.000
1.918	0.000	1.918	0.000
1.932	0.000	1.932	0.000
1.946	0.000	1.946	0.000
1.960	0.000	1.960	0.000
1.974	0.000	1.974	0.000
1.988	0.000	1.988	0.000
2.002	0.000	2.002	0.000

表格中的数据是以1.0V为间隔与F-H曲线上各点一一对应，通过“△、▽”键翻页。

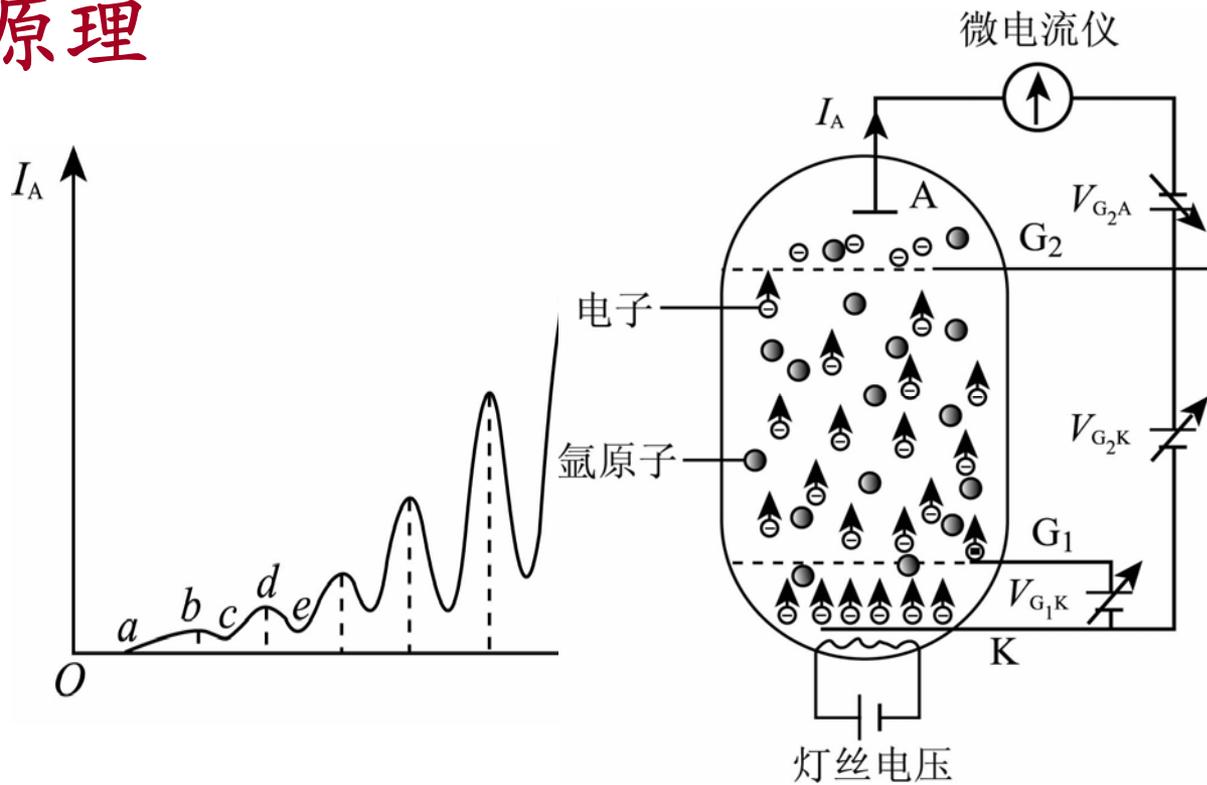
翻页至**最后一页**时，会看到供参考的曲线各极大值和极小值的数据表。



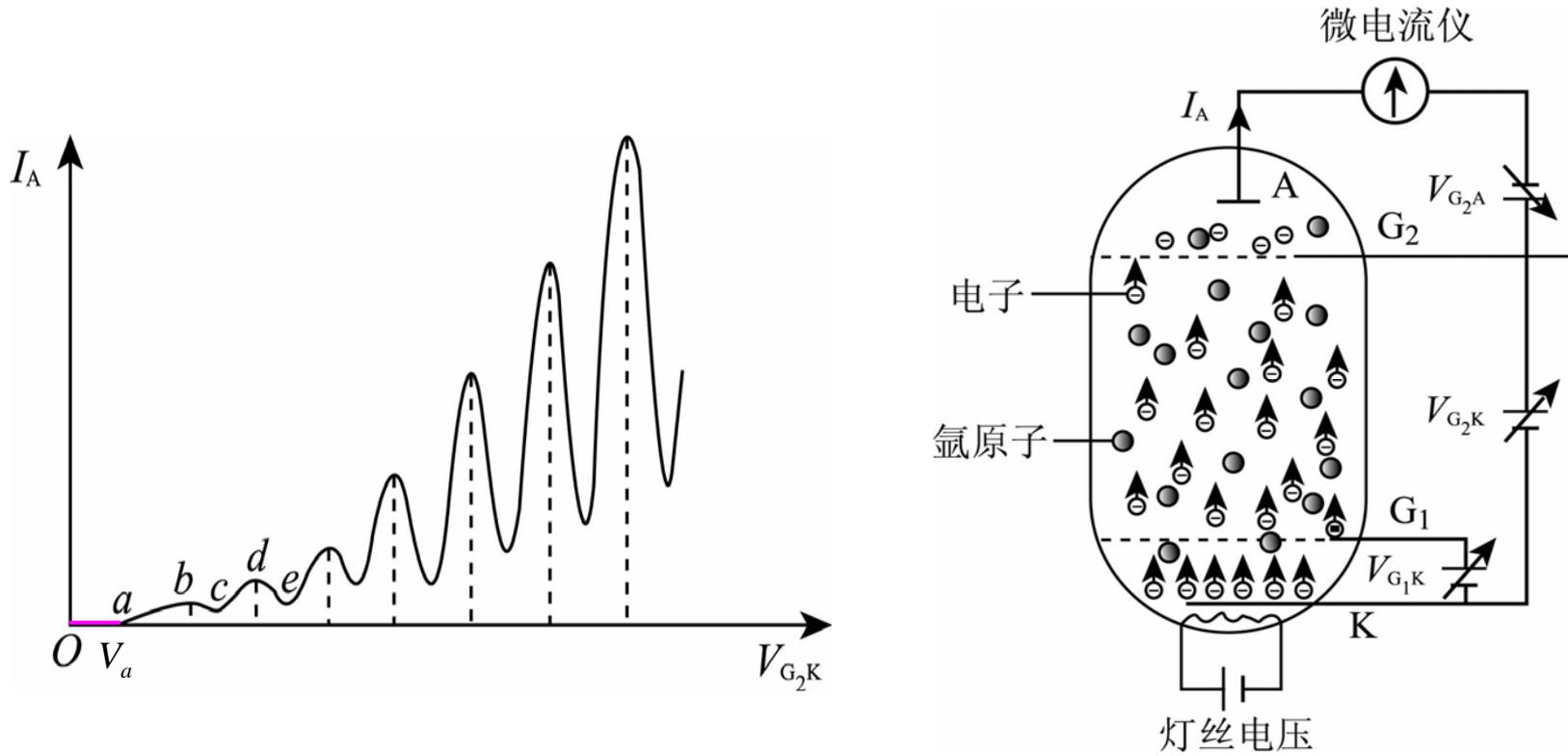
“手动”表示手动采样。即通过旋动“手动调节”旋钮逐步改变扫描电压 V_{G_2K} ， V_{G_2K} 的数值用数字万用表检测。LCD显示相应的 I_A 值但不保存数据，需边调节边记录。



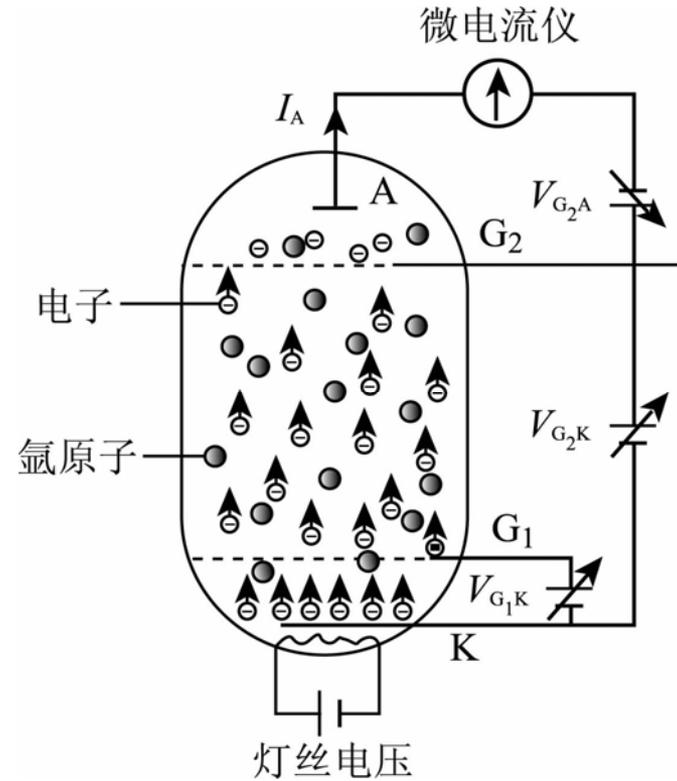
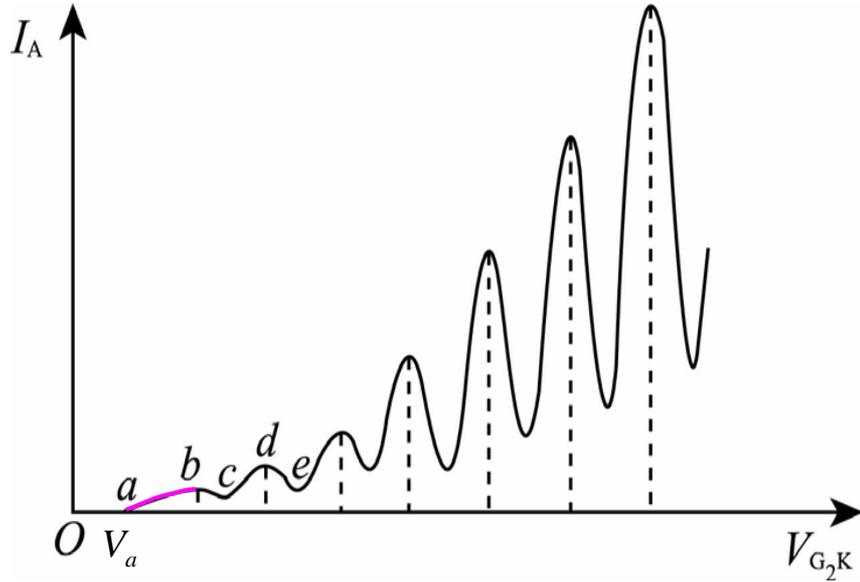
实验测量原理



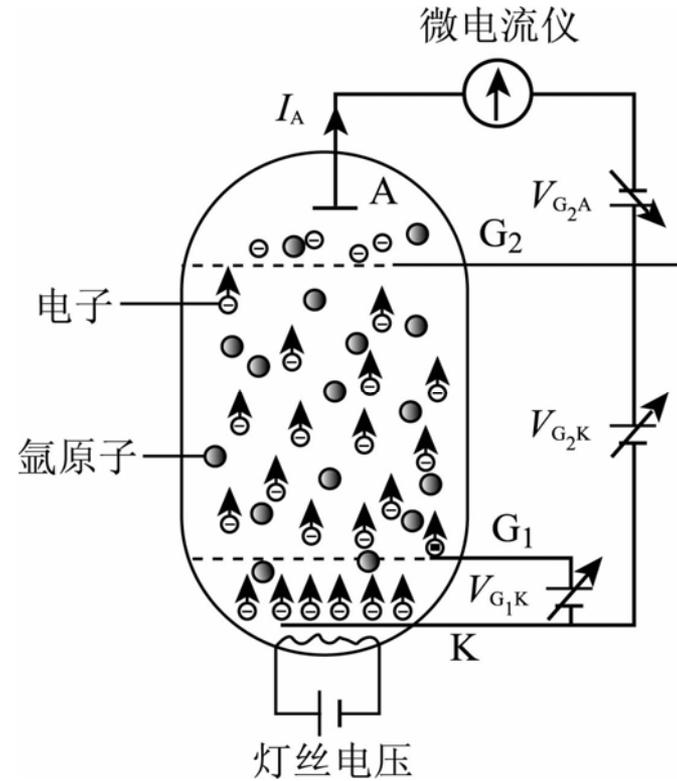
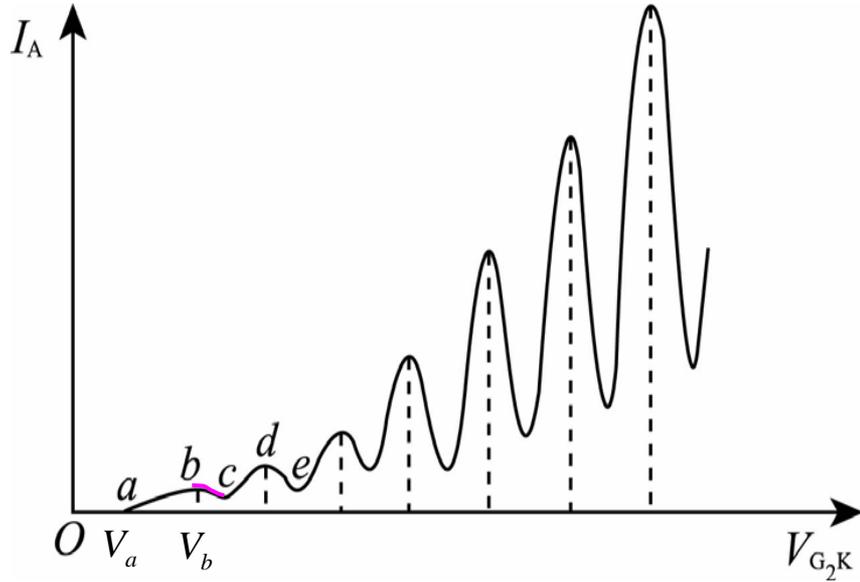
实验时使栅极加速电压 V_{G_2K} 从零伏逐渐增加，板极电流如上图所示变化（**F-H曲线**），电流曲线反映出氩原子与慢电子间通过碰撞进行交换的图像。



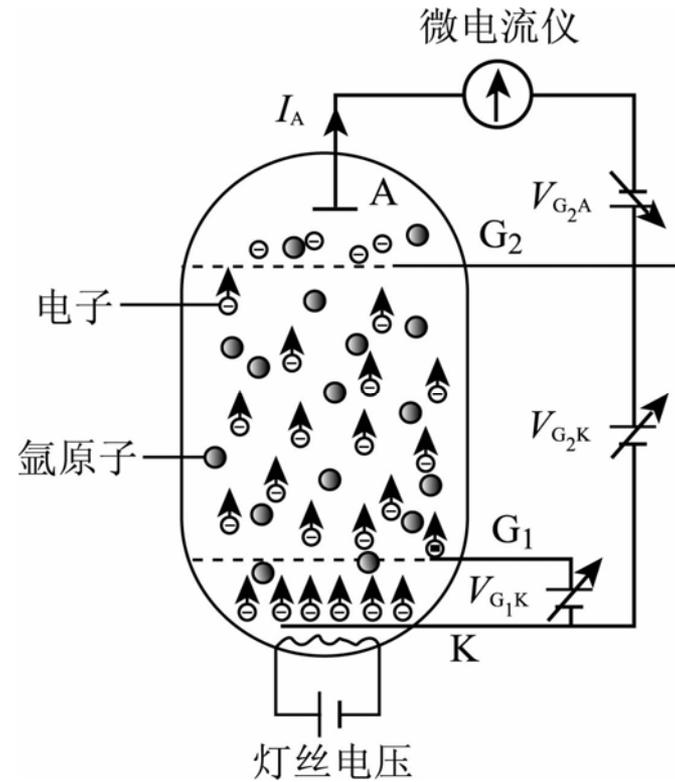
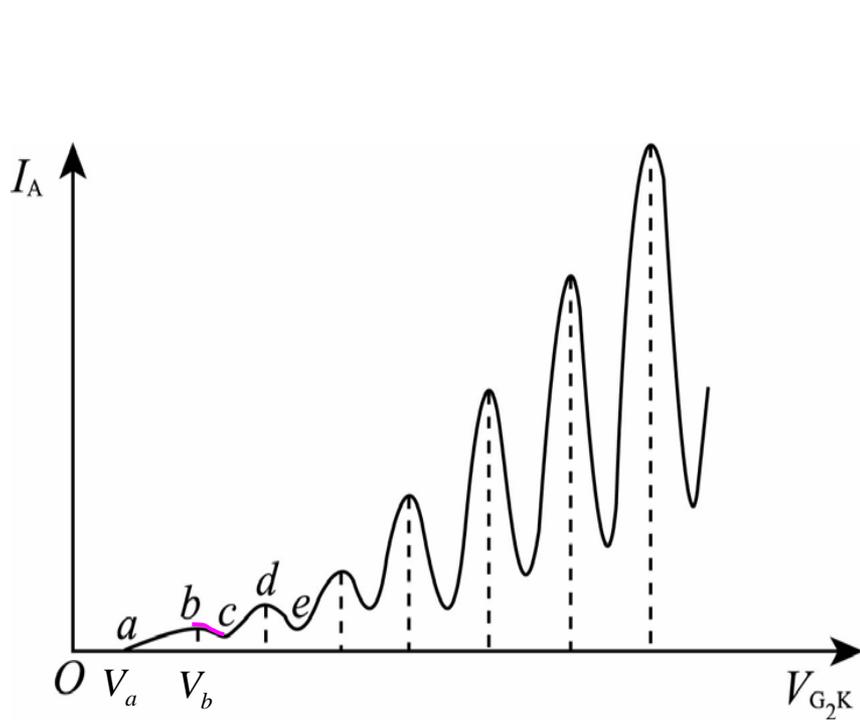
Oa 段：反映了F-H管栅极 G_2 和阴极 K 之间存在着负的接触电位 ($-V_a$)。当 $V_{G_2K} < V_a$ 时，加速栅极电压对热电子没有加速作用，**不会形成板极电流。**



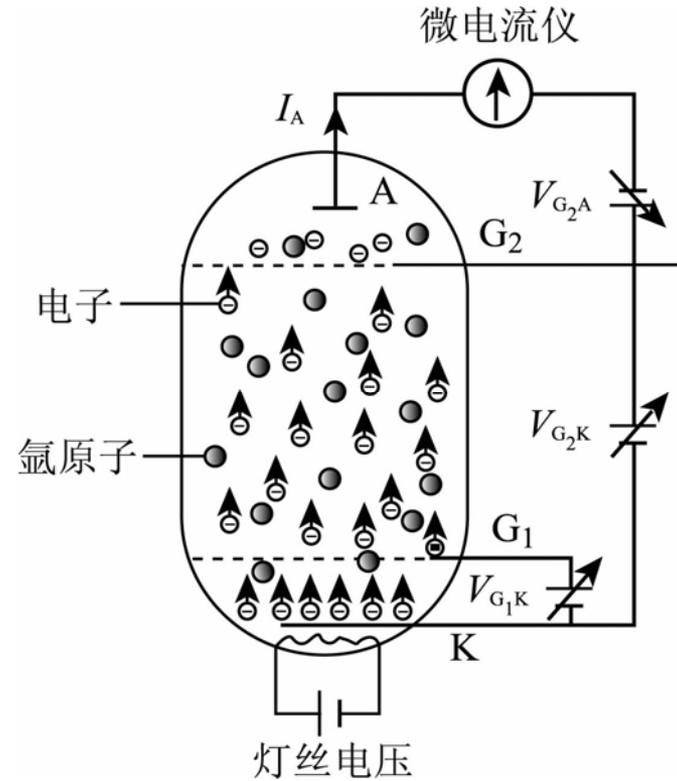
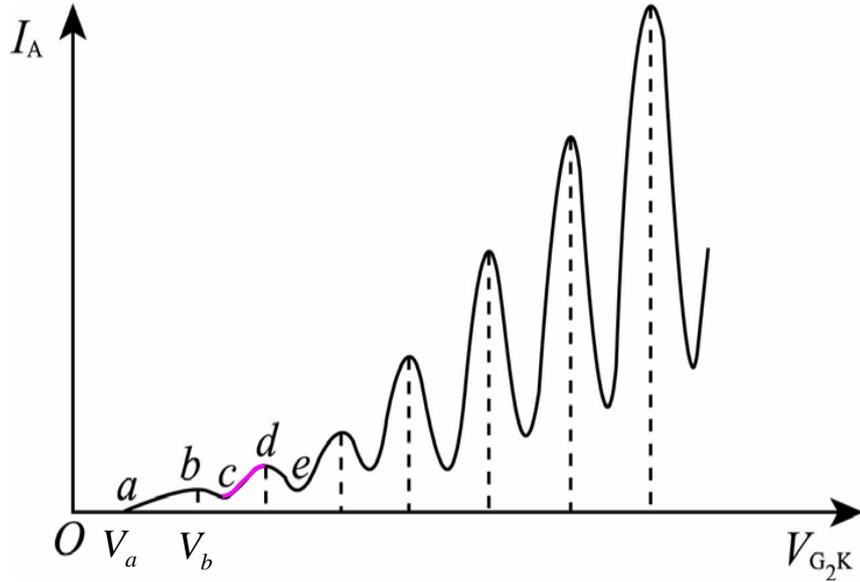
ab段: V_{G_2K} 继续逐渐增大, 热发射电子将获得动能 $e(V_{G_2K} - V_a)$, 由于此时 V_{G_2K} 较小, 在栅极 G_2 附近电子与氩原子发生的是弹性碰撞, 电子动能几乎不会减少, 这样会有电子穿过拒斥场到达板极A。



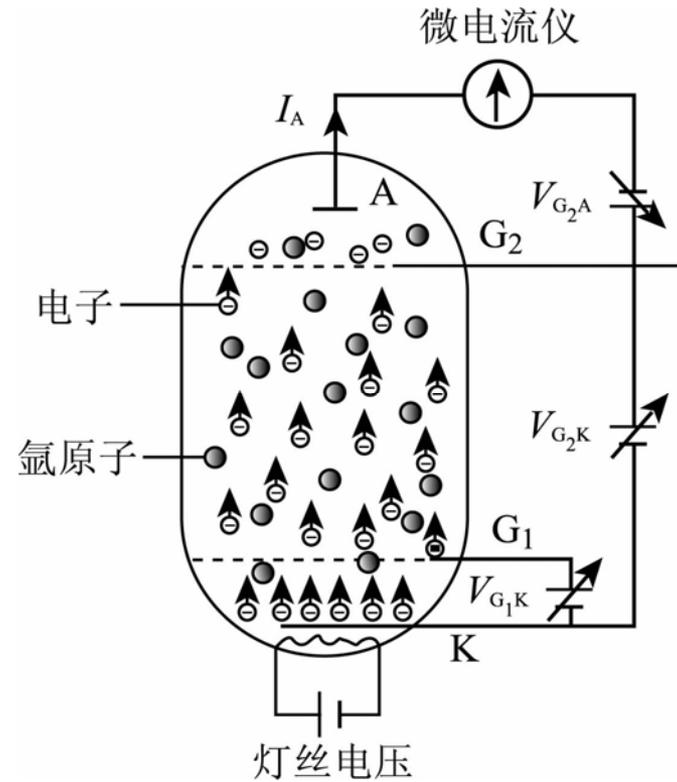
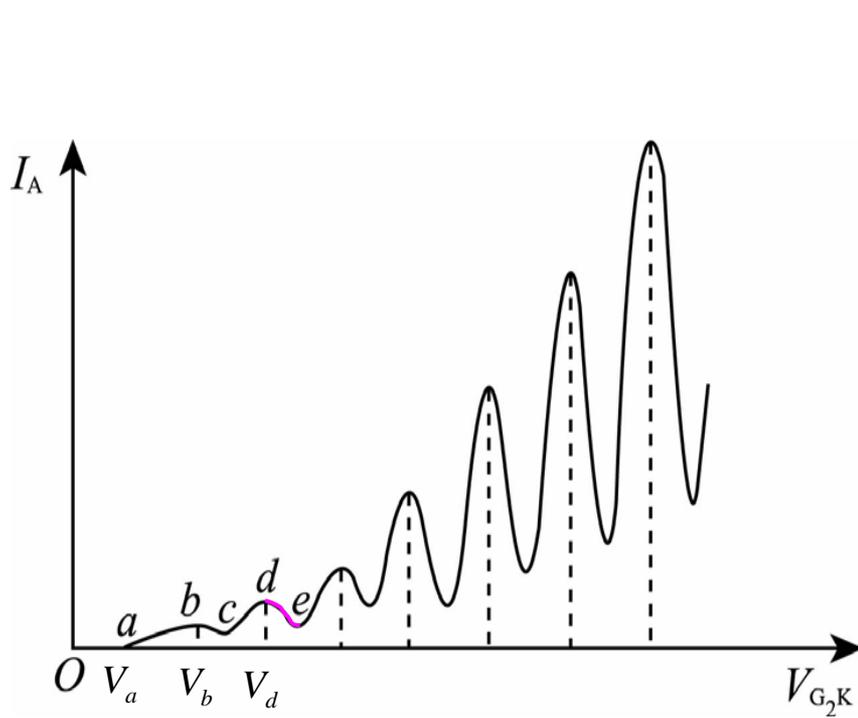
bc段: 当 V_{G_2K} 增大到等于或稍大于 V_b ($V_b = V_a + V_0$) 时, 热发射电子将获得等于或稍大于 eV_0 的加速动能, 如果 $eV_0 = E_2 - E_1$, 在栅极 G_2 附近电子与氩原子发生完全非弹性碰撞, 把 eV_0 的能量交给氩原子。



汞原子获得 eV_0 的能量后从基态被激发到第一激发态 (V_0 称为汞原子的第一激发电位)。而失去能量的电子不能越过拒斥场或者即使越过也不能到达板极A，所以板极电流开始下降。



cd段: V_{G_2K} 继续逐渐增大, 有的电子在与氩原子碰撞后除把 ΔE 的能量交给氩原子外, 留下的能量还能克服拒斥场而达到板极A。这使得到达板极的电子数又开始增多, 板极电流上升形成图中cd段。



de段: 当 V_{G_2K} 增大到等于或稍大于 V_d ($V_d = V_a + 2V_0$) 时, 电子在 **K-G₂** 空间会与氩原子发生两次完全非弹性碰撞而失去 $2eV_0$ 能量, 又造成了第二次板极电流 I_A 的下降形成 **de** 段曲线。



随着加速电压 V_{G_2K} 继续增加，电流曲线变化情况类似的出现。

⋮



各峰值电流对应的 V_{G_2K} 满足

$$V_{G_2K} = V_a + nV_0 \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

即各峰值电流对应的 V_{G_2K} 是 n 的线性函数（各谷值电流对应的加速电压也存在类似的线性关系），其斜率就是氩原子第一激发电位。

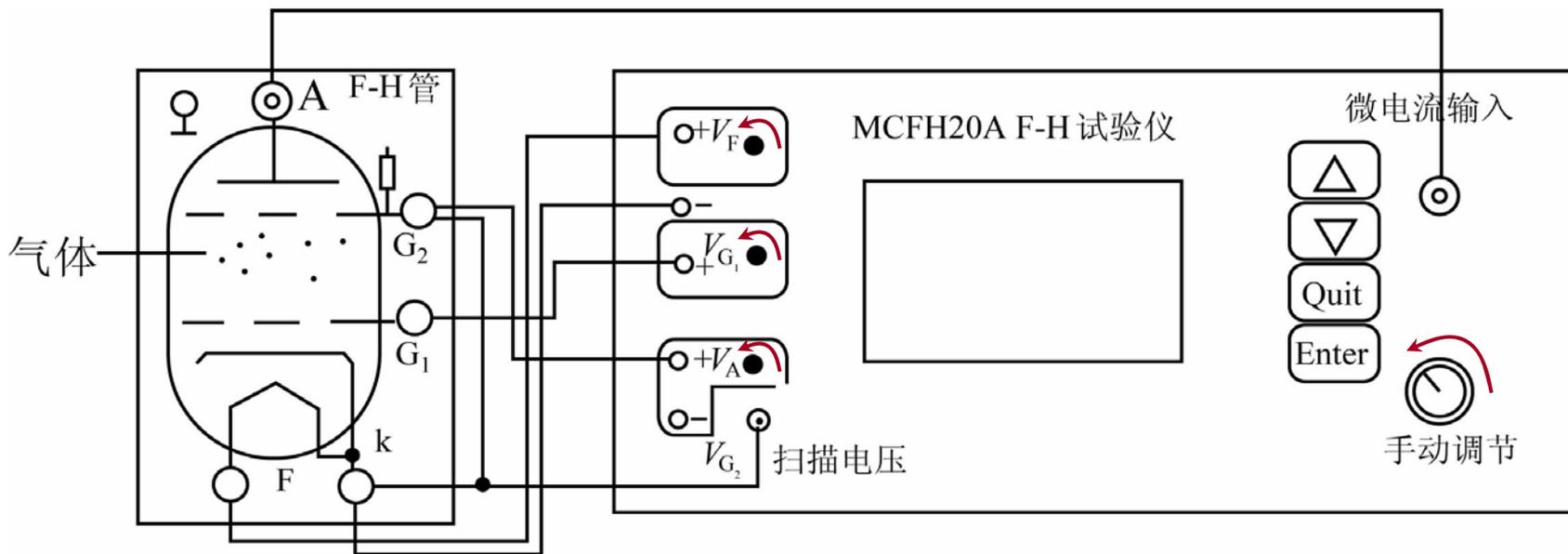
本实验通过测量一系列不同加速电压下的板极电流值，找出6个峰值电流对应的 V_{G_2K} ，把 n 作为自变量，把对应的 V_{G_2K} 作为因变量，通过最小二乘法求出 $V_{G_2K} - n$ 线性函数的斜率就可得到 V_0 。



实验内容与数据处理

1. 自动法测氩原子第一激发电位

(1) 连线



注意：实验前各电源电压调节钮和“手动调节”旋钮**逆**时针旋到底，打开F-H试验仪，预热10min。



(2) 调出有6个峰值出现的光滑清晰的F-H曲线

以表3-12给出的个电源调整范围选定一组 V_F 、 V_{G_1} 和 V_A 数值，

表3-12 各电源电压范围

V_F	V_{G_1}	V_A
2.3 ~ 4.4 V	1.0 ~ 2.5 V	2.0 ~ 10.0 V

选择“自动”模式，仪器采样后观察显示屏，不管LCD是否出现光滑的F-H曲线，都不妨按以下步骤调节3个电源电压以观察它们对F-H曲线的影响



①对于选定的一组 V_F 、 V_A 、 V_{G_1} 数据，保持 V_A 、 V_{G_1} 不变，调节 V_F 观察LCD显示的变化，分析灯丝电压对板极电流的影响。

②把灯丝电压调回到原先选定的数据，保持 V_{G_1} 不变，调节 V_A 观察LCD显示的变化，分析拒斥电压对板极电流的影响。

③再把拒斥电压调回到原先选定的数据，保持 V_F 不变，调节 V_{G_1} 观察LCD显示的变化，分析第一栅极电压对板极电流的影响。



(3) 记录数据

① 在调节出合适的F-H曲线后，按“quit”键退出，进入“列表”选项，调出F-H曲线对应的数据表。

$(V_F = \text{___} \text{V}, V_{G1} = \text{___} \text{V}, V_A = \text{___} \text{V})$

V_{G2K} / V	1	2	3	...	78	79	80
I_A / nA						



② 通过翻页操作，在列表的最后一页找到“Max”列出的各电流峰值所对应的 V_{G_2K} 参考值，记录与自拟表格中。

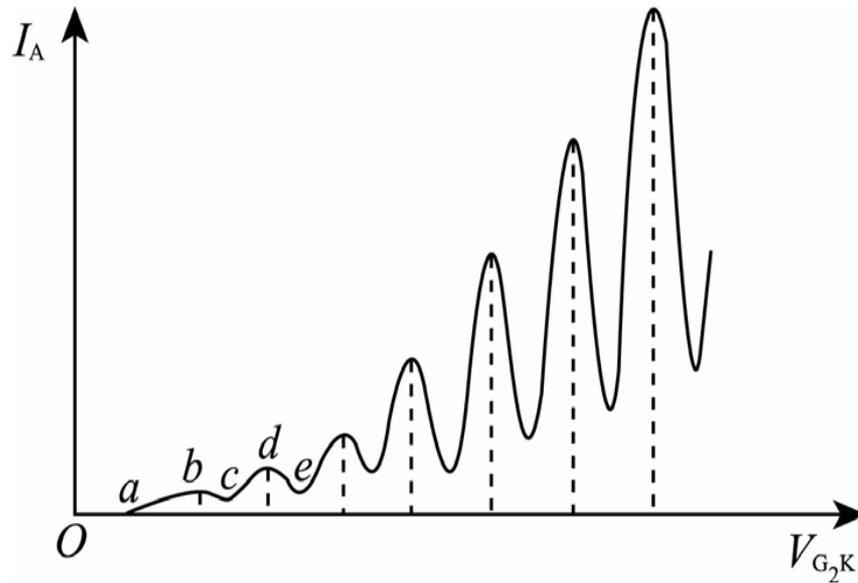
需要记录

MIN		MAX	
U_a (V)	I (nA)	U_a (V)	I (nA)
0.014612	0.000000	0.014612	0.000000
0.014611	0.000000	0.014611	0.000000
...
0.014614	0.000000	0.014614	0.000000



(4) 数据处理

① 依照表3-13所记数据使用Excel软件绘出 $V_{G_2K} - I_A$ 曲线，观察F-H曲线特点。





② 依照自拟表格中记录的数据，用最小二乘法计算氩原子的第一激发电位。

给出测量结果。

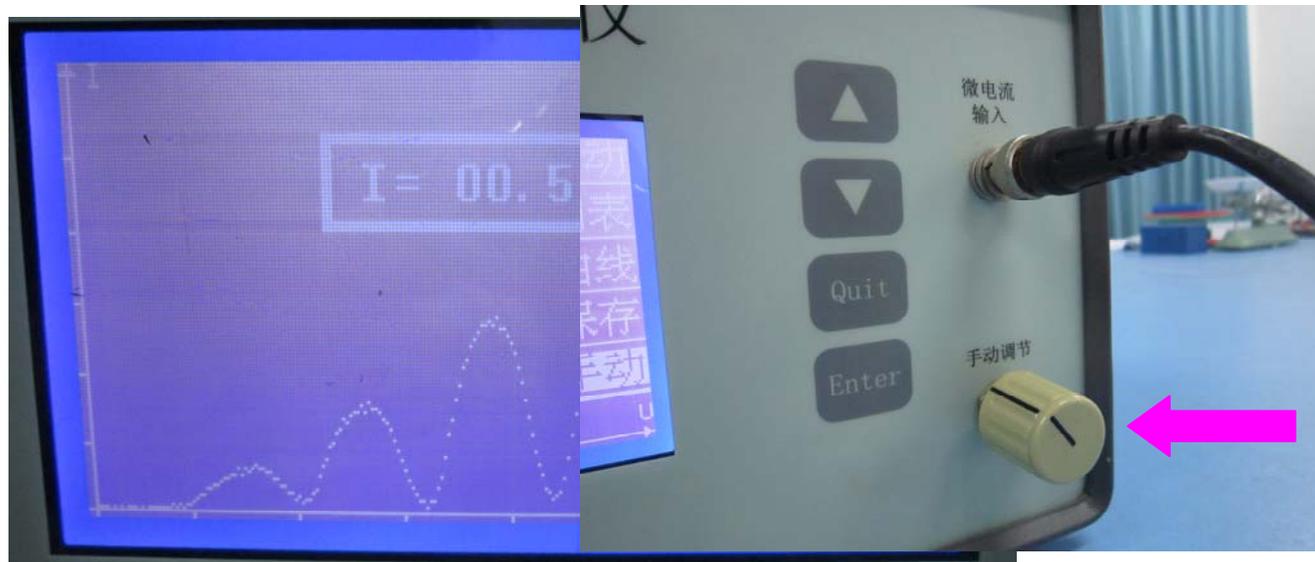
$$V_0 = (V_0 \pm U_{V_0}) \quad \mathbf{V}$$



2. 手动法测氩原子第一激发电位

(1) 选择“手动”模式。使用表3-13中的中的 V_F 、 V_A 、 V_{G_1} 各值。

缓慢旋转“手动调节”旋钮逐渐改变加速电压 V_{G_2k} (用数字万用表监测)，屏幕上显示相对应的 I_A 值。自拟表格，记录所有数据。





(2) 数据处理

用Excel软件绘制 $V_{G_2K} - I_A$ 曲线，找出各电流峰值所对应的 V_{G_2K} ，记录于自拟表格中。用最小二乘法计算氩原子的 V_0 ，并给出测量结果表示

$$V_0 = (V_0 \pm U_{V_0}) \quad \mathbf{V}$$



注意事项

1. 仔细检查接线，使用MCFH20A型F-H实验仪时，各路电压不得互换，极性不得接反，否则可能造成仪器损坏。
2. 自动测量前及手动测量后，注意使“手动调节”左旋调到最小位置。
3. 注意 V_F 、 V_A 、 V_{G_1} 电压的参考范围，一般不要超出。



思考题

1. 如何从本实验结果看出原子的能量是量子化的？
2. 灯丝电压对实验结果有什么影响？是否影响第一激发电位？
3. F-H管的阴极与加速栅极之间的接触电位差对F-H曲线有什么影响？