

气体放电中等离子体的分析

洪宇宸[†] 181840084

南京大学物理学院

摘要： 等离子体

关键词： 等离子体

1 引言

等离子体作为物质的第四态在宇宙中普遍存在。在实验室中对等离子体的研究是从气体放电开始的。朗缪尔 (I. Langmuir) 和汤克斯 (L. Tonks) 首先引入“等离子体”这个名称。近年来等离子体物理学有了较快发展, 并被应用于电力工业、电子工业、金属加工和广播通讯等部门, 特别是等离子体的研究, 为利用受控热核反应, 解决能源问题提供了诱人的前景。

2 实验目的

1. 了解气体放电中等离子体的特性。
2. 利用等离子体诊断技术测定等离子体的一些基本参量。

3 实验原理

1. 等离子体及其物理特性

等离子体(又称等离子区)定义为包含大量正负带电粒子、而又不出现净空间电荷的电离气体。也就是说, 其中正负电荷密度相等, 整体上呈现电中性。等离子体可分为等温等离子体和不等温等离子体, 一般气体放电产生的等离子体属不等温等离子体。

等离子体有一系列不同于普通气体的特性:

- (1) 高度电离, 是电和热的良导体, 具有比普通气体大几百倍的比热容。
- (2) 带正电的和带负电的粒子密度几乎相等。
- (3) 宏观上是电中性的。

虽然等离子体宏观上是电中性的, 但是由于电子的热运动, 等离子体局部会偏离电中性。电荷之间的库仑相互作用, 使这种偏离电中性的范围不能无限扩大, 最终使电中性得以恢复。偏离电中性的区域最大尺度称为德拜长度 λ_D 。当系统尺度 $L > \lambda_D$ 时, 系统呈现电中性, 当 $L < \lambda_D$ 时, 系统可能出现非电中性。

2. 等离子体的主要参量

描述等离子体的一些主要参量为:

- (1) 电子温度 T_e 。它是等离子体的一个主要参量, 因为在等离子体中电子碰撞电离是主要的, 而电子碰撞电离与电子的能量有直接关系, 即与电子温度相关联。
- (2) 带电粒子密度。电子密度为 n_e , 正离子密度为 n_i , 在等离子体中 $n_e \approx n_i$ 。
- (3) 轴向电场强度 E_z 。表征为维持等离子体的存在所需的能量。

[†] Email: 181840084@smail.nju.edu.cn

(4) 电子平均动能 E_e 。

(5) 空间电位分布。

此外，由于等离子体中带电粒子间的相互作用是长程的库仑力，使它们在无规则的热运动之外，能产生某些类型的集体运动，如等离子体振荡，其振荡频率 F_p 称为朗缪尔频率或等离子体频率。电子振荡时辐射的电磁波称为等离子体电磁辐射。

3. 稀薄气体产生的辉光放电

本实验研究的是辉光放电等离子体。

辉光放电是气体导电的一种形态。当放电管内的压强保持在 $10 \sim 10^{-2} \text{Pa}$ 时，在两电极上加高电压，就能观察到管内有放电现象。辉光分为明暗相间的 8 个区域，在管内两个电极间的光强、电位和场强分布如图 2.3-1 所示。8 个区域的名称为 (1) 阿斯顿区，(2) 阴极辉区，(3) 阴极暗区，(4) 负辉区，(5) 法拉第暗区，(6) 正辉区(即正辉柱)，(7) 阳极暗区，(8) 阳极辉区。

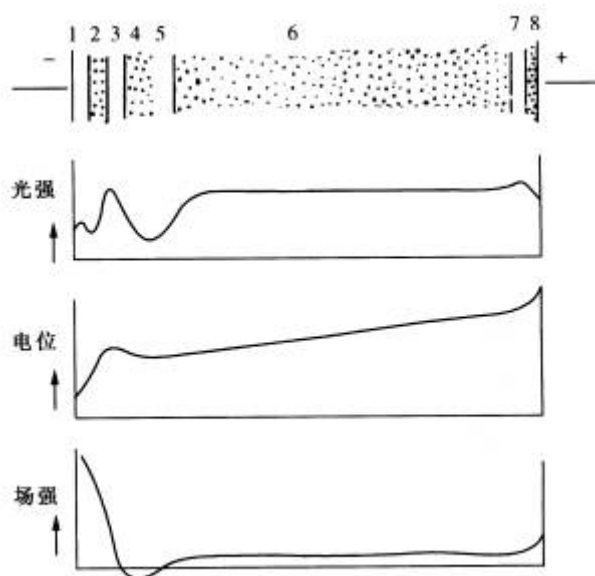


图 2.3-1

正辉区是我们感兴趣的等离子区。其特征是：气体高度电离；电场强度很小，且沿轴向有恒定值。这使得其中带电粒子的无规则热运动胜过它们的定向运动。所以它们基本上遵从麦克斯韦速度分布律。由其具体分布可得到一个相应的温度，即电子温度。但是，由于电子质量小，它在跟离子或原子作弹性碰撞时能量损失很小，所以电子的平均动能比其他粒子的大得多。这是一种非平衡状态。因此，虽然电子温度很高（约为 10^5K ），但放电气体的整体温度并不明显升高，放电管的玻璃壁并不软化。

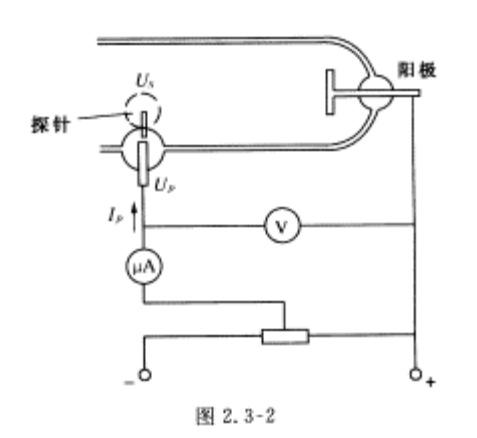
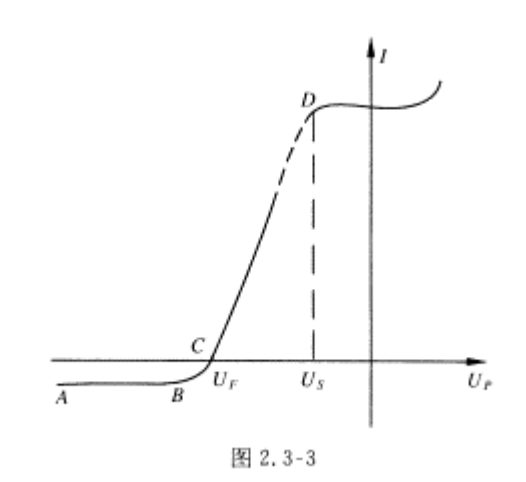


图 2.3-2

4. 等离子体诊断

测试等离子体的方法被称为诊断,它是等离子体物理实验的重要部分。等离子体诊断有(1)探针法,(2)霍尔效应法,(3)微波法,(4)光谱法,等等。下面介绍前两种方法。

(1) 探针法。探针法测定等离子体参量是朗缪尔提出的,又称朗缪尔探针法。分单探针法和双探针法。



①单探针法。探针是封入等离子体中的一个小的金属电极(其形状可以是平板形、圆柱形、球形),其接法如图 2.3-2 所示。以放电管的阳极或阴极作为参考点,改变探针电位,测出相应的探针电流,得到探针电流与其电位之间的关系,即探针伏安特性曲线,如图 2.3-3 所示。对此曲线的解释为:

在 A B 段,探针的负电位很大,电子受负电位的拒斥,而速度很慢的正离子被吸向探针,在探针周围形成正离子构成的空间电荷层,即所谓“正离子鞘”,它把探针电场屏蔽起来。等离子区中的正离子只能靠热运动穿过鞘层抵达探针,形成探针电流,所以 A B 段为正离子流,这个电流很小。

过了 B 点,随着探针负电位减小,电场对电子的拒斥作用减弱,使一些快速电子能够克服电场拒斥作用,抵达探极,这些电子形成的电流抵消了部分正离子流,使探针电流逐渐下降,所以 B C 段为正离子流加电子流。

到了 C 点,电子流刚好等于正离子流,互相抵消,使探针电流为零。此时探针电位就是悬浮电位 U_F 。

继续减小探极电位绝对值,到达探极电子数比正离子数多得多,探极电流转为正向,并且迅速增大,所以 C D 段为电子流加离子流,以电子流为主。

当探极电位 U_p 和等离子体的空间电位 U_s 相等时,正离子鞘消失,全部电子都能到达探极,这对应于曲线上的 D 点。此后电流达到饱和。如果 U_p 进一步升高,探极周围的气体也被电离,使探极电流又迅速增大,甚至烧毁探针。

由单探针法得到的伏安特性曲线,可求得等离子体的一些主要参量。

对于曲线的 C D 段,由于电子受到减速电位 $(U_p - U_s)$ 的作用,只有能量比 $e(U_p - U_s)$ 大的那部分电子能够到达探针。假定等离子区内电子的速度服从麦克斯韦分布,则减速电场中靠近探针表面处的电子密度 n_e ,按玻耳兹曼分布应为

$$n_e = n_0 \exp \left[\frac{e(U_p - U_s)}{kT_e} \right] \quad (2.3-1)$$

式中 n_0 为等离子区中的电子密度, T_e 为等离子区中的电子温度, k 为玻耳兹曼常数。

$$N_e = \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e S \quad (2.3-2)$$

将 (2.3-1) 式代入 (2.3-2) 式得探针上的电子电流:

$$I = N_e \cdot e = \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e \cdot S \cdot e = I_0 \exp \left[\frac{e(U_p - U_s)}{kT_e} \right] \quad (2.3-3)$$

其中

$$I_0 = \frac{1}{4} n_0 \bar{v}_e \cdot S \cdot e \quad (2.3-4)$$

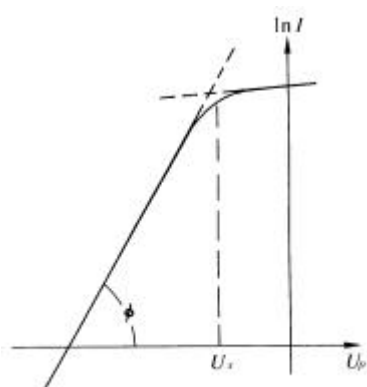


图 2.3-4

对 (2.3-3) 式取对数

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{eU_s}{kT_e} + \frac{eU_p}{kT_e}$$

其中

$$\ln I_0 - \frac{eU_s}{kT_e} = \text{常数}$$

故

$$\ln I = \frac{eU_p}{kT_e} + \text{常数} \quad (2.3-5)$$

可见电子电流的对数和探针电位呈线性关系。作半对数曲线, 如图 2.3-4 所示, 由直线部分的斜率

$$\text{tg } \phi = \frac{\ln I}{U_p} = \frac{e}{kT_e}$$

t g ϕ , 可决定电子温度 T_e :

$$T_e = \frac{e}{k \tan \phi} = \frac{11600}{\tan \phi} (K) \quad (2.3-6)$$

若取以 10 为底的对数，则常数 11 6 0 0 应改为 5 0 4 0。

电子平均动能 $\overline{E_e}$ $\overline{v_e}$

$$\overline{E_e} = \frac{3}{2} kT$$

$$\overline{v_e} = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (2.3-8)$$

式中 m_e 为电子质量。

由 (2.3-4) 式可求得等离子区中的电子密度：

$$n_e = \frac{4I_0}{eS\overline{v_e}} = \frac{I_0}{eS} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}} \quad (2.3-9)$$

式中 I_0 为 $U_p = U_s$ 时的电子电流， S 为探针裸露在等离子区中的表面面积。

②双探针法。单探针法有一定的局限性，因为探针的电位要以放电管的阳极或阴极电位作为参考点，而且一部分放电电流会对探极电流有所贡献，造成探极电流过大和特性曲线失真。

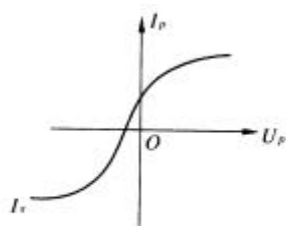


图 2.3-5

双探针法是在放电管中装两根探针，相隔一段距离 L 。双探针法的伏安特性曲线如图 2.3-5 所示。

熟悉了单探针法的理论后，对双探针的特性曲线是不难理解的。

在坐标原点，如果两根探针之间没有电位差，它们各自得到的电流相等，所以外电流为零。然而，一般说来，由于两个探针所在的等离子体电位稍有不同，所以外加电压为零时，电流不是零。

随着外加电压逐步增加，电流趋于饱和。最大电流是饱和离子电流 i_{s1} 、 i_{s2} 。

双探针法有一个重要的优点，即流到系统的总电流决不可能大于饱和离子电流。这是因为流到系统的电子电流总是与相等的离子电流平衡。从而探针对等离子体的干扰大为减小。

由双探针特性曲线，通过下式可求得电子温度 T_e ：

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{I_{i1} \cdot I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \cdot \frac{dU}{dI} \Big|_{U=0} \quad (2.3-10)$$

式中 e 为电子电荷， k 为玻耳兹曼常数， i_{i1} 和 i_{i2} 为流到探针 1 和 2 的正离子电流。它们由

$$\left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=0}$$

电子密度 n_e 为:

$$n_e = \frac{2I_s}{eS} \sqrt{\frac{M}{kT_e}} \quad (2.3-11)$$

式中 M 是放电管所充气体的离子质量, S 是两根探针的平均表面面积。 i_s 是正离子饱和电流。

由双探针法可测定等离子体内的轴向电场强度 E_L 。一种方法是分别测定两根探针所在处的等离子体电位 U_1 和 U_2 , 由下式得

$$E_L = \frac{U_1 - U_2}{l} \quad (2.3-12)$$

式中 l 为两探针间距。

另一种方法称为补偿法, 接线如图 2.3-6 所示。当电流表上的读数为零时, 伏特表上的电位差除以探针间距 L , 也可得到 E_L 。

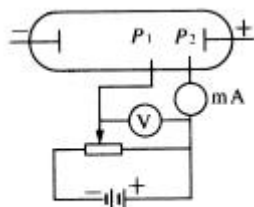


图 2.3-6

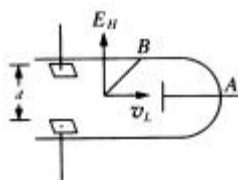


图 2.3-7

(2) 霍尔效应法

在等离子体中“悬浮”一对平行板, 在与等离子体中带电粒子漂移垂直的方向加磁场, 保持磁场方向、漂移方向和平行板法线方向三者互相垂直, 如图 2.3-7 所示, 则具有电荷 e 和漂移速度 v_L 的电子在磁场中受到的洛仑兹力为

$$F_L = e v_L \times B$$

式中 B 为磁感应强度。

这个作用力使电子向平行板法线方向偏转, 从而建立起霍尔电场 E_H , 这个电场对电子也将产生作用力

$$F_e = e \cdot E_H$$

当磁力和电场力平衡时, 有

$$U_L = \frac{E_H}{B} = \frac{U_H}{Bd} \quad (2.3-13)$$

式中 d 是平行板间距, U_H 是霍尔电压。

实验证明, 对弱磁场, 霍尔电压和磁场之间保持线性关系, 但 (2.3-13) 式要修改为

$$v_L = \frac{8U_H}{Bd} \quad (2.3-14)$$

设电流密度为 j ，则通过放电管的电流为：

$$di = j \, dA$$

设 r 是放电管半径，则

$$di = n_e(r) e v_L \cdot 2\pi r \, dr$$

在只考虑数量级时，可假定 $n_e(r)$ 是常数，则有

$$i = n_e e \pi r^2 v_L \quad (2.3-15)$$

由 (2.3-14) 式和 (2.3-15) 式，求得电子密度

$$n_e = \frac{I}{e \pi r^2 v_L} = \frac{IBd}{8\pi e r^2 U_H} \quad (2.3-16)$$

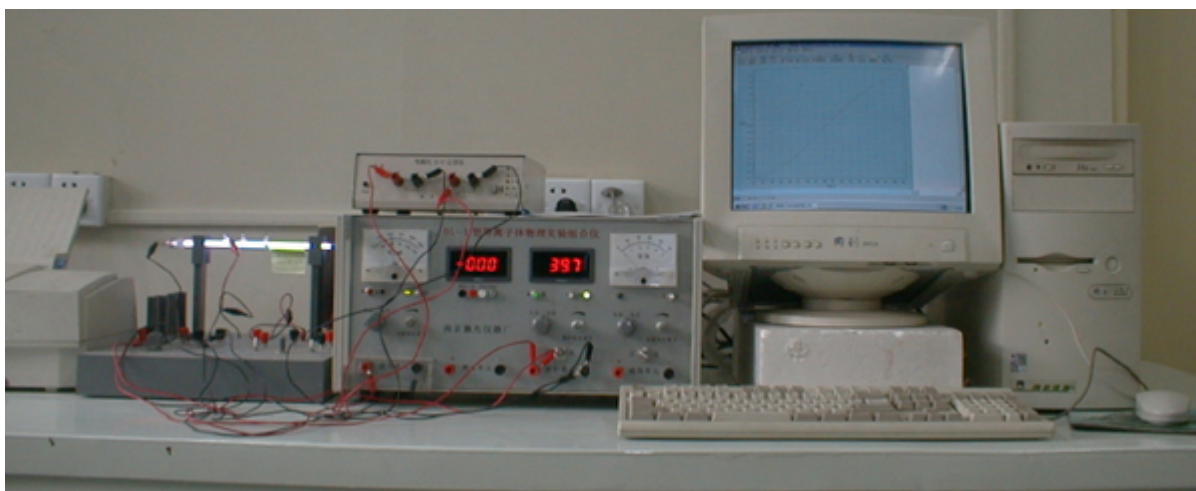
亥姆-

$$B = 0.724 \frac{\mu_0 N i}{R}$$

μ_0 为真空磁导率， N 为线圈

匝数， i 为线圈电流， R 为线圈半径。

4 实验仪器



本实验用等离子体物理实验组合仪(以下简称组合仪)、接线板和等离子体放电管。

放电管的阳极和阴极由不锈钢片制成，霍尔电极(平行板)用不锈钢片或镍片制成。管内充汞或氩。

霍尔效应法测量时外加一对亥姆霍兹线圈。

有关的实验参数如下，

探针面积 $S = \pi d^2 / 4$ ， $d = 0.45 \text{ mm}$

探针轴向间距 = 30 mm

放电管内径 $\Phi 6 \text{ mm}$ (气体放电柱直径要稍小些，通常取 $\Phi 5 \text{ mm}$)

平行板面积： $\Phi = 4 \times 7 \text{ (mm)}$

平行板间距： $d = 4 \text{ mm}$

亥姆霍兹线圈直径： $\Phi 200 \text{ mm}$

亥姆霍兹线圈间距： 100 mm

亥姆霍兹线圈匝数， 400 匝(单只)

组合仪和接线板的用法参看该仪器使用说明书。还可以配 X-Y 函数记录仪, 或者用电脑化 X-Y 记录仪, 自动描出伏安特性曲线。

5 实验内容

1. 单探针法测等离子体参量

进行单探针法诊断实验可用三种方法: 一种方法是逐点改变探针电位, 记录探针电位和相应的探针电流数值,

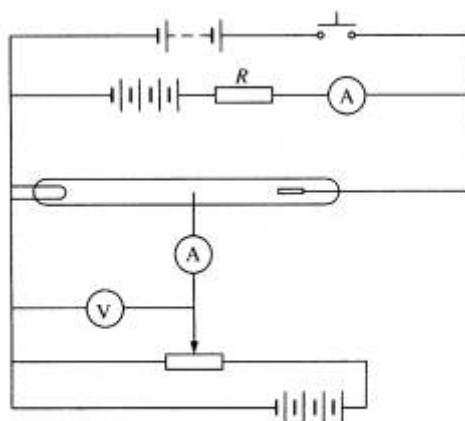


图 2.3-8 单探针法实验原理图

然后在直角坐标纸和半对数纸上绘出单探针伏安特性曲线。另一种方法用 X-Y 函数记录仪直接记录探针电位和探针电流, 自动描绘出伏安特性曲线。第三种方法是电脑化 X-Y 记录仪和等离子体实验辅助分析软件, 测量伏安特性曲线, 算出等离子体参量。单探针法实验原理图如图 2.3-8 所示。

(1) 逐点记录法的操作步骤大致如下:

按图 2.3-9 连接线路。

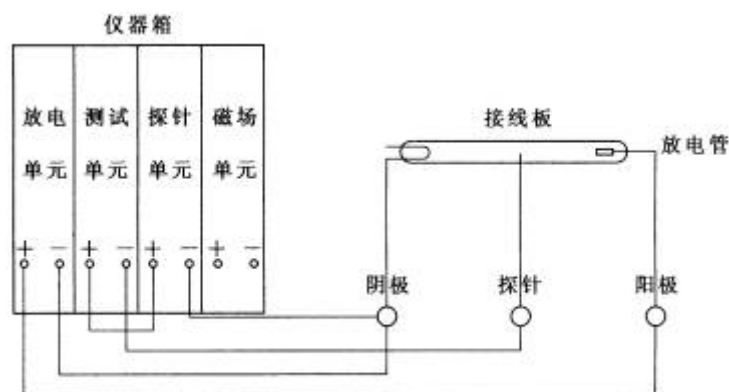


图 2.3-9 单探针法实验接线图(逐点记录)

接通仪器主机总电源、测试单元电源、探针单元电源和放电单元电源, 显示开关置“电压显示”, 调节输出电压使之成为 300 V 以上, 再把显示开关置“电流显示”, 按“高压触发”按钮数次, 使放电管触发并正常放电, 然后, 将放电电流调到 30 ~ 60 mA 之间的某一值。

将探针单元输出开关置“正向输出”, 调节“输出电压电位器”旋钮, 逐点记录测得的探针电压和探针电流, 直到完成单探针的 U-I 特性曲线的测量。

(2) 用 X-Y 函数记录仪测量

按图 2.3-10 接线路, 接通仪器主机总电源、测试单元电源、探针单元电源和放电单元电源。按前述方法使放电管放电, 将放电电流调到需要值。接通 X-Y 函数记录仪电源, 选择合适的量程。在接线板上选择合适的电阻。

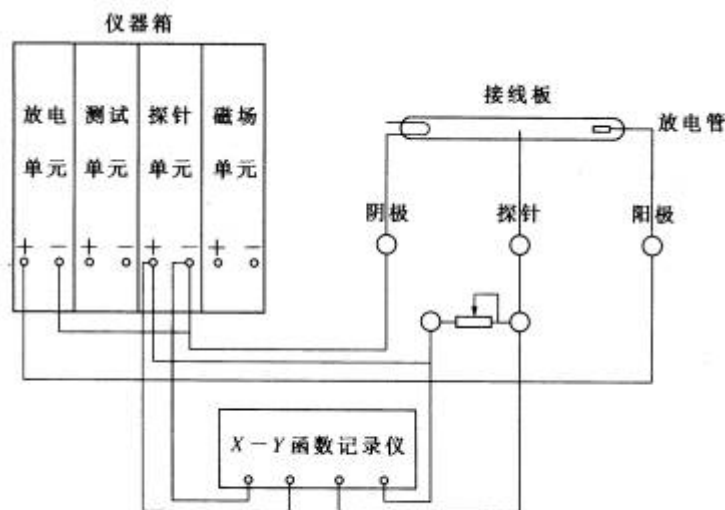


图 2.3-10 单探针法实验接线图(用函数记录仪)

将选择开关置“自动”，则探针电压输出扫描电压，当需要回零时，按“清零”按钮，电压又从零开始扫描。让函数记录仪自动记录单探针的 $U-I$ 特性曲线。

由于等离子体电位在几分钟内可能有 2.5% 的漂移，逐点法测试时间较长，会使得到的曲线失真，而用 X-Y 记录仪测量比较快，所以，可得到比逐点法好的曲线。

由逐点记录和自动描绘的伏安特性曲线上求出电子温度、电子密度、平均动能。

(3) 用电脑化 X-Y 记录仪测量

线路与图 2.3-10 基本相同，只不过用电脑化 X-Y 记录仪代替普通的函数记录仪，微机内已安装数据采集软件以及等离子体实验辅助分析软件，这些软件的使用方法请参阅仪器使用说明书，或者软件的在线帮助。

接好线路并检查无误后，使放电管放电，启动微机，运行电脑化 X-Y 记录仪数据采集软件，仿照步骤 (2)，随着探针电位自动扫描，电脑自动描出 $U-I$ 特性曲线，将数据保存。

运行等离子体实验辅助分析软件，将数据文件打开，进行处理，求得电子温度等主要参量。

2. 双探针法

用逐点记录法和自动记录法测出双探针伏安特性曲线，求 T_e 和 n_e 。

双探针法实验原理图如图 2.3-11 所示。实验方法与单探针法相同，同样可用逐点记录和用 X-Y 函数记录仪测量，接线图如图 2.3-12 和 2.3-13 所示。

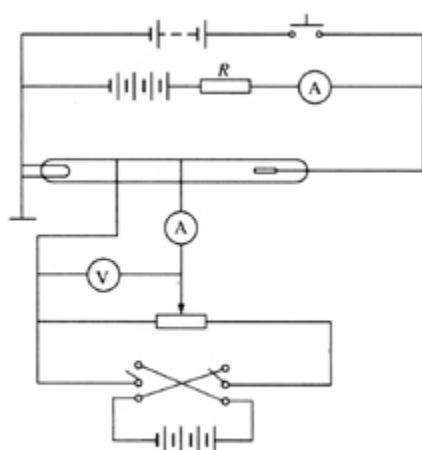


图 2.3-11 双探针法实验原理图

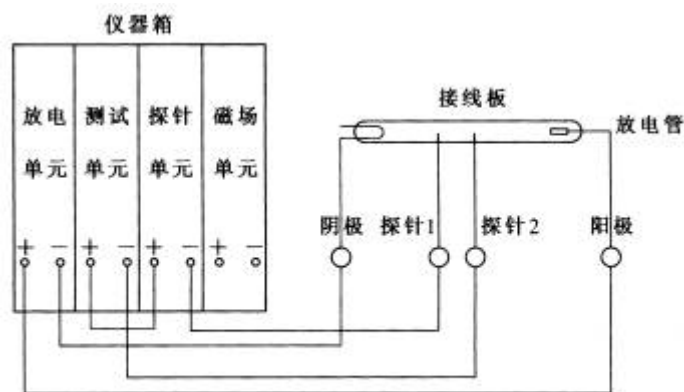


图 2.3-12 双探针法实验接线图(逐点记录)

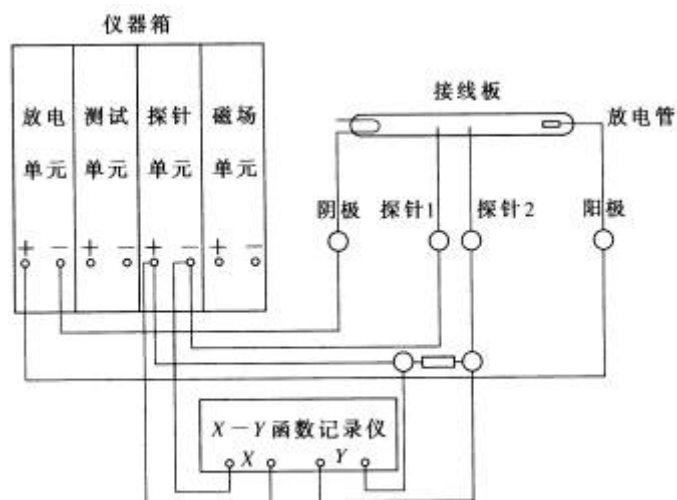


图 2.3-13 双探针法实验接线图(用函数记录仪)

值得注意的是双探针法探针电流比单探针小两个数量级，故要合理选择仪表量程。

3. (选做项目) 霍尔效应法

测量 $B-U_H$ 特性曲线，由放电电流 I 求出 n_e 和 v_L ，由两个探针之间的电位差确定轴向电场强度 E_L 。

接线图如图 2.3-14 所示。其中，在接线板上有补偿电源，这是因为霍尔平行板相对阴极并不完全对称，又有其他副效应，在未加磁场时，平行板之间会有一定的电位差，所以用这一可调的补偿电源将此电位差抵消掉。

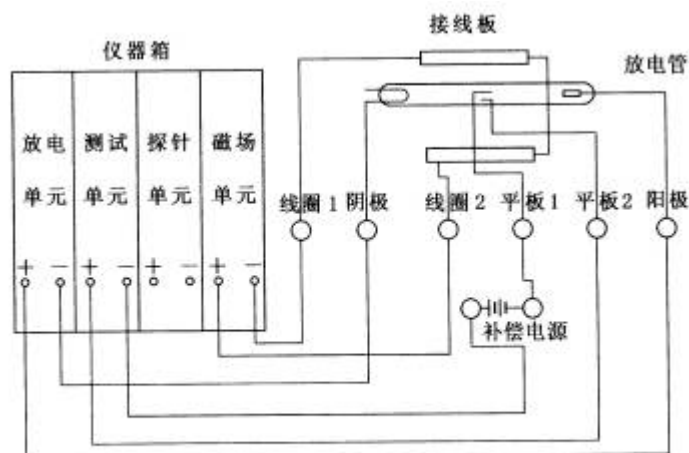


图 2.3-14 霍尔效应法接线图

注意：在本项目中，放电管中霍尔平行板需和线圈的磁场方向垂直，并对准线圈中心孔，两只线圈应串联顺接，以使磁场方向相同。

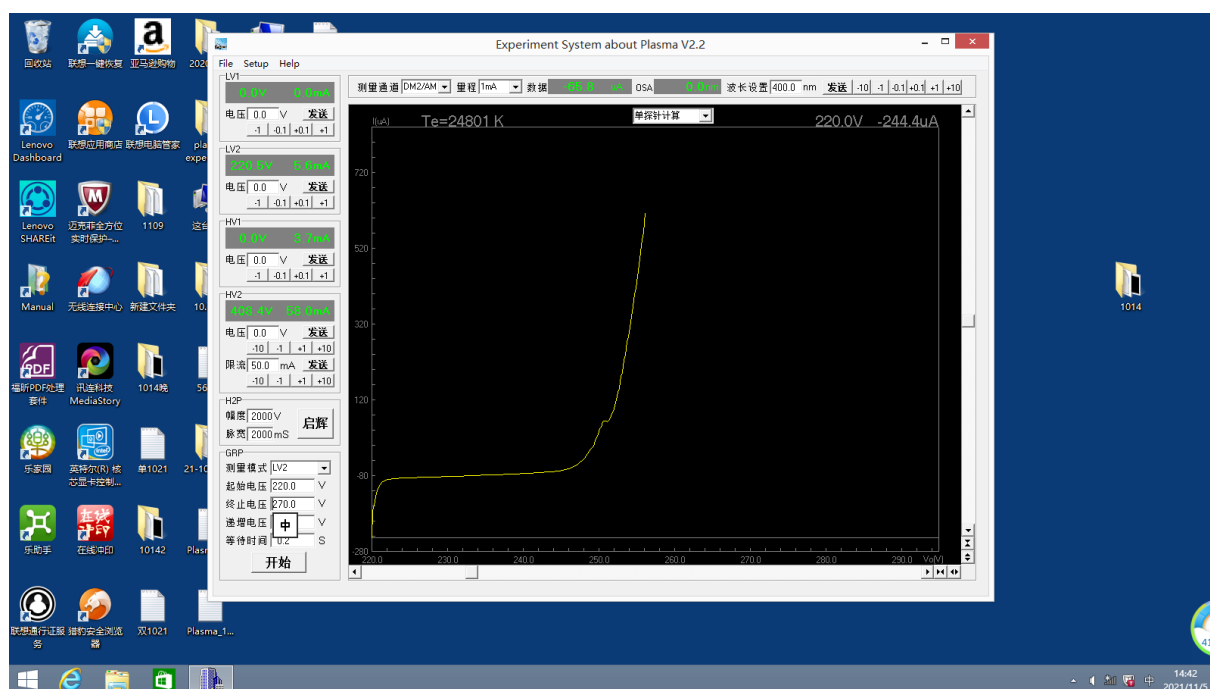
实验步骤如下：

- (1) 按图 2.3-14 接好线路，然后使放电管放电，电流调到 30~100mA。
- (2) 接通补偿电源、测试单元和磁场单元。
- (3) 在线圈电流为零时，先调节补偿电源，使霍尔电压为零，然后逐点增加线圈的电流，记录每点的电流值和霍尔电压值。

如果改变磁场方向重复上述实验，应稍等一些时间，并调节补偿电源，仍使霍尔电压为零。

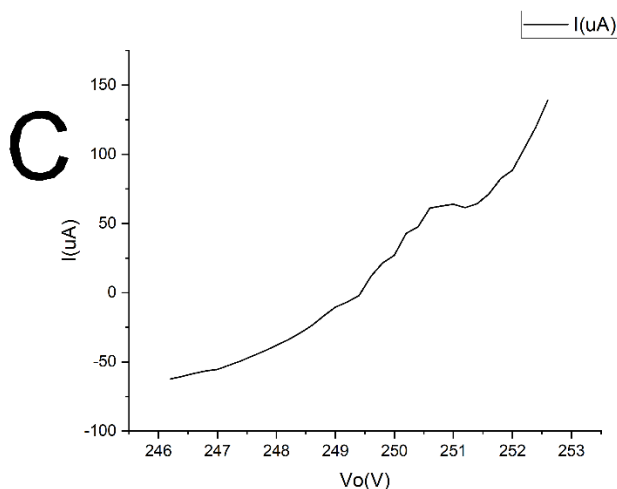
6 数据记录与处理

6.1 单探针法



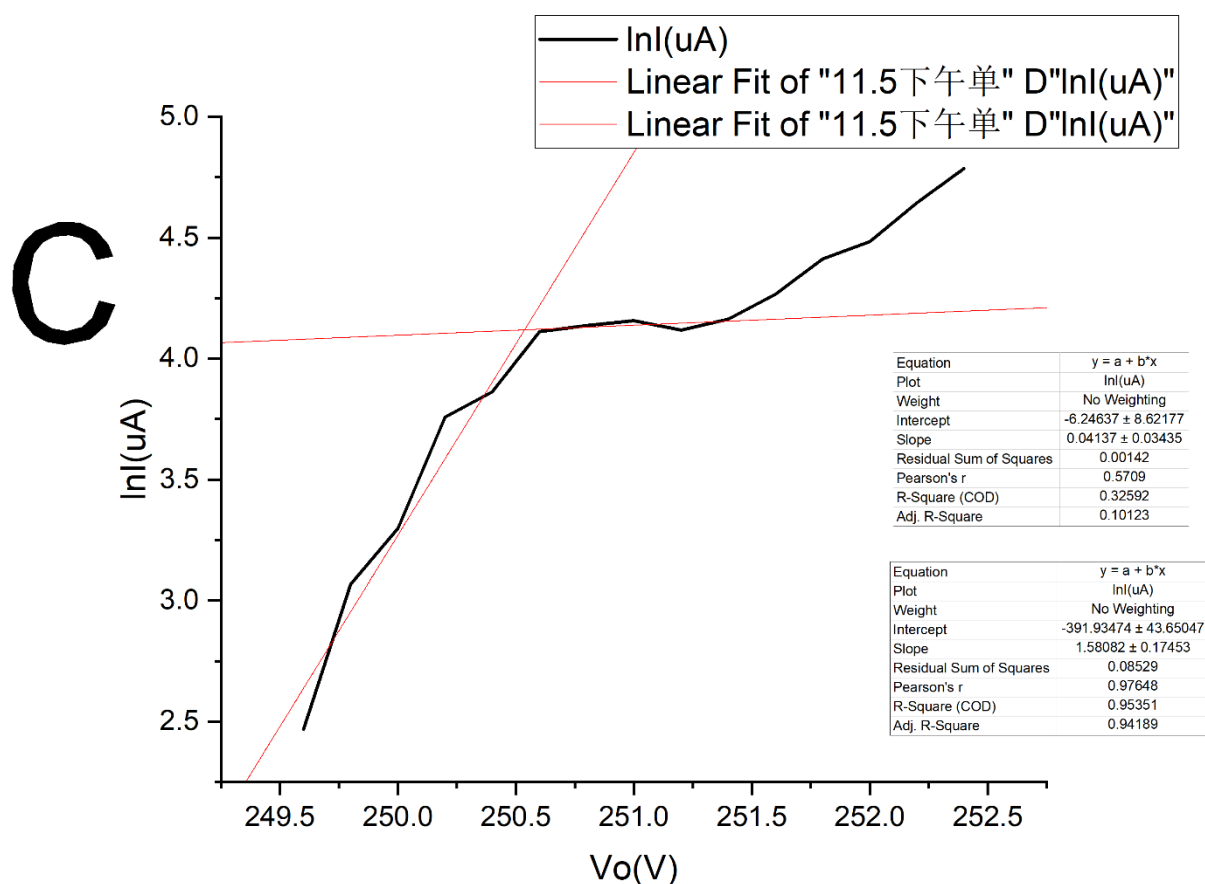
图表 1 原始实验数据图

根据文本数据.txt 文件，用 origin 重绘我们关心的那部分曲线：



可以看到曲线锯齿形状比较明显，可能是递增步长太大，以及辉光放电电流不稳定（实验中观察到辉光光束剧烈摆动）所致。

绘制半对数曲线 $\ln I-U$ 曲线并作拟合如下：



两条拟合直线的交点为 $X = 250.535786$, $Y = 4.11830863$ 。由此可以得到探针电极 U_p 和等离子体的空间电位 U_s 相等时的电子电流约为 $I_0 = e^{4.11830863} = 61.4552 \mu A$ ，相应电压为 $250.535786V$ ，可以当做等离子体空间电位的值。

从 Origin 拟合结果可以看出第一条拟合直线斜率为 $\tan \phi = 1.58082$ 。

于是电子温度为：

$$T_e = \frac{e}{k \cdot \tan \phi} = \frac{11600}{\tan \phi} (K) = 7337.964 K$$

这里有可能因为点数太少，导致了极大的误差。

6.2 双探针法

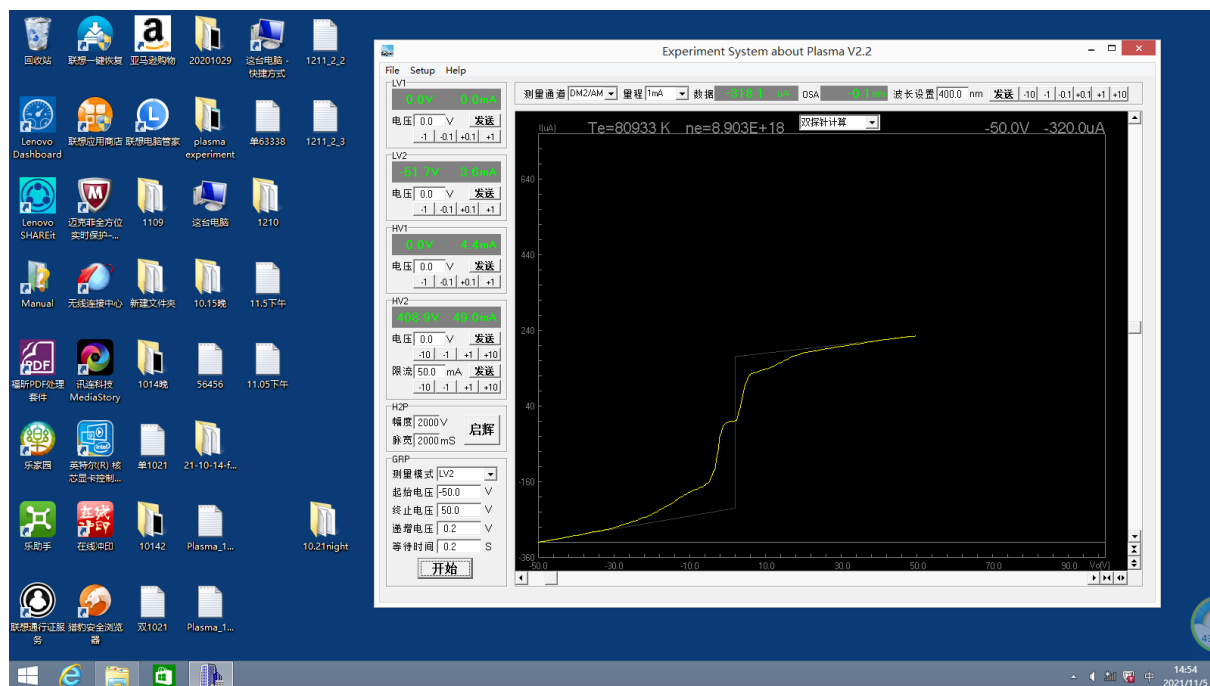
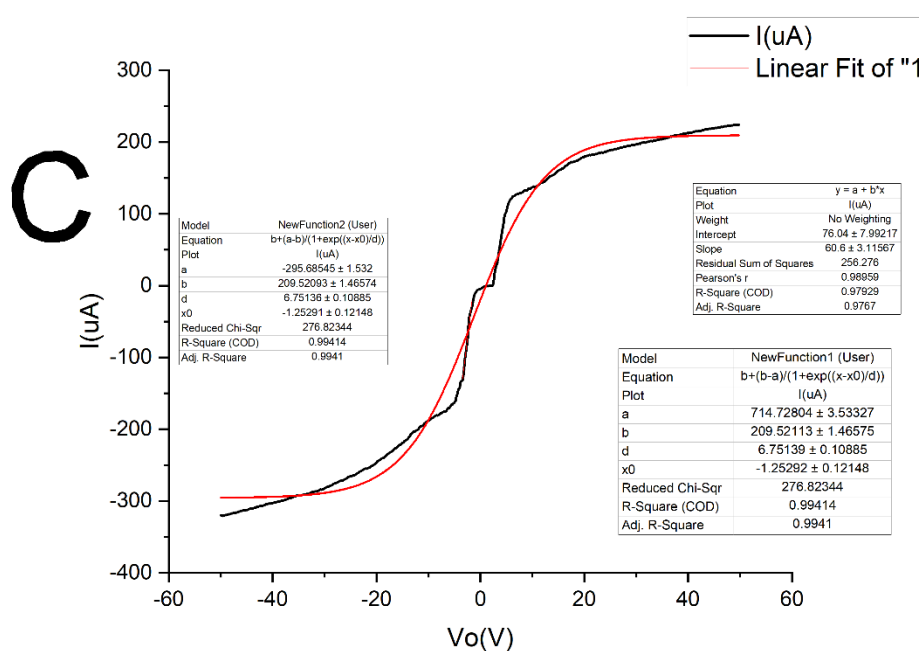


图 2 双探针法原始实验数据图

绘图并在 $U=0$ 附近做拟合得到其斜率约为 60.6:



最大电流即饱和离子电流，分别为 $I_{i1} = 295.68545 \mu A$, $I_{i2} = 209.52093 \mu A$

此时可以求出电子温度为:

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{I_{i1} \cdot I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \frac{dU}{dI} \bigg|_{U=0} = 11600 \times 122.628 \times 10^{-6} \times \frac{1}{60.6 \times 10^{-6}} K = 23473.347 K$$

这一结果与单探针法实验软件给出的结果非常接近。

7 实验分析和讨论

注意事项

1. 放电管两极上的电压很高，谨防触电！
2. 探针电流不宜过大，以免损坏仪器。
3. 组合仪必须在看懂使用说明书后才可连线和操作。一定要按照操作规程，不可乱动旋钮。
4. 应用不同方法测量同一个等离子体参量，会有较大差别，这正是测量等离子体的困难之处。

误差：实验的误差主要来源于外界光源的影响，另外氢气的纯度不高也会导致实验的误差。在对实验数据进行处理时，发现采样率过低，拟合结果误差较大。

双探针法的优点：双探针法不需要参考电位，受放电系统接地情况的影响较小。另外由于流到探针的总电流不会大于饱和离子电流，从而探针对等离子体的干扰大为减小。

单探针法的优点：单探针法可以通过伏安特性曲线得到双探针法无法获得悬浮电位 U_F 及空间电位 U_S 。

8 思考题

气体放电等离子体有什么特性？

- 高度电离，是电和热的良导体，具有比普通气体大几百倍的比热容；
- 带正电的和带负电的粒子密度几乎相等；
- 宏观上是电中性的。

等离子体有哪些主要参量？

- 电子温度 T_e ，他是等离子体的一个主要参量，因为在等离子体中电子碰撞电离是主要的，而电子碰撞电离与电子的能量有直接关系，即与电子温度相关联。
- 带电粒子密度。电子密度为 n_e ，正离子密度为 n_i ，在等离子体中 $n_e \approx n_i$ 。
- 轴向电场强度 E_L 。表征为维持等离子体的存在所需的能量。
- 电子的平均动能 \bar{E}_e 。
- 空间的电位分布。

如何用探针法确定电子温度和电子密度？

- (1) 探针具有较高的熔点，保证其不会在放电过程中熔化
- (2) 探针化学性质稳定，避免与等离子体发生化学反应。
- (3) 探针线度适中：要小于离子和电子的自由程以减小对等离子体的干扰。特别是对于双探针法时，两个探针应该垂直的放置于放电电流的方向，使得这两个探针的电位尽量相同。
- (4) 抗干扰能力强。探针必须是电的良导体，在高温的等离子气体中仍然要保持电的良导体的特性。

1. 比较本实验所用的几种等离子体诊断方法的优缺点。
2. 探针法对探针有什么要求？
3. 分析误差原因，提出改进措施。

- 等离子体是包含大量正负带电粒子,而在整体上呈现电中性的
- 等离子体中带正电的粒子密度和带负电的粒子密度相等
- 朗缪尔提出的等离子体诊断方法是探针法
- 双探针法的探极电流小于单探针法的探极电流
- 单探针法的局限性在于放电电流对探极电流有贡献,致使探极电流过大

9 参考文献

- [1] B.斯皮瓦克主编,专门物理实验,第一卷,高等教育出版社,1957
- [2] H.A.卡普卓夫著,气体与真空中的电现象(上册),高等教育出版社,1960
- [3] 孙杏凡,等离子体及其应用,高等教育出版社,1982
- [4] 华中师范大学近代物理实验教研室编,近代物理实验,华中师范大学出版社,1988
- [5] 美国麻省理工学院编,中级物理实验讲义,P212,北京工业大学印,1980