

气体放电中等离子体的分析

一、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。

二、实验原理

1、等离子体及其物理特性

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。

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 $n_e = n_i$ 。
- (3) 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。
- (4) 电子平均动能 E_e 。
- (5) 空间电位分布。

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^{-10} - 10^{-2} 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。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）阴极辉区。

如图 1 所示，其中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 10⁵ K），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。

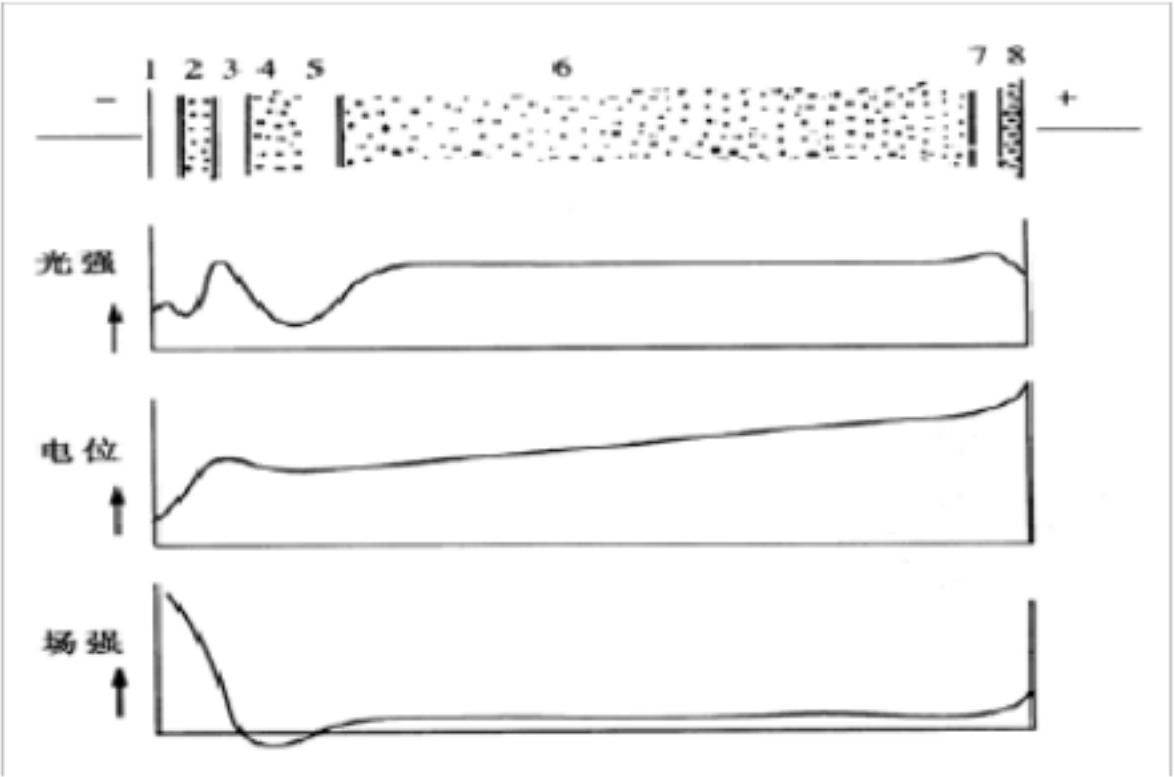


图 1

3. 等离子体诊断

测试等离子体的方法被称为诊断。等离子体诊断有探针法，霍尔效应法，微波法，光谱法等。本次实验中采用探针法。探针法分单探针法和双探针法。

（1）单探针法。单探针法实验原理图如图 2 所示。

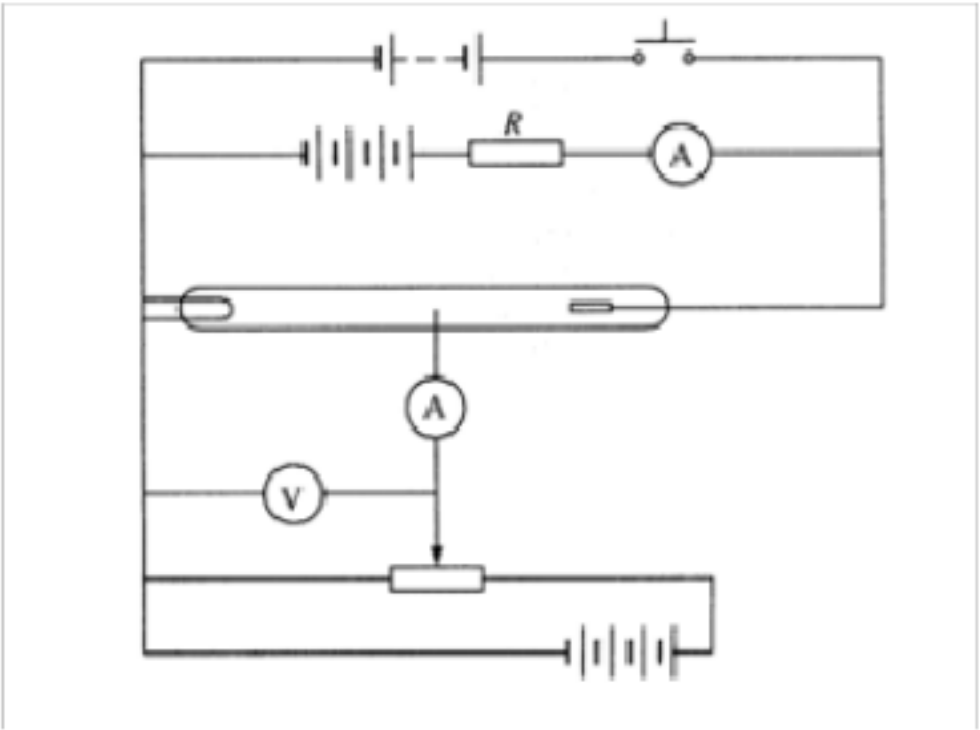


图 2

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）。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 3 所示。对此曲线的解释为：

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）。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 所示。对此曲线的解释为：

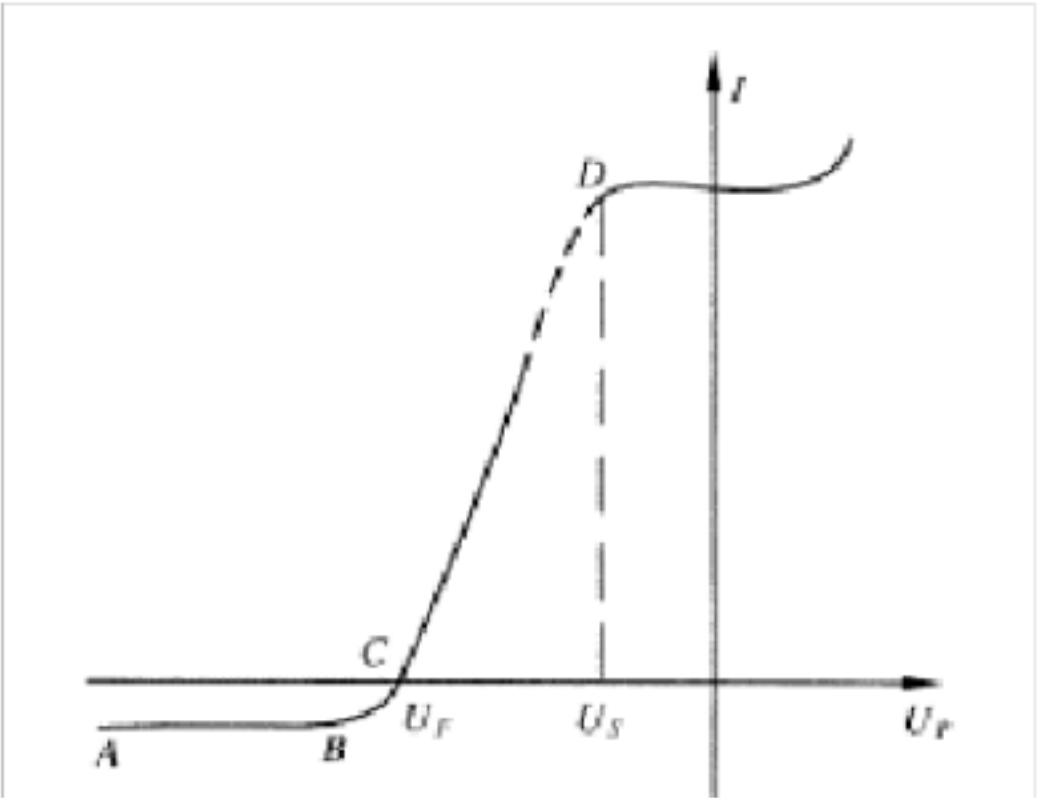


图 3

在 A B 段，探针的负电位很大，电子受负电位的排斥，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，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

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

近探针表面处的电子密度 n_e ，按玻耳兹曼分布应为

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。

在电子平均速度为 \bar{v}_e 时，在单位时间内落到表面积为 S 的探针上的电子数为：

$$N_e = \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e S$$

得探针上的电子电流：

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

其中

$$I_0 = \frac{1}{4} n_0 \overline{v_e} \cdot S \cdot e$$

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

$$\ln I = \frac{eU_p}{kT_e} + \text{常数}$$

可见电子电流的对数和探针电位呈线性关系。

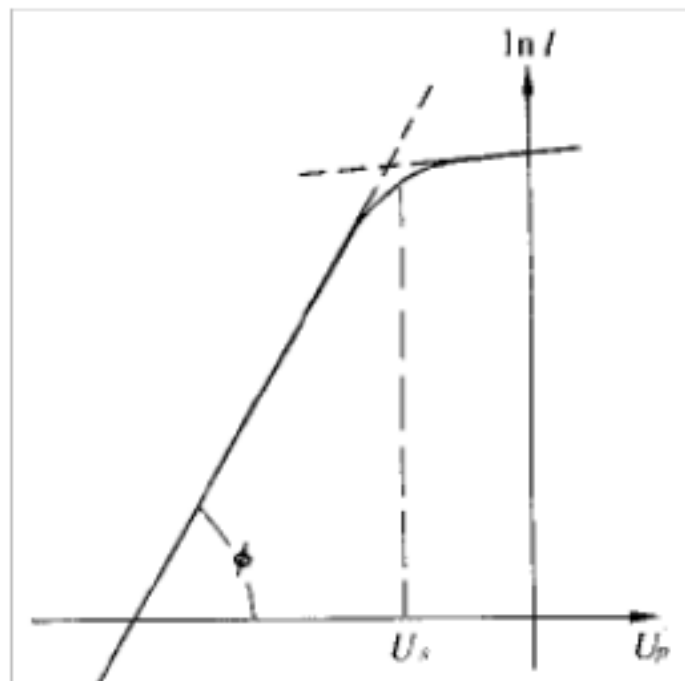


图 4

作半对数曲线，如图 4 所示，由直线部分的斜率 $\text{tg} \phi$ ，可决定电子温度 T_e ：

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

$$T_e = \frac{e}{k \text{tg} \phi} = \frac{11600}{\text{tg} \phi} (K)$$

电子平均动能 E_e 和平均速度 v_e 分别为：

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

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$$

式中m e 为电子质量。

由(4) 式可求得等离子区中的电子密度：

$$n_e = \frac{4I_o}{eSv_e} = \frac{I_o}{eS} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}}$$

式中 I0 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。双探针法原理图如图 5

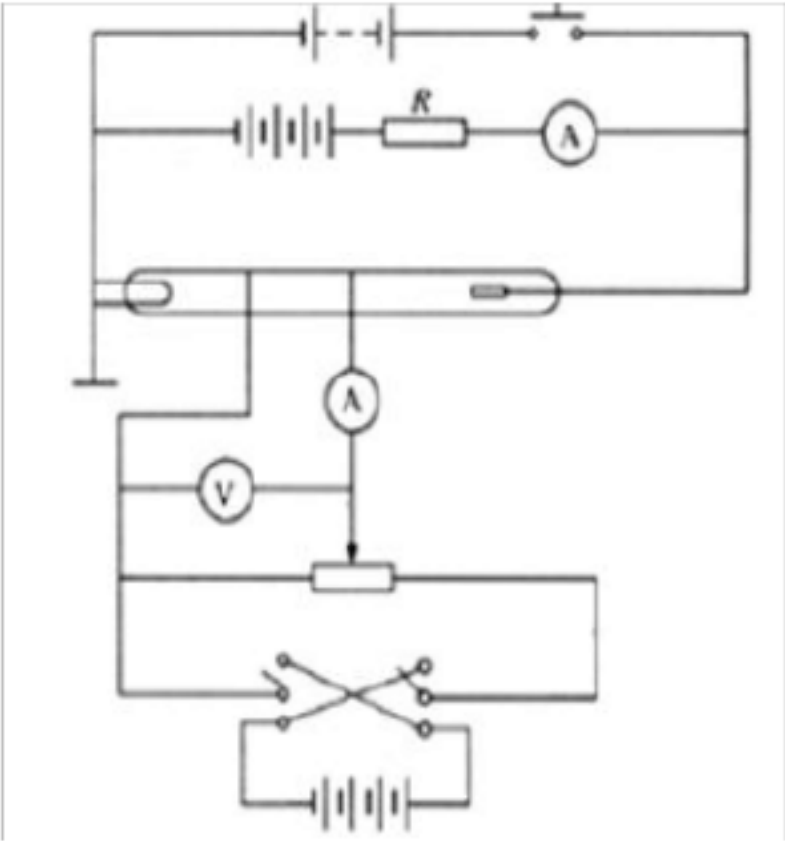


图 5

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 6 所示。

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 Is1、 Is2。

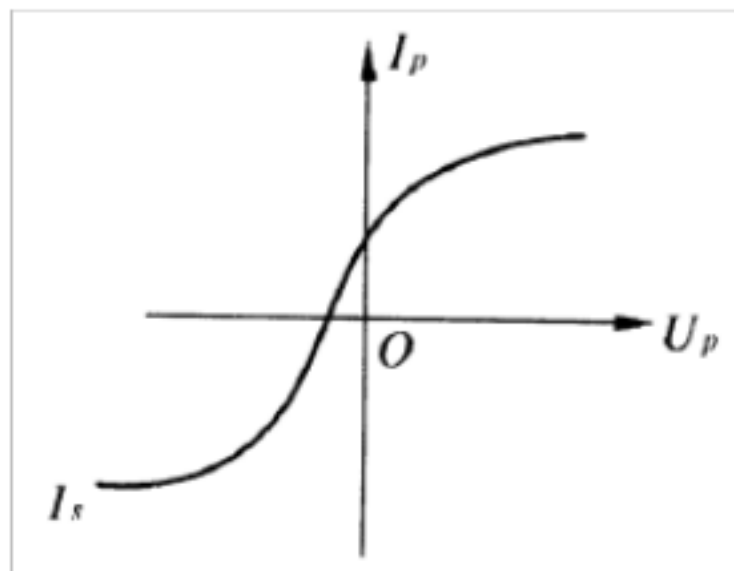


图 6

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 ：

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{I_{i1} + I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=0}$$

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

饱和离子流确定。 $\left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=0}$ 是 $U = 0$ 附近伏安特性曲线斜率。

电子密度 n_e 为：

$$n_e = \frac{2I_s}{eS} \sqrt{\frac{M}{kT_e}}$$

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

$$E_L = \frac{U_1 - U_2}{l}$$

式中 l 为两探针间距。

另一种方法称为补偿法，接线如图 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 。

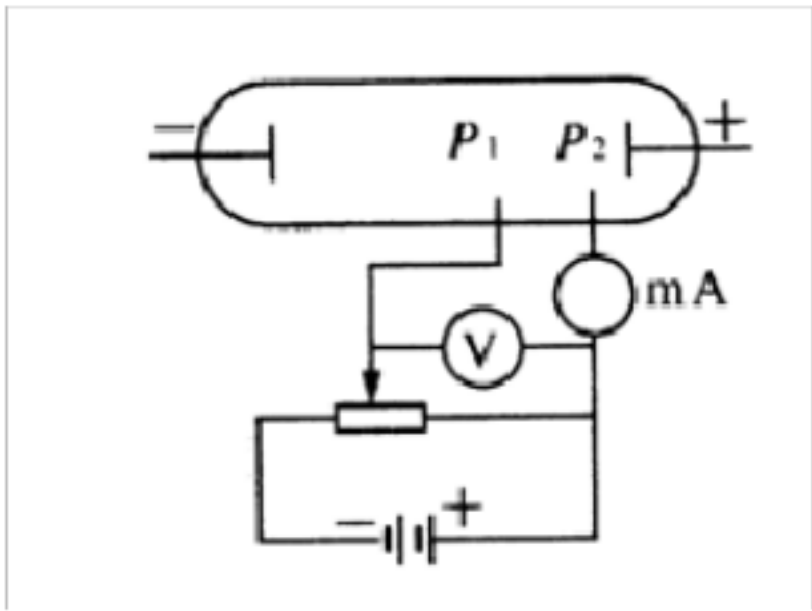


图 7

三、实验数据

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，管内充汞或氩。

四、实验内容

1. 单探针法测等离子体参量

本实验采用的是电脑化 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。实验接线图如下

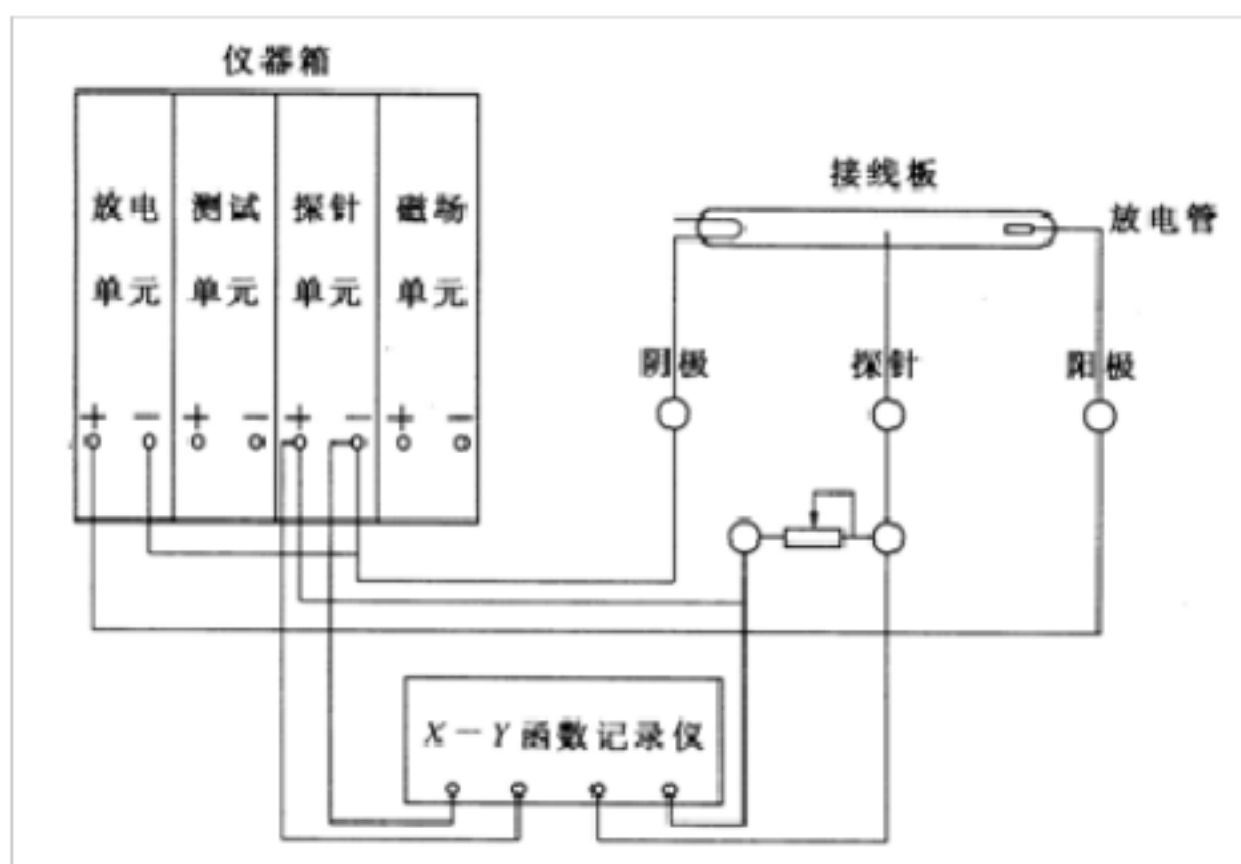


图 8

连好线路后接通电源，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取样电阻。运行电脑化 X-Y 记录仪数据采集软件，

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。用等离子体实验辅助分析软件处理数据，求得电子温度等主要参量。

2．双探针法

用自动记录法测出双探针伏安特性曲线，求 T_e 和 n_e 。

双探针法实验方法与单探针法相同，接线图如图 9 所示。

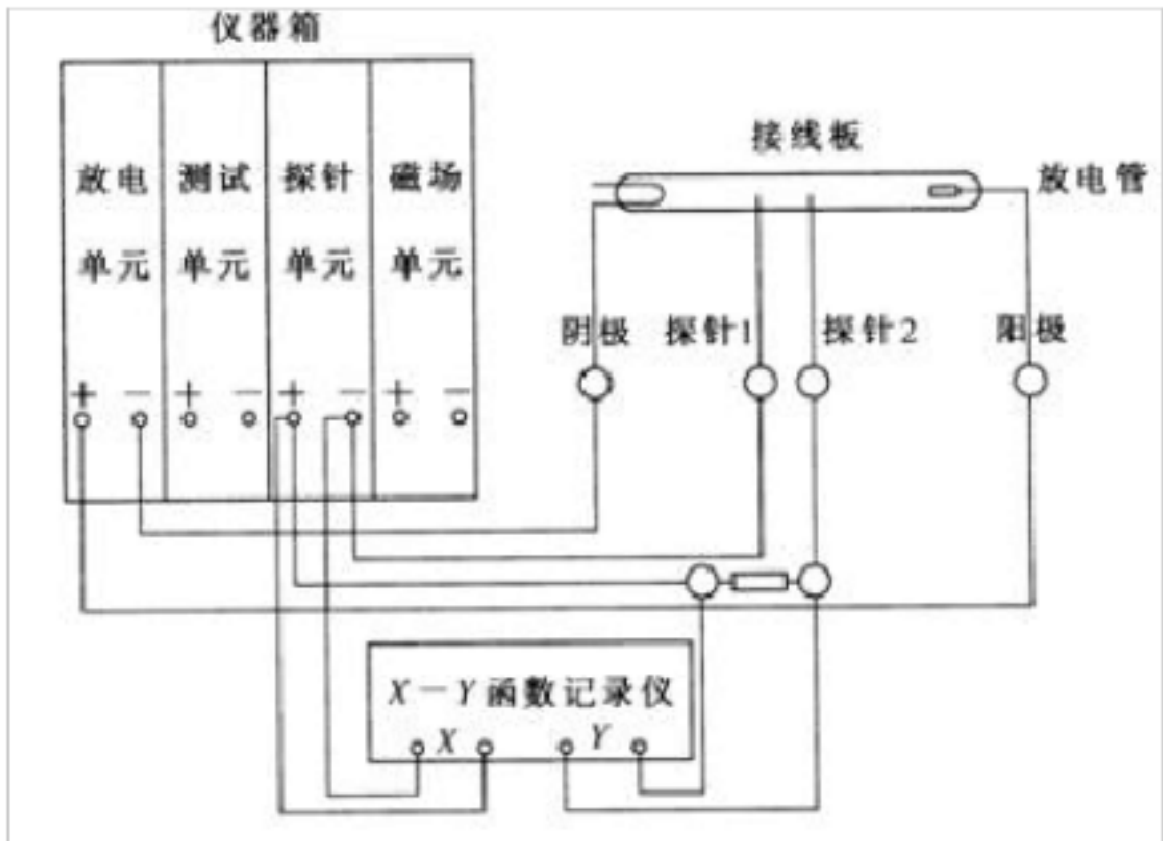


图 9

五、实验数据

1.单探针法

实验参数：

探针直径 (mm)：0.45

探针轴向间距 (mm)：30.00

放电管内径 (mm)：6.00

平行板面积 (mm²)：8.00

平行板间距 (mm)：4.00

亥姆霍兹线圈直径 (mm) : 200.00

亥姆霍兹线圈间距 (mm) : 100.00

亥姆霍兹线圈匝数 : 400

放电电流 (mA) : 99

单探针序号 : 1

取样电阻值 () : 750

实验结果 :

$U_0 = 34.86 \text{ V}$

$I_0 = 15209.79 \text{ uA}$

$t_g = 0.24$

$T_e = 4.81E+004 \text{ K}$

$V_e = 1.36E+006 \text{ m/s}$

$N_e = 1.75E+018 \text{ n/m}^3$

$E_e = 9.96E-019 \text{ J}$

2. 双探针法

实验参数 :

探针直径 (mm) : 0.45

探针轴向间距 (mm) : 30.00

放电管内径 (mm) : 6.00

平行板面积 (mm^2) : 8.00

平行板间距 (mm) : 4.00

亥姆霍兹线圈直径 (mm) : 200.00

亥姆霍兹线圈间距 (mm) : 100.00

亥姆霍兹线圈匝数 : 400

放电电流 (mA) : 99

取样电阻值 () : 750

第一次实验结果 :

$I_1 = 583.61 \text{ uA}$

$I_2 = 448.12 \text{ uA}$

$tg = 1.0E-004$

$Te = 2.95E+004 \text{ K}$

$Ne = 1.63E+017 \text{ n/m}^3$

放电电流 (mA) : 99

取样电阻值 () : 750

第二次实验结果 :

$I_1 = 554.53 \text{ uA}$

$I_2 = 471.76 \text{ uA}$

$tg = 1.9E-004$

$T_e = 1.55E+004 \text{ K}$

$N_e = 2.23E+017 \text{ n/m}^3$

六、思考题

1、气体放电中的等离子体有什么特征？

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、等离子体有哪些主要的参量？

描述等离子体的一些主要参量为：

- (1) 电子温度 T_e 。
- (2) 带电粒子密度。
- (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。
- (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、探针法对探针有什么要求？

- (1) 因为电子温度很高（约 $10^5 K$ ），所以探针需要有很高的熔点，且保证化学性质稳定
- (2) 抗干扰能力强。探针必须是电的良导体，在高温中仍然要保持电的良导体的特性。