

南京大学物理学院

近代物理实验

近代物理实验

气体放电中等离子体的研究

实验报告

姓名	杨峻
学号	111120174
院系 班级	物理学院 5 班
报告日期	2014 年 5 月 1 日

§1 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。

§2 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。其中正负电荷密度相等，整体上成电中性。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于不等温等离子体。

等离子体有一系列不同于普通气体的特性：

- (a) 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；
- (b) 带正电的和带负电的粒子密度几乎相等；
- (c) 宏观上是电中性的。

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，使得这种偏离电中性的范围不能无限扩大，最终使得电中性恢复。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 $L \leq \lambda_D$ 时，系统呈现电中性。

2. 等离子体的主要参量

- (a) 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。
- (b) 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 $n_e \approx n_i$ 。
- (c) 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。
- (d) 电子的平均动能 \bar{E}_e 。
- (e) 空间的电位分布。

3. 稀薄气体产生的辉光放电

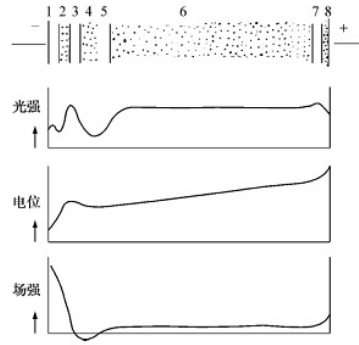


Figure 1: 辉光放电的光强、电位和场强分布

本实验研究的是辉光放电等离子气体。正辉区是我们感兴趣的等离子区。其特征是：气体高度店里，且轴向有恒定值。这使得其中带电粒子的无规则热运动胜过定向运动。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，它跟粒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，虽然电子的温度很高，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。

4. 等离子体的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。

- 单探针法探针是封入等离子体中的一个小的金属电极，其接法如图 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，得到伏安特性曲线，如图 3。

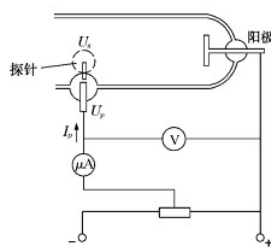


Figure 2: 单探针接法

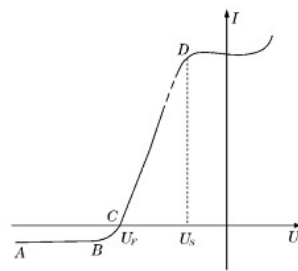


Figure 3: 单探针伏安特性

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 CD 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 ，按玻尔兹曼分布应为

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

其中 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 为玻尔兹曼常数。

在电子平均速度为 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：

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

将 (1) 带入 (2) 得到探针上的电子电流：

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

其中

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

对 (3) 取对数 $\ln I = \ln I_0 - \frac{eU_s}{kT_e} + \frac{eU_p}{kT_e}$ 其中 $\ln I_0 - \frac{eU_s}{kT_e} = \text{const}$ 故

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

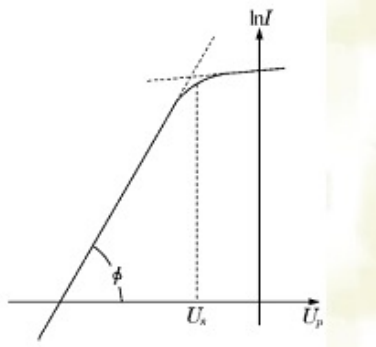


Figure 4: 单探针的半对数曲线

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 4 所示，由直线的斜率 $\tan \phi$ ，可决定电子温度 T_e ：

$$\tan \phi = \frac{\ln I}{U_p} = \frac{e}{kT_e} \quad (6)$$

$$T_e = \frac{e}{k \tan \phi} = \frac{11600}{\tan \phi} (K) \quad (7)$$

电子的平均动能 \bar{E}_e 和平均速度 \bar{v}_e 分别为：

$$\bar{E}_e = \frac{3}{2} kT \quad (8)$$

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (9)$$

其中 e 为电子质量。由 (4) 可求得等离子区的电子密度：

$$n_e = \frac{4I_0}{eS\bar{v}_e} = \frac{I_0}{eS} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}} \quad (10)$$

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

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

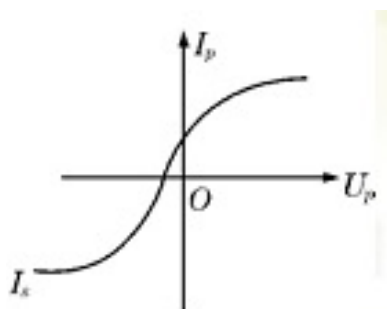


Figure 5: 双探针的伏安特性曲线

双探针法有一个重要的优点，即流到系统的总电流绝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。

§3 试验仪器

本实验用等离子体物理实验组合仪、接线板、等离子体放电管、电脑化 $X - Y$ 记录仪。

§4 实验步骤

- 单探针法接好线路并检查无误，使放电管放电，启动微机，运行 $X - Y$ 记录仪数据采集软件，扫描伏安特性曲线，保存数据。

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，获得相关的实验参数。

- 双探针法同单探针。

§5 数据处理

1. 单探针法

- 从仪器直接得到的结果单探针法

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 (mm^2): 28.00

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): 90

单探针序号: 1

取样电阻值 (Ω): 1000

实验结果:

$U_0 = 27.29 \text{ V}$

$I_0 = 1807.40 \mu A$

$\text{tg}\Phi = 2.37$

$T_e = 4.90E+003 \text{ K}$

$V_e = 4.35E+005 \text{ m/s}$

$N_e = 6.52E+017 \text{ n/m}^3$

$E_e = 1.01E-019 \text{ J}$

- 自己算的结果取 (2.505, 22.66), (2.54, 3.266) 两个点计算出 $\tan \phi = 2.85$, 相应的计算出 $T_e = 4.1 \times 10^3 K$, $V_e = 4.0 \times 10^5 m/s$, $N_e = 7.1 \times 10^{17} n/m^3$, $E_e = 0.82 \times 10^{-19} J$ 。对比上述试验结果误差不大。

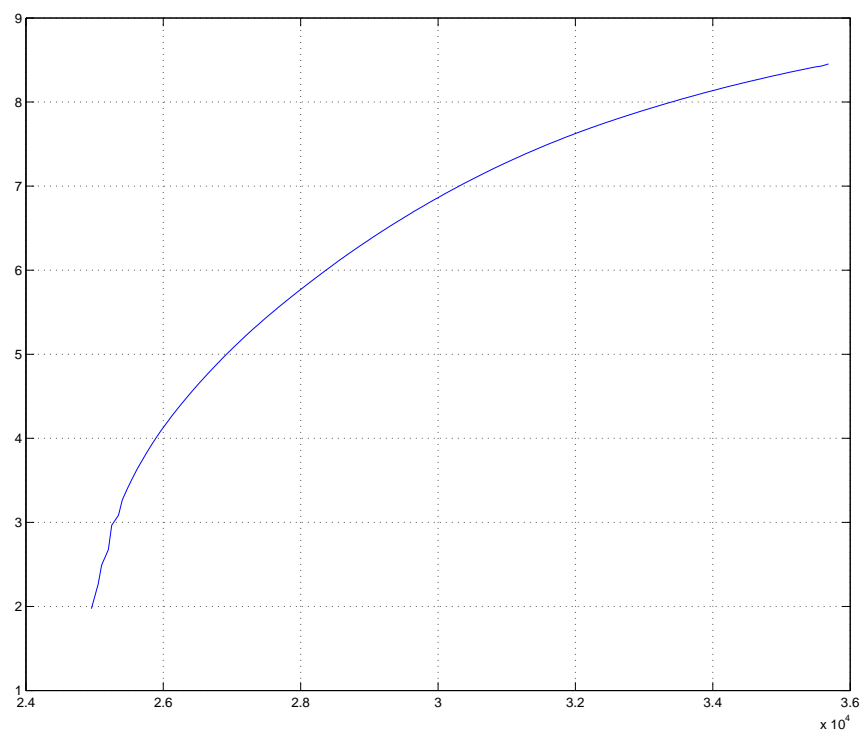


Figure 6: 单探针半对数曲线

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 (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): 90

取样电阻值 (Ω): 1000

实验结果:

$$I_1 = 492.91 \mu A$$

$$I_2 = 554.86 \mu A$$

$$\text{tg}\Phi = 7.4\text{E-}005$$

$$T_e = 4.07\text{E+}004 \text{ K}$$

$$N_e = 1.41\text{E+}017 \text{ n/m}^3$$

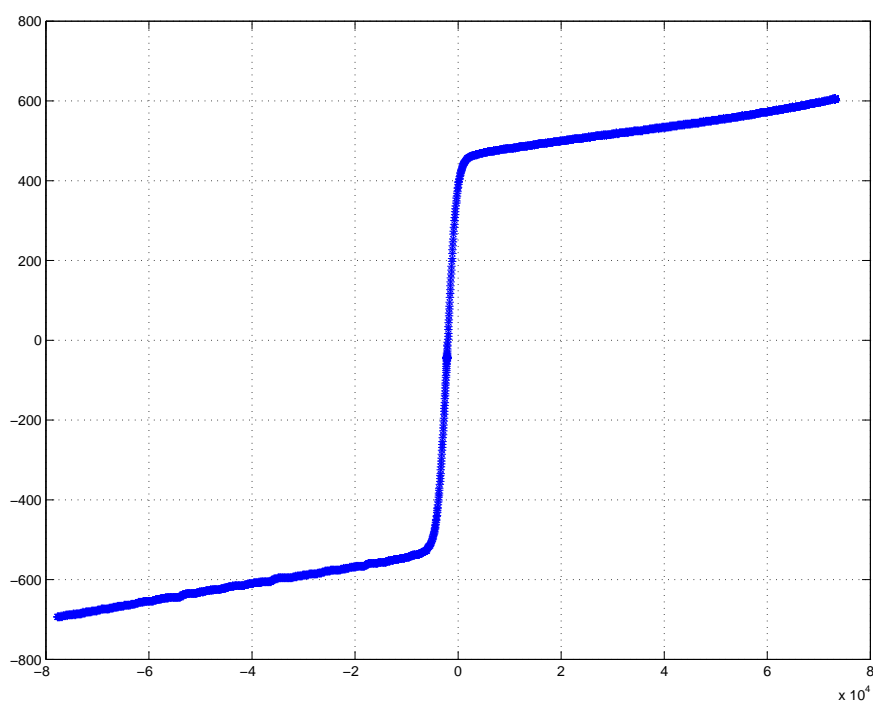


Figure 7: 双探针伏安特性曲线

§6 实验分析

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。

§7 思考题

1. 气体放电中的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。

- 辉光特性，电子的平均动能远大于其他粒子，处于非平衡态。

2. 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。

3. 探针法对探针有什么要求？

- 电子和里子打到探针表面后被完全吸收，不会发生次级电子发射。
- 探针熔点要较高，保证其不会在放电过程中熔化。
- 探针不与等离子体发生化学反应。
- 探针的线度适中：小于离子和电子的自由程，减小对等离子体的干扰；同时要明显大于其表面的正离子壳层的厚度，以减少离子壳层厚度变化造成的影响。
- 使用双探针法时，两探针应垂直于放电电流的方向放置，使两个探针所在的等离子体电位尽量相同