

# 近代物理实验报告 2.3：等离子体分析

林杨 211840092 物理学院

2024 年 9 月 26 日

## 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，并被应用到电力工业、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 实验仪器

等离子体物理实验组合仪、接线板、等离子体放电管、亥姆霍兹线圈。

## 4 实验原理

### 4.1 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：

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  $\lambda_D$ ，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。

## 4.2 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  $E_L$ 。表征为维持等离子体的存在所需的能量。
4. 电子平均动能  $\bar{E}_e$ 。
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。

## 4.3 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。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。

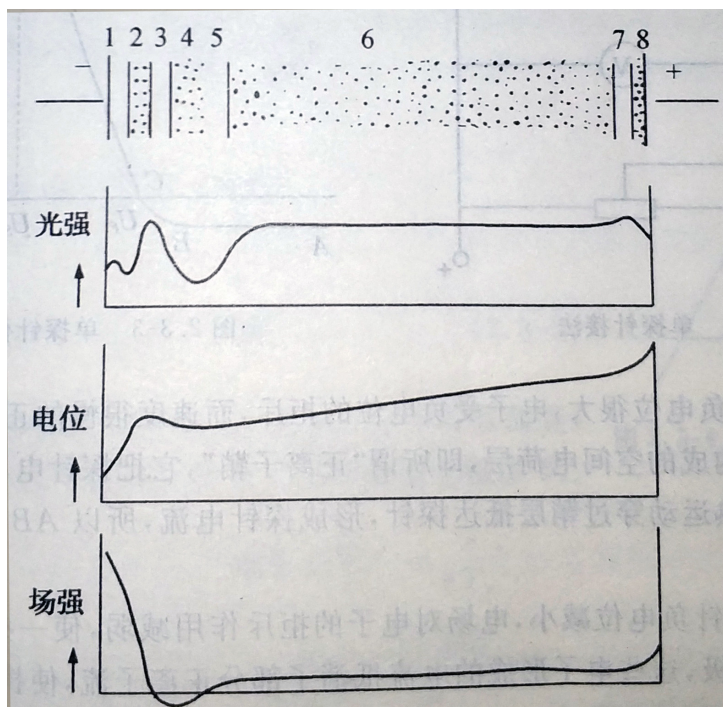


图 1: 辉光放电的光强、电位和场强的分布

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 105K)，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。

## 4.4 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 (1) 探针法, (2) 霍尔效应法, (3) 微波法, (4) 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。

### 4.4.1 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) 所示。

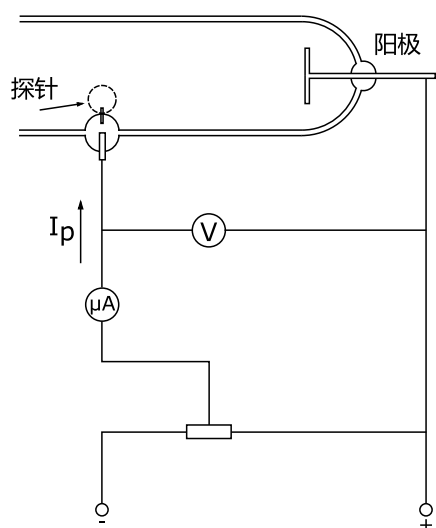


图 2: 单探针接法

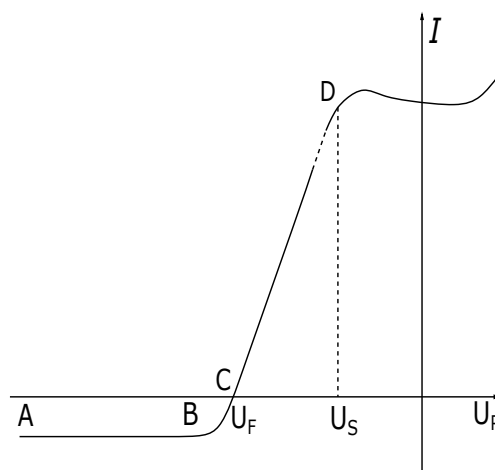


图 3: 单探针伏安特性

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：

在 AB 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，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 AB 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 BC 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 CD 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 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  $n_e$ ，按玻耳兹曼分布应为

$$n_e = n_0 e^{\frac{e(U_p - U_s)}{k_B T_e}} \quad (1)$$

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， $k_B$  为玻耳兹曼常数。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：

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

得探针上的电子电流

$$I = N_e e = \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e S e = I_0 e^{\frac{e(U_p - U_s)}{k_B T_e}} \quad (3)$$

其中

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

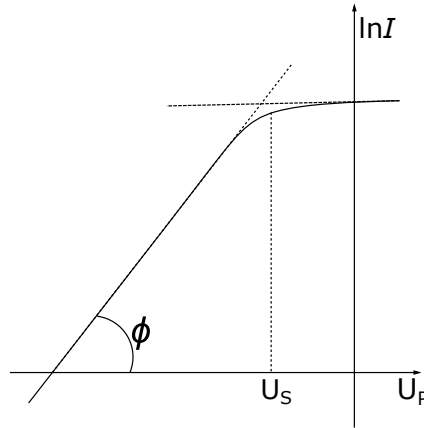


图 4: 单探针的半对数曲线

对式 (3) 取对数

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{e U_s}{k_B T_e} + \frac{e U_p}{k_B T_e}$$

其中

$$\ln I_0 - \frac{e U_s}{k_B T_e} = \text{常数}$$

故

$$\ln I = \frac{e U_p}{k_B T_e} + \text{常数} \quad (5)$$

可见电子电流的对数与探针电位呈线性关系。作半对数曲线，如图 (4) 所示，由直线部分的斜率  $\tan \phi$ ，可决定电子温度  $T_e$ ：

$$\tan \phi = \frac{\ln I}{U_p} = \frac{e}{k_B T_e}$$

$$T_e = \frac{e}{k_B \tan \phi} = \frac{11600}{\tan \phi} \quad (6)$$

若取以 10 为底的对数，则常数 11600 应改为 5040。

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

$$\bar{E}_e = \frac{3}{2} k_B T_e \quad (7)$$

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

式中  $m_e$  为电子质量。

由式 (4) 可求得等离子区中的电子密度：

$$n_e = \frac{4I_0}{eS\bar{v}_e} = \frac{I_0}{eS} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{k_B T_e}} \quad (9)$$

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积。

#### 4.4.2 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。

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 (5) 所示。

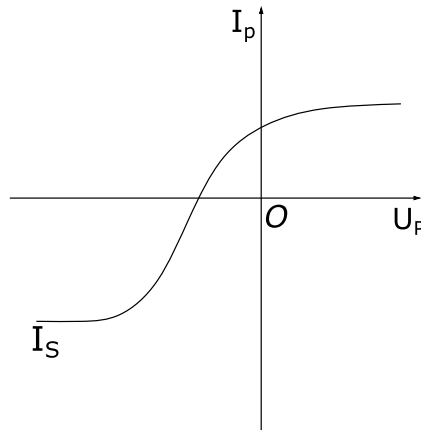


图 5: 双探针伏安特性

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  $T_e$ ：

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

式中  $I_{i1}$  和  $I_{i2}$  为流到探针 1 和 2 的正离子电流。它们由饱和离子流确定。 $\frac{dU}{dI}|_{U=0}$  是  $U=0$  附近伏安特性曲线斜率。

电子密度  $n_e$  为：

$$n_e = \frac{2I_s}{eS} \sqrt{\frac{M}{k_B T_e}} \quad (11)$$

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  $U_2$ ，得

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

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。

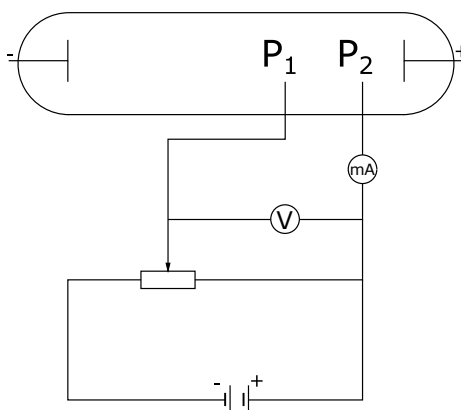


图 6: 补偿法接线

当电流表上得读数为 0 时，伏特表上得电位差除以探针间距  $l$ ，也可以得到  $E_L$ 。

## 5 实验内容

### 5.1 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。

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。

### 5.2 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。值得注意的是双探针法探针电流比单探针小两个数量级，故要选择合适的仪表量程。

## 6 实验数据

## 7 误差分析

## 8 思考题

8.1 气体放电中的等离子体有什么特征？

8.2 等离子体有哪些主要的参量？

8.3 探针法对探针有什么要求？

## 参考文献

[1] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.