

# 等离子体物理实验

## 期末口头报告

黎也

复旦大学物理学系

2023年6月7日

- ① 实验简介
- ② 实验原理
- ③ 实验内容

- ① 实验简介
- ② 实验原理
- ③ 实验内容

# 实验目的

本实验以直流辉光等离子体为例，并掌握等离子体检测的常用方法，同时了解等离子体物理的基本知识和一些重要的应用领域。

- 等离子体的 I-V 特性测量
- 气体击穿电压与电极间距的关系研究
- 等离子体稳定条件研究
- 探针法测电子温度

- ① 实验简介
- ② 实验原理
- ③ 实验内容

# 等离子体

随着温度的升高，物质一般会经历从固态、液态到气态的相变过程。温度升高将会有越来越多的物质被电离，变成了一团由电子、离子和中性粒子组成的混合物，称为等离子体

天体物理学家沙哈（Saha）给出公式，在热平衡的气体中，电离部分粒子数占总粒子数的比跟温度的关系为：

$$\frac{n_i}{n_0} \simeq 2.4^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/kT} \quad (1)$$

代入数据，。若要使电离成份占千分之一，必须使温度  $T$  高于  $10^4\text{K}$ 。

因此采用碰撞电离：气体中的带电粒子在电场中加速获得等量，这些能量大的带电粒子跟气体原子碰撞进行能量交换，从而使气体电离。碰撞电离中主要是电子的贡献。

# 实验仪器



图 1: DH2005 型直流辉光等离子体实验装置

- 顶部是放电管及水冷部分；
- 两端为高压加在放电管；
- 外面采用聚四氟乙烯绝缘材料绝缘；
- 两端为冷却水通过的循环水冷套对放电管进行冷却；
- 放电管内附两组钨丝电极，测定等离子体的一些基本参量。

# 气体放电

气体放电可以采用多种能量激励形式。直流放电因为结构简单、成本低而受到广泛应用。本实验适用的直流放电形成辉光等离子体的典型结构如图：

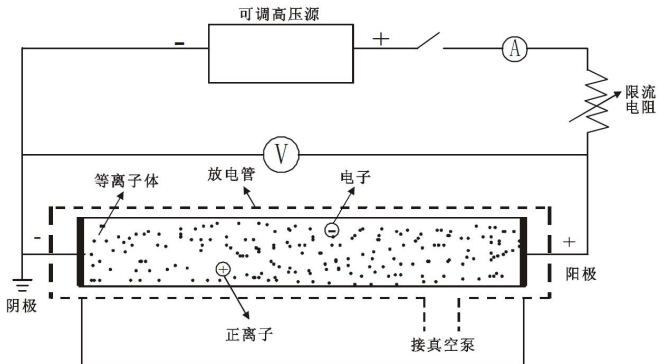


图 2: 气体放电管工作原理图



- ① 实验简介
- ② 实验原理
- ③ 实验内容

# 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量

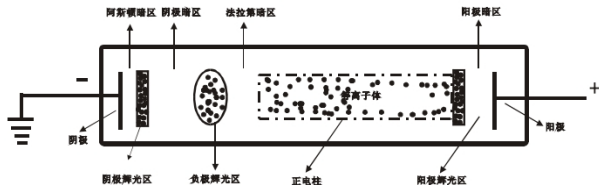


图 3: 低气压放电

低气压放电可分为三个阶段：暗放电、辉光放电和电弧放电。这三个阶段的划分从现象上来看是放电强度的不同，内在因素是其放电电压和放电电流之间存在显著差异，可通过测量 I-V 曲线可以了解其放电原理和现象。

## I-V 曲线

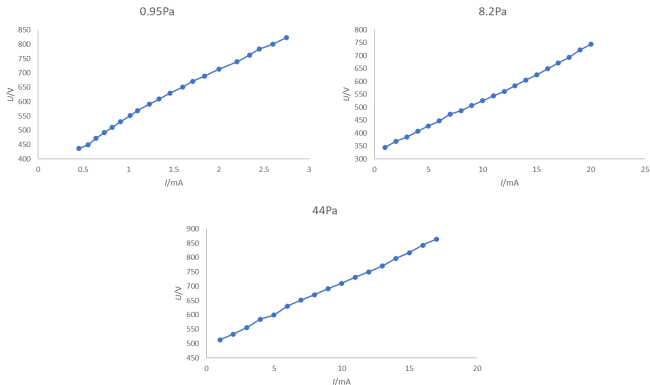


图 4: 辉光放电电压-电流曲线

直流辉光放电中, 电极距离一定时, 电流随电压的升高的增大, 且气压升高时, 电流增大的速率变快。

# 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证实验

在直流电气放电中，气体的击穿电压由下式决定：

$$V_b = \frac{Cpd}{\ln[Apd / \ln(1 + 1/\gamma)]} \quad (2)$$

某一特定气体的击穿电压仅仅依赖于  $pd$  的乘积，这一现象被称为帕邢（**Paschen**）定律。

# 帕邢定律

在保持  $pd$  乘积不变的条件下，取不同的  $p$ 、 $d$  值共 5 组，测量对应的气体击穿电压；

$P \cdot d / \text{Pa} \cdot \text{mm}$	$d / \text{mm}$	$P / \text{Pa}$	$V / \text{V}$
612	120	5.1	548
590	100	5.9	478
593.4	86	6.9	478
600	75	8.0	450
603	67	9.0	414

表 1:  $Pd$  乘积不变时变击穿电压  $V$

## 实验仪器

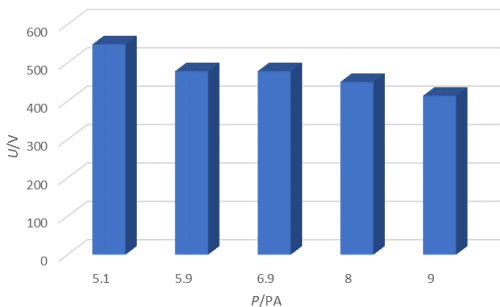


图 5:  $Pd$  乘积不变时变击穿电压  $V$

其中保证  $Pd$  乘积不变，但击穿电压仍有 10% 量级的变差，推测是气压计显示和气压控制不稳定导致。

# 帕邢定律

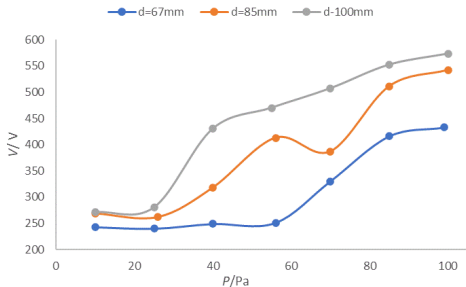
改变  $pd$  的值, 让其单调变化, 取不同  $pd$  值共 9 组, 测量对应的击穿电压。并绘制  $V$ - $pd$  曲线图:

$d = 67\text{mm}$		$d = 85\text{mm}$		$d = 100\text{mm}$	
$P/\text{Pa}$	$V/\text{V}$	$P/\text{Pa}$	$V/\text{V}$	$P/\text{Pa}$	$V/\text{V}$
10	243	10	269	10	271
25	240	26	262	25	280
40	249	40	318	40	430
56	251	56	413	55	470
70	330	70	387	70	507
85	416	85	511	85	552
99	433	100	542	100	573

表 2:  $Pd$  单调变化时击穿电压  $V$

# 帕邢定律

保证极板间距  $d$  不变，不同  $P$  下的击穿电压：



其中各个组内的  
击穿电压趋势基  
本符合帕邢定  
律。

图 6:  $V - P$  曲线



# 帕邢定律

绘制单调  $Pd$  下的击穿电压：

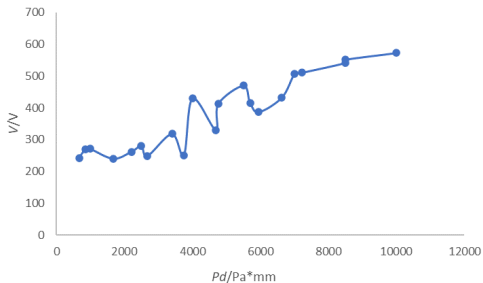


图 7:  $V - Pd$  曲线

其中各个组内的击穿电压在  $Pd$  单调时，有上升趋势，但是周期波动，这很可能是因为气压  $P$  仪器测量存在偏差导致的。

○

# 电子温度的测量

对于平衡态等离子体（高温等离子体）温度是各种粒子热运动的平均量度；对于非平衡态等离子体（低温等离子体），由于电子、离子可以达到各自的平衡态，故要用双温模型予以描述。一般用  $T_i$  表示离子温度， $T_e$  表示电子温度。实验用双探针法测量电子温度。



图 8: 双探针法

# 双探针法

对于等离子体有如下假设

- ① 被测空间是电中性的等离子体空间，电子密度  $n_e$  和离子浓度  $n_i$  相等，电子与离子的速度满足麦克斯韦速度分布；
- ② 探针周围形成的空间电荷鞘层厚度比探针面积的线度小，这样可忽略边缘效应，近似认为鞘层和探针的面积相等；
- ③ 电子和正离子的平均自由程比鞘层厚度大，这样可忽略鞘层中粒子碰撞引起的弹性散射、粒子激发和电离；
- ④ 探针材料与气体不发生化学反应；
- ⑤ 探针表面没有热电子和次级电子的发射。

则根据玻尔兹曼定理推出电子温度在探针加压为零附近的近似：

$$T_e = \frac{eI_i}{2k \left. \frac{dI}{dV} \right|_{(I=0, V=0)}} \quad n = I_+ / \sqrt{\frac{kT}{m(Ar)}} \quad (3)$$

# 电子温度的测量

选 3 组不同的负载电压、气压和电流测量双探针的 I-V 曲线。

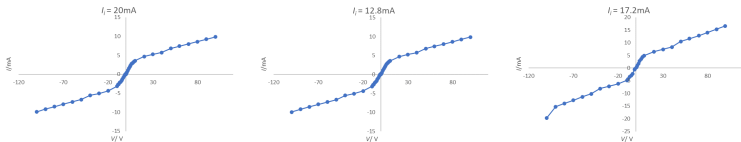


图 9: 实验中双探针 I-V 曲线

# 双探针法

根据拟合结果计算得

$V/V$	$I/\text{mA}$	$P/\text{Pa}$	$T_e/\text{eV}$	$n/\text{m}^{-3}$
488	19.9	9.42	27.87	1633.80
428	12.75	5.45	20.21	1229.40
323	17.25	5.57	15.90	1874.96

表 3: 电子温度与等离子体密度

其中前两组为直流功率一定，不同气压，后两组为气压一定，不同功率。测得得电子温度和等离子体得量级和趋势均与理论相符。

*Thanks!*