

# 直流辉光等离子体放电实验

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

**摘要:** 此实验中我们利用 DH2006 型直流辉光等离子体实验装置, 观察到了直流低气压辉光等离子体的放电现象; 并通过对辉光等离子体的伏安特性曲线的测量, 理解了辉光等离子体的电学特性和直流电气击穿的机制; 验证了帕邢定律; 并采用 Langmuir 双探针法测量得到了等离子体参数。

**关键词:** 等离子体; Langmuir 双探针; 击穿电压; 电子温度

## DC Glow Discharge of Plasma

Rong Liao

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

**Abstract:** In this experiment, we use DH2006 DC glow plasma experimental equipment, observed the glow plasma discharge phenomenon of DC low pressure. and By measuring the voltammetry characteristic curve of glow plasma, the electrical characteristics of glow plasma and the mechanism of DC electric breakdown are understood. Paschen's law is verified. The equiionization was measured by Langmuir double probe method.

**Keywords:** Plasma; Langmuir double probe; Puncture voltage; Electron temperature

### 1 实验原理

#### 1.1 稀薄气体产生的辉光放电

等离子体放电的伏安特性曲线如下图所示 [1]

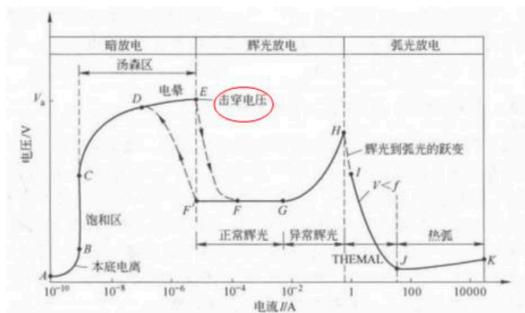


图 1: 等离子体放电伏安特性曲线

图中 A-E 区为暗放电区, 电流始终很小; 电压达到击穿电压后, 会有一显著下降, 随后进入辉光放电区, 即图中 F'-H 区。在这段区域中, 电流迅速增长, 在 F'-G 区, 电压不随电流增长; 随后在 G-H 区, 电压与电流一同增长; 电压继续增长则会进入弧光放电区, 放电电流极强。

本实验中, 主要研究的部分为 F'-H 区的辉光放电区辉光管伏安特性曲线。

#### 1.2 帕邢定律

在低气压直流放电中, 气体的击穿电压由下式决定:

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

$\gamma$  为二次电子发射系数, A, C 为和气体种类有关的系数, p 为压强, d 为阴阳极间距离,  $V_b$  为击穿电压。

#### 1.3 朗缪尔探针法

朗缪尔探针是一种双探针, 这种方法以一根与测量极相同的探针为参考极, 使两根探针均处于悬浮电位, 减少了探针对等离子体的影响, 使测量结果更加准确.[3]

双探针的伏安特性曲线满足以下方程:

$$\begin{aligned} I_D &= I_{io1} - I_{e2} = I_{e1} - I_{io2} \\ V_D &= V_{p1} - V_{p2} + V_e \\ I_{e1} &= I_{eo1} e^{-\frac{eV_{p1}}{kT_{e1}}} \\ I_{e2} &= I_{eo2} e^{-\frac{eV_{p2}}{kT_{e2}}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $I_{io1}, T_{io2}$  是探针 1、2 的离子饱和电流,

$I_{e1}, I_{e2}$  为电子电流,  $I_{eo1}, I_{eo2}$  为电子饱和电流,  $V_{p1}, V_{p2}$  为探针电位,  $V_e$  为两探针电位差。

当两探针距离足够近且等离子体均匀时, 有  $T_{e1} = T_{e2} = T_e$ ,  $n_{eo1} = n_{eo2}$ , 由2, 可得

$$\frac{I_{e1}}{I_{e2}} = \frac{I_{eo1}}{I_{eo2}} e^{-\frac{e}{kT_e}(V_D - V_e)} \quad (3)$$

对该式取对数并对  $V_D$  微分并令  $V_D = 0$  后, 有

$$kT_e = -e \frac{I_{io1} I_{io2}}{I_{io1} + I_{io2}} \left( \frac{dV_D}{dI_D} \right) \Big|_{V_D=0} \quad (4)$$

若两探针完全相同, 则  $I_{io1} = I_{io2} = I_{io}$ ,

$$kT_e = -e \frac{I_{io}}{2} \left( \frac{dV_D}{dI_D} \right) \Big|_{V_D=0} \quad (5)$$

由此式可求得电子温度  $T_e$

若电子能量符合麦克斯韦分布, 探针接受电子有效面积为  $S_e$ , 则探针饱和电流为

$$I_{eo} = \frac{en_e S_e \bar{u}_e}{4} \quad (6)$$

电子平均运动速度  $\bar{u}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$ , 则有

$$n_e = \frac{4I_{eo}}{eS_e} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT_e}} \quad (7)$$

由此式可求得电子密度  $n_e$

## 2 实验器材

## 3 实验步骤与结果

### 3.1 直流低气压放电现象观察及伏安曲线测量

固定电极距离, 取两个不同的工作气压 (20Pa, 40Pa), 测量辉光放电阶段的放电电压、电流, 记录结果并绘制电压-电流曲线。与理论相对照, 分析差异及原因。分析工作气压对伏安曲线的影响机制。

工作气压 20Pa		工作气压 40Pa	
电压 V	电流 mA	电压 V	电流 mA
1289	55.0	707	55.0
1234	50.0	678	50.0
1185	45.0	646	45.0
1110	40.0	624	40.0
1007	35.0	599	35.0
897	30.0	569	30.0
790	25.0	540	25.0
693	20.0	513	20.0
626	15.0	485	15.0
560	10.0	452	10.0
480	5.0	398	5.0

表 1: 电压、电流测量值

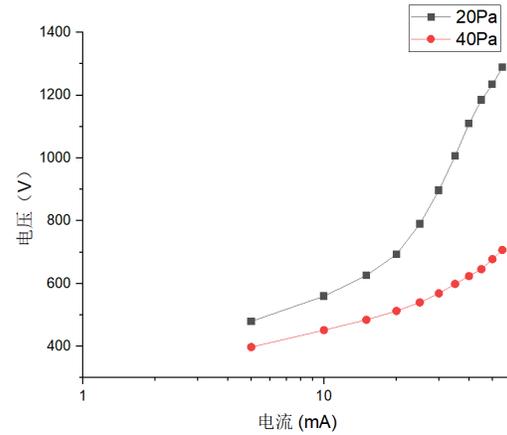


图 2: 工作气压为 20Pa 和 40Pa 时的电压-电流曲线

可以看出实验曲线与理论曲线的最大差异在于没有出现汤森区, 主要原因可能为实验器材对电流的控制不够精确, 使得等离子体未在汤森区停留而直接进入饱和区。但其他部分与理论拟合较好, 表现了正常辉光和异常辉光的伏安特性。

### 3.2 气体击穿电压的测定和帕邢定律的验证

使用击穿电压档, 当击穿电压显示值突变 (大于 0.5V) 并同时有放电现象时记录此时放电管电压值。放电现象出现后立刻降电压停止放电。保持  $d$  不变, 取五个不同的压强  $p$  (10 - 50Pa), 测量对应的气体击穿电压, 并作图分析。

压强 $Pa$	击穿电压 $V$
10	480
20	488
30	535
40	572
50	624

表 2: 不同工作气压下的气体击穿电压

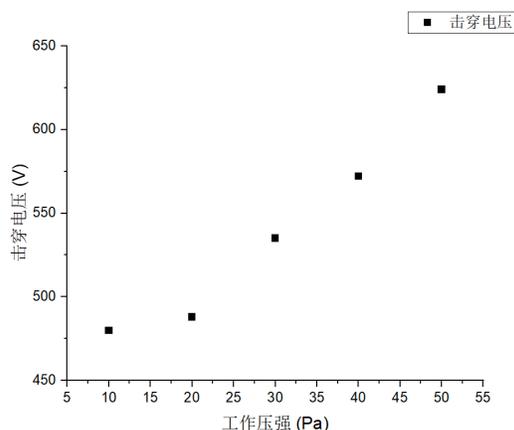


图 3: 气体击穿电压与工作压强的关系

根据帕邢定律公式, 我们可以预测随着气压从  $0Pa$  开始增大增大, 气体的击穿电压先从无穷大开始迅速衰减, 然后呈现出较好的线性增长, 此次实验中 2 到 5 号数据点均在先行区域内, 对其拟合可以得到如下结果:

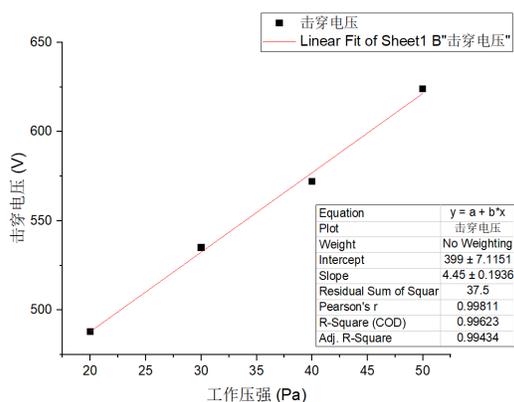


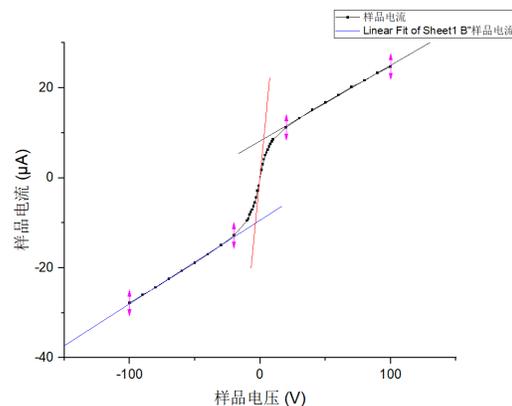
图 4: 线性增长区数据点拟合结果

其中  $R^2 = 0.996$ , 可以看出实验对帕邢定律的匹配较好。

### 3.3 朗缪尔双探针法测量电子温度和等离子体密度

保持电极距离不变, 采用朗缪尔双探针测量 2 组探针  $I - V$  变化数据, 保持气压为  $20Pa$ , 两组实验改变功率 ( $0 - 10V$  步长  $1V$ ,  $10 - 100V$  步长  $10V$ )。绘制出  $I - V$  曲线, 由曲线斜率根据上述公式计算出电子温度和电子密度, 并根据计算结果, 分别分析功率和气压对等离子体参数的影响和影响机理。[4]

电压 $V$	电流 $\mu A$	电压 $V$	电流 $\mu A$
1.0	1.7	-1.0	-1.8
2.0	3.0	-2.0	-2.9
3.0	4.1	-3.0	-4.4
4.0	5.0	-4.0	-5.5
5.0	5.6	-5.0	-6.3
6.0	6.2	-6.0	-7.1
7.0	6.9	-7.0	-7.6
8.0	7.5	-8.0	-8.2
9.0	8.1	-9.0	-9.1
10.0	8.5	-10.0	-9.5
20.0	11.2	-20.0	-12.8
30.0	13.2	-30.0	-15.0
40.0	15.1	-40.0	-17.0
50.0	16.7	-50.0	-18.9
60.0	18.4	-60.0	-20.7
70.0	20.2	-70.0	-22.5
80.0	21.6	-80.0	-24.4
90.0	23.3	-90.0	-26.0
100.0	24.7	-100.0	-27.8

表 3: 功率  $6.64W$ , 气压  $20Pa$  条件下的  $V - I$  关系图 5: 功率  $6.64W$ , 气压  $20Pa$  条件下的  $V - I$  关系

计算得到  $p = 20Pa, W = 6.64w$  时

$$I_{i01} = 8.81\mu A, I_{i02} = 9.99\mu A \quad (8)$$

$$\left(\frac{dI_D}{dV_D}\right)_0 = 2.95\mu AV^{-1} \quad (9)$$

于是电子能量  $\epsilon_e = 2.549eV$ , 电子温度  $T = 18463K$ , 电子密度  $n_e = 2.925 \times 10^{11}cm^{-3}$ .

计算得到  $p = 20Pa, W = 3.17w$  时

$$I_{i01} = 3.34\mu A, I_{i02} = 3.91\mu A \quad (10)$$

$$\left(\frac{dI_D}{dV_D}\right)_0 = 0.968\mu AV^{-1} \quad (11)$$

于是电子能量  $\epsilon_e = 3.021eV$ , 电子温度  $T = 21878K$ , 电子密度  $n_e = 2.687 \times 10^{11}cm^{-3}$ .

电压 $V$	电流 $\mu A$	电压 $V$	电流 $\mu A$
1.0	0.8	-1.0	-0.8
2.0	1.4	-2.0	-1.5
3.0	1.9	-3.0	-2.0
4.0	2.2	-4.0	-2.4
5.0	2.5	-5.0	-2.8
6.0	2.7	-6.0	-3.0
7.0	2.9	-7.0	-3.3
8.0	3.1	-8.0	-3.5
9.0	3.3	-9.0	-3.7
10.0	3.4	-10.0	-3.8
20.0	4.5	-20.0	-4.9
30.0	5.2	-30.0	-5.9
40.0	6.0	-40.0	-6.7
50.0	6.8	-50.0	-7.5
60.0	7.5	-60.0	-8.3
70.0	8.1	-70.0	-9.0
80.0	8.8	-80.0	-9.7
90.0	9.4	-90.0	-10.5
100.0	10.0	-100.0	-11.1

表 4: 功率  $3.17W$ , 气压  $20Pa$  条件下的  $V - I$  关系

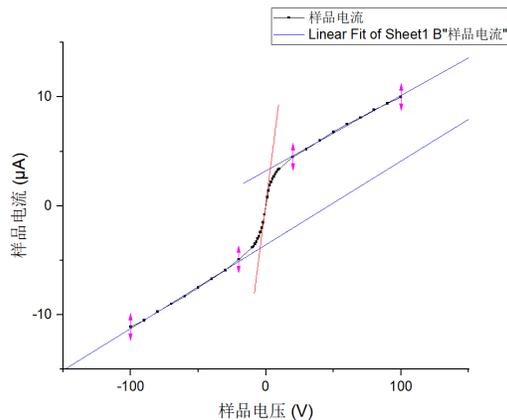


图 6: 功率  $3.17W$ , 气压  $20Pa$  条件下的  $V - I$  关系

### 3.4 思考题

#### 3.4.1 暗放电区电流的测量应该注意什么问题

1. 暗放电区电流较小, 且电流变化跨度较大 (达  $10^5$  倍) 并且无明显现象, 所以需要注意不要超过量程以至于烧坏仪器。

#### 3.4.2 阴极与阳极显著的热效应差别的原因

2. 等离子体由正离子与电子组成, 在阴极区放电的是正离子, 在阳极区放电的是电子, 而正离子质量远大于电子, 因此正离子能量大于电子, 在阴极区放电时热效应远高于阳极区电子放电。[2]

### 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 直流辉光等离子体放电实验 (实验讲义) .
- [2] 钟雷刘昊汪海胡明, 万树德. 磁控直流辉光等离子体放电特性. 物理学报, 2012.4.
- [3] 茅卫红、张慧云、陈宏. 低压直流辉光等离子体的放电特性. 第六届全国高等学校物理实验教学研讨会论文集 (下), 2010.
- [4] 谢行恕, 康世秀, 霍剑青. 大学物理实验, 第三册, 第二版. 高等教育出版社, 北京, 2005.