

# 辉光放电等离子体物理实验

李彬 19307110302

## 一、 实验目的：

理解低压气体直流击穿辉光放电的原理，观察实验现象。

掌握帕邢曲线的测量方法，验证帕邢定律。

学习单探针与双探针的工作原理，测量等离子体正柱区的电子温度与电子密度。

## 二、 实验原理：

### 1. 等离子体与辉光放电：

等离子体是由电子、离子和中性粒子组成的，宏观上呈现电中性，小尺度上呈现电磁性，且具有集体效应的混合气体。可以通过热电离、光电离与碰撞电离使物质的分子与原子电离，从而产生等离子体。

通过气体两端施加电场作为激励，气体分子会产生放电现象，产生数量可观的等离子体，同时，这一等离子体场会发出辉光，称为辉光放电现象。在管中不同区域的辉光放电呈现不同的状态，如图 1 所示。

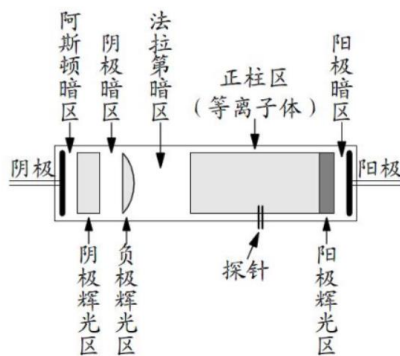


图 1 辉光放电现象

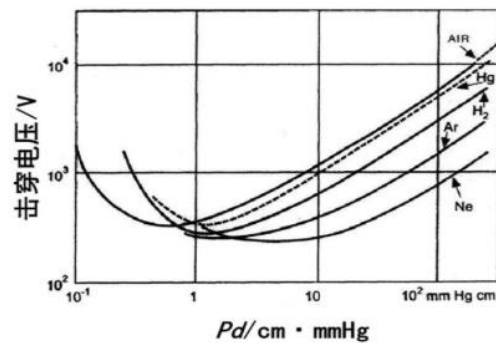


图 2 帕邢定律示意图

### 2. 帕邢定律：

放电电极间的电压增大时，管电流随之增加，而在某一阈值电压(击穿电压)处，出现管电流的突然增加，发生气体击穿现象。帕邢通过实验总结出击穿电压  $V_b$  与气压  $P$  和电极间隙  $d$  的乘积  $P \cdot d$  之间的关系：

$$V_b = \frac{Apd}{\ln\left(\frac{Bpd}{\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $\gamma$  为常数，由实验气体、阴极材料等实验因素确定。

对于不同的气体，曲线均具有式(1)的形式，如图 2 所示。在  $pd$  较大的区间， $V_b$  与  $pd$  近似呈线性，在特定的  $pd$  值时，将出现击穿电压  $V_b$  的最小值。

### 3. 双探针法测量等离子体参数：

电子温度与电子密度是描述等离子体的重要参量，实验上可采用双探针法进

行测量。

在正柱区插入探针，两探针间的电压为 $V$ ，测量通过探针的电量 $I$ ，推导可得二者关系：

$$I = 2i \tanh\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (2)$$

其 $I - V$ 图像如图 3 所示，在 $V$ 较小时近似有 $I = 2i \frac{eV}{kT_e}$ ；而在 $V$ 较大时 $I = 2i$ ，

因此可作原点处曲线的切线，与 $V$ 较大时的渐近线相交于 $V_0 = \frac{kT_e}{e}$ 。由此可得电子温度与密度：

$$T_e = \frac{V_0 e}{k} \quad (3)$$

$$n_e = \frac{I}{\sqrt{\frac{kT_e}{m}}} \quad (4)$$

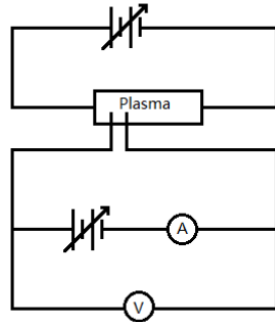


图 3 双探针法测量原理图

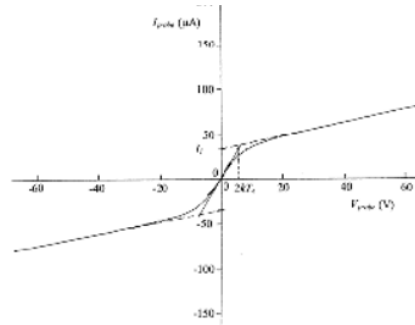


图 4 双探针法测定 I-V 图像

### 三、 实验器材：

Ilab-x 平台的“辉光放电等离子体物理系列实验”模块

### 四、 实验内容：

本实验首先观察辉光放电现象

### 五、 实验记录：

#### 1. 辉光放电现象与击穿特性测量：

打开保护开关，选择“击穿电压测量”模式，开启工作钥匙，开启冷却水、抽气泵、开启电阻规测量气压。

开启氩气气瓶阀门，开启气体阀门，调节减压阀，控制气压。旋转仪器流量计“气源流量”旋钮，控制示数 20Pa。

开启高压，旋转电压粗调旋钮，放电管电压达到 365V 时（对应击穿电压 0.545V），出现辉光放电现象，如下图。

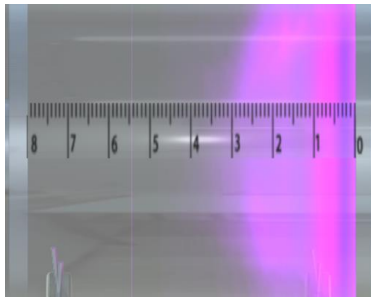


图 1 辉光放电现象

旋转电压粗调旋钮，使电压下降为 0，辉光随电压下降而消失。  
重复上述操作，测量不同气压下的击穿电压。

表格 1 不同气压下击穿电压

气压 $P/\text{Pa}$	放电管电压/V	击穿电压/V
20	365	0.545
30	460	0.605
40	501	0.631
18	346	0.524
16	334	0.623

依次关闭气流计、高压、电阻规、真空泵、冷却水、工作钥匙与保护开关，关闭氩气瓶气压总阀与泄压阀。

## 2. 双探针法测量电子温度与电子密度：

接入探针。

依据前述步骤开启仪器。调节气流计，示数为 11Pa。开启高压，旋转粗调旋钮，产生辉光，此时辉光电流为 5.00mA，放电管电压为 685V。

调节探针电压粗调旋钮，设定为 0.2V，以步长 0.2V 调节至 2V，以 1V 为步长调节至 10V，以 5V 为步长调节至 60V，记录数据。

表格 2 双探针法，不同探针电压下的探针电流

探针电压/V	探针电流/mA
0.20	0.18
0.40	0.26
0.60	0.37
0.81	0.50
1.00	0.61
1.19	0.73
1.40	0.86
1.59	0.97
1.80	1.10
1.99	1.22
2.99	1.83
4.01	2.46
5.00	3.06
6.06	3.71

7.02	4.30
8.05	4.93
8.98	5.49
10.02	6.13
15.03	9.20
20.07	12.28
25.17	15.41
30.36	18.58
34.96	21.39
40.02	24.49
45.15	27.63
50.00	30.60
54.99	33.66
60.97	37.31

将电压调节为 0V，拨动电压正负开关，将电压反向。

表格 3 双探针法，不同探针电压下的探针电流

探针电压/V	探针电流/mA
-0.20	-0.12
-0.40	-1.25
-0.60	-0.25
-0.82	-0.34
-1.03	-0.50
-1.21	-0.50
-1.41	-0.58
-1.62	-0.67
-1.83	-0.76
-2.01	-0.83
-3.08	-1.27
-4.07	-1.68
-5.06	-2.10
-6.09	-2.52
-7.03	-2.91
-8.05	-3.33
-9.00	-3.73
-9.98	-4.13
-15.19	-6.29
-20.00	-8.28
-24.55	-10.
-30.31	-12.
-35.02	-14.
-39.87	-16.
-45.11	-18.
-50.00	-20.

-55.29	-22.
-61.10	-25.

关闭探针电压、放电管电压、高压开关、电阻真空计开关、真空泵开关，取下探针连接线，关闭冷却水，关闭工作钥匙，关闭保护开关。

关闭总阀门与减压阀门。

## 六、数据处理：

### 1. 击穿特性测量：

电极间距为 8.00cm，采用式(1)进行拟合，如图所示，得到拟合结果：

$$A = 0.3199$$

$$B = 3.724$$

$$\gamma = 0.0926$$

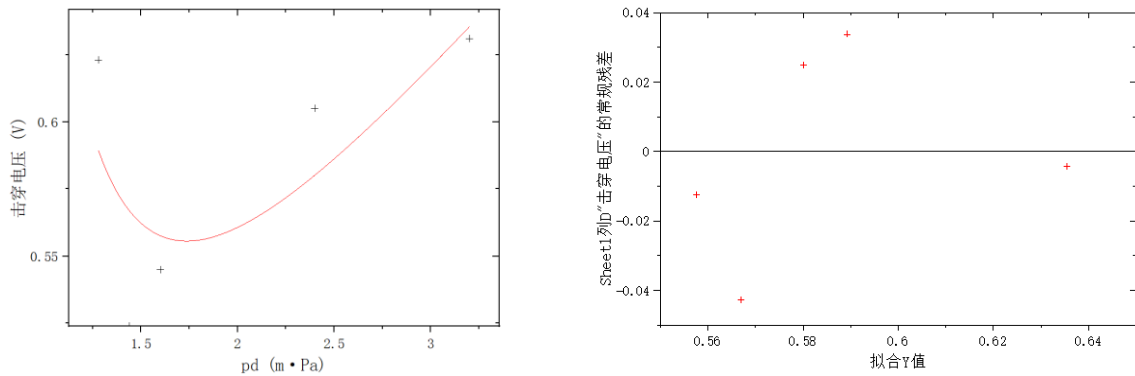


图 2 击穿电压与 pd 值的拟合图与残差图

从拟合图像上看，拟合程度低，残差图显示残差分布于 $[-0.04V, 0.04V]$ 区间，拟合残差大约为数值的 7.3%，存在较大的误差。

通过对拟合后的数值，代入式(1)，并对其求导函数零点，得到击穿电压最小值对应的 $P \cdot d$ 值：1.737m·Pa；测量数据的最低点为 1.44 m·Pa，以之近似为曲线的最低点，因此有误差 20.6%。此外，从图像可看出，拟合曲线最低点约 0.5556V，高于测量数值的最小值 0.524V，误差约为 6.03%。

实验的主要误差来源是实验测量取点过少，导致曲线拟合精度不高。因此，本次整体的测量精度约在 10%-20%，在半定量的情况下验证了帕邢定律。

### 2. 双探针法测量电子温度与电子密度：

绘制散点图：

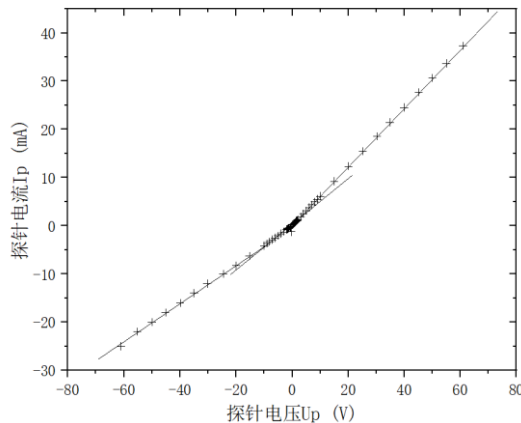


图 3 探针电流随探针电压变化图像

图像整体上由三段斜率不同的直线组成，分别拟合得出直线方程，计算交点，得到电子温度与密度。与理论图像不同的是，实际测得的曲线在电压较大时并探针电流未出现饱和，而是仍与电压呈较好的线性关系。这可能是由于实际测量过程中，由于探针电压较大，对体系产生了进一步的电离，增大了探针电流，维持了线性关系。

对探针电压为[-2V, 2V]区间的数据进行拟合，得到结果：

斜率： $k = 0.54 \pm 0.04$

截距： $b = 0.06 \pm 0.06$

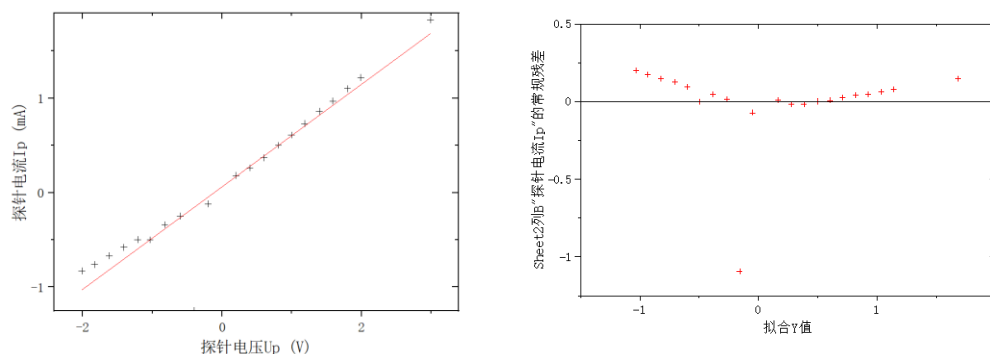


图 4[-2V, 2V]区间拟合图像与残差图

对探针电压为[-60V, -10V]区间的数据进行拟合，得到结果：

斜率： $k = 0.400 \pm 0.004$

截距： $b = -0.11 \pm 0.15$

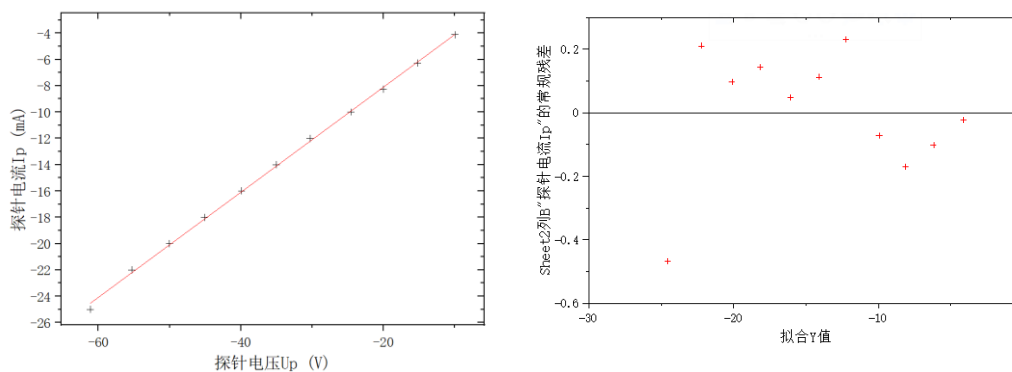


图 5[-60V, -10V]区间拟合图像与残差图

对探针电压为[10V, 60V]区间的数据进行拟合，得到结果：

斜率： $k = 0.6120 \pm 0.00007$

截距： $b = -0.0005 \pm 0.003$

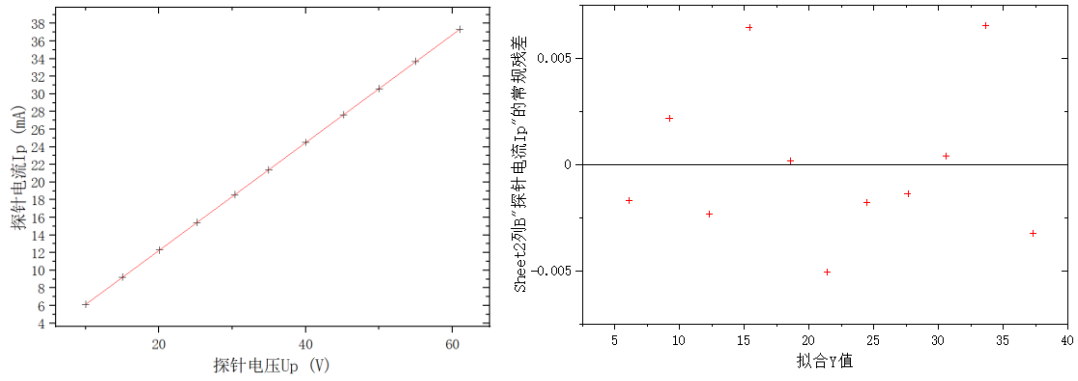


图 6[10V, 60V]区间拟合图像与残差图

计算得到交点为:

$$V_{b1} = -0.36 \pm 0.07V, I_1 = -0.14 \pm 0.17mA$$

$$V_{b2} = 0.83 \pm 0.04V, I_2 = -0.51 \pm 0.16mA$$

取均值得

$$V_0 = 0.60 \pm 0.06V, I = 0.33 \pm 0.17mA$$

代入式(3)、式(4)得:

$$T_e = \frac{V_0 e}{k} = (6.9 \pm 0.7) \times 10^3 K$$

$$n_e = \frac{I}{\sqrt{\frac{kT_e}{m}}} = (1.01 \pm 0.12) \times 10^{-9} m^2 \cdot C$$

可见电子温度远高于室温,表明气体的辉光放电需要较大的能量,若单纯采用升温的方式,则需要升高至 $10^3 K$ 至 $10^4 K$ 的数量级。

## 七、实验结论:

本实验首先观察了辉光放电的基本实验现象,测定击穿电压随 $P \cdot d$ 值的变化曲线,在误差允许的范围内验证了帕邢定律;本实验进一步用双探针法,测量了气压为11Pa、辉光电流为5.00mA、放电管电压为685V的条件下,测定探针电流、电压的变化图像,并以此计算氩气的电子温度与电子密度,得到结果 $T_e = (6.9 \pm 0.7) \times 10^3 K$ 、 $n_e = (1.01 \pm 0.12) \times 10^{-9} m^2 \cdot C$ 。