

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。

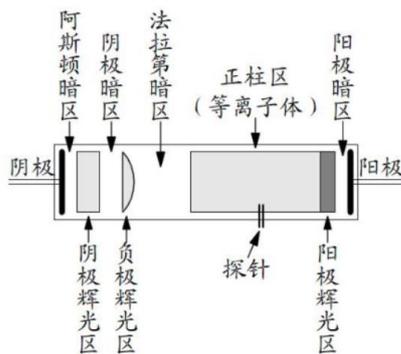


图 1 辉光放电现象

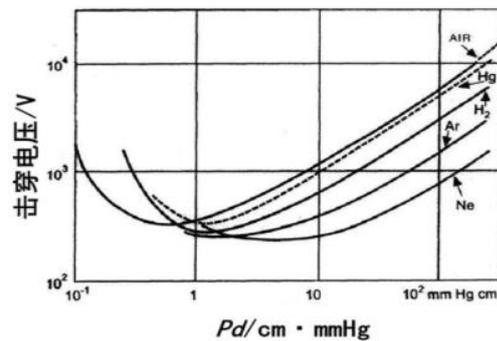


图 2 帕邢定律示意图

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 、 γ 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：

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

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

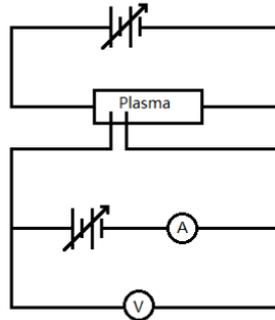


图 3 双探针法测量原理图

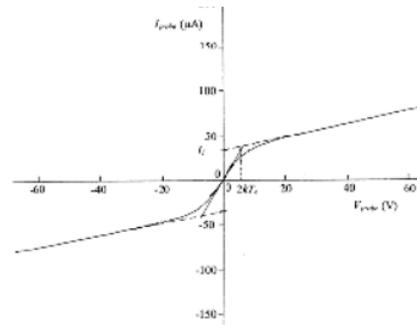


图 4 双探针法测定 I-V 图像

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。

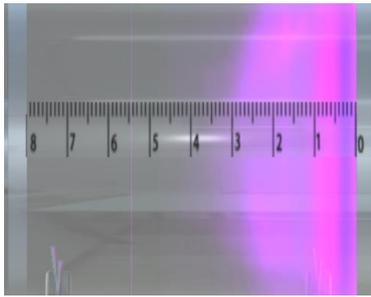


图 1 辉光放电现象

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/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：

$$A = 0.3199$$

$$B = 3.724$$

$$\gamma = 0.0926$$

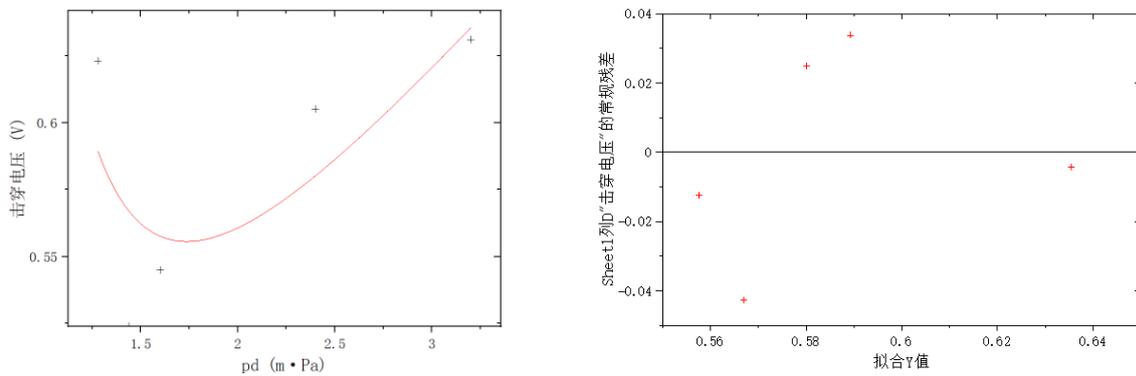


图 2 击穿电压与 pd 值的拟合图与残差图

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：

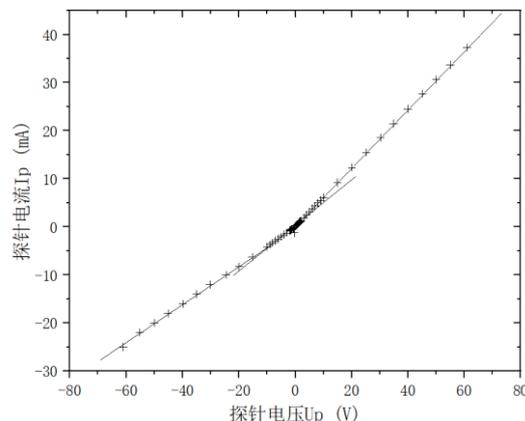


图 3 探针电流随探针电压变化图像

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： $b = 0.06 \pm 0.06$

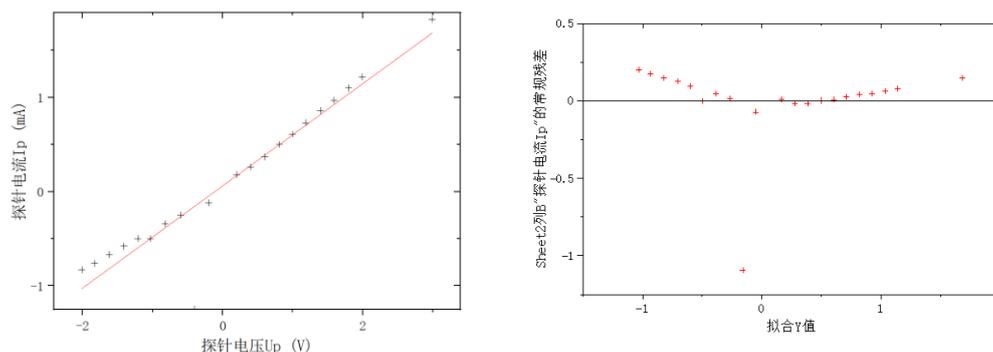


图 4[-2V, 2V]区间拟合图像与残差图

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： $b = -0.11 \pm 0.15$

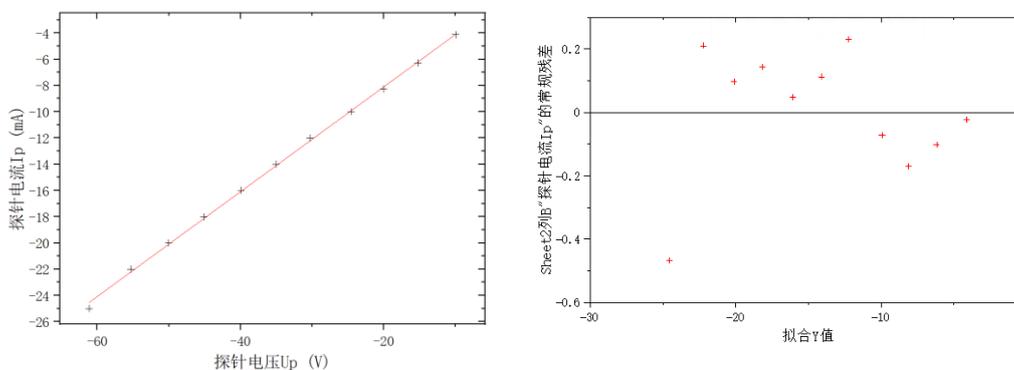


图 5[-60V, -10V]区间拟合图像与残差图

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： $b = -0.0005 \pm 0.003$

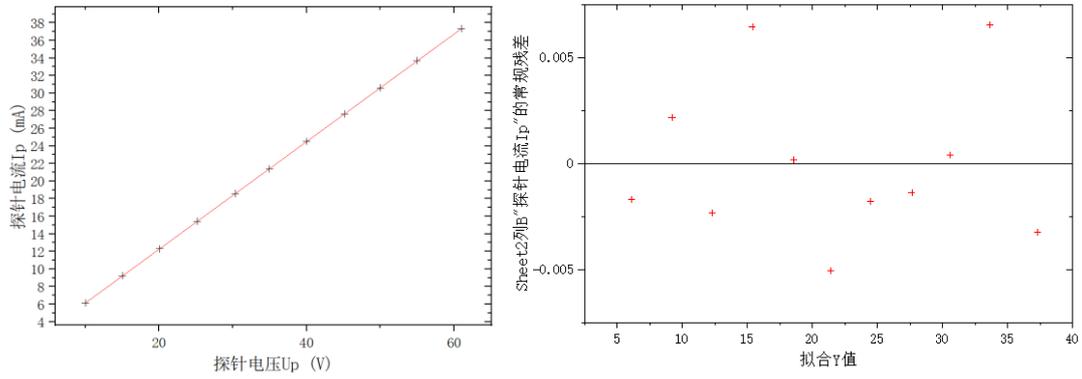


图 6[10V, 60V]区间拟合图像与残差图

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 10^3K 至 10^4K 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 $T_e = (6.9 \pm 0.7) \times 10^3 K$ 、 $n_e = (1.01 \pm 0.12) \times 10^{-9} m^2 \cdot C$ 。