

对等离子体辉光放电性质和参数的研究

易开济 06307050018

摘要：利用直流辉光等离子体试验装置观察等离子体不同气压下放电现象，并测量了伏安曲线。测定气体击穿电压，验证了帕邢定律的符合情况。此外，利用 Langmuir 双探针法测量了等离子体的参数，并分析了功率和气压对电子温度和等离子体密度的影响。

关键词：等离子体 辉光放电 双探针法 电子温度 等离子体密度

1. 引言^[1]

等离子体作为物质的第四态，在工业、农业、国防、医药卫生等领域获得了越来越广泛的应用，其主要原因在于等离子体具有两个主要特征：同化学和其他的方法相比，等离子体具有更高的温度和能量密度；等离子体能够产生活性成分，从而引发在常规化学反应中不能或难以实现的物理变化和化学反应。活性成分包括紫外和可见光子、电子、离子、自由基；高反应性的中性成分，如活性原子，受激原子态、活性分子碎片，如单体。等离子体技术是一个关系国家能源、环境、国防安全的重要技术，在国内，关于等离子体技术的研究和教学远远落后于等离子体技术在工程中的应用，具体体现在很多领域，如微电子、光学镀膜等领域。所以了解等离子体测量系统及等离子体本身性质对研究此项技术有非常重要的意义。^[2]

气体低压放电课分为三个阶段：暗放电、辉光放电和电弧放电。其中各个阶段的放电在不同的应用领域有广泛的应用。这三个阶段的划分从现象上来看是放电强度的不同，从内在因素来看是其放电电压和放电电流之间存在着显著差异。经典的直流低气压放电在正常的辉光放电区示意图如下图：

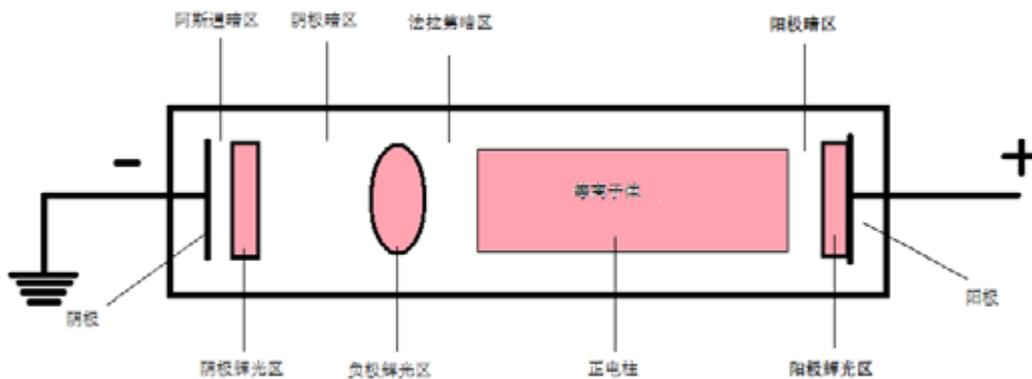


图 1 辉光放电区示意图

从左至右，其唯象结果如下：

阴极区 包括阴极，Aston 暗区，阴极辉区和克洛克斯暗区。

负辉区 整个放电管中最亮的区域。其中电场相当低。几乎全部电流由电子运载，电子在阴极区被加速产生电离，在负辉光区产生强爆发。

法拉第暗区 在这个区域里，由于在负辉光区里的电离和激发作用，电子能量很低。净空间电荷很低，轴向电场也很小。

正柱区 正柱区是准中性的，电场很小，一般是 1v/cm 。这种电场的大小刚好足以在它的阴极端保持所需的电离度。空气中正电柱等离子体是粉红色至蓝色。正电柱是一个长的均

匀的辉光，是等离子体最均匀的部分，也是本实验中探针放置的位置。

阳极辉光区 阳极辉光区是在正电柱的阳极端的亮区，比正电柱稍亮一点，在各种低气压辉光放电中并不总有。它是阳极鞘层的边界。

阳极暗区 阳极暗区在阳极辉光和阳极本身之间，他是阳极鞘层，他有一个负的空间电荷，是在电子从正电柱向阳极运动中引起的，其电场高于正电柱的电场。^[3]

本实验运用杭州大华 DH2005 型直流辉光等离子体实验装置改变工作气压、电极距离等影响等离子体的参数，工作气体为 Ar 气，研究等离子体的激发原理和影响因素。

2. 实验原理

1. 帕邢定律

在直流电气放电中，气体的击穿电压由下式决定：

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

上式表明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定律。

2. 等离子体参数：

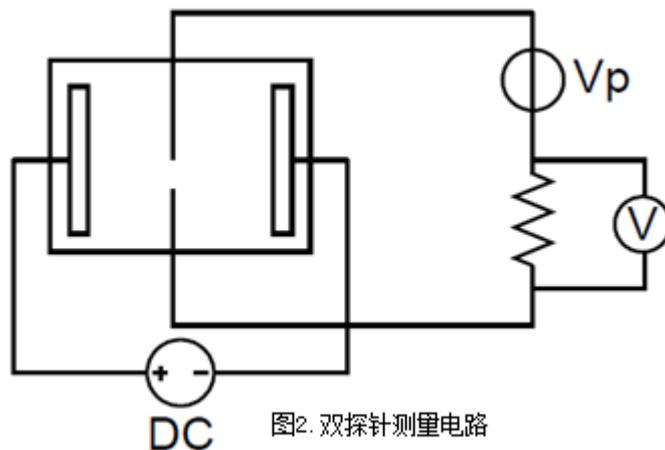
a: 等离子体密度：单位体积内某带电粒子的数目。 n_i 代表粒子浓度， n_e 表示电子浓度

b: 等离子体温度：对于平衡态等离子体（高温等离子体），温度是各种热运动的平均量度；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表述。一般用 T_i 表示等离子体温度， T_e 表示电子温度。

c: 德拜长度：等离子体内电荷被屏蔽的半径，表示等离子体内能保持的最小尺度。当正负电荷置于等离子体内部是就会在其周围形成一个异号电荷的“鞘层”。

$$\text{德拜长度： } \lambda_D = (kT_e/4\pi e^2)^{1/2} \quad (1)$$

3. 等离子体参数的 Langmuir 双探针测量原理



假设：

(1) 被测空间是电中性的等离子体空间（正柱区），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发射。

理想的双探针曲线如图 2，然而在实验中的双探针曲线(I-V 函数关系曲线)大致如图 3。

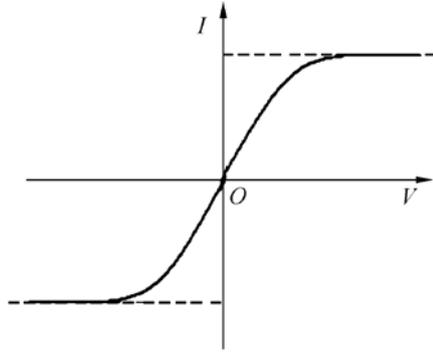


图 3：理想双探针曲线图

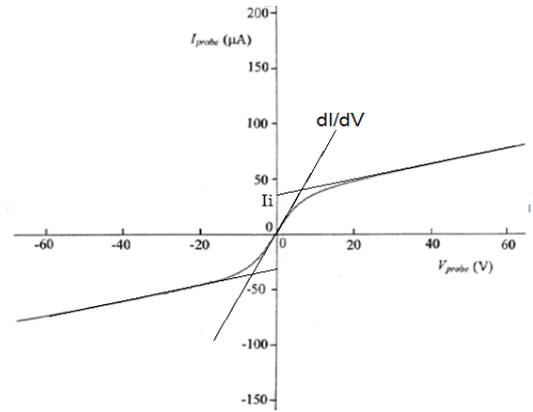


图 4：试验中的双探针曲线

由图 4，分别做两段直线拟合，由截距 I_i 和斜率近似为 $\frac{dI}{dV(I=0, V=0)}$

可以计算出电子温度 $T_e = \frac{eI_i}{2k \frac{dI}{dV(I=0, V=0)}}$

等离子体密度: $n = \frac{I_i}{\sqrt{\frac{kT_e}{mi}}}$

4. 试验结果

3.1 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量

先打开真空泵电源，抽取本地真空约 5 分钟后，打开转子流量计，调节气体流量到一定值，调节隔膜阀，同时调节微调阀将气体稳定在所需工作气压，打开高压并将工作选择打到辉光放电测量。缓慢调节高压调节旋钮，调节高压的大小，同时根据电流值的大小，转换不同的电流量程，记录下辉光放电时电压和电流的测量结果。取 3 个不同的工作气压(11Pa, 24Pa, 33Pa)，绘制电压—电流曲线结果如图 5

可以看到辉光电流的大小随着电压的增大而增大，但是关系非线性。此外，相同电压下，气压越大辉光电流越大。这是因为气压越大，试验装置内的氩气越多，被电离的气体也越多，使辉光电流变大。

随着气压的上升，可以看到最小击穿电压随着气压的上升而

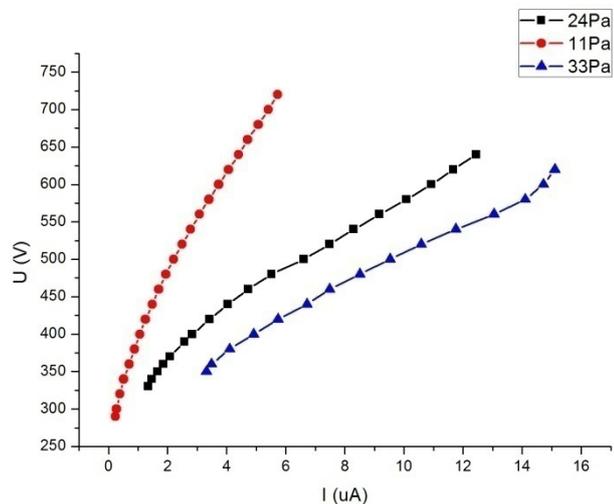


图 5 不同气压下伏安特性曲线的测量 d=60mm

变大。这也就是帕邢定律所表达的内容，对于这个问题，放在下一部分详细讨论。

4.2 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证试验

保持 $d=60\text{mm}$ 不变，抽取本地真空约 5 分钟后，将工作选择打到击穿电压测量。缓慢调节高压调节旋钮，调节高压大小，观察击穿电压测量表，当击穿电压突然增大时，记下该击穿电压值 V （放电管电压测量表）。调节不同工作气压，记下相应时的击穿电压值。按照不同的 pd 值，绘制 V - pd 曲线，如图 6

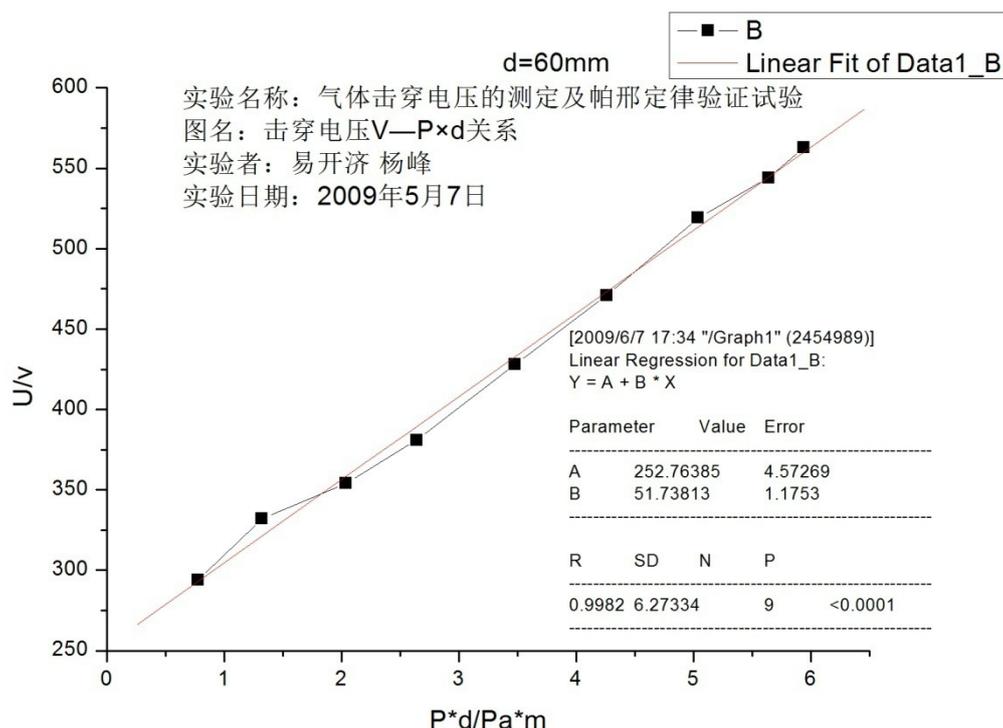


图 6 帕邢定律验证 V — pd 关系图

在测量范围内，最小击穿电压和 pd 之间存在线性关系，这与公式 $V_b = \frac{Cpd}{\ln[Apd / \ln(1+1/\gamma)]} = f(pd)$

并不一致，取函数 $f(x) = x / \ln(x)$ 做图，如图 7。可见在 x 比较大的时候，帕邢定律退化成为类似一次曲线的形式。拟合得到在测量范围内有：

$$U = (252p + 51) / \text{伏特}$$

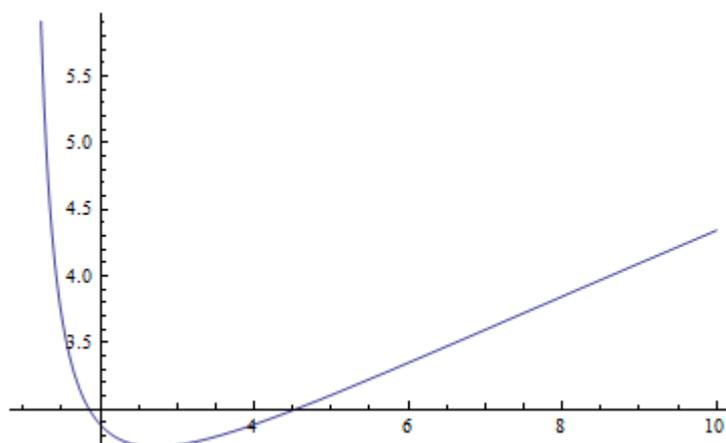


图 7 函数 $f(x) = x / \ln(x)$ 示意图

3.3 直流辉光放电等离子体参数的测量

根据图 2 将双探针与电流表和电压表串联,连接好试验线路。在电极距离一定的情况下,抽取本底真空约 5 分钟后,接通电阻真空计电源,测量放电管内真空度。然后调节气源流量至适当值,同时通过调节隔膜阀和微调阀流量,气压稳定在所需工作气压 P,将工作选择打到辉光放电测量,缓慢调节高压,调节电压所需功率(实际测量中选择 2w, 4w 两个功率分别测量)。再将工作选择打到探针电压,缓慢调节电压,根据电流值大小,改变电流测量量程,依次记录下 V-I 关系数据。然后改变气压 P(实际测量中选择 20Pa 和 40Pa 分别进行测量),重复这一过程。不同条件下 V-I 关系曲线见图 8。

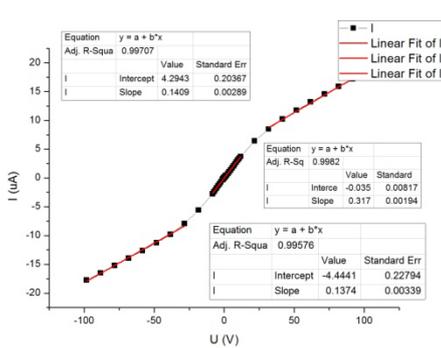


图 8(a) 20Pa, 1.96w, 60mm Te=6.92eV
 $n=2.43 \cdot 10^7 / m^3$

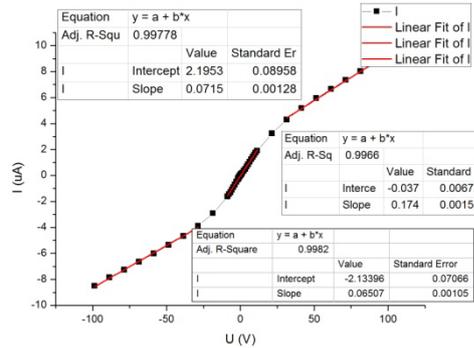


图 8 (b) 41Pa, 2.04w, 60mm Te=6.47eV
 $n=1.29 \cdot 10^7 / m^3$

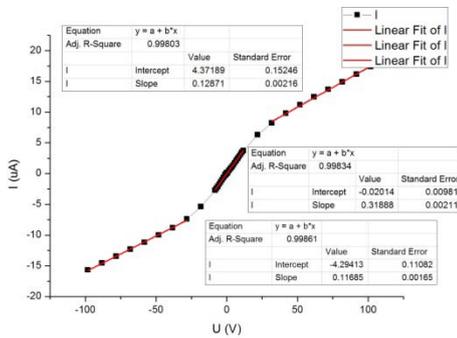


图 8(c) 42Pa, 3.98w, 60mm Te=7.05eV
 $n=2.45 \cdot 10^7 / m^3$

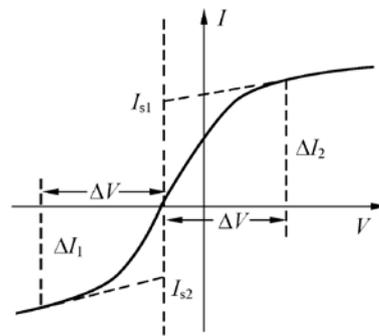


图 9 V-I 曲线的不对称性

1. 由原始测量数据可以看到, 探针电流 $I = 0$ 时, $V \neq 0$, 这是由于两探针处在等离子体的不同空间电位上导致的^[4], 因此当探针电压 $V = 0$ 时, 空间电位差导致探针电流 $I \neq 0$ 。因此所有试验数据都经过平移后使得当 $I = 0$ 时, $V = 0$ 。
2. 在对 I-V 曲线 $V > 0$ 和 $V < 0$ 的拟合中发现, 两段线性拟合的斜率和截距都不相同, 但是相差并不是很大。而且存在一个普遍现象是 $V > 0$ 部分的斜率大于 $V < 0$ 部分, 这可能是因为测量过程中辉光放电功率总有下降趋势, 导致测量过程中两段曲线的不对称性。
3. 比较图 8 (a) (b) 可以发现, 其他条件相同, 当气压变大时, 电子温度和等离子体密度都变小。因为气压变大, 则辉光放电管内的氩气变多, 气体的平均自由程减小, 氩气被电离的概率和被电离后电子获得的能量减小, 因此电子温度和等离子体密度都变小。

4. 比较图 8 (b) (c) 可以发现, 其他条件相同, 当功率变大时, 电子温度和等离子体密度都变大。功率变大时, 能够电离的氩气变多, 辉光放电管内被电离出来电子获得的能量变大, 使得电子温度和等离子体密度都变大。
5. 对于电子温度和等离子体密度的测量误差主要由截距 I_i 的拟合引起, $\frac{dI}{dV(l=0, V=0)}$ 测量点的密度很大, 误差很小。一般电子温度中的测量误差在 3%-4%。而不同条件下电子温度的相对差距在 8%-10%。而且多次试验的结果中气压和功率对电子温度和等离子体密度影响都有相同的结果。因此可以认为测量结果是比较准确的。

4. 总结

通过直流辉光等离子体实验装置研究了等离子体各种性质, 并对各种现象做了分析和讨论。

1. 对直流低气压放电现象进行了观察以及对不同气压下辉光放电的伏安曲线进行了测量。在高压足够大的范围 (辉光放电现象非常明显, 氩气被电离的程度高), 随着气压的上升, 同样电压辉光电流变大。
2. 对不同气压下气体击穿电压进行了测定并对帕邢定律验证。证明了在测量范围内出现的结果符合帕邢定律在 pd 比较大时情况。
3. 通过双探针测量法对等离子体参数进行了测量。根据测量结果对于气压和功率对于电子温度和等离子体密度的影响进行了分析, 表明功率越大, 气压越小, 电子温度和等离子体密度越大。此外还对结果进行了误差分析, 证明数据处理的结果是可靠的。

5. 未来展望

在双探针测量法的基础上, 可以对于不同气压和功率下的电子温度和等离子体密度进行更多的测量, 来进一步寻找具体的函数关系。但在实验中要保证数据的误差不影响结果获得, 需要尽可能的是气压稳定, 以及解决辉光放电功率在试验中随时间不断衰减的问题。

此外, 我们还对单针测量进行了初步的尝试, 但由于探针扫描电压的范围 (-100v~+100v) 太小, 无法获得完整的单针测量曲线, 也就无法测定电子温度和等离子体密度, 以此来对双探针测量的结果进行比较。因此如果能改进探针扫描电压的范围, 那么下一步可以尝试单针测量的方法。

6 致谢

十分感谢乐永康老师在试验过程中的帮助和指导, 此外感谢合作者杨峰同学在试验过程中的配合和协助。

参考文献:

- [1] DH2005 型直流辉光等离子体试验装置使用说明书, 杭州大华科教仪器研究所
- [2] 陈 FF 著, 林光海译, 《等离子体物理导论》, 人民教育出版社, 1980: 16-26
- [3] 张洪志等, 气体放电等离子体特性测量 I-V 曲线不对称性的研究, 物理实验, 2006.6.No.7 Vol.26 35~38
- [4] 刘浏, 双探针法测量直流辉光放电等离子体参数, 复旦大学
- [5] 李靖, 等离子体参数测量曲线研究, 复旦大学材料系

[6] E. O. Johnson, L. mater. A Floating Double Probe Method for Measurements in Gas Discharges. [J].Physical Review, 1950, 80(1):58-68.

Investigations on the Properties of Plasma in Gas Discharge and

Plasma Parameter

Kaiji Yi

(Department of Physics Fudan University)

Abstract: Measure the I-V curve of the plasma in gas discharge and compare with the Paschen Law. By using Langmuir double probe method measure the electron temperature and plasma densities, then analyze the influence of different pressure and power on plasma parameter.

Key words: plasma; gas discharge; Langmuir double probe; electron temperature; plasma densities