

实验 14 直流辉光等离子体放电研究实验

固体、液体和气体是我们常见的物质形态，等离子体是物质存在的第四状态，是一种由带电粒子（自由电子和离子）组成的准中性电离气体。等离子体在自然界和实验室中广泛存在，火焰、雷电、核武器爆炸、地球外层大气的电离层中都存在者等离子体。宇宙空间物质存在的主要形态是等离子体态，太阳就是一个较大的等离子体球。历史上，等离子放电的研究可以追溯到 18 世纪末的电气实验，本杰明·富兰克林通过风筝实验初步探索了雷电的电气性质。随后，19 世纪的科学家如迈克尔·法拉第和威廉·克鲁克斯进一步推动了气体放电现象的研究。克鲁克斯管的发明为阴极射线的发现奠定了基础，而这些射线最终被证明是电子的存在证据。进入 20 世纪，欧文·朗缪尔提出了“等离子体”这一术语，用于描述在气体放电过程中产生的带电粒子集合，并发明了朗缪尔探针来测量等离子体的物理参数。随着研究的深入，等离子体物理学在 20 世纪中叶成为核聚变研究的重要组成部分。通过等离子放电实验，科学家们努力创造和控制高温等离子体，以实现核聚变反应。与此同时，等离子体技术也在工业应用中得到广泛发展，如等离子蚀刻和等离子喷涂等技术，成为半导体制造、材料表面处理等高科技领域的重要工具。

本实验将带领学生探索等离子体放电的基本原理，观察等离子体的放电现象，测量等离子体的物理参数，并讨论其在科学研究和工业中的广泛应用。通过实验，帮助学生理解等离子体的物理机制，强化电磁学等基础理论知识，同时加深对等离子体技术在核聚变、半导体制造、材料处理等实际应用中的认识。

一. 实验目的

1. 观察直流低气压辉光等离子体的放电现象；
2. 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；
3. 采用朗缪尔（langmuir）双探针法测量得到等离子体参数。

二. 实验原理

1. 低气压放电管工作原理

等离子体的产生方法很多，除自然界本身产生的等离子体外，人为发生等离子体的方法主要有：气体放电法、射线辐射法、光电离法、热电离法、冲击波法等。

化工中最常见的是气体放电法如下：

- (1) 根据所加电场的频率，气体放电可以分为直流放电、低频放电、高频放电、微波放电等多种类型；
- (2) 根据其放电形式又可以分为电晕、辉光、弧光等离子等；
- (3) 根据气压又可以分为低压等离子体和常压等离子体。

2. 气体放电伏安特性曲线

气体放电通常是在一长直放电管内进行的，管内保持 $10\sim 10^2$ Pa 的压强，管两端装有一对平行板电极，当电极加上高压后管内气体产生放电，放电电流随电压变化，分为三个阶段：暗放电、辉光放电和电弧放电，其伏安特性曲线如图 1-1 所示。

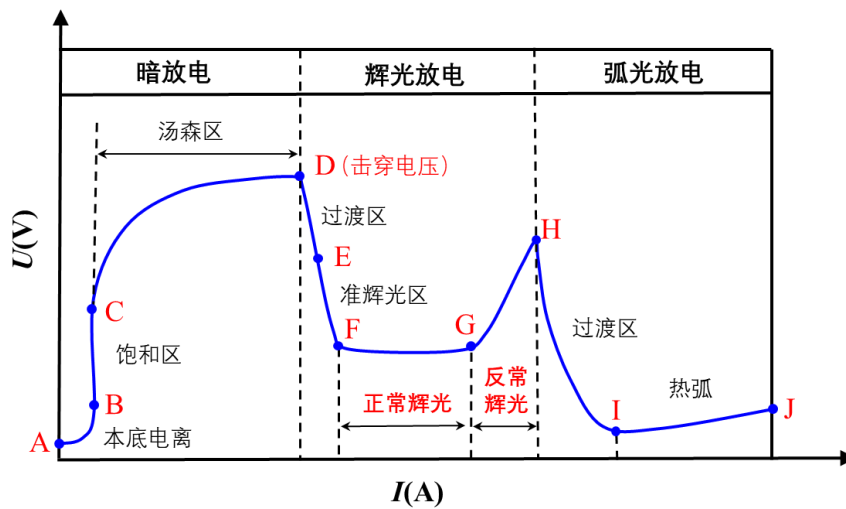


图 1-1 气体放电的伏安特性曲线

图 1-1 中，D 点称为“着火点”，FG 部分就是要研究的正常辉光放电所形成的等离子体区域。

3. 低气压辉光放电现象

低气压产生辉光放电时，放电管在整个放电空间内被若干明暗相间的光层

所分隔，形成阿斯顿暗区、阴极辉光区、阴极暗区、负辉光区、正电柱区、阳极暗区以及阳极辉光区八个区域，如图 1-2 所示。

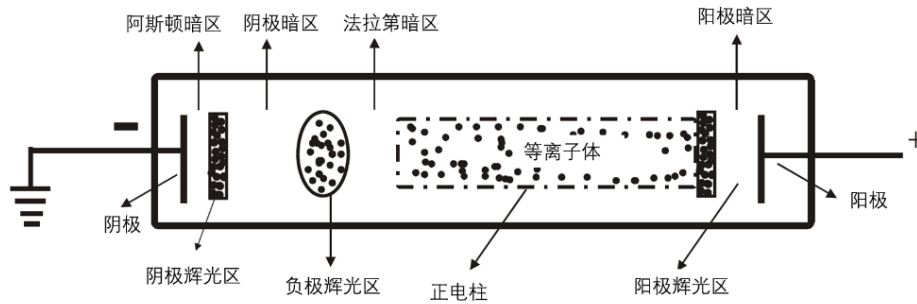


图 1-2 辉光放电管示意图

4. 帕刑 (Paschen) 定律

在低气压直流放电中，气体的击穿电压由下式决定：

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

其中， γ 为二次电子发射系数， A 、 C 为依赖于电子动力学温度和气体种类的常数， p 为气体压强， d 为阴阳极间距离， V_b 为击穿电压。

上式表明某一特定气体的击穿电压仅仅依赖于 pd 的乘积，这一现象被称为帕刑定律。

5. 朗缪尔探针法测量等离子参数

5.1 等离子体参数

(1) **等离子体密度：**单位体积内（一般以立方厘米为单位）某带电粒子的数目。 n_i 表示离子浓度， n_e 表示电子密度。在等离子体中 $n_e \approx n_i$ 。

(2) **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。

(3) **等离子体频率：**表示等离子体对电中性破坏的反应快慢，是等离子体震荡。

(4) **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。当电荷正负电荷置于等离子体内部时就会在其周围形成一个异号电的“鞘层”。

5.2 朗缪尔探针法

静电探针法测量等离子体参量是根据朗缪尔探针法，分为单探针和双探针法，其测量线路如图 1-3 所示。

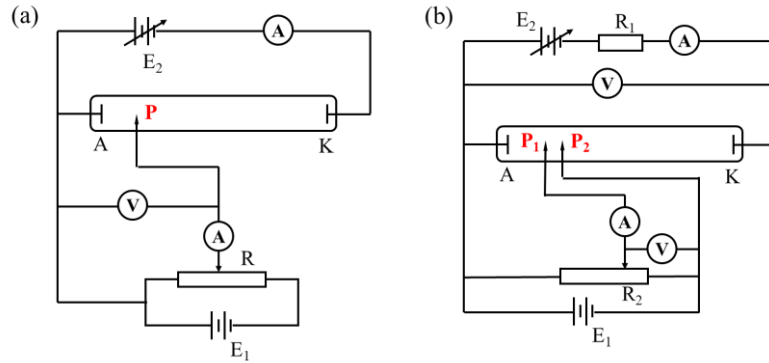


图 1-3 (a) 单探针、(b) 双探针法的测量线路图

单探针法（图 1-3 (a)）有一个悬浮探针，以阳极为参考电位，改变阳极附近探针 P 的电位得到探针上电流和电压的关系。但探针的电压会破坏气体放电状态，造成测量结果的误差较大。通常应用较多的还是双探针法（图 1-3 (b)），双探针法是在放电管靠近阳极附近装有 2 个两个悬浮探针，探针间具有一定的距离，探针间的电压可以调节。测试放电管处于稳定状态下两探针的伏安特性（图 1-4），计算出等离子体的电子密度和电子温度。

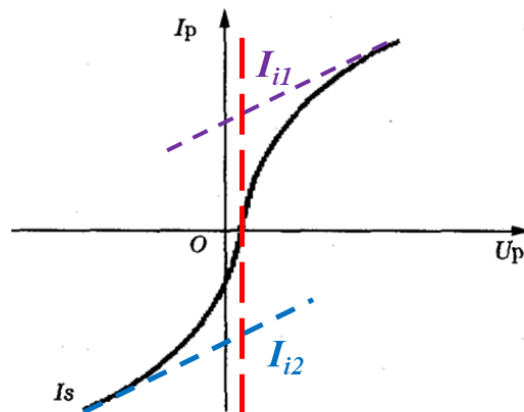


图 1-4 双探针法测得的 V-I 曲线

$$\text{电子温度 } T_e: T_e = \frac{e}{k} \frac{I_{i1} I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \frac{1}{\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0}}$$

$$\text{电子密度 } n_e: n_e = \frac{2I_s}{eS} \sqrt{\frac{M}{kT_e}}$$

其中， e 为电子电荷， k 为玻尔兹曼常数， I_{i1} 和 I_{i2} 为流到探针1和2的正离子电流， $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0}$ 为 $V=0$ 附近伏安特性曲线的斜率， I_s 为正离子饱和电流，可取 I_{i1} 和 I_{i2} 的算术平均值， S 为两根探针的平均表面面积， M 为放电管中所充气体的离子质量。

三. 实验仪器与装置

本实验采用来自杭州大华仪器制造有限公司的 DH2006 型直流磁控辉光等离子体实验装置（图 1-5），该装置包括可拆卸的气体放电管、控制及测量系统、探针电压表、电流表、直流辉光放电电源、真空系统、进气系统、水冷系统等部分构成。



图 1-5 实验装置实物图

四. 实验内容与步骤

1. 开机及准备

(1) 检查设备的完好性，依次打开总电源空开（在仪器左侧）、总电源开关、冷却水开关、电阻真空计电源开关；

(2) 关闭流量计，打开真空泵，打开挡板阀，开始抽放电管内真空（直至真空度优于 5 Pa）；

(3) 开启流量计开关，调节一定的流量，给真空室输送工作气源，同时调节挡板阀，使气压达到所要求，并维持不大幅度变化；

2. 直流低气压放电现象的观察与伏安曲线的测量

(1) 开启放电电源按钮，缓慢调节高压调节旋钮，调节到一定的电压时，放电管内将产生辉光放电现象，观察并分析辉光放电现象；

(2) 固定电极距离，取两个不同的工作气压（20 Pa、30 Pa），测量辉光放电阶段的放电电压、电流，记录结果；

3. 气体击穿电压的测定及帕刑定律的验证

(1) 开启放电电源按钮，缓慢调节高压调节旋钮，观察电流表示数。当电流表显示有电流时，记下此时的电压值 V （击穿电压）；

(2) 保持 pd 乘积不变，测定 10 组对应气体的击穿电压；

(3) 保持 d 不变，取五个不同的压强 p （10–30 Pa，10 组），测量对应的气体击穿电压；

4. 放电等离子体参数的测量

(1) 将工作选择打到辉光放电测量，缓慢调节高压，调节电压到所需功率；

(2) 打开探针电压，缓慢调节电压，根据探针电流值大小，改变探针电流测量量程，并记录 V - I 关系数据；

(3) 改变功率和气压，重复上述过程。

5. 关机

试验结束后，将高压调节旋钮逆时针调小，使放电电源输出为“0”，关闭放电电源按钮开关、气路、真空计、真空泵、冷却水、总电源，拔掉总电源线。

注意：在实验过程中禁止用手去触摸高压电源线以及电极杆，防止触电。

五. 实验数据记录与处理

1. 伏安曲线的测量

测量电极距离，并将不同工作气压下所测的电压、电流记录在表 1-1 中，绘制辉光放电曲线。分析工作气压对伏安曲线的影响机制，并于与理论相对

照，分析实验误差及原因。

表 1-1 伏安曲线测量的电压、电流值

(不同气压下，可每隔 10V 记录一组数据，记 20 组)

电极距离：____ mm			
工作气压： 20 Pa		工作气压： 30 Pa	
电压/v	电流/A	电压/v	电流/A

2. 气体击穿电压的测定及帕刑定律的验证

(1) 分别保持 pd 乘积不变和保持 d 不变取五个不同的压强 p (10 – 30 Pa)，测量对应的气体击穿电压 V 填入表 1-2 和 1-3；

(2) 绘制击穿电压 V 与 pd 曲线，验证帕刑定律。

表 1-2 Pd 乘积不变时的击穿电压 V

$P*d= \underline{\hspace{2cm}} Pa*mm$										
d/mm										
P/Pa										
V/v										

表 1-3 P 单调变化时的击穿电压 V

d/mm											
P/Pa	5	7	10	12	15	17	20	22	25	27	30
V/v											

3. 放电等离子体参数的测量

(1) 根据表 1-4，记录不同气压、功率下探针测得的电流电压值，绘制曲线并

根据公式计算出等离子体温度和等离子体密度；

(2) 分析功率和气压对等离子体参数的影响及影响机理；

表 1-4 不同条件下探针电流和电压的关系数据

电极距离: mm					
功率 2W, 气压 10Pa		功率 2W, 气压 20Pa		功率 4W, 气压 20Pa	
电压 V	电流 I	电压 V	电流 I	电压 V	电流 I
$\pm 100 \sim \pm 10/10$		$\pm 100 \sim \pm 10/10$		$\pm 100 \sim \pm 10/10$	
$\pm 10 \sim \pm 1/1$		$\pm 10 \sim \pm 1/1$		$\pm 10 \sim \pm 1/1$	
$\pm 0.9 \sim \pm 0.1/0.1$		$\pm 0.9 \sim \pm 0.1/0.1$		$\pm 0.9 \sim \pm 0.1/0.1$	
0		0		0	

六. 思考题

1. 分析单探针法和双探针法的特点；
2. 请列举 1-2 例等离子体放电的实际应用并谈谈自己的见解。

参考资料

- [1] 晏于模, 王魁香. 近代物理实验, 吉林大学出版社, 1995.
- [2] 廖荣. 直流辉光等离子体放电实验, 国科学技术大学大学物理-综合性实验, 2023.