

等离子体的应用

DH2005 型 直流辉光等离子体实验装置
(附实验讲义)

使用说明书

杭州大华科教仪器研究所
杭州大华仪器制造有限公司

目 录

目 录.....	1
设备简介及使用范围.....	2
仪器结构及说明.....	3
仪器主要配置及组成.....	4
技术参数及特性.....	5
设备安装及调试.....	5
设备操作使用及注意事项.....	6
设备维护.....	7
常见故障的解决办法.....	7
装箱清单.....	8
辉光等离子体概述.....	9
实验一 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量.....	16
实验二 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证实验	22
实验三 直流辉光放电等离子体参数的测量	26

一、直流辉光等离子体教学实验装置

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：同化学的和其它的方法相比，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。同其它与之竞争的加工方法相比，工业等离子体工程提供了更有利的工业加工方法，包括更有效和更便宜达到工业相关结果的能力；它还能完成其它方法不能完成的任务，它能在不产生大量不需要的副产品和废料的情况下达到相同目的；并且能在产生很少污染和有毒废物的情况下实现相同目的。

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、光学镀膜等领域引进的具有上世纪 90 年代国际先进水平的生产线大量使用了等离子体技术，但高等理工学校在人才培养环节中却缺乏关于等离子体理论和实践方面的训练，造成这一现象的主要原因在于等离子体设备价格昂贵，国内生产的等离子体设备通常是科研院所从开展科学研究的角度开发的，价格一般在 15-200 万元，而同类进口设备的价格是国产设备价格的 10 倍，因此目前各高等学校的等离子体装置只用于研究和研究生教学，本科生基本上没有机会得到关于等离子体技术应用方面的训练。

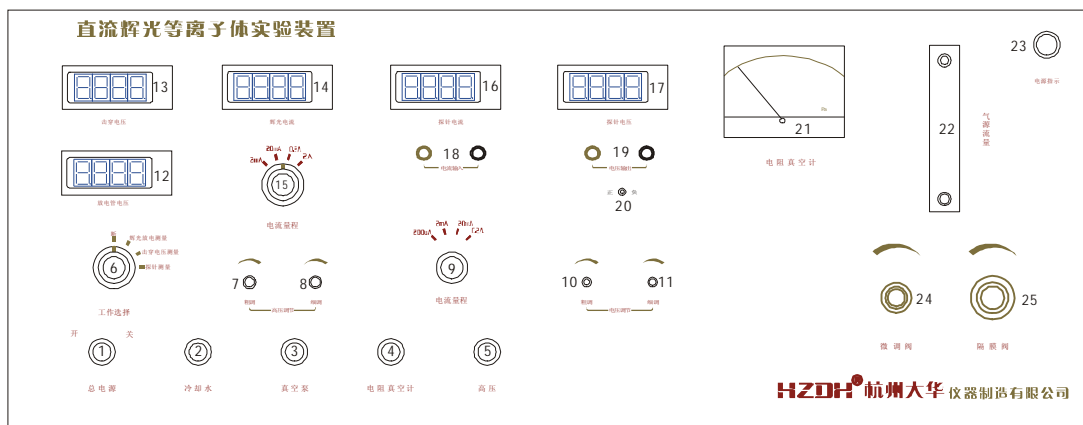
直流辉光等离子体教学实验装置在经典直流放电管的基础上加以改进，工作气体、工作气压、电极距离等影响等离子体的参数均可灵活地加以单独或组合调控，从而利用该装置可以系统研究等离子体的激发原理和影响因素，不仅可以开设多个验证性实验，而且可以开设研究性实验，以提高学生分析问题的能力。

该装置包括可拆卸的气体放电管、测量系统、真空系统、进气系统和水冷系统等部分组成，具有结构合理、调节方便、测量参数多等特点。

二、仪器结构及说明

结构说明：仪器采用的是一体化设计，顶部是放电管及水冷部分，高压加在放电管两端，外面采用聚四氟乙烯绝缘材料绝缘防止漏电，冷却水通过两端的循环水冷套对放电管进行冷却，放电管内附两组钨丝，可利用等离子体诊断技术测定等离子体的一些基本参量。测量及控制部分均布置在中部的操作面板上，真空系统安装在机箱的内部。

操作面板配置说明



DH2005 直流辉光等离子体实验装置操作面板图

各操作部件名称：

- | | |
|-------------|-------------|
| 1、总电源开关 | 2、冷却水电源开关 |
| 3、真空泵电源开关 | 4、电阻真空计开关 |
| 5、高压电源开关 | 6、工作选择开关 |
| 7、高压调节粗调旋钮 | 8、高压调节细调旋钮 |
| 9、探针电流量程旋钮 | 10、探针电压粗调旋钮 |
| 11、探针电压细调旋钮 | 12、放电管电压表 |
| 13、击穿电压显示表 | 14、辉光电流测量表 |
| 15、辉光电流量程旋钮 | 16、探针电流表 |
| 17、探针电压表 | 18、探针电流输入端 |
| 19、探针电压输出端 | 20、电压输出换向开关 |
| 21、电阻真空计 | 22、转子流量计 |
| 23、总电源指示灯 | 24、高真空微调阀 |
| 25、高真空隔膜阀 | |

各操作部件功能说明:

6、工作选择开关: 此功能开关共分“断”、“辉光放电测量”、“击穿电压测量”、“探针测量”共四档。

断: 开关在此位置时, 高压没有输出, 在更换电极距离和在调试过程中将开关置于“断”档位上。

辉光放电测量: 即产生辉光放电后的电压、电流测量。

击穿电压测量: 其原理是当放电管中的电流增大导致气体击穿时, 在内部取样电阻上的电压增大, 导致二极管导通, 此时电压表显示的是二极管的导通电位值。当电压在 0.5~0.6V 时可以认为气体击穿, 记录下此时放电管两端的电压。(实际的击穿电压值是放电管电压显示的电压值)。

探针测量: 此时将接通探针测量电压。

9、15 量程选择开关: 探针电流测量: 分为 20 μ A~20mA 共 4 档。辉光电流测量: 分为 2mA~2A 共 4 档。

三、仪器主要配置及组成

DH2005 直流辉光等离子体实验装置包括可拆卸的气体放电管、测量系统、真空系统、进气系统和水冷系统等部分组成, 具有结构合理、调节方面、测量参数多等特点。

气体放电管: 采用玻璃烧结而成, 内附两组钨丝探针。及两边采用不锈钢材料制成的水冷套及放电管固定托架。

测量系统: 包括辉光电压表、辉光电流表、探针电压表、探针电流表、击穿电压测量

放电管电压表: 三位半数显, 测量范围是 0~2000V, 测量精度 2%

辉光电流表: 三位半数显, 测量范围是 0~2A, 共分 5 档, 测量精度 0.5%

探针电压表: 三位半数显, 测量范围: 0~ \pm 200V, 测量精度 0.5%

探针电流表: 三位半数显, 测量范围: 0~20mA, 测量精度 0.5%;

击穿电压测量: 三位半数显, 测量范围: 0~2V, 测量精度 0.5%;

测量系统包括两组直流稳压稳流电源: 一组放电管工作电压, 调节范围是 0~1000V, 另一组为探针测量电源, 调节范围是 0~ \pm 100V, 稳定度 0.5%。

真空系统: 采用 2XZ-2 型旋片真空泵, 对密封容器抽除气体而获得真空, 真空的测量采用热偶真空计, 用于测量本底真空和工作时的工作气压。真空的密封采用金属和橡胶密封; 真空调节采用隔膜阀粗调和微调阀精细调节, 调节

快速方便、稳定性好。

2XZ-2 型旋片真空泵主要技术指标:

- | | |
|--------------------------------|-----------------|
| 1) 工作电压: AC220V/50 Hz | 2) 抽气速率: 2L/S |
| 3) 极限压力: 6×10^{-1} Pa | 4) 电机功率: 0.37KW |
| 5) 进气口内径: 25mm | 6) 用电量: 0.65L |
| 7) 噪声: 72Lw dB(A) | |

进气系统: 进气通过金属管路联接, 可通入不同的工作气体, 通过转子流量计控制气体的流量, 同时通过高真空微调阀调节, 达到控制放电管中的工作压力。

水冷系统: 装置自带循环冷却水, 通过自带水箱、水泵对整个系统的冷却水进行循环, 可保证系统正常运行对水温的要求。对实验室的水源无特别的要求。

四、技术参数及特性

- 1、工作电压: AC220V \pm 5% 50Hz
- 2、整机功率: 最大功率 1.5KW
- 4、整机重量: 约 100Kg
- 5、外形尺寸(mm): 长 1000 \times 宽 660 \times 高 1230
- 6、放电管: $\phi 45 \times 200$ mm
- 7、电极距离: 30~180mm 可调
- 8、工作气压: 10Pa~200Pa
- 9、工作电压: 0V~1000V 连续可调, 电压稳定度 1%
- 10、放电电流: 10^{-6} A~0.3A 可测
- 11、探针工作电压: 0~ \pm 100V, 稳定度 0.5%
- 12、探针电流测量范围: 0~20mA

五、设备安装及调试

1、安装环境要求

- 1)、电源: AC220V, 50Hz, 最大功率 1.5KW
- 2)、温度、湿度、气源及冷却水: 应保障设备工作稳定正常
- 3)、安装室: 室内整洁, 空气流通, 无尘埃。
- 4)、接地线: 室内具有独立接地线 $<3 \Omega$

2、安装顺序

- 1)、确认安装环境满足设备安装要求
- 2)、检查设备良好情况（检查在运输过程中是否造成损坏）
- 3)、检查放电管及放电管部件是否完好无损
- 4)、安装放电管部件托架。
- 5)、确认各电气部件完好无损。
- 6)、连接真空管路及真空橡胶管。
- 7)、连接好设备地线。
- 8)、关闭流量计，连接好外接气源。

六、设备操作使用及注意事项

- 1)、检查确认设备各部件完好，连接安全（注意接地）。
- 2)、接通总电源，打开总电源开关旋钮，确认冷却水箱水容量打开冷却水开关按钮。
- 3)、打开隔膜阀，确认气路连接规范完好后打开真空泵开关按钮，抽放电管内真空。
- 4)、打开电阻真空计电源开关，测量此时反应室的压强，抽真空约 15 分钟使放电管内真空达到所要求。测量放电管内的本底真空，真空度优于 10Pa。
- 6)、将高压输出线加在放电管两端，**注意：在实验过程中禁止用手去触摸高压电源线以及放电极杆，防止触电。**
- 7)、将功能选择开关打在“放电电流测量”档，开启高压开关按钮，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。
- 8)、关闭隔膜阀，开启流量计开关，调节一定的流量，给真空室输送工作气源，同时调节微调阀使工作气压达到所要求。
- 9)、试验结束时，将高压电源调至 0，关闭高压开关按钮，关闭气路，关闭真空泵，关闭冷却水，关闭总电源，拔掉总电源线。

七、设备维护

- 1、定期更换冷却水，清洗冷却水箱，保证循环水系统的正常工作。
- 2、在放电管壁受到污染时及时打开真空反应室，清洁放电管管壁（避免用尖锐物体划伤放电管内壁）。

- 3、所有电气旋钮及开关状态在使用前一定要确认是否在“原始”状态。
- 4、真空系统维护：
 - 1)、注意真空泵换油；
 - 2)、注意反应室及管道清洁；
 - 3)、注意密封面清洁；
 - 4)、真空系统停机前先关真空计电源，然后再进行其它操作
 - 5)、实验结束后将真空室报空。

八、常见故障及解决办法

真空计指示不正常。

可能原因：规管或传感器上的输出线脱落或松脱，规管或传感器内进油被污染。

处理办法：检查接线，如进油，将规管或传感器撤下用乙醇溶液小心清洗，并风干。

九、装箱清单

序号	名称	数量	备注
1	DH2005 型直流辉光等离子体实验装置	1 台	
2	快卸法兰 (KF16)	1 只	
3	O 形圈 $\phi 3.55 \times 1.8$ 、 $\phi 6 \times 1.8$	10 只	
4	$\phi 10$ 放水皮管	3 米	
5	M8—M10 固定扳手	1 把	
6	M12—M14 固定扳手	1 把	
7	专用套筒	1 把	
8	专用扳手	1 把	
9	康尼线 KAT4ABD52 (红、黑各一、一头焊夹子)	2 根	45cm
10	康尼线 KAT4ABD52 红色	1 根	30cm
11	放电管 $\phi 50 \times 155$	1 根	
12	放电管固定座	1 套	
13	进气管	1 根	
14	桌板固定螺丝 ($2 \times 60\text{mm}$)	8 根	
15	使用说明书 (含讲义)	1 份	
16	产品合格证	1 份	

十、直流辉光等离子体技术简介

1 气体放电

气体放电可以采用多种能量激励形式，如直流、微波、射频等能量形式。其中直流放电因为结构简单、成本低而受到广泛应用。直流放电形成辉光等离子体的经典结构如图(1)所示，在电气击穿形成等离子体前要经历暗放电阶段，包括本底电离区、饱和区、汤森放电区和电晕放电区。在汤森放电区，当电压继续增加时，可能发生两种放电情况。如果是电源的内阻很高，从而只能提供很小的电流，放电管就拉不出足够的电流击穿气体，放电管仍处于只有很小电晕点的电晕区，或在电极上有明显的刷形电晕放电；如果电源内阻很低，气体就会在击穿电压处击穿，放电将从暗放电区转移到正常辉光放电区。

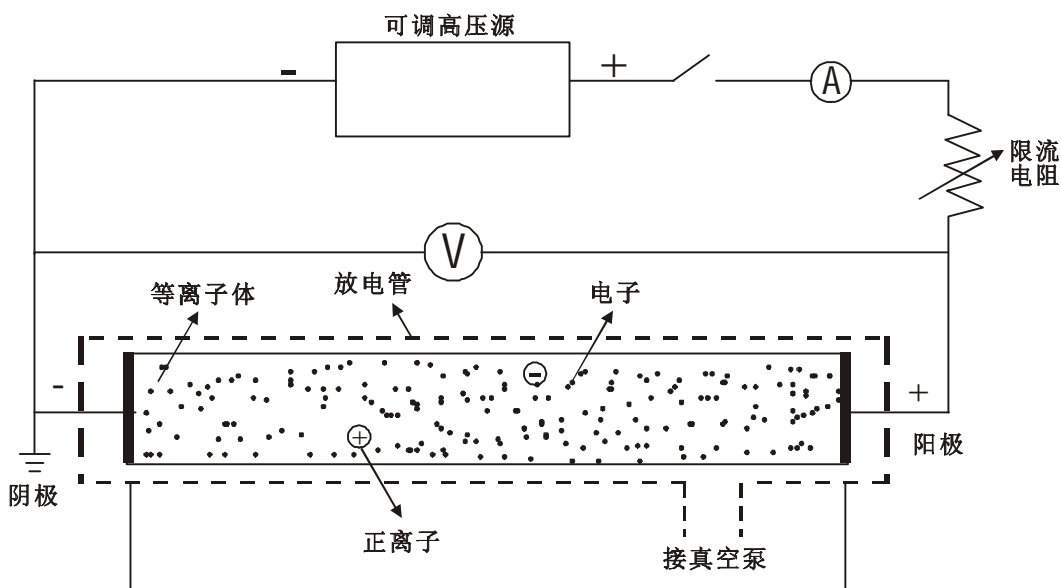


图 1、低气压放电管工作原理示意图

2 气体电击穿理论

汤森放电区在工业上有重要应用，包括电晕放电和气体的电击穿。因此研究汤森区的放电理论对电晕、辉光等离子体的应用有重要意义。以低气压放电管的工作为例，其原理图见图 1。在暗放电区的电流-电压关系见图 2。当放电管上的电压超过 C 点后，电流将呈指数律上升。在 C 和 E 之间的指数增长电流区域称为汤森放电区。这一电流增长规律可以用汤森第一电离系数来分析。

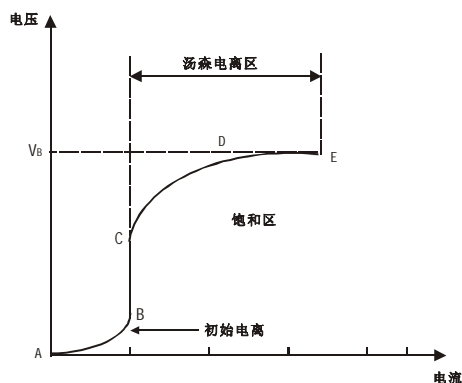


图 2、暗放电区电流-电压关系图

2.1 汤森第一电离系数

汤森第一电离系数 α 定义为一个电子沿电场走过一米时平均电离碰撞的次数。参数 α 以每米离子电子对数作单位，依据动力学理论，与电离平均自由程有关：

$$\alpha = \frac{1}{l_i} = \frac{n_{ei}}{u_e} = \frac{n_0 \langle su \rangle_{ne}}{u_e} \quad (1)$$

有重要意义的是初始电子由阴极发射，而体积电离无贡献。设阴极每秒每平方米发射出 Γ_{e0} 个电子，在 x 和 $x+dx$ 之间由于电子碰撞而产生的微分电子通量可由汤森第一电离系数给出：

$$d\Gamma_e = \alpha \Gamma_e dx \quad (2)$$

当电子沿着轴向移动时。如果没有复合或电子损失，从 $x=0$ 到 x 积分获得总电子通量：

$$\int_{\Gamma_{e0}}^{\Gamma_e} \frac{d\Gamma_e}{\Gamma_e} = \int_0^x \alpha dx \quad (3)$$

通常电离平均自由程不是 x 的函数，因而 α 与 x 无关，积分得：

$$\Gamma_e = \Gamma_{e0} e^{\alpha x} \quad (4)$$

指数增长的放电电流是来自阴极的初始电子引发的，放电电流密度：

$$J_e = e\Gamma_e = J_{e0} e^{\alpha x} \quad (5)$$

设放电管的截面积是 S ，总的放电电流为

$$I_e = I_{e0} e^{ax} = SJ_{e0} e^{ax} \quad (6)$$

上式表明：在外加电压的两个平行平板电极之间流过的电流，将随平板之间的距离增加而呈指数律地增长。这一规律可进行实验观察并可应用于测定汤森第一电离系数 a 。

2.2 汤森第一电离系数 a 的解析表达

汤森第一电离系数等于每米电离平均自由程数，因此与电子在轴线上通过大于电离距离 x_i 的几率有关。如果电子的平均自由程为 l_i ，且，这样每米的平

均自由程数为： $\frac{1}{l_i}$

设初始电子密度为 n_{e0} ，在气体中运动时，将按指数律衰减，从而给出一个电子的自由程大于长度 x_i 的几率：

$$\frac{n_e(x)}{n_{e0}} = \exp\left(-\frac{x_i}{l_i}\right) \quad (7)$$

汤森第一电离系数是每米电离碰撞的可几数目，是每米平均自由程数乘以电子的自由程大于 x_i 的几率：

$$a = \frac{1}{l_i} \frac{n_e(x)}{n_{e0}} = \frac{1}{l_i} \exp\left(-\frac{x_i}{l_i}\right) \quad (8)$$

将式 (1) 代入上式中得：

$$\frac{1}{l_i} = \frac{n_0 \langle su \rangle_{ne}}{u_e} = Ap \quad (9)$$

表一：

气体	A (离子对/ (Torr·m))	C (V/ (Torr·m))
Air	1220	36500
CO ₂	2000*	46600
H ₂	1060	35000
N ₂	1060	34200

表一、某些气体的汤森第一电离系数的微象学常数 A 和 C

这里 A 是依赖于电子动力学温度和气体种类的常数， p 是气体压强。

$$a = A \exp(-Apx_i) \quad (10)$$

在距离内，电子能够从电场中获得足够的能量，有效电离电位 $V^* > V_i$ ，使本底气体电离，此处为实际电离电位，如果电子移动的距离为，则 $V^* \approx Ex_i$ 得到：

$$\frac{a}{p} = A \exp\left(-\frac{AV^*}{E/p}\right) = A \exp\left(-\frac{C}{E/p}\right) \quad (11)$$

式 (11) 是汤森第一电离电位的标准形式。

上式表明比值 $\frac{a}{p}$ 仅是电场与压强的比值 $\frac{E}{p}$ 的函数，可写为：

$$\frac{a}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (11')$$

参数 C, A 及有效电位 V^* 之间的关系为： $C \equiv AV^*$

2.3 常数 A, C 和 a/p 的测定

常数 A, C 和比值 a/p 可通过实验的方法进行测定，其理论依据是方程(6)。

从方程 (11') 中可以看出，比值 $\frac{a}{p}$ 与电场 E 有关，因此，测量时应该在恒定电场下进行。在测量时，当平板间的距离增加时，调节极板间的电压维持电场恒定，同时测量电流 I ，在 $\log \frac{I}{I_0}$ 和电极距离 d 的半对数图上得到一曲线，对某一范围的压强和电场重复这个过程得到气体的实验数据。

2.4 电击穿

汤森放电中的电流：

二次电子发射系数 γ ： $\gamma \equiv$ 发射电子数/入射的离子或光子数
是每个入射的离子或光子从阴极上发射出的电子数目。在经典放电管中，汤森区中离子能量一般较低， γ 值在 10^{-2} 或 10^{-3} 量级。

定义： Γ_{ea} 为在阳极上所有源产生的电子通量， Γ_{ec} 是由阴极出来的总的电子通量， d 为阳极和阴极间的距离， α 为汤森第一电离系数。则

$$\Gamma_{ea} = \Gamma_{ec} e^{ed} \quad (12)$$

Γ_{ec} 包括两部分，可写为

$$\Gamma_{ec} = \Gamma_{es} + \Gamma_{e0} \quad (13)$$

其中 Γ_{es} 是来自阴极的二次电子发射的电子通量， Γ_{e0} 是由于光发射、本底辐射或另外的过程在阴极上产生的电子通量，在稳态情况下，到达阳极的电子通量 Γ_{ea} 等于到达阴极的离子通量 $\Gamma_{ic} = \frac{\Gamma_{es}}{g}$ 和从阴极发射出来的电子通量 Γ_{ec} 的和，即：

$$\Gamma_{ea} = \frac{\Gamma_{es}}{g} + \Gamma_{ec} \quad (14)$$

得到二次发射电子的阴极通量：

$$\Gamma_{es} = g\Gamma_{ec} (e^{ad} - 1) \quad (15)$$

阴极的总的电子通量：

$$\Gamma_{ec} = \Gamma_{es} + \Gamma_{e0} = g\Gamma_{ec} (e^{ad} - 1) + \Gamma_{e0} \quad (16)$$

解得：

$$\Gamma_{ec} = \frac{\Gamma_{e0}}{1 - g(e^{ad} - 1)} \quad (17)$$

到达阳极的电子通量为：

$$\Gamma_{ea} = \frac{\Gamma_{e0} e^{ad}}{1 - g(e^{ad} - 1)} \quad (18)$$

两边乘以电子电荷得到电流密度：

$$j = j_0 \frac{e^{ad}}{1 - g(e^{ad} - 1)} \quad (19)$$

2.5 汤森判据

在两平板电极之间的气体发生电气击穿时，由上式给出的两平板之间的电流应无限增长(在击穿电压下，电流可增长 10^4 到 10^8 倍)，该条件可写为

$$1 - g(e^{ad} - 1) = 0 \quad (20)$$

或

$$ge^{ad} = g + 1 \quad (20')$$

此为汤森判据。

根据汤森判据和汤森第一电离系数可以求出击穿电压。

取汤森判据的自然对数：

$$\ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) = ad \quad (21)$$

定义击穿电压为 V_b ，击穿电场为：

$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (22)$$

结合汤森第一电离系数，有：

$$Apd \exp\left[-\frac{Cpd}{V_b}\right] = \ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) \quad (23)$$

两边取对数，解得：

$$V_b = \frac{Cpd}{\ln[Apd / \ln(1 + \frac{1}{g})]} = f(pd) \quad (24)$$

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（Paschen）定律。

最小击穿电压：

将帕邢定律对 pd 进行微分并使微商等于零，得到最小击穿电压发生时的 pd 值，

$$(pd)_{\min} = \frac{e}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) = \frac{2.718}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) \quad (25)$$

$$V_{b,\min} = e \frac{C}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) = 2.718 \frac{C}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{g}\right) \quad (26)$$

实验一 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量

一、实验目的

观察直流低气压辉光放电等离子体的唯象结构，通过对辉光等离子体的伏安曲线的测量，理解辉光等离子体的电学特性。

二、实验仪器

DH2005 型 直流辉光放电等离子体装置

三、实验原理

低气压放电可分为三个阶段：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显著差异。经典的直流低气压放电在正常辉光放电区有如下示意图：

从左至右，其唯象结果如下：

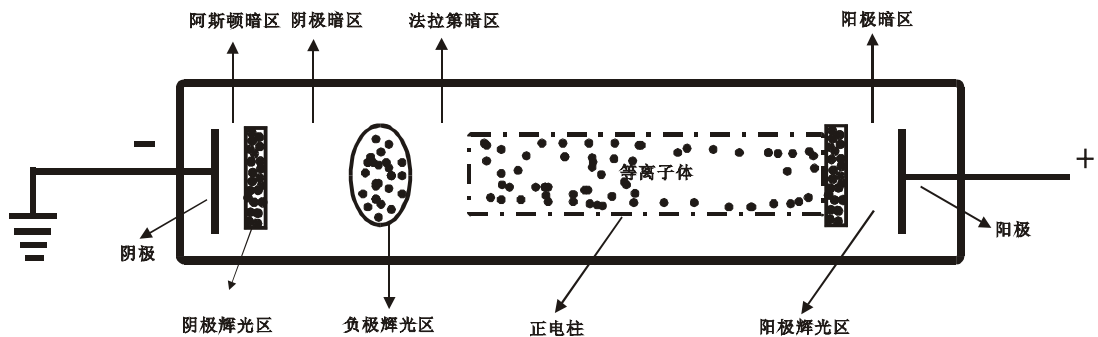


图 3、低气压放电现象

阴极 阴极由导电材料制成，二次电子发射系数 δ 对放电管的工作有很大影响。

阿斯顿(Aston)暗区 紧靠在阴极右边的阿斯顿暗区，是一个有强电场和负空间电荷的薄的区域，它含有慢电子，这些慢电子正处于从阴极出来向前的加速过程中，在这个区域里电子密度和能量太低不能激发气体，所以出现了暗区。

阴极辉光区 紧靠在阿斯顿暗区右边的是阴极辉光区，这种辉光在空气放电时通常是微红色或桔黄色，是由于离开阴极表面溅射原子的激发，或外部进

人的正离子向阴极移动形成的。这种阴极辉光有一个相当高的离子密度。阴极辉光的轴向长度取决于气体类型和气体压力。明极辉光有时紧贴在阴极上，并掩盖阿斯顿暗区。

阴极暗区 这是在阴极辉光的右边比较暗的区域，这个区域内有一个中等强度电场，有正的空间电荷和相当高的离子密度。

阴极区 阴极和阴极暗区至负辉光之间的边界之间的区域叫做阴极区。大部分功率消耗在辉光放电的极区。在这个区域内，被加速电子的能量高到足以产生电离，使负辉光区和负辉光右面的区域产生雪崩。

负辉光区 紧靠在阴极暗区右边的是负辉光区，在整个放电中它的光强度最亮。负辉光中电场相当低，它通常比阴极辉光长，并在阴极侧最强。在负辉光区内。几乎全部电流由电子运载，电子在阴极区被加速产生电离，在负辉光区产生强激发。

法拉第暗区 这个区紧靠在负辉光区的右边，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，在法拉第暗区中电子数密度由于复合和径向扩散而降低。净空间电荷很低，轴向电场也相当小。

正电柱 正电柱是准中性的，在正电柱中电场很小，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。在不变的压力下，随着放电管长度的增加阴极，正电柱变长。正电柱是一个长的均匀的辉光。除非触发了自发不动的或运动的辉纹，或产生了扰动引发的电离波。

阳极辉光区 阳极辉光区是在正电柱的阳极端的亮区，比正电柱稍强一些，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，它是阳极鞘层，它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。

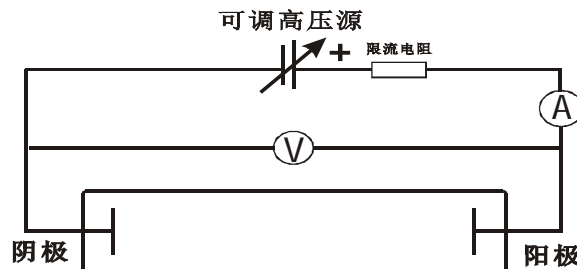


图 4、低压放电实验原理

四、实验内容和步骤

- 1、了解直流辉光放电等离子体装置的工作原理，观察直流辉光放电现象，画出示意图，并进行分析。
- 2、取 3 个不同的工作气压，测量辉光放电阶段的放电电压、电流，将测量结果填入下表。绘制电压-电流曲线，与理论相对照，自主分析其中的差异，并分析原因。分析工作气压对伏安曲线的影响机制。
- 3、根据放电电压和放电电流的特点，提出电压和电流测量的实验方案，画出电路图。

具体实验步骤如下：

- A、检查仪器的完整性,连接好所有的管路,安装好放电管部件。拧紧放电管固定螺帽。用专用套筒拧紧极板密封螺帽；
- B、将高压输出电源线接至放电管两端的正负极板上，注意此时操作应确保电源在关闭的状态下，所有开关均处于原始状态；
- C、检查水箱里有无冷却水，接通总电源；
- D、打开总电源开关；
- E、关闭转子流量计，打开隔膜阀，并依次接通冷却水电源，真空泵电源，抽取本底真空约 5 分钟，接通电阻真空计电源。
- F、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压稳定在所需工作气压，开高压，并将工作选择打到辉光放电测量；
- G、缓慢调节高压调节旋钮，调节高压大小，同时根据电流值大小，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，每隔 20V 记录一组数据，共 20 组；
- H、将电压、电流测量结果填入下表，并绘制电压-电流曲线。

五、实验数据处理

- 1、将所测的电压、电流值记录在表 1 中。
- 2、根据表 1 的数据描绘出辉光放电电压-电流曲线。
- 3、根据实验数据总结实验结论。

表 1、电压、电流测量值

电极距离:	mm				
工作气压:	Pa	工作气压:	Pa	工作气压:	Pa
电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA

六、思考题

- 1、 暗放电区电流的测量应注意什么问题？
- 2、 阴极与阳极显著的热效应差别的原因？
- 3、 工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响？其影响机制是什么？

七、实验报告

一、实验结果

1、直流辉光放电示意图

2、根据电压和电流测量的实验方案，画出电路图。

3、辉光放电中的电压-电流

表 2、辉光放电中的电压-电流值

电极距离:	100 mm				
工作气压:	20Pa	工作气压:	40Pa	工作气压:	80Pa
电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA
480	0.135	380	0.686	400	0.76
500	0.188	400	1.3	420	4.35
520	0.243	420	1.6	440	6.03
540	0.305	440	2.1	460	7.88
560	0.373	460	2.7	480	9.96
580	0.471	480	3.3	500	12.16
600	0.554	500	3.92	520	14.16
620	0.646	520	4.65	540	16.38
640	0.753	540	5.36	560	18.56
660	0.846	560	6.13	580	20.6
680	0.954	580	6.92	600	22.8
700	1.07	600	7.68	620	25.1
720	1.16	620	8.2	640	27.2
740	1.28	640	8.7	660	29.3
760	1.4	660	9.5	680	30.4
780	1.53	680	10.33	700	31.3
800	1.65	700	11.34	720	34.8
820	1.78	720	12.08	740	38.1
840	1.91	740	12.38	760	40.1
860	2.04	760	13.6	780	41.1

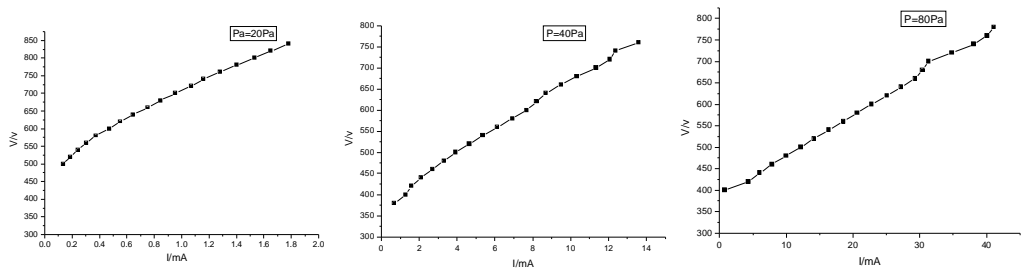


图 5、辉光放电电压-电流曲线

结论: 直流辉光放电中, 电极距离一定时, 电流随电压的升高的增大, 且气压升高时, 电流增大的速率变快。

二、思考题

- 1、电流的测量应注意什么问题?
- 2、阴极与阳极显著的热效应差别的原因?
- 3、工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响? 其影响机制是什么?

实验二 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证实验

一、实验目的

- 1、理解直流电气击穿的机制
- 2、验证帕邢定律

二、实验装置

直流辉光放电等离子体装置

三、实验原理

在直流电气放电中，气体的击穿电压由下式决定：

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

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（Paschen）定律。

最小击穿电压：

将帕邢定律对 pd 进行微分并使微商等于零，得到最小击穿电压发生时的 pd 值，

$$(pd)_{\min} = \frac{e}{A} \ln(1 + \frac{1}{g}) = \frac{2.718}{A} \ln(1 + \frac{1}{g})$$
$$V_{b,\min} = e \frac{C}{A} \ln(1 + \frac{1}{g}) = 2.718 \frac{C}{A} \ln(1 + \frac{1}{g})$$

四、实验内容

- 1、在保持 pd 乘积不变的条件下，取不同的 p 、 d 值共 5 组，测量对应的气体击穿电压。将测量结果填入表 1。
- 2、改变 pd 的值，让其单调变化，取不同 pd 值共 9 组，测量对应的击穿电压。将测量结果填入表 2，并绘制 V - pd 曲线图。
- 3、根据测量结果，分析击穿电压与 pd 乘积的关系，以及击穿电压与 p 、 d

值的关系。

五、实验步骤

A、按照实验内容的要求，讨论和制定最优的实验测量方案。

B、拧松极板密封螺帽，调节两极板距离至所需距离 d ，再拧紧极板密封螺帽。

C、插上电源线，将总电源开关打开。

D、关闭转子流量计，打开隔膜阀，并依次接通冷却水电源，接通真空泵电源，抽取本底真空约 5 分钟，接通电阻真空计电源。

E、将工作选择打到击穿电压测量。调节转子流量计的流量，同时关闭隔膜阀，调节微调阀流量，将气压稳定在所需工作气压 P ，接通高压电源开关；

F、缓慢调节高压调节旋钮，调节高压大小，观测击穿电压测量表，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)。调节工作气压，记下相应的击穿电压值。

G、重复上述过程记测量其它极板距离时的击穿电压值。

H、将不同极板距离 d 和工作气压 P 对应的击穿电压 V ，按要求填入下表，并绘制 V - pd 曲线。

六、实验数据处理

表 3、 pd 乘积不变时变击穿电压 V

$P*d = Pa*m$					
d/mm					
P/Pa					
V/v					

表 4 、 pd 单调变化时击穿电压 V

d/mm									
P/Pa									
$P*d/Pa*m$									
V/v									

以空气为例， Pd 的范围从 0.5 到 10

七、实验报告

一、实验结果

- 1、在保持 pd 乘积不变的条件下，取不同的 p 、 d 值共 5 组，测量对应的气体击穿电压。将测量结果填入表 5。

表 5、 pd 乘积不变时变击穿电压 V

$P*d = 6000 \text{ Pa*m}$					
d/mm	120	100	86	75	67
P/Pa	50	60	70	80	90
V/v	670	670	668	672	670

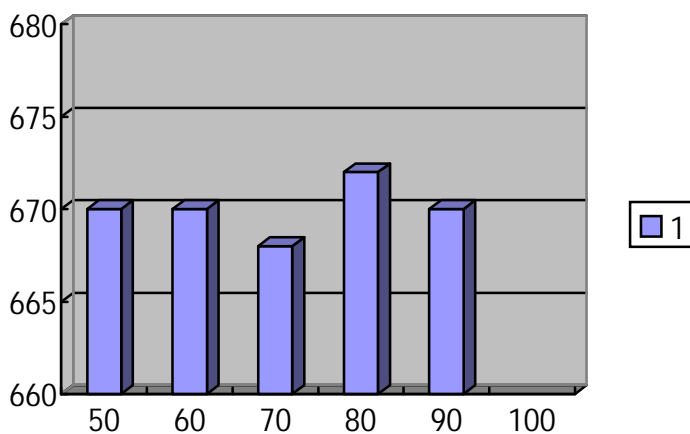


图 6、 pd 乘积不变时击穿电压

- 2、改变 pd 的值，让其单调变化，取不同 pd 值共 9 组，测量对应的击穿电压。将测量结果填入表 6，并绘制 V - pd 曲线图。以空气为例， Pd 的范围从 0.5 到 10。

表 6 pd 单调变化时击穿电压 V

d/mm	67	67	75	75	86	86	100	100	120
P/Pa	20	30	40	50	60	70	80	90	90
$P*d/\text{Pa*m}$	1.34	2.01	3	3.75	5.16	6.02	8	9	10.8
V/v	500	550	602	637	655	668	690	695	705

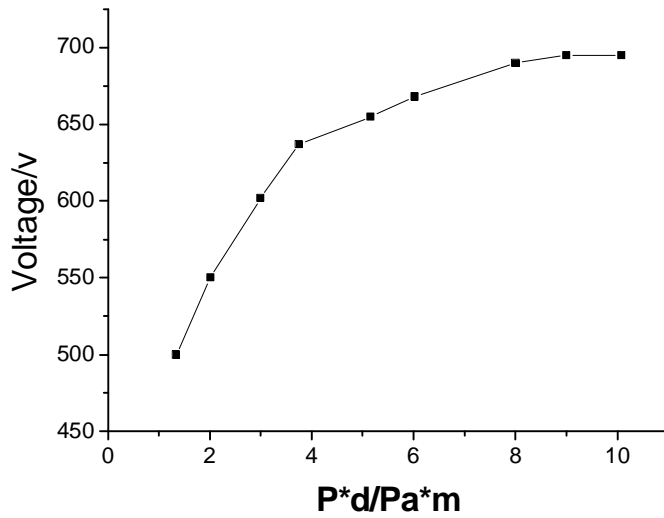


图 7、V-pd 曲线

二、实验结果分析

根据测量结果，分析击穿电压与 pd 乘积的关系，以及击穿电压与 p 、 d 值的关系。

实验三 直流辉光放电等离子体参数的测量

一、实验目的

- 1、了解等离子体的性质
- 2、采用 langmuir 双探针测量等离子体参数

二、实验装置

DH2005 型 直流辉光放电等离子体装置

三、实验原理

1、等离子体参数

a: 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。

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。

c: 等离子体频率: 表示等离子体对电中性破坏的反应快慢, 是等离子体震荡这种集体效应的频率为。

$$\text{粒子震荡频率: } \omega_{pi} = \sqrt{nie^2 / \epsilon_0 m_i}$$

$$\text{电子震荡频率: } \omega_{pe} = \sqrt{nie^2 / \epsilon_0 m_e}$$

d: 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”。

$$\text{德拜长度: } l_D = \left(\frac{kT_e}{4\pi e^2} \right)^{1/2}$$

2、等离子体参数的静电探针诊断原理

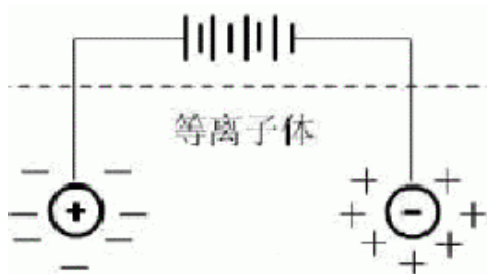


图 8、等离子体探针原理

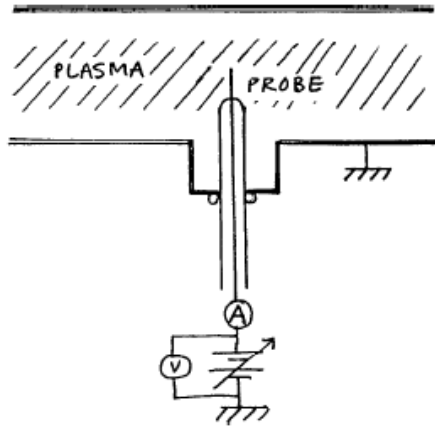


图 9、单探针法



图 10、双探针法

假设：

- (1)、被测空间是电中性的等离子体空间，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的发射。

则：对于插入等离子体的单探针有：

$$\text{随机电流： } I = -eJ_r A_s \quad , \quad J_r = \frac{1}{4} n \bar{U} = \frac{4}{n} \left(\frac{8T_e}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

根据玻耳兹曼定理：

$$\text{电子密度 } n = n_0 \exp\left(e \frac{V_p - V_s}{kT_e} \right)$$

式中： V_p 为探针电位， V_s 为等离子体电位

$$\text{所以：探针电流 } I = -\frac{en_0}{4} \exp\left(e \frac{V_p - V_s}{kT_e}\right) \left(\frac{8T_e}{\pi m}\right)^{\frac{1}{2}} A_s$$

而对于插入等离子体的双探针有：

设探针的面积分别为 A_1, A_2 ；电位为 V_1, V_2 ；电压 $V=V_1-V_2 \geq 0$ 。

流过探针 1, 2 的离子和电子电流分别为： i_{1+} , i_{1-} , i_{2+} , i_{2-} 。

对双探针整体为悬浮的故： $i_{1+} + i_{1-} + i_{2+} + i_{2-} = 0$

则从 2 流入 1 的电流为：

$$i_{2,1} = i_{2+} + i_{2-} - (i_{1+} + i_{1-}), \quad \frac{I}{2} = i_{2+} + i_{2-} = -(i_{1+} + i_{1-})$$

所以：

$$\begin{aligned} i_{1+} + \frac{I}{2} &= i_{1-} = -eA_1 J_r \exp\left(e \frac{V_1 - V_s}{kT_e}\right) \\ i_{2+} - \frac{I}{2} &= i_{2-} = -eA_2 J_r \exp\left(e \frac{V_2 - V_s}{kT_e}\right) \\ \Rightarrow \frac{i_{1+} + \frac{I}{2}}{i_{2+} - \frac{I}{2}} &= \frac{A_1}{A_2} \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \end{aligned}$$

故：

$$\begin{aligned} I &= 2i + \frac{\exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) - \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right)}{\exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) + \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right)} = 2i + \tanh\left(\frac{eV}{2kT_e}\right) \\ \Rightarrow \frac{dI}{dV_{(I=0, V=0)}} &= \frac{eI_i}{2kT_e} \end{aligned}$$

大致 I-V 函数关系曲线见下图：

$$\text{由此可知：电子温度： } T_e = \frac{eI_i}{2k \frac{dI}{dV_{(I=0, V=0)}}}$$

等离子体密度:
$$n = \frac{I_+}{\sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}}$$

注: $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库, $k = 1.38 \times 10^{-23}$, $1eV = 11600K$

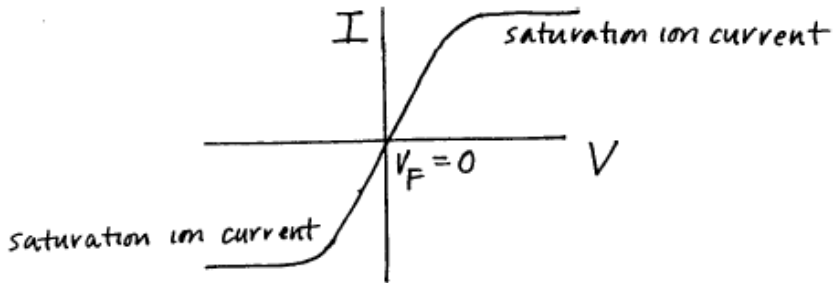


图 11、理想双探针曲线

四、实验内容

- 1、在电极距离一定的情况下，采用 Langmuir 双探针测量三组探针 I-V 变化数据，其中前两组为直流功率一定，不同气体，后两组为气压一定，不同功率。将所得数据添入表 1。
- 2、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等离子体密度。例如：

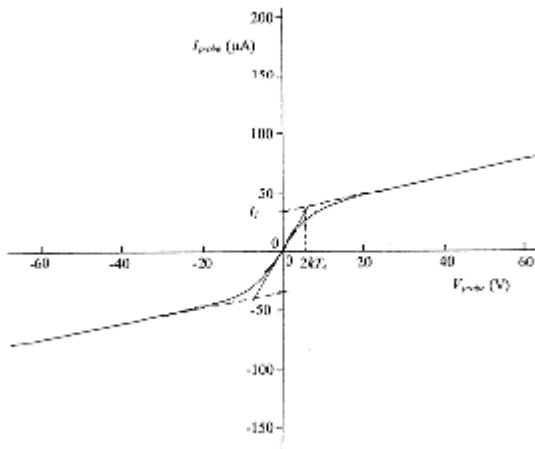


图 12、实验中双探针曲线

- 3、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及影响机理。

五、实验步骤

- A、按照实验内容的要求，讨论和制定最优的实验测量方案。
- B、根据实验原理图将双探针与电流表和电压表串联。联接好实验线路。
- C、插上总电源线，接通总电源开关。打开总电源。
- D、关闭进气气源流量计旋钮，打开隔膜阀，并依次打开冷却水开关，真空泵电源开关，抽取本底真空，真空泵工作约 5 分钟后接通电阻真空计电源，测量放电管内真空。
- E、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，将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，调节电压到所需功率。
- F、打开探针电压，缓慢调节电压，根据电流值大小，改变电流测量量程，并依次记录下 $V-I$ 关系数据。
- G、将探针电压调为零，并关闭探针电压，将探针电源输出线反过来与探针电流表和探针电压表串联
- H、重复上述过程依次记录 $I-V$ 关系数据
- I、在其它直流功率和气压下重复上述过程。

七、实验报告

一、实验结果

- 1、在电极距离一定的情况下，采用 Langmuir 双探针测量三组探针 I-V 变化数据，其中前两组为直流功率一定，不同气体，后两组为气压一定，不同功率。将所得数据添入表 8。

表 8、不同条件下 I-V 关系数据

电极距离： 100 mm					
750V*2.6mA		500V*4mA		570V*7mA	
功率 2W	气压 20 Pa	功率 2W	气压 40 Pa	功率 2W	气压 40 Pa
-100	-0.0193	-100	-0.0047	-100	-0.0107
-90	-0.0178	-90	-0.0045	-90	-0.0102
-80	-0.0163	-80	-0.0043	-80	-0.0096
-70	-0.0148	-70	-0.004	-70	-0.0088
-60	-0.0132	-60	-0.0037	-60	-0.008
-50	-0.0116	-50	-0.0035	-50	-0.0074
-40	-0.0101	-40	-0.0032	-40	-0.0066
-30	-0.0087	-30	-0.00288	-30	-0.0056
-20	-0.0072	-20	-0.00251	-20	-0.0049
-10	-0.0054	-10	-0.00214	-10	-0.00384
-9	-0.0053	-9	-0.00213	-9	-0.00376
-8	-0.005	-8	-0.00206	-8	-0.00368
-7	-0.0048	-7	-0.002	-7	-0.0036
-6	-0.0046	-6	-0.00197	-6	-0.00348
-5	-0.0042	-5	-0.00192	-5	-0.00334
-4	-0.0039	-4	-0.0019	-4	-0.00319
-3	-0.0035	-3	-0.0018	-3	-0.003
-2	-0.003	-2	-0.0016	-2	-0.0028
-1	-0.00246	-1	-0.0012	-1	-0.0026
-0.9	-0.00235	-0.9	-0.00117	-0.9	-0.00224
-0.8	-0.0022	-0.8	-0.00114	-0.8	-0.00218
-0.7	-0.002	-0.7	-0.00101	-0.7	-0.00214
-0.6	-0.00195	-0.6	-0.001	-0.6	-0.00206
-0.5	-0.00178	-0.5	-0.00087	-0.5	-0.0019
-0.4	-0.00162	-0.4	-0.00076	-0.4	-0.0018
-0.3	-0.00145	-0.3	-0.00064	-0.3	-0.0017
-0.2	-0.00127	-0.2	-0.00059	-0.2	-0.0015
-0.1	-0.00111	-0.1	-0.00045	-0.1	-0.00117

0	0.0006	0	0.00037	0	0.0009
0.1	0.00111	0.1	0.00045	0.1	0.00117
0.2	0.00127	0.2	0.00059	0.2	0.0015
0.3	0.00145	0.3	0.00064	0.3	0.0017
0.4	0.00162	0.4	0.00076	0.4	0.0018
0.5	0.00178	0.5	0.00087	0.5	0.0019
0.6	0.00195	0.6	0.001	0.6	0.00206
0.7	0.002	0.7	0.00101	0.7	0.00214
0.8	0.0022	0.8	0.00114	0.8	0.00218
0.9	0.00235	0.9	0.00117	0.9	0.00224
1	0.00246	1	0.0012	1	0.0026
2	0.003	2	0.0016	2	0.0028
3	0.0035	3	0.0018	3	0.003
4	0.0039	4	0.0019	4	0.00319
5	0.0042	5	0.00192	5	0.00334
6	0.0046	6	0.00197	6	0.00348
7	0.0048	7	0.002	7	0.0036
8	0.005	8	0.00206	8	0.00368
9	0.0053	9	0.00213	9	0.00376
10	0.0054	10	0.00214	10	0.00384
20	0.0072	20	0.00251	20	0.0049
30	0.0087	30	0.00288	30	0.0056
40	0.0101	40	0.0032	40	0.0066
50	0.0116	50	0.0035	50	0.0074
60	0.0132	60	0.0037	60	0.008
70	0.0148	70	0.004	70	0.0088
80	0.0163	80	0.0043	80	0.0096
90	0.0178	90	0.0045	90	0.0102
100	0.0193	100	0.0047	100	0.0107

- 2、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等离子体密度。
- 3、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及影响机理。

注：图 16—18 是在 0V 附近的放大图

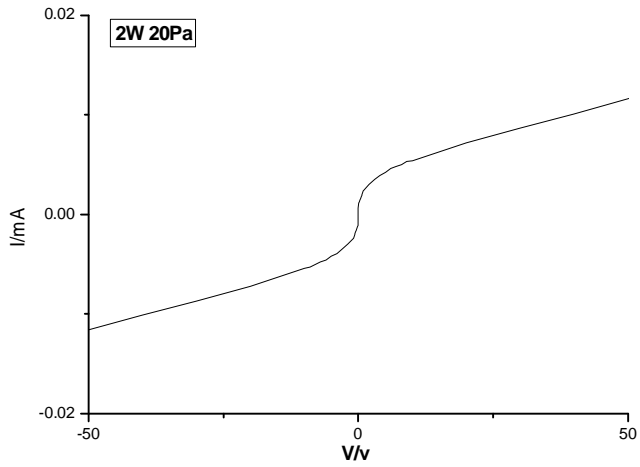


图 13、2W /20Pa 的 I-V 关系数据

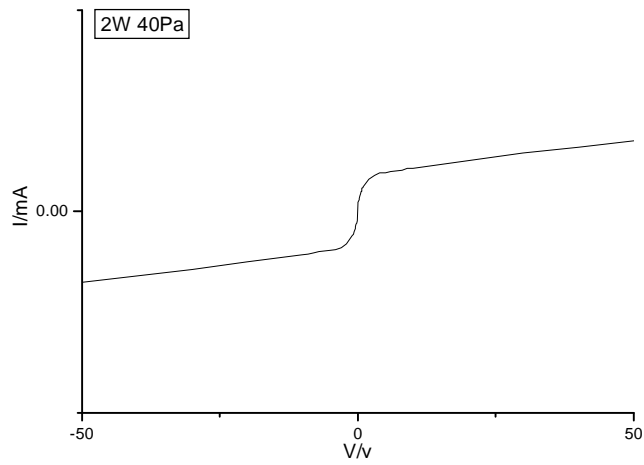


图 14、2W /40Pa 的 I-V 关系数据

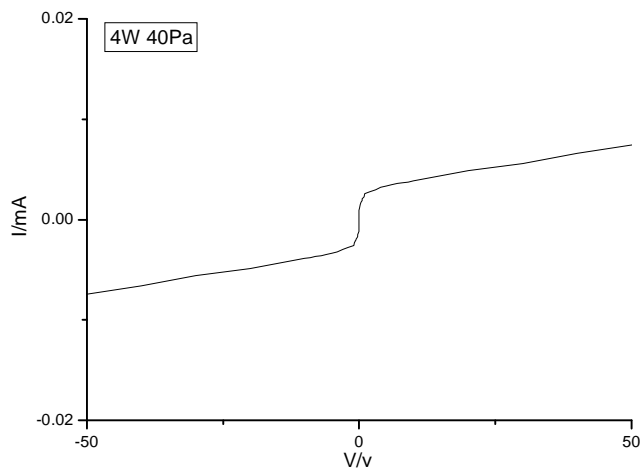
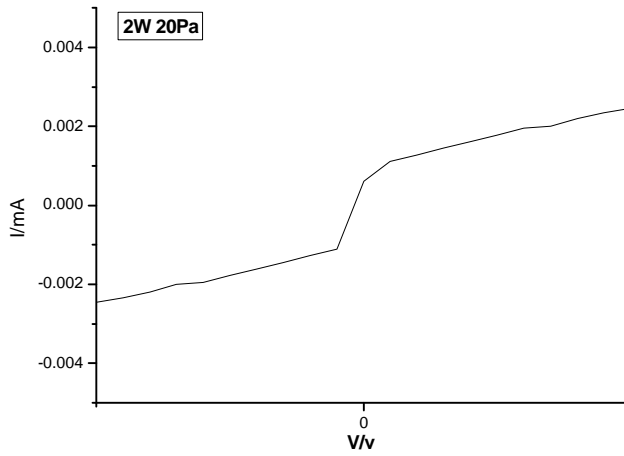
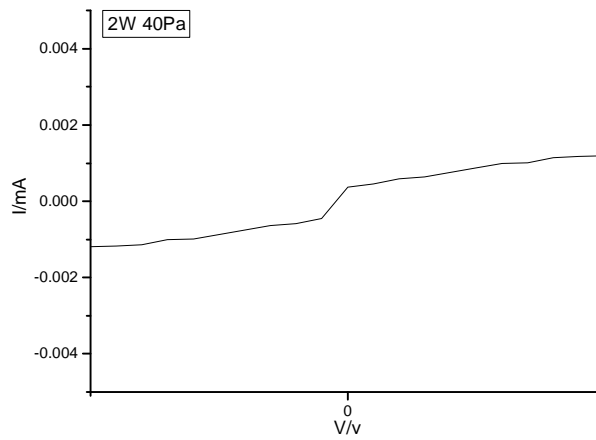


图 15、4W /40Pa 的 I-V 关系数据



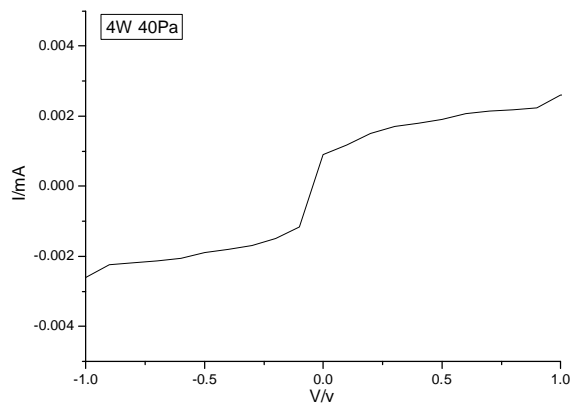
$$T_e = 5.8 \times 10^3 \text{K} = 0.5 \text{eV}$$

图 16



$$T_e = 2.5 \times 10^3 \text{K} = 0.21 \text{eV}$$

图 17



$$T_e = 3.2 \times 10^3 \text{K} = 0.28 \text{eV}$$

图 18