

## 直流辉光等离子体放电实验

### 一. 实验装置:

DH2006 型直流辉光等离子体实验装置

### 二. 实验目的:

观察直流低气压辉光等离子体的放电现象,通过对辉光等离子体的伏安特性曲线的测量,理解辉光等离子体的电学特性;

理解直流电气击穿的机制;

验证帕邢定律;

采用 Langmuir 双探针法测量等离子体参数。

### 三. 背景知识:

等离子体作为物质的第四态在宇宙中普遍存在,在实验室中对等离子体的研究是从气体放电开始的。朗缪尔和汤克斯首先引入“等离子体”这个名称。它在工业、农业、国防、医药卫生等领域获得了越来越广泛的应用,为利用受控热核反应,解决能源问题提供了诱人的前景,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。等离子体作为物质的第四态。近年来等离子体物理学有了较快发展,并被应用于电力工业、电子工业、金属加工和广播通讯等部门,

### 四. 实验原理:

#### 1. 等离子体及其物理特性及主要参量:

等离子体具有一系列不同于普通气体的特性:

(1) 高度电离,是电和热的良导体,具有比普通气体大几百倍的比热容。(2) 带正电的和带负电的粒子密度几乎相等。(3) 宏观上是电中性的。

描述等离子体的一些主要参量为:

(1) 电子温度  $T_e$ 。它是等离子体的一个主要参量,因为在等离子体中电子碰撞电离是主要的,而电子碰撞电离与电子的能量有直接关系,即与电子温度相关联。

(2) 带电粒子密度。电子密度为  $n_e$ , 正离子密度为  $n_i$ , 在等离子体中  $n_e \approx n_i$ 。

(3) 轴向电场强度  $E_z$ 。表征为维持等离子体的存在所需的能量。(4) 电子平均动能  $E_e$ 。(5) 空间电位分布。

## 2. 气体放电

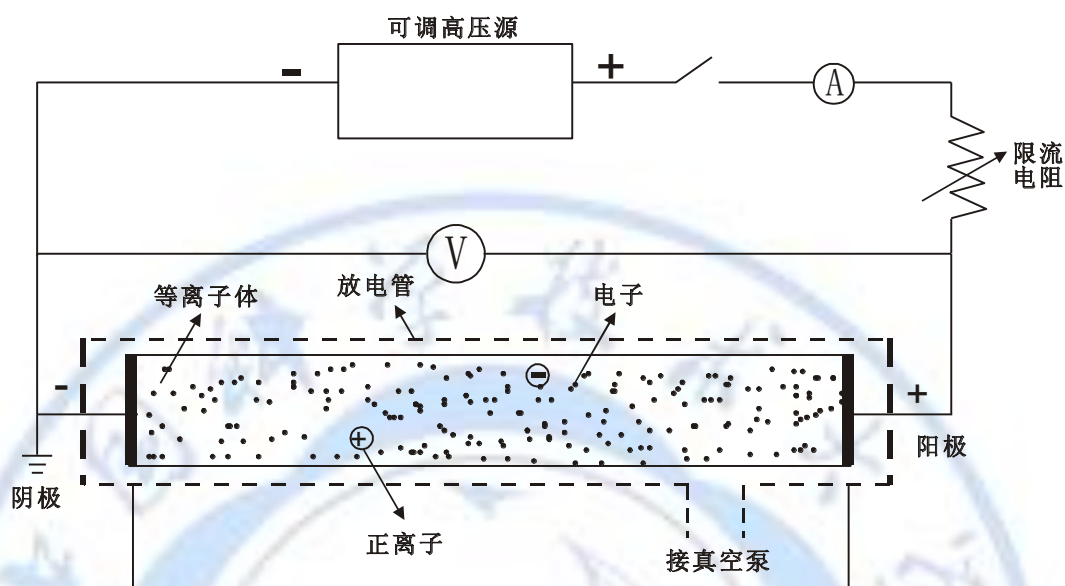


图 1、低气压放电管工作原理示意图

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。

在电极两端施加电压时，通过调节高压源输出电压可得到气体放电的伏安特性曲线，如图 2 所示。由气体放电的伏安特性曲线图可看出，开始在 A、B 点间电流随电压的增加而增加，但此时电流上升变化得较缓慢，表明放电管中气体电离度很小，继续提高电压，电流不再增加，呈本底电离区的饱和状态；继续提高电压，电流会迅速地呈指数关系上升，从 C 到 E 区间，这时电压较高但电流不大，放电管中无明亮的辉光；自 E 点起，再继续提高电压，发生了新的变化，此时电压不但不增高反而下降，同时在放电管内气体发生了电击穿，观测到耀眼的辉光。这时因电离而电阻减小，但电流开始增长，在 E 点处对应的电压称为气体的击穿电压。放电转变为辉光放电，电流开始上升而电压一直下降到 F 点，然后电流继续上升但电压恒定不变直到 G 点；而后电压随电流的增加而增加到 H 点，放电转入较强电流的弧光放电区。I 和 J 之间是非热弧光区，电流增加电压下降，在 J 和 K 之间是热弧光区，等离子体接近热力学、动力学平衡，从

J 到 K 的弧光放电区属于热等离子特性。

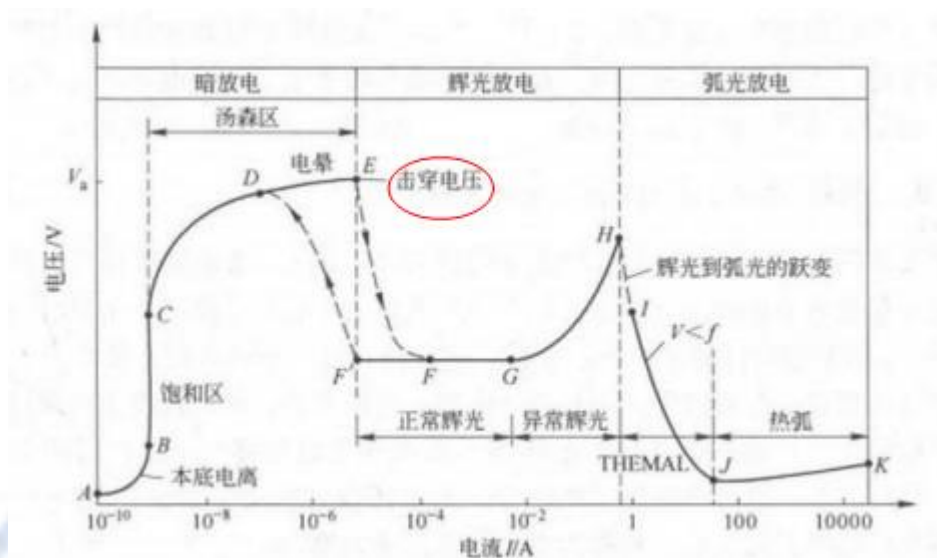


图 2 气体放电伏安特性曲线：AB 段—非自持放电本底电离区；BC 段—非自持放电饱和区；CE 段—汤森放电区；DE 段—电晕放电区；EF 段—前期辉光放电区；FG 段—正常辉光放电区；GH 段—异常辉光放电区；HK 段—弧光放电区

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着显著差异。经典的直流低气压放电在正常辉光放电区有如图 3 所示：

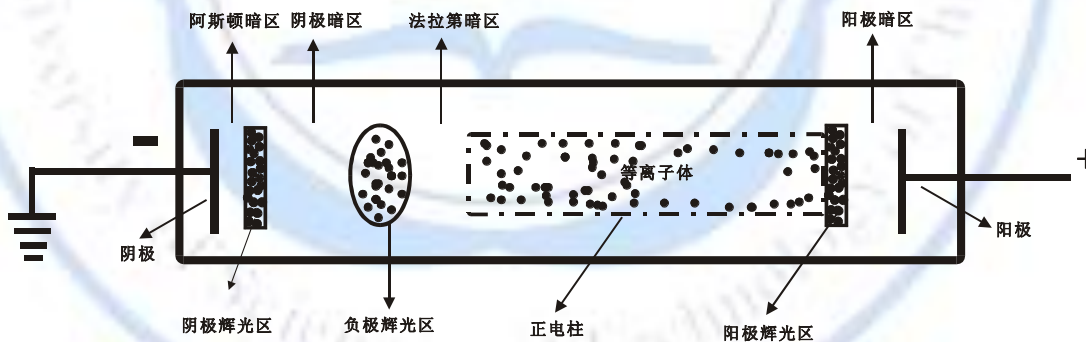


图 3、低气压放电现象

从左至右，其现象结果如下：

阴极：阴极由导电材料制成。

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，或外部进入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。阴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  $1\text{V/cm}$ 。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，正电柱变长。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，正电柱是一个长的均匀的辉光。

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。

### 3. 帕邢定律

在低气压直流放电中，气体的击穿电压由下式决定：



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

其中  $\gamma$  为二次电子发射系数，常数  $A$ 、 $C$  和气体种类有关的常数， $p$  为压强， $d$  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，这一现象被称为帕邢（Paschen）定律。

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，

$$(pd)_{min} = \frac{e}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \frac{2.718}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2)$$

$$V_{b,min} = e \frac{C}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = 2.718 \frac{C}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (3)$$

#### 4. 郎缪尔（Langmuir）探针

测试等离子体的方法被称为诊断。等离子体诊断有探针法，霍尔效应法，微波法，光谱法等。本次实验中采用探针法。探针是封入等离子体中的一个小的金属电极（其形状可以是平板形、圆柱形、球形）。以放电管的阳极或阴极作为参考点，改变探针电位，测出相应的探针电流，得到探针电流与其电位之间的关系，即探针伏安特性曲线。要获得理想的伏安特性曲线，探针要满足如下条件：

- (1) 不存在磁场；
- (2) 插入等离子体的探针是平面探针，探针附近的鞘层厚度要远小于探针尺寸；
- (3) 探针的尺寸要小于电子的平均自由程；
- (4) 等离子体满足电中性条件，鞘层以外的等离子体基本不受探针干扰；
- (5) 探针鞘层中不发生激发和电离；
- (6) 探针材料不会在等离子体中发生化学反应。

探针法分单探针法和双探针法。朗缪尔探针又称为静电探针，是一种双探针结构。双探针法是在放电管中装两根探针，相隔一段距离  $L$ 。相比于单探针的诊断方法，双探针不以放电装置的阴极或者阳极作为参考点，而是引入一根与测量

探针完全相同的探针为参考极，从而使两根探针均处于悬浮电位，进而减少了探针对于等离子体的扰动，使测量结果更为可靠。

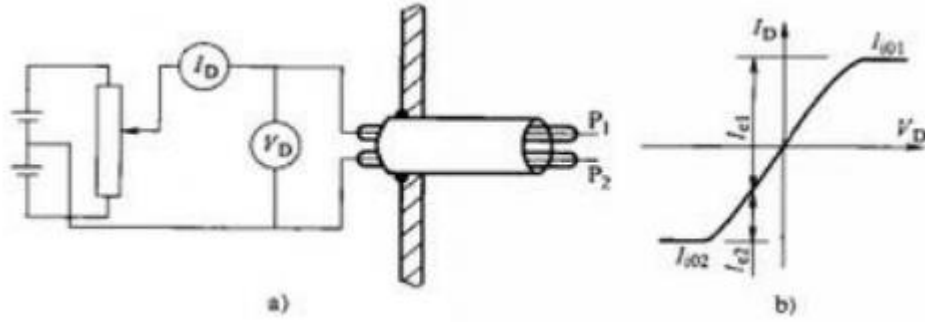


图 4. 双探针测量原理示意图与伏安特性

双探针诊断等离子体示意图如图 4 (a) 所示，它由两根材料、形状、尺寸完全相同的探针 P1 和 P2 构成，其伏安特性如图 4 (b) 所示。双探针的伏安特性曲线要满足如下方程：

$$I_D = I_{i02} - I_{e2} = I_{e1} - I_{i01} \quad (4)$$

$$V_D = V_{P1} - V_{P2} + V_e \quad (5)$$

$$I_{e1} = I_{e01} \exp\left(-\frac{eV_{P1}}{kT_{e1}}\right) \quad (6)$$

$$I_{e2} = I_{e02} \exp\left(-\frac{eV_{P2}}{kT_{e2}}\right) \quad (7)$$

式中， $I_{i01}$ 、 $I_{i02}$  是探针 1、2 的离子饱和电流； $I_{e1}$ 、 $I_{e2}$  是电子电流； $I_{e01}$ 、 $I_{e02}$  是电子饱和电流； $V_{P1}$ 、 $V_{P2}$  是探针鞘层电位； $V_e$  是两探针间的电位差。

如果两根探针靠得足够近，且等离子体均匀，则有  $kT_{e1} = kT_{e2}$ ， $n_{e01} = n_{e02}$ ，由式 (4)~(7) 得

$$\frac{I_{e1}}{I_{e2}} = \frac{I_{e01}}{I_{e02}} \exp\left(-\frac{eV_{P1} - eV_{P2}}{kT_e}\right) = \frac{I_{e01}}{I_{e02}} \exp\left(-\frac{eV_D - eV_e}{kT_e}\right) \quad (8)$$

对式 (8) 两边取对数，并对  $V_D$  微分后得

$$\frac{1}{I_{e1}} \frac{dI_{e1}}{dV_D} - \frac{1}{I_{e2}} \frac{dI_{e2}}{dV_D} = \frac{e}{kT_e} \quad (9)$$

将式 (4) 代入式 (9)，并令  $V_D = 0$  得

$$kT_e = -e \frac{I_{i01} I_{i02}}{I_{i01} + I_{i02}} \left( \frac{dV_D}{dI_D} \right) \Big|_{V_D=0} \quad (10)$$

如果两探针完全相同，则  $I_{i01} \approx I_{i02}$ ，则有

$$kT_e = -e \frac{I_{i0}}{2} \left( \frac{dV_D}{dI_D} \right) \Big|_{V_D=0} \quad (11)$$

式(10)和式(11)就是双探针测量电子温度的计算公式。

如果电子能量服从麦克斯韦分布，则单位时间内打在探针单位面积上的电子数为

$$N_e = \frac{1}{4} n_e \bar{u}_e \quad (12)$$

假设探针接受电子的有效面积为  $S_e$ ，则探针上接受的饱和电流为

$$I_{e0} = \frac{1}{4} e n_e \bar{u}_e S_e \quad (13)$$

电子的平均速度为

$$\bar{u}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (14)$$

由式(13)与式(14)求得电子密度的计算公式为

$$n_e = \frac{4I_{e0}}{eS_e} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT_e}} \quad (15)$$

式中， $I_{e0}$ 的单位为 A，为了计算方便，取 0.05A； $S_e$ 的值取  $0.04\text{cm}^2$ ； $kT_e$ 的单位为 eV， $1\text{eV}=11600\text{K}$ ， $k$  为玻尔兹曼常数  $k=1.3806505(24) \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $m_e$  为电子质量  $m_e=0.91 \times 10^{-30} \text{ kg}$ ； $n_e$  的单位为  $\text{cm}^{-3}$ 。

利用实验数据绘制的双探针  $V$ - $I$  特性曲线同理论曲线会有很大差距，绘制  $V$ - $I$  特性曲线时要有足够的数据量，斜率  $dV_D/dI_D$  取值要注意是在  $V_D=0$  附近，饱和电流  $I_{i0}$  一般用实验曲线中  $I_{i01}$  和  $I_{i02}$  延长线与纵轴的交点确定。饱和电流  $I_{i01}$ 、 $I_{i02}$ 、斜率  $dV_D/dI_D$  的取值如图 5 所示。

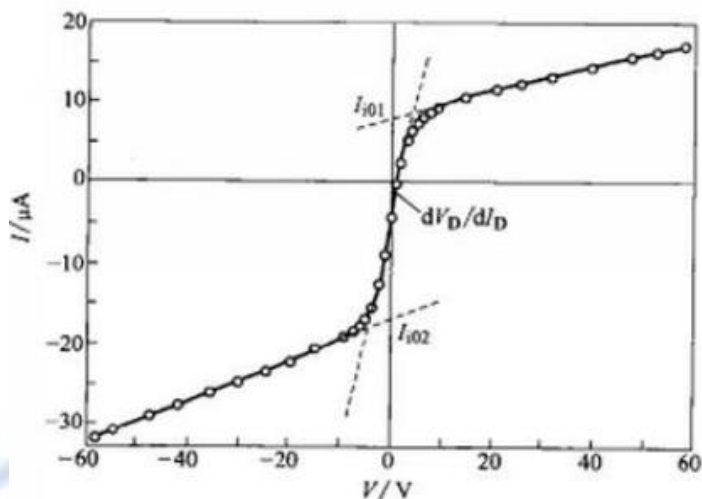


图 5. 双探针法测量电子温度数据曲线

在坐标原点，如果两根探针之间没有电位差，它们各自得到的电流相等，所以外电流为零。然而，一般说来，由于两个探针所在的等离子体电位稍有不同，所以外加电压为零时，电流不是零。如果双探针  $V$ - $I$  曲线不对称，饱和电流可取正负半轴的平均值再利用式(11)进行计算或直接利用式(10)进行计算，求得电子温度，然后利用式(15)求得电子密度。

## 五. 实验内容:

### 1. 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量

- 1) 了解直流磁控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，并进行分析。辉光放电后要及时把电流调到 100mA 以下，观察现象时可以把电流调到 20mA 以下，容易观察到各个放电区。
- 2) 固定电极距离 120-150 mm，取 2 个不同的工作气压 (20, 40Pa)，测量辉光放电阶段的放电电压、电流，将测量结果填入下表。**注意：起辉时电压会偏高，起辉后及时降电压使电流小于 100 mA，放电打火不稳定时要等一小会，待稳定了再测量，可以从 100mA 附近开始，每降低 5mA 左右记录一个电压值，得到  $I$ - $V$  关系。20Pa 时开始放电电压 700V 以上；调节电压会有所滞后，待调节好后 10s 左右读数。**
- 3) 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。



表 1、电压、电流测量值

电极距离:	mm				
工作气压:	20 Pa	工作气压:	40 Pa	工作气压:	60 Pa (选做)
电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA	电压/v	电流/mA

## 2. 气体击穿电压的测定及帕邢定律的验证

- 1) 掌握击穿电压的测量方法，用击穿电压档，调节电压快到击穿电压时一定要慢，等击穿电压显示值突变（大于 0.5V）同时有放电现象时记录当前放电管电压值。**注意：是出现放电现象前一刻的放电管电压值读数，待放电后该读数会减小；放电现象出来后立刻降电压停止放电，再记录击穿前一刻放电管电压，防止电流过大损伤石英管。**
- 2) 在保持  $d$  不变，取 5 个不同的压强  $p$  (10–50Pa)，测量对应的气体击穿电压，并作图分析。

## 3. 朗缪尔双探针法测量电子温度和等离子体密度

- 1) 保持电极距离不变，采用朗缪尔双探针测量 2 组（必做 1 组，另一组选做）探针  $I$ - $V$  变化数据，保持气压一定（建议 20 Pa），不同功率（放电电流小于 20mA）。将所得数据填入表 2。**注意：0~10 V 间隔 1V，10–100 V 间隔 10 V；用左边那组靠近正电柱的探针，辉光电流要小（小于 20mA），使正电柱比较明显。**
- 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电子密度。并根据计算结果，分别分析功率（放电管电压\*电流）和气压对等离子体参数的影响及影响机理。

表 2、不同条件下 V-I 关系数据

功率 W; 气压 Pa		功率 W; 气压 Pa	
电压/V	电流/uA	电压/V	电流/uA

4. 定性观测磁场对等离子体辉光的影响, 强度、方向、位置等。磁铁线圈 1000 匝。(选做)

## 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. 磁场和工作气压对辉光放电中的 V-A 特性曲线有何影响? 其影响机制是什么?  
(选做)

## 七. 参考资料:

1. 竹涛著, 低温等离子体技术处理工业源 VOCs, 冶金工业出版社, 2015. 05
2. 张映辉, 大学物理实验, 机械工业出版社, 2010. 01
3. 林立中, 直流辉光等离子体特性研究, 福州大学学报, 1999. 08
4. 茅卫红、张慧云、陈宏, 低压直流辉光等离子体的放电特性, 第六届全国高等学校物理实验教学研讨会论文集(下), 2010

5. 胡明、万树德、钟雷、刘昊、汪海，磁控直流辉光等离子体放电特性，物理学报，2012.04

## 实验步骤

### 注意事项：

- 加高压之后千万不能触碰顶端放电的配件，防止触电。
- 不要擅自调节电极距离，如有必要请老师帮忙，调节前必须把高压调到零，关闭高压后才能调节。
- 开启高压前要开启冷却水。
- 高压最高加到 1400 V。
- 放电电流小于 100 mA。
- 测击穿电压时，放电后立刻降电压结束放电，再记录击穿前放电管电压，因为此时不显示放电电流，而实际电流很大。

1. 打开电源总开关（在仪器左侧一个气动开关），拧动仪器钥匙通电。
2. 打开机械泵，打开挡板阀（逆时针拧到底），打开电阻真空计，抽本底真空到  $<5\text{ Pa}$ 。
3. 打开流量计到阀控档，调节流量计流量（一般  $10\text{sccm}$  左右，但不同仪器有所不同，可以根据需要调节流量，气压  $20\text{Pa}$ ），同时观察电阻真空计读数到指定压强。
4. 开水冷，开高压，并将工作选择打到所需的档位：内容 1 档位辉光放电测量，内容 2 档位击穿电压测量，内容 3 档位探针测量。
5. 缓慢调节高压调节旋钮，调节高压大小，根据电流值大小，转换不同的电流量程。调节有点滞后，测量时要缓慢调节电压。
6. 做完一项内容之后，把高压调到零，改变工作选择到所需档位继续测量。不要擅自调节电极距离，如有必要请老师帮忙，调节前必须把高压调到零，关闭高压后才能调节，否则电极带高压很危险。
7. 实验结束后把高压调到零，关闭高压，工作选择到断档，关闭冷却水，流量计打到关闭。待压强低于  $5\text{Pa}$ （若抽真空  $5\text{min}$  还未到  $5\text{Pa}$  也可以关闭）再关闭电阻真空计、挡板阀、机械泵，拧钥匙到关闭档。最后关闭仪器总电源。