

一、实验原理:

1. 等离子体放电的最佳条件

通常来讲, 利用气体作为等离子体工作物质来获得等离子体需要满足以下两个条件:

合适的气体压强
足够的电场强度

由于该系统放电电源的富余量较大, 因此可以研究该装置起辉电压随气体压强的变化关系, 由此可以得到获取等离子体的最佳气体压强的条件。

2. 用经典探针测量诊断等离子体的电子温度 T_e 和电子密度 N_e

静电探针又叫朗缪尔探针, 用一根金属细丝外套一根金属管, 两者之间用玻璃或陶瓷管使其绝缘, 金属丝的端部裸露部分为工作端。

将探针插入等离子体, 由于等离子体中电子的速度远大于离子的速度, 一开始电子进入探针的数目就会远大于离子进入探针的数目, 因此会使得探针表面逐步形成一个负电荷层, 在临近探针工作端表面空间形成薄层离子鞘, 使探针相处该处等

离子体呈现负电位, 计作 V_f , 被称为探针悬浮点位, 在其作用下, 进入探针表面的电子和离子数目达到平衡。当外加电源使探针相对该处等离子体空间电位的电位差 V_p 不等于悬浮电位 V_f

$$I_{eo} = \frac{1}{4} N_e e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} S = 2.5 \times 10^{-14} N_e S \sqrt{kT_e}$$

时, 有电流 I 产生。其中电子饱和电流为:

而离子饱和电流为:

做近似 $N_i Z = N_e$:

其中 T_e 为电子温度, kT_e 的单位为 eV, N_e 为电子密度,

$$I_{io} \approx N_i Z S \sqrt{\frac{kT_e}{\epsilon m_i}} \quad \epsilon = 2.718 \dots$$

$$I_{io} \approx 3.62 \times 10^{-27} N_e S \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$$

e 为电子电荷, S 为探针的表面积。在伏安曲线的中部,

$$I = I_e - I_{io} = I_{eo} e^{-V_p/kT_e} - I_{io}$$

探针电流等于电子流和离子饱和流之和, 即:

整理并取对数:

因此可以得到:

$$\frac{V_p}{kT_e} = -\ln \frac{I + I_{io}}{I_{eo}}$$

$$kT_e = \left| \frac{dV_p}{d \ln \frac{I+I_{io}}{I_{eo}}} \right|$$

不过, 实际上实验中测量得到的电压并不是 V_p , 而是 $V=V_p+V_R$, 因此上式可以改为:

$$kT_e = \left| \frac{dV}{d \ln \frac{I+I_{io}}{I_{eo}}} \right|$$

由此可以求得电子温度, 进而求出电子密度。

3、 帕那定律:

二电极间开始形成电弧或放电的击穿电压是气体的压力和电极距离乘积的函数, 帕那找到此函数的形式是:

此处 a 和 b 是常数, p 是气体的压力, d 是电极的距

$$V = \frac{apd}{\ln pd} + b$$

离。 a 、 b 和气体的成分有关。在标准气压下, $a=43.66$; $b=12.8$ 。帕那定律表示二极间开始的击穿电压和气体压力及二极间距离乘积的关系; 实际是一条弯曲的曲线; 开始时, 气体压力减少, 电压也随之下降; 但当气压再下降时, 电压又慢慢上升; 一直升至比开始时的电压高 2-3 倍; 这条击穿电压和气体压力及电极距离乘积的曲线又称帕那曲线。帕那定律是德国物理学家帕那于 1889 年发现的; 故以他的名字命名。帕那定律在气压很高和二电极距离很短时不能成立。

二、 实验数据与分析:

1、 击穿电压与 Paschen 定律的验证:

我们记录气体放电时的气压与起辉电压如下:

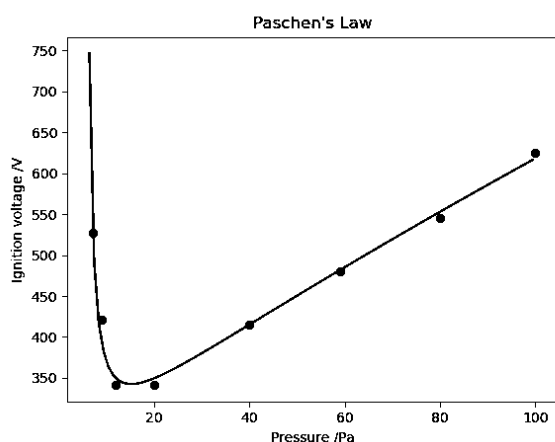
气压/Pa	起辉电压/V	现象
7.2	527	阴极板附近出现淡紫色辉光, 极弱
9.0	421.2	较上一次现象明亮一点
12	341	较上一次现象明亮一点, 能勉强看到第二层冕层。
20	342	阴极内层强度继续高亮, 出现较为明显的黄色冕层
40	415	阴极非常明亮, 呈现紫白色的辉光, 且阳极板上有微量辉光, 可能是反射
59	480	阴极板辉光进一步明亮, 冕层已无法分辨
80	545	同上
100	625	同上

对实验现象的总结如下:

- 1、当电压较小时, 辉光电流为0, 没有明显的现象。
- 2、电压逐渐调大, 逐渐出现辉光, 辉光为两层, 内层呈紫色, 外层呈黄色。阳极无明显辉光, 主要集中在阴极区域。

- 3、随着电压的加大，颜色逐渐更深，亮度更大。
- 4、当电压较小时，辉光电流为0，没有明显的现象。
- 5、电流逐渐调大，达到某个临界值时，突然产生明显的辉光现象，并且电压突然降低。
- 6、电压调大时，阳极区域的辉光不稳定，阴极比较稳定。
- 7、当电压从高调整到低于临界值时，辉光仍存在，当电压较低才消失。

将我们的实验数据代入 Paschen 定律的表达式拟合得到图像为：

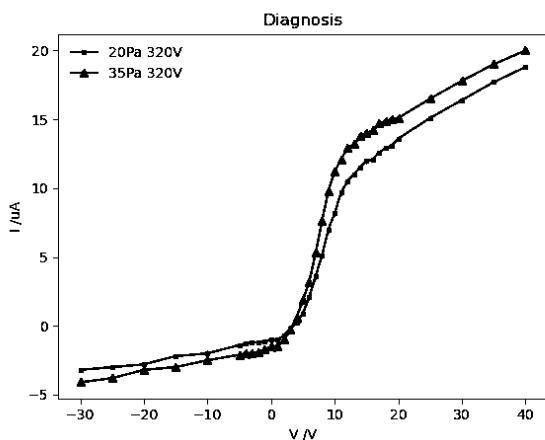


拟合得到参数分别为 $a = 79.34$, $b = 126.81$, $d = 0.178$, 拟合优度 r^2 为 0.986 , 拟合结果较好, 说明

3 Paschen 定律的成立。

2、诊断实验:

先调整电压出现辉光, 确定放电后逐渐调低电压到规定值, 稳定 3min 后开始测量取点, 读取探针数据过程中要保证放电状态稳定, 压强以及放电电压参数保持不变, 采集如下两组数据 (气体介质均为 Ar), 绘制图像为:
得到 20Pa 的情况下有 $i_{i0} = 2.1\mu A$, $i_{e0} = 9.7\mu A$;



35Pa 的情况下有 $i_{i0} = 0.6\mu A$, $i_{e0} = 12.1\mu A$ 。分别拟合各自段得到斜率为:

$$b_{20Pa} = 1.5343, \quad b_{35Pa} = 1.775$$

各自的拟合优度为:

$$R^2_{20Pa} = 0.9976, R^2_{35Pa} = 0.9887$$

代入公式计算得到

$$T_{20Pa} = 1.78 \times 10^4, T_{35Pa} = 2.06 \times 10^4$$

$$N_{20Pa} = 1.99 \times 10^{13} m^{-3}$$

$$N_{35Pa} = 2.31 \times 10^{12} m^{-3}$$

三、思考题

1、为什么要用氦气作等离子气体?

首先相对简单的发射光谱, 对发射光谱会产生极少的干扰, 在原子化的特性上, 电离或者激活元素周期表上的大多数元素。

因为在氦气和其它元素之间缺乏稳定的化合物形式, 这样相对于利用其它气体作等离子气体, 会比其他稀有气体的费用较低, 而且氦气占空气中的1%, 是最可能得到的, 在工艺、细帘上也比较容易获取。

最重要一点是, 相比分子气体如氮气或氧气, 氦气相

对低的导热率, 在这种条件下也是比较适合做等离子气体的。

2、在我们的气体放电试验中改变介质气体或电极距离, 放电条件和放电现象会有什么变化?

根据 Paschen's law, 击穿电压为:

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right)\right]}$$

因此改变电极距离和介质气体, 会改变击穿电压的大小, 同时会影响放电现象, 比如辉光颜色、辉光稳定性、不同电压下的辉光的明显程度。

3、在我们的试验中, 这种气体放电 (辉光放电) 获得的等离子体, 电子温度很高但整体温度很低 (试验中触摸电极室可以感觉近似室温), 这是为什么?

在正辉区, 辉光放电比较明显。此时, 气体处于高度电离状态, 但是这个区域电场强度较小, 并且沿着轴线具有一

个恒定的值。因此在这个区域带电粒子的无规则热运动要强于它们的定向运动，因此带电粒子的运动基本符合麦克斯韦速度分布律。根据其具体的分布，可以得到一个相应的温度，即为电子的温度。而由于电子的质量远小于离子、原子的质量，因此电子更容易在电场中获得能量，并且电子与它们进行碰撞的时候，能量的传递是很小的，因此电子的平均动能远大于其他的粒子。在这个区域中，电子、离子、原子构成了一种非平衡状态，电子的动能高而离子分子的动能较低，因此虽然电子的温度很高，但是整体的温度会较低。

4、除了朗缪探针诊断法，还有哪些常用的等离子体诊断方法？

发光光谱法：谱线加宽法测温，相对强度法测温，绝对强度法测温。

激光法：激光干涉法，激光散射法。

粒子束法

质谱法。

苗立扬

PB19000132

微波诊断法