

# 双探针法测量直流辉光放电等离子体参数

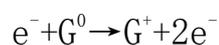
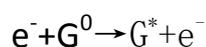
刘浏 06300720361

**【摘要】**郎缪尔探针在测量低气压辉光离子体中被广泛应用。本文就双探针法测等离子体参数的原理、现象以及结论进行了探讨。分析了本组的实验结果，求出了不同条件下辉光放电等离子体中的电子温度，分析了功率和气压对电子温度的影响，并就结果中的一些与不理想的部分做出了解释。

**【关键词】**等离子体 参数 辉光放电 双探针法 电子温度

## 1. 引言

电流通过气体的现象称为气体放电。从日常生活中的日光灯管、电闪雷鸣，到工业生产中广泛使用的溅射镀膜、离子镀膜、离子轰击等，都与气体放电有关。具有一定能量的电子与中性原子发生非弹性碰撞时，电子把一部分动能传给原子，使该原子激发或电离，即



激发原子  $G^{*}$  会产生特定颜色的辉光；产生的气体离子  $G^{+}$  成为等离子体的一部分。

等离子体 (plasma) 是指电离度大于 1% 的电离介质，是和固、液、气同一层次物质存在形式。在众多等离子体测量手段中，郎缪尔探针法被认为是最简便的一种方法。郎缪尔探针法由伸入等离子体内的导体作为探针，向它施加电压，通过测定探针电流，得到电流-电压 (I-V) 特性曲线，从而求得等离子体的参数。

本小组用双探针法对直流辉光放电等离子体的参数进行了测量，本文将对测量的结果进行分析和探讨。

## 2. 直流气体辉光放电特性与原理<sup>[1]</sup>

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右图：

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  $1\text{v/cm}$ 。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。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。

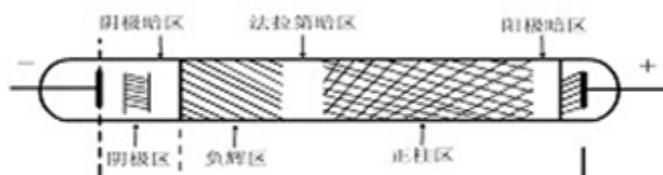


图 1. 直流低气压辉光放电区示意图

**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. 等离子体参数与探针法原理

#### (1)、等离子体参数：

①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

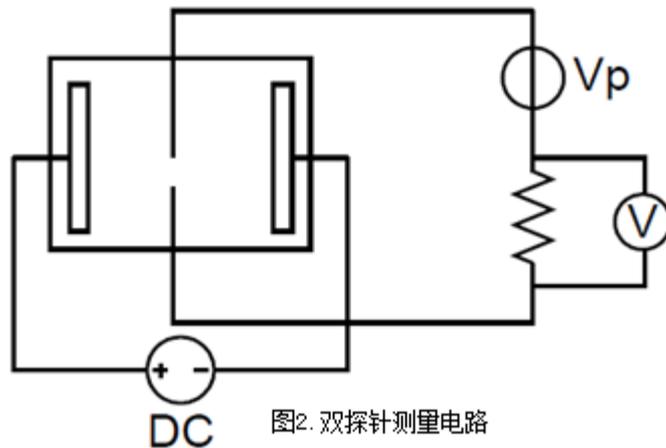
②等离子体温度：对于平衡态等离子体（高温等离子体），温度是各种热运动的平均量度；对于非平衡态等离子体（低温等离子体），由于电子、离子可以达到各自的平衡态，故要用双温模型予以表述。一般用  $T_i$  表示等离子体温度， $T_e$  表示电子温度。本实验的对象是低温等离子体。

③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”。

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

#### (2)、双探针法原理

本实验采取双探针法。双探针通常在没有合适的接地电极的等离子体中<sup>[2]</sup>，其优点在于，其净电流值绝不会超过离子饱和电流，所以能最大程度的降低对放电的干扰<sup>[2]</sup>。而其缺点在于不能反映出等离子体的空间电位。实验中使用的双探针测量电路如图2。其中，两探头均由钨丝制成，置于直流放电气体正柱区内。



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

一个理想双探针I-V曲线如图：

则对于插入等离子体的双探针：

电子温度：

$$T_e = \frac{eI_i}{2k \frac{dI}{dV}(I=0, V=0)} \quad (2)$$

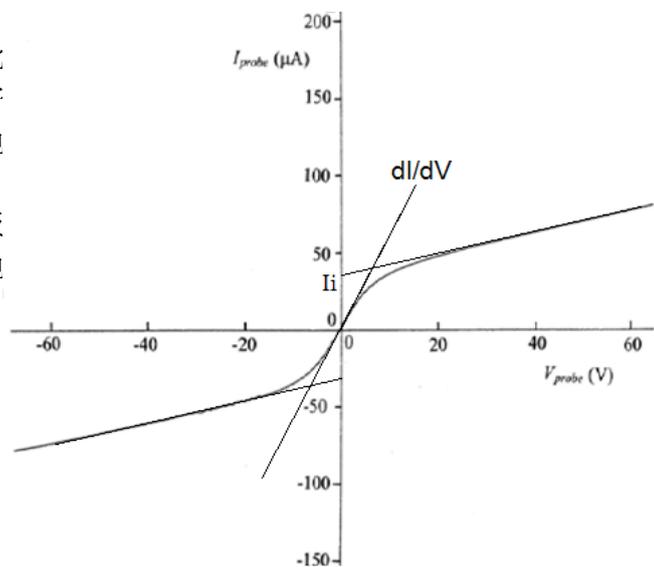


图3.理想双探针实验曲线

等离子体密度:

$$n = \frac{I_+}{\sqrt{\frac{kTe}{mi}}} \quad (3)$$

#### 4. 测量结果与分析。

经过测量，不同功率和不同气压下的等离子体参数结果如下：

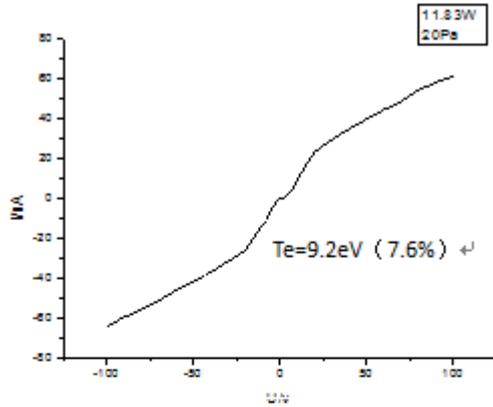


图4 11.83w, 20Pa 时的探针 I-V 图

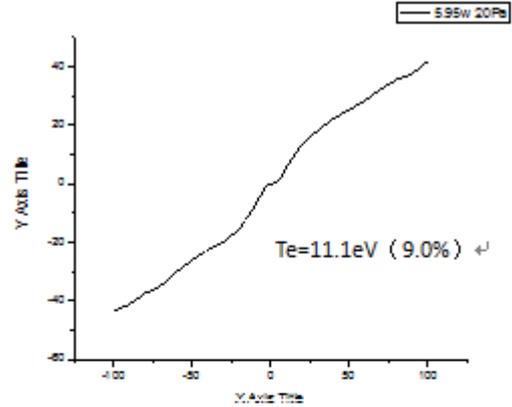


图5 5.95w, 20Pa 时的探针 I-V 图

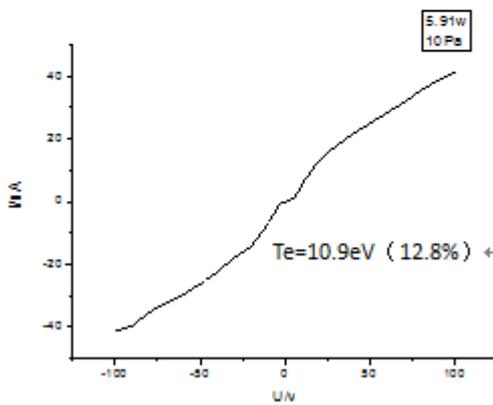


图6 5.91w, 10Pa 时的探针 I-V 图

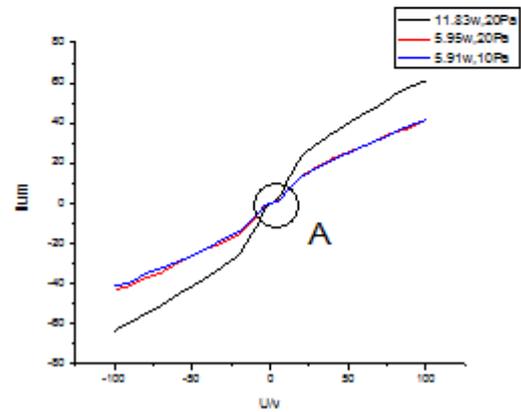


图7 三种条件下的探针 I-V 综合图

由图4、5、6可知，功率相同（5.95w）气压不同（10Pa，20Pa）时，电子温度基本相同；而气压相同（20Pa）功率不同（5.95w，11.83w）时，功率高的电子温度反而小。再看图17，发现功率相同的两条曲线几乎完全重合，这是因为探针电流

$$I = 2i_+ \tanh\left(\frac{eV}{2kTe}\right)$$

仅与探针电压和电子温度有关，而功率相同的两条曲线对应的电子温度相同。因此两条曲线重合。

另外，在图17中，能看到在0点附近由一个于理想实验图颇不相符的区域A，在这个区域中，曲线的斜率突然变小，成为一个平台，且三条曲线在平台出几乎重合。这个现象在很多试验者的结果中都出现过（见图8<sup>[3]</sup>，图9），但可能由于他们的平台并不十分明显，并未看到有人解释其形成原因。

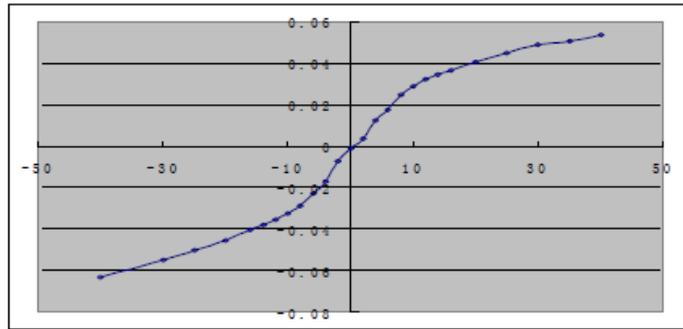


图8

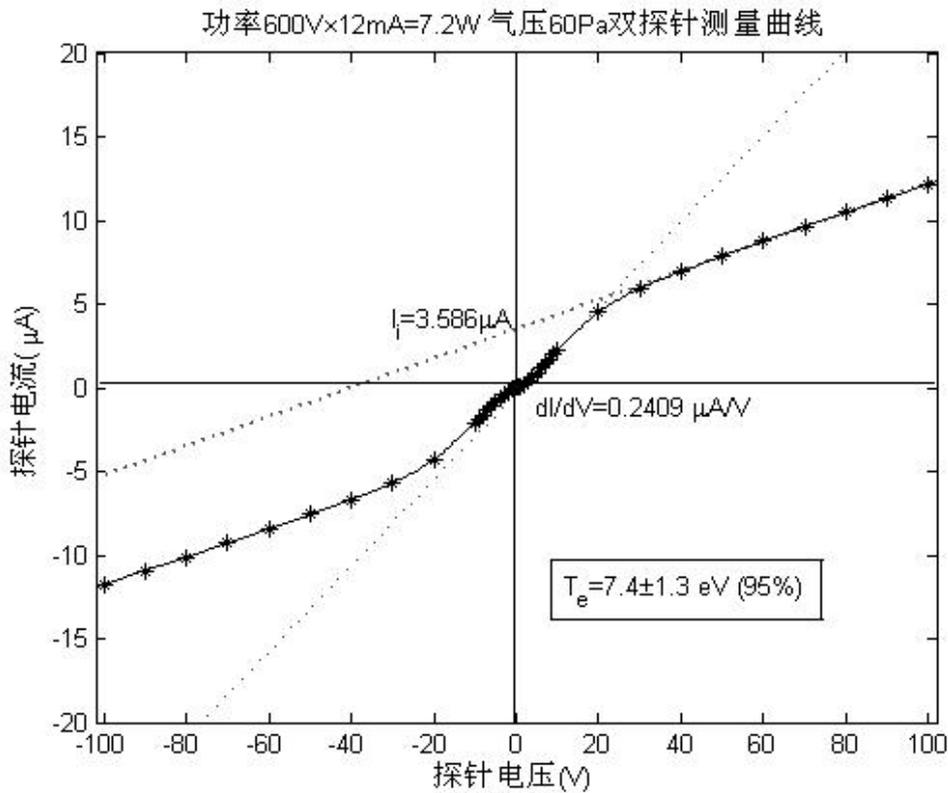


图9. 徐国强的实验结果

### 5. 误差分析与现象讨论

(1) 由于本组结果中0点附近平台的出现，在求 $dI/dV$ 时未采用在零点附近求导的方法，而是采用在 $(-8, 8)$ 区间内现行拟合的方式，这样会导致 $dI/dV$ 值偏小，电子温度 $T_e$ 偏大（如右图）。

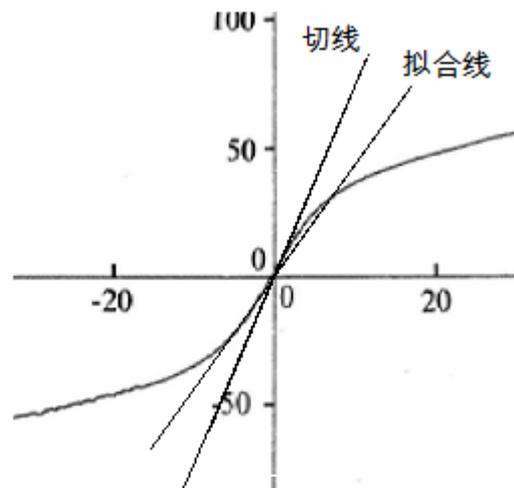


图 10.

(2) 双探针理论曲线与理想实验曲线也有差别, 如图11.

在 $|U|$ 较大时, 理论曲线斜率为0, 而理想实验曲线则有一个正斜率。这是因为在推导理论曲线时, 我们假设探针周围形成的空间鞘层很小, 可以忽略, 则探针拦截电子的面积一直不变, 为探针面积 $A$ 。这样, 当电压达到一定值时, 探针拦截电子的能力达到饱和, 电流不再增大; 而在实际实验中, 探针周围的鞘层面积随着电压的增加而增加, 这样, 探针拦截电子的能力会随着电压的增加而加强, 于是 $I$ 也会随之增大。

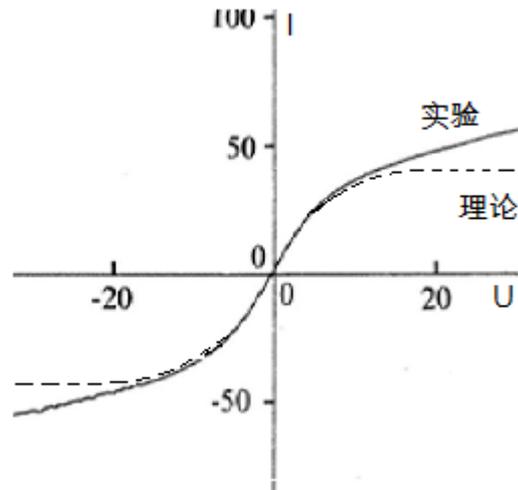


图11. 理论曲线与理想实验曲线

(3) 对于图7中出现的平台A。这个平台出现在 $|U| \leq 1V$ 时, 此时探针电压极小, 不能有效地在钨丝探针周围形成异号电荷鞘层,

使探针不能有效的拦截电子和离子, 导致电导急剧下降,  $I-U$ 曲线斜率突然变小。当探针不能有效拦截电子和离子时, 等离子体中电子的温度已经不能影响到探针的电导, 所以会出现不同条件下的曲线重合在A区域的情况。

(4) 改变探针位置, 使两个钨丝探针一左一右放置, 这是得到的 $I-U$ 曲线如图12. 可以看出, 这个曲线丧失了对称性。这是两探针在放电管中的位置空间不对称, 左边一个更接近阴极, 而右边一个更接近阳极。这样, 两探针之间就存在一个背底电压, 且左边探针主要接收电子, 而右边探针则更多的接受正离子, 这样就导致了曲线的不对称。

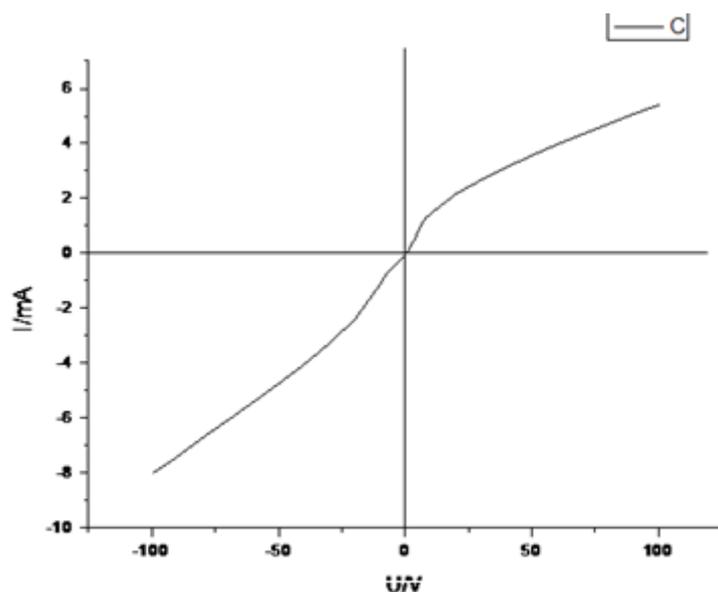


图12. 不对称探针

## 6. 小结

用双探针法测量等离子体参数, 能有效减小测量对等离子体的影响, 通过用本组的实验, 我们可以看到, 高的放电功率不一定对应高的电子温度。另外, 取不同的参数时, 测得的探针 $I-U$ 曲线图也会不同。因此, 在实验时, 应该选取适当的气压、功率以及探针位置和距离, 这样才能得到较为理想的实验图。

【参考文献】

- [1] DHPD-1型等离子体诊断仪使用说明书. 杭州大华科教仪器研究所
- [2] 李沛, 刘文正, 李成, 柳崔杰. 低气压高频辉光放电等离子体的特性. 北京交通大学
- [3] 严伟, 刘文正, 李成柳. 探针法在直流辉光放电等离子体测量中的应用. 北京交通大学

---

[4] 侯清润, 茅卫红, 陈宜保. 气体放电实验与帕邢定律[J]. 物理实验, 2004, 24(1):3-8.

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