

等离子体参数测量曲线研究

李靖

(复旦大学材料系 上海)

摘要：利用朗缪尔双探针法研究等离子体参数测量 I-V 曲线，针对实验中发现的问题，讨论出现问题的原因。并分析与实验相关的实验因素，讨论其与实验数据的影响。最后，针对 I-V 曲线不对称性进行分析，用实验对其验证，对其进行理论分析。

关键词：等离子体；双探针；

1 引言：

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：同化学和其他的方法相比，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。^[1]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。所以了解等离子体测量系统及等离子体本身性质对研究此项技术有非常重要的意义。^[2]

本实验所研究的是直流辉光放电等离子体。在放电管中，从阴极到阳极分为阿斯顿暗区、阴极辉光区、阴极暗区、负辉区、法拉第暗区、正柱区、阳极暗区和阳极辉光区。其中，前 3 个区总称为阴极位降区，大部分源电压在该区下降。从阴极位降区发射出来的电子将与负辉区中的原子或分子发生碰撞，使其激发或电离。正柱区是我们研究的等离子区，其特点是：气体高度电离，电场强度沿轴向有恒定值。^[3-4]

等离子体的特性参量主要有：等离子体密度、电子温度、德拜常数、电子平均动能、空间电位分布等。^[5]

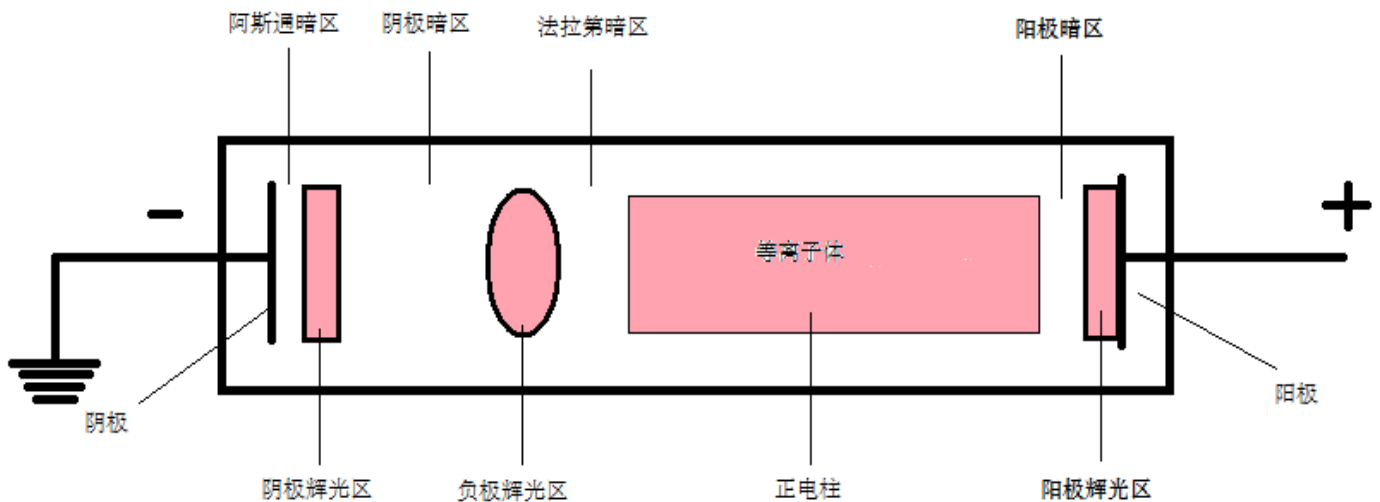


图1 气体低压放电现象放电管内示意图

等离子体参量的诊断通常采用朗缪尔双探针法（实验原理电路如图 2 所示）：在气体等离子体放电管靠近阳极附近正柱区装有 2 个悬浮的探针，两探针间电压能够调节，利用测得的放电管处于稳定状态下的两探针间的 I-V 特性曲线，可以计算出电子密度和电子温度，并进而求出其余各参量^[6]。因此，对探针 I-V 曲线的研究具有重要意义。

如果 2 个探针是完全相同的（即形状和表面积都相同），而它们所处的局部等离子体电位也是均匀的，且具有相同的参量和空间电位，它的伏安特性曲线将是正负对称的^[7] [如图 3 所示]。但实际测量的 I-V 曲线与理想状况不同。

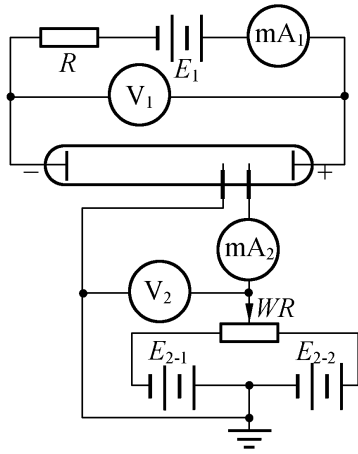


图2 实验原理电路图

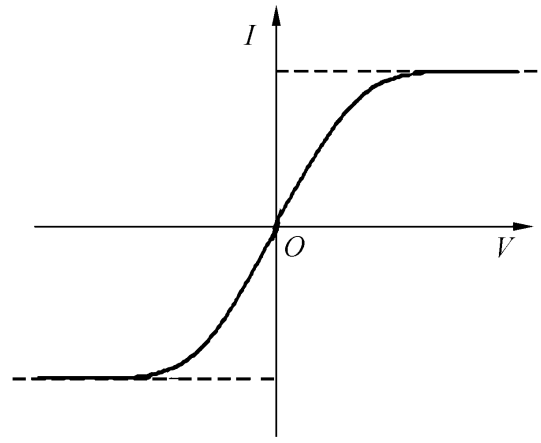


图3 理想的I-V 曲线

本实验就是根据上述放电管和实验原理电路图对等离子体进行性质测量，并通过分析探针对某些现象及问题进行探讨与解释。

2 实验原理与理论知识

测量等离子体参数的方法如下：

设 A_1 ， A_2 分别为探针 1，探针 2 的表面积，则探针间的电压：

$$V = V_1 - V_2 > 0 \quad (1)$$

其中， V_1 ， V_2 分别为探针 1、探针 2 的电位。

若我们定义： i_{1+} ， i_{1-} ， i_{2+} ， i_{2-} 分别为探针 1 和探针 2 的离子电流和电子流，则探针系统浮动的条件为：

$$i_{1+} + i_{1-} - i_{2+} - i_{2-} = 0 \quad (2)$$

在整个闭路电路中

$$I = i_{1-} - i_{1+} = i_{2+} - i_{2-} \quad (3)$$

令 j_r 为随机电子流密度，则

$$i_{1-} = A_1 j_r \exp(eV_1 / kT_e) \quad (4a)$$

$$i_{2-} = A_2 j_r \exp(eV_2 / kT_e) \quad (4b)$$

由(1)、(3)式得

$$(I + i_{1+}) / (i_{2+} - I) = A_1 / A_2 \cdot \exp(eV / kT_e) \quad (5)$$

当 $A_1 = A_2$ 时，有

$$i_{1+} \equiv i_{2+} \equiv i_{2-}$$

可得

$$I = i_{1-} \text{th}(eV / 2kT_e) \quad (6)$$

上式为双探针法的理论公式。我们可以从(5)式的对数式中求得 kT_e 。但是，我们还可以有更简便的方法通过求出 I-V 特性曲线过原点的斜率而计算出电子温度 T_e ，即：

$$\frac{dI}{dV} = \frac{e}{kT_e} \cdot \frac{i_{1+} \cdot i_{2+}}{i_{1+} + i_{2+}} \quad (7)$$

(7)式是双探针法根据实验曲线求得电子温度 T_e 的常用方法。至于电子密度 N_e 可通过公式

$$i_{1+} = \frac{1}{2} N_e \cdot A \cdot e \left(\frac{kT_e}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

求得。其中， A 为探针表面积， M_i 为离子质量。^[8]

3 探针对等离子体特性测量 I-V 曲线影响

3.1 探针对等离子体特性测量 I-V 曲线的影响

在实验测量阶段出现的等离子体特性测量 I-V 曲线不是如图 3 的理想曲线，如图 4(a)和图 4(b)。

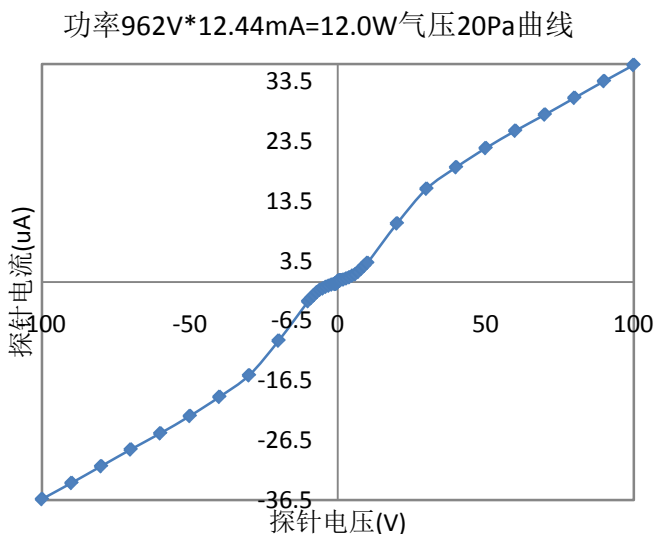


图4(a) 功率 $962V \cdot 12.44mA = 12.0W$ 气压 $20Pa$ 测量曲线

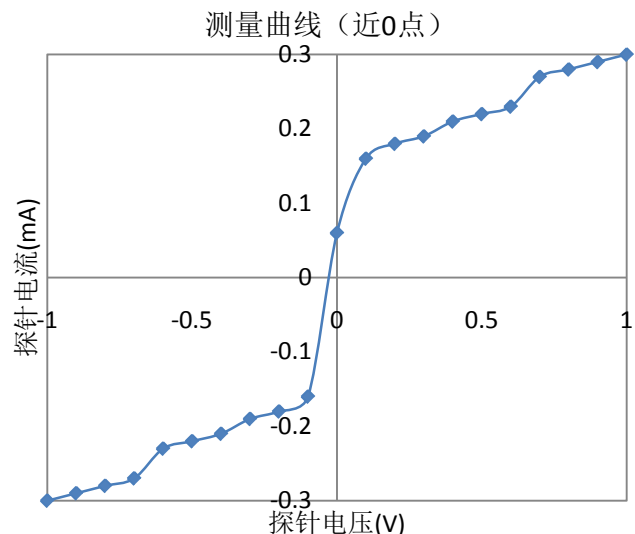


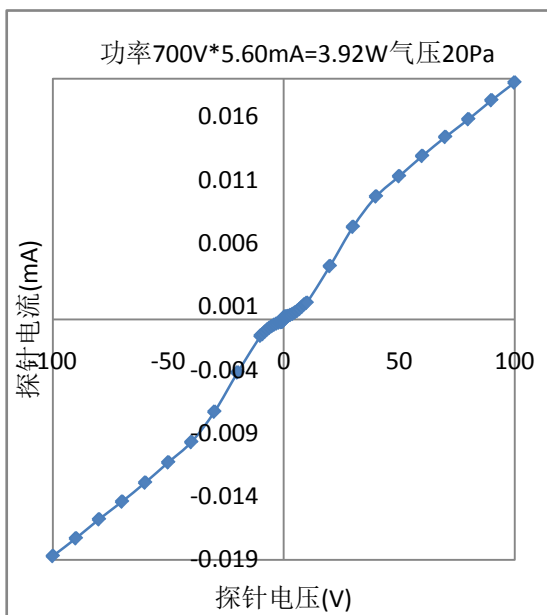
图4(b) 功率 $962V \cdot 12.44mA = 12.0W$ 气压 $20Pa$ 测量曲线(近0点)

由图像可以看出曲线在近 0 点时候的斜率很小，这与理想的曲线不相符，且无法用实验原理的方法得出电子温度，等离子体密度等等等离子体特性。

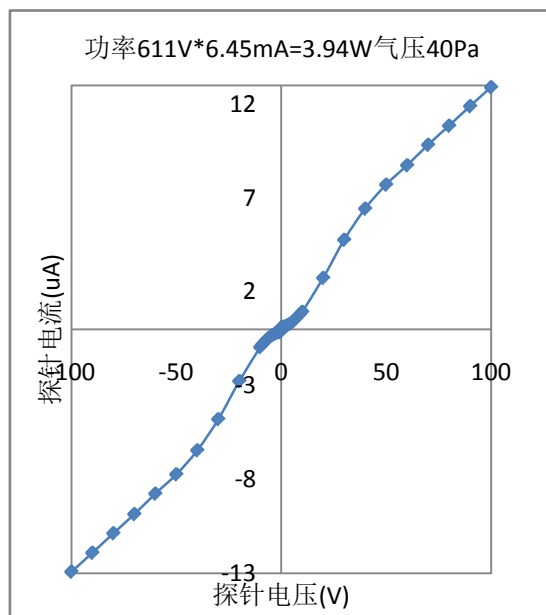
经分析初步有以下两种可能：①电压设置太高，造成等离子体的不稳定，造成在探针电压很小的时候等离子体特性有所改变；②本实验所通过的气体为空气，在空气中有 78%的 N_2 和 21%的 O_2 ，探针的材质为金属，其在 O_2 氛围中经过高压击穿产生高热而造成氧化。这使得金属的伏安特性变化。通过实验对以上两种情况做分析。

3.1.1 设置各个电压测量等离子体特性 I-V 曲线

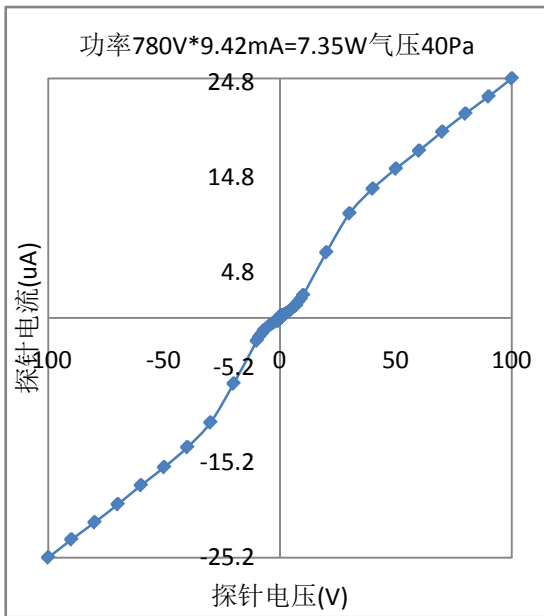
分别设置不同的电压，功率也不相同，测量 I-V 曲线如下图 5



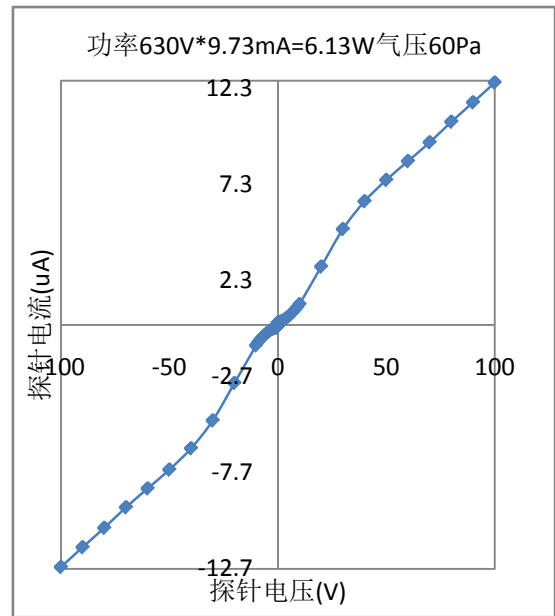
(a)



(c)



(b)



(d)

图5 不同电压和功率下的I-V 曲线

由图 5 可知电压不同且功率各不相同曲线图像仍是在探针电压小的时候斜率比较小,不符合理想情况下的 I-V 曲线。

因此,可以得出结论:该种曲线不是由于测量的偶然性误差而得出的。

3.1.2 探针表面氧化而造成的曲线影响

本实验所通过的气体为空气,在空气中有 78%的 N_2 和 21%的 O_2 , 探针的材质为金属,其在 O_2 氛围中经过高压击穿产生高热而造成氧化。这使得金属的伏安特性变化。由于实验条件限制,不能通过 N_2 或者是 H_2 , 我们所做的就是对表面氧化层进行去除。去除表面氧化成的方法就是依次对两个探针加高压,将其表面氧化层清理。清理表面氧化层的电路图如图 6。

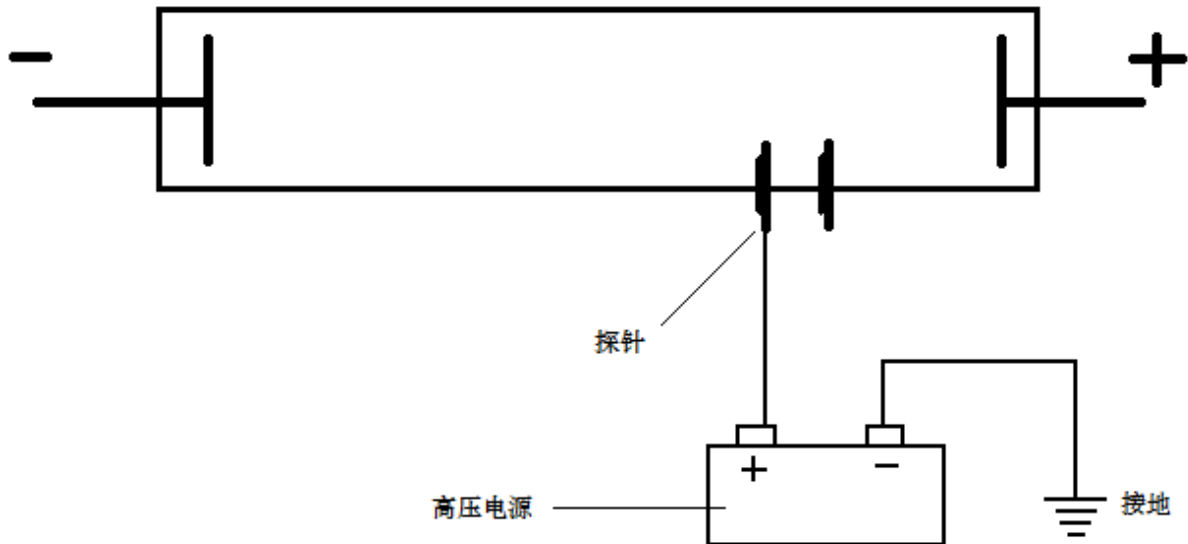
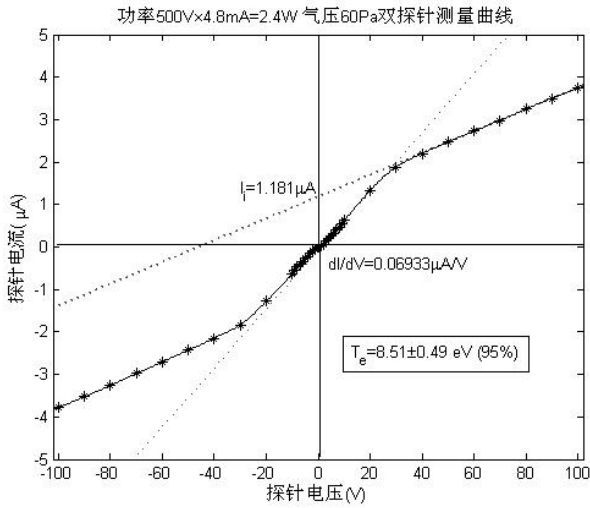
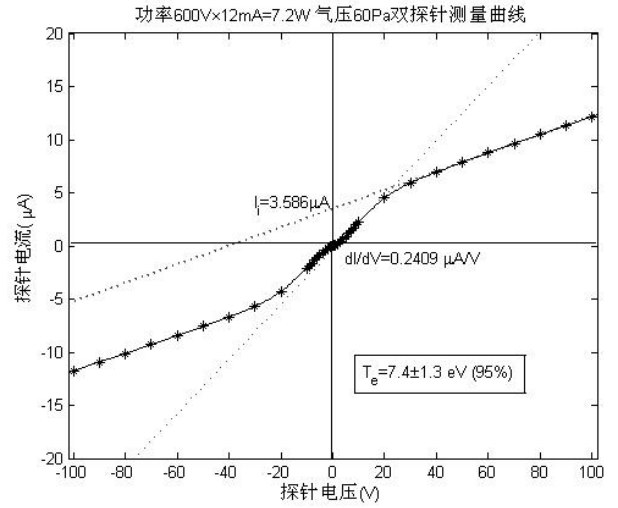


图6 洗探针表面氧化膜示意图

接图 6 电路,持续 10 分钟左右,然后开始测量等离子体特性 I-V 曲线。测得数据,数据良好,图像如图 7。



(a)



(b)

图7 对探针表面氧化膜进行清理后的数据图像

由上述图像可知，处理以后的探针所测得的数据与理想的 $I-V$ 曲线比较符合，且可以算出电子温度。

因此，可以得出结论：由于探针表面的氧化膜形成，致使等离子体 $I-V$ 曲线近 0 点的斜率有所减小，导致无法计算出等离子体参数。故，在实验前，要进行探针表面氧化膜的清理，这样才能确保实验的成功。

3.1.3 小结

随着实验的增多，通过放电管空气多，加上高压，造成探针表面氧化会导致测量等离子体参数时候造成误差，这会实验的数据。故，在实验前，要对探针表面氧化膜进行清理。

对于探针表面氧化膜形成，探针寿命也会因此缩短，虽然清理氧化膜后探针表面会洁净，但是长此以往，探针的表面积也会受到消耗，探针表面积对于实验的影响也是无法估计的^[11]。所以，必须找到方法解决这一问题。例如，可以考虑通过通入 N_2 或者 H_2 等气体来解决问题。

3.2 探针等离子体电位对等离子体特性测量 $I-V$ 曲线不对称性的影响

在试验中，我们测得的等离子体特性 $I-V$ 曲线并不是像理想的曲线(图 3)那样，实际测得的曲线当具有相同 ΔV 时(从 $I=0$ 时算起)， $\Delta I_1 \neq \Delta I_2$ ，这就是曲线不对称。如图 8。

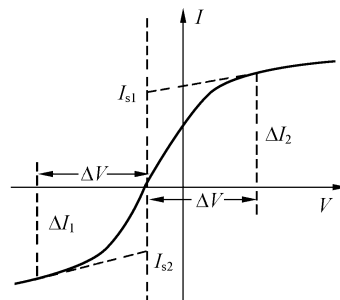


图8 实验所得曲线的不对称性

针对这种不对称性提出一种解释：由于两探针处在等离子体的不同空间电位上，使得当探针间外加电压为 0 时，探针回路电流并不为 0 。下面用实验对此进行验证。

3.2.1 实验原理与实验数据

我们用双探针法测量一组数据，做出 I-V 曲线，在放电电压、压强等因素都不改变的情况下，将放电管电压极性改变，测出其 I-V 曲线。如果得到的 ΔI_1 与 ΔI_2 的关系改变，则说明其不对称是由于两个探针的等离子体电位不同引起的。实验结果如图 9。

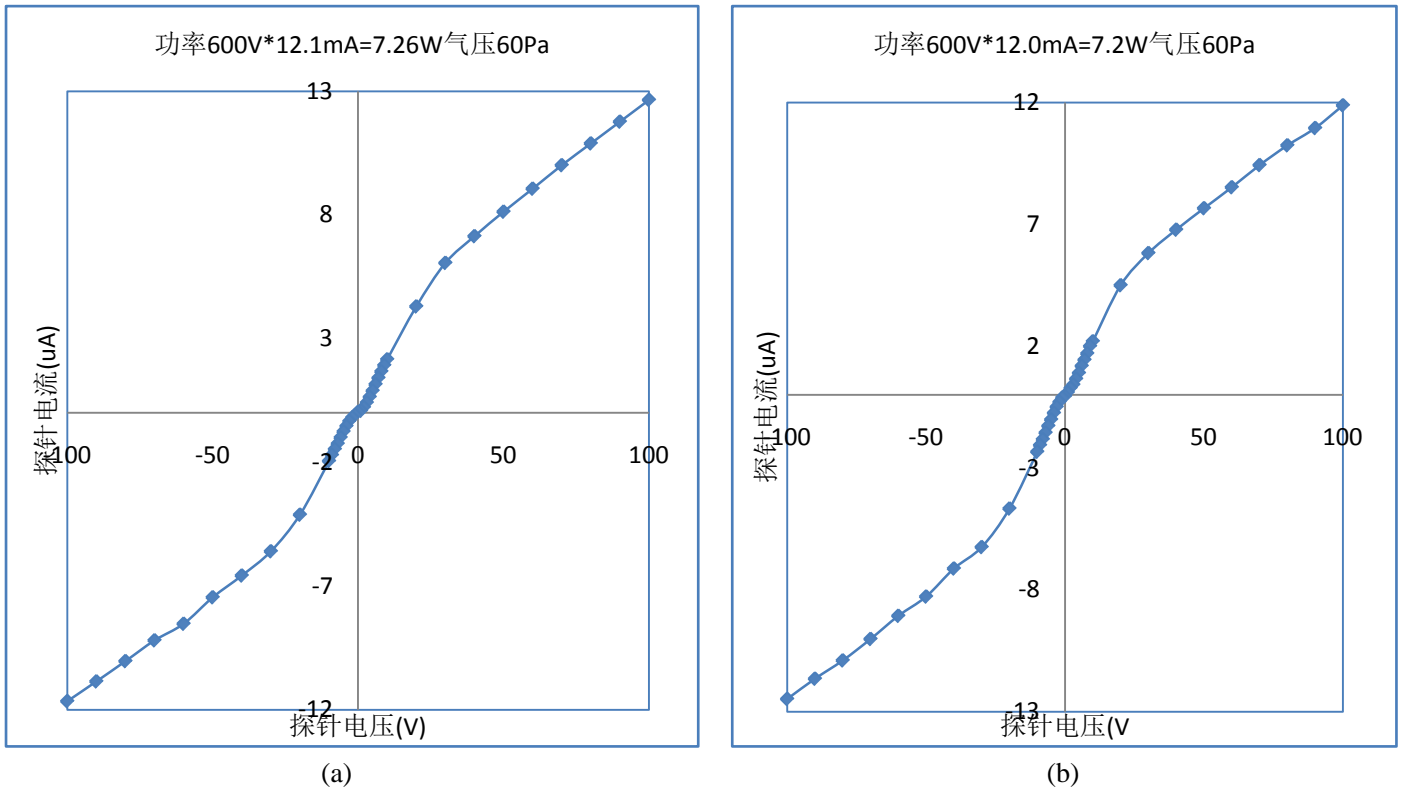


图9 放电管电压正接(a)与反接(b)时所测得的 I-V 曲线图

从图 9 中可以看出：(a)中的 $\Delta I_1 > \Delta I_2$ ，(b)中 $\Delta I_1 < \Delta I_2$ 。这就说明曲线不对称性是由于探针处等离子体电位不同引起的。

3.2.2 理论分析^[11]

双探针法测量中,当外电路电流稳定时,则由等离子体空间进入(或流出)探针 1 的电子(离子)流应等于由探针 2 流出(进)的电子(离子)流, 因此, 若确定电流 I 值, 只需考虑其中一个探针的情况即可。

①在未插入探针时(图 10), 等离子体正柱区电子与正离子密度相等, 即 $n_e = n_i$, 电子向正极移动, 正离子向负极移动, 在距离圆柱中轴一定距离内可近似认为正、负离子均匀分布。其中还有未被电离的中性粒子。

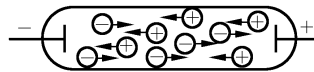


图10 不加探针时的正负电荷的运动

②当置入一探针时(如图 11), 由于等离子体中 $v_e > v_i$, 电子将先于离子到达探针表面, 因此探针会带负电。负电荷积累产生电场, 将排斥电子而吸引离子。最后电子和离子以相等的流密度扩散(即双极性扩散), 使探针电位不再改变。这样就在探针周围就形成一个负电位的等离子鞘层。该鞘层保护等离子体不受探针影响^[5]。

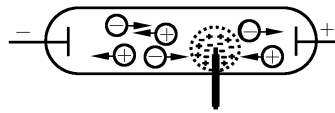


图 11 单探针的离子鞘

③当置入 2 个探针时(两探针独立, 如图 12), 相当于 2 个单探针情况, 由于探针 2 处等离子体电位高于探针 1 处, 1 处电子经电场加速到达 2 处, 因此, 2 处电子应具有更大速度, 在探针 2 处聚积更多电子数, 所形成鞘层半径^[9] $R_2 > R_1$ 。

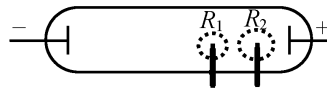


图 12 双探针离子鞘半径比较

④若将两探针直接用导线相连(未加外电源, 如图 13), 由于探针 2 所带负电量要大于探针 1 所带负电量, 电子将由 2 沿导线流向 1, 由于此时两探针电位相等, 使得 2 探针鞘层半径减小, 1 探针鞘层半径增大, 这样探针 2 捕获电子能力强于探针 1, 于是在探针回路形成电流 I (选等离子体放电电流方向为正), 方向如图 13 所示。该电流对应 $I-V$ 曲线中 $V=0$ 处电流值。

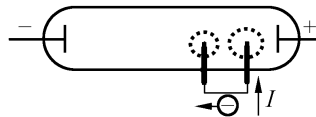


图 13 双探针直接相连时的外电流

⑤当在两探针之间加一正向偏置时(与放电电压极性相同, 如图 14), 两探针悬浮, 选探针 1 为参考点, 探测电压在从 0 增大时, 探针 2 鞘层及电流变化如下: 探针 2 鞘层随探测电压的增加而减小, 探针电流 I 增加(如图 15 曲线 bc 段)。当 2 处等离子体电位与探针电位相等时, 鞘层消失。此时探测电流由等离子体电流密度和探针表面积决定(曲线 c 点)。探针电压继续增加时, 探针 2 将吸引周围电子使探测电流继续缓慢增加(曲线 cd 段), 当探测电压增加到某一值时, 使探针 2 具有足够电压加速周围电子使周围中性粒子继续电离, 此时探测电流急剧增加(曲线 de 段)。

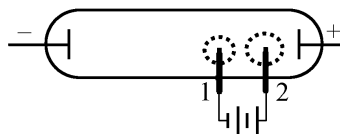


图 14 正向偏压的双探针外电流

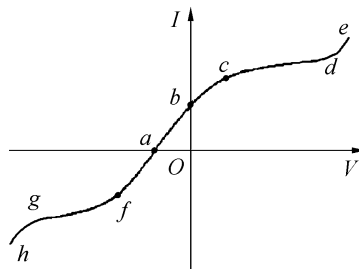


图 15 正向偏压时的 $I-V$ 曲线

⑥探针间置一反向电压(与放电电压极性相反)时(见图 16), 随探测电压的负向增大, 探针 2 鞘层逐渐增大, 使探针 2 接收电子的能力减小^[10], 探测电流 I 减小(曲线 ba 段), 当到达某一临界电位 V_a (a 点)时, 电流为 0, 这时探

针电压等于两探针处等离子体电位差 V_p 。继续负向增大，探针 1 电位不断升高，鞘层半径逐渐减小，电子由探针 1 流进，电流反向增大(曲线 af 段)。当达到某一值时，探针 1 鞘层消失(曲线 f 点)，此后与⑤中探针 2 变化情况类似。

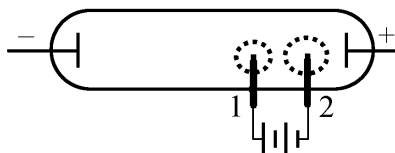


图 16 反向偏压时的探针电流

⑦可以把整个探针测量过程看作是以④情况为背景，则可以看出实际所得曲线比理想曲线向 I 轴正向移动，因此不难理解实验中所得曲线不对称性出现的原因。

以上分步分析了在放电电压正向时，所得探测曲线情况。当放电管电压反接时，与上述分析过程类似，可分析得出图 9(b)所示情况。

3.2.3 小结

由上述实验可知：等离子体特性测量 I-V 曲线的不对称性是由于两探针所处的等离子体电位不等，造成所测的探针实际电流不对称引起的。

要克服这一不对称性，在制造仪器时要使得两探针相对于放电管电流方向严格垂直，这样才能使两探针等离子体电位相等，才能使测量的 I-V 曲线很好的对称。

4 总结

由上述可知：

(1) 随着实验的增多，通过空气多，加上高压，造成探针表面氧化会导致测量等离子体参数时候造成误差，这会实验的数据。故，在实验前，要对探针表面氧化膜进行清理。

对于探针表面氧化膜形成，探针寿命也会因此缩短，虽然清理氧化膜后探针表面会洁净，但是长此以往，探针的表面积也会受到消耗，探针表面积对于实验的影响也是无法估计的^[11]。所以，必须找到方法解决这一问题。例如，可以考虑通过通入 N_2 或者 H_2 等气体来解决问题。

(2) 等离子体特性测量 I-V 曲线的不对称性是由于两探针所处的等离子体电位不等，造成所测的探针实际电流不对称引起的。

要克服这一不对称性，在制造仪器时要使得两探针相对于放电管电流方向严格垂直，这样才能使两探针等离子体电位相等，才能使测量的 I-V 曲线完美对称。

5 致谢

感谢乐永康老师的悉心指导，并提供直流辉光等离子体实验装置；另外感谢徐国强、林小牧、杜科三位同学在实验上的配合和协助。

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] 陈 FF 著, 林光海译, 《等离子体物理导论》, 人民教育出版社, 1980: 16-26
- [3] 马腾才, 胡希伟, 陈银华编著, 《等离子体物理原理》, 中国科学技术大学出版社, 1988: 84-120
- [4] 朱世尧等, 《离子体物理基础》, 科学出版社, 1983.9
- [5] 徐学基, 诸定昌, 《气体放电物理》, 复旦大学出版社, 1996.121~126, 43~61
- [6] 晏于模, 王魁香, 《近代物理实验》, 吉林大学出版社, 1995.30~35
- [7] 项志遴, 俞昌旋, 《高温等离子体诊断技术》, 上海科学技术出版社, 1982.30
- [8] 石玉龙等, 直流等离子体的双探针诊断, 真空, Vacuum, 编辑部邮, 1987.02
- [9] Auciello O, 郑少白, 胡建芳, 郭淑静, 等译, 《等离子体诊断(第一卷)》, 电子工业出版社, 1994.136~137
- [10] 卡普卓夫 H A , 《气体与真空中的电现象》, 高等教育出版社, 1958.294
- [11] 张洪志等, 气体放电等离子体特性测量 I-V 曲线不对称性的研究, 物理实验, 2006.6.No.7 Vol.26 35~38

Investigations on Curve of the Plasma Parameter

LI Jing

(Department of Material Science, Fudan University)

Abstract: The I-V curve of the plasma in gas discharge is measured using Langmiur double probe method. Find the cause of the problem turned out in the experiment. Analyze some related ingredients of the experiment to discuss the influence on the final data. Finally, make an experiment and discuss in theory on the problem of the I-V curve asymmetry of the plasma, to find out the cause of it.

Key words: plasma; double probe