

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束

明章健 兰涛 李弘 谢锦林 刘阿棣 刘万东

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

Ming Zhang-Jian Lan Tao Li Hong Xie Jin-Lin Liu A-Di Liu Wan-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 115201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.115201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性

[Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures](#)

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体

[Diagnosis of high-Z plasma with soft X-ray laser probe](#)

物理学报.2014, 63(21): 215203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215203>

多目标优化推断内爆芯部温度和密度空间分布

[Deduction of temperature and density spatial profile for implosion core by multi-objective optimization](#)

物理学报.2014, 63(12): 125209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125209>

利用软X射线双频光栅剪切干涉技术诊断金等离子体

[Diagnoses of Au plasma with soft X-ray double frequency grating interference technique](#)

物理学报.2014, 63(12): 125210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125210>

双层丝阵Z箍缩电流分配实验研究

[Experimental study on current division of nested wire array Z pinches](#)

物理学报.2013, 62(17): 175203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.175203>

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束*

明章健 兰涛† 李弘 谢锦林 刘阿棣 刘万东

(中国科学技术大学近代物理系, 中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 合肥 230026)

(2014年9月4日收到; 2015年1月20日收到修改稿)

在碰撞等离子体中使用单探针测量系统测得的伏安特性曲线会发生畸变. 实验中分别测量了非碰撞条件下(20 Pa)和碰撞条件下(400 Pa)氩气(Ar)电感耦合等离子体的单探针伏安特性曲线, 并进一步通过在400 Pa下测量不同位置处的单探针伏安特性曲线和引入干扰电极调节整体电中性约束的程度的方法来分析研究曲线的畸变现象. 结果表明碰撞等离子体中整体电中性约束条件会对非碰撞探针测量系统进行约束, 并通过理论分析和实验证明: 在单探针测量过程中, 以真空室壁为电位参考点, 等离子体将通过改变自身等离子体电位来满足整体电中性的要求, 此时, 单探针测得的伏安特性曲线就不是理论上的单探针的鞘层伏安特性.

关键词: 碰撞等离子体, 单探针诊断, 整体电中性, 约束**PACS:** 52.70.-m, 52.40.Kh**DOI:** 10.7498/aps.64.115201

1 引言

碰撞等离子体有着相当广泛的应用, 从最常见的等离子体光源到工业中的机械加工、冶金、化工、材料合成, 以及半导体工业中的微电子学加工和其他金属与非金属材料的加工, 诸如等离子体刻蚀、掺杂、离子注入和薄膜沉积等.

在碰撞条件下, 许多在非碰撞等离子体中成立的条件和假设都要作相应的调整, 静电探针诊断需要新的理论模型支持和修正. 目前, 考虑碰撞条件的探针理论有两种不同的模型: 一种是适用于强碰撞条件下的连续流理论; 另一种是在无碰撞探针理论的基础上加入修正因子, 即过渡区理论. 连续流理论以带电粒子连续性方程和泊松方程为主导方程, 考虑只有弹性碰撞的情况, 这个模型的物理意义较为明确, 但是无法得到解析的解, Su和Cohen等^[1,2]在他们的工作中基于连续流模型给出了一些特殊情况下的数值解, 此后, Talukder等^[3]以此为基础总结出了半经验的电流表达式, 并将得到的探针曲线与实验曲线相拟合, 从而计

算出了大气压下氩气中微波放电的等离子体密度和温度. Chou等^[4]的理论从动力学方程出发, 包含了泊松方程和玻尔兹曼方程, 采用Krook-Type模型来处理碰撞, 是碰撞过渡区探针理论中较为完整的一个, 但对实验工作者来说, 这个理论因为含有一些未知的积分而无法直接应用, Talbot和Chou^[5]采用插值法计算了这一积分使之可以应用于实验中, 但是Talbot-Chou的理论只考虑了弹性散射对离子流的减弱效应, 而此后Zakrzewski和Kopiczynski的工作^[6]在此基础上同时考虑了碰撞对轨道运动的破坏导致离子流的增加, 发展出了所谓Zakrzewski-Kopiczynski理论.

上述碰撞条件下的静电探针理论在非碰撞条件基础上引入了新的模型或修正, 但碰撞条件下的单探针伏安特性(V - I)曲线的测量仍旧采用的是非碰撞条件下的测量系统, 其正确性值得怀疑. 事实上, 如本文所述, 非碰撞条件下的探针测量系统在碰撞条件下会受到整体电中性条件的约束, 测量得到的探针曲线将发生畸变, 该曲线不仅仅表征探针鞘层的 V - I 特性, 而是表征探针鞘层和参考极鞘层共同的 V - I 特性. 本实验首先运用非碰撞条件下

* 国家自然科学基金(批准号: 11275200, 11375187, 11375188, 11375193)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lantao@ustc.edu.cn

的探针测量系统分别测量非碰撞条件下 (20 Pa) 和中等碰撞条件下 (400 Pa) Ar 气电感耦合放电等离子体中的 V - I 曲线, 对比观察该测量系统在碰撞条件下引入的曲线畸变问题; 其次在中等碰撞条件下 (400 Pa), 通过改变单探针的位置测量多条 V - I 曲线来研究引起该畸变的原因; 然后通过引入干扰电极对畸变原因进行进一步的分析和验证; 最后, 讨论整体电中性如何对非碰撞探针测量系统进行约束, 并通过推理和实验证明在探针测量过程中等离子体电位会发生变化。

2 实验装置

实验装置的真空室为直径 1.5 m、长 1.2 m 的不锈钢圆筒, 如图 1 所示. 等离子体由 13.56 MHz 的射频源和凹陷型电感线圈在气压可调的 Ar 气环境中放电产生, 放电线圈近似处在真空室的中轴线上. 单探针曲线测量系统以真空室壁为电位参考点, 由单探针、扫描电压源、采样电阻和数据采集卡组成, 探针电压通过分压电阻 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ 采得, 探针电流通过采样电阻 $R_1 = 250 \text{ }\Omega$ 采样获得. 单探针处于放电线圈的中垂面上, 其距离放电线圈的位置 r 可以调节, 干扰电极位于放电线圈另一侧, 同样也是中垂面上, 其距离放电线圈的位置 r' 可以调节, 干扰电极末端与真空室壁相连. 探针电压由扫描电压源提供, 扫描电压经隔离变压器后处于悬浮状态, 其振幅取 $-25 \sim 25 \text{ V}$, 扫描周期为 10 ms, 每次采 500 个周期, 对这些探针 V - I 曲线通过周期平均法去除信号噪声, 周期平均法无法去除射频振荡对等离子体电位的影响, 平均后得到的曲线的非线性区的范围将扩大, 变化趋势变缓, 但离子饱和流和电子饱和流的线性区变化很小, 因此在本实验中不考虑射频的影响。

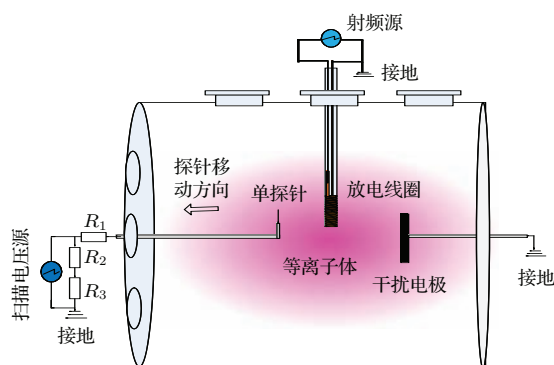


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. The schematic diagram of experiment.

3 实验结果和分析

图 2(a), (b) 分别为放电气压 20 Pa 和 400 Pa 时, 探针距离放电线圈 60 mm 处采得的探针 V - I 曲线, 其中 I_{pr} 和 V_{pr} 分别为单探针电流和电压. 放电气压 400 Pa 时为中等碰撞等离子体, 其单探针 V - I 曲线 (b) 与 20 Pa 时非碰撞等离子体的 V - I 曲线 (a) 明显不同. 首先, 图 2(a) 中电子饱和流区域的值远大于其离子饱和流区域的值, 是典型的非碰撞等离子体的 V - I 曲线, 而图 2(b) 中的电子饱和流区域的值却小于其离子饱和流区域的值; 另外, 图 2(a) 中的电子饱和流区域的斜率远大于其离子饱和流区域中的斜率, 而图 2(b) 中的电子饱和流区域的斜率和其离子饱和流区域的斜率相近. 以上说明, 在碰撞等离子体中, 使用非碰撞条件下的单探针测量系统得到的探针曲线发生畸变。

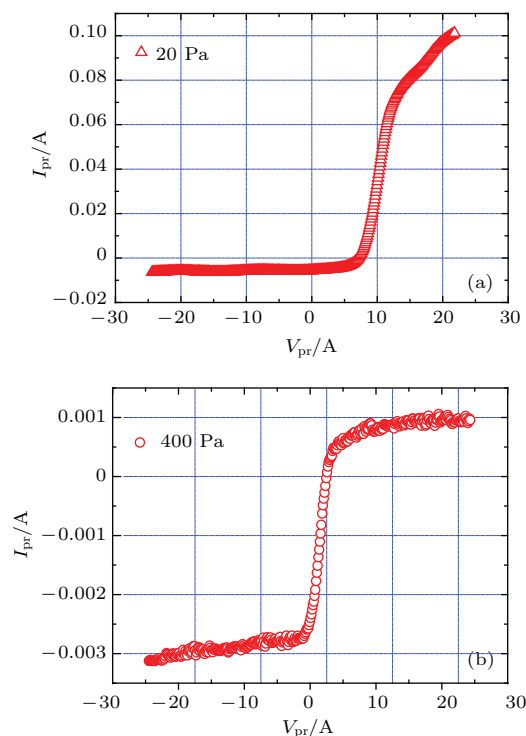


图 2 探针距离放电线圈 60 mm 处采得的探针 V - I 曲线 (a) 气压 20 Pa 无碰撞条件; (b) 气压 400 Pa 中等碰撞条件

Fig. 2. The V - I characteristics curves for the probe which is 60 mm away from the discharge coil (a) collisionless condition at the pressure of 20 Pa; (b) collision condition at the pressure of 400 Pa.

对于畸变现象的第一点, 实验证明是探针电子流搜集端出现问题. 图 3 为放电气压 400 Pa 下, 单探针在距离放电线圈 $r = 30, 60, 90 \text{ mm}$ 处测得的 V - I 曲线图, 图中离子饱和流区域的值随距离的增

大而变小, 其趋势与凹腔型电感耦合等离子体密度分布一致^[7], 而电子饱和流区域的变化与其不同, 其大小和形状几乎不随距离而变化, 存在一个与探针当地点等离子体密度无关的因素对电子流搜集产生约束, 以下实验证明该约束因素为整体电中性.

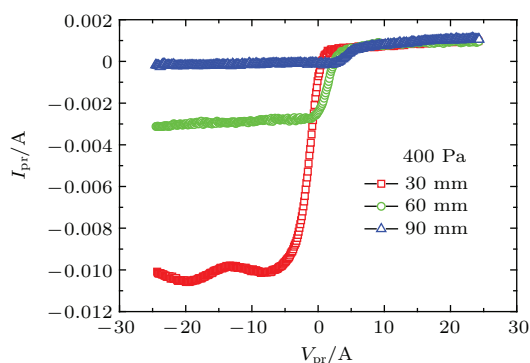


图3 放电气压 400 Pa 下, 单探针在距离放电线圈 $r = 30, 60, 90$ mm 处测得的 V - I 曲线图

Fig. 3. The V - I characteristics curves for the probe which the distances between it and discharge coil are $r = 30, 60$ and 90 mm at the pressure of 400 Pa.

与双探针测量系统中整体电中性约束两个探针上的电流时时相等类似, 在单探针测量系统中, 单探针表面和作为电位参考极的真空室壁上收集的电流也时时相等. 在碰撞等离子体中, 由于离子与中性粒子频繁碰撞, 等离子体被局域在放电线圈周围的小范围内, 真空室壁处的等离子体密度很低, 当单探针工作在电子饱和流区时, 真空室壁工作在过渡区或者离子饱和流区, 如果真空室壁收集到的离子流小于单探针端收集到的电子流时, 整体电中性的约束作用就突显出来, 它使得单探针上收集到的电子流的最大值只能达到真空室壁流出的离子饱和流大小, 而与探针当地点等离子体密度无关, 出现图 3 中的现象. 实验中将一干扰电极(金属栅网)作为真空室壁的一部分伸入等离子体中, 通过移动它的位置来调节真空室壁收集的离子饱和流的大小, 同时观察探针电子饱和流的变化. 实验结果如图 4 所示, 放电气压 400 Pa, 探针距离线圈位置 $r = 30$ mm 保持不变, 干扰电极分别距离放电线圈 $r = 10, 30, 50, 90$ mm 时测得四条 V - I 曲线. 随着干扰电极的深入, 作为真空室壁的一部分能够收集的离子饱和流随之增加, 由于电中性的约束, 此时单探针上搜集到的电子饱和流所能达到的最大值也在相应增加. 实验证明, 碰撞等离子体中单探针曲线的电子饱和流的大小由于整体电中

性的约束, 受到作为电位参考极的真空室壁上的离子饱和流的限制, 当真空室壁上能收集到的离子饱和流小于探针处的电子饱和流时, 就会出现图 2(b) 中的情况, 因此, 当非碰撞条件下的探针测量系统运用在碰撞等离子体中时, 会受到整体电中性的约束, 测量得到的探针曲线会发生畸变.

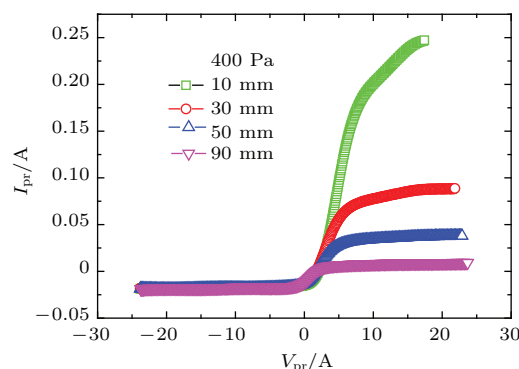


图4 放电气压 400 Pa, 探针距离 $r = 30$ mm, 干扰电极分别距离线圈 $r = 10, 30, 50, 90$ mm 时测得探针曲线

Fig. 4. The V - I characteristics curves for the probe which the distances between interference electrode and discharge coil are $r = 10, 30, 50$ and 90 mm at the pressure of 400 Pa, The distance between probe and discharge coil is $r = 30$ mm.

图 4 中离子饱和流的大小不随干扰电极位置而变化, 看似并没有受到整体电中性的约束, 是因为此时真空室壁上能够收集到的电子饱和流仍然大于探针收集到的离子饱和流, 因此单探针的离子饱和流没有体现出整体电中性的约束, 这点同样也是非碰撞等离子体中的探针 V - I 曲线没有体现整体电中性约束的原因.

碰撞等离子体中探针 V - I 曲线的电子饱和流端的斜率畸变也是由整体电中性的约束造成的, 单探针端的电子饱和流随电压的变化, 由于整体电中性的约束需与电位参考极端的离子饱和流的变化一致, 即两者的斜率相近(图 2(a)), 而不像真实的电子饱和流随电压的变化那样快(图 2(b)).

实际上, 在非碰撞等离子体中, 整体电中性也对单探针测量进行约束, 图 5 为单探针测量系统的示意图. 在单探针理论中, 探针 V - I 曲线需要测量两个量, 一个是探针电流 I_{pr} , 另一个是探针电位 V_{probe} 与探针鞘层边界处等离子体空间电位 V_{ps} 之差 V_p , $V_p = V_{probe} - V_{ps}$ 即探针鞘层电压, 但实验中因无法测量等离子体空间电位而无法直接测量 V_p , 而是选择一个电位参考极, 如真空室壁, 参考电位取为 0, 测量探针与真空室壁之间的电位差 V , V

与 V_p 的关系如下:

$$V = V_p + V_r, \quad (1)$$

其中 V_r 是探针鞘层边界处等离子体空间电位, 它可以分成两个部分:

$$V_r = V_{rp} + V_{rs}, \quad (2)$$

其中 V_{rp} 为探针鞘层边界处与真空室壁鞘层边界处的等离子体空间电位差, 其值在等离子体状态稳定并且不受干扰或者干扰很小的情况下可忽略, V_{rs} 为真空室壁鞘层边界处等离子体空间电位, 即真空室壁的鞘层电压, 它的大小由鞘电流和该鞘的 V - I 特性曲线决定. 所以, 如果以真空室壁作为参考极, 要想测量到真实的探针鞘层的 V - I 特性曲线, 就必须要求 V_{rs} 在测量过程中不发生变化或者变化很小.

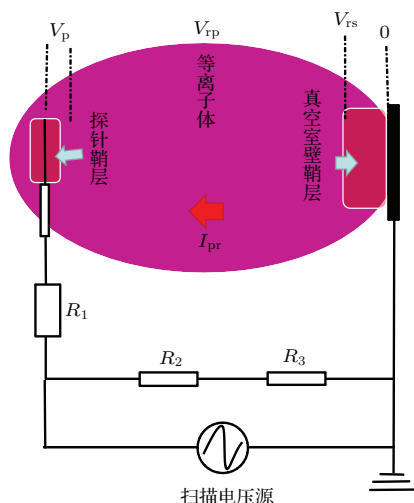


图5 单探针测量系统示意图

Fig. 5. The schematic diagram of probe diagnostic system.

非碰撞等离子体中, 由于真空室壁处等离子体密度高, 真空室壁的表面积远大于探针表面积, 所以真空室壁处鞘层电流的动态范围远大于单探针鞘层电流的动态范围, 探针在收集电流的同时, 由于整体电中性的作用, 真空室壁处的鞘层工作在其 V - I 特性曲线过渡区中较小的范围内, 此时 V_{rs} 变化很小, 如图6(a)所示, 因此 V_r 基本不变, V 与 V_p 成线性关系, 因此测量得到的探针曲线表征的是理论上探针鞘层 V - I 特性.

而在碰撞等离子体中, 由于碰撞导致等离子体双极扩散受阻, 等离子体被局域在放电线圈附近, 真空室壁处的等离子体密度远小于非碰撞情况下

的, 真空室壁处的等离子体鞘层电流的动态范围较小. 单探针收集电流的同时, 由于整体电中性的作用, 真空室壁的鞘层工作在过渡区和离子饱和流区范围, 甚至也可能工作在电子饱和流区, 此时 V_{rs} 的变化很大, 如图6(b)所示, V_r 不能再视为一常数, 而是随着偏压 V 变化, 偏压 V 与 V_p 不再是线性关系, 因此, 测量得到的探针曲线不仅仅表征探针鞘层 V - I 特性, 而是表征探针鞘层和真空室壁鞘层共同的 V - I 特性. 所以在碰撞等离子体中使用非碰撞条件下的探针测量系统得到的探针曲线并不是理论上对应单探针 V - I 特性曲线.

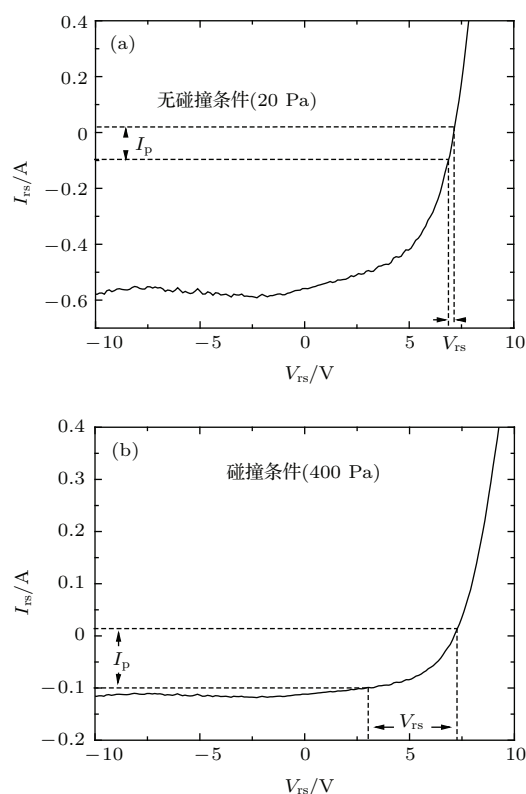


图6 (a) 非碰撞条件下和(b)碰撞条件下的真空室壁鞘层电流动态范围

Fig. 6. The dynamic range of vacuum chamber sheath current at (a) collisionless condition and (b) collision condition.

在偏压 V 扫描过程中, I_p 的大小由 V_p 和 V_{rs} 的分配关系决定, I_p 和 V_p 与 I_p 和 V_{rs} 同时分别满足探针鞘层与真空室壁鞘层的 V - I 特性. 在碰撞等离子体中, 由于整体电中性的约束, V_{rs} 的变化范围很大, 如图6(b), 如果此时以真空室壁作为电位参考极, 其值为0, 那么真空室壁的鞘层电压为 V_{rs} , 它在单探针电压扫描的过程中将不断变化, 如果此过程中等离子体状态不发生改变, 则整个等离子体空间电位都将变化. 鉴于等离子体电位难以测量, 实验

中通过测量等离子体中某点的悬浮电位 V_f 来验证这一现象, 因为当等离子体处于稳定状态时, 一般认为探针悬浮电位与当地点的等离子体空间电位仅相差一常数. 实验电路如图 7 所示, 悬浮电位通过 $R_4 = 1\text{ M}\Omega$ 和 $R_5 = 10\text{ k}\Omega$ 分压得到. 实验结果如图 8 所示, 在探针电压扫描的过程中, V_f 的值随探针扫描电压 V 发生变化, 即表明等离子空间电位也在变化. 探针测量过程中的等离子体空间电位的变化从另一个方面说明, 在碰撞等离子体中使用非碰撞条件下的探针测量系统并不能得到理论中对应的探针 V - I 曲线.

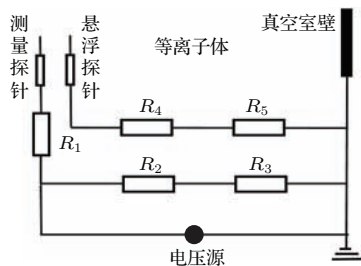


图 7 悬浮电位测量示意图

Fig. 7. The schematic diagram of floating potential measurement.

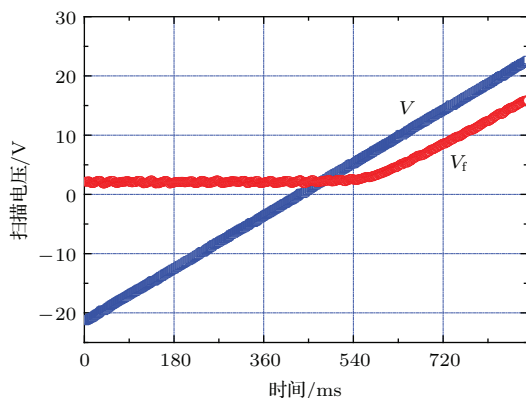


图 8 悬浮电位 V_f 和扫描电压 V 随扫描时间的变化图

Fig. 8. The floating potential and sweeping voltage evolutions.

4 结 论

在碰撞等离子体中, 由于离子与中性粒子频繁碰撞, 等离子体被局域在放电线圈周围的小范围

内, 真空室壁处的等离子体密度远低于非碰撞条件下的等离子体密度, 当真空室壁上能够收集到的离子饱和流小于探针处收集到的电子饱和流时, 电中性条件就会约束探针上的电子收集, 使其电子饱和流受限, 探针 V - I 曲线出现畸变.

实际上, 在非碰撞条件和碰撞条件下, 整体电中性条件都对单探针测量进行约束, 只是在非碰撞等离子体中, 该约束的作用可以忽略, 测量得到的探针曲线能表征探针鞘层的 V - I 特性, 但在碰撞等离子体中, 该约束作用不可忽略, 测量得到的探针曲线表征的是探针鞘层和真空室壁鞘层共同的 V - I 特性, 而不是探针理论中所对应的探针鞘层 V - I 曲线. 此时, 测量的 V - I 特性曲线将出现虚假的拐点和电子饱和流, 实验者稍不注意就会误以为测量到了真实的探针 V - I 特性曲线, 造成测量误差, 我们在另外一篇论文中提出了一种加悬浮极单探针的方法 [8] 可以在碰撞等离子体中测量到真实的探针 V - I 特性曲线, 不会出现虚假的拐点和受限的电子饱和流.

在碰撞等离子体中, 等离子体电位在探针测量过程中会发生变化, 以满足整体电中性的约束, 这从另外一个方面说明在碰撞等离子体中使用非碰撞条件下的探针测量系统并不能得到理论中所对应的探针曲线.

参考文献

- [1] Su C H, Lam S H 1963 *Phys. Fluids* **6** 1479
- [2] Cohen I M 1963 *Phys. Fluids* **6** 1492
- [3] Talukder M R, Korzec D, Kando M 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 9529
- [4] Chou S Y, Talbot L, Willis D R 1966 *Phys. Fluids* **9** 2150
- [5] Talbot L, Chou S Y 1966 *Rarefied Gas Dynamics* (New York: Ac. Press) p1723
- [6] Zakrzewski Z, Kopiczynski T 1974 *Plasma Phys.* **16** 1194
- [7] Ou Y L, Liu W D, Bai X Y, Chen Z P, Wang H H, Li H, Luo C, Ji L L, Hu B 2007 *Plasma Sci. Technol.* **9** 265
- [8] Ming Z J, Li H, Chen Z P, Luo C, Xie J L, Lan T, Liu A D 2012 *Chinese Phys. Lett.* **29** 075201

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma^{*}

Ming Zhang-Jian Lan Tao[†] Li Hong Xie Jin-Lin Liu A-Di Liu Wan-Dong

(CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 4 September 2014; revised manuscript received 20 January 2015)

Abstract

The volt-ampere (V - I) characteristic curve obtained using single probe diagnostic system for collisionless plasma will be distorted when the system is applied to collisional plasma. The V - I characteristic curves of collisionless and collision inductively coupled plasma is obtained at the gas pressure of 20 Pascal and 400 Pascal, respectively. The distortion phenomenon was studied by measuring the V - I characteristic curves at different positions of the probe and introducing interference electrode to adjust the level of overall electrical-neutrality constraint. The inferential and experimental results show that the overall electrical neutrality in collisional plasma will compose constraint on the single probe diagnostic system for collisionless plasma. Moreover, it is concluded from experiments that the plasma will adjust the potential of itself, which makes the potential of vacuum chamber wall as reference, in order to satisfy the overall electrical neutrality, and that the V - I characteristic curve obtained by single probe is not the V - I characteristic of probe sheath predicted by theory.

Keywords: collisional plasma, single probe diagnostic, overall electrical neutrality, constraint

PACS: 52.70.-m, 52.40.Kh

DOI: 10.7498/aps.64.115201

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11275200, 11375187, 11375188, 11375193).

[†] Corresponding author. E-mail: lantao@ustc.edu.cn