

探针特性曲线的初级电子修正及用离子声波 速度测电子温度的研究^{*}

王文清 肖 佐

(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘 要 在 $T_e \gg T_i$, 且存在两种电子能量的等离子体中, 讨论了正确进行朗缪尔探针特性曲线修正 —— 初级电子修正方法; 用朗缪尔探针方法得到的等离子体电子温度与离子声波速度测量得到的电子温度分布实验结果比较证明, 提出的初级电子修正方法是正确的. 实验结果还表明, 用离子声波速度测量得到的电子温度误差较小, 平均测量误差 $\overline{\Delta T_e}$ 大约只有 0.1 eV, 有望成为一种可行的电子温度测量方法.

关键词 朗缪尔探针; 电子温度测量; 离子声波

中图法分类号 P 41

A Method to Correct the Characteristic Curve of a Langmuir Probe and the Possibility to Measure Plasma Electron Temperature Through Ion-Acoustic Waves

WANG Wenqing XIAO Zuo

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100080)

Abstract A proper method is proposed in this paper to eliminate the additional electric current by electrons with high energy in the Langmuir V-I characteristic curve when plasma consists of two groups of electrons at different temperatures and under the condition that $T_e \gg T_i$. The study showed that after this correction the result of electron temperature measured is more reasonable. Another method to obtain electron temperature using Ion-Acoustic Wave speed was also studied in this paper. The ion-acoustic wave in this experiment was excited by either tone-burst test wave method or by CW test wave method. The comparison of the electron temperature of the plasma using the above correction method with that calculated from ion-acoustic wave (IAW) speed shows that the average error of electron temperatures from IAW speed $\overline{\Delta T_e}$ (about 0.1 eV) is much smaller than that from Langmuir V-I characteristic curve (about 0.44 eV, after the above mentioned correction). It can be concluded that to make an additional correction is a good way to raise the accuracy of electron temperature measurement while using IAW method seems better in certain cases.

Key words Langmuir probe, Electron temperature measurement, Ion Acoustic Wave

^{*} 国家自然科学基金项目 (40134020, 49990455) 和北京市重点学科 (XK100010404) 共同资助
2004-06-01 收到原稿, 2005-03-15 收到修定稿

1 引言

朗缪尔探针方法是测量空间、电离层和实验室等离子体电子密度 N_e 及电子温度 T_e 的最基本方法。然而, 在实验室模拟电离层环境时, 多采用气体放电方法产生等离子体。在低气压气体放电产生的等离子体中, 往往不可避免地存在着两种类型的不同温度的电子。一类是灯丝放出的电子, 在放电电压的加速作用下, 获得了较高的速度, 由于气压低, 平均自由程长, 碰撞概率小, 损失的能量也小, 因此具有较高的平均能量(称其为初级电子)。另一类是与中性原子(分子)碰撞后使中性原子(分子)电离而产生的电子和离子, 这是通常所关心的等离子体(背景等离子体)。背景等离子体中的电子由碰撞电离而产生, 因此具有的平均能量要远较前一类电子的平均能量低。高能初级电子的存在大大增加了处理朗缪尔探针特性曲线的困难。为了得到可靠的等离子体电子密度 N_e 及电子温度 T_e 结果, 除了必须对朗缪尔探针特性曲线作离子电流修正外, 还必须作初级电子修正, 将初级电子的影响从朗缪尔探针特性曲线中消除掉。对参考文献 [1] 中的修正方法提出了改进意见。

从离子声波的激发和传播实验研究发现, 在 $T_e \gg T_i$ 的低气压等离子体中, 利用离子声波速度的测量可以得到可靠的等离子体电子温度的空间分布。利用离子声波速度得到的等离子体电子温度的平均测量误差 ΔT_e 大约只有 0.1 eV, 其远远小于用朗缪尔探针特性曲线得到的电子温度平均误差 (ΔT_e 大约为 0.44 eV)。实验结果证明, 我们提出的朗缪尔探针特性曲线的初级电子修正方法是可靠的。同时, 实验也证明, 用离子声波速度测量得到的电子温度误差小, 可靠性高, 有望作为一种可行的电子温度测量方法。

2 等离子体中存在两种不同能量类型电子的朗缪尔探针测量问题

在低气压气体放电的等离子体中, 容易产生两种不同能量类型的电子。一般认为 [1], 有两种不同能量类型电子的等离子体中, 朗缪尔单探针测量的半对数特性曲线 $abcd$ 如图 1 所示, 会有两个斜率 B_1 和 B_2 , 利用 B_1 和 B_2 两种不同直线的斜率, 可

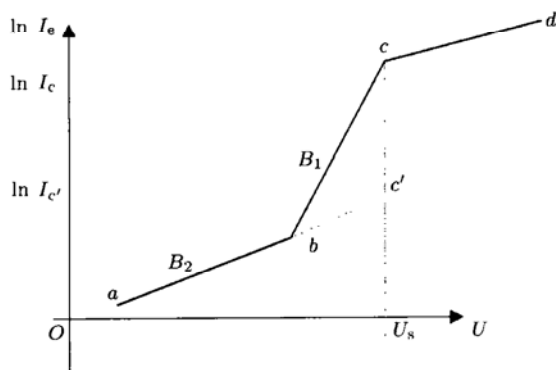


图 1 朗缪尔单探针特性曲线的初级电子修正方法
Fig.1 The method of eliminating the current of high-energy electrons in Langmuir U-I characteristic curve

得到两种不同类型能量电子的温度 T_{e1} 和 T_{e2} 。

在有两种不同平均能量类型电子的等离子体中, 不应该由 B_1 和 B_2 段的直线斜率分别得到两种不同能量类型电子的温度 T_{e1} 和 T_{e2} 。Chen [1] 等的分析没有考虑到在 B_1 段的电子电流中仍然包含了 B_2 段电子电流的影响, 以及 B_2 段高能初级电子也应该有 Maxwell 分布的事实。因为, 在等离子体空间电位以下 ($U \leq U_s$ 时) 探针周围为离子鞘, 在 B_1 段探针相对于等离子体的电位比 B_2 段时的探针电位要低, 因此不仅较低能量的电子可以打到探针上, 具有较高能量的初级电子更可以打到探针上。即 B_1 段的探针电流应该是两种电子能量电子电流贡献的叠加, 而不应只是低能等离子体电子电流的贡献。其次, 有较高平均温度的高能初级电子也应该具有 Maxwell 分布, 即高能初级电子对电子电流的贡献不应该仅仅是图 1 中 B_2 段的 ab 部分, 随着探针电压的提高(探针越接近于空间电位 U_s), B_2 段应沿 ab 的延长线增加到 c' 点。 c' 点相应的电流 $I_{c'}$ 为初级电子的饱和电子电流, 因此低平均能量电子的饱和电子电流应该是 $I_c - I_{c'}$, 而不应该是 I_c 。同样, 如果在任意探针电压 U 时, 背景等离子体(有较低电子温度)的电子电流为 I_{e1} , 而有较高平均温度的高能初级电子电流为 I_{e2} 。总探针电子电流为 I_e , 显然应有关系式 $I_{e1} = I_e - I_{e2}$ 。初级电子修正方法在文献 [2] 中曾提出过, 但其是否合理, 只是作了一般分析, 并未给予实验证明。从离子声波速度的测量实验结果, 反算等离子体电子温度, 并与经过初级电子修正的探针测量结果比较。实验结果证明,

两种实验方法得到的电子温度结果在趋势上是一致的. 因而证明, 上面提出的初级电子修正方法是正确的.

在直径 400 mm, 长约 700 mm, 充 Ar 气压 $P \approx 3.33 \times 10^{-2}$ Pa 的不锈钢真空放电室中, 放电灯丝电流 $I_f = 9.7$ A, 放电电压 $U_d = 100$ V, 放电电流 $I_d = 0.7$ A. 在此条件下, 背景等离子体的电子温度 $T_e \approx 0.5-2.5$ eV, 离子温度 $T_i \leq 0.1$ eV, 满足 $T_i \ll T_e$ 条件. 利用以上初级电子修正方法, 测量到等离子体真空室中不同空间位置处的电子温度分布.

3 利用连续波方法激发离子声波传播速度(相速度)得到的等离子体电子温度

图 2 为用连续波方法激发的离子声波随空间传播的实验测量结果^[3]. 从两个波峰(或波谷)之间的距离可以得到离子声波的波长 λ , 再利用已知的离子声波激发频率 f , 可以得到离子声波的传播速度

$$v_p = f\lambda. \quad (1)$$

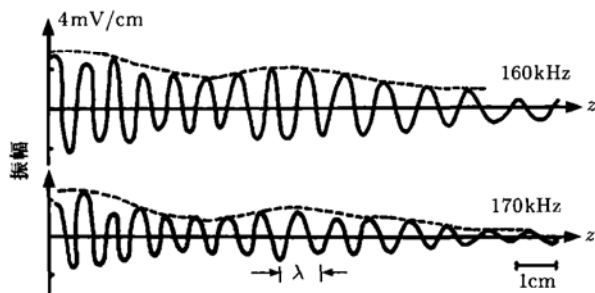


图 2 用连续波方法激发的离子声波随空间传播的实验测量结果

Fig.2 The IAW experiments excited by CW test wave method

在 $T_e \gg T_i$ 时, 根据

$$v_p = \sqrt{\frac{k(T_i + T_e)}{M_i}} \approx \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}. \quad (2)$$

可以得到等离子体的电子温度

$$kT_e = M_i v_p^2 = M_i f^2 \lambda^2. \quad (3)$$

上式中, M_i 为等离子体离子质量(由此得到的等离子体电子温度空间分布标于图 3, 图 4 中以圆圈“o”表示用离子声波方法得到的等离子体电子温度). 由 2 种方法得到的电子温度空间分布比较可以看出: 两种方法得到的结果基本上是吻合的. 而且由离子声波速度得到的电子温度结果离散程度要远小于用朗缪尔探针测定的电子温度离散程度. 用离子声波速度测量电子温度的主要误差来源于测量离子声波的波长 λ (当然这是在 $T_e \gg T_i$ 的条件下). 而用朗缪尔探针测定电子温度除探针电子电流和探针电压的测量误差外, 处理朗缪尔探针特性曲线时不可避免地要作离子电流修正和上面讨论的初级电子修正, 不确定因素增多, 而且带有一定的任意性. 特别是在低气压气体放电的等离子体中, 这些不确定因素往往是不可避免的. 在空间和电离层中, 两种不同能量类型电子的情况也时有发生. 两种不同能量类型电子的平均温度有时相差甚远, 一类可能是空间或电离层背景等离子体的电子, 另一类电子也可能是另一类等离子体的电子(如太阳风等离子体的电子), 也可能只是另一类不同能量的电子(如实验室灯丝发出的电子, 它并不是某种等离子体的一部分), 因此, 上面的讨论有重要的实际意义. 实际测量中必须将它们分开, 否则测量会有太大的误差.

4 利用脉冲调制波法激发离子声波传播速度(群速度)得到等离子体电子温度

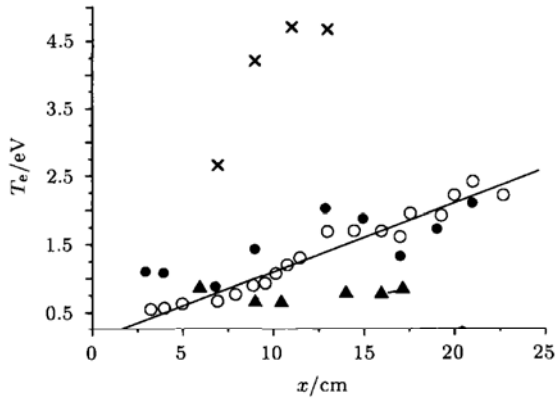
图 4 为利用脉冲调制波法激发的离子声波传播实验, x 为接受探针离开激发栅极之距离, 纵坐标为波的振幅, 横坐标为时间. 图 4 中第一个波为直接耦合到探针的波信号, 第二个波为离子声波. 离子声波与直接耦合波之间的横坐标时间差即为离子声波由栅极传播到接受探针处所需要的时间.

故离子声波的传播速度(群速度)可以得到

$$v_s = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (4)$$

离子声波的相速度可以认为等于其群速度, 因而利用式(3)也可以计算等离子体电子温度 T_e . 利用脉冲调制波法激发离子声波传播速度(群速度)得到的电子温度实际上是两点之间的平均电子温度. 由于测量两点之间的传播时间的误差和测量两点之间的

距离误差都相对较大, 利用群速度测量电子温度的误差比利用相速度测量电子温度的误差大. 利用脉冲调制波法激发离子声波传播速度 (群速度) 得到的电子温度结果也标于图 3(图中用“×”表示).



- ○ ○ 连续 IAW 结果 (from IAW excited by CW test wave)
 ● ● ● 初级电子修正后的探针结果 (after eliminating the high-energy electrons)
 ▲ ▲ ▲ 脉冲调制 IAW 结果 (from IAW excited by tone-burst test wave)
 × × × 未作初级电子修正的探针结果 (without eliminating the high-energy electrons)

图 3 各种方法得到的电子温度结果比较

Fig.3 The electron temperatures profiles got from different methods

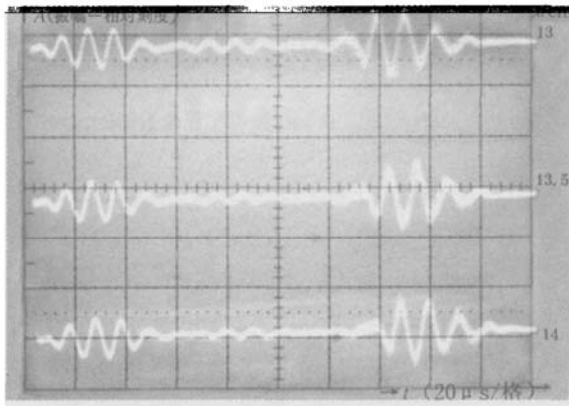


图 4 利用脉冲调制波法激发的离子声波传播实验

Fig.4 The IAW experiments excited by tone-burst test wave method

5 结论

(1) 在有两种平均电子能量的等离子体中, 用朗缪尔探针测量电子温度必须作初级电子修正, 修正是, 将高能量初级电子的电流 - 电压特性曲线 (图 1 中 ab 段) 延长至空间电位处 (延长到 c'), 实际背景等离子体的电子电流 $I_{e1} = I_e - I_{e2}$, 其中 I_e 为该探针电位下探针实测到的探针电流, I_{e2} 为高能量初级电子电流特性曲线延长至该探针电位处的值 (即该探针电位下高能量初级电子电流值).

(2) 朗缪尔探针特性曲线在作了初级电子修正后得到的等离子体电子温度 T_e 结果与利用离子声波速度计算得到的电子温度 T_e 的结果是一致的. 但由朗缪尔探针特性曲线得到的结果离散性更大 (误差更大), 平均误差大约为 0.44 eV.

(3) 用离子声波速度测量得到等离子体电子温度 T_e 的结果离散性较小, 平均误差大约只有 0.1 eV, 是一种可能的较好测电子温度方法, 建议可作为电离层或空间等离子体电子温度的测量方法之一.

(4) 用连续波方法可以较好得到离子声波速度的空间分布, 因此也可以得到等离子体电子温度 T_e 的空间分布. 用脉冲调制波方法也能得到所测空间两点间的离子声波的平均速度, 因而也能得到此两点间的平均等离子体电子温度. 如果空间两点的距离不大, 等离子体的电子温度空间梯度也不大, 则脉冲调制波方法也可以得到等离子体电子温度的空间分布.

参考文献

- [1] Chen F F. Plasma Diagnostic Techniques. New York: Academic Press. 1965, 134—136
- [2] Zhou Huibei, Wang Wenqing, Sun Chuanli. The influence of high energy electrons and contamination on Langmuir probe diagnostics of gas discharged. *Chin. J Space Sci.*, 1989, 9(3):180—185. in Chinese (周怀北, 王文清, 孙传礼. 气体放电等离子体中朗缪尔探针应用中的问题. 空间科学学报, 1989, 9(3):180—185)
- [3] Wag Wenqing. Experimental research on nonlinear Landau damping of ion acoustic waves. *Chin. Sci. Bull.*, 1990, 35(24):2035—2039