

文章编号: 1001-4322(2007)04-0621-04

等离子体的三频点微波透射衰减诊断方法*

王甲寅, 时家明, 袁忠才, 许波

(电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 合肥 230037)

摘 要: 依据微波在等离子体中的传播特性, 并利用微波透射非磁化等离子体时在三个相邻频率点的透射能量衰减值, 可同时诊断等离子体中的电子密度和电子碰撞频率。使用该方法对 100 ~ 700 Pa 范围内氦气辉光放电等离子体进行了诊断, 选择 6.2, 6.8 和 7.4 GHz 三个频率点, 并与使用双探针诊断的诊断结果进行比较。结果表明, 两种诊断方法所得碰撞频率基本一致, 微波透射衰减法诊断出的电子密度值与探针法的诊断结果在同一数量级 (10^{16} m^{-3}), 但前者约是后者的 1.67 倍。最后对造成这一差异的原因进行了分析。三频点微波透射衰减诊断方法可用于较高气压及其它静电探针使用受限的环境下, 并且可以采用能量较小的微波, 不会对等离子体本身造成显著影响, 适用于等离子体的初步诊断。

关键词: 等离子体; 微波; 透射衰减; 诊断; 电子密度; 碰撞频率

中图分类号: O536, TL652

文献标识码: A

等离子体诊断是获取等离子体内部参数、进行等离子体性质研究的基础。通常采用的诊断方法有静电探针法、光谱学法、微波法和激光法等^[1-3], 其中静电探针法和微波法使用仪器相对简单、测量及分析过程简便。静电探针法可以同时测得等离子体中的电子密度和温度, 且具有一定的空间分辨能力。但是该方法不能直接诊断出等离子体中的电子碰撞频率, 而必须借助其它方法间接得到。微波等离子体诊断方法可以较好地诊断出等离子体密度, 且其诊断结果与使用探针法所得结果非常接近^[4]。现有的微波诊断方法主要利用微波与等离子体相互作用所形成的干涉和相移特性来诊断等离子体中的电子密度, 较少涉及电子碰撞频率的诊断, 仅有的对电子碰撞频率的诊断方法也较为复杂^[2, 5-7]。

本文分析了三频点微波透射衰减等离子体诊断方法的原理, 并利用微波透射等离子体时在三个相邻频率点上的能量衰减值, 同时诊断了等离子体中电子密度和电子碰撞频率。

1 三频点微波透射衰减等离子体诊断法的原理

平面电磁波在等离子体中的传播因子可以表示为 $e^{k(r-\omega t)}$, 其中 ω 为电磁波角频率, r 为电磁波的传播距离, k 为等离子体中电磁波的传播常数。一般情况下 $k = nk_0$, n 为等离子体的复折射率, $k_0 = \omega/c$ 为真空中的波数, c 为真空中的光速。根据阿普顿方程^[2], n 可以表示为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

式中 ϵ_r 为等离子体的相对介电常数, 且

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (2)$$

式中 ω_p 为等离子体角频率, ν 为等离子体中电子与中性粒子的碰撞频率。通常 n 可以写为 $n = \beta + j\alpha$, β 为相移常数, 描述电磁波在等离子体中的传播特性; α 为衰减常数, 描述等离子体对电磁波的碰撞吸收衰减特性。

在非磁化等离子体中 β 和 α 可分别表示为

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2} \left[- \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式(3)、式(4)表明 β 和 α 均为 ω , ω_p 和 ν 的函数。此时, 传播因子可以写为 $e^{-\alpha k_0 r} e^{j\beta k_0 r - \omega t}$ 。当电磁波在等离子

* 收稿日期 2006-12-01; 修订日期 2007-03-20

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 王甲寅(1974—), 男, 博士生, 主要从事光电对抗、等离子体隐身技术研究, wangjiayin163@163.com。

体中传播 r 距离后造成的能量衰减值 S (单位 dB) 为

$$S = -20\lg e^{-\alpha k_0 r} \approx 8.7\alpha k_0 r = 8.7 \frac{\alpha r \omega}{c} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可知 S 是 ω 、 ω_p 、 ν 和 r 的函数。如果知道等离子体微波透射吸收频带内的 3 个信号的频率分别为 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 ，及其透射相同厚度等离子体时相应的能量衰减值 S_1 、 S_2 和 S_3 ，将其分别代入式(5)中，整理可得下列方程组

$$\begin{cases} S_1 = \frac{\alpha_1 \omega_1}{\alpha_2 \omega_2} \\ S_2 = \frac{\alpha_3 \omega_3}{\alpha_2 \omega_2} \end{cases} \tag{6}$$

结合式(6)和式(4)即可解出 ω_p 和 ν 。由电子密度 $N_e = \omega_p^2 \epsilon_0 m_e / e^2$ 可以求出等离子体中的电子密度。

2 诊断系统及实验分析

诊断系统由扫频信号源、标量网络分析仪、微波宽带喇叭、功率分配器和定向耦合器等构成，其结构如图 1 所示。微波信号从扫频信号源输出，经功率分配器后成为两路，一路直接经检波器 2 输入标量网络分析仪的 R 通道，作为计算输入功率的参考。另一路经定向耦合器后，由发射喇叭辐射出去。辐射信号在被检测物表面产生的反射信号由定向耦合器输入到标量网络分析仪的 A 通道。透过被检测物的辐射信号经接收喇叭和检波器 1 输入标量网络分析仪的 B 通道。设反射功率为 P_r ，透射功率为 P_t ，发射喇叭的入射功率为 P_i ，则信号透射等离子体所造成的功率衰减为

$$S = 10\lg\left(\frac{P_t}{P_i - P_r}\right) = G_t - 10\lg(1 - 10^{G_r/10}) \tag{7}$$

式中： $G_t = 10\lg(P_t/P_i)$ ， $G_r = 10\lg(P_r/P_i)$ ，分别为标量网络分析仪测得的透射衰减增益和反射增益。

测量前先对系统进行校准。在无等离子体的情况下，认为接收喇叭收到的功率为 P_t ，同时认为无反射功率($P_r = 0$)，将标量网络分析仪调整为 0 dB。当等离子体存在时，由于其对微波的透射衰减和反射作用， G_t 和 G_r 的值将分别减小和增大。当 G_r 较小时，可以认为 $S \approx G_t$ 。

使用上述系统对长方体封闭腔内低气压条件下氦气辉光放电所产生的等离子体进行了诊断，测量电子密度和碰撞频率。封闭腔内两平行板电极间距 35 cm，放电电流为 450 mA。选取 4 个气压值分别为 100、300、500 和 700 Pa 进行测量，扫频信号源扫频范围为 2~8 GHz。为了验证该方法的性能，同时以双探针在两电极板中间位置进行诊断，并将两种方法所测得的结果进行比较。图 2 为 300 Pa 气压条件下标量网络分析仪所测得的等离子体对微波反射与透射衰减的曲线。

图 2 中反射曲线说明，在该放电条件下，等离子体对 2~5 GHz 频率范围内的微波具有较强的反射，而在 5~8 GHz 频率范围内反射稍小，显然等离子体对不同频率的微波具有不同的吸收和反射作用。其它气压条件下的测量曲线也有类似的结论。为使测量结果准确，尽量选择反射功率较小的频率点，这里我们选择 6.2、6.8 和 7.4 GHz 三个频率，其诊断结果如表 1 所示。采用双探针诊断时，可以直接得到电子密度值，碰撞频率由所测电子温度结合文献 [8] 中的图表及公式得到。

由表 1 中数据可以看出，在不同气压条件下，两种方法所测得的数据基本一致。与利用双探针诊断的结果

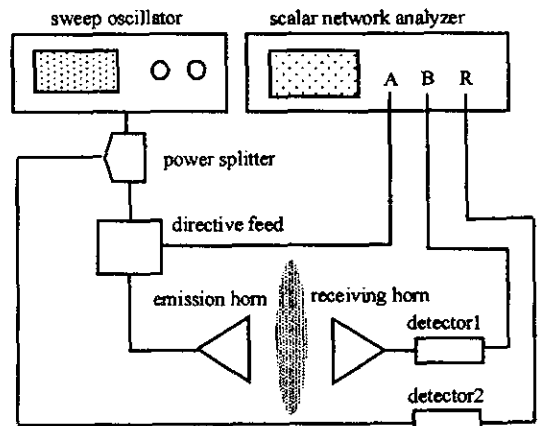


Fig. 1 Plasma diagnostic system of microwave transmission attenuation

图 1 等离子体微波三频点透射衰减测量系统

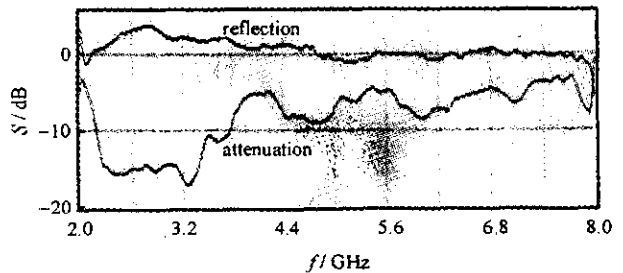


Fig. 2 Attenuation and reflection of microwave vs frequency

图 2 气压为 300 Pa 时等离子体对微波的反射与透射衰减曲线

相比,两种方法得到的碰撞频率吻合较好;微波透射衰减法诊断出的密度值较大,约是双探针法诊断结果的 1.67 倍,但相应结果均处在同一个量级约 10^{16} m^{-3} 。

造成三频点微波透射衰减法与双探针法诊断结果之间存在差异的主要原因有:首先,等离子体对微波吸收衰减的理论推导是基于平面波的传播特性,而在实际测量过程中,由于测量距离较近,喇叭天线所发射的是一柱面波。其次,在产生等离子体后,接收喇叭接收到的信号的减小并不完全由等离子体内部的衰减造成,而是包含了等离子体边界的反射。由于等离子体的边界并非平面,其密度分布不均匀,因此部分反射能量不能完全进入发射喇叭,使表现出的反射功率小于实际值,但在测量时认为 $S \approx G$ 而未将该因素扣除。同时,这一差异还与数学上的近似和测量过程中存在的误差等因素有关。该方法是利用衰减测量值来反推等离子体的电子密度和碰撞频率,因而诊断结果的精度与衰减测量的精度密切相关。另外等离子体的不稳定性、仪器稳定度均可产生误差。

表 1 三频点微波透射衰减诊断和双探针诊断的结果

Table 1 Diagnostic results by the microwave attenuation and double probe method

p/Pa	attenuation/dB			microwave attenuation		double probe	
	f_c/GHz	6.2 GHz	6.8 GHz	7.4 GHz	$N_e/10^{16} \text{ m}^{-3}$	f_c/GHz	$N_e/10^{16} \text{ m}^{-3}$
100	5.4	3.75	1.25	4.5	2.5	2.7	2.5
300	7.2	6.50	3.75	6.5	3.0	3.9	3.4
500	8.7	11.30	13.75	8.0	5.5	4.8	5.1
700	11.2	12.50	13.75	8.5	6.0	5.9	6.7

为了减小测量误差,在保证喇叭的 3 dB 波束角完全包含在等离子体区域的同时,喇叭尽量远离等离子体,从而使微波以接近平面波方式入射。在选择测量频率点时,应使所选的三个频率较为接近,以减小扫频间隔时间内由等离子体及仪器的不稳定性造成的影响。

3 结 论

我们提出了利用微波透射等离子体时在 3 个相邻频率点上的衰减量,同时诊断等离子体中的电子密度和碰撞频率的方法。使用该方法与双探针法对同一状态下的等离子体进行了诊断对比。结果表明,两者所得到的碰撞频率基本一致,前者得到的电子密度普遍大于后者,但仍然处于同一数量级。不同放电状态下的诊断结果具有一致性,说明该方法的诊断结果较为可靠。

采用三频点微波透射衰减诊断方法,虽然得到的仅是等离子体在传播路径上的平均电子密度,而不能如静电探针法一样得到电子密度的分布,但是在较高气压及其它静电探针使用受限的条件下,该方法仍然适用,并可同时得到等离子体的电子碰撞频率。另外,使用该方法时,可以采用能量较小的微波,不会对等离子体本身造成显著影响,该方法可用于等离子体的初步诊断,具有较广的适用范围。

参考文献:

- [1] 项志遴,余昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982. (Xiang Z L, Yu C X. Technology of high temperature plasma diagnostics. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1982)
- [2] Hutchinson I H. Principles of plasma diagnostic[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1987.
- [3] 陈宗柱,高树香. 气体导电:下册[M]. 南京:南京工学院出版社,1988.(Chen Z Z, Gao S X. Gaseous conduction. Nanjing:Nanjing University of Technology Publisher, 1988)
- [4] Lawrence J O, Hopkins B J. Comparison of electron-density measurements made using a Langmuir probe and microwave interferometer in the gaseous electronics conference reference reactor[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, **74**(7):4323-4330.
- [5] Zhang S, Hu X W. New microwave diagnostic theory for measurement of electron density in atmospheric plasma[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(1):168-170.
- [6] Lukas C, Muller M, Schulz-von der Gathen V, et al. Spatially resolved electron density distribution in an RF excited parallel plate plasma reactor by 1 mm microwave interferometry[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 1999, **8**(1):94-99.
- [7] Yuan Z C, Shi J M, Xu B. Diagnosis of unmagnetized plasma electron number density and electron-neutral collision frequency by using microwave [J]. *Plasma Science and Technology*, 2005, **7**(6):3137-3138.
- [8] Baille P, Chang J S, Claude A, et al. Effective collision frequency of electrons in noble gases[J]. *J Phys B:At Mol Phys*, 1981, **14**:1485-1495.

Plasma diagnostic method using the transmission attenuation of microwaves at three frequencies

WANG Jia-yin , SHI Jia-ming , YUAN Zhong-cai , XU Bo

(*Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province , Institute of Electronic Engineering , Hefei 230037 , China*)

Abstract : The plasma frequency and the electron collision frequency can be deduced with the plasma diagnostic method which utilizes the transmission attenuation of microwaves at three frequencies in a non-magnetized plasma. Then the electron density can be obtained from the plasma frequency. The measurement system consists of a sweep oscillator , a pair of broad-band horns , and a scalar network , etc. The plasma produced by an electric discharge of helium with the pressure range 100 ~ 700 Pa in a closed cavity is diagnosed by this way at three frequencies of 6.2 , 6.8 and 7.4 GHz. As a comparison , the Langmuir double probe method is used at the same time. The results indicate that the electron collision frequencies got by these two methods are coincident. The electron densities got by the attenuation of microwave are universally larger than those got by the double probe diagnostic method , but they are at the same magnitude (10^{16} m^{-3}). The transmission microwave attenuation method is suitable for the elementary diagnosis of the plasma at low and high pressure.

Key words : Plasma ; Microwaves ; Transmission ; Attenuation ; Diagnostic ; Electron density ; Collision frequency