

文章编号: 2095-4980(2020)04-0639-04

大气压电子束等离子体密度诊断实验

刘世贵, 方吉汉, 范 威, 谭 畅*, 邓永锋, 韩先伟

(西安航天动力研究所 陕西省等离子体物理与应用技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要: 大气压电子束等离子体密度诊断用微波法和光谱法较为合适, 根据微波在等离子体中的传播特性, 利用微波透过等离子体时透射能量衰减和相位变化, 计算等离子体密度, 并与光谱诊断结果进行比较, 2 种方法诊断结果基本一致。在微波诊断等离子体实验研究中, 发现空气湿度对大气压等离子体密度有显著影响, 利用大气化学模型仿真研究湿度对等离子体密度影响规律, 获得与实验测试一致的结果。

关键词: 大气压等离子体; 微波诊断; 衰减; 密度; 碰撞频率; 湿度

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018233

Microwave diagnose on electron density of electron-beam-generated air plasma

LIU Shigui, FANG Jihan, FAN Wei, TAN Chang*, DENG Yongfeng, HAN Xianwei

(Shaanxi Key Laboratory of Plasma Physics and Applied Technology, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Microwave and optical measurements are the best diagnostic methods for electron-beam-generated air plasma. According to the microwave characteristic of plasma, the attenuation in energy and phase shift can be adopted to diagnose electron density. The experimental results of microwave and optical measurements are coincident. From the experiment results, humidity effect on air plasma is analyzed, and it is found that the electron density of humid air plasma is obviously reduced compared to that of the dry air plasma under the same experiment conditions. The numerical calculations using the chemical processes model are completed for air plasma, and the numerical result is in a good agreement with the experimental result.

Keywords: air plasma; microwave diagnosis; attenuation; density; collision rate; humidity

目前对等离子体进行诊断有多种方法, 如静电探针法、光谱法、激光散射诊断法和微波诊断法^[1-3]等, 但是各种诊断方法都有一定的适用范围和局限性^[4]。其中微波诊断法因对等离子体扰动小, 且对微波源的要求不高, 又不受大气压力条件的限制, 所以微波诊断法得到了广泛应用。本文利用微波透射衰减和相位变化相结合的方法测量等离子体电子密度, 并研究空气湿度对大气压等离子体密度的影响。

1 方法原理

等离子体作为一种电磁色散传播介质, 影响电磁波传播的参数主要是相对介电常数 ϵ_r 和磁导率 μ_i 。电磁波在等离子体中传播的传播因子可写为 $\exp[i(k_r - \omega t)]$, 其中, ω 为电磁波角频率, $k = nk_0$ 为电磁波在等离子体中的传播常数, $k_0 = \omega/c$ 为真空中的波数, c 为真空中电磁波传播的速度, n 为等离子体的复折射率^[5-7], 表达式为:

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

式中 ϵ_r 为等离子体的相对介电常数, 可表示为:

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475131)

作者简介: 刘世贵(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航空宇航等离子体技术。email: agui_182003@163.com

*通信作者: 谭 畅 email: casc_tan@163.com

$$\epsilon_r = 1 - \omega_p^2 / \left[\omega^2 (1 - i \frac{\nu}{\omega}) \right] \tag{2}$$

式中： ω_p 为等离子体频率； ν 为等离子体碰撞频率。此时，传播常数可以表示为：

$$k(\omega) = k_r + ik_i = k_0 \left[1 - \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0 \omega (\omega - i\nu)} \right]^{1/2} \tag{3}$$

对式(3)进行运算可得：

$$\left(\frac{\nu}{\omega} \right) = - \frac{2k_r k_i}{k_0^2 - k_r^2 + k_i^2} \tag{4}$$

$$n_e = \frac{m_e \epsilon_0 c^2}{e^2} (k_0^2 - k_r^2 + k_i^2) \left[1 + \left(\frac{4k_r^2 k_i^2}{k_0^2 - k_r^2 + k_i^2} \right) \right] \tag{5}$$

式中： e 为电子电荷量； m_e 为电子质量； ϵ_0 为真空介电常数； n_e 为等离子体密度。由方程(4)和(5)可根据 k_r 和 k_i 的测量结果计算等离子体电子密度 n_e 和碰撞频率 ν 。波数 k 的实部 k_r 体现波在等离子体中的空间相位延迟；由于碰撞，等离子体的传播常数出现了虚部 k_i ，该虚部描述了电磁波通过时变等离子体时其幅度不断衰减。对于垂直入射到高斯分布等离子体传播距离 z 后相位变化量 $\Delta\varphi$ 和能量衰减 A 为^[5-6,8-9]：

$$\Delta\varphi = (k_r - k_0)z \tag{6}$$

$$A(\text{dB}) = 4.343zk_i \tag{7}$$

因此，测量相位变化和衰减可计算出等离子体密度和碰撞频率。

2 微波衰减测量

测量系统由扫频信号源、接收机、本振/中频分配单元、微波宽带喇叭以及低损耗电缆组成(如图 1)。信号源产生测试所需的微波信号经耦合器后分为两路，一路经发射天线发射出去，另一路作为参考信号经参考混频器变频为中频信号，这个中频参考信号经中频/本振单元放大后到达接收机；发射的微波信号被接收天线接收，接收信号经测试混频器变频为中频信号，中频接收信号经中频/本振单元放大后到达接收机，最后接收机对参考信号和接收信号进行对比，得到幅值和相位的测量结果。系统集成测控软件对测试设备进行控制，完成测试工作，并对测试数据进行分析处理。

测量前先对系统进行校准，在无等离子体情况下，对测量系统进行归零。在有等离子体情况下分别测量反射衰减 A_r 和透射衰减 A_t ，等离子体对微波衰减为 $A_r - A_t$ ，透射衰减 A_t 的相位就是微波在等离子体中传播过程中的相位变化。

微波垂直入射等离子体，透射衰减和反射衰减测量结果如图 2。反射衰减明显高于透射衰减，这是因为反射衰减测量到的微波两次穿过等离子体，微波在等离子体中传播路程为透射传播的两倍，所以反射衰减大于透射衰减。

3 电子密度测量结果

在某工况下测量开展微波透射法和光谱法诊断密度试验，根据等离子体对微波的透射衰减大小和相位变化计算等离子体密度，这个密度为微波在等离子体中传播通道的最高密度，同时假设等离子体密度为高斯分布^[8-9]。在产生等离子体过程中，开展光谱诊断测试，进行光谱分析得到电子束等离子体密度。对比两种方法测量结果，2 种方法诊断结果基本一致。

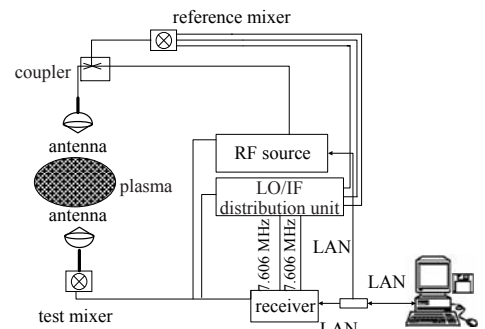


Fig.1 Measurement configuration
图 1 微波测量系统原理图

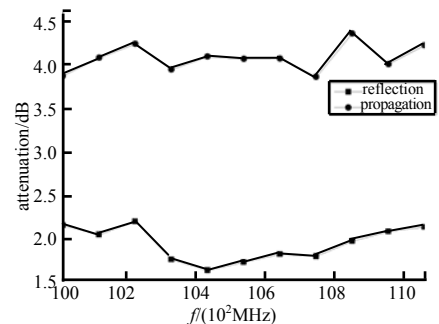


Fig.2 Reflection and propagation attenuation
图 2 反射衰减和透射衰减

表 1 两种方法测量电子密度

Table1 Two methods		
method	density/m ⁻³	
	case1	case2
microwave	2.76×10 ¹⁶	1.45×10 ¹⁶
spectrum	1.51×10 ¹⁶	9.87×10 ¹⁵

4 电子密度对透射衰减的影响

在等离子体对微波的衰减测量实验研究中发现，相同工况下夏天的测量结果和秋冬季节的测量结果有显著差异，进一步分析证明是因为北方地区夏天空气湿度较大而秋冬季节干燥造成的。图 3 为干燥空气和潮湿空气时透射衰减测量结果，湿度对微波衰减影响较大，需要研究影响规律。

由图 4 可以看出，相同工况干燥空气等离子体密度明显比潮湿空气等离子体密度高，另外等离子体密度与等离子体源功率有关，电子束电流越大则等离子体密度越高^[10-14]，密度随频率波动主要是测量随机误差和等离子体本身瞬时波动造成的，干燥空气和潮湿空气等离子体平均密度分别为 $2.88 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $1.31 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 和 $3.21 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 。

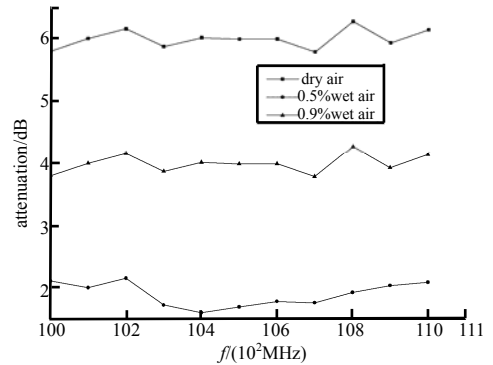


Fig.3 Microwave attenuation of dry and wet air plasma
图 3 干燥和潮湿空气等离子体透射衰减

5 分析与讨论

大气由多种成分组成，标准条件下空气中的水蒸气含量小于 0.03%。而任意条件下空气中水蒸气的含量与当地当时的温度和相对湿度有关，可表示为：

$$\eta = \frac{p_{sv,H_2O}\mu}{p_{air}} \quad (8)$$

式中： p_{sv,H_2O} 是某温度下水蒸气的饱和蒸气压； p_{air} 为空气压强； μ 为当地当时的相对湿度。那么，最大水蒸气含量为饱和蒸气压，即相对湿度为 100%时所占的比例。

近似认为西安地区冬天干燥空气中水蒸气含量极低，可以忽略，根据实验当时记录的温、湿度数据计算水蒸气含量，4 月某次实验潮湿空气中水蒸气体积百分含量为 0.5%，7 月某次实验潮湿空气中水蒸气含量为 0.9%，对实验工况大气压等离子体进行仿真计算，密度受水蒸气影响较大(如图 5)，可以看出，潮湿空气密度显著下降。尽管潮湿空气中水蒸气含量较小，但水蒸气对电子有较强的吸附能力，形成带电负离子导致等离子体中电子数量降低。0.5%的水蒸气导致电子密度下降 15%~30%，0.9%水蒸气导致电子密度下降 30%~50%，相同工况下水蒸气含量越高，等离子体密度越低，变化趋势与实验结果一致。

水蒸气的引入并没有增加空气的电离能，也不会改变空气的电离率，水蒸气对电子的吸附作用较强，并产生带电负离子，从而导致等离子体密度降低^[15]。提高大气压等离子体密度，可以从降低带负电离子或粒子密度入手，如相同工况下用氮气置换空气时等离子体密度显著增大。

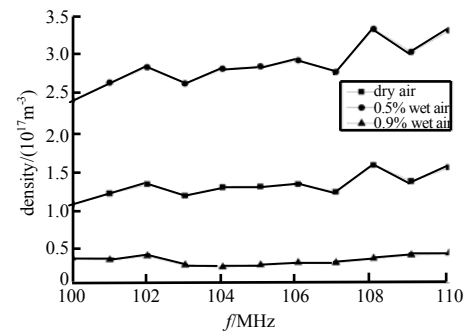


Fig.4 Plasma density of dry and wet air
图 4 干燥和潮湿空气等离子体密度

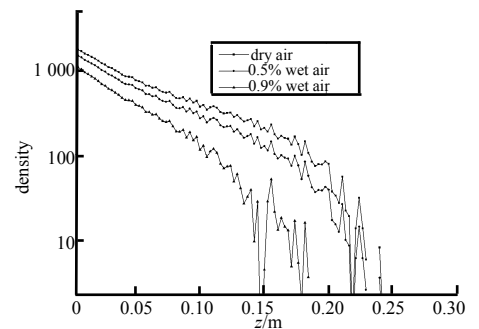


Fig.5 Numerical simulation
图 5 仿真计算结果

6 结论

本文利用等离子体对微波透射衰减法诊断等离子体密度，本方法结合相位变化，可计算等离子体密度，同时计算等离子体碰撞频率。从实验测试和仿真计算两方面研究湿度对等离子体密度的影响规律，这两种方法研究结果一致性好，空气湿度越高，大气压等离子体密度越低，空气中水蒸气会导致等离子体密度显著下降。

等离子体对微波透射测量要求以平面波入射等离子体，实际测量时因测试距离有限很难做到平面波入射，这样就会造成一定的误差。另外对等离子体密度分布做出了一定的假设，实际密度分布也会和假定的分布有偏差，这也是一个误差因素。天线波束宽度也会对测量结果有影响，波束照射等离子体面积越大，测量结果对密度平均化越明显。但测试试验中充分利用大气压等离子体分布的轴对称性，把收、发天线对称放置于等离子体

两侧,使微波垂直入射等离子体,降低微波绕射等干扰的影响。

参考文献:

- [1] 陈宗胜,林志丹,时家明,等. 用 Langmuir 探针法标定的发射光谱法诊断等离子体电子密度及分布[J]. 真空科学与技术学报, 2015,35(6):646-649. (CHEN Zongsheng,LIN Zhidan,SHI Jiaming,et al. Diagnosis of electron density distribution of plasma with emission spectroscopy demarcated by Langmuir probe[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015,35(6):646-649.)
- [2] 王涛,张天平,张海亮. 放电室等离子体诊断朗缪尔探针设计分析[J]. 真空与低温, 2018,24(4):275-278. (WANG Tao, ZHANG Tianping,ZHANG Hailiang. Analysis and design of Langmuir probe for diagnose of ion thruster discharge plasma[J]. Vacuum and Cryogenics, 2018,24(4):275-278.)
- [3] 刘冲,何湘,朱卫华. 射频容性耦合等离子体放电特性的光谱诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(4):1007-1013. (LIU Chong,HE Xiang,ZHU Weihua. Spectral diagnosis of RF capacitive coupled plasma[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(4):1007-1013.)
- [4] 林敏,徐浩军,魏小龙. 电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究[J]. 物理学报, 2015,64(5):313-319.(LIN Min, XU Haojun,WEI Xiaolong. Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(5):313-319.)
- [5] 董群锋,郭立新. 太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传播特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):38-41. (DONG Qunfeng,GUO Lixin. Terahertz electromagnetic wave propagation in uniform magnetized plasma[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):38-41)
- [6] 杨华,时家明,凌永顺. 电磁波在磁化等离子体上的反射特性研究[J]. 电波科学学报, 2001,16(2):196-199. (YANG Hua,SHI Jiaming,LING Yongshun. Studies of reflection characteristics of electromagnetic waves propagating into magnetized plasma[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001,16(2):196-199.)
- [7] 魏小龙,徐浩军,李建海,等. 高气压空气环状感性耦合等离子体实验研究和参数诊断[J]. 物理学报, 2015,64(17): 1-8. (WEI Xiaolong,XU Haojun,LI Jianhai,et al. Experimental investigation and parameter diagnosis of air high-pressure ring-shaped inductively coupled plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(17):1-8.)
- [8] VIDMAR R J,SEELEY M V,SERDYUCHENKO A,et al. Electrical,RF,and optical diagnostics in E-beam excited air plasma[C]// 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Oslo:[s.n.], 2008:1111.
- [9] VIDMAR R J,KUMARI D R,RAMSAYER C J,et al. Electron-beam-generated air plasma:microwave diagnostics and optical measurements[C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Florida,USA:[s.n.], 2009:12.
- [10] DENG Yongfeng,TAN Chang,HAN Xianwei,et al. Numerical simulation of the self-heating effect induced by electron beam plasma in atmosphere[J]. Plasma Science and Technology, 2012,14(2):89-93.
- [11] DENG Yongfeng,TAN Yonghua,HAN Xianwei. Study of plasma natural convection induced by electron beam in atmosphere[J]. Physics of Plasmas, 2014,21(6):76-81.
- [12] DENG Yongfeng,TAN Yonghua,HAN Xianwei. Research on inducing characteristics of nonequilibrium electron beam plasma for aerodynamic applications[C]// The 14th International Space Conference of Pacific-basin Societies. Xi'an,China:[s.n.], 2014,21(6):76-81.
- [13] DENG Yongfeng,TAN Yonghua,HAN Xianwei. Numerical and experimental investigation of electron beam air plasma properties at moderate pressure[J]. Plasma Science and Technology, 2017,19(4):1-6.
- [14] PEI Xuekai,CHEN Kai,LU Xinpei. Large scale N₂ plasma induced by electron beam at high pressure[J]. Abstract Proceeding of IEEE International Conference on Plasma Science, 2013,41(3):494-497.
- [15] 黄清,魏旭,许建刚,等. 氧气含量对氦氢等离子体射流特性影响[J]. 华北电力大学学报, 2017,44(4):57-61. (HUANG Qing,WEI Xu,XU Jiangang,et al. Effect of oxygen content on characteristics of helium oxygen plasma jet[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017,44(4):57-61.)