

局域环境中微波等离子体电子 密度诊断实验研究*

杨 涓[†] 许映乔 朱良明

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2007 年 4 月 27 日收到, 2007 年 6 月 5 日收到修改稿)

为了研究局域真空环境中微波等离子体喷流电子数密度的分布规律及其影响因素, 利用发射/郎缪尔探针测量等离子体的空间电位, 再测量等离子体的电流-电压特性曲线, 根据空间电位测量结果, 在等离子体的电流-电压特性曲线上能准确地获取饱和电流, 从而处理出电子数密度. 最后的诊断实验表明: 在有约束边界条件下, 微波等离子体发生器以 60 W 以下的微波功率击穿流量范围是 21—105 mg/s 的氩气时, 所产生的喷流中电子数密度分布在 8.8×10^{14} — $7.53 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 范围内. 喷流轴线上的电子数密度呈线性分布, 离开轴线时电子数密度沿喷流方向近似呈抛物线分布, 增加气体流量和功率都有利于提高电子数密度.

关键词: 等离子体诊断技术, 等离子体基本过程, 等离子体基本特性

PACC: 5270, 5220, 5225

1. 引 言

由天线罩、雷达天线和高频部件构成的雷达舱位于导弹的头部并产生很强的雷达散射截面, 因此降低雷达舱的雷达散射截面是飞行器隐身中一个重要的研究课题. 基于等离子体技术的雷达舱隐身方案之一是在雷达舱内创建一个真空环境, 需要隐身时对舱内连续充填等离子体, 在金属天线前形成具有一定电子数密度、体积达到一定范围并能维持一定时间的等离子体, 利用其吸收电磁波的效应降低金属天线的雷达散射截面, 从而实现雷达舱的等离子体隐身. 当天线需要工作时, 停止等离子体的充填, 雷达舱内空间成为透波环境. 微波等离子体发生器具有效率高、体积小、工作稳定无电磁辐射的特点^[1], 有可能应用在雷达舱的等离子体隐身中, 然而其应用效果直接受控于电子数密度的分布, 因而从实验上诊断具有约束边界微波等离子体喷流的电子数密度, 分析其分布规律与影响因素具有重要的实际意义.

本文利用石英玻璃罩来模拟雷达天线罩, 结合发射探针与单郎缪尔探针的诊断方法, 利用发射探

针同时测取玻璃罩内真空环境中微波等离子体喷流的空间电位和探针电流-电压特性曲线, 从中诊断出电子数密度. 实验研究有边界条件下喷流中电子数密度的分布规律, 并分析其影响因素, 为实现飞行器的等离子体隐身奠定基础.

2. 实验系统和装置

如图 1 所示, 实验系统由三部分组成: 1) 有约束边界微波等离子体喷流实验装置, 包括发生器腔体、微波源、气源、金属平板和直径 260 mm、长 300 mm 的石英玻璃罩, 其中金属平板上连接有真空管用于维持石英玻璃罩内的真空度. 2) 探针诊断装置, 包括发射探针电源、郎缪尔探针扫描电源、三套弯曲的探针、探针移动坐标架, 其中三根探针具有发射探针和郎缪尔探针的功能, 探针钨丝分别位于喷流轴线、距离轴线 50 和 80 mm 的位置处. 移动坐标架可以使探针沿喷流方向连续移动; 发射探针电源用于加热探针, 使其达到电子发射状态, 从而测量等离子体空间电位, 郎缪尔探针扫描电源用于给探针加电压, 从而获得等离子体的电流-电压特性曲线. 3) 真空系统, 包括直径 1.2 m、长 3 m 的真空实验舱, 两套罗茨泵

* 国家自然科学基金(批准号: 30575081, 90716019)和航空基金(批准号: 2006ZA53005)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: jyang_mpt@hotmail.com

机组. 真空泵工作时, 真空舱内的极限真空压强能达到 0.1 Pa ; 发生器腔体在其内工作, 并以氩气为工质, 质量流量为 105 mg/s 时, 真空舱内真空压强能维持在 6 Pa 以下.

如图 1 所示, 有约束边界微波等离子体喷流装置安装在真空实验舱内, 金属平板上的真空管把石英玻璃罩内的空间和真空舱连通, 真空泵机组工作时可以在石英玻璃罩内形成局域真空环境. 实验时, 朗缪尔探针扫描电源首先给探针加电, 测得探针未发射电子时的冷探针电流-电压特性曲线. 再缓慢加大发射电源的电流, 直到获得探针钨丝开始发射电子时的发射电流, 两次测量结果的对比就可以得到等离子体空间电位^[2].

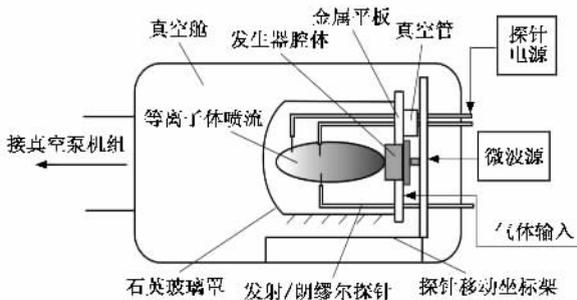


图 1 实验系统图

3. 实验结果与分析

固定在移动坐标架上的三根弯曲发射/朗缪尔探针横穿于有约束边界微波等离子体喷流实验装置的金属平板上, 移动坐标架在计算机的控制下, 可以诊断轴线、距轴线 50 mm 和 80 mm 沿喷流方向上的

电子密度分布. 诊断从距发生器喷口 20 mm 处开始, 三根探针每移动 25 mm 后, 在功率分别为 46 W , 52 W 和 59 W , 氩气质量流量分别为 21 mg/s , 42 mg/s , 63 mg/s , 84 mg/s 和 105 mg/s 条件下进行电流-电压特性曲线测量和电子密度诊断.

3.1. 在给定功率条件下电子密度的空间分布规律及其随质量流量的变化

在微波功率为 59 W 的条件下, 图 2 和图 3 分别给出电子密度沿喷流方向和半径方向的变化规律. 这里 L 表示轴向坐标值, r 表示径向坐标值. 两图的曲线表明诊断出的电子密度分布在 $9.6 \times 10^{14} \sim 10^{16} / \text{m}^3$ 范围内.

图 2(a) 表明, 在不同流量条件下, 喷流轴线上电子密度沿轴向距离几乎呈线性衰减. 文献 3 对没有约束边界条件下的自由等离子体喷流进行了诊断, 在相同功率和流量范围条件下, 诊断出喷流轴线上电子密度沿喷流方向的变化也几乎呈线性规律衰减, 这和本文实验结果相一致. 不同的是在相同的流量变化范围内, 由于边界的约束作用, 石英玻璃罩内等离子体喷流电子密度的变化范围小于自由等离子体喷流电子密度的变化范围. 图 2(b) 和 (c) 的曲线表明等离子体具有抛物线的形状, 并且在径向距离较大时电子密度易受流量影响, 这和一般由喷口加速产生的喷流特征相一致.

在图 3 上, 由于实验条件的限制, 在同一流量条件下, 只能获得三个实验数据点, 难以全面给出电子密度沿径向的完整分布曲线, 也无法给出喷流边界上电子密度分布, 但是这些数据典型地反映出电子密度在喷口附近随半径和流量发生明显变化、在喷口较远处随半径和流量发生缓慢变化的情况.

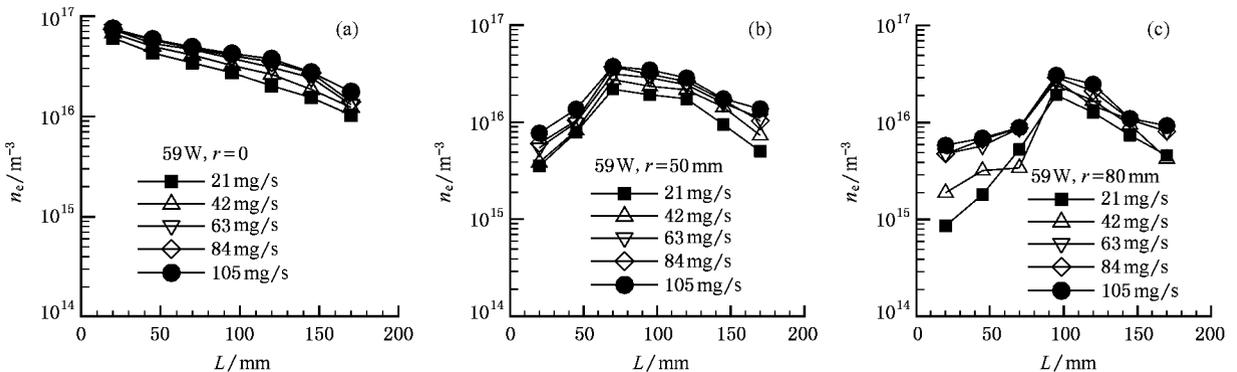


图 2 微波功率 59 W 、不同流量条件下电子密度沿喷流方向的分布规律 (a) $r = 0 \text{ mm}$; (b) $r = 50 \text{ mm}$; (c) $r = 80 \text{ mm}$

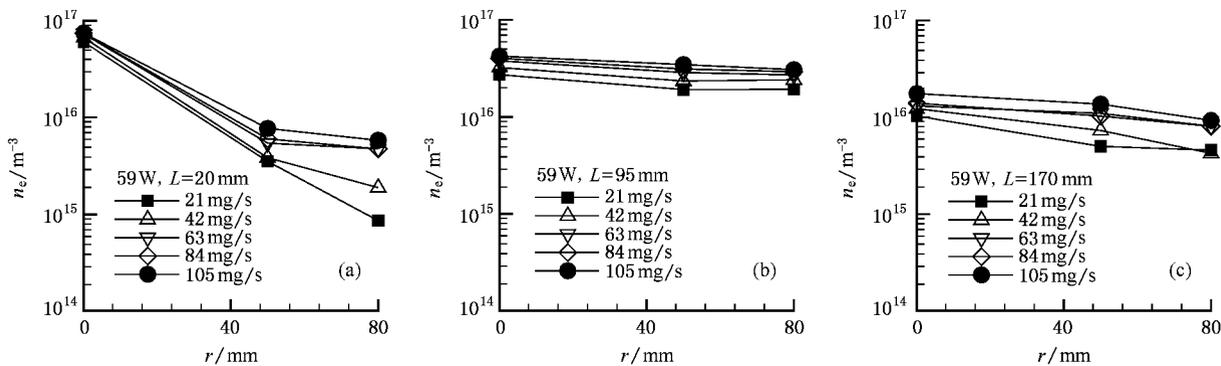


图 3 微波功率 59 W、不同流量条件下电子密度沿半径方向的分布规律 (a) $L=20\text{ mm}$; (b) $L=95\text{ mm}$; (c) $L=170\text{ mm}$

3.2. 在给定流量条件下电子密度的空间分布规律及其随质量流量的变化

在气体流量为 63 mg/s 的条件下, 图 4 和图 5 分别给出电子密度沿喷流方向和半径方向的变化规律. 图示曲线表明诊断出的电子密度分布在 $8.8 \times 10^{14} \sim 7.52 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 范围内. 微波功率增加使等离子体喷流中的电子密度增加, 这和微波等离子体实

验情况相一致. 微波等离子体发生器稳定工作时, 腔体内部气体压强超出 $1 \times 10^5\text{ Pa}$, 等离子体碰撞频率高于微波频率, 微波的传播不受等离子体截止频率的限制, 因此微波功率的增加使等离子体吸收的功率也增加, 从而导致电子密度增加^[4]. 图 4 所示曲线还说明在离轴线较远处, 电子密度随微波功率的变化而发生明显的变化, 图 5 说明, 在距喷口较近的位置处, 电子密度易受微波功率的影响.

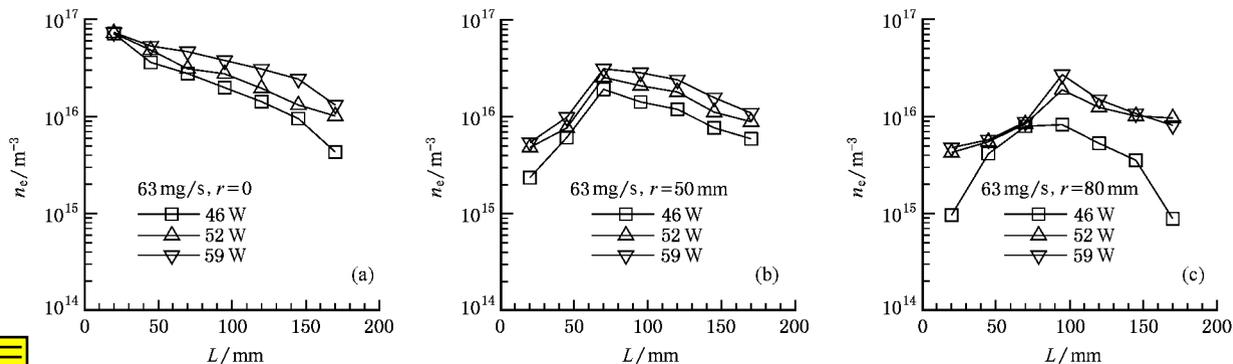


图 4 流量为 63 mg/s 、不同功率条件下电子密度沿喷流方向的分布规律 (a) $r=0\text{ mm}$; (b) $r=50\text{ mm}$; (c) $r=80\text{ mm}$

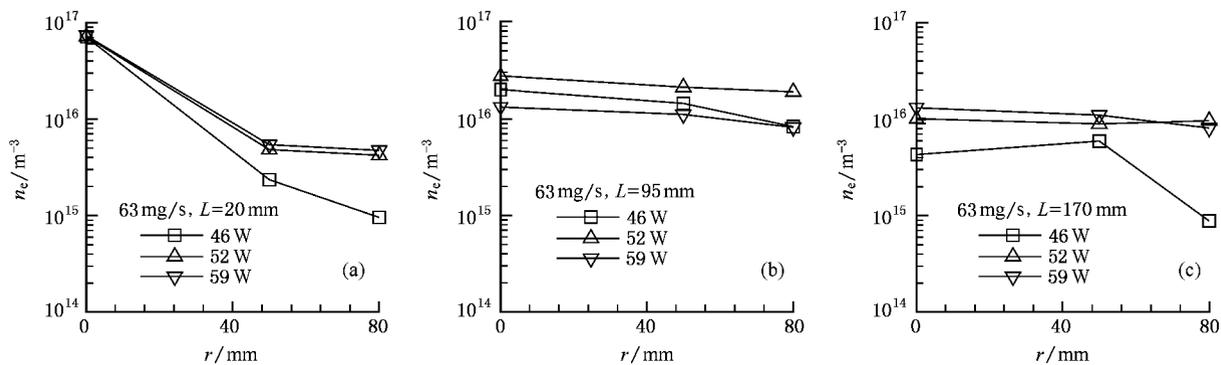


图 5 流量为 63 mg/s 、不同功率条件下电子密度沿半径方向的分布规律 (a) $L=20\text{ mm}$; (b) $L=95\text{ mm}$; (c) $L=170\text{ mm}$

4. 结 论

本文采用石英玻璃罩、金属平板、微波等离子体发生器形成了一套有约束边界的微波等离子体喷流实验装置,该装置放置在大体积真空实验舱内,形成了局域真空容器内的微波等离子体喷流。采用发射/朗缪尔探针诊断实验装置获得了氩气等离子体喷流中电子密度的空间分布及其随流量和微波功率的变化规律。

在微波功率为 46 W、52 W 和 59 W,氩气流量分布在 21—105 mg/s 范围内时,诊断出的电子密度分布在 8.8×10^{14} — $7.53 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 范围内,喷流轴线上的电子密度沿喷流方向呈线性变化规律;在离开轴线的位置处,等离子体电子密度沿喷流方向的分布呈现近似的抛物线分布规律。功率和流量的增加都导致电子密度的增加,在离喷流轴线较远或喷口较近的位置处,流量和微波功率对电子密度有较明显的影响。

- [1] Yang J, He H Q, Mao G W 2004 *J. Propulsion Tech.* **25** 259 (in Chinese) [杨 涓、何洪庆、毛根旺 2004 推进技术 **25** 259]
 [2] Sun Q P, Deng X L, Ma T C *et al* 2004 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **24** 67 (in Chinese) [孙秋普、邓新绿、马腾才等 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 67]
 [3] Yang J, Liu W Y, Zhu G Q, Mao G W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56**

366 (in Chinese) [杨 涓、刘文一、朱国强、毛根旺 2007 物理学报 **56** 366]

- [4] Xia G Q, Mao G W, Yang J, Song J, Chen J, He H Q 2006 *J. of Propulsion Tech.* **27** 363 (in Chinese) [夏光庆、毛根旺、杨涓、宋 军、陈 君、何洪庆 2006 推进技术 **27** 363]

Diagnostic study on the electron density distribution of microwave plasma jet in local vacuum environment^{*}

Yang Juan[†] Xu Ying-Qiao Zhu Liang-Ming

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

(Received 27 April 2007; revised manuscript received 5 June 2007)

Abstract

In order to diagnose the electron density of microwave plasma jet confined by solid boundary walls, the emission/Langmuir probe was applied to measure the plasma space potential and current and voltage property when the probe is charged by heating and scanning power supply separately. According to the plasma space potential, saturated current on the current-voltage characteristics of plasma can be distinguished, which can be used to estimate the number density of electrons in the plasma. The results show that the magnitude of electron density ranges from 8.8×10^{14} to $7.53 \times 10^{16}/\text{m}^3$, the electron density on the centerline of jet decreases linearly off the nozzle exit plane, but it has approximately parabolic distribution along the plasma jet direction when leaving the centerline. Increasing mass flow rate at constant power and increasing power at constant mass flow rate will increase electron density.

Keywords: plasma diagnostic techniques, elementary processes in plasma, basic properties of plasma

PACC: 5270, 5220, 5225

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10575081, 90716019) and Astronautics Foundation (Grant No. 2006ZA53005).

[†] E-mail: jyang_mpt@hotmail.com