

# 真空中微波等离子体喷流电子数密度 分布规律实验研究<sup>\*</sup>

杨 涓<sup>†</sup> 刘文一 朱国强 毛根旺

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2005 年 6 月 20 日收到, 2005 年 9 月 5 日收到修改稿)

为了准确诊断真空中微波等离子体喷流的电子数密度, 利用统一的发射和单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, 当真空环境压强为 2—6 Pa, 等离子体发生器以 60 W 以下的微波功率击穿流量范围是 42—106 mg/s 的氩气时, 所产生的微波等离子体喷流中电子数密度分布在  $1 \times 10^{16}$ — $7.2 \times 10^{16}/\text{m}^3$  范围内.

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

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, 在军用和民用两方面有着非常广泛的用途. 然而其应用效果直接受控于电子数密度的分布<sup>[1-3]</sup>, 因而从实验上诊断真空中微波等离子体喷流的电子数密度, 从而分析其分布规律与影响因素具有重要的实际意义.

等离子体的诊断有激光、光谱和探针等方法, 其中探针诊断又包括朗缪尔探针、发射探针方法等. 郎缪尔探针可以用来测量等离子体的电流-电压特性曲线, 对曲线进行处理就可以获得电子数密度和电子温度等参数. 这种诊断方法具有装置简单、易于制作和操作方便等特点, 被广泛用来进行各类等离子体电子数密度和温度的诊断<sup>[4-9]</sup>. 发射探针可以用来测量等离子体的空间电位, 同样具有装置简单、易于制作和操作方便等特点<sup>[10]</sup>. 郎缪尔探针诊断方法的一个关键之处就是在等离子体电流-电压特性曲线上准确地获取探针的饱和电流, 但是在诊断过程中, 探针可能发射出电子, 影响饱和电流的读取, 所以应该首先利用发射探针测量等离子体的空间电位, 再用郎缪尔探针测量等离子体的电流-电压特性

曲线, 根据等离子体空间电位来准确判断饱和电流. 为此本文结合发射探针与单郎缪尔探针的诊断方法, 采用统一的发射和单郎缪尔探针同时测取真空中微波等离子体喷流的空间电位和电流-电压特性曲线, 以研究喷流中电子数密度的分布规律, 并分析其影响因素.

## 2. 实验系统

如图 1 所示, 实验系统由微波等离子体发生器、真空实验装置、测控装置、XY 坐标架、统一发射和单郎缪尔探针诊断装置组成. 真空实验装置包括实验舱和真空泵机组. 微波等离子体发生器包括固态源和腔体, 其中固态源把电能转换为 2.45 GHz 的微波能, 微波能沿电缆通过实验舱法兰输入到腔体中并在其中形成 TEM 谐振波, 气体进入腔体后被微波能量击穿产生等离子体, 等离子体再经过喷口喷出形成真空下的微波等离子体喷流. 统一发射和单郎缪尔探针诊断装置包括探针、发射探针电源和扫描电源, 发射探针电源用于加热探针, 使其达到电子发射状态, 以测量等离子体空间电位, 扫描电源等同于单郎缪尔探针电源, 用于给探针加电压, 以获得等离子体的电流-电压特性曲线. 测控装置用于控制固态

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10575081)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: jyang\_mpt@hotmail.com

源的输出微波功率和气体流量、记录等离子体的空间电位和电流-电压曲线、测量腔体的压强、控制  $XY$  坐标架上腔体在两个相互垂直方向上的移动。

实验时,腔体固定在实验舱中,产生真空环境中的微波等离子体喷流。探针固定在等离子体喷流中,发射探针电源给探针加电以后,首先测得探针未发射电子时的冷探针电流-电压曲线,再缓慢加大发射电源的电流,直到获得发射探针的饱和发射电流,两次测量结果的对比就可以得到等离子体空间电位。再关闭发射探针电源,打开扫描电源,测量探针的电流-电压特性曲线。根据该曲线和等离子体空间电位就可处理出等离子体中的电子数密度。

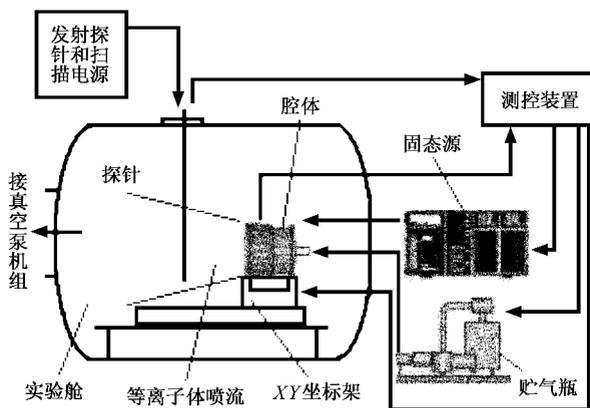


图1 实验系统

### 3. 实验结果与分析

实验时,以氩气为工质,固态源输出微波功率分别为 46 和 59 W、微波等离子体发生器气体流量分别为 63, 84 和 105 mg/s、实验舱压强分别为 3.2 和 5.4 Pa。

#### 3.1. 微波功率和流量对径向电子数密度分布规律的影响

图 2—图 7 给出不同微波功率、不同流量、不同轴线位置处,微波等离子体喷流中电子数密度  $N_e$  沿径向分布规律的诊断结果。图中横坐标为诊断位置与喷流轴线之间的距离,  $L$  为诊断位置与发生器喷口端面之间沿轴线方向的距离。

图示曲线说明: 1) 当流量比较小为 63 mg/s 时,微波功率增加将使电子数密度增加; 当流量大于 84 mg/s 时,微波功率增加,电子数密度变化不很明显。这是因为随着功率增加,腔体内场强增加,在流量比

较低的情况下,气体流速较小,腔体内微波等离子体中电子有足够的时间获得更多的能量,使气体电离度增加,从而使喷射出腔体等离子体的电子数密度增加。当流量较大时,气体流速较大,电子没有足够的时间完全吸收微波能量,使得腔内外等离子体电子数密度随微波功率的增加而变化不明显。2) 在流量给定的条件下,微波功率增加,同一横截面上等离子体扩散的范围增加。这是因为微波功率增加,腔体内外等离子体的电离度增加,从而使其扩散范围增加。

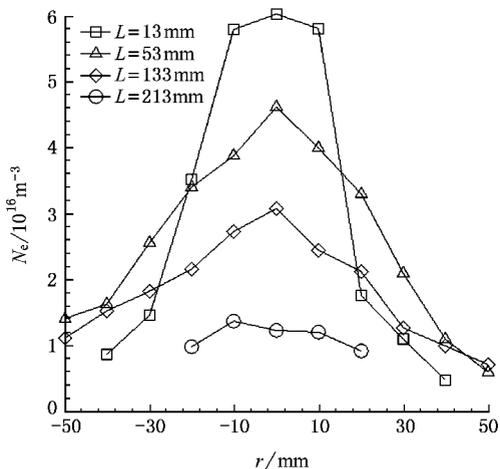


图2 63 mg/s 46 W 时  $N_e$  沿径向分布

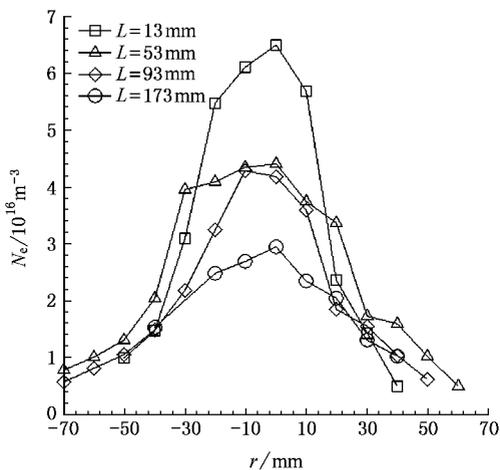


图3 63 mg/s 59 W 时  $N_e$  沿径向分布

#### 3.2. 微波功率和流量对轴向电子数密度分布规律的影响

图 8 和 9 为不同功率、不同流量条件下,电子数密度沿轴线的分布规律。图示说明,流量不变时,微

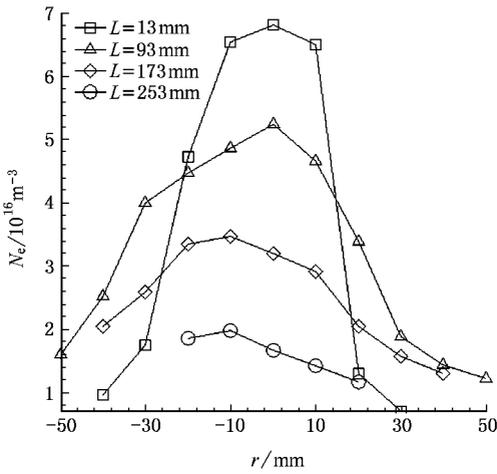


图 4 84 mg/s 46 W 时  $N_e$  沿径向分布

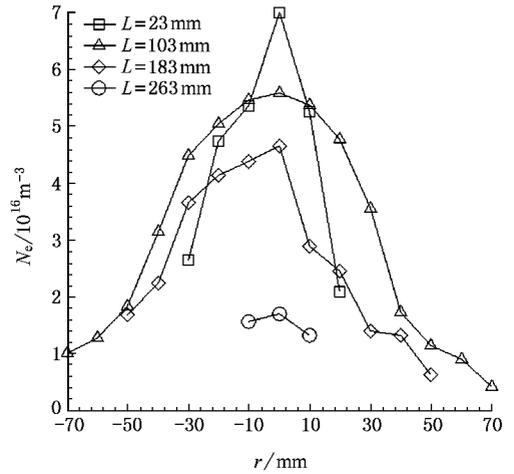


图 7 105 mg/s 59 W 时  $N_e$  沿径向分布

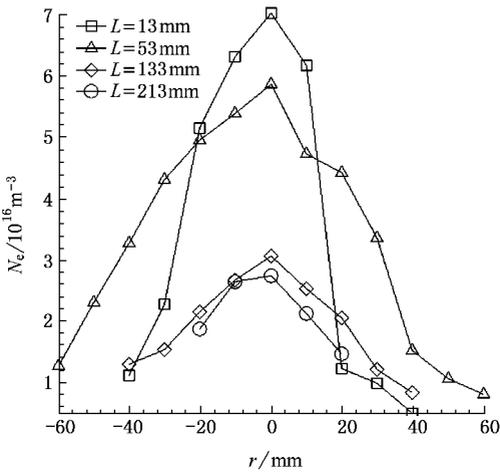


图 5 84 mg/s 59 W 时  $N_e$  沿径向分布

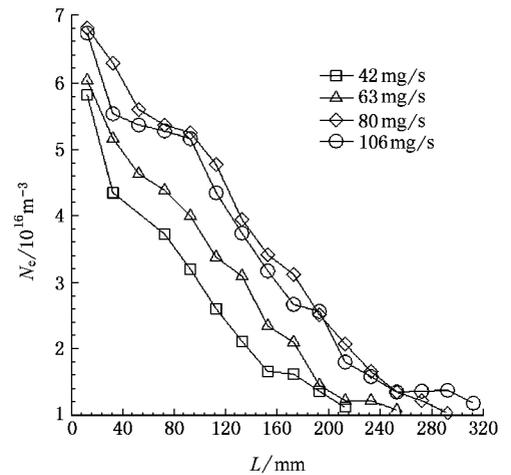


图 8 46 W 时  $N_e$  沿轴向分布

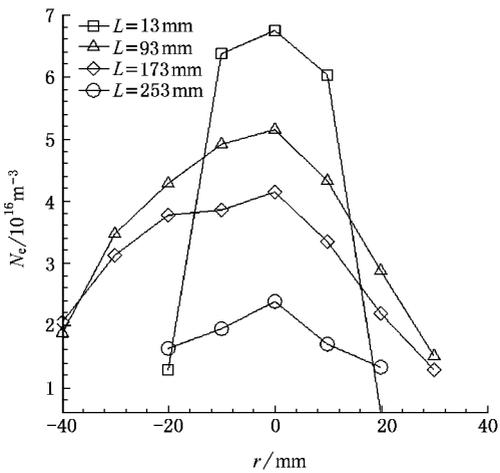


图 6 105 mg/s 46 W 时  $N_e$  沿径向分布

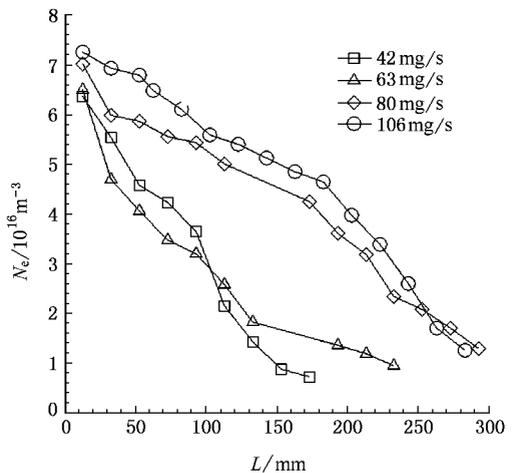


图 9 59 W 时  $N_e$  沿轴向分布

波功率增加, 等离子体沿轴向能够扩散到更远的位置. 这是因为功率增加, 腔体内等离子体的电离度提

高,腔体外等离子体的电子密度增加,并能扩散到更远的位置。

### 3.3. 真空度对电子数密度分布规律的影响

图 10 为固态源输出功率 59 W、流量 63 mg/s 时,在环境压强分别为 3.2 和 5.4 Pa 条件下电子数密度沿轴线的分布规律;图 11 为固态源输出功率 59 W、流量 63 mg/s 时,在环境压强分别为 3.2 和 5.4 Pa 条件下距等离子体发生器腔体外端面 93 mm 位置处电子数密度沿径向的分布规律。图示说明随着环境压强的降低,喷流中电子数密度增加、等离子体的扩散范围增加。这是因为,环境气体压强降低时,等离子体中电子的平均自由程增加,电子与其他粒子的碰撞频率降低,从而降低了等离子体的复合率,却使等离子体的扩散范围增加。

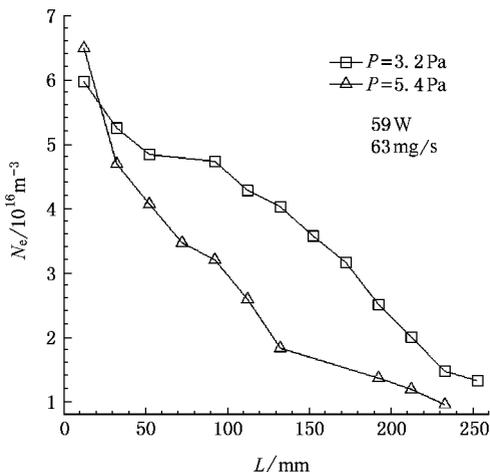


图 10 真空度不同时  $N_e$  沿轴线分布

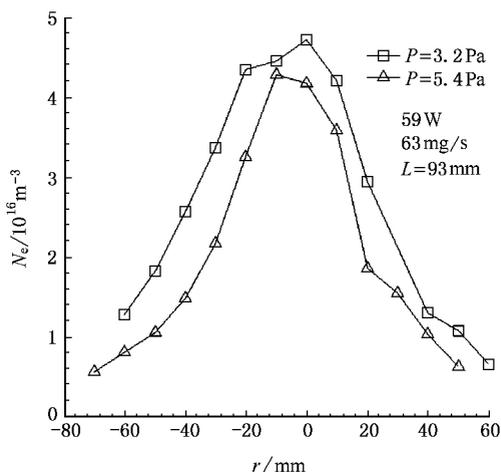


图 11 真空度不同时  $N_e$  沿径向分布

## 4. 结 论

在不同电源的作用下,统一的发射和单郎缪尔探针既可以用来测量等离子体的空间电位,又能用来测量等离子体的电流-电压特性曲线。根据这些测量结果,可以诊断出等离子体的电子数密度。

当真空环境压强分别为 3.2 和 5.4 Pa、气体流量在 42—106 mg/s 范围内变化时,60 W 以下微波功率产生的等离子体喷流电子数密度分布在  $(1—7.2) \times 10^{16}/\text{m}^3$  范围内。

当气体流量比较低时,提高微波功率可以明显地提高等离子体喷流中电子数密度;当气体流量比较大时,提高微波功率并不能明显地提高电子数密度,但却能使等离子体喷流范围增加。降低真空环境压强有利于提高等离子体喷流的电子数密度与扩散范围。

[1] Sun A P, Li L Q, Qiu X M, Dong Y Y 2002 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **22** 135 (in Chinese) [孙爱萍、李丽琼、邱孝明、董玉英 2002 核聚变与等离子体物理 **22** 135]

[2] Sun A P, Tong H H, Shen L R, Tang D L, Qiu X M 2001 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **21** 224 (in Chinese) [孙爱萍、童洪辉、沈丽如、唐德礼、邱孝明 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 224]

[4] Chi L F, Lin K X, Yao R H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1313 (in Chinese) [池凌飞、林揆训、姚若河 2001 物理学报 **50** 1313]

[5] Zhu X D, Wen X H, Zhou H Y, Zhan R J 2001 *Vacuum Science and Techn.* **21** 67 (in Chinese) [朱晓东、温晓辉、周海洋、詹如娟 2001 真空科学与技术 **21** 67]

[6] Pan G S, Wang C, Wan S D 2001 *Vacuum Science and Techn.* **21**

116 (in Chinese) [潘阁生、王成、万树德 2001 真空科学与技术 **21** 116]

[7] Liu L H, Yu W, Zhao Q D, Fu G S 2004 *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis* **37** 28 (in Chinese) [刘丽辉、于威、赵启大、傅广生 2004 南开大学学报 **37** 28]

[8] Zhu W H, Zhu N Q, Chen Y S 1989 *Acta Phys. Sin.* **38** 236 (in Chinese) [朱文浩、朱南强、陈跃山 1989 物理学报 **38** 236]

[9] Chen L Y, Qiu J W, Gu Z 2004 *Vacuum and Cryogenics* **10** 31 (in Chinese) [陈琳英、邱家稳、顾佐 2004 真空与低温 **10** 31]

[10] Sun Q P, Deng X L, Ma T C 2004 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **24** 67 (in Chinese) [孙秋普、邓新绿、马腾才 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 67]

# Diagnostic study on the electron density distribution of microwave plasma jet in vacuum environment<sup>\*</sup>

Yang Juan Liu Wen-Yi Zhu Guo-Qiang Mao Gen-Wang

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

( Received 20 June 2005 ; revised manuscript received 5 September 2005 )

## Abstract

In order to diagnose precisely the electron number density of microwave plasma jet in vacuum environment , the integrative probe whose function is the same as that of emissive and Langmuir ones was applied to measure the plasma space potential and its current and voltage property when the probe is charged by the electric power of emissive probe and scanning electric power separately. According to the plasma space potential , saturated current on the current-voltage curve of plasma can be determined , which can be used to estimate the number density of electrons. The experimental results show that the number density of electrons in microwave argon plasma jet in vacuum environment is  $1 \times 10^{16} - 7.2 \times 10^{16} / \text{m}^3$  , when the vacuum pressure is 3.2 and 5.4 Pa , the microwave output power is under 60 W and gas mass flow rate is in the range of 42—106 mg/s.

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

**PACC** : 5270 , 5220 , 5225

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 10575081 ).