

真空环境中等离子体喷流对反射电磁波衰减的 实验研究^{*}

朱 冰 杨 涓 黄雪刚 毛根旺 刘俊平

(西北工业大学航天学院,西安 710072)

(2005 年 7 月 14 日收到,2005 年 11 月 14 日收到修改稿)

在真空环境中,利用传输线测量装置,开展微波等离子体喷流对反射电磁波衰减的实验研究.实验结果表明,采用传输线测量方法能够有效地获得等离子体对反射电磁波的衰减.在 5GHz 附近,以氩气为工质,流量为 52.5mg/s 时,52W 微波功率在真空环境中产生的等离子体喷流能对反射电磁波产生最大的衰减.增加微波功率、降低真空环境压强可以提高等离子体对反射电磁波的衰减.要使等离子体能够对反射电磁波产生最大的衰减,必须选取合适的发生器参数.

关键词:电磁波在等离子体中的传输,等离子体基本过程,电磁波

PACC:5240D,5225,2110K

1. 引 言

等离子体隐身是继常规隐身方法之后出现的一种新概念隐身技术,其研究在国外有相当的历史^[1,2],近几年在国内也受到重视^[3-7].到目前为止,国内外已经有人对电磁波在等离子体中的传输与反射规律进行了大量的计算分析,讨论等离子体厚度、电子数密度、入射电磁波频率、角度和极化方向等因素对电磁波在等离子体中传输的影响.实验上,这方面的研究还非常有限.1998 年,国外有人在大气条件下^[8],利用等离子体炬产生了大范围的等离子体喷流,再利用 X 波段方波导装置测量等离子体对电磁波的衰减.波导一端联接扫频源,用于发射电磁波测量信号;另一端联接频谱仪,用于测量接收到电磁波信号的电平.等离子体产生后通过横穿波导的石英玻璃管,再启动扫频源和频谱仪,就能给出等离子体对 X 波段电磁波的衰减.实验结论为三套并排的等离子体炬对 8.5—10.5GHz 电磁波衰减的最大值为 25dB.

2001 年国内有人在地面条件下以 100W 的微波功率产生了直径 5mm、长度 30mm 的微波等离子体喷流,随后微波功率可以降低并稳定在 50W^[9].然后

利用 X 和 C 波段的矩形波导传输线,在地面条件下初步测量了微波等离子体喷流对电磁波的衰减.测量结果是微波等离子体对 X 波段电磁波衰减的最大值可以达到 15dB,对 C 波段电磁波衰减的最大值可以达到 6dB.

本文借鉴以上有关文献的实验测量方案,研究微波等离子体喷流在真空环境中对反射电磁波的衰减规律,并分析微波等离子体发生器气体流量、微波功率和真空度如何影响这一规律.

2. 实验系统与测量方法

实验系统由真空环境模拟实验装置、微波等离子体发生器、传输线测量装置、网络分析仪组成,如图 1 所示.真空环境模拟实验装置含真空实验舱和两套真空泵机组.微波等离子体发生器含固态源、腔体和储气瓶.其中固态源把电能转换为 2.45GHz 的微波能,微波能沿电缆通过真空实验舱法兰输入到腔体中并在其中形成 TEM 谐振波,气体从储气瓶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.传输线测量装置由 BJ48 型微波直波导器件组成,直波导内腔尺寸为 47.549mm × 22.149mm,器件中微波

^{*}西北工业大学研究生创业种子基金(批准号 Z200502)资助的课题.

的传输模式为 TE_{10} 波, 频率范围为 3.94—5.99GHz. 这些器件为同轴波导转换、环行器、隔离器、开孔直波导、短路金属板和石英玻璃管, 其中石英玻璃管横穿开孔波导宽边. 实验时, 等离子体从腔体中喷出后直接进入石英玻璃管. 为了防止微波从波导壁孔向外泄漏, 波导孔直径应该小于波导波长的 $1/4$, 此处选为 18.5mm, 石英玻璃管内外直径分别为 16 和 18mm. 网络分析仪的作用是发射电磁波测试信号并检测反射回的电磁波电平, 测试频率分布在 20MHz—20GHz 范围内.

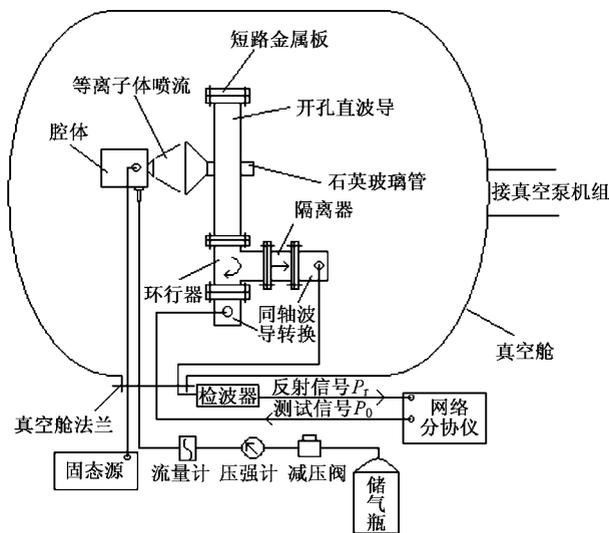


图1 实验装置

传输线测量等离子体对反射电磁波衰减的方法是: 网络分析仪根据要求发射出一定频率范围的电磁波测试信号沿电缆首先进入同轴波导转换, 再通过环行器和开孔直波导后被短路金属板全反射, 电磁波反射信号再沿环行器、隔离器和同轴波导转换, 进入检波器被检波成电流信号, 再进入到网络分析仪. 网络分析仪对输出电磁波和输入检波信号能量进行对比运算后, 给出回波损耗值 $L_r = 10 \lg(P_r/P_0)$ (dB), 其中 P_0 是网络分析仪输出电磁波测试信号能量, P_r 是进入到网络分析仪的电磁波反射信号能量. 在全反射的情况下 $P_0 = P_r$, $L_r = 0$. 开孔直波导内存在等离子体时, 如果等离子体能够吸收通过的电磁波能量, 则 $P_0 > P_r$, $L_r < 0$. 可见 L_r 愈小, 等离子体对发射电磁波的衰减愈大.

针对图1实验装置, 测量分两步进行. 1) 校准: 在等离子体喷流产生前, 首先测量传输线装置本身的回波损耗, 并把测量曲线全部校准为零, 人为地定

义等离子体产生前电磁波在传输线中为全反射状态. 2) 差值测量: 等离子体喷流产生后, 测量传输线装置的回波损耗, 这时网络分析仪给出的回波损耗代表了等离子体对反射电磁波的衰减.

为了验证传输线测量方案的有效性, 首先在石英玻璃管中通水, 测量水对电磁波的回波损耗. 电磁波的传输理论说明^[10] TE_{10} 波在矩形波导内传输时, 介质引起的衰减常数为 $\alpha = \omega^2 \mu \epsilon \text{tg} \delta / (2\beta)$, 其中 $\text{tg} \delta$ 为介质损耗角正切, 波传播常数 $\beta = \sqrt{k^2 + (\pi/a)^2}$, a 为波导宽边长度. 可见波导内介质引起的电磁波能量损耗随频率的增加而加大. 实验所用传输线的工作频率范围为 4—6GHz, 实际测量结果如图2所示. 图示说明, 在 4—6GHz 频率范围内, 水对电磁波都有比较大的损耗; 频率增加, 水对电磁波能量的损耗增加. 这些测试结果基本与水对电磁波的衰减特性相符合.

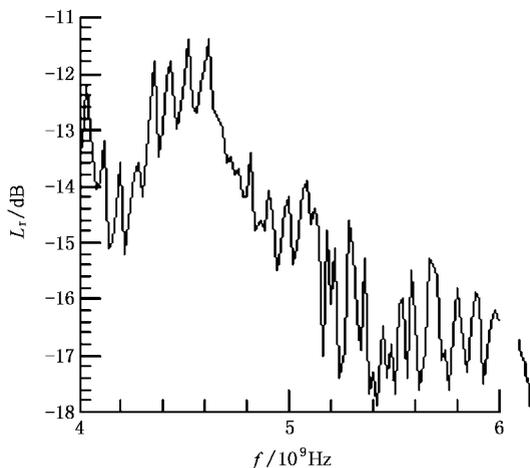


图2 水的回波损耗

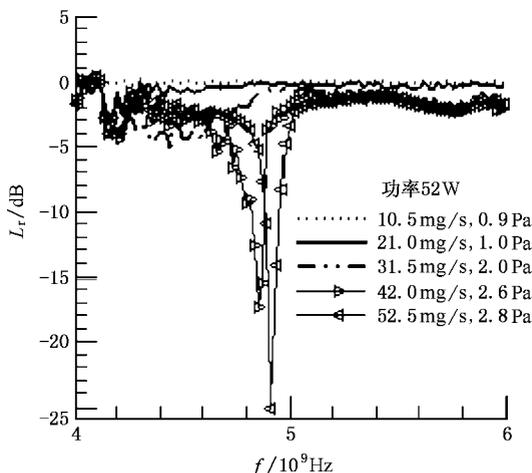


图3 不同流量等离子体的回波损耗 (≤ 52.5 mg/s)

3. 实验结果与分析

测量等离子体对电磁波的回波损耗时,以氩气为工质,电磁波频率范围为4—6GHz,固态源输出微波功率分别为46、52和59W,微波等离子体发生器气体流量分布在10.5—105mg/s范围内,真空泵机组的工作状态分为两组开启和一组开启.

3.1. 流量对实验测量结果的影响

在输出功率为52W、开启两组真空泵和不同流量条件下,测量出等离子体对电磁波的回波损耗如图3和图4所示.图示说明,流量比较小时,等离子体对反射电磁波的衰减非常低;当流量增加到42.0mg/s以上时,等离子体对反射电磁波能够产生较高的衰减.在实验中观察到现象是:当流量增加到42.0mg/s时,等离子体才能明显喷射出来,并在波导中占据一定的空间,对反射电磁波产生明显的衰减;当流量增加到52.5mg/s以上时,等离子体才能够横穿石英玻璃管或开孔波导,在波导中占据的空间范围达到最大,对反射电磁波产生较高的衰减.这些实验现象与测试结果相符合.

图示还说明,当流量为52.5mg/s时,在5GHz附近,等离子体对反射电磁波的衰减最大,为25dB.实验中观察到的现象是:当流量增加到52.5mg/s时,等离子体喷流的颜色最为明亮;以后随着流量的增加,等离子体的颜色逐渐变暗.由此可对测试结果做出的解释为:当流量为52.5mg/s时,微波等离子体发生器腔体中等离子体与微波能量的耦合状态达到最佳,气体吸收的微波能量最大,产生的等离子体中电子数密度达到最大,使喷射出来的电子数密度也达到最大.这时喷流等离子体与电磁波振荡状态在5GHz频率点上相接近,从而对反射电磁波产生最大的衰减.当流量过低或过大时,微波等离子体发生器腔体中等离子体不能与微波能量产生最佳的耦合,使喷射出的电子数密度降低,从而对反射电磁波的衰减降低.微波等离子体喷流吸收电磁波的频率范围比较窄,说明喷流中电子数密度的分布范围比较窄.

3.2. 功率对实验测量结果的影响

在开启两组真空泵、流量分别是63.0mg/s和105.0mg/s的条件下,测量出不同功率下等离子体对

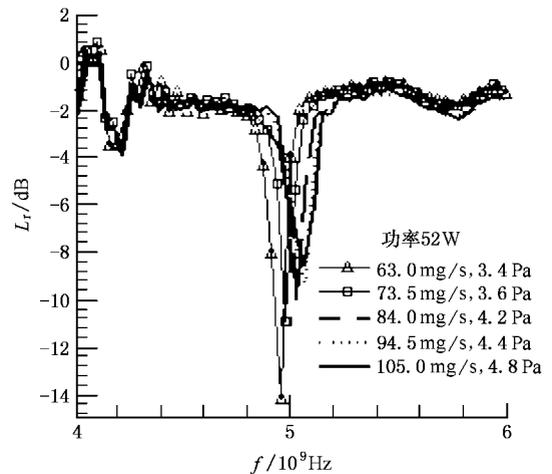


图4 不同流量等离子体的回波损耗 (>52.5mg/s)

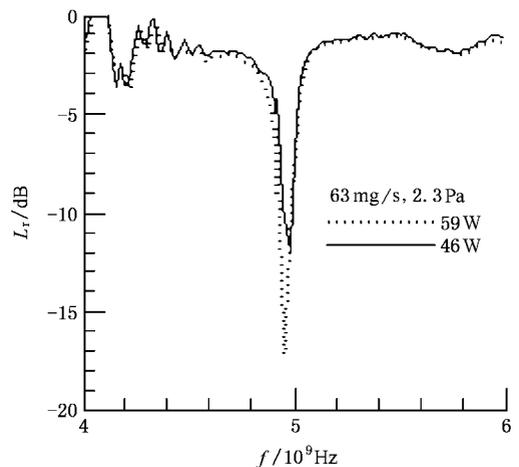


图5 不同功率等离子体的回波损耗(63.0mg/s)

电磁波的回波损耗如图5和6所示.图示说明,当流量给定时,功率增加,等离子体对反射电磁波的衰减增加.这是因为微波功率增加,等离子体能够吸收更多的能量,电子数密度增加,喷流等离子体振荡状态更加接近电磁波的振荡状态,因而等离子体对反射电磁波的衰减增加.

3.3 真空度对实验测量结果的影响

功率为59W、流量分别是52.5mg/s和73.5mg/s条件下,测量出真空泵机组不同工作状态下等离子体对电磁波的回波损耗如图7和8所示.图示说明,在功率和流量给定条件下,真空环境的压强降低,等离子体对反射电磁波的衰减增加.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,使等离子体的复

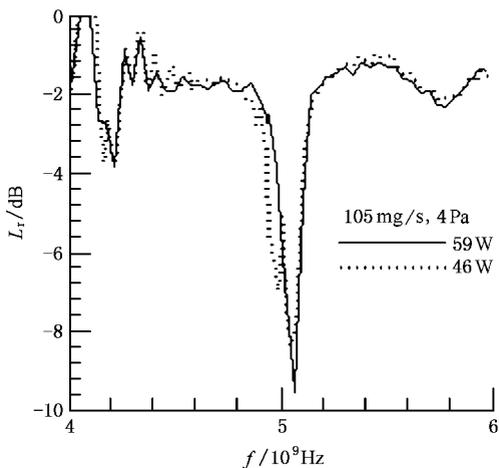


图 6 不同功率等离子体的回波损耗(105.0mg/s)

电子数密度,并有利于提高等离子体对反射电磁波的衰减.

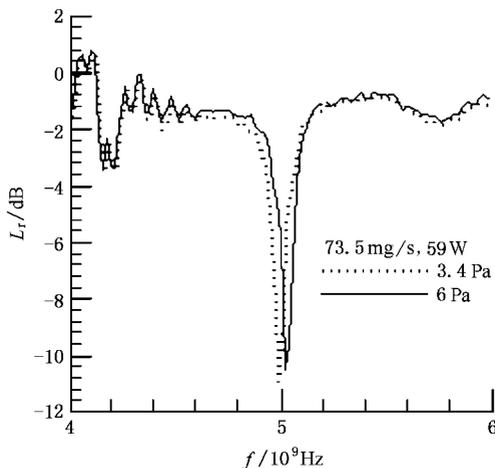


图 8 不同真空度等离子体回波损耗(73.5mg/s)

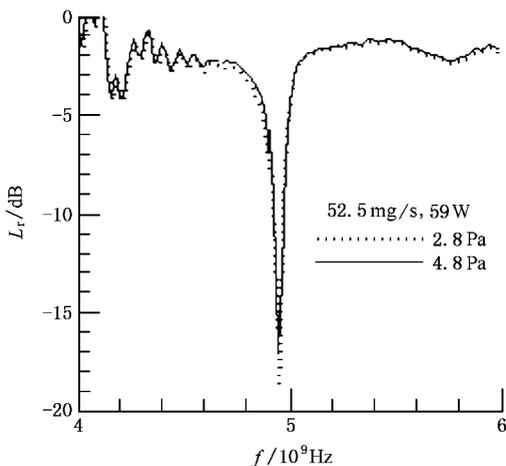


图 7 不同真空度等离子体的回波损耗(52.5mg/s)

合率降低,这种情况有利于提高等离子体喷流中的

4. 结 论

在本实验条件下,微波等离子体喷流具有显著的电磁波吸收效应.

采用传输线测量方法可以有效地测量出等离子体对电磁波的回波损耗,从而获得等离子体对反射电磁波的衰减.

在 5GHz 频率附近,利用 52W 微波功率在真空中产生的氩气等离子体喷流对反射电磁波的衰减达到最大.

提高微波功率、降低真空环境压强都能够提高等离子体喷流对反射电磁波的衰减.

[1] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 733
 [2] Laroussi M, Roth J R 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **21** 366
 [3] Bin J H, Gang W, Sh. Li L 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 1131
 [4] Cao J Z, Li J Z, Chen G R 2002 *Chinese Journal of Radio Science* **17** 125 (in Chinese) [曹建章、李景镇、陈国瑞 2002 电波科学学报 **17** 125]
 [5] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H, Liu K F, Gu C L, Pan Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1317 (in Chinese) [刘明海、胡希伟、江中和、江中和、刘克富、辜承林、潘 垣 2002 物理学报 **51** 1317]

[6] Tang D L, Sun A P, Qiu X M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1724 (in Chinese) [唐德礼、孙爱萍、邱孝明 2002 物理学报 **51** 1724]
 [7] Su W Y, Yang J, Wei K, Mao G W, He H Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3101 (in Chinese) [苏纬仪、杨 涓、魏 昆、毛根旺、何洪庆 2003 物理学报 **52** 3101]
 [8] Koretzky E, Kuo S P 1998 *Physics of Plasma* **5** 3774
 [9] Yang J, He H Q, Mao G W 2001 *Yin Shen Ji Shu* **3** 2 (in Chinese) [杨 涓、何洪庆、毛根旺 2001 隐身技术 **3** 2]
 [10] Liao C E 1995 *Foundation of Microwave Technology* (Xi 'an : Xidian University Press) (in Chinese) [廖承恩 1995 微波技术基础(西安 : 西安电子科技大学出版社)]



Experimental study on the plasma jet attenuation of reflected wave in vacuum environment^{*}

Zhu Bing Yang Juan Huang Xue-Gang Mao Gen-Wang Liu Jun-Ping

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

(Received 14 July 2005 ; revised manuscript received 14 November 2005)

Abstract

The microwave test method of transmission line can be applied to study the characteristics of wave absorption by plasma. With this method , how the parameters of microwave plasma generator , the medium being argon , and the vacuum environment affect the variation trends of plasma return loss , which imply the plasma jet attenuation of reflected electromagnetic wave , is studied in vacuum environment. Experimental results show that when the mass flow rate and output power of plasma generator are 52.5mg/s and 52W , respectively , microwave plasma jet can absorb the energy of reflected electromagnetic wave maximally at the frequency near 5GHz. With the output power increasing and the environment pressure decreasing , the wave attenuation of plasma will be increased. The plasma jet will attenuate reflected wave maximally with appropriate generator parameters.

Keywords : electromagnetic wave propagation in plasma , plasma basic properties , electromagnetic moments

PACC : 5240D , 5225 , 2110K

^{*} Project supported by the Foundation of Northwestern Polytechnic University (Grant No. Z200502).