

真空中不同极化电磁波在微波等离子体 喷流中的衰减特性实验研究^{*}

杨 涓[†] 朱 冰 毛根旺 许映乔 刘俊平

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2006 年 12 月 4 日收到, 2007 年 5 月 8 日收到修改稿)

在真空环境中, 利用空间反射电磁波测量装置, 开展微波等离子体喷流对垂直和水平极化电磁波衰减的实验研究, 分析不同极化电磁波在等离子体中衰减的影响因素. 实验结果表明: 以氩气为工质, 真空室中微波等离子体喷流对垂直和水平极化电磁波具有显著的吸收效应. 发生器流量、功率以及实验真空度对垂直极化电磁波在等离子体中的衰减影响明显. 真空度和发生器功率对水平极化电磁波没有显著影响.

关键词: 等离子体中的电磁波, 等离子体基本性质, 电磁波

PACC: 5240D, 5225, 2110K

1. 引 言

电磁波在等离子体中的衰减问题是等离子体物理学的基本问题之一, 它广泛地出现在等离子体材料处理、微波等离子体推进以及等离子体隐身等领域. 这方面的研究一直受到人们的重视. 当电磁波在等离子体中传输时, 波的极化方向以及等离子体参数的变化将影响电磁波在等离子体中的衰减特性. 影响电磁波在等离子体中衰减的参数一般有密度及其剖面、电子与中性粒子的碰撞频率. 人们对此已经开展了许多理论和数值研究^[1-8]以及实验研究^[9, 10]. 数值研究用的模型为均匀或非均匀平板型和球面型等离子体, 并假设电子密度分布服从某种数学规律. 然而实际应用中, 等离子体很难以规律的形状出现, 电子数分布难以服从某种数学规律, 也很难准确假设电子和中性粒子的碰撞频率. 如果以非规则形状的等离子体为计算模型, 研究电磁波在其中的衰减, 则需要复杂的理论与数值模拟. 这方面的研究工作还未见公开报道. 本文从实验上开展这方面的研究, 以微波击穿气体, 在真空室中形成微波等离子体喷流, 直接研究电磁波的频率、极化方向、发生器流量和微波功率以及真空度对电磁波在微波等离子体中

衰减特性的影响, 比较垂直极化电磁波和水平极化电磁波在微波等离子体喷流中的衰减特性差异.

2. 实验系统与测量方法

测量等离子体与电磁波的相互作用, 可以看成是测量一种特殊气体与电磁波的相互作用. 目前虽然还没有成熟的方法对这种相互作用进行测量, 然而可以借鉴电介质材料或吸波材料与电磁波相互作用的测量方法. 它包括空间反射电磁波和传输线方法. 根据真空室中微波等离子体喷流的特点, 这里采用空间反射电磁波测量方法.

图 1 为空间反射电磁波测量装置示意图, 由真空环境模拟实验装置、微波等离子体发生器、空间反射电磁波测量装置组成. 真空环境模拟实验装置由直径为 1.2 m、长为 3 m 的真空实验舱和两套真空机组组成. 微波等离子体发生器由固态源、腔体和储气瓶组成. 固态源把电能转换为 2.45 GHz 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横电磁谐振波, 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环境中的微波等离子体喷流. 空间反射电磁波测量装置由网络分析仪、发射和

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10575081)和航空科学基金(批准号: 2006ZA53005)资助的课题.

[†] E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

接收角锥喇叭天线、检波器、电缆与各类接头组成。

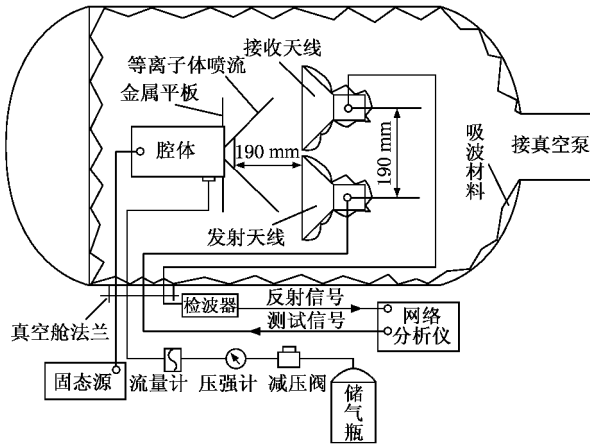


图1 空间反射电磁波测量装置示意图

实验系统待测量的参数为回波损耗 $L_r = 10 \lg(P_r/P_o)$ 其中 P_o 、 P_r 分别是测量信号输出功率和反射功率, L_r 的单位为 dB。利用空间反射电磁波法测量等离子体的回波损耗的原理如下: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发射天线,并向空中辐射,辐射波遇到腔体后端面及金属平板时被全反射,反射电磁波辐射到接收天线后再沿电缆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 。在全反射的情况下 $P_o = P_r$, $L_r = 0$ 。如果腔体后端面及金属平板前存在等离子体并能吸收通过的电磁波能量,则 $P_o > P_r$, $L_r < 0$ 。由此可见 L_r 愈小,等离子体对发射电磁波的衰减愈大。

针对图1所示的实验装置,测量分两步进行。第一步是校准:在等离子体喷流产生前,首先测量空间反射电磁波测量装置本身的回波损耗,并把测量曲线全部校准为零,人为地定义在等离子体产生前电磁波在金属板前为全反射状态。第二步是差值测量:等离子体喷流产生后,网络分析仪给出的回波损耗代表等离子体对反射电磁波的衰减,即等离子体的回波损耗。

要实现以上测量,应合理地选择天线的型号与性能,合理地设计天线之间的距离。要求发射天线、等离子体喷流、接收天线的路径长度 R 必须大于天线的近场辐射距离,即

$$R_0 \geq 2d^2/\lambda,$$

其中 d 为等离子体喷流尺寸, λ 为测试波长。天线

的安装距离也应由实验确定。经过实验测量,两天线之间距离取 100 mm 以上可以避免互耦合,该距离实际取 190 mm。待测目标还应放置在天线的感应场区之外,为此选择等离子体发生器腔体端面和天线口面之间距离为 190 mm。为了减少金属壁面引起的漫散射,以保证测试信号免受干扰,在天线背壁、真空实验舱内壁面以及天线架表面都粘贴吸波材料。

3. 实验结果及分析

实验时,固态源输出微波功率分别为 62、66 和 70 W,微波等离子体发生器以氩气为工质,流量分别为 1、2.5 和 5 L/min。真空泵机组工作状态有两组和一组泵分别工作,以产生不同的真空度环境。角锥喇叭天线的工作频率范围为 4—8 GHz,天线放置的方位不同可以形成电场方向分别与地面垂直和平行的垂直极化和水平极化电磁波。

3.1. 气体流量对电磁波衰减的影响

在微波发生器功率为 70 W、开启两组真空泵和不同气体流量条件下,测量得到的等离子体对垂直极化和水平极化电磁波的回波损耗如图2所示。从图2可以看出,当流量比较小时,等离子体对垂直极化电磁波的衰减较小,在实验频率范围内的平均值为 1—2 dB。而等离子体对水平极化电磁波有较大的衰减,在实验频率范围内的平均值为 10 dB 左右,而且衰减随着频率的增加而增加。当气体流量增加时,等离子体对垂直极化电磁波的衰减增加。当气体流量为 2.5 和 5 L/min 时,回波损耗平均值分别为 5 和 10 dB 左右。气体流量增加时等离子体对水平极化电磁波的衰减是先减少再增加,最后使垂直极化和水平极化电磁波的衰减趋于一致。

文献[5—8]指出,对于平板型和球面型等离子体,当电子密度和等离子体频率在最佳值范围内增加时,等离子体对电磁波的衰减单调增加。文献[6]对水平极化和垂直极化电磁波在金属平板前等离子体层中的反射系数进行了计算,计算结果是随着等离子体中电子密度的增加,等离子体对垂直极化电磁波的反射系数单调地降低;当电子密度增加到一个最佳值时,电磁波的反射系数降至最低,随后又随电子密度的增加而增加;而电子密度对水平极化电磁波反射系数的影响则有着比较复杂的规律。这些结论可借以解释实验规律:气体流量从 1 L/min 增加

中的衰减随气体流量增加而增加,但水平极化电磁波随气体流量的增加而出现复杂变化现象的原因.

3.2. 微波功率对不同电磁波衰减的影响

在开启两组真空泵、不同发生器功率(62,66,70 W)和不同气体流量(1,2.5,5 L/min)条件下,测量得到等离子体对垂直极化和水平极化电磁波的回波损耗如图3—图5所示.当气体流量取1和2.5 L/min这两个较小值时,等离子体对垂直极化电磁波的衰减随功率的减少而增加.最大功率(70 W)条件下,实验频率范围内最小衰减平均值为3 dB左右;最小功率(62 W)条件下,最大衰减平均值为10 dB左右.当气体流量增加到5 L/min时,等离子体对垂直极化电磁波的衰减将不再随功率的增加而变化.气体流量取1和2.5 L/min这两个较小的值时,等离子体对水平极化电磁波的衰减随功率的改变而变化不大.但是,在较大气体流量(5 L/min)和66 W功率点上出现了异常现象,这可能与实验异常有关.

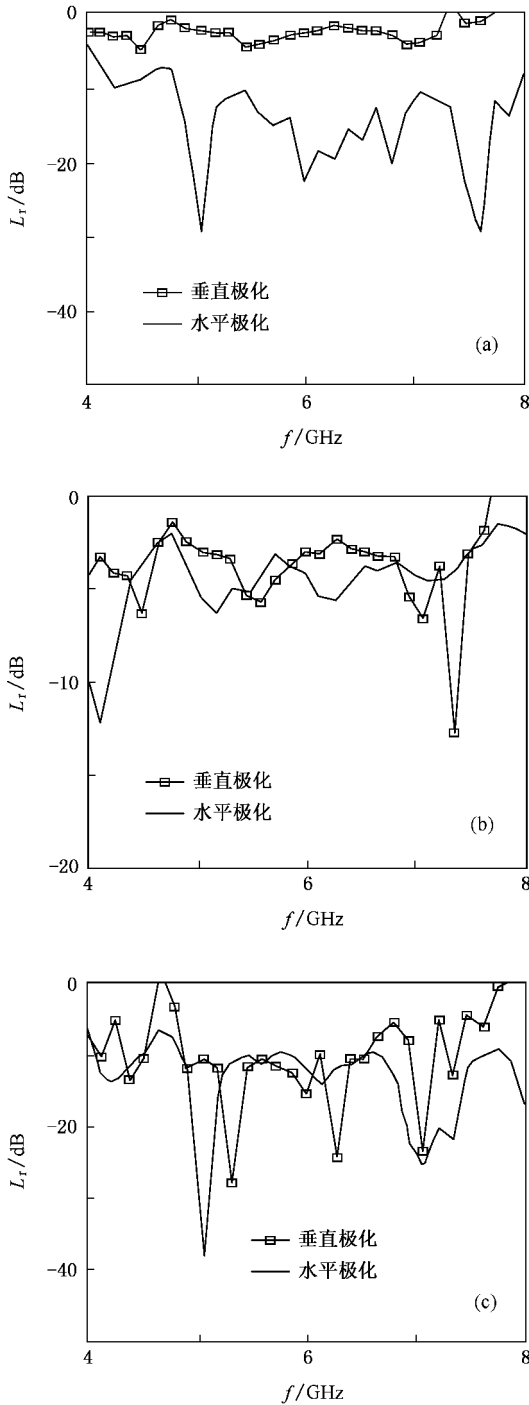


图2 当微波功率为70 W时,不同气体流量下等离子体对垂直极化和水平极化电磁波的回波损耗 (a)气体流量为1 L/min,真空度为0.1 Pa (b)气体流量为2.5 L/min,真空度为0.1 Pa (c)气体流量为5 L/min,真空度为0.6 Pa

到5 L/min,发生器腔体内有更多的气体原子被电离,从而使喷出的等离子体喷流中电子密度以及电子和中性粒子的碰撞频率逐渐增加,但是其值还达不到最佳.这也就是实验中垂直极化电磁波在等离子体

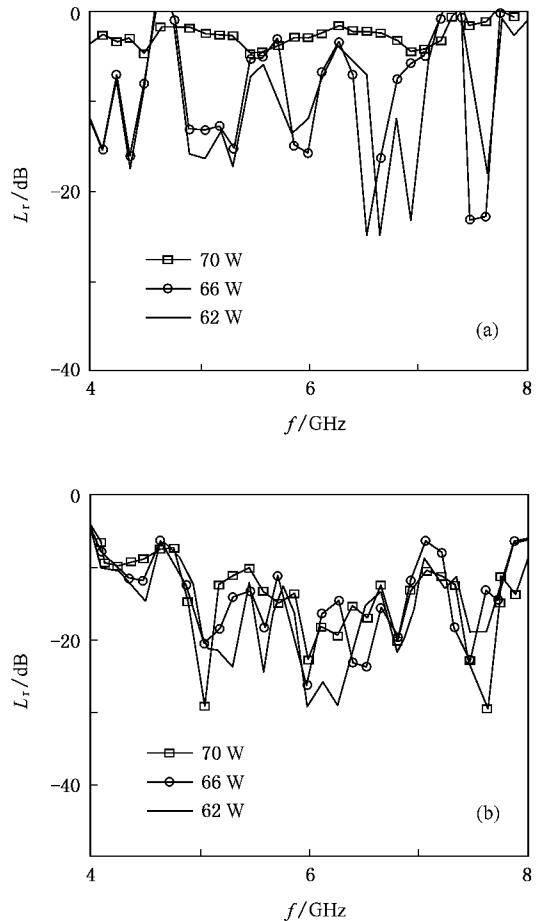


图3 气体流量为1 L/min时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

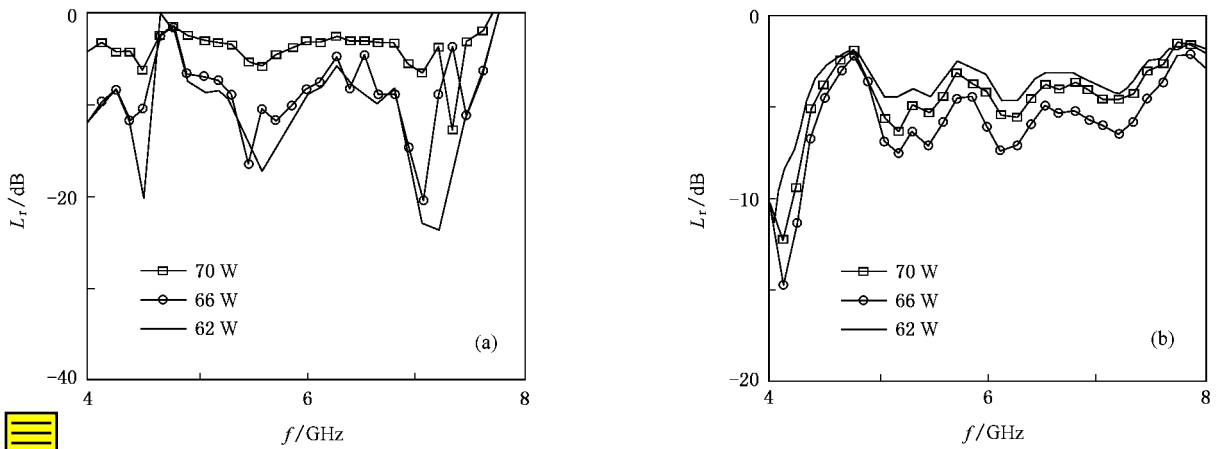


图4 气体流量为 2.5 L/min 时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

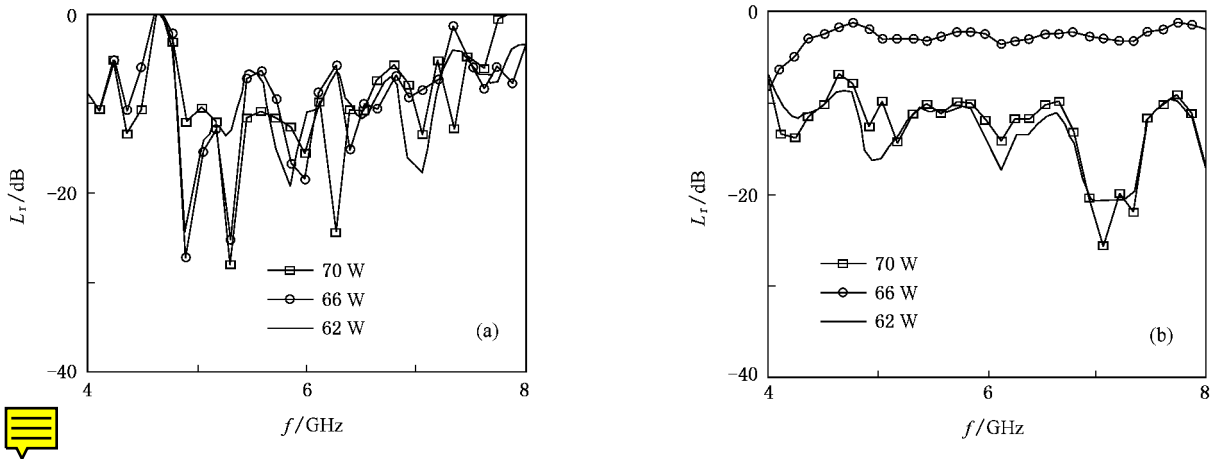


图5 气体流量为 5 L/min 时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

对实验结果的分析表明：发生器功率的提高，有可能使腔体内等离子体中电子吸收更多的微波功率，使其具有更高的能量和碰撞频率，从而使得喷流的碰撞频率相应提高。在低气体流量下，喷流中电子密度较低，等离子体对垂直极化电磁波的衰减主要受控于碰撞机制，表现出发生器功率对电磁波的衰减影响显著。在高气体流量下，喷流中电子密度较高，等离子体对垂直极化电磁波的吸收主要受控于电子在电场中的加速和能量转移，因而受发生器功率的影响较小。当气体流量一定时，发生器功率的提高导致等离子体对垂直极化电磁波衰减降低，其原因可能是电子与中性粒子碰撞频率与最佳值的偏差加大。

在实验选取的参数范围，当气体流量一定时，等离子体对水平极化电磁波的衰减没有受到微波功率明显的影响。

3.3. 真空度对不同电磁波衰减的影响

在发生器功率为 70 W、不同气体流量(1, 2.5, 5 L/min)条件下，分别开启两组和一组真空泵以研究真空度对不同极化电磁波在等离子体中衰减的影响，测量得到等离子体对垂直极化和水平极化电磁波的回波损耗如图 6—图 8 所示。当气体流量较小(1 L/min)时，等离子体对垂直极化电磁波的衰减受真空度的影响比较显著。两组和一组泵分别开启时，真空环境压强由低向高变化，在 4—6 GHz 测试频率范围内，等离子体对垂直极化电磁波的衰减由低向高变化，其差值平均约为 7 dB 左右。当气体流量为 2.5 L/min 时，在 5—7 GHz 频率范围内，两组和一组泵分别开启垂直极化电磁波衰减由低向高变化，平均值相差约 6 dB 左右。当气体流量为 5 L/min 时，在整个实验频率范围内，两组和一组泵分别开启垂直

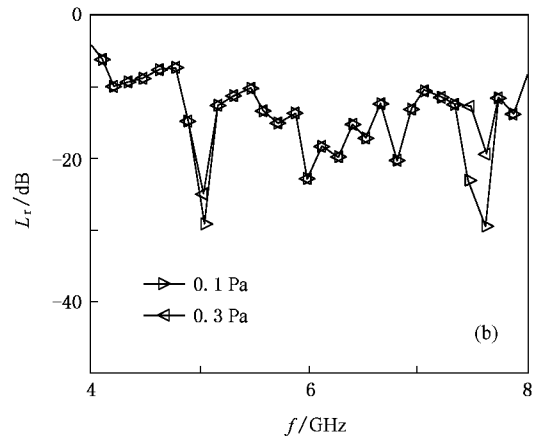
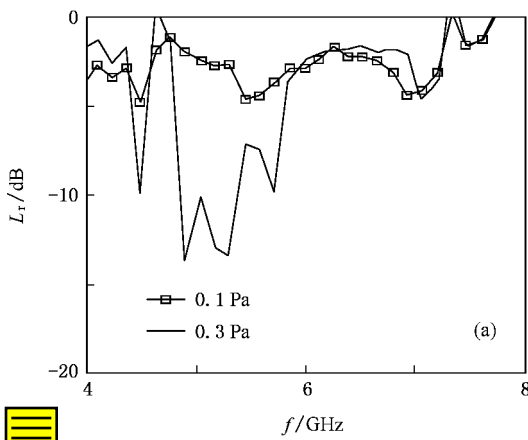


图 6 微波功率为 70 W、气体流量为 1 L/min 时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

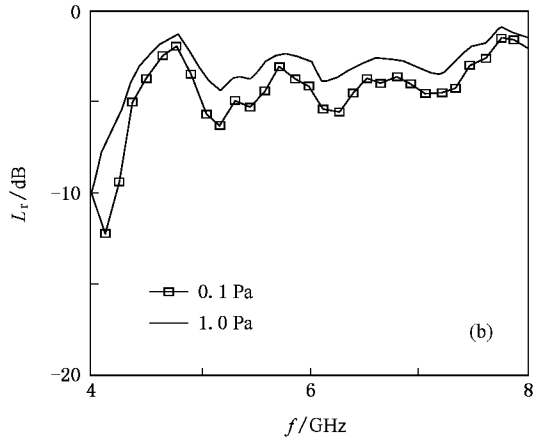
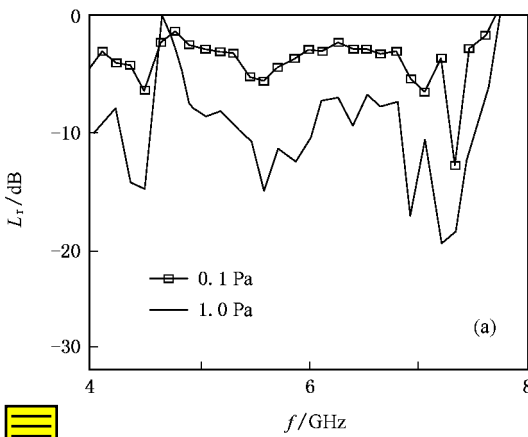


图 7 微波功率为 70 W、气体流量为 2.5 L/min 时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

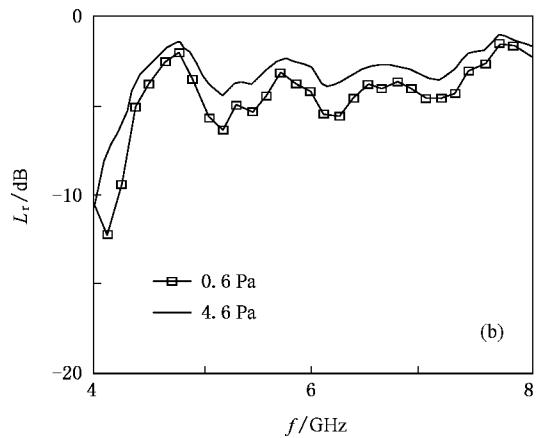
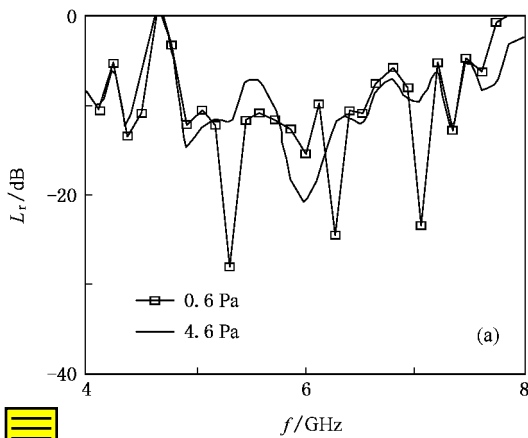


图 8 微波功率为 70 W、气体流量为 5 L/min 时等离子体对电磁波的回波损耗 (a)垂直极化 (b)水平极化

极化电磁波衰减没有明显的变化。

真空度和气体流量共同影响着等离子体的喷流参数,如压强和速度的分布,从而也影响着电子密度

以及电子和中性粒子的碰撞频率分布.当气体流量较小时,等离子体喷流比较稀薄,喷流外界环境压强的变化很容易影响到等离子体内部,从而导致其压

强的变化,引起电子密度及与中性粒子碰撞频率的变化,表现出在低流量下垂直极化电磁波在等离子体中衰减易受真空度的影响.在较高气体流量条件下,等离子体喷流压强比较高,真空度的变化不易影响到等离子体喷流内部,从而使电子密度及与中性粒子的碰撞频率受到的影响也比较小.当气体流量一定时,如果真空度比较高,则等离子体喷流中电子自由程比较长,电子与中性粒子碰撞频率较低.随着真空度的降低,电子自由程缩短、与中性粒子碰撞频率提高,使电磁波的碰撞吸收功率增加,这也就是气体流量一定、真空度降低反而使垂直极化电磁波的衰减提高的原因.

实验的真空度变化并没有引起水平极化电磁波衰减有明显的变化,说明真空度对水平极化电磁波衰减影响的敏感度较低.

4. 结 论

采用空间反射电磁波测量方法,在低辐射真空

环境中可以有效测量等离子体对电磁波的衰减.在本文的实验条件下,微波等离子体喷流对垂直极化和水平极化电磁波具有显著的吸收效应,并且受气体流量、微波功率和真空度的影响.当其他条件一定时,低流量下等离子体对垂直极化电磁波的衰减明显小于对水平极化电磁波的衰减.气体流量、微波功率和真空度对垂直极化电磁波有着明显的影响,但微波功率和真空度对水平极化电磁波的影响不显著.

发生器气体流量的增加使等离子体喷流中电子密度及与中性粒子的碰撞频率在最佳值内增加,从而加强了等离子体对垂直极化电磁波的吸收.发生器微波功率的增加导致等离子体对垂直极化电磁波的衰减降低.

当气体流量较低时,垂直极化电磁波在等离子体中的衰减易受真空度的影响;而在较高气体流量下,真空度对垂直极化电磁波衰减的影响不大.当气体流量一定时,真空度降低反而使垂直极化电磁波的衰减提高.

- [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] Wang G, Chen Y H, Lu W 2001 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **21** 160 (in Chinese) [王 炯、陈银华、陆 玮 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 160]
- [4] 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]
- [5] Sun A P, Li L Q, Qiu X M, Dong Y Y 2002 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **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]
- [6] Su W Y, Yang J, Wei K, Mao G W, He H Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3102 (in Chinese) [苏纬仪、杨 涓、魏 昆、毛根旺、何洪庆 2003 物理学报 **52** 3102]
- [7] Song F L, Cao J X, Wang G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1110 (in Chinese) [宋法伦、曹金祥、王 炯 2004 物理学报 **53** 1110]
- [8] Yuan Z C, Shi J M 2004 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **24** 157 (in Chinese) [袁忠才、时家明 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 157]
- [9] Song F L, Cao J X, Wang G, Wang Y, Zhu Y, Zhu J, Wang L, Niu T Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2147
- [10] Koretzky E, Kuo S P 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3774

Experimental study on attenuation of differently polarized wave by microwave plasma jet in vacuum^{*}

Yang Juan[†] Zhu Bing Mao Gen-Wang Xu Ying-Qiao Liu Jun-Ping

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

(Received 4 December 2006 ; revised manuscript received 8 May 2007)

Abstract

The microwave test method of space reflective wave was applied to study the attenuation characteristics of differently polarized wave scattered by microwave argon plasma jet in vacuum and its influencing factors. Experimental results show that in the 4—8 GHz frequency area of testing wave , the plasma absorbs vertically and horizontally polarized wave obviously. The mass flow rate and power of generator and the background pressure affect the attenuation of vertically polarized wave. But the power of generator and degree of vacuum almost do not affect the horizontally polarized wave attenuation.

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

PACC : 5240D , 5225 , 2110K

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

[†] E-mail : yangjuan@nwpu.edu.cn