

外加磁场微波等离子体喷流对平面 电磁波衰减的实验研究^{*}

杨 涓^{1)†} 龙春伟¹⁾ 陈茂林¹⁾ 许映桥¹⁾ 谭小群²⁾

1) 西北工业大学航天学院, 西安 710072)

2) 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

(2008 年 7 月 30 日收到, 2008 年 11 月 18 日收到修改稿)

采用空间透射波测量方法, 实验研究透波密闭石英玻璃容器内等离子体喷流对垂直和水平极化电磁波的衰减, 在有和无外加磁场条件下分析实验参数对等离子体吸波效应的影响, 分析等离子体的吸波机理. 实验结果表明在非磁和本实验条件下, 平面电磁波在等离子体中的衰减机理为碰撞吸收, 在有磁和本实验条件下, 平面电磁波在磁等离子体中的衰减机理同样为碰撞吸收, 但是外加磁场的存在有限地改善了等离子体的吸波效应. 为了使磁等离子体最有效地吸收电磁波, 应该提高磁场感应强度, 把高频混杂频率提高到测试微波频率范围内, 或降低微波测试频率至本实验中的高混杂频率附近.

关键词: 等离子体相互作用, 电磁波, 电磁波在等离子体中的传输

PACC: 5240, 2110K

1. 引 言

理论计算和实验研究表明在一定的条件下等离子体对电磁波有明显地衰减作用^[1-11], 会导致电磁波信号减弱乃至消失, 这一特性使人们关注等离子体应用于飞行器隐身的可行性研究. 等离子体在磁化状态下与入射电磁波的相互作用比非磁化时更加复杂, 存在着电子回旋共振和高混杂共振吸收模式, 控制好磁场感应强度及其方向和等离子体参数, 能够增强等离子体对电磁波的衰减. 为此, 国外有人从理论和实验两方面探讨了电磁波在磁化等离子体中的传输特性^[5, 6], 国内对此也开展过理论分析与数值计算^[7-9]. 文献 [9] 从数值上研究了电磁波在均匀磁化等离子体中传播时的吸收、反射和衰减, 认为不同磁场强度可以显著改变等离子体对不同频率电磁波的吸收和反射特性. 当电磁波频率接近等离子体高混杂频率时, 磁化等离子体将对该波产生强的共振吸收. 本文在前期非磁化微波等离子体吸波效应实验研究的基础上^[4], 采用空间透射波法, 开展外加磁场条件下的微波等离子体喷流吸波效应实验研究,

研究本实验条件下控制等离子体吸波效应的机理, 从而分析本实验方案能否改善等离子体的吸波效应.

2. 实验装置

测量等离子体和电磁波的相互作用时, 可以把等离子体看成是一种特殊的气态电介质, 因而可以借鉴电介质材料与电磁波相互作用的空间透射波测量方法来研究电磁波在等离子体中的衰减情况. 空间透射波实验装置如图 1 所示, 由石英玻璃真空密封容器、微波等离子体发生器、标量网络分析仪 Anritsu54147A、角锥微波发射和接收天线、吸波材料和真空泵等组成. 其中标量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, 其测试频率分布在 20 MHz—20 GHz 范围内. 实验选用了两套角锥喇叭天线, 一套天线的工作频率范围为 4—6 GHz, 一套天线的工作频率范围为 6—8 GHz, 其增益都为 15 dB, 功率辐射宽度都小于 40°. 为了消除天线辐射出口面积不同给测量带来的误差, 两套天线的辐射出口面积都选为 200 mm × 200 mm. 实验时

^{*} 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.

[†] E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

微波等离子体喷流从发生器腔体喷入到石英玻璃容器中,形成真空中的微波等离子体喷流.网络分析仪发射出一定频率范围、功率为 P_0 的电磁波测试信号进入发射天线,并辐射向等离子体,透射过等离子体后功率为 P_1 的电磁波再通过检波器被检波成电流信号进入到网络分析仪.网络分析仪对输出电磁波和输入检波信号的能量进行对比运算后,就可给出等离子体对电磁波的衰减量 $A = -10\log(P_1/P_0)$ (dB).在全透射的情况下 $P_0 = P_1$, $A = 0$,实验测量的 A 愈大,等离子体对电磁波的衰减量愈大.

实验测量分两步进行.第一步校准:在等离子体喷流产生前,对整体实验测量装置进行衰减测量,并把测量曲线全部校准为零,人为地定义电磁波传输为无衰减状态.第二步差值测量:等离子体喷流产生后,以校准曲线为基础,网络分析仪便会给出等离子体对入射电磁波的衰减曲线.

外加磁场微波等离子体发生器在同轴型微波等离子体发生器腔体的基础上形成^[10].实验中采取两种内导体方案,一是完整的黄铜内导体方案,产生非磁微波等离子体.二是采用软磁合金、永磁材料、黄铜形成的如图 2 所示组合内导体方案,同时在发生器外导体端面镶嵌永磁材料环,从而在石英密封真空容器内形成外加磁场微波等离子体喷流.图 2 磁路结构具有轴对称特征,因而磁场也具有轴对称结构.利用高斯仪测出磁环以外的磁场感应强度分布如图 3 所示,在磁环外表面 10 mm 以内存在 0.1 T 以上较强磁场,45 mm 以外磁场感应强度几乎衰减为 0.图 4 为磁路的有限元数值计算结果,在发生器轴线附近,磁场方向接近于轴向,在远离轴线区,磁

场方向偏离于轴向,具有较强的径向磁场分量.

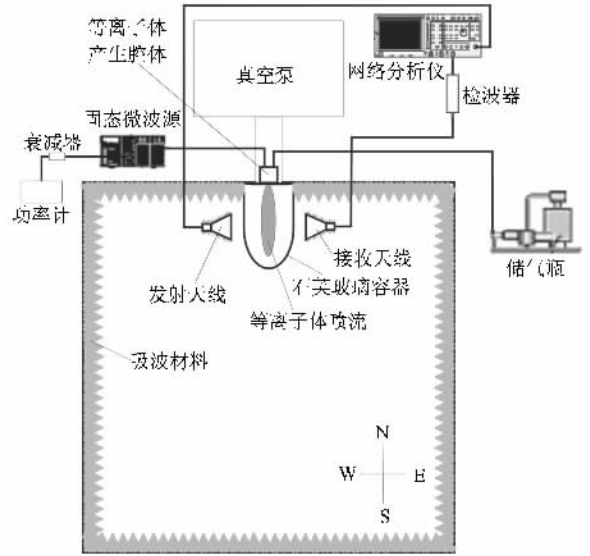


图 1 空间透射波测量装置示意图

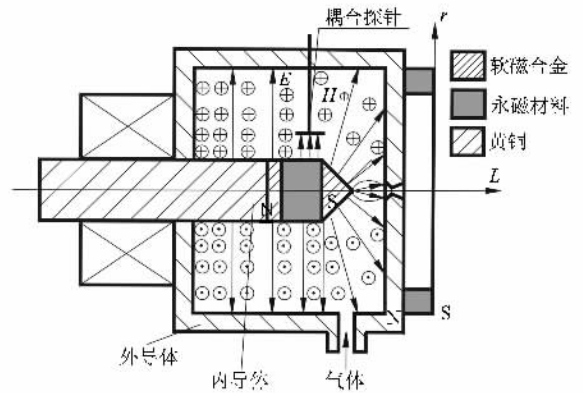


图 2 等离子体发生器磁路模型

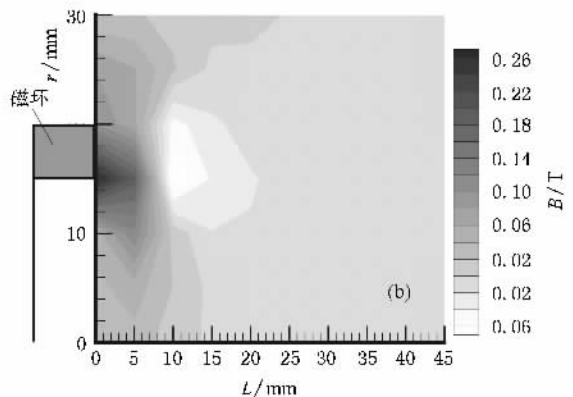
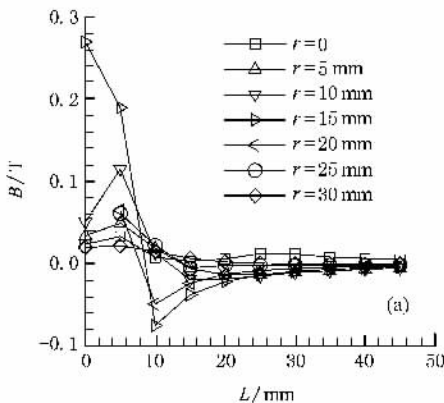


图 3 等离子体发生器磁路测量结果 (a)不同半径处磁感应强度沿轴线的变化 (b)磁环外磁感应强度等值线图

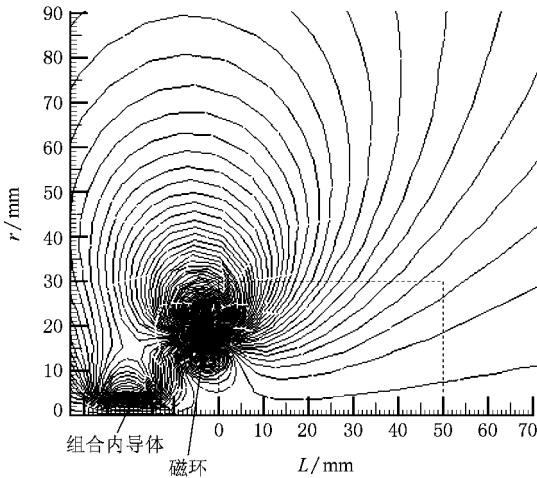


图 4 发生器磁路有限元数值计算结果

3. 实验结果与分析

实验时以氩气为工质,微波等离子体发生器的输出功率依次取 43, 61, 74 W, 流量依次取 52.5, 73.5, 94.5 mg/s, 分别采用磁体组和内导体和完整黄铜内导体方案以形成有外加和没有外加磁场下的真空微波等离子体喷流, 研究在微波功率、不同工质流量条件下, 外加磁场对等离子体吸波效应的影响。

实验初期选用两套角锥喇叭天线, 一套低频天线的工作频率范围为 4—6 GHz, 一套高频天线的工作频率范围为 6—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。在不同气体流量、微波功率为 43 W 条件下, 采用两套天线分别测量无外加磁场时微波等离子体喷流对垂直和水平极化电磁波的衰减量, 结果表明两套天线的测量结果变化趋势相同, 因而在以后的实验中, 为了保证实验条件相同, 采用一套低频角锥喇叭天线进行实验测量。

3.1. 等离子体对垂直极化电磁波的吸收效应

图 5、6 分别为不同微波功率、不同流量条件下等离子体喷流对垂直极化电磁波的衰减量。从图中可以看出, 对于完整黄铜内导体方案, 当流量为 52.5 mg/s, 功率从 41 W 增加至 74 W 时, 等离子体对 4—8 GHz 电磁波的平均衰减从 3 dB 增加到 7 dB 左右; 功率为 61 W、流量从 73.5 mg/s 增加至 94.5 mg/s 时, 等离子体对电磁波的平均衰减变化不大。对于磁

体组和内导体, 在相同的实验条件下, 等离子体对电磁波的衰减有明显的增加, 图 5 显示的最大增加量达到 4 dB 左右, 图 6 显示的最大增加量达到 5 dB 左右。

文献 [11] 计算了 0.1—8 GHz 频率范围内的平面电磁波在 $f_p = 0.1—8$ GHz (等离子体频率) $\nu_m = 0.1, 0.5, 1, 5, 10$ GHz (等离子体碰撞频率) 的非磁化等离子体中的传输衰减系数, 结果显示无论碰撞频率取何值, 在等离子体频率附近, 由于电磁波频率与等离子体频率接近而发生共振, 这时等离子体对电磁波的衰减量达到最大。但是随着电磁波频率远离等离子体频率, 电磁波在等离子体中的衰减量逐渐降低, 等离子体频率和碰撞频率增加都使平面电磁波在等离子体中的衰减量增加。

文献 [12] 采用 Langmuir/发射探针诊断了玻璃容器内非磁微波等离子体喷流的电子密度, 在几乎相同的条件下诊断出电子密度分布在 $0.9 \times 10^{16}—5 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 范围内, 与此相对应的等离子体频率为 0.85—2.0 GHz; 当流量从 52.5 mg/s 增加到 94.5 mg/s 时, 容器内压强从 1 Pa 增加到 10 Pa, 因而在整个实验过程中等离子体中电子的碰撞频率低于 0.2 GHz, 远小于等离子体频率。由此可以对图 5、6 进行解释, 实验采用的 4—8 GHz 电磁波频率大于等离子体频率和碰撞频率, 因而本实验无法获得共振吸收点。图 5、6 显示出 1) 随着入射波频率的增加, 电磁波在等离子体中的衰减量降低; 2) 随着气体流量的增加, 容器内气体压强增加, 导致电子的碰撞频率增加, 因而使平面电磁波在等离子体中的衰减量增加; 3) 气体击穿微波功率增加, 使腔体内气体电离度增加, 喷流等离子体频率增加, 使平面电磁波在等离子体中的衰减量增加。这些实验结果和文献 [11] 的理论计算分析相一致, 碰撞吸收是等离子体的吸波机理之一。

在磁体组合内导体发生器实验方案中, 垂直极化电磁波在等离子体中的传输相当于电磁波传播方向和外磁场垂直, 且波的电场方向与等离子体发生器腔体轴线方向垂直, 同时和磁场的轴向分量垂直, 和磁场的径向分量平行, 前者形成了非寻常波, 后者形成了寻常波。对于寻常波, 带电粒子在静电振荡中的运动方向与磁场平行, 磁场对它没有影响。对于非寻常波, 波的色散关系为

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega^2 - \omega_p^2)}{\omega^2(\omega^2 - \omega_h^2)},$$

式中 $\omega_h^2 = \omega_p^2 + \omega_{ce}^2$ 称为高混杂频率, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数. 可以看出电磁波频率为高混杂波频率 ω_h 时, 波数 k 趋于无穷大, 波长趋于 0, 表明产生共振, 此时等离子体对电磁波的吸收最大, 称为高混杂共振吸收. 文献 9 计算了在非寻常波条件下, 等离子体对非寻常电磁波的衰减, 结果表明当等离子体碰撞频率比较低时, 在高混杂频率处, 等离子体对电磁波存在共振吸收峰. 对于本实验, 如图 3 所示, 磁体组合内导体等离子体发生器腔体外 10 mm 左右磁场感应强度约是 0.075 T, 而在腔体 14 mm 以外 45 mm 以内, 磁场感应强度很快从 0.04 T 衰减到 0.002 T, 该范围磁感应强度对应的电子回旋频率分布在 1.1—

0.056 GHz. 文献 12 采用 Langmuir/发射探针诊断了玻璃容器内磁体材料组和内导体发生器形成的喷流等离子体电子密度, 在几乎相同的条件下诊断出电子密度分布在 $1.0 \times 10^{16}—1.5 \times 10^{17}/m^3$ 范围内, 与此相对应的等离子体频率为 0.9—3.5 GHz, 而且等离子体中电子的碰撞频率依然低于 0.2 GHz. 由此可以得出高混杂频率分布在 0.9—3.6 GHz 范围, 因而从理论上讲本实验的组合内导体方案无法产生高混杂共振吸收和等离子体共振吸收现象, 仅仅是碰撞吸收控制着等离子体的吸波机理. 但是图 5, 6 显示磁场存在条件下出现了共振吸收现象, 这有可能是实验误差导致.

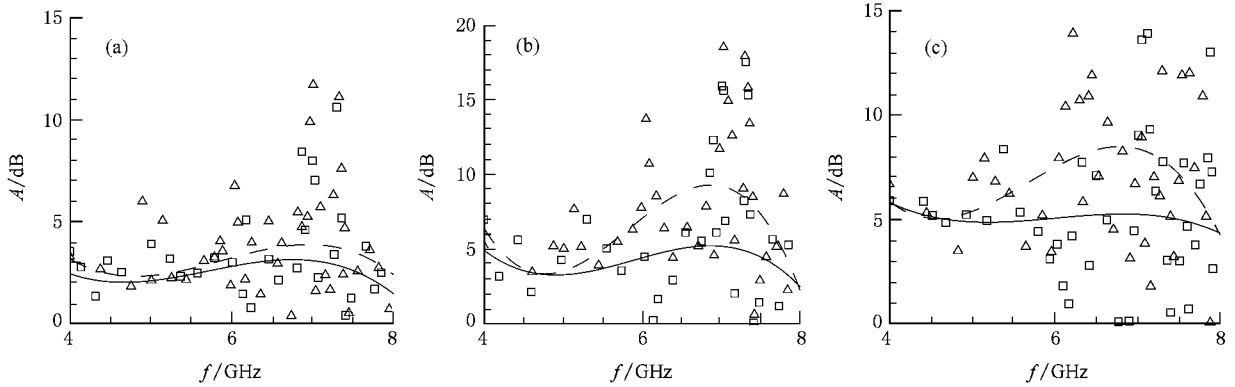


图 5 不同功率下磁与非磁等离子体对垂直极化电磁波的衰减 (\triangle , \square 分别表示磁与非磁) (a) 流量 52.5 mg/s, 功率 43 W 时衰减量 (b) 流量 52.5 mg/s, 功率 61 W 时衰减量 (c) 流量 52.5 mg/s, 功率 74 W 时衰减量

3.2. 等离子体对水平极化电磁波的吸收效应

图 7, 8 为不同微波功率、不同流量条件下等离子体对水平极化电磁波的衰减量. 图示显示, 对于完整黄铜内导体, 当流量为 52.5 mg/s, 功率从 41 W 增加至 74 W 时, 等离子体对 4—8 GHz 电磁波的平均衰减从 2 dB 增加到 7 dB 左右; 功率为 61 W、流量从 73.5 mg/s 增加至 94.5 mg/s 时, 等离子体对电磁波的平均衰减变化不大. 对于磁体组和内导体, 在相同的实验条件下, 等离子体对电磁波的衰减有明显的增加, 图 7(c) 显示在 4 GHz 左右最大增加量达到 10 dB 左右.

图 7, 8 给出的黄铜内导体方案实验规律和图 5, 6 相同, 说明在本实验条件下不存在等离子体的共振吸收, 等离子体对电磁波的衰减量随频率增加而增加, 这和文献 11 的理论计算得出的物理规律是一致的, 因而在本实验条件下碰撞吸收控制着等

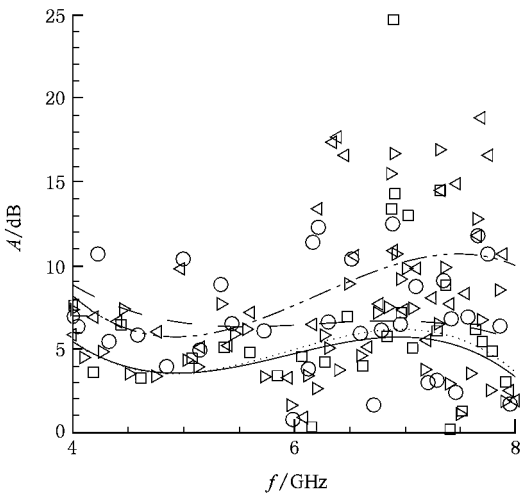


图 6 不同流量条件下磁化与非磁化等离子体对垂直极化电磁波的衰减 (功率 61 W 时衰减量; \circ , \square 为流量 75.5 mg/s 下磁与非磁; \triangle , ∇ 为流量 94.5 mg/s 下磁与非磁)

离子体的吸波机理.

在磁体组合内导体实验方案中,水平极化电磁波在等离子体中传输时,波传播方向和磁场垂直,且波的电场方向与等离子体发生器腔体轴线平行,同时和磁场的轴向分量平行,和磁场的径向分量垂直,前者形成寻常波,后者形成非寻常波.因而控制本实验条件下磁等离子体对水平极化电磁波衰减的机理和垂直极化电磁波完全相同,即可能存在高混杂共

振吸收和碰撞吸收.由于本实验未在高混杂共振吸收条件下进行,因而也难以观察到高混杂共振吸收现象.但是实验结果表明磁体组和内导体方案却能使电磁波的衰减提高 10 dB 左右,这主要是由于磁场的存在,改善了微波等离子体发生器内部的工作条件,增加了气体电离度,从而提高了等离子体喷流中电子密度,提高了等离子体频率和碰撞频率,从而提高了平面电磁波在等离子体中的衰减量.

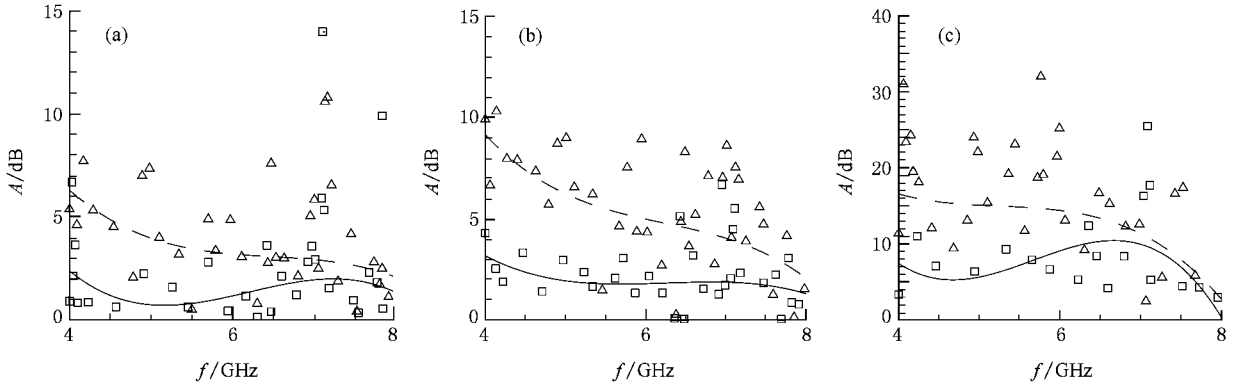


图 7 不同功率下磁与非磁等离子体对水平极化电磁波的衰减(图注同图 5) (a)流量 52.5 mg/s,功率 43 W 时衰减量 (b)流量 52.5 mg/s,功率 61 W 时衰减量 (c)流量 52.5 mg/s,功率 74 W 时衰减量

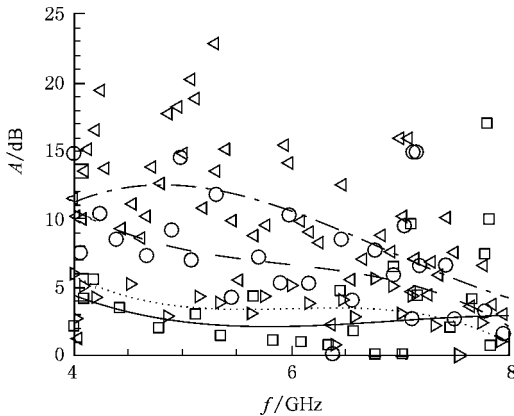


图 8 不同流量条件下磁与非磁等离子体对水平极化电磁波的衰减(图注同图 6)

4. 结 论

本实验采用永磁材料改造微波等离子体发生器腔体结构,形成二维轴对称外加磁场方案,研究该条件下真空中的微波等离子体喷流对 4—8 GHz 垂直

和水平极化电磁波的衰减效应,分析气体击穿微波功率、流量、外加磁场对等离子体吸波效应的影响,分析控制等离子体吸收平面电磁波的机理.

在非磁实验条件下,测量得到了垂直和水平极化电磁波在等离子体中的衰减量.实验参数分析表明在本实验条件下,平面电磁波在等离子体中的衰减机理为碰撞吸收,而非共振吸收.为了获得共振吸收机理,改善等离子体对平面电磁波的吸收效应,必须把微波频率降低到等离子体频率附近.

在有磁实验条件下,测量得到了垂直和水平极化电磁波在等离子体中的衰减量.实验参数分析表明:在本实验条件下,平面电磁波在磁等离子体中的衰减机理为碰撞吸收.为了改善磁等离子体对电磁波的吸收效应,一方面应该提高磁场感应强度,把高频混杂频率提高到测试微波频率范围内;另一方面应该降低微波测试频率至本实验中的高混杂频率附近.

实验研究等离子体对电磁波的共振吸收机理和高混杂共振吸收机理是下一步的研究工作,将在以后的文章报道.

- [1] Song F L , Cao J X , Wang G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1110(in Chinese) [宋法伦、曹金祥、王 舸 2004 物理学报 **53** 1110]
- [2] Zhao H K , Lu J P , 2004 *J. of Beijing Institute of Technology* **24** 350(in Chinese) [赵宏康、陆建萍 2004 北京理工大学学报 **24** 350]
- [3] Yang J , Zhu B , Mao G W , Xu Y Q , Liu J P . 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7120(in Chinese) [杨涓、朱冰、毛根旺、许映乔、刘俊平 2007 物理学报 **56** 7120]
- [4] Zhu B , Yang J , Huang X G , Mao G W , Liu J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2352(in Chinese) [朱冰、杨涓、黄雪刚、毛根旺、刘俊平 2006 物理学报 **55** 2352]
- [5] Laroussi M , Member , Reece Roth. J 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **21** 366
- [6] Laroussi M 1995 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **16** 2069
- [7] Sun A P , Tong H H , Shen L R , Tang D L , Qiu X M 2001 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **21** 224(in Chinese) [孙爱萍、董洪辉、沈丽如、唐德礼、邱孝明 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 224]
- [8] Yang J , Zhu L M , Su W Y , Mao G W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3236(in Chinese) [杨涓、朱良明、苏维仪、毛根旺 2005 物理学报 **54** 3236]
- [9] 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]
- [10] Yang J , Xu Y Q , Zhu B , Mao G W , Zhu L M 2007 *Phys. Plasmas* **14** 093508
- [11] 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]
- [12] Yang J , Xu Y Q , Meng Z Q , Yang T L 2008 *Phys. Plasmas* **15** 023503

Experimental study on the effect of applied magnetic field on plane wave attenuation by microwave plasma plume^{*}

Yang Juan^{1)†} Long Chun-Wei¹⁾ Chen Mao-Lin¹⁾ Xu Ying-Qiao¹⁾ Tan Xiao-Qun²⁾

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

2) *School of Mechatronics , Northwestern Polytechnic University , Xi 'an 710072 , China)*

(Received 30 July 2008 ; revised manuscript received 18 November 2008)

Abstract

The effect of applied magnetic field on the plane wave attenuation by microwave plasma plume inside a closed and evacuated quartz vessel is studied through spatially propagating wave method. The objective is to analyze how the operating parameters affect the wave attenuation in plasma and to find the mechanism which controls the interaction between plasma and plane wave. The experimental results show that under the present experimental condition and in the cases without and with applied field , collisions are the reason leading to plane wave attenuation in the plasma. Plasma resonance absorption and upper hybrid resonant absorption mechanisms can not be found. To increase the plane wave attenuation in magnetized plasma , magnetic flux density should be set to make the wave test frequency and upper hybrid frequency identical.

Keywords : plasma interactions , electromagnetic moments , electromagnetic wave propagation in plasma

PACC : 5240 , 2110K

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

[†] Corresponding author. E-mail : yangjuan@nwpu.edu.cn