

S—Ka 频段电磁波在等离子体中传输特性的实验研究

马昊军 王国林 罗杰 刘丽萍 潘德贤 张军 邢英丽 唐飞

Experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in S--Ka band in plasma

Ma Hao-Jun Wang Guo-Lin Luo Jie Liu Li-Ping Pan De-Xian Zhang Jun Xing Ying-Li Tang Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 025201 (2018) DOI: 10.7498/aps.20170845

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20170845>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[介质阻挡放电中同心圆环斑图的产生机理](#)

Formation mechanism of concentric-ring pattern in dielectric barrier discharge

物理学报.2015, 64(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.245202>

[高功率微波土壤击穿的数值验证研究](#)

Numerical validation study of high power microwave soil breakdown

物理学报.2015, 64(4): 045203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045203>

[高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究](#)

Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifier fiber lasers

物理学报.2014, 63(8): 085202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085202>

[基于高斯型脉冲的非线性 Ramsey 干涉](#)

Nonlinear Ramsey interference with Gaussian pulse

物理学报.2013, 62(22): 225202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225202>

[一类扰动发展方程近似解](#)

Approximate solution for a class of the disturbed evolution equation

物理学报.2012, 61(15): 155202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155202>

S—Ka频段电磁波在等离子体中传输特性的实验研究*

马昊军[†] 王国林 罗杰 刘丽萍 潘德贤 张军 邢英丽 唐飞

(中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 绵阳 621000)

(2017年4月17日收到; 2017年8月21日收到修改稿)

在感应耦合等离子体风洞上开展了等离子体中电磁波传输特性实验研究, 获得了不同频率电磁波在等离子体中的传输衰减. 通过微波诊断技术, 获得了等离子体射流的电子数密度和碰撞频率. 通过矢量网络分析仪和标准增益天线组成的电磁波传输特性测试系统, 获得了电磁波经过等离子体之后的衰减, 研究了电子数密度范围 $7.0 \times 10^{10}—1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、等离子体碰撞频率在 10^9 Hz 量级的等离子体对 2.6—40 GHz 不同频率电磁波传输特性的影响, 分析了经典传输理论和薄层理论预测结果与实验结果的差异. 该实验工作为等离子体中电磁波传输特性的理论研究和数值仿真提供了基础数据.

关键词: 等离子体, 电磁波, 传输特性, 通信中断

PACS: 52.35.Mw, 52.40.Db, 52.40.Kh, 52.50.Qt

DOI: 10.7498/aps.67.20170845

1 引言

高超声速飞行器在大气层中飞行时, 飞行器与大气强烈作用, 在飞行器头部形成弓形脱体激波, 波后气体温度、压强急剧升高, 使大气离解、电离, 在飞行器周围形成等离子体鞘套, 这种非均匀、碰撞、弱电离等离子体对电磁波信号的衰减作用很强, 以致出现飞行器与地面测控系统的通信中断现象, 即所谓的“黑障”^[1].

针对再入飞行器通信“黑障”问题, 国内外学者开展了大量的研究. 美国国家航空航天局(NASA)于20世纪60年代开展了RAM (radio attenuation measurement) 系列飞行试验为代表的多种飞行测试, 对再入飞行器的等离子体鞘套特性及电磁波信号衰减进行了测量^[2-4]. 针对通信中断问题, 国外学者开展了大量的研究, 提出了以下减缓方式: 磁窗通信^[5-9]、亲电子物质添加^[10-12]、电场和磁场复合驱动^[13,14]、气动外形修正及改变电磁波频率

等多种手段.

近年来, 随着我国新型高超声速飞行器研制工作的开展, 等离子体鞘套引起的通信中断问题受到了广泛的重视. 国内, 中国空气动力研究与发展中心马平等^[15]在激波管中开展了电磁波传输特性实验研究; 于哲峰等^[16,17]研究了薄层等离子体和磁窗天线对电磁波传输的影响. 电子科技大学郑灵等^[18]开展了35 GHz和96 GHz电磁波在等离子体中的传输特性理论和实验研究; 邢晓俊等^[19]设计了永磁体和螺旋天线一体式磁窗天线, 研究了等离子体中磁窗天线的性能; 马春光等^[20]开展了毫米波在柱状等离子体中的衰减特性研究. 西安电子科技大学谢楷等^[21]研究了L和S频段电磁波在等离子体中的衰减特性; 高平等^[22]研究了等离子体对GPS信号载噪比的影响; 杨敏等^[23]研究了信号在时变等离子体中的传播特性. 国内的研究人员借助各类等离子体产生装置, 在开展实验工作的同时, 开展了大量的理论分析和数值计算工作.

电磁波在等离子体内的传播特性与等离子体

* 国家自然科学基金(批准号: 11472002)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: mahaojun82@163.com

的电子密度、碰撞频率以及电磁波频率有关. 开展等离子体中电磁波传输特性研究, 分析电磁波传输特性与等离子体参数的关系, 是研究黑障问题的基础. 本文利用感应耦合等离子体风洞产生的等离子体射流, 开展了电磁波在等离子体中的传输特性实验研究, 测试了不同参数的等离子体对不同频率电磁波的传输衰减作用, 并与理论预测结果进行了比较.

2 实验设备

感应耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 风洞能够提供纯净的、长时间稳定运行的高焓等离子体射流, 被广泛应用于高超声速飞行器耐热材料性能实验研究、高温气体物理化学特性实验研究、等离子体中电磁波传输特性研究^[24]等方面. 感应耦合等离子体风洞的原理如图1所示, 气体介质通过旋向进气装置进入石英管, 载有高频电流的感应线圈缠绕在石英管上形成感应放电室, 在石英管内部产生交变的电磁场并产生次生电流, 在欧姆加热的作用下气体被加热至很高的温度, 通过过渡段和喷管进入真空试验段, 从而形成等离子体射流. 根据气体介质的不同, 可以产生不同气氛的等离子体射流, 例如空气、氩气、氮气、二氧化碳等.

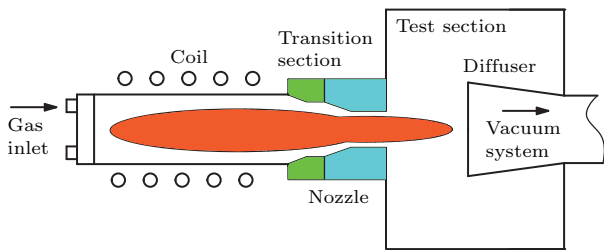


图1 感应耦合等离子体风洞示意图

Fig. 1. Inductive coupled plasma wind tunnel.

相比于激波管产生的等离子体^[15], 感应耦合等离子体风洞产生的空气等离子体持续时间更长(3000 s以上), 等离子体射流更加稳定, 有利于电磁波传输特性实验测试的开展; 相比于辉光放电装置^[21], 感应耦合等离子体射流的电子数密度范围更宽(10^{10} — $10^{13}/\text{cm}^3$), 碰撞频率更高(10^9 — 10^{10} Hz), 更接近于飞行器进入黑障时的等离子体鞘套参数.

为了产生不同形状和参数的等离子体射流, 风洞的喷管分为轴对称喷管和矩形喷管, 其中矩形喷管用于产生一定参数的薄片状等离子体射流. 本研究中首先采用过渡段将轴对称等离子体射流转换为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 正方形截面的等离子体射流, 之后转接入口截面尺寸为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 、出口截面尺寸为 $50\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的矩形喷管, 从而形成厚度为 50 mm (即电磁波传输方向)的片状等离子体射流, 如图2所示.

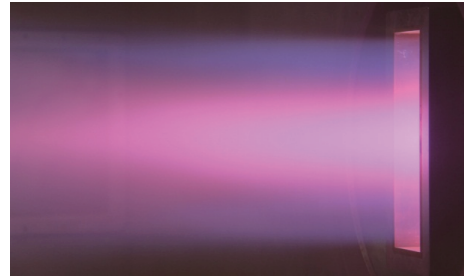


图2 矩形喷管等离子体射流

Fig. 2. Plasma jet of rectangular nozzle.

3 等离子体参数诊断

电磁波在等离子体中传播时, 其复传输常数是等离子体频率、碰撞频率和电磁波频率的函数, 复传输 k 常数的虚部和实部分别为电磁波传输的衰减常数 α_p 和相位常数 β_p , 可表示为

$$k = \beta_p + j\alpha_p, \quad (1)$$

其中

$$\alpha_p = \frac{\omega}{c} \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2 \omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

$$\beta_p = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2 \omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

式中, c 为光速, ω 为电磁波频率, ω_p 为等离子体频率, ν 为等离子体碰撞频率, 以上频率均为角频率.

根据(2)和(3)式,可推导出等离子体碰撞频率和等离子体频率可分别表示为^[25]:

$$\nu = 2 \left(\frac{c^2}{\omega} \right) \left[\frac{\alpha_p \beta_p}{1 - \frac{c^2}{\omega^2} (\beta_p^2 - \alpha_p^2)} \right], \quad (4)$$

$$\omega_p = \left\{ \left[1 - \frac{c^2}{\omega^2} (\beta_p^2 - \alpha_p^2) \right] \left[\omega^2 + 4 \left(\frac{c^4}{\omega^2} \right) \times \left(\frac{\alpha_p \beta_p}{1 - \frac{c^2}{\omega^2} (\beta_p^2 - \alpha_p^2)} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

等离子体频率与等离子体电子密度相关,即

$$\omega_p = 2\pi \times 8.98 \times 10^3 \sqrt{n_e}. \quad (6)$$

电磁波穿过厚度为 l 的等离子体,相对于无等离子体时,其幅值和相位发生变化.当 $\omega \gg \omega_p$ 时,可忽略等离子体对电磁波的反射作用,只考虑等离子体对电磁波的吸收作用,可以得到以下关系:

$$A = A_0 e^{\int_0^l (\alpha_0 - \alpha_p) dx}, \quad (7)$$

$$\Delta\varphi = \int_0^l (\beta_0 - \beta_p) dx, \quad (8)$$

式中,下标0代表自由空间的值,下标p代表等离子体中的值,空气中 $\alpha_0 \approx 0$; A_0 为电磁波的初始幅值, A 为电磁波经过等离子体后的幅值; $\Delta\varphi$ 为相位变化.

本研究中采用矢量网络分析仪、微波天线和相应的同轴电缆,建立了等离子体微波诊断系统,获得一定频率的电磁波经过等离子体后的幅值衰减和相位变化.将实际情况简化为一维均匀等离子体,根据(7)和(8)式得到等离子体中电磁波传输的衰减常数 α_p 和相位常数 β_p ,代入(4)–(6)式,得到电磁波传输路径上等离子体的平均碰撞频率和平均电子数密度(其中碰撞频率的单位为rad/s,需进一步转换为常用单位Hz).测试中,为了满足 $\omega \gg \omega_p$,尽可能采用频率较高的波段.为了减小电磁波在试验段内部多径传输和反射的影响,发射天线和接收天线采用点聚焦透镜天线或者笔形波束高增益天线,天线周围的试验段金属壁面粘贴吸波材料.

4 实验方法

利用高性能矢量网络分析仪分别接上发射天线和接收天线,根据测试的频段范围,采用频率相

匹配的天线,测试一定的等离子体射流条件下,等离子体对不同频段电磁波的衰减作用,测试系统的布置如图3所示.

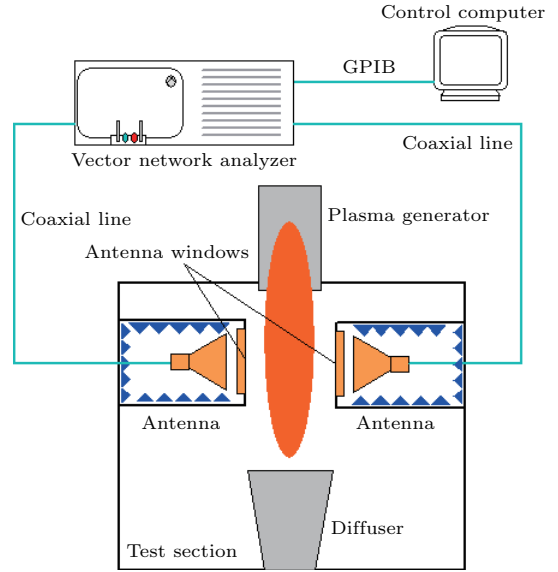


图3 实验布置示意图

Fig. 3. Diagram of experimental setup.

设无等离子体时的入射波功率为 P_i ,有等离子体时透射信号和反射信号的功率分别为 P_t 和 P_r ,则透射信号和反射信号的增益分别为:

$$G_t = 10 \lg(P_t/P_i), \quad (9)$$

$$G_r = 10 \lg(P_r/P_i). \quad (10)$$

则电磁波在等离子体中传输时,等离子体的吸收引起的信号衰减为^[15]

$$S = G_t - 10 \lg(1 - 10^{|G_r|/10}). \quad (11)$$

测量前,先对测量系统进行校准,认为无等离子体射流时系统无反射信号.当有等离子体射流时,由于其对电磁波的衰减和反射作用, G_t 和 G_r 的值分别减小和增大,根据(11)式获得等离子体吸收引起的电磁波衰减.为了避免天线旁瓣绕过等离子体,对测试结果造成影响,接收天线和发射天线分别放置在等离子体射流两侧的水冷天线舱内部,天线舱内壁面黏贴吸波材料,天线舱前端开口并设置耐高温天线窗材料,如图3所示.

在等离子体射流稳定的条件下,矢量网络分析仪采用扫频工作模式,测试微波天线有效工作波段的电磁波衰减.由于风洞实验状态完全由电源电压和进气流量等运行参数控制,在保证运行参数不变的条件下,风洞产生的等离子体射流参数不变,因

此在保持风洞运行参数不变的条件下, 不同的车次采用不同频段的微波天线校准并测试; 通过多个车次的测量, 获得相同等离子体射流条件下多个不同

波段的电磁波衰减. 本文采用的多组微波天线由西安恒达微波技术开发有限公司研制, 具体参数如表 1 所列.

表 1 标准增益天线参数
Table 1. Parameters of standard gain horn antenna.

型号	频率范围/GHz	增益/dB	波束/(°)	波导
HD-32SGAH10N	2.60—3.95	10	55	BJ32
HD-48SGAH10N	3.94—5.99	10	55	BJ48
HD-70SGAH10N	5.38—8.17	10	55	BJ70
HD-100SGAH15S	8.20—12.40	15	30	BJ100
HD-140SGAH20S	11.9—18.0	20	18	BJ140
HD-220SGAH25 K	17.6—26.7	25	10	BJ220
HD-320SGAH25 K	26.5—40.0	25	10	BJ320

为了保证测试系统具有一定的衰减阈值, 而不发生接收信号的截止, 实验前在图 3 所示的测试链路中加入标准可调衰减器, 对测试系统各个波段的衰减阈值进行了标定, 确定测试过程中等离子体导致的电磁波衰减低于测试系统的阈值, 保证测试结果的可靠性.

以上发生通信中断现象, 电子数密度为 $10^{10}/\text{cm}^3$ 量级时, 整个测试波段均不发生通信中断; 电子数密度为 $10^{11}/\text{cm}^3$ 量级时, 6.5 GHz 以下发生通信中断; 电子数密度为 $10^{12}/\text{cm}^3$ 量级时, 19.6 GHz 以下发生通信中断; 电子数密度为 $10^{13}/\text{cm}^3$ 量级时, 39.6 GHz 以下发生通信中断.

5 结果与讨论

5.1 实验结果

本研究中, 通过调节风洞电源系统的电压和等离子体发生器进气流量, 产生不同参数的等离子体射流. 通过微波测试, 获得了 $50 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 喷管等离子体射流的电子数密度和碰撞频率, 典型的实验状态和等离子体射流参数如表 2 所列.

表 2 实验结果
Table 2. Table of experimental results.

电源电压/kV	进气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	电子密度/ cm^3	碰撞频率/Hz
4.0	10	7.0×10^{10}	1.5×10^9
5.0	10	5.0×10^{11}	1.6×10^9
8.0	15	3.5×10^{12}	2.0×10^9
11.0	20	1.0×10^{13}	9.0×10^9

表 2 中各个实验状态下, 2.6—40 GHz 范围内的电磁波传输衰减如图 4 所示 (本文图中的衰减量均取绝对值). 从图中可见: 随着等离子体射流电子数密度的升高, 电磁波衰减增大, 发生明显衰减现象的频段增宽; 如果设定电磁波衰减 20 dB

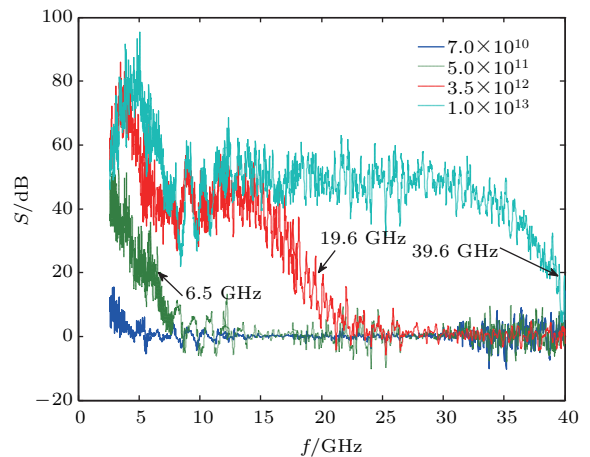


图 4 电磁波传输衰减随频率的变化

Fig. 4. Attenuations of microwave vs. microwave frequency.

实验过程中同时监测了等离子体对电磁波的反射作用, 在本文的等离子体参数范围内, 等离子体对电磁波的反射信号相对于传输信号很小, 可以忽略. 前三个实验状态下, 等离子体电子数密度差异达到一个量级, 但碰撞频率变化较小, 主要是因为等离子体碰撞频率与等离子体宏观温度和压力相关. 以上实验状态下, 风洞流场核心区的温度变

化较小,且进气流量接近的条件下等离子体射流的静压差异较小,因此等离子体碰撞频率变化较小.风洞运行在更高的进气流量条件下,喷管射流等离子体的碰撞频率可达 10^{10} Hz量级.

5.2 实验结果分析

5.2.1 经典传输理论

通常认为,当等离子体厚度远大于电磁波波长时,微波的传输特性与平面波理论结果符合较好,这也是等离子体微波诊断技术的基础.根据平面波传输理论和Wenzel-Kramers-Brillouin (WKB)近似,当忽略等离子体引起的电磁波反射时,电磁波在非磁化各向同性等离子体中传播距离 l 的衰减量(单位为dB)为^[16]

$$S = -8.68 \operatorname{Im} \left(\int_0^l k(x) dx \right) \approx -8.68 \alpha_p l. \quad (12)$$

5.2.2 薄层传输理论

20世纪50年代,在研究地球电离层与电磁波的相互作用时发现:当电磁波波长与弱电等离子体厚度相近时,等离子体对电磁波的反射特性实验

结果与平面波理论预测结果差异较大,因此提出了解释这种差异的薄层反射理论^[26],由该理论引申得到的薄层传输理论得到了激波管等离子体中电磁波传输实验结果的支持^[27].薄层传输理论认为:当电磁波波长与等离子体厚度相近时,等离子体引起的电磁波传输衰减应按下式计算^[15,16,21,26]:

$$S = 20 \lg \left[\frac{1 + (\nu/\omega)^2}{[\pi \cdot (l/\lambda) \cdot (\omega_p/\omega) + \nu/\omega]^2 + 1} \right], \quad (13)$$

式中, λ 为电磁波波长.本研究中,电磁波段为2.6—40 GHz,波长为11.54—0.75 cm,因此在整个频谱上,电磁波波长与等离子体厚度接近(即电磁波波长不满足远小于等离子体厚度的平面波假设),与薄层理论的假设比较符合.

分别采用上述理论,对表2中各个实验状态下的电磁波传输衰减进行了理论计算.理论计算中等离子体厚度的设定与微波诊断中的路径长度一致,均为5 cm;等离子体参数以微波测试得到的结果为准.理论计算结果与实验结果的比较如图5(a)—(d)所示,图中横坐标为电磁波的频率,纵坐标为衰减量的绝对值, f_ν 表示等离子体的碰撞频率, f_p 表示等离子体频率.

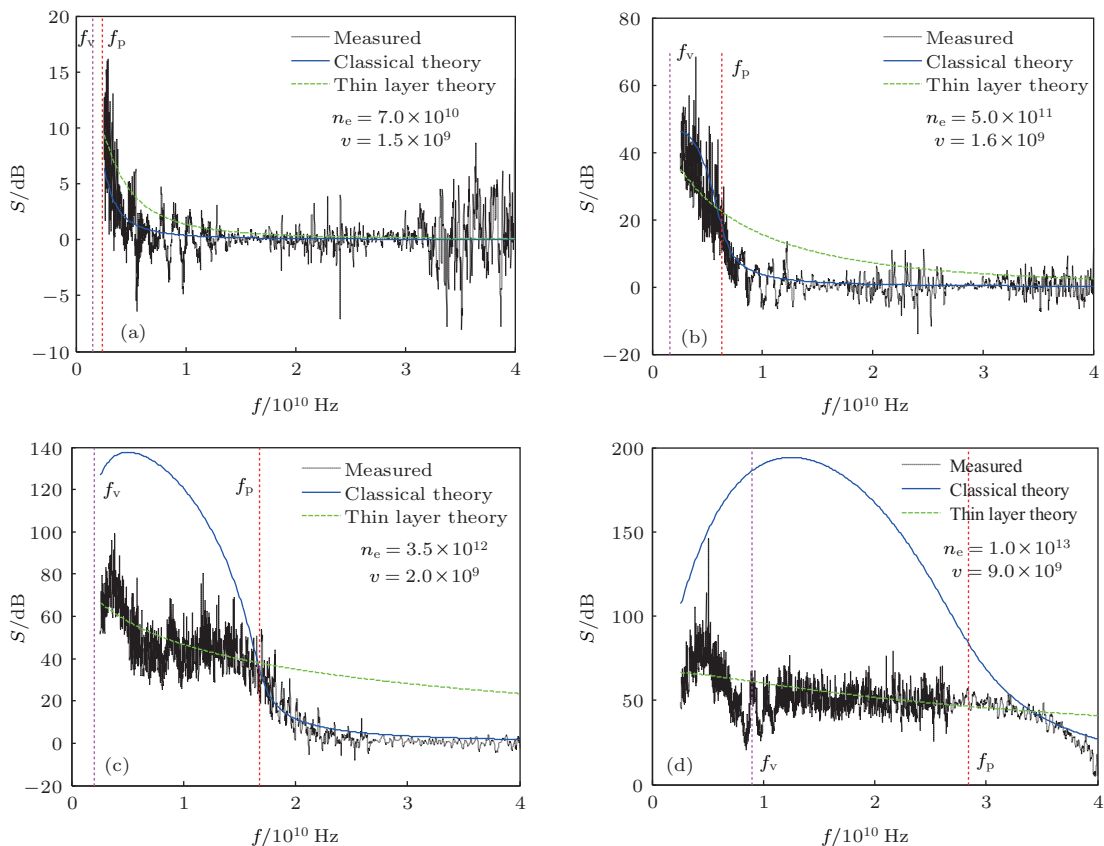


图5 理论预测结果与实验结果的比较
Fig. 5. Theory result vs. experimental result.

由图 5 可见, 电子数密度在 $10^{10}/\text{cm}^3$ 量级时, 等离子体频率和等离子体碰撞频率均低于电磁波频率, 电磁波经过等离子体的衰减很低, 经典理论与薄层理论预测结果和实验结果相近, 且在整个频谱上经典理论的预测结果与实验结果更符合; 随着电子数密度的增加, 理论预测结果与实验测试结果的差异逐渐增大; 在本文的等离子体参数范围内, 当电磁波频率小于等离子体频率时, 薄层理论预测结果与实验结果更符合, 当电磁波频率大于等离子体频率时, 经典理论预测结果与实验结果更符合.

本文的结果是在等离子体碰撞频率较低且变化较小的状态下得到的, 因此这里不讨论碰撞频率对电磁波传输衰减的影响. 由图 5(c) 和图 5(d) 可见, 当电磁波频率在等离子体碰撞频率附近时, 测试曲线出现较大的变化, 薄层理论的预测结果比经典理论更符合实验结果, 但仍然存在较大差异. 这是因为低频电磁波多径绕射严重而引起的测试误差, 还是其他因素导致的, 有待进一步的验证. 根据现有理论, 初步认为这是由于在低频段, 传统的 WKB 近似已经不适应(电磁波的波长大于等离子体的特征长度), 必须用全波解的方法才能揭示其物理内涵; 如果从天线波导出发, 对天线的辐射场分布和电磁传输进行全波计算, 可以进一步对实验结果进行分析. 因此, 以上理论分析有待进一步完善.

6 结 论

在感应耦合等离子体风洞上开展了等离子体参数诊断工作, 采用微波诊断方法, 对不同电子数密度量级的等离子体流场参数进行了测试. 采用矢量网络分析仪和多组微波天线组成的测试系统, 获得了一定参数的等离子体对 2.6—40 GHz 整个频谱上电磁波的传输衰减作用, 采用经典传输理论和薄层理论对实验结果进行了初步的分析. 为了提高等离子体诊断的可靠性, 下一步将开展等离子体参数的双探针诊断工作, 并采用时域有限差分法数值计算的方法^[28]对实验结果进行进一步的分析.

参考文献

- [1] Rybak J P, Churchill R J 1971 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **7** 879
- [2] Jones W L, Cross A E 1972 *The Entry Plasma Sheath and its Effect on Space Vehicle Electromagnetic Systems* (Washington D C: NASA, NASA SP-252) p109
- [3] Grantham W L 1970 NASA TN-D-6062, L-7107
- [4] Swift C T, Beck F B, Thomson J, Castellow S L J 1971 *NASA Special Publication* **252** 137
- [5] Hodara H 1961 *Proc. IRE* **49** 1825
- [6] Manning R M 2009 NASA TM-2009-216096, E-17149
- [7] Thoma C, Rose D V, Miller C L, Clark R E, Hughes T P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 1825
- [8] Starkey R 2003 *34th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference* Orlando, Florida, June 23–26, 2003 AIAA 2003-4167
- [9] Usui H, Matsumoto H, Yamashita F, Yamane M, Tanaka S 1998 *Spacecraft Charging Tech.* **1** 107
- [10] Rosen G 1962 *Phys. Fluids* **5** 737
- [11] Russo F P, Schroeder L C 1968 NASA TM X-1521
- [12] Hartunian R, Stewart G, Curtiss T, Ferguson S, Seibold R, Shome P 2007 *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit* Hilton Head, South Carolina, August 20–23, 2007 AIAA 2007-6633
- [13] Keidar M, Kim M, Boyd I D 2008 *J. Spacecr. Rockets* **45** 445
- [14] Kim M, Keidar M, Boyd I D 2009 *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting* Orlando, Florida, Jan., 2009 AIAA 2009-1232
- [15] Ma P, Zeng X J, Shi A H, Bu S Q, Yu Z F 2010 *J. Exper. Fluid Mech.* **24** 51 (in Chinese) [马平, 曾学军, 石安华, 部邵清, 于哲峰 2010 实验流体力学 **24** 51]
- [16] Yu Z F, Ma P, Zhang Z C, Liang S C, Shi A H, Huang J 2013 *J. Exp. Fluid Mech.* **27** 60 (in Chinese) [于哲峰, 马平, 张志成, 梁世昌, 石安华, 黄洁 2013 实验流体力学 **27** 60]
- [17] Yu Z F, Liu J Q, Ren A M, Zhang S J, Ma P, Shi A H 2011 *J. Astronaut.* **32** 1564 (in Chinese) [于哲峰, 刘佳琪, 任爱民, 张生俊, 马平, 石安华 2011 宇航学报 **32** 1564]
- [18] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z, Huang C, Xing X J, Zhang C Y, Chen X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖 2012 物理学报 **61** 155203]
- [19] Xing X J, Zhao Q, Zheng L, Tang J M, Chen Y X, Liu S Z 2013 *High Power Laser Part. Beam* **25** 1965 (in Chinese) [邢晓俊, 赵青, 郑灵, 唐剑明, 陈禹旭, 刘述章 2013 强激光与粒子束 **25** 1965]
- [20] Ma C G, Zhao Q, Luo X G, He G, Zheng L, Liu J W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055201 (in Chinese) [马春光, 赵青, 罗先刚, 何果, 郑灵, 刘建卫 2011 物理学报 **60** 055201]
- [21] Xie K, Li X P, Yang M, Shi L, Liu D L 2013 *J. Astronaut.* **34** 1166 (in Chinese) [谢楷, 李小平, 杨敏, 石磊, 刘东林 2013 宇航学报 **34** 1166]
- [22] Gao P, Li X P, Xie K, Liu Y M, Shi L 2015 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **36** 633 (in Chinese) [高平, 李小平, 谢楷, 刘彦明, 石磊 2015 航空学报 **36** 633]
- [23] Yang M, Li X P, Liu Y M, Shi L, Xie K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明, 石磊, 谢楷 2014 物理学报 **63** 085201]

- [24] ITO T, Ishida K, Mizuno M, Sumi T, Matsuzaki T, Nagai J, Murata H 2003 *12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies* Norfolk, Virginia, 15–19 December, 2003 AIAA 2003-7023
- [25] Luo S, Scharer J E, Thiyagarajan M, Mark D 2006 , *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2637
- [26] Poeverlein H 1958 *J. Atmosphere and Terrestrial Phys.* **12** 126
- [27] Rudderow W H 1975 *A Study of Electromagnetic Wave Interactions with Air Plasmas* (Texas: Defense Technical Information Center) ADA-016449
- [28] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H, Zhang S, Lan C 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 1661

Experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in S–Ka band in plasma*

Ma Hao-Jun[†] Wang Guo-Lin Luo Jie Liu Li-Ping Pan De-Xian Zhang Jun
Xing Ying-Li Tang Fei

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(Received 17 April 2017; revised manuscript received 21 August 2017)

Abstract

When hypersonic vehicle flies in the atmosphere at a high altitude with a high speed, plasma sheath is generated around the vehicle, and thus attenuating the electromagnetic wave signals and even interrupting the communication. Therefore the control, guidance, and navigation of hypersonic vehicle can be affected seriously by the plasma sheath. It is necessary to study this problem in reasonable ground experiment.

The inductively coupled plasma (ICP) wind tunnel is an ideal equipment for studying electromagnetic transmission characteristics in plasma because it can produce uncontaminated plasma and the electrode cannot be ablated in the process of plasma production. We carry out the experiment in ICP wind tunnel. A thin slice of plasma jet is generated by a rectangular nozzle with an outlet size of 50 mm × 250 mm. Plasma jets with different parameters are obtained by adjusting the operating power and inlet flow of the wind tunnel. Four kinds of states are provided with the electron densities of 7.0×10^{10} , 5.0×10^{11} , 3.5×10^{12} and $1.0 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, and the collision frequencies of 1.5×10^9 , 1.6×10^9 , 2.0×10^9 and 9.0×10^9 Hz, respectively.

The amplitude attenuations and phase changes of the electromagnetic waves are measured with microwave diagnostics system consisting of a vector network analyzer and high gain antennas. And electron density and collision frequency of plasma are obtained according to the transmission characteristics of electromagnetic waves in plasma.

The attenuations of the electromagnetic wave in plasmas of different states are measured via microwave transmission system which is composed of a vector network analyzer and pairs of horn antennas covering a frequency range of 2.6–40 GHz. The results show that both the amplitude attenuation and attenuation band increase with the increase of electron density. The classical theory and thin layer theory are used to simulate the transmission attenuation. The results are compared with the experimental ones. The results in this paper provide basic data for further theoretical and numerical study of electromagnetic wave transmission characteristics in plasma.

Keywords: plasma, electromagnetic wave, transmission characteristic, communication break

PACS: 52.35.Mw, 52.40.Db, 52.40.Kh, 52.50.Qt

DOI: 10.7498/aps.67.20170845

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11472002).

† Corresponding author. E-mail: mahaojun82@163.com