

高温激波管中电波传输特性的实验研究

康国剑 竺乃宜 余西龙 胡新天 黄立舜 黄天翔

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京市北四环西路 15 号, 100190)

摘要: 本文从工程应用角度, 介绍了在 $\Phi 800\text{mm}$ 的大型激波管中进行微波传输特性实验研究的情况。实验测试了在碰撞频率较高, 等离子体厚度较大的条件下, 微波频率为 10GHz 和 14.6GHz 时的传输特性, 并对比了实验结果与理论计算。结果表明: 当等离子体厚度 Z 比电磁波工作波长 λ 大 10 倍以上, 而且流场中的碰撞频率 ν 比较大时, 电波穿过等离子体后的衰减与均匀无限大等离子体中电波传输理论所计算的结果相一致。

关键字: 微波, 激波管, 等离子体

0 引言

上一个世纪, 在无线电通讯中, 通过对电离层观测实验总结, 对于电磁波在无限大、均匀、无磁场等离子体中传输的问题, 已经有了比较成熟的理论计算模型。但是实际工程中所遇到的都是有限厚度的(厚度与电磁波长同量级)、非均匀的等离子体。例如: 飞行器重返大气层时, 由于飞行器周围高温、高速气流形成的等离子鞘套, 使得电磁波受到很大的衰减甚至不能通过, 因而会造成飞行器与地面之间的通讯中断, 这已是一个非常突出的问题。前人已经做过相关的实验并且定性的得出了一定的结论, 但是由于受实验条件的限制很难定量说明问题, 因而对于实际的工程应用遇到很大的阻碍。本文实验主要就是定量研究理论计算公式的适用范围。第一阶段实验结果表明, 当等离子体厚度 Z 比电磁波工作波长 λ 大 10 倍以上, 而且流场中的碰撞频率 ν 比较大时, 电波穿过等离子体后的衰减与均匀无限大等离子体中电波传输理论所计算的结果相一致(我们的理论计算由邬润辉高级工程师应用 FDTD 方法所得)。

1 基本原理

假设等离子体层包括同等数量的正离子和自由电子, 同时还有一定数量的中性粒子, 带电粒子

之间保持一个平均的平衡距离, 而这个距离取决于他们所处的静电场。如果其中的某个粒子脱离了它的平衡位置而其它的粒子仍然保持位置不变。那个分离的粒子就要围绕它的平衡位置做振动, 简谐振动的回复力由周围带电粒子产生的静电场提供。同时, 振动粒子与中性粒子的碰撞构成了这个振动的阻尼。振动粒子的震动频率就是电离层中自由电荷的固有频率。电子的固有频率 ω_p 由下式决定:

$$\omega_p = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2} \quad (1)$$

其中 n_e 是单位体积的电子数, $-e$ 是电子的电荷量, m_e 是电子的质量, ϵ_0 是自由空间的介电常数。

对于微波穿过等离子体的衰减, 按照一个频率为 ω 的平面电磁波在无限大的介质中传播:

$$A = A_0 e^{(j\omega t - \tilde{\gamma} \cdot Z)} \quad (2)$$

其中传输常数

$$\tilde{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

α 为衰减系数, β 为相位系数, Z 为等离子体厚度。

$$\alpha = \chi \frac{\omega}{c} \quad (4)$$

$$\beta = \mu \frac{\omega}{c} \quad (5)$$

其中 μ, χ 分别为

$$\mu = \operatorname{Re}(\tilde{k}^{1/2}) = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

$$\chi = -\operatorname{Im}(\tilde{k}^{1/2}) = \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (7)$$

其中 $\tilde{k}^{1/2} = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) - j \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)$, ω_p 为电子的固有频率, ν 为等离子体中的电子的碰撞频率。

$$\nu = \left(\frac{8KT}{\pi m_e} \right)^{1/2} (N_i \cdot Q_{ei} + N_n \cdot Q_{en}) \quad (8)$$

Q_{ei}, Q_{en} 分别为电子与离子和中性粒子的碰撞截

面。 N_i, N_n 分别为离子和中性粒子数密度。

衰减系数 α 的表达式为:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

当 $\nu^2 \ll \omega^2, \omega_p^2 \ll \omega^2$ 时, 公式 (9) 可以简化成:

$$\alpha = \frac{\omega}{2c} \left[\left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \cdot \frac{\nu}{\omega} / \sqrt{1 - \omega_p^2/\omega^2} \right] = \frac{\nu}{2c} \left[\frac{n_e}{n_{ec}} / \sqrt{1 - n_e/n_{ec}} \right] \quad (10)$$

其中 $n_{ec} = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$ 为微波的截止密度, n_e 为等离子体中的电子密度。

2 实验装置

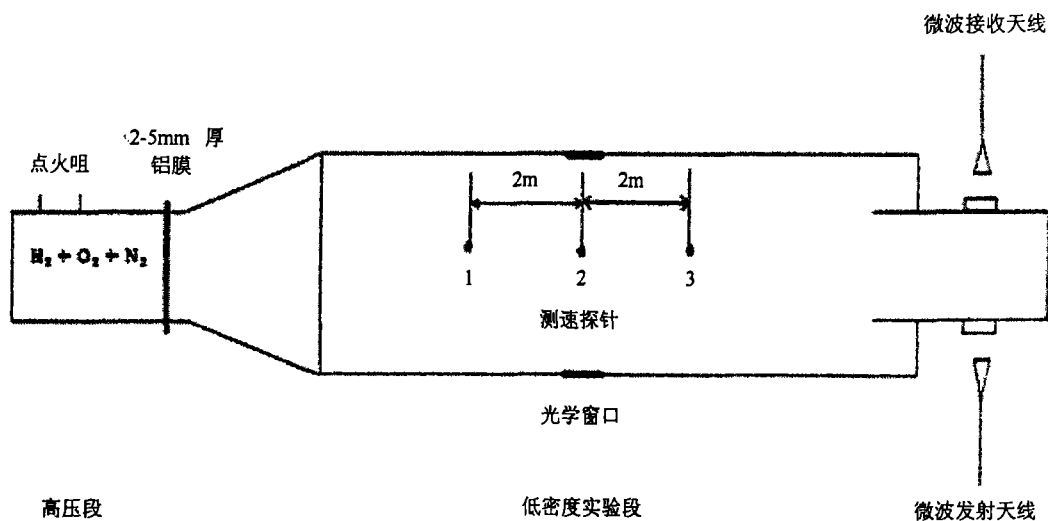
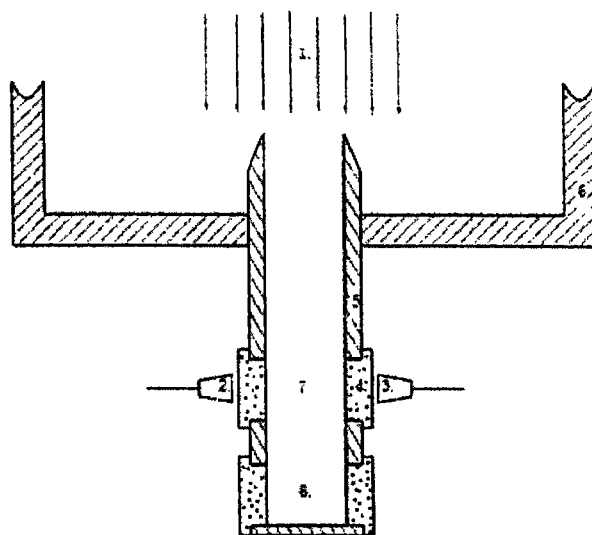


图 (1) $\Phi 800$ mm 微波管示意图

如图 (1) 我们利用 $\Phi 800$ mm 的大型激波管中的强激波后的高温气体作为高速流动的等离子体源。其低压段压力范围为 $P_1 = 1.3 \sim 133 P_0$, 运行马赫数范围 $M_s = 8 \sim 23$ 。以空气为工作物质时, 二区电子密

度 ($1 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{13}$) 个/ cm^3 , 五区电子密度可达 1×10^{15} 个/ cm^3 。激波管有很好的重复性和可控性, 通过控制起始压力和运行 M_s 而得到所需电子密度和碰撞频率。



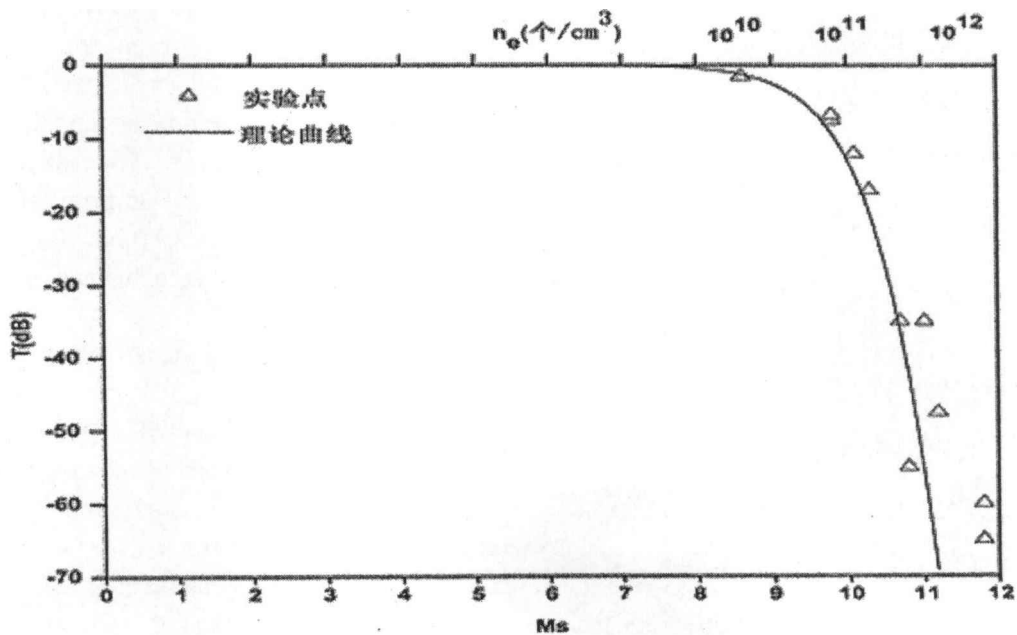
图(2) 天线支架结构示意图

- 1. 等离子体流动方向 2. 发射天线 3. 接收天线 4. 聚四氟乙烯窗口
- 5. 试验段管壁 6. 激波管管壁 7. 相当于激波管二区 8. 相当于激波管五区

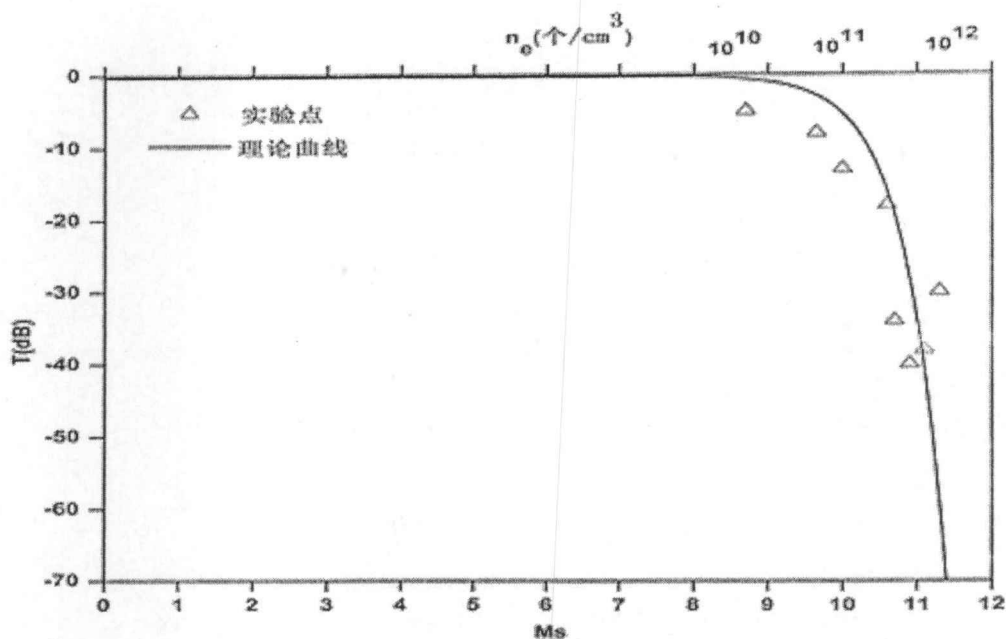
图(2)给出了本文采用的天线支架结构。在 $\Phi 800\text{mm}$ 激波管尾部加上一个带有切取器的矩形实验段,从激波管中心取出 38cm 厚的均匀等离子体流。在实验段两侧开有聚四氟乙烯窗口,这样在第一对窗口处的等离子体中的参数相当于激波管

二区的值,第二对窗口处等离子体的参数相当于激波管五区的值。

3 实验结果及其分析



图(3) 微波频率为 10GHz 时透射系数随 M_s 的变化



图(4) 微波频率为 14.6GHz 时透射系数随 M_s 的变化

图(3), 图(4) 分别为 $p_1=1\text{mmHg}$, $M_s=8\sim 12$ 范围内(这时高温空气对应的电子密度 $n_e=1\times 10^{10}\sim 1\times 10^{13}$), $f=10\text{GHz}$ 和 $f=14.6\text{GHz}$ 时微波透射系数随 M_s 的变化实验数据点和理论计算曲线。由图中可以看出实验结果与理论计算的结果符合的比较好。由此可以得出, 当 $Z/\lambda > 10$ (Z 为等离子体厚度, λ 为微波波长), 且碰撞频率 ν 比较大时, 现有的微波理论计算公式适用。

4 结论

当等离子体的厚度与微波波长比 $Z/\lambda > 10$ (厚层等离子体) 且碰撞频率较大时, 就可以认为等离子体的尺度足够大, 此时可以用电波在半无限, 均匀介质中的传输理论来估算电波透射系数。对于薄层情况下的电波传输特性的定量的规律需在下阶段做进一步的实验研究和理论研究。

致谢

本课题得到国家自然科学基金(10772188 和 90816015) 资助, 在此表示感谢!

参考文献

- [1] 竺乃宜, 李学芬, 黄立舜, 余西龙, 杨乾锁. ACTA MECHANICA SINICA, 2004 vol. 20 No. 3, 213-218.
- [2] 陈强. 激波管流动的理论 and 实验技术. 北京: 高等教育出版社, 1979:38-42, 80-83.
- [3] Zhu NY. The Investigation of ionization phenomena in a 800 mm shock tube. in:13th International Symposium on shock Tube and Waves. Niagara Falls, 1981. 528-534.
- [4] Zhu NY. The investigation of ionization phenomena of shock tube using microwave interferometer. Acta Mechanica Sinica, 1984, 16:85-91.
- [5] Zhu NY. Measurements of flow parameters in a 800mm shock tube. Acta Mechanica Sinica, 1978, 10:234-237.
- [6] Zhu NY. Measurements of electrons density in high temperature air and inspections of theoretical chars. Journal of Chinese Society of Astronautics, 1987, (2):86-92 (in chinese).
- [7] Zhu NY. Measurement of the average collision cross-section of slow electron using 8mm microwave. In:2th Symposium on Atom-Molecule and Physical Mechanics in China, 1986.
- [8] Heald, M.A., Wharton, C.B: Plasma diagnostics with microwaves, John Wiley and Sons, New York(1965)