

文章编号：1001-4322(2005)02-0225-04

# 垂直入射电磁波在大气压非平衡等离子体层中的传播特性<sup>\*</sup>

吴 彬<sup>1</sup>, 林 烈<sup>1</sup>, 吴承康<sup>1</sup>, 张 澄<sup>2</sup>, 王永庆<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要：**用数值模拟的方法对大气压非平衡等离子体薄层中,不同的电子密度分布对微波反射、吸收和透射的影响进行了研究。所采用的理论分析方法是分层模型和镶嵌不变原理。计算中考虑了微波在子层间的多次反射和吸收。数值结果表明,对于电磁波的吸收来说,等离子体中具有二次分布的电子密度,其效果要高于线性分布 10%左右;而对于反射来说,线性分布效率更高。功率反射系数随波长的增大而增大,功率吸收系数 A 也不是单调的,当电子密度不变时,A 存在一个峰值,随着电磁波波长的增加而增加,达到最大值后,缓慢降低。

**关键词：**电磁波; 等离子体; 传播; 非平衡; 大气压

**中图分类号：**O441.5      **文献标识码：**A

从 20 世纪 60 年代以来,美国、前苏联等军事强国就开始研究等离子体吸收电磁波的性能。80 年代初,前苏联最早开始进行实验,研究的重点是等离子体在高空超音速飞行器上的潜在应用;90 年代初,美国休斯实验室进行的一项为期两年,投资 65 万美元的实验表明,应用等离子体技术,可使一个 13 cm 长的微波反射器的雷达截面在 4~14 GHz 频率范围内平均降低 20 dB,即雷达获取回波的信号强度减小到原来的 1%<sup>[1]</sup>。由此可见,等离子体对电磁波的传播有很大的影响<sup>[5,6]</sup>,研究等离子体对电磁波的作用是非常必要的。国内外的学者对电磁波的传播采用不同的研究方法<sup>[7,8]</sup>。本文对等离子体中的电磁波传播特性,采用分层模型进行了数值计算,得到了一些可供实际参考的结果。

## 1 数值计算

电磁波在等离子体中的传播是一个复杂的物理过程。为了研究等离子体对电磁波的吸收、反射、透射过程,对等离子体介质作了如下基本假设。

### 1.1 基本假设

假设等离子体为无限大平板,一维分布,即等离子体沿电磁波传播方向是变化的;假设电子温度为  $T_e = 1 \text{ eV}$ ,重粒子温度为 2 000 K,气体压力  $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,空气介质。

### 1.2 等离子体基本参数

电磁波在等离子体中传播时,其传播特性与等离子体的介电常数  $\epsilon$  和电导率  $\sigma$  有关,由等离子体动力学理论<sup>[2,3]</sup>可得

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{n_e e^2}{m_e} \frac{1}{\omega^2 + \nu^2} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e} \frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} \quad (2)$$

式中: $n_e$  和  $\nu$  分别为等离子体中的电子密度和碰撞频率; $m_e$  和  $e$  分别为电子的质量和电荷; $\omega$  为电磁波的圆频率。等离子体的相对复介电常数为

$$\epsilon_r = \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \quad (3)$$

式中: $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / m_e \epsilon_0}$  为等离子体圆频率。如果等离子体是均匀各向同性介质,复介电常数为常量。平面电磁波传播的形式为  $E = E_0 \exp(\pm ik \cdot r - i\omega t)$ 。其中  $E_0$  为振幅; $k$  为波矢量;复波数  $k = (\omega/c)\sqrt{\epsilon_r}$ , $c$  为自由空间中

\* 收稿日期:2004-03-10; 修订日期:2004-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目资助课题(10375082,90205026)

作者简介:吴 彬(1964—),男,高工,现在从事低温等离子体的基本过程和应用基础研究;E-mail:wubin@imech.ac.cn。

的光速。对于非均匀等离子体介质,复介电常数为空间坐标的函数,如果我们假设等离子体是沿电磁波传播方向上的分层介质时,因为在每个分层内部,介质是均匀的,所以满足上述各向同性介质的条件,可用上述波动方程的解,但此时在各层的分界面处将发生反射,有一部分能量透射到下一层。电磁波在界面上的反射和透射由各层的相对复折射率  $K$  决定。 $K = K_r + iK_i = \sqrt{\epsilon_r}$ , 式中: $K_r$  和  $K_i$  分别为折射系数和吸收系数。

### 1.3 反射系数、透射系数和吸收系数

如图 1 所示,将等离子体分层,0 层和  $n$  层为自由空间,对应的波数为  $k_0, k_n; 1, 2, \dots, n-1$  层为等离子体层,对应的波数为  $k_1, k_2, \dots, k_{n-1}$ ,相应的厚度为  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{n-1}$ 。

假定电磁波沿  $z$  轴方向传播,入射波场量为  $E_0 \exp(ik_n z)$ ,反射波场量为  $R_n E_0 \exp(-ik_n z)$ ,透射波场量为  $T_n E_0 \exp[ik_n(z - z_{n-1})]$ (时间相关项  $\exp(-i\omega t)$  相同,略去未写)。这里  $R_n, T_n$  分别是等离子体的振幅反射系

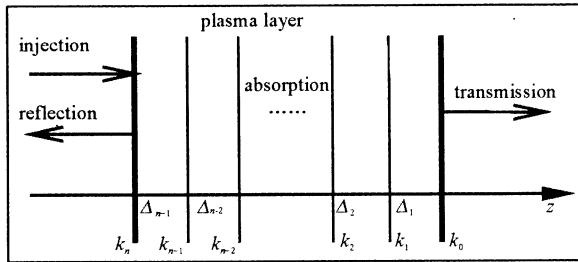


Fig. 1 Plasma sub-layers

图 1 等离子体分层图

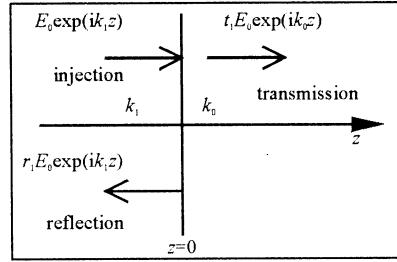


Fig. 2 Reflection and transmission on single interface

图 2 单界面反射与透射

数和透射系数。由不变量镶嵌法<sup>[4]</sup>可得  $k_n$  与  $k_{n-1}$  界面上,振幅反射系数  $r_n$  和振幅透射系数  $t_n$ <sup>[4]</sup>

$$r_n = (k_n - k_{n-1}) / (k_n + k_{n-1}) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

$$t_n = 2k_n / (k_n + k_{n-1}) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

根据菲涅耳公式可得:在  $k_1 - k_0$  界面上(见图 1)有

$$r_1 = (k_1 - k_0) / (k_1 + k_0) = (K_1 - K_0) / (K_1 + K_0) \quad (6)$$

$$t_1 = 2k_1 / (k_1 + k_0) = 2K_1 / (K_1 + K_0) \quad (7)$$

对于分层介质体系的电磁波传输,我们设( $n-2$ )层总的振幅反射系数和振幅透射系数分别为  $R_{n-1}$  和  $T_{n-1}$ ,增加第( $n-1$ )层后,电磁波在该层的两个界面之间发生多次反复的反射与透射,并且在该层内会被吸收,反射波和透射波,都由一系列波迭加而成。可得透射波幅值  $T_n$  和反射波幅值  $R_n$ <sup>[4]</sup>

$$R_n = \begin{cases} (r_n + \delta_{n-1} R_{n-1}) / (1 + r_n \delta_{n-1} R_{n-1}) & (n = 2, 3, 4, \dots) \\ r_1 & (n = 1) \end{cases} \quad (8)$$

$$T_n = \begin{cases} t_n \exp(ik_{n-1} \Delta_{n-1}) T_{n-1} / (1 + r_n \delta_{n-1} R_{n-1}) & (n = 2, 3, 4, \dots) \\ t_1 & (n = 1) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\delta = \exp(2ik_{n-1} \Delta_{n-1})$ 。按时间平均的能流密度计算,可得功率反射系数  $R = |R_n|^2$ ,功率透射系数  $T = (K_{r_0}/K_{r_n}) |T_n|^2$ ;而功率吸收系数为  $A = 1 - T - R$ 。

## 2 结果与讨论

数值计算了等离子体厚度为 4 cm,电子密度分布为一次和二次分布,最高电子密度分别为  $1.0 \times 10^{12}, 1.0 \times 10^{13}, 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时,等离子体对电磁波的功率吸收系数、反射系数和透射系数。图 4~6 给出了功率透射、反射、吸收系数随波长的变化。等离子体层的功率反射系数强烈依赖于等离子体的最大密度。最大电子密度  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (图 4)的等离子体其功率反射系数几乎可以忽略,  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (图 5)的等离子体具有明显的反射作用。对于电磁波的反射,只有当  $n_{\max}$  大于  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (图 5)时才能起到明显的作用,而当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时(图 6),大于 50% 的电磁波被反射。

### 2.1 电子密度为线性分布

反射波对电子密度比较敏感,当最大电子密度  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(b)),波长小于 5 cm 的电磁

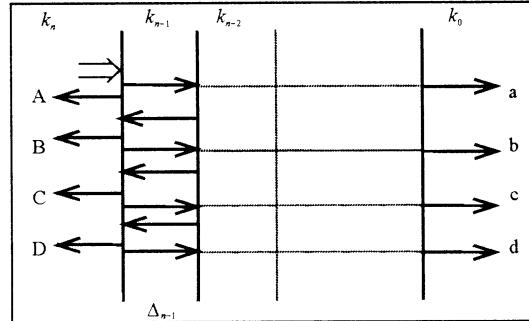


Fig. 3 Reflection and transmission wave by ( $n-1$ ) sub-layers

图 3 ( $n-1$ ) 层等离子体对电磁波的反射和透射

波几乎没有反射,  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(b)), 功率反射系数  $R$  随着波长的增加而增加, 当波长  $\lambda = 5 \text{ cm}$  时,  $R$  可达到约 28%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时(图 6(b)),  $R$  可达到约 70%。

功率吸收系数  $A$  与功率反射系数  $R$  不同, 它不是单调的; 当电子密度不变时,  $A$  存在一个峰值, 随着电磁波波长的增加开始是增加, 达到最大值后, 缓慢降低。图 6(b)显示, 当最大电子密度为  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时, 对波长  $\lambda = 0.22 \text{ cm}$  的电磁波有最大的吸收, 其相应的最大功率吸收系数  $A$  可达到 98%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(b)), 对波长  $\lambda = 0.75 \text{ cm}$  的电磁波有最大的吸收, 其最大功率吸收系数  $A$  可达到 97%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(b)), 对波长  $\lambda = 5 \text{ cm}$  的电磁波, 其最大功率吸收系数  $A$  为 69%。

功率透射系数  $T$  随波长的变化是单调下降的, 波长越短, 电磁波的透射越强烈。当最大电子密度  $n_{\max} < 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时, 透射较强烈(图 4(b)、图 5(b))。当  $n_{\max} > 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时, 功率透射系数随着波长的增加下降很快, 如  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(b)),  $\lambda > 0.8 \text{ cm}$  时, 已没有透射。

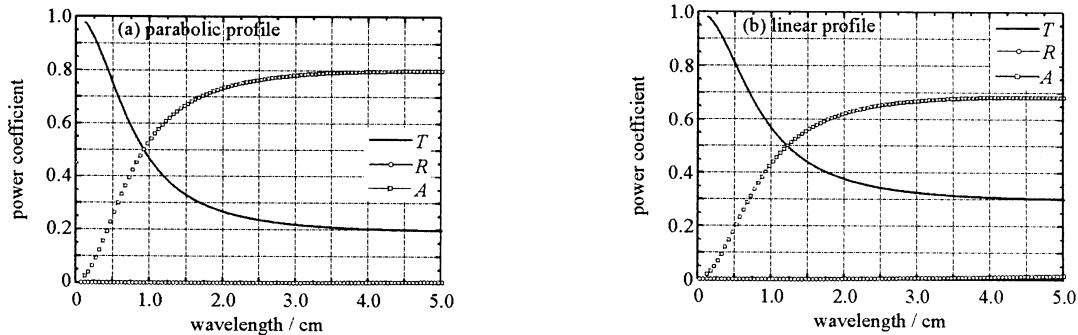


Fig. 4 功率透射、反射、吸收系数随波长的变化 ( $n_{\max} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )

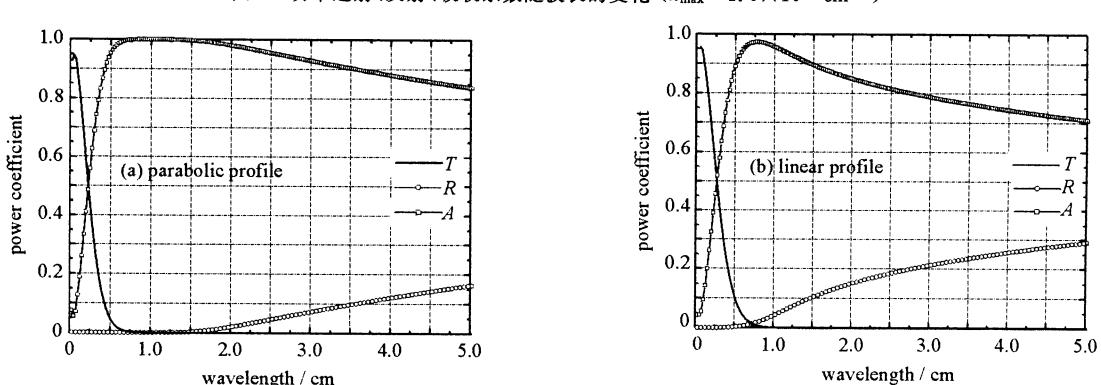


Fig. 5 功率透射、反射、吸收系数随波长的变化 ( $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )

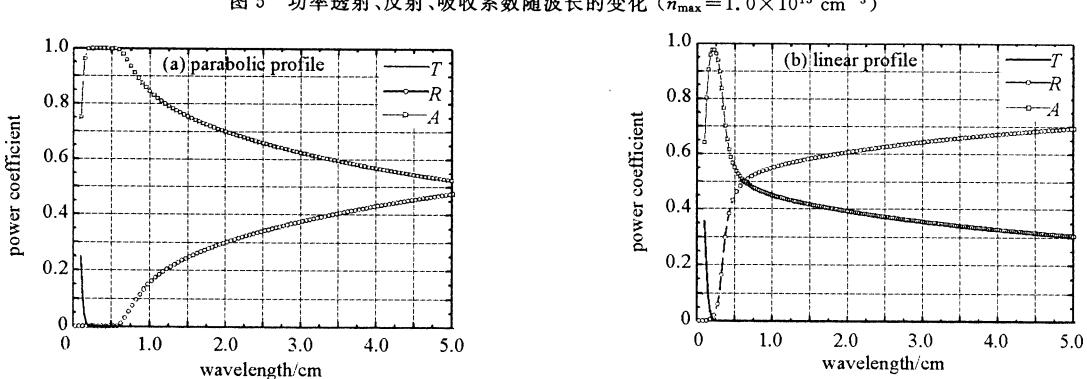


Fig. 6 功率透射、反射、吸收系数随波长的变化 ( $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )

## 2.2 电子密度为二次抛物线分布

电子密度为二次抛物线分布的等离子体对电磁波的作用与一次分布相类似(图 4(a)~6(a)), 但二次分布对电磁波的吸收作用更强, 功率吸收系数  $A$  平均要高出约 10%; 而反射系数  $R$  和透射系数  $T$  都更小。

电子密度对功率反射系数影响较大。当  $n_{\max} < 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(a)), 在所讨论电磁波的波长范围内几乎没有反射;  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(a)), 功率反射系数  $R$  随着波长的增加而增加, 当波长  $\lambda = 5 \text{ cm}$  时, 功率反射系数  $R$  可达到 17%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时(图 6(a)), 功率反射系数  $R$  可达到约 48%。由此可以看出, 二次分布的等离子体对电磁波的反射比一次分布大为降低。

功率吸收系数  $A$  也不是单调的, 当电子密度不变时,  $A$  存在一个峰值, 随着电磁波波长的增加而增加, 达到最大值后, 缓慢降低。当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时(图 6(a)), 对波长为  $0.2 \sim 1.2 \text{ cm}$  的电磁波吸收达到最大, 其相应的功率吸收系数  $A$  都大于 99%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(a)), 对波长  $\lambda = 1.2 \sim 2.5 \text{ cm}$  的电磁波的吸收达到最大, 其最大功率吸收系数  $A$  大于 99%; 当  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(a)), 对波长  $\lambda = 5 \text{ cm}$  的电磁波, 其最大功率吸收系数  $A$  为 80%。

当  $n_{\max} < 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(a)), 透射强烈, 但比线性分布要小约 10%。当  $n_{\max} > 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时(图 4(a)、5(a)), 与线性分布类似, 功率透射系数  $T$  随着波长的增加下降很快, 如  $n_{\max} = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时(图 5(a)),  $\lambda > 0.8 \text{ cm}$  时, 已没有透射。

### 3 结 论

等离子体层的功率吸收系数不但与等离子体的最大密度有关, 而且还与等离子体的分布有关。等离子体密度为二次分布的等离子体层, 其对于电磁波的吸收, 要比线性分布的等离子体层高 10% 左右。最大电子密度大于  $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时, 等离子体层对波长大于 3 mm 微波的功率透射系数几乎可以忽略。功率反射系数随着波长(大于 5 mm)的增大而增大, 而功率吸收系数随着波长的增大而减小。

### 参考文献:

- [1] 刘春生. 等离子体技术在军事领域的应用[J]. 国际航空, 2000, 45(12): 49—51. (Liu C S. The application of plasma technology in the military industry. *International Aviation*, 2000, 45(12): 49—51)
- [2] Heald M A, Wharton C B. Plasma diagnostics with microwaves[M]. New York: Wiley, 1965.
- [3] Auciello O, Flamm D L. Plasma diagnostics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1994.
- [4] 王柏懿, 徐燕侯, 嵇震宇. 电磁波在非均匀有损耗再入等离子体鞘层中的传播[J]. 宇航学报, 1985, 6(1): 35. (Wang B Y, Xu Y H, Ji Z Y. Propagation of electromagnetic waves in inhomogenous and lossy reentry plasma sheath layer. *Journal of Astronautics*, 1985, 6(1): 35)
- [5] Laroussi M, Roth J R. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1993, 21(4): 366—372.
- [6] Vidmar R J. On the use of atmospheric plasma as electromagnetic reflectors and absorbers[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1990, 18(4): 733—741.
- [7] Petrin A B. On the transmission of microwaves through plasma layer [J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2000, 28(3): 1000—1008.
- [8] 付继伟, 候朝桢, 窦丽华. 电磁脉冲斜入射对孔缝耦合效应的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(3): 249—252. (Fu J W, Hou C Z, Dou L H. Numerical analysis on hole coupling effects of an oblique incidence of electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3): 249—252)

## Propagation characteristics of a vertical incident microwave in a non-equilibrium plasma slab at atmospheric pressure

WU Bin<sup>1</sup>, LIN Lie<sup>1</sup>, WU Cheng-kang<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, WANG Yong-qing<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Shenyang Aircraft Research Institute, Shenyang 110035, China )

**Abstract:** The effects of electron number density and its profile on the microwave propagation characteristics in a plasma slab are discussed. The incident wave travels vertically on the plasma slab. The plasma layer is modeled as adjacent, homogeneous sub-slabs, whose approximate distributions are linear or parabolic. The theoretical method to analyze the propagation of the wave is based on the stratified layer model and invariant imbedding principle. Multiple reflections between sub-slab interfaces are analyzed with the model. The numerical result shows that absorption with parabolic distribution plasma is better than the linear one, but the reflection is higher for the linear profile plasma. The power coefficient of reflection increases and the absorption coefficient decreases after an early peak with the increase of wavelength in the case that the maximum electron density is greater than  $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

**Key words:** Microwave; Plasma; Propagation; Non-equilibrium; Atmospheric pressure