

# 金属平板前等离子体的电磁波功率反射系数计算分析

苏纬仪 杨 涓<sup>†</sup> 魏 昆 毛根旺 何洪庆

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2002 年 11 月 14 日收到, 2003 年 6 月 3 日收到修改稿)

把金属平板前非均匀等离子体层简化为分层均匀的平板模型, 采用等效输入阻抗方法, 计算大气或真空边界入射波的总功率反射系数, 分析其影响因素. 计算结果表明: 电子数密度大小、等离子体层厚度、入射波频率和入射角是功率反射系数的主要影响因素, 适当调整其中任何一个, 都可以达到降低功率反射系数的效果. 在低频段, 电子数密度的分布对功率反射系数几乎没有影响, 在高频段, 电子数密度的分布对功率反射系数有影响. 等离子体厚度、入射波频率、电子数密度分布对功率反射系数的影响几乎与波的极化方向无关.

关键词: 等离子体, 电磁波, 传输

PACC: 5240D, 5225, 2110K

## 1. 引 言

等离子体隐身技术是继常规隐身方法之后出现的一种新概念隐身技术, 对其研究在国外已有相当的历史<sup>[1,2]</sup>, 近几年在国内也受到重视<sup>[3-7]</sup>. 从理论上计算电磁波在等离子体中的功率反射系数, 分析其影响因素是开展这项工作的重要基础. 国内外已经有人在这方面开展过研究工作, 文献 [2,3] 把非均匀等离子体简化为均匀等离子体平板, 分别采用 Fresnel 公式和散射矩阵方法计算电磁波在磁化等离子体中的功率反射系数, 并分析电子数密度、碰撞频率、入射波角度等对其影响; 文献 [5,7] 计算了电磁波在均匀和非均匀磁化等离子体中的传输与反射功率系数, 分析了等离子体的均匀性、电子数密度、碰撞频率等的影响; 文献 [4] 就金属平板前非磁化等离子体对垂直入射波的功率反射系数进行了计算, 且只考虑一次反射; 文献 [6] 利用洛伦兹模型进行了计算, 讨论了等离子体密度、电子-中性气体碰撞频率及入射波频率对电磁波在大气人造等离子体中衰减特性的影响.

本文采用等效输入阻抗方法计算水平和垂直极化波斜投射到金属平板前非均匀等离子体层时总的功率反射系数. 首先把非均匀等离子体视为由若干

层介电常数不同的均匀介质平板组成, 入射波进入介质平板后在上下分界面处发生多次反射. 从合成驻波方程出发, 推导出介质平板的等效输入阻抗, 从而获得入射波在等离子体边界面上的总功率反射系数. 分析入射波极化方向、频率与入射角、电子数密度大小及分布、等离子体层厚度对该参数的影响.

## 2. 微波在非均匀等离子体中传输的等效输入阻抗计算方法

### 2.1. 金属平板前非均匀等离子体模型

如图 1 所示, 金属平板前存在一层非均匀等离子体, 考虑电子的碰撞, 其介电常数为复数. 假设沿  $y$  方向等离子体参数分布均匀, 沿  $x$  方向, 等离子体中电子数密度为线性和对称抛物线分布. 线性分布模拟与金属平板表面垂直的等离子体喷流, 对称抛物线分布模拟与金属平板表面平行的等离子体喷流. 图中  $N_{e01}, N_{e1}$  为线性分布时的最大和最小电子数密度值;  $N_{e02}, N_{e2}$  为对称抛物线分布时的最大和最小电子数密度值. 把金属平板、等离子体和真空或大气边界视为由若干个平板层组成, 第一层为金属平板, 最后第  $n$  层为大气或真空边界层. 沿厚度方向把等离子体均匀划分成厚度为  $d$  的  $n-2$  层, 每一层等离子体参数近似均匀, 并取层中间处的参

<sup>†</sup> 通讯联系人.

数值.

入射波在第  $n$  层介质内开始投射,通过  $n-2$  层等离子体后,被金属平板反射,整个传输过程相当于在如图 2 所示的等效输入阻抗中传输.

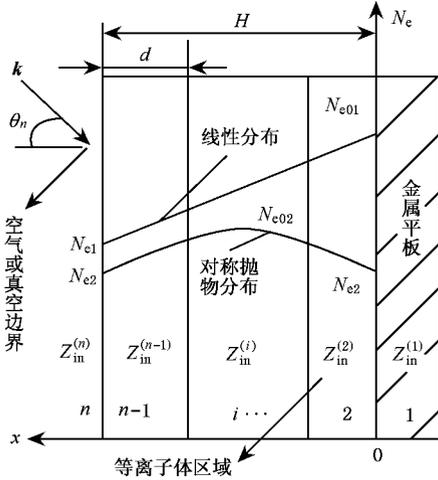


图 1 等离子体平板模型及其电子密度分布

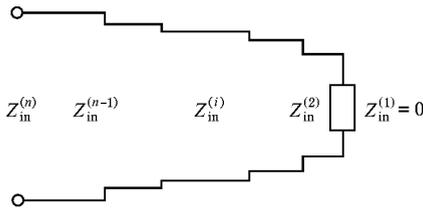


图 2 分层介质等效输入阻抗示意图

## 2.2. 分层介质等效输入阻抗方法

除第一层介质外,电磁波在各介质层内传输时,在各个边界上都发生多次反射,引起两个方向波的传播并形成驻波.在第  $i$  层等离子体中,总电场强度与总磁场强度为

$$E_{iz} = A_i \exp[j\beta_i(x - x_{i-1})] + B_i \exp[-j\beta_i(x - x_{i-1})], \quad (1)$$

$$H_{iy} = \frac{1}{Z_i} \left\{ A_i \exp[j\beta_i(x - x_{i-1})] + B_i \exp[-j\beta_i(x - x_i)] \right\}, \quad (2)$$

式中  $\beta_i = k_i \cos \theta_i$  为波的传播常数沿  $x$  轴的分量,  $\theta_i$  为透射波与等离子体层界面法向的夹角,由斯涅尔定律确定.波数  $k_i = -\frac{\omega \sqrt{\epsilon_{r,i}}}{c}$ ,其中  $c$  为光速,  $\omega$  为入射波频率,  $\epsilon_{r,i}$  为考虑电子碰撞的第  $i$  层等离子

体复介电常数.

已知第  $n$  层介质内入射波的参数,再由于在金属平板内电场强度与磁场强度为零,因此  $n$  层介质内共有  $\chi(n-2)+1$  个振幅  $A_i$  ( $i=2, 3, \dots, n-1$ ) 和  $B_i$  ( $i=2, 3, \dots, n$ ) 为未知量,需要根据每层等离子体边界上电场强度和磁场强度连续条件确定.这里仅关心第  $n$  层与第  $n-1$  层交界面上的总功率反射系数,所以只需求解总电场强度振幅反射系数,而无须求解各介质层中电磁场强度的振幅.

对于第一层金属平板,等效输入阻抗为

$$Z_{in}^{(1)} = 0. \quad (3)$$

第二层等效输入阻抗为

$$\begin{aligned} Z_{in}^{(2)} &= \frac{E_{2z}}{H_{2y}} \Big|_{x=d} \\ &= \frac{A_2 \exp(jk_2 d \cos \theta_2) + B_2 \exp(-jk_2 d \cos \theta_2)}{A_2 \exp(jk_2 d \cos \theta_2) - B_2 \exp(-jk_2 d \cos \theta_2)} Z_2 \\ &= \frac{Z_{in}^{(1)} - jZ_2 \tan[(k_2 \cos \theta_2)d]}{Z_2 - jZ_{in}^{(1)} \tan[(k_2 \cos \theta_2)d]} Z_2. \end{aligned} \quad (4)$$

在第二层与第三层介质的交界面上,法向电场强度与切向磁场强度连续,所以第二层等效输入阻抗又可写为

$$\begin{aligned} Z_{in}^{(2)} &= \frac{E_{3z}}{H_{3y}} \Big|_{x=d} \\ &= \frac{A_3 \exp(jk_3 d \cos \theta_3) + B_3 \exp(-jk_3 d \cos \theta_3)}{A_3 \exp(jk_3 d \cos \theta_3) - B_3 \exp(-jk_3 d \cos \theta_3)} Z_3. \end{aligned} \quad (5)$$

由此求出在第二层与第三层介质的交界面上总电场强度振幅反射系数为

$$R_E^{(2)} = \frac{Z_{in}^{(2)} - Z_3}{Z_{in}^{(2)} + Z_3}. \quad (6)$$

以此类推,可以求解第  $i-1$  层与第  $i$  层交界面上总的电场强度振幅反射系数为

$$R_E^{(i-1)} = \frac{Z_{in}^{(i-1)} - Z_i}{Z_{in}^{(i-1)} + Z_i}. \quad (7)$$

在等离子体边界面上总功率反射系数为

$$R_p = |R_E^{(n-1)}|^2. \quad (8)$$

以上各式中,  $Z_i$  为第  $i$  层介质的特性阻抗.对于平行极化波,

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \cos \theta_i; \quad (9)$$

对于垂直极化波,

$$Z_i = \frac{\sqrt{\mu_i}}{\cos \theta_i}. \quad (10)$$

### 3. 入射波在金属板前非均匀等离子体界面上反射系数的计算

利用分层介质等效输入阻抗计算方法,编制计算程序,首先对文献[8]中的算例进行计算,结果互相吻合,说明计算方法合理、编制的计算程序正确.再对入射波在金属平板前等离子体边界上的功率反射系数进行计算,分析入射波频率与方向、等离子体厚度、电子数密度大小及其分布对功率反射系数的影响.计算时,假设等离子体碰撞频率 $\nu$ 与等离子体频率 $\omega_p$ 相当.

#### 3.1. 等离子体厚度对功率反射系数的影响

设入射波频率为 6 GHz,电子数密度为线性分布,并在金属边界处达到最大.把等离子体均匀地分成若干层,当最大的电子数密度  $N_{e01}$  分别取  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  时,计算空气或真空边界处水平和垂直极化波总的功率反射系数随等离子体层总厚度的变化曲线如图 3 和图 4 所示.计算结果说明:

(1)当  $N_{e01}$  取  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  时,水平和垂直极化入射波功率反射系数随等离子体厚度的增加而下降的梯度最大,这说明该电子数密度分布使等离子体达到谐振状态,入射波被等离子体强烈吸收.

(2)金属平板表面等离子体层厚度  $H < 0.015 \text{ m}$  时,电子数密度越大,水平和垂直极化入射波的功率反射系数越小.

(3)当  $0.015 \text{ m} \leq H < 0.042 \text{ m}$  且  $N_{e01}$  取  $10^{17} \text{ m}^{-3}$  时,水平和垂直极化入射波的功率反射系数最小.

(4)当  $H > 0.042 \text{ m}$ ,且  $N_{e01}$  取  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  时,水平和垂直极化入射波的功率反射系数最小.

(5)从图 3、图 4 可以看出,垂直极化入射波在等离子体边界上的反射系数最小能达到 0.2,而水平极化波的功率反射系数最小能达到 0.1 以下.

#### 3.2. 入射角对功率反射系数的影响

假设入射波频率为 6 GHz,等离子体厚度  $H$  为 0.05 m,电子数密度分布同上述计算时的假设,当电子数密度不同时,计算空气或真空边界处水平和垂直极化入射波总的功率反射系数随入射角度的变化曲线如图 5 和图 6 所示.

图 5 所示的水平极化波功率反射系数计算结果说明,当电子数密度分布一定时,存在一个最佳入射

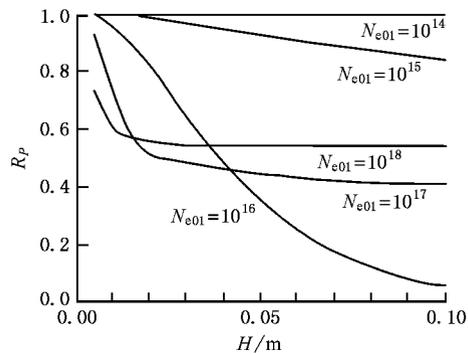


图 3 水平极化波功率反射系数随等离子体厚度的变化

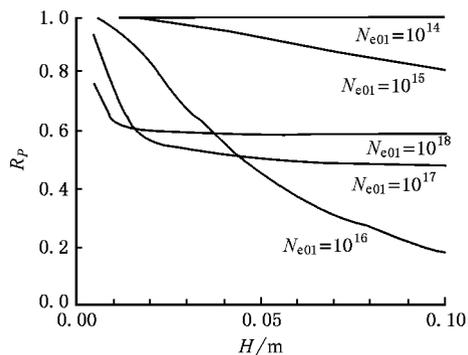


图 4 垂直极化波功率反射系数随等离子体厚度的变化

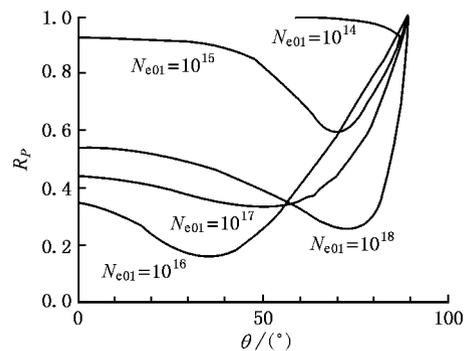


图 5 水平极化波功率反射系数随入射角的变化

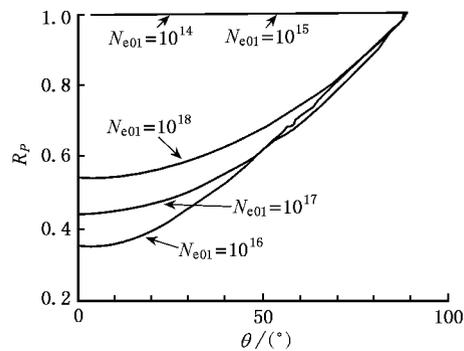


图 6 垂直极化波功率反射系数随入射角的变化

角度 此时功率反射系数最小. 图 6 所示的垂直极化波功率反射系数计算结果说明, 当入射角度增加时, 功率反射系数增加; 入射角度小于  $40^\circ$  时, 电子数密度分布对功率反射系数有较大的影响. 图 5 和图 6 所示的计算结果表明, 无论是水平极化波还是垂直极化波, 入射角接近  $90^\circ$  时, 功率反射系数都接近于 1.

### 3.3. 入射波频率对功率反射系数的影响

假设入射波垂直入射, 等离子体厚度为  $0.05\text{ m}$ , 电子数密度分布同上述计算时的假设, 当电子数密度不同时, 计算所得空气或真空边界处水平和垂直极化波总的功率反射系数随波频率的变化曲线如图 7 和图 8 所示. 计算结果表明:

(1) 入射波频率对功率反射系数的影响与波的极化方向无关.

(2) 在每条计算曲线上, 入射波都存在一个谐振频率点, 此时, 等离子体边界处入射波的功率反射系数最小.

(3) 随着电子数密度的增加, 入射波谐振频率也增加, 最小功率反射系数则减小, 具有低功率反射系数的入射波频率带宽增加.

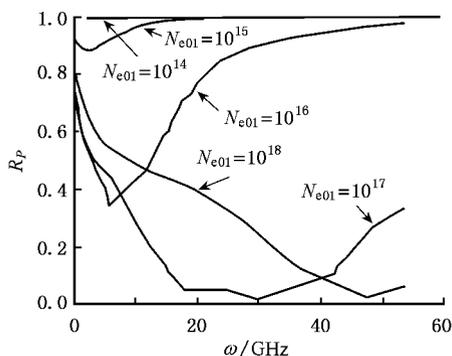


图 7 水平极化波功率反射系数随入射波频率的变化

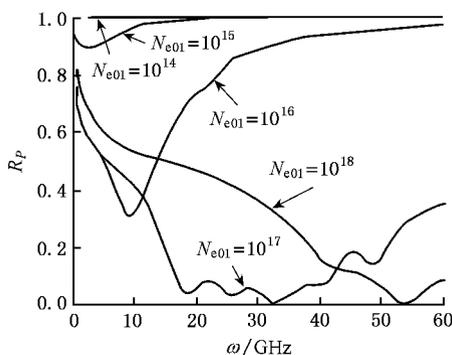


图 8 垂直极化波功率反射系数随入射波频率的变化

### 3.4. 电子数密度分布对功率反射系数的影响

假设入射波垂直入射, 等离子体层厚度和中部的电子数密度分别取  $0.05\text{ m}$  和  $10^{16}\text{ m}^{-3}$ , 当电子数密度分别为线性分布、对称抛物线分布时(如图 1), 计算得到空气或真空边界处水平和垂直极化波总的功率反射系数随波频率的变化曲线如图 9 和图 10

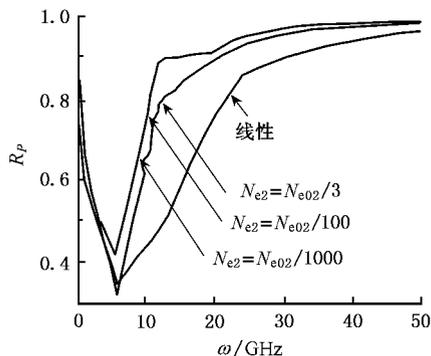


图 9 不同电子数密度分布条件下水平极化波功率反射系数随入射波频率的变化

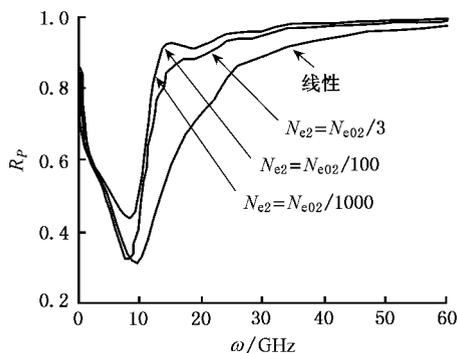


图 10 不同电子数密度分布条件下垂直极化波功率反射系数随入射波频率的变化

所示. 计算结果说明:

(1) 在每条计算曲线上, 入射波都存在一个谐振频率点, 此时, 等离子体边界上功率反射系数最小.

(2) 在低频段, 计算曲线几乎重合, 电子数密度的分布对功率反射系数几乎没有影响.

(3) 在高频段, 等离子体的电子数密度分布对功率反射系数影响较大.

(4) 相对于对称抛物线分布, 线性分布的等离子体对微波反射的功率系数最小, 具有低功率反射系数的入射波频率带宽最大.

(5) 电子数密度沿厚度变化的梯度越大, 入射波功率反射系数就越小, 具有低功率反射系数的入射

波频率带宽也越小.

(6)电子数密度分布对水平极化和垂直极化波功率反射系数的影响几乎相同.

## 4. 结 论

(1)本文把非均匀等离子体假设为分层介质,从分层介质中电磁波的驻波方程出发,推导出每层介质的等效输入阻抗,获得空气或真空边界面上的功率反射系数,从而计算等离子体边界对入射波的功率反射系数.用该方法可以计算金属平板前等离子体层对电磁波的功率反射系数.

(2)本文的计算分析表明,等离子体厚度、电子数密度分布、入射波频率和入射波角度是影响功率

反射系数的主要因素.在低频段,电子数密度的分布对功率反射系数几乎没有影响;在高频段,电子数密度的分布对功率反射系数有影响.

(3)等离子体的电子数密度、波的入射角度和频率分别存在一个最佳值,当其他条件一定时,功率反射系数最小.

(4)当等离子体层厚度范围为  $0.005\text{—}0.100\text{m}$ 、最大电子数密度取值在  $10^{16}\text{—}10^{18}\text{m}^{-3}$  范围内时,通过调整入射波的角度,可以使功率反射系数最低达到 0.1 以下,使金属平板对微波的回波损耗有 10 dB 以上的改善.

(5)等离子体层厚度、入射波频率、电子数密度分布对功率反射系数的影响几乎与波的极化方向无关.

- 
- [ 1 ] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **18** 733
- [ 2 ] Laroussi M, Roth J R 1993 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **21** 366
- [ 3 ] Bin J H, Gang W, Sh L L 1999 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **27** 1131
- [ 4 ] Cao J Z, Li J Z, Chen G R 2002 *Chin. J. Radio Sci.* **17** 125 (in Chinese) [ 曹建章、李景镇、陈国瑞 2002 电波科学学报 **17** 125 ]
- [ 5 ] Sun A P, Li L Q, Qiu X M *et al* 2002 *Nucl. Fus. Plas. Phys.* **22** 135 (in Chinese) [ 孙爱萍、李丽琼、邱孝明等 2002 核聚变与等离子体物理 **22** 135 ]
- [ 6 ] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1317 (in Chinese) [ 刘明海、胡希伟、江中和等 2002 物理学报 **51** 1317 ]
- [ 7 ] 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 ]
- [ 8 ] Yuan J H, Mo H D 1990 *The Wave in Plasma* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press) (in Chinese) [ 袁敬阔、莫怀德 1990 等离子体中的波(成都:电子科技大学出版社) ]

# Calculation and analysis on the wave reflected characteristics of plasma before the conductor plate

Su Wei-Yi Yang Juan Wei Kun Mao Gen-Wang He Hong-Qing  
( College of Astronautics , Northwestern Polytechnic University , Xi'an 710072 ,China )  
( Received 14 November 2002 ; revised manuscript received 3 June 2003 )

## Abstract

Regarding the nonuniform plasma plate as uniform multilayer slabs , the total wave energy reflectance of the interface between the plasma before a conductor plate and the atmosphere or vacuum can be calculated by applying the equivalent input impedance method. The result obtained is that the reflection characteristics are affected by electron number density , plasma thickness , frequency and transmitting direction of the incident wave. Changing any factor of them , the total wave energy reflectance can be reduced greatly. In the low frequency band , the distribution of electron number density almost does not affect the reflectance. But in the high frequency band , it will affect the reflectance. The effect of plasma thickness , wave frequency , electron number density distribution on it is almost independent of the wave polarizing direction.

**Keywords :** plasma , electromagnetic wave , propagation

**PACC :** 5240D , 5225 , 2110K