

电磁波在磁化等离子体表面的功率 反射系数计算研究*

杨 涓† 朱良明 苏维仪 毛根旺

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2004 年 8 月 5 日收到, 2004 年 9 月 8 日收到修改稿)

采用等效输入阻抗方法计算金属平板前非均匀磁化等离子体层对垂直入射电磁波的功率反射系数, 结果表明, 电子数密度大小、等离子体层厚度、入射波频率和外磁场是功率反射系数的主要影响因素. 电子数密度取值必须合适, 外加磁场才能明显降低等离子体对入射电磁波的功率反射系数. 入射电磁波频率增加时, 必须加大外磁场强度, 才能明显降低功率反射系数.

关键词: 等离子体中电磁波的传输, 等离子体特性, 电磁波

PACC: 5240D, 5225, 2110K

1. 引 言

等离子体隐身是继常规隐身方法之后出现的一种新概念隐身技术, 其研究在国外有相当的历史^[1, 2], 近年在国内也受到重视^[3-9]. 从理论上计算分析电磁波在等离子体中的传输特性及各影响因素是开展这项工作的重要基础. 国内外已经有人进行过计算分析, 文献 2, 3 把非均匀等离子体简化为分层均匀等离子体平板, 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反射和吸收特性, 并分析电子数密度、碰撞频率、入射波角度等的影响; 文献 5, 7 计算电磁波在均匀和非均匀磁化等离子体中的传输与反射特性, 分析等离子体的均匀性、电子数密度、碰撞频率等的影响; 文献 4 对金属平板前非磁化等离子体对垂直入射波的反射进行计算; 文献 6 利用洛伦兹模型进行计算, 讨论等离子体密度、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. 文献 9 采用电流密度卷积-时域有限差分算法, 对磁化等离子体平板对于平行于磁场传播电磁波的反射和透射系数进行了计算. 这些计算研究方法各有特点, 从不同的角度计算分析等离子体对入射电磁波的影响, 并从中探索规律.

等离子体实质上可以看成为电介质材料, 因此电磁波在电介质中传输的等效输入阻抗计算方法^[10]能够用来计算等离子体对电磁波的反射, 这种方法显著的特点是简洁、直观明了, 能快速计算分析等离子体与电磁波诸多参数对功率反射系数的影响. 文献 8 曾经采用这种方法计算非均匀非磁化等离子体对电磁波的反射系数, 本文采用这种方法计算磁化等离子体对垂直磁场入射电磁波的反射系数.

2. 磁化等离子体内垂直于磁场传播的电磁波

电磁波沿 x 方向在等离子体中传输时, 电场与磁场强度满足 Maxwell 方程. 对于均匀平面电磁波, 从 Maxwell 方程出发, 可以获得电场强度的波动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \bar{\epsilon} \mathbf{E} = 0. \quad (1)$$

均匀平面电磁波在等离子体内沿垂直于磁场的方向传输时, 根据方程 (1) 的解, 存在寻常波与非寻常波. 寻常波在磁化与非磁化等离子体中的传输方程相同, 但是非寻常波在磁化与非磁化等离子体中传输方程不同. 根据等离子体参数和电磁波频率, 寻

* 西北工业大学科技创新项目.

† E-mail: yangjuan_mpt@sina.com

常与非寻常波分别存在通带与阻带,而且两种波的通带与阻带不完全重合^[11].如果同时考虑两种波的通带,计算过程将非常复杂,难以分析影响磁化等离子体与电磁波相互作用的因素.因此为了计算分析磁化等离子体对微波功率的反射系数,并给出明确的计算规律,仅考虑寻常电磁波处于通带、非寻常电磁波处于阻带的情况十分必要,由此可采用等效输入阻抗计算方法计算磁化等离子体中电磁波的传输问题.

3. 电磁波垂直于磁场传播时,磁化等离子体表面功率反射系数的等效输入阻抗计算方法

3.1. 金属平板前非均匀磁化等离子体模型

如图1所示,金属平板前覆盖一层非均匀有碰撞的等离子体,外加均匀磁场方向与等离子体平板平行.沿 y 方向等离子体参数分布均匀,沿 x 方向,设电子数密度为线性分布.在垂直于平板的方向上,把等离子体均匀划分为厚度为 d 的若干层,每一层等离子体参数近似均匀.设第一层为金属平板层,最后一层(第 n 层)为真空或空气域.

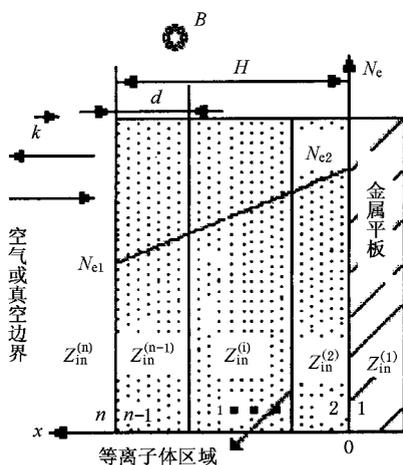


图1 金属平板前非均匀磁化等离子体模型

3.2. 分层介质等效输入阻抗方法

如图1所示,平面线极化电磁波在第 n 层内向第 $n-1$ 层传输,通过等离子体后,被金属平板全反射.电磁波在分层等离子体中的传输相当于在图2的等效输入阻抗中传输.

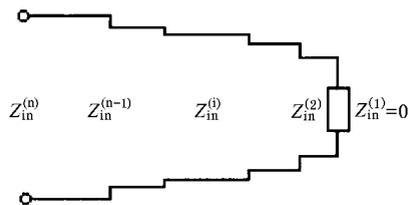


图2 分层介质等效输入阻抗示意图

除第一层介质外,电磁波在各介质层内传输时,在各边界上发生多次反射,引起两个方向波的传播并形成驻波.在第 i 层等离子体中,平面电磁波的合电场与磁场强度为

$$E_{iz} = A_i e^{j\beta_i(x-x_{i-1})} + B_i e^{-j\beta_i(x-x_{i-1})}, \quad (2)$$

$$H_{iy} = \frac{1}{Z_i} [A_i e^{j\beta_i(x-x_{i-1})} + B_i e^{-j\beta_i(x-x_{i-1})}], \quad (3)$$

式中省略对坐标 y 的因子 $e^{-jk_y y \sin \theta_i}$.其中, $\beta_i = k_i \cos \theta_i$ 为波传播常数沿 x 轴分量,由斯涅尔定律确定.波数 $k_i = -\frac{\omega \sqrt{\epsilon_{ri}}}{c}$,其中 c 为光速, ω 为入射波频率.对于非磁化等离子体,等离子体复介电常数

$$\bar{\epsilon}_{ri} = 1 - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2 + \nu_{eni}^2} - j \frac{\omega_{pi}^2 \nu_{eni} / \omega}{\omega^2 + \nu_{eni}^2}, \quad (4)$$

其中 ω_{pi} 为等离子体频率, ν_{eni} 为等离子体碰撞频率.对于磁化等离子体^[5]

$$\bar{\epsilon}_{ri} = 1 - \frac{\omega_{pi}^2 / \omega^2}{\left| 1 - j\nu_{eni} / \omega - \frac{\omega_{cei}^2 / \omega^2}{1 - \omega_{pi}^2 / \omega^2 - j\nu_{eni} / \omega} \right|^2}, \quad (5)$$

其中 ω_{cei} 为电子回旋频率.

已知第 n 层介质内入射波,由于第一介质层内电场与磁场强度为零,因此 n 层介质内有 $\mathcal{X}(n-2)+1$ 个振幅 A_i ($i=2, 3, \dots, n-1$), B_i ($i=2, 3, \dots, n$)为未知量,需要根据 $\mathcal{X}(n-2)+1$ 个等离子体边界面上电场、磁场连续条件确定.这里仅仅关心第 n 层与第 $n-1$ 层交界面上的功率反射系数,所以无须求解电磁场振幅.

在 $x=0$ 的交界面上,等效输入阻抗为

$$Z_{in}^{(1)} = 0, \quad (6)$$

在 $x=d$ 的交界面上,

$$\begin{aligned} Z_{in}^{(2)} &= \frac{E_{2z}}{H_{2y}} \Big|_{x=d} = \frac{A_2 e^{jk_2 d \cos \theta_2} + B_2 e^{-jk_2 d \cos \theta_2}}{A_2 e^{jk_2 d \cos \theta_2} - B_2 e^{-jk_2 d \cos \theta_2}} Z_2 \\ &= \frac{Z_{in}^{(1)} - jZ_2 \tan[(k_2 \cos \theta_2) - d]}{Z_2 - jZ_{in}^{(1)} \tan[(k_2 \cos \theta_2) - d]} Z_2, \quad (7) \end{aligned}$$

Z_2 是第二层介质阻抗. 在该界面上, 法向电场强度与切向磁场强度连续, 所以

$$Z_{in}^{(2)} = \frac{E_{3z}}{H_{3y}} \Big|_{x=d} = \frac{A_3 e^{jk_3 d \cos \theta_3} + B_3 e^{-jk_3 d \cos \theta_3}}{A_3 e^{jk_3 d \cos \theta_3} - B_3 e^{-jk_3 d \cos \theta_3}} Z_3. \tag{8}$$

振幅反射系数为 $R_E^{(2)} = \frac{Z_{in}^{(2)} - Z_3}{Z_{in}^{(2)} + Z_3}$.

以此类推, 可以求解第 $n - 1$ 层与第 n 层交界

面上振幅反射系数为 $R_E^{(n-1)} = \frac{Z_{in}^{(n-2)} - Z_{n-1}}{Z_{in}^{(n-2)} + Z_{n-1}}$, 总功率

反射系数为 $R_{en} = |R_E^{(n-1)}|^2$.

考虑平行线极化波, $Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \cos \theta_i$.

4. 计算结果与分析

分析表明, 入射电磁波频率、等离子体厚度、等离子体频率或电子数密度、磁场强度或电子回旋频率等是影响电磁波沿垂直磁场方向传输在等离子体表面反射的参数. 针对这些参数的变化, 计算磁化等离子体表面电磁波功率反射系数的相应变化规律. 首先编制计算程序, 对文献 [11] 中的算例进行计算, 结果互相符合后, 再对入射波在金属平板前磁化等离子体边界上的功率反射系数进行计算.

4.1. 等离子体厚度对功率反射系数的影响

设入射波频率为 6GHz, 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 20 层, 当最大电子数密度分别取 $10^{14}, 10^{15}, 10^{16}, 10^{17}/m^3$ 时, 在不同磁场强度条件下, 计算线极化电磁波入射到等离子体表面时总功率反射系数随厚度 H 的变化曲线. 计算结果如下:

1) 图 3 至图 6 表明, 无论磁场强度、电子数密度如何变化, 等离子体厚度增加, 电磁波的功率反射系数都降低. 这是由于等离子体厚度增加相当于等效输入阻抗增加, 因而能够吸收更多的电磁波能量.

2) 图 3 表明, 当等离子体层两端电子数密度分别为 $10^{14}, 10^{13}/m^3$, 且无外磁场时, 随着等离子体厚度的增加, 电磁波几乎被全反射. 这是因为, 金属平板前等离子体频率分布在 1.5—1.1GHz 范围内, 与电磁波处于非谐振状态, 大部分电磁波能量被反射出去. 外加磁场后, 随等离子体厚度增加, 电磁波功率反射系数有所降低, 当外磁场 $B = 0.04T$ 时, 电磁

波功率反射系数降到最低. 这是因为, 此时电子回旋频率与入射电磁波频率相接近, 等离子体接近于电子回旋共振状态, 被反射的电磁波能量降低. 等离子体层两端电子数密度分别为 $10^{15}, 10^{14}/m^3$ 时, 有同样的现象及其原因 (图 4).

3) 图 5 说明, 当等离子体层两端电子数密度分别为 $10^{16}, 10^{15}/m^3$, 且无外磁场时, 随着等离子体厚度增加, 大部分电磁波能量被吸收. 这是因为, 此时金属平板前等离子体的频率分布在 5.4—0.5GHz 范围, 与入射电磁波接近于谐振状态, 6GHz 电磁波在等离子体中传输时几乎处于通带. 当外磁场强度在 0.02—0.04T 范围内时, 功率反射系数进一步降低. 这是因为, 此时电子回旋频率接近电磁波频率, 等离子体能够吸收更多的电磁波能量.

4) 图 6 说明, 当等离子体层两端电子数密度分别为 $10^{17}, 10^{16}/m^3$, 且无外磁场时, 随着等离子体厚度增加, 大部分电磁波能量被吸收. 这是因为, 此时金属平板前等离子体频率分布在 18—5.6GHz 范围, 有一部分等离子体层与入射电磁波处于谐振状态, 6GHz 电磁波在其中传输时处于通带. 外加磁场后, 功率反射系数反而增加. 这说明, 等离子体与电磁波共振条件是控制功率反射系数的主要因素.

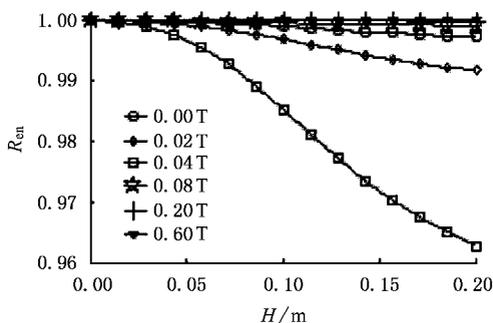


图 3 不同磁场强度下, 功率反射系数随等离子体厚度变化 ($N_2 = 10^{14}, N_{e1} = 10^{13}/m^3$)

4.2. 不同电磁波频率下, 磁场强度对功率反射系数的影响

设等离子体层厚度为 0.05m, 两端电子数密度分别为 $10^{16}, 10^{15}/m^3$, 在不同电磁波频率下, 计算线极化电磁波入射到磁化等离子体表面时总功率反射系数随磁场强度变化曲线如图 7 所示. 在图上可以看出:

对应 8, 16, 24, 32GHz 的电磁波频率, 分别存在最佳磁场强度 0.04, 0.07, 0.14, 0.18T, 这时等离子

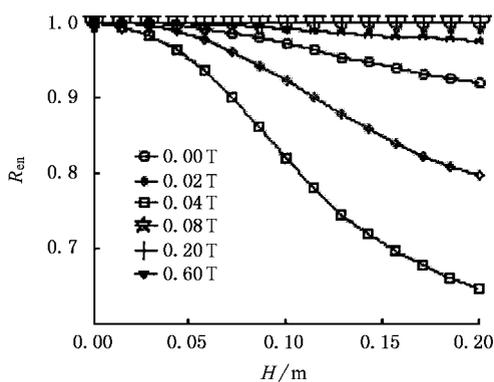


图 4 不同磁场强度下,功率反射系数随等离子体厚度变化 ($N_e = 10^{15}$, $N_{e1} = 10^{14}/m^3$)

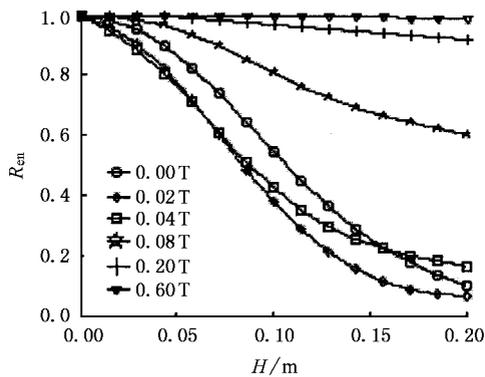


图 5 不同磁场强度下,功率反射系数随等离子体厚度变化 ($N_e = 10^{16}$, $N_{e1} = 10^{15}/m^3$)

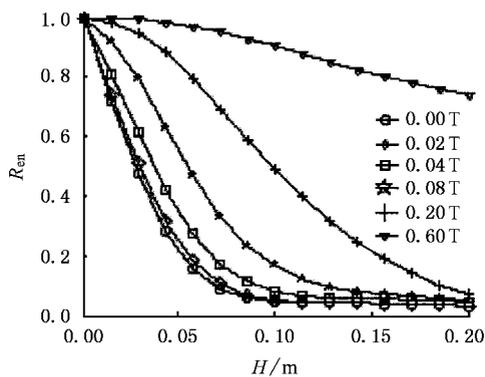


图 6 不同磁场强度下,功率反射系数随等离子体厚度变化 ($N_e = 10^{17}$, $N_{e1} = 10^{16}/m^3$)

体表面对电磁波功率反射最小.在 8,16,24,32GHz 的电磁波频率上,要使等离子体处于电子回旋谐振状态,外加磁场强度必须为 0.045,0.09,0.135,0.18T,正符合电子回旋共振吸收电磁波能量的现象.

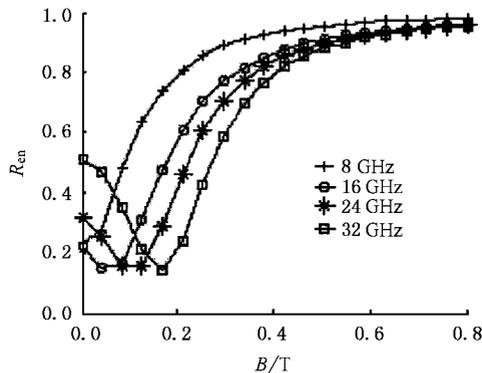


图 7 不同电磁波频率下,功率反射系数随磁场强度的变化

5. 结 论

1. 电磁波垂直入射磁化等离子体层,将产生寻常与非寻常特征波,如果条件合适,磁化等离子体只能传输寻常波,可采用非磁化等离子体中电磁波传输的计算方法计算磁化等离子体中垂直磁场传输的寻常电磁波.

2. 本文的计算分析表明,等离子体厚度、电子数密度、入射波频率、外磁场是影响功率反射系数的主要因素.等离子体厚度增加,等效输入阻抗增加,从而可以吸收更多的电磁波能量.等离子体电子数密度不同时,外磁场对功率反射系数产生不同的影响,如果电子数密度较低,等离子体频率低于电磁波频率,外加磁场有利于降低功率反射系数.如果电子数密度比较合适,等离子体频率接近电磁波频率,外加磁场反而不能降低电磁波功率反射系数.入射电磁波频率增加时,可以明显降低功率反射系数的外加磁场范围增加.

因此要使磁化等离子体能够产生较强的电磁波吸收效应,必须协调好等离子体参数(数密度和碰撞频率)、外磁场强度、入射电磁波频率之间的关系.



- [1] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 733
- [2] Laroussi M and Roth J R 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **21** 366
- [3] Hu B J , Wei G and Lai S L 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 1131
- [4] Cao J Z , Li J Z and Chen G R 2002 *Chinese Journal of Radio Science* **4** 125 (in Chinese) [曹建章、李景镇、陈国瑞 2002 电波科学学报 **4** 125]
- [5] Sun A P *et al* 2002 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **3** 135 (in Chinese) [孙爱萍等 2002 核聚变与等离子体物理 **3** 135]
- [6] Liu M H *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1317 (in Chinese) [刘明海等 2002 物理学报 **51** 1317]
- [7] Tang D L , Sun A P and 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] Su W Y *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3101 (in Chinese) [苏伟仪等 2003 物理学报 **52** 3102]
- [9] Liu S B , Mo J J and Yuan N C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 783 (in Chinese) [刘少斌、莫锦军、袁乃昌 2004 物理学报 **53** 783]
- [10] JI. M. 布列霍夫斯基赫 1960 分层介质中的波 (科学出版社)
- [11] Yuan J H and Mo H D 1990 *The Wave in Plasma* (in Chinese) [袁敬阔、莫怀德 1990 等离子体中的波 (成都 : 电子科大出版社)]

Calculation of the wave reflecting characteristics of magnetized plasma surface^{*}

Yang Juan Zhu Liang-Ming Su Wei-Yi Mao Gen-Wang

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

(Received 5 August 2004 ; revised manuscript received 8 September 2004)

Abstract

The total wave energy reflectance of the interface between the magnetized plasma before a conductor plate and the atmosphere or vacuum can be calculated by using the equivalent input impedance method. The result is that the reflection characteristics can be affected by electron numerical density , magnetized plasma thickness , incidence wave frequency and magnetic intensity. Magnetic field can reduce wave energy reflectance obviously only when the electron numerical density is of an appropriate value. The increased frequency of the incident wave must accompany the augmented magnetic intensity , which is the condition that magnetized plasma will absorb more energy of the electromagnetic wave.

Keywords : electromagnetic wave propagation in plasma , plasma basic properties , electromagnetic moments

PACC : 5240D , 5225 , 2110K

* Project supported by the Innovative of Northwestern Polytechnic University.