

太赫兹波斜入射均匀非磁化等离子体中 传输特性研究

董群锋^{1,2}, 向宁静¹, 李俊杰², 张辉¹

(1. 咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安工业大学 理学院, 西安 710100)

摘要: **目的** 研究太赫兹波斜入射均匀非磁化等离子体中的传输特性。**方法** 根据分层介质中的电磁波传播理论, 给出了等离子体中太赫兹波的功率反射和透射系数, 分析了太赫兹波频率、入射角、等离子体的碰撞频率和电子密度对太赫兹波传输特性的影响。**结果** 垂直入射时, 模型结果与已有文献结果一致; 斜入射时, 入射角度增大, 反射系数增大, 透射系数变小。太赫兹波频率增大, 反射系数减小, 透射系数起初快速增大, 而后变得平缓。等离子体的电子密度增大, 透射系数减小, 碰撞吸收增大, 太赫兹波衰减增大。**结论** 入射角变大, 反射率增大。太赫兹波频率较低时, 入射角对透射率影响明显。

关键词: 太赫兹波; 非磁化等离子体; 入射角; 反射和透射

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.01.023; A

文章编号: 1672-9242(2019)01-0118-04

Characteristics of Oblique Incident Terahertz Wave Propagation in Uniform Unmagnetized Plasma

DONG Qun-feng^{1,2}, XIANG Ning-jing¹, LI Jun-jie², ZHANG Hui¹

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China;

2. School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: Objective To research transfer characteristics of terahertz (THz) electromagnetic wave propagation in the unmagnetized plasma. **Methods** According to the theory of electromagnetic wave propagation in layered medium, the TE reflection and transmission coefficients were given. The effects of the incident angle and frequency of terahertz wave as well as collision frequency and electron density of plasma on the reflection and transmission were discussed. **Results** It was found that there were in good agreement with values of TE reflection and transmission obtained by the existing formulas and proposed models on normal incidence. With the increase of incident angle, the reflection coefficient increased and the transmission coefficient decreased during oblique incidence. With the increase of wave frequency, the reflection coefficient decreased and the transmission coefficient initially increased quickly, and then flattened. With the increase of the electron density, the transmission coefficient decreased, the absorption increased and the THz wave attenuation increased. **Conclusion** The incident angle increases, the reflectance coefficient becomes bigger. When the terahertz wave frequency is low, the incident angle has obvious influence on the transmission.

KEY WORDS: terahertz electromagnetic wave; unmagnetized plasma; incident angle; reflection and transmission

收稿日期: 2018-06-03; 修订日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61102018); 陕西省教育厅专项科研项目(18JK0833); 中国博士基金项目(2014M562371); 咸阳师范学院青蓝计划人才培养项目(批准号: XSYQL201609)

作者简介: 董群锋(1977—), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播。

太赫兹 (THz) 波是指频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 太赫兹波处于微波波段和红外波段之间, 具有很多独特的性质和优点, 如: 时空相干性、穿透性、安全性、宽带性以及瞬态性, 目前尚未被完全开发, 因而该频段被称为“THz Gap (太赫兹鸿沟)”^[1]。与微波波长相比, 太赫兹波段有更大的带宽, 因而传输效率更高, 这些特性使得太赫兹波在雷达探测、宽带通信、大气与环境监测等领域具有良好的应用前景^[2]。

空间飞行器以超高声速再入大气层时遇到的通信中断即“黑障”问题^[3-5]一直都是人们关注的难题, 国内外学者做了许多研究工作, 大多集中于微波频段 (频率小于 100 GHz)^[6-10]。近年来, 利用 THz 波来穿透等离子体鞘套也成为解决“黑障”问题的一种有效办法, 太赫兹波在等离子体中的传播特性倍受关注。刘少斌等应用 WKB 方法研究了 THz 波段非磁化等离子体覆盖目标的电磁特性^[11]。陈文波等研究了 THz 波在时变非磁化等离子体中的传播特性^[12]。袁承勋研究了高温非磁化等离子体中 THz 波的传播特性^[13]。郑灵等人研究了均匀非磁化等离子体中 THz 波的反射、透射和衰减特性^[14]。田媛等人研究了非均匀碰撞等离子体的 THz 波的传播特性^[15]。文献[16-17]研究了太赫兹波在磁化等离子体中的传输特性。Jamison 等人通过太赫兹时域光谱技术对等离子体的传播特性进行了实验测量^[18]。文中对太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传输特性进行了理论研究, 建立了非磁化均匀等离子体中太赫兹波的反射和透射系数模型, 并与已有的模型进行了比较, 分析了太赫兹波频率、入射角、等离子体电子密度等因素对 THz 波传播特性的影响。

1 等离子体的介电常数

冷的、非磁化等离子体的相对介电常数为^[14]:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{w_p^2}{w^2 + v_{en}^2} - i \frac{v_{en}}{w} \frac{w_p^2}{w^2 + v_{en}^2} \quad (1)$$

式中: w_p 为等离子体频率, $w_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$; n_e 为电子密度; e 为电子电量; m_e 为电子质量; ϵ_0 为真空中的介电常数; v_{en} 为碰撞频率; w 为电磁波角频率。

2 物理模型

如图 1 所示, 平面电磁波从空气入射到分界面 $z = z_0$ 的区域 0, 在区域 0 中有入射波和反射波。区域 1 填充等离子体, 区域 2 中无反射波, 只有透射波, 即 $A_2=0$ 。

入射波可表示为^[19]:

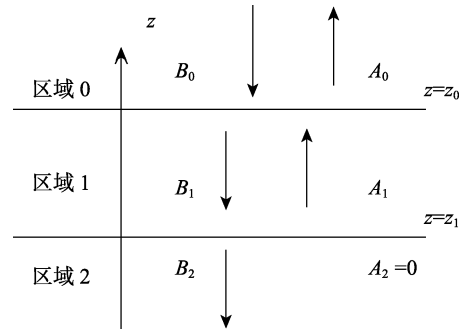


图 1 毫米波在等离子体传播

$$E_i = E_0 \exp(ik_{0x}x - ik_{0z}z) \quad (2)$$

对于 TE 波, 在区域 1 中既有上行波, 又有下行波, 将区域 1 的总电磁场表示为:

$$E_{1y} = [A_1 \exp(ik_{1z}z) + B_1 \exp(-ik_{1z}z)] \exp(ik_x x) \quad (3)$$

$$H_{1x} = \frac{1}{-i\omega\mu_1} \frac{\partial E_{1y}}{\partial z} \quad (4)$$

$$H_{1z} = \frac{1}{i\omega\mu_1} \frac{\partial E_{1y}}{\partial x} \quad (5)$$

于是, 区域 1 中上行波和下行波幅值大小之比为:

$$\frac{A_1}{B_1} = R_{12} \exp(-i2k_{1z}z_1) \quad (6)$$

式中: R_{12} 表示区域 1 到区域 2 之间的反射系数。令 $z_0 = 0$, 区域 0 分界面处的反射系数表示为:

$$r = \frac{A_0}{B_0} = \frac{R_{01} + R_{12} \exp(-i2k_{1z}z_1)}{1 + R_{01}R_{12} \exp(-i2k_{1z}z_1)} \quad (7)$$

式中: k_{1z} 为等离子体中波数 k 在 z 方向的分量,

$$k_{1z} = \sqrt{k^2 - (k_0 \sin \theta_i)^2}; \theta_i \text{ 为电磁波的入射角}; R_{01} \text{ 和}$$

$$R_{12} \text{ 可由 } R_{l(l+1)} = \frac{1 - p_{l(l+1)}}{1 + p_{l(l+1)}}, \quad p_{l(l+1)}^{\text{TE}} = \frac{\mu_l k_{(l+1)z}}{\mu_{l+1} k_{lz}}, \quad l=0,$$

1, 2 来计算。

对于垂直入射有:

$$R_{01} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (9)$$

于是, 将式(8)和(9)代入(7), 可导出:

$$r = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \epsilon_r + 2\sqrt{\epsilon_r} \coth(ik_{1z}z_1)} \quad (10)$$

这与郑灵给出的结论一致^[14], 表明文中结论的正确性。

透射系数定义为:

$$t = B_2 / B_0 \quad (11)$$

应用边界条件和(11), 可导出透射系数为:

$$t = \frac{4 \exp[-i(k_{2z} - k_{1z})z_1]}{(1 + p_{01})(1 + p_{12})[1 + R_{01}R_{12} \exp(i2k_{1z}z_1)]} \quad (12)$$

式中： $p_{l(l+1)} = \mu_l k_{(l+1)z} / \mu_{l+1} k_{lz}$ 。

因此，等离子体中太赫兹波的反射率、透射率和衰减为^[14]：

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad At = -10 \lg T \quad (13)$$

3 数值计算

为验证公式的正确性，取太赫兹波频率 0.1~1.0 THz，等离子体的碰撞频率为 0.01 THz，等离子体的厚度为 0.08 m，电子密度为 10^{17} m^{-3} 。利用文中公式 (Proposed formula) 数值计算太赫兹波垂直入射时等离子体中传播的反射率和透射率，并与已有文献模型 (Zheng et al's formula) 的结果进行比较^[14]。

太赫兹波从空气垂直入射等离子体时的反射率和透射率如图 2 和图 3 所示。可以看出，文中公式计算结果与郑灵等人的模型结果完全吻合，验证了公式的正确性。

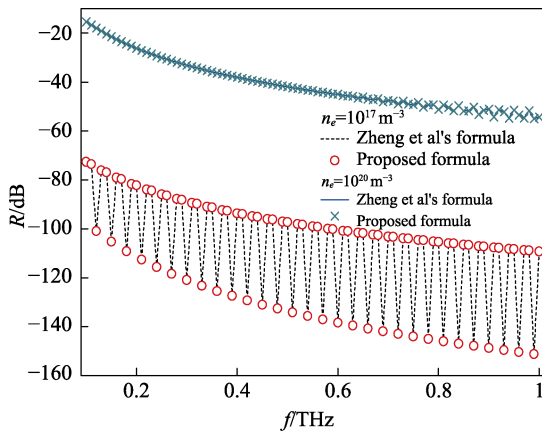


图 2 文中公式与文献模型的反射率结果比较

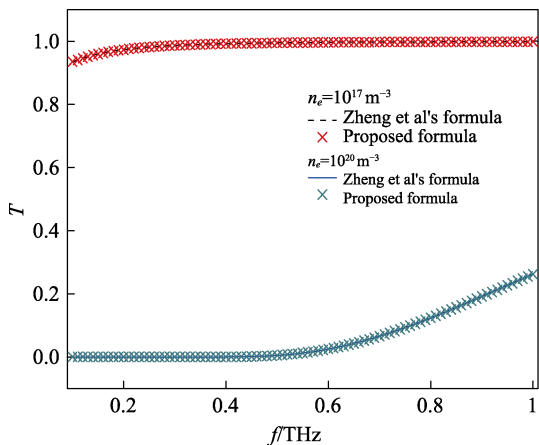


图 3 文中公式与文献模型的透射率结果比较

在等离子体的碰撞频率为 0.1 THz，入射角分别为 0° 、 25° 、 50° 、 75° 时，计算了入射角对太赫兹

波反射、透射特性的影响，结果如图 4 和图 5 所示。

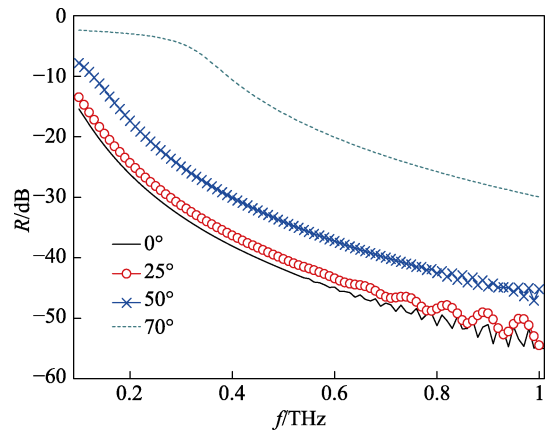


图 4 太赫兹波入射角对反射率的影响

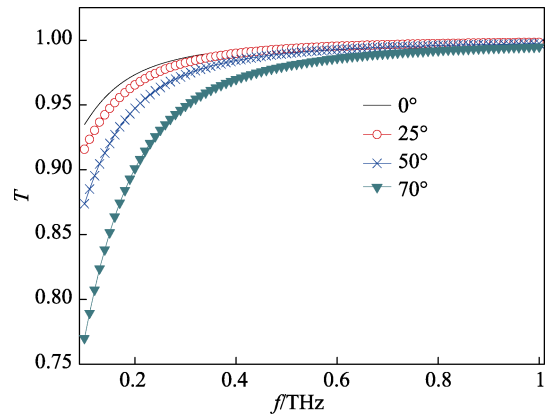


图 5 太赫兹波入射角对透射率的影响

从图 4 可以看出，反射率随入射角的增大而增大， $\theta = 0^\circ$ 时反射率最小。对于同一入射角，太赫兹波频率增大，反射率减小。图 5 表明，太赫兹频率在 0.1~0.4 THz 时，电磁波入射角对透射率的影响较为明显，入射角增大，透射率减小。太赫兹波频率增大，透射率增大。当太赫兹波频率大于 0.4 THz 时，入射角和频率对透射率的影响明显很小。

电子密度分别为 10^{17} 、 10^{18} 、 10^{19} 、 10^{20} m^{-3} ，等离子体的碰撞频率为 0.01 THz 时，计算了等离子体的密度对太赫兹波透射的影响，如图 6 所示。可以看出，等离子体的电子密度增大，透射率减小。这是因为等离子体中有更多的电子吸收了电磁波能量并传递给中性粒子，导致传输的能量减小。

4 结论

文中研究了斜入射太赫兹波对等离子体的传播特性的影响。计算结果表明，在垂直入射时，文中给出的功率反射率和透射率与已有模型计算结果完全一致，验证了文中模型的有效性。入射角变大，反射率增大。太赫兹波频率较低时，入射角对透射率影响明显。太赫兹波频率增大，反射率减小，透射率起初

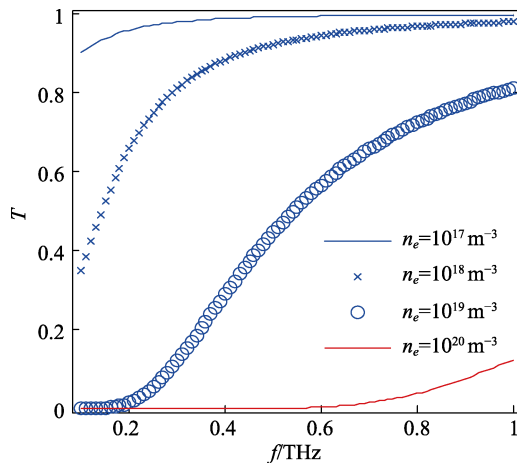


图6 电子密度对透射率的影响

快速增大,而后变得平缓。与此同时,在相同的条件下,等离子体的电子密度增大,透射率减小,碰撞吸收增大,太赫兹波衰减增大。

参考文献:

- [1] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107.
- [2] YU X, JIA S, HU H, et al. 160 Gbit/s Photonics Wireless Transmission in the 300~500 GHz Band[J]. *Apl Photonics*, 2016, 1(8): 371-376.
- [3] SHI L, GUO B, LIU Y, et al. Characteristic of Plasma Sheath Channel and Its Effect on Communication[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 123(3): 321-336.
- [4] WANG M, LI H, DONG Y, et al. Propagation Matrix Method Study on THz Waves Propagation in a Dusty Plasma Sheath[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015, 64(1): 286-290.
- [5] SONG Z, LIU J, DU Y, et al. The Modeling and Simulation of Plasma Sheath Effect on GNSS System[J]. *Applied Physics A*, 2015, 121(3): 1067-1073.
- [6] 陈禹旭, 赵青, 薄勇, 等. 等离子体鞘层中电磁传输特性的数值仿真和实验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 290-294.
- [7] JIN F Y, TONG H H, SHI Z B, et al. Effects of External Magnetic Field on Propagation of Electromagnetic Wave in Uniform Magnetized Plasma Slabs[J]. *Computer Physics Communications*, 2006, 175: 545-552.
- [8] HU B J, WEI G, LAI S L. SMM Analysis of Reflection, Absorption, and Transmission from Nonuniform Magnetized Plasma Slab[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, 27(4): 1131-1136.
- [9] 李江挺, 郭立新. 等离子体鞘套中的电波传播特性研究[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(3): 494-500.
- [10] 林敏, 徐浩军, 魏小龙. 电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(5): 313-319.
- [11] LIU Shao-bin, ZHOU Tao, LIU Mei-lin, et al. Wentzel-Kramer-Brillouin and finite-difference Time-Domain Analysis of Terahertz Band Electromagnetic Characteristics of Target Coated with Unmagnetized Plasma[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(1): 15-20.
- [12] 陈文波, 龚学余, 邓贤君, 等. THz 电磁波在时变非磁化等离子体中的传播特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 74-79.
- [13] YUAN C, ZHOU Z, XIANG X, et al. Propagation Properties of Broadband Terahertz Pulses through a Bounded Magnetized Thermal Plasma[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research B*, 2011, 269(1): 23-29.
- [14] ZHENG L, ZHAO Q, LIU S Z, et al. Studies of Terahertz Wave Propagation in Non-magnetized Plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 514-518.
- [15] TIAN Y, HAN Y P, LING Y J, et al. Propagation of Terahertz Electromagnetic Wave in Plasma with Inhomogeneous Collision Frequency[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(2): 1768-1775.
- [16] 陈春梅, 摆玉龙, 张洁, 等. 太赫兹波斜入射到磁化等离子体的数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(1): 45-49.
- [17] 周天翔, 陈长兴, 蒋金, 等. 太赫兹波在磁化等离子体中传输特性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(7): 97-101.
- [18] JAMISON S P, SHEN J, JONES D R, et al. Plasma Characterization with Terahertz Time-domain Measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(7): 4334-4336.
- [19] 葛德彪, 魏兵. 电磁波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.