

文章编号: 2095-4980(2018)01-0038-05

太赫兹波在均匀磁化等离子体中的传播特性

董群锋^{1,2}, 郭立新², 李应乐³, 王明军¹, 张希¹, 郝艳华¹

(1.咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2.西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
3.陕西学前师范学院 科技处, 陕西 西安 710100)

摘要: 研究了太赫兹波通过均匀磁化等离子体的传播特性, 给出了太赫兹波衰减和相移随等离子体密度、碰撞频率、太赫兹波频率和磁感应强度的变化规律。等离子体电子密度越大, 衰减和相移越大; 随着碰撞频率的增大, 电磁波的衰减先增加到峰值后逐渐减小, 且随着磁感应强度的增加, 衰减的峰值变大, 峰值向碰撞频率减小的方向移动; 当电子碰撞频率接近电磁波频率时等离子体对右旋极化波的衰减达到极大值。太赫兹波频率增大, 衰减逐渐减小, 而相移先增加后逐渐减小。

关键词: 太赫兹波; 等离子体; 衰减; 相移

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0038

Terahertz electromagnetic wave propagation in uniform magnetized plasma

DONG Qunfeng^{1,2}, GUO Lixin², LI Yingle³, WANG Mingjun¹, ZHANG Xi¹, XI Yanhua¹

(1.Department of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China;
2.School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;
3.Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: The propagation of terahertz electromagnetic wave in uniform magnetized plasma is investigated. The relationship among terahertz wave attenuation, phase shift and the plasma density, collision frequency, wave frequency and magnetic field strength are obtained. The attenuation and phase shift increase with the increasing of plasma density, and the attenuations first increase to peak value and then decrease with the increasing of collision frequency. When the magnetic field strength increases, the value of peak increases and the peaks move toward lower collision frequency. And when the collision frequency is close to wave frequency, the attenuation of right polarization wave reaches a maximum value. With the increase of wave frequency, the attenuation decreases, and phase shift firstly increases, and then decreases.

Keywords: terahertz wave; plasma; attenuation; phase shift

电磁波与等离子体的相互作用研究, 一直是人们关注的重要课题, 主要因为等离子体中电波传播在飞行器隐身、无线通信、等离子诊断等方面有着重要应用^[1-6]。飞行器的等离子体隐身、空间飞行器以超高声速再入大气层时遇到的“黑障”问题等成为研究热点^[7], 因此研究电磁波在等离子体中的传播特性具有重要意义和应用价值。国内外学者做了许多研究工作, 主要是基于时域有限差分方法等数值计算^[3,8-10]以及基于解析分析^[3,11]的研究工作。然而, 等离子体与电磁波相互作用方面的工作大多集中于微波频段(频率小于 0.1 THz)。

目前国际通讯联盟已指定 0.2 THz 频段为下一步卫星间通信之用^[12], 因此研究太赫兹(Terahertz, THz)波在等离子体中的传播特性具有重要的意义。刘少斌等应用 WKB(Wentzel-Kramers-Brillouin)方法研究了 THz 波段非磁化等离子体覆盖目标的电磁特性^[13]; 袁承勋研究了高温非磁化等离子体中 THz 波的传播特性^[14]; 郑灵等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^[15-16]; 田媛等研究了非均匀碰撞等离子体的 THz 波的传播特性^[17]; 李拴涛等研究了太赫兹波在非磁化、非均匀等离子体鞘套中的传输特性^[18]; Jamison 等通过实验测得了 He 等离子体的衰减和相移^[19]; Kolner 研究了 THz 脉冲在等离子体中的传输特性^[20]。

收稿日期: 2016-12-19; 修回日期: 2017-10-12

基金项目: 中国博士后基金资助项目(2014M562371); 陕西省自然科学基金资助项目(2014JM8312); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201410722024); 咸阳师范学院青蓝计划人才培养资助项目(XSYQL201609)

本文利用解析法研究了 THz 波在均匀磁化等离子体中的传播特性,分析了等离子体密度、碰撞频率等因素对 THz 波传播衰减和相移的影响。

1 基本理论

考虑时间因子为 $e^{j\omega t}$ 的平面电磁波,其在等离子体等损耗媒质中的传播服从麦克斯韦方程组^[3]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0)\mathbf{E} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{H}$ 为磁场强度; ω 为电磁波角频率; ϵ_r 为媒质的相对介电常数; σ 为媒质的电导率; ϵ_0 为真空中的介电常数; μ_0 为真空磁导率。

波动方程可表示为:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\tilde{\epsilon}_r}{c^2} \omega^2 \mathbf{E} \quad (3)$$

式中: $\tilde{\epsilon}_r$ 为复相对介电常数, $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$; c 为真空中的波速度。

可得到入射波的电场为:

$$\mathbf{E} = E_0 \exp(j\omega t - \tilde{\gamma}z) \quad (4)$$

式中: $\tilde{\gamma}$ 为传播常数; E_0 为入射波电场振幅; z 为电磁波正向传播方向。

等离子体中的传播常数为^[15]:

$$\tilde{\gamma} = \alpha + j\beta = j(\tilde{\epsilon}_r)^{1/2} \frac{\omega}{c} \quad (5)$$

式中: α 为衰减系数; β 为相移系数。

2 磁化等离子体中 THz 波的传播特性

2.1 磁化等离子体的介电常数

等离子体中 THz 波的传输如图 1 所示。当平面电磁波的传播方向与磁场方向一致时(夹角 $\theta=0^\circ$),磁化等离子体的复相对介电常数为^[3-4]:

$$\tilde{\epsilon}_r = \left\{ 1 - \frac{\omega_p^2(\omega \pm \omega_b)}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\} - j \left\{ \frac{\omega_p^2 \nu_{en}}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\} \quad (6)$$

式中: ω_p 为等离子体频率; ν_{en} 为碰撞频率, $\nu_{en} = 2\pi f_{en}$, f_{en} 是电子与中性粒子的碰撞频率; ω_b 为电子回旋频率; “-” 号表示右旋极化波, “+” 号表示左旋极化波。

2.2 磁化等离子体的 THz 波的衰减和相移

由式(5)和(6)可得 THz 波在磁化等离子体中的衰减系数和相移系数分别为:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left[-\frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\omega_p^2(\omega \pm \omega_b)}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\} + \frac{1}{2} \left(\left\{ 1 - \frac{\omega_p^2(\omega \pm \omega_b)}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\}^2 + \left\{ \frac{\omega_p^2 \nu_{en}}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\}^2 \right)^{1/2} \right] \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\omega_p^2(\omega \pm \omega_b)}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\} + \frac{1}{2} \left(\left\{ 1 - \frac{\omega_p^2(\omega \pm \omega_b)}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\}^2 + \left\{ \frac{\omega_p^2 \nu_{en}}{\omega[(\omega \pm \omega_b)^2 + \nu_{en}^2]} \right\}^2 \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

等离子体中电磁波衰减 A 和传播的相移 ϕ 分别为^[2,7]:

$$A = 8.686\alpha d \quad (9)$$

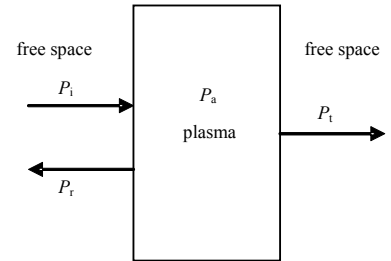


Fig.1 Schematic diagram of the THz wave propagation
图 1 等离子体中太赫兹波传输示意图

$$\varphi = \beta d - \frac{\omega d}{c} \quad (10)$$

式中 d 为等离子体的厚度。

3 数值计算与结果分析

以下给出右旋极化 THz 波通过均匀磁化等离子体中的衰减和相移的数值结果。

3.1 等离子体衰减

取等离子体的电子密度分别为 $n_e=10^{17} \text{ m}^{-3}, 10^{18} \text{ m}^{-3}, 10^{19} \text{ m}^{-3}, 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 $f_{en}=0.1 \text{ THz}$, 等离子体的厚度 $d=0.08 \text{ m}$, 磁感应强度 $B=1.0 \text{ T}$ 时, THz 波衰减随电子密度的变化关系如图 2 所示。由图可以得出, 电子密度越大, 衰减越大, 这是由于等离子体密度增加时, 更多的电子从电场吸收能量, 并通过碰撞传给了中性粒子, 使得电磁波衰减增加。THz 波频率增大, 衰减逐渐减小, 这是由于电磁波频率增加时, 电磁波的电场变化太快, 此时等离子体中的电子来不及响应如此快速变化的电场, 因而吸收的电磁波能量减小, 从而导致电磁波衰减下降^[16]。

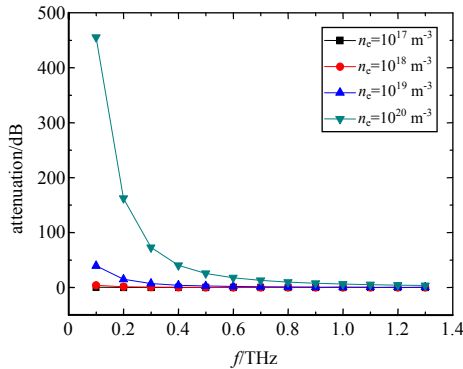


Fig.2 THz wave attenuation in different electron densities
图 2 不同电子密度下的太赫兹波衰减

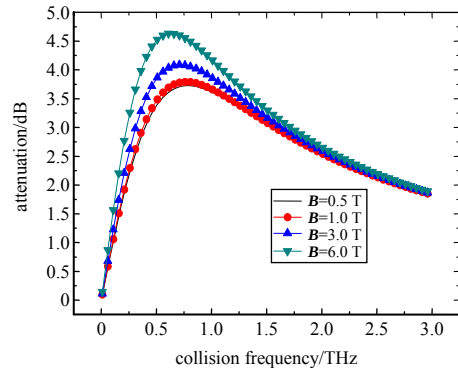


Fig.3 THz wave attenuation in different magnetic fields
图 3 不同磁感应强度下的太赫兹波衰减

取等离子体的电子密度为 $n_e=10^{19} \text{ m}^{-3}$, 电磁波频率为 0.8 THz , 等离子体的厚度 $d=0.08 \text{ m}$, 磁感应强度为 $B=0.5 \text{ T}, 1.0 \text{ T}, 3.0 \text{ T}, 6.0 \text{ T}$ 时, 等离子体的衰减随外加磁感应强度变化情况如图 3 所示。由图可以得出, 随着碰撞频率的增大, 电磁波的衰减先增加到峰值后逐渐减小, 且随着磁感应强度的增加, 衰减的峰值变大, 峰值向碰撞频率减小的方向移动。这是由于等离子体碰撞频率增加时, 电子与中性粒子的碰撞概率增加, 从而通过碰撞传给中性粒子的能量也增加, 因此电磁波衰减增加; 而当碰撞频率过高时, 电子在碰撞前被电场加速的时间很短, 尚未来得及从电场获取更多的能量, 便与中性粒子发生了碰撞, 因而碰撞频率过高时, 电磁波衰减反而下降^[21]。

取等离子体的碰撞频率为 0.1 THz , 电子密度 $n_e=10^{19} \text{ m}^{-3}$, 磁感应强度为 $B=1.0 \text{ T}$, 等离子体的厚度为 $d=0.08 \text{ m}, 0.12 \text{ m}, 0.16 \text{ m}, 0.2 \text{ m}$ 时, 等离子体的衰减随厚度的变化关系如图 4 所示。从图中可以看出, THz 波衰减随入射波频率的增大而减小。随着等离子体厚度增加, 太赫兹波与等离子体的作用距离增加, 衰减增加。

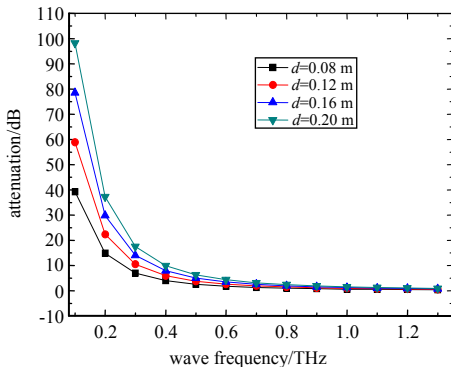


Fig.4 THz wave attenuation in different plasma thicknesses
图 4 不同等离子体厚度下的太赫兹波衰减

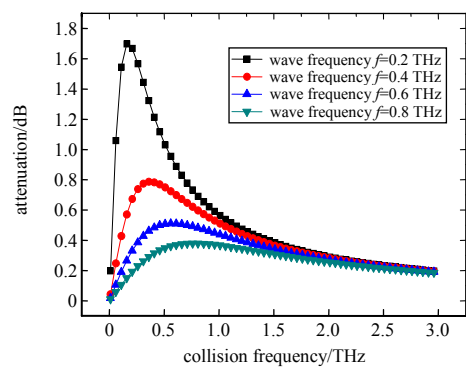


Fig.5 THz wave attenuation in different wave frequencies
图 5 不同频率下 THz 波的衰减

取等离子体的电子密度为 $n_e=10^{18} \text{ m}^{-3}$, 等离子体的厚度 $d=0.08 \text{ m}$, 磁感应强度为 $B=1.0 \text{ T}$, 电磁波频率为 $0.2 \text{ THz}, 0.4 \text{ THz}, 0.6 \text{ THz}, 0.8 \text{ THz}$ 时, 等离子体的衰减随入射波频率变化如图 5 所示。可以看出, 随着电磁波频

率增大,衰减减小;当电子碰撞频率接近电磁波频率时,等离子体对右旋极化波的衰减达到极大值,衰减峰值越小,其对应的碰撞频率越大。

3.2 等离子体相移

取等离子体的碰撞频率为 0.16 THz , 电子密度 $n_e=8.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 等离子体的厚度 $d=0.15 \text{ m}$, 磁感应强度为 $B=1.0 \text{ T}, 5.0 \text{ T}, 8.0 \text{ T}$ 时, 等离子体的相移随外加磁感应强度的变化关系如图 6 所示。从图中可以看出, 随入射波频率增加, 相移逐渐增大, 在等离子体频率附近相移达到最大值, 随后相移逐渐减小; 磁感应强度增大, 相移的极大值向入射波频率较高的方向移动。

取等离子体的碰撞频率为 0.16 THz , 磁感应强度为 $B=1.0 \text{ T}$, 等离子体的厚度 $d=0.15 \text{ m}$, 电子密度分别为 $n_e=1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}, 4.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}, 8.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时, 等离子体的相移随电子密度的变化关系如图 7 所示。可以得出, 在相同条件下, 电子密度越大, 相移越大。

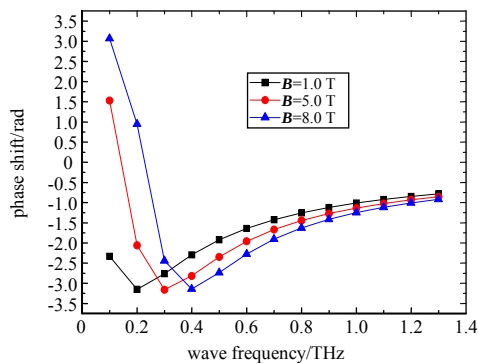


Fig.6 THz wave phase shift in different magnetic fields
图 6 不同磁感应强度下的太赫兹波相移

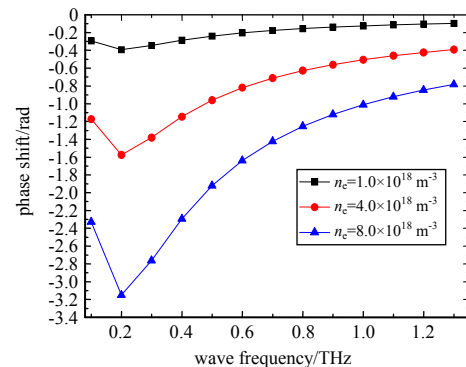


Fig.7 THz wave phase shift in different electron densities
图 7 不同电子密度下的太赫兹波相移

4 结论

本文对太赫兹波通过均匀磁化等离子体的传播特性进行了研究, 得到了等离子体密度、碰撞频率等因素对太赫兹波传播特性的影响规律。研究表明, 等离子体电子密度越大, 衰减越大; 随着碰撞频率的增大, 太赫兹波的衰减先增加到峰值后逐渐减小, 且随着磁感应强度的增加, 衰减的峰值变大, 峰值向碰撞频率减小的方向移动; 当电子碰撞频率接近电磁波频率时等离子体对右旋极化波的衰减达到极大值, 衰减峰值越小, 其对应的碰撞频率越大。THz 波频率增大, 衰减逐渐减小。电子密度越大, 相移越大; THz 波频率增加, 相移逐渐增大, 在等离子体频率附近相移先增加后逐渐减小; 磁感应强度增大, 相移的极大值向入射波频率较高的方向移动。本文研究结果为太赫兹雷达反等离子体隐身设计提供了重要参考。

参考文献:

- [1] PETRIN A B. Nonlinear interaction of microwave and plane magnetoactive plasma layer[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998,26(2):150-158.
- [2] 杨华,时家明,凌永顺. 电磁波在磁化等离子体上的反射特性研究[J]. 电波科学学报, 2001,16(2):196-199. (YANG Hua,SHI Jiaming,LING Yongshun. Studies of reflection characteristics of electromagnetic waves propagating into magnetized plasma[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001,16(2):196-199.)
- [3] TANG D L,SUN A P,QIU X M,et al. Interaction of electromagnetic waves with a magnetized nonuniform plasma slab[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003,31(3):405-410.
- [4] SHI J,YONG G,WANG J,et al. Electromagnetic reflection of conductive plane covered with magnetized inhomogeneous plasma[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2001,22(8):1167-1175.
- [5] 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.
- [6] LIU S B,MO J J,YUAN N C. Research on the absorption of EM-wave by inhomogeneous magnetized plasmas[J]. Acta Electronica Sinica, 2003,31(3):372-375.
- [7] 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. (LI Jiangting,GUO Lixin. EM wave propagation characteristic in plasma sheath[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(3):494-500.)

- [8] LUEBBERS R J, HUNSBERGER F, KUNZ K S. A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for transient propagation in plasma[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1991, 39(1): 29–34.
- [9] YANG H W, YUAN H, CHEN R S, et al. SO-FDTD analysis of anisotropic magnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(3): 1443–1446.
- [10] SUN Xin, LIU Yanan, LIU Yimin, et al. Study on the transmission properties of plasma sheath based on transfer matrix method[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(2): 194–200.
- [11] 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. (LIN Min, XU Haojun, WEI Xiaolong. Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(5): 313–319.)
- [12] CHEN W B, GONG X Y, DENG X J, et al. Propagation characteristics of THz electromagnetic waves in time varying unmagnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(19): 358–361.
- [13] LIU Shaobin, ZHOU Tao, LIU Meilin, et al. Wentzel–Kramér–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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ZHENG L, ZHAO Q, LIU S, et al. Theoretical and experimental studies of terahertz wave propagation in unmagnetized plasma[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, 35(2): 187–197.
- [17] 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.
- [18] 李拴涛, 李军, 朱忠博, 等. 等离子体鞘套中太赫兹波传输特性研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2): 203–207. (LI Shuantao, LI Jun, ZHU Zhongbo, et al. Studies on terahertz wave propagation in plasma sheath[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(2): 203–207.)
- [19] 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.
- [20] KOLNER B H, BUCKLES R A, CONKLIN P M, et al. Plasma characterization with terahertz pulses[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(2): 505–512.

作者简介:



董群锋(1977–), 男, 陕西省礼泉县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播. email: qunfengdong1028@163.com.

郭立新(1968–), 男, 西安市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂目标与地海环境电磁散射特性、随机介质中的电波传播特性、天线理论设计与微波技术等。

李应乐(1962–), 男, 陕西省蓝田县人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向电磁波传播与散射。

王明军(1979–), 男, 陕西省旬阳县人, 教授, 主要研究方向为电磁波传播与散射。

张 希(1993–), 男, 陕西省汉中市人, 在读本科生, 主要研究方向为信息处理。

郝艳华(1974–), 女, 陕西省蒲城县人, 副教授, 主要研究方向为信号处理。