

THz 波斜入射非均匀磁化等离子体的 衰减特性研究

李俊杰¹, 董群锋^{1,2}, 张辉^{1,2}, 武瑞青¹

(1. 西安工业大学 理学院, 西安 710021; 2. 咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: **目的** 研究太赫兹波在非均匀磁化等离子体中的衰减特性。**方法** 运用 WKB 近似法分析太赫兹波斜入射非均匀磁化等离子体后的衰减特征。**结果** 当入射角度增大时, 衰减增大; 当碰撞频率增大时, 衰减变小; 外加磁场强度增大时, 衰减的最大值向着太赫兹波频率较高的方向移动; 电子密度峰值增大时, 衰减增大。**结论** 可以通过调节外加磁场强度、等离子体电子密度和碰撞频率, 使得太赫兹波在等离子体中传播的过程中衰减发生变化, 为太赫兹雷达反等离子体隐身技术提供重要参考。

关键词: 太赫兹波; 非均匀等离子体; 磁化; 衰减特性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.017

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0104-04

Attenuation Characteristics of Inhomogeneous Magnetized Plasma with Oblique Incidence of THz Wave

LI Jun-jie¹, DONG Qun-feng^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, WU Rui-qing¹

(1. School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China)

ABSTRACT: Objective To study the attenuation characteristics of terahertz wave in inhomogeneous magnetized plasma. **Methods** The attenuation characteristics of terahertz wave inhomogeneous magnetized plasma with oblique incidence were analyzed with the WKB approximation method. **Results** The attenuation increased with the increase of the incident angle, and decreased with the increase of the collision frequency. When the intensity of external magnetic field increased, the maximum attenuation moved towards the higher frequency of terahertz wave. The attenuation increased with the increase of peak value of electron density. **Conclusion** The adscititious magnetic field intensity, the plasma electron density and the collision frequency can be adjust to change the attenuation process of THz wave propagation in plasma to provide a valuable reference for the plasma stealth technology.

KEY WORDS: terahertz wave; inhomogeneous plasma; magnetization; attenuation characteristics

太赫兹 (THz) 波是一种频率很高的电磁波, 它处于微波和远红外之间, 频率在 0.1~10 THz 这一范围内。太赫兹波与微波相比具有穿透性强、带宽更宽、

传输效率高的特点。太赫兹波本身具有低能量性、相干性、瞬态性以及很高的透射性, 较好的相干性、宽带性这些特点。目前来说, 太赫兹波尚未被完全开发,

收稿日期: 2019-04-08; 修订日期: 2019-05-17

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(18JK0833)

作者简介: 李俊杰 (1993—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要研究方向为等离子体中电磁波传播。

通讯作者: 董群锋 (1977—), 男, 陕西省礼泉县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播。

因此该波段叫做“太赫兹鸿沟”^[1-2]。

等离子体隐身技术是 20 世纪提出的一种非常规隐身技术,目前美俄等军事强国正在大力发展。这种技术的隐身机理实际上就是通过某种方法使飞行器的金属表层上能形成一层等离子体。电磁波在非均匀等离子体中的碰撞吸收很大,该种隐身技术使得电磁波在非均匀等离子体薄层内发生更多的吸收和折射,更少的反射,从而导致回波的能量降低,雷达更难发现目标^[3]。

近年来,等离子体与太赫兹波的相互作用受到研究人员的关注。Kolner 等人^[4]研究了 THz 脉冲在等离子体中的传输特性。Glyavin 等人^[5]研究了 THz 辐射的产生及其与等离子体和气体的相互作用。李茜等^[6]研究了太赫兹波对抗等离子体隐身技术。蒋金等^[7]研究了太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中的传播特性。陈文波等^[8]研究了 THz 电磁波在时变非磁化等离子体中的传播特性。杨玉明等^[9]研究了太赫兹雷达反等离子体隐身技术。郑灵等^[10]研究了太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传播特性。文献[11]研究了尘埃等离子体中太赫兹波传输特性。董群锋等^[12]研究了太赫兹波在均匀非磁化等离子体中的传播特性。陈春梅、周天翔等^[13-14]分别研究了均匀磁化等离子体中太赫兹波的传播特性。从目前研究来看,主要研究太赫兹波与非磁化等离子体、均匀等离子体的相互作用。文中应用 WKB 近似法研究了太赫兹波斜入射到非均匀磁化等离子体的衰减特性,分析了太赫兹波入射频率、碰撞频率、电子密度、入射角度、外加磁场强度等因素对太赫兹波在磁化非均匀等离子体中衰减特性的影响。

1 基本理论与物理模型

文中考虑的是非均匀磁化等离子体,太赫兹波在等离子体中的传输模型如图 1 所示^[15],其中 d 为等离子体厚度。

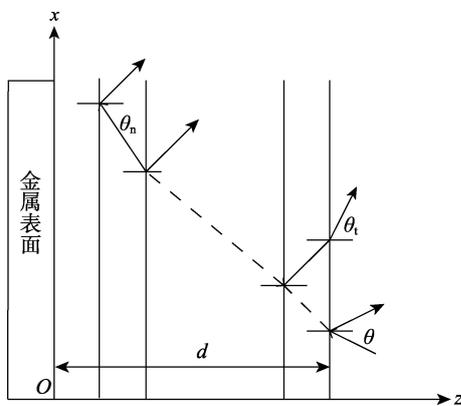


图 1 太赫兹波在非均匀等离子体中传输模型

在一维的情况下,磁化冷等离子体的相对介电常数 ϵ_r 为^[13]:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega - \omega_c}{\omega} \frac{\omega_p^2}{[(\omega - \omega_c)^2 + \nu_{en}^2]} - j \frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{[(\omega - \omega_c)^2 + \nu_{en}^2]} \quad (1)$$

式中: ω 为太赫兹波的入射频率; ω_p 为等离子体频率, $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e}$; ω_c 为电子回旋频率; e 为电子电量; n_e 为电子密度; ϵ_0 为真空介电常数; m_e 为电子质量; B 为磁场强度; ν_{en} 为有效碰撞频率。

平面电磁波的色散关系为^[15]:

$$k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

式中: k_0 为自由空间波数, $k_0 = \omega/c$ 。

令电磁波的入射角为 θ , 则在第 n 层等离子体的入射角和回波的出射角分别为 θ_n 、 θ_r 。根据斯菲涅尔定律有:

$$n_n \sin \theta_n = \sin \theta \quad (3)$$

式中: n_n 为第 n 层的等离子体折射率。当电场沿 y 方向时,非均匀磁化等离子体内电磁波的波动方程可写为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k_1^2 E_y = 0 \quad (4)$$

那么第 n 层内传播的电磁波的场量可表示为:

$$\exp \left[-j \frac{\omega}{c} n_n (x \sin \theta_n \pm z \cos \theta_n) \right] \quad (5)$$

式中: \pm 表示波的传播方向,向上或向下; x 、 y 表示极化的方向。

由式(4)可得出非均匀等离子体内电磁波的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + [k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n] E_y = 0 \quad (6)$$

式(6)的 WKB 解为:

$$E_y = E_0 \exp \left[\pm j \int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n} dz \right] \quad (7)$$

式中: E_0 为入射波电场强度; E_y 为电场沿 y 方向的强度。

当 $\alpha = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n}$ 时,则 WKB 解的有效条件为:

$$\left| \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\alpha^2} \frac{d\alpha}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2\alpha^3} \frac{d^2\alpha}{dz^2} \right| \ll 1 \quad (8)$$

由于金属边界的存在,当电磁波从 $z=d$ 处以 θ 入射到等离子体内部并在 $z=0$ 处被反射回来,则太赫兹波斜入射到非均匀磁化等离子体的双程衰减为^[15]:

$$Att = \left| 10 \lg \frac{P}{P_0} \right| = \left| 17.372 \operatorname{Im} \left(\int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n} dz \right) \right| \quad (9)$$

式中: p 表示透射功率; p_0 表示太赫兹波的入射功率; z 表示等离子体的厚度; k_1 为等离子体中的波数。

2 数值计算

等离子体中的电子密度分布是影响电磁特性的重要因素。通常情况下，等离子体的电子密度分布近似为 Epstein 分布，其表达式为^[16]：

$$n_e = \begin{cases} n_0 [1 + \exp(-(z-L/20)/\sigma_1)]^{-1} & 0 < z < L/10 \\ n_0 [1 + \exp(-(z-3L/4)/\sigma_2)]^{-1} & L/10 < z < L \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\sigma_1=0.1$ ； $\sigma_2=1.0$ ； n_0 为等离子体电子密度峰值； L 为等离子体厚度。以下仿真的电子密度峰值取为 10^{18} m^{-3} 。

2.1 外加磁场强度对太赫兹波在等离子体中衰减特性的影响

当等离子体厚度为 10 cm (分 10 层)，电子密度峰值为 10^{18} m^{-3} ，入射角为 30° ，碰撞频率为 0.3 THz，外加磁场强度分别取 3、5、7、9 T 时，外加磁场对太赫兹波衰减的影响如图 2 所示。可以看出，随着外加磁场的增大，衰减的最大值向着太赫兹波频率较高的方向移动。随着太赫兹波频率的增大，衰减先增大后减小。引起上述情况的原因是：在恒定磁场下，等离子体中自由振荡的电子将会以一定的回旋频率在与磁场线垂直的平面内做圆周运动，电子运动将会被限制。

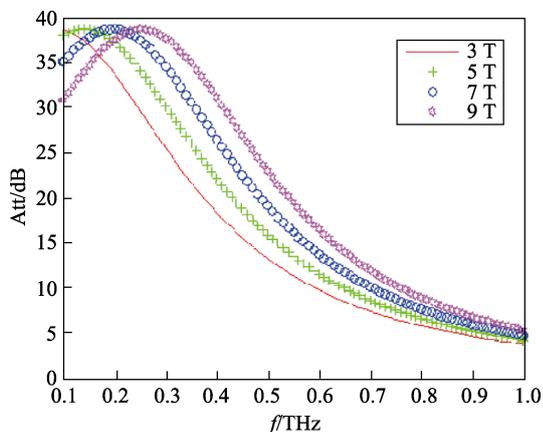


图 2 外加磁场对太赫兹波衰减的影响

2.2 入射角度对太赫兹波在等离子体中衰减特性的影响

当等离子体厚度为 10 cm，电子密度峰值为 10^{18} m^{-3} ，磁场强度为 3 T，碰撞频率为 0.3 THz，入射角分别取 0° 、 30° 、 50° 、 70° 时，入射角度对太赫兹波衰减的影响如图 3 所示。可以看出，对于同一入射波频率，入射角增大，衰减增大。这是由于入射角越大，太赫兹波在等离子体中传播距离也就越大，等离子体中电子吸收的能量变大。

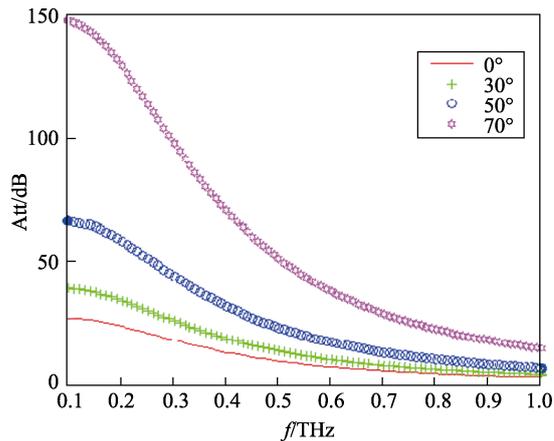


图 3 入射角度对太赫兹波衰减的影响

2.3 不同电子密度峰值对太赫兹波在等离子体中衰减特性的影响

当等离子体厚度为 10 cm，入射角为 60° ，磁场强度为 3 T，碰撞频率为 0.3 THz，电子密度峰值分别取 1×10^{17} 、 1×10^{18} 、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时，等离子体电子密度对太赫兹波衰减的影响如图 4 所示。可以看出，随着电子密度峰值的不断增大，衰减不断增大。随着太赫兹波入射频率的不断增大，衰减曲线呈下降趋势，这与文献[14]结果一致。这是由于当等离子体密度增加时，等离子体中电子数目增多，入射电波与带电粒子的碰撞概率增大，电子从入射电波中吸收更多的能量加速自身无规则运动。

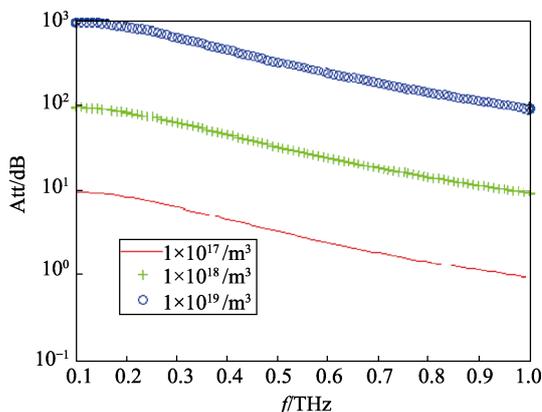


图 4 等离子体电子密度对太赫兹波衰减的影响

2.4 碰撞频率对太赫兹波在等离子体中衰减特性的影响

当等离子体厚度为 10 cm，电子密度峰值为 10^{18} m^{-3} ，入射角为 30° ，磁场强度为 3 T，碰撞频率分别取 0.1、0.13、0.15、0.17 THz 时，碰撞频率对太赫兹波衰减的影响如图 5 所示。可以看出，随着碰撞频率的不断增大，衰减不断变小。当太赫兹波的入射频率增大时，衰减先增大后减小。其原因是：当等离子体碰撞频率增加时，电子与中性粒子的碰撞几率变大，通过碰撞

传给中性粒子的能量变大,从而导致衰减增加;但当碰撞频率过高时,电子在碰撞前被电场加速的时间很短,未能从电场获取更多的能量,从而导致衰减减小。

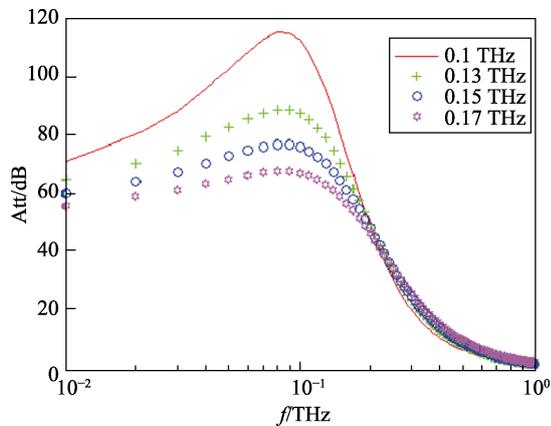


图 5 碰撞频率对太赫兹波衰减的影响

3 结论

利用电子密度为 Epstein 分布的条件建立了一维非均匀磁化等离子体模型,通过仿真可以得出以下结论。

1) 当外加磁场强度增大时,衰减的最大值向着较高太赫兹波频率的方向移动。

2) 入射角度不断增大,衰减不断增大。

3) 电子密度峰值不断增大,衰减不断增大。

4) 碰撞频率不断增大,衰减不断减小。

由此,可以通过调节外加磁场强度、等离子体电子密度和碰撞频率,使得太赫兹波在等离子体中传播的过程中衰减发生变化,为太赫兹雷达反等离子体隐身技术提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 洪伟,余超,陈继新.毫米波与太赫兹技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(8):1086-1107.
 [2] 李纪舟,蒋文涛.太赫兹波通信技术研究现状及展望[J].

通信技术,2014,47(4):348-353.

- [3] LIU Shao-bin. Absorption of Electromagnetic Waves in Inhomogeneous Magnetized Plasma[J]. Journal of Electronics, 2003, 31 (3): 372-375.
 [4] 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.
 [5] GLYAVIN M Y, GOLUBEV S V, DENISOV G G, et al. Generation of Powerful THz Radiation by Electron Beams and Its Interaction with Plasma and Gases[C]// 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. USA: IEEE, 2014.
 [6] 李茜,徐晟.太赫兹波对抗等离子体隐身技术的探讨[J].光电技术应用,2011,26(2):9-11.
 [7] 蒋金,陈长兴,汪成.太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中的传播特性[J].系统仿真学报,2015,27(12):3109-3115.
 [8] 陈文波,龚学余. 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):82-87.
 [9] 杨玉明,王红.太赫兹雷达反等离子体隐身研究[J].雷达科学与技术,2012,10(5):486-491.
 [10] 郑灵,赵青,刘述章.太赫兹在非磁化等离子体中的传输特性研究[J].物理学报,2012,61(24):381-387.
 [11] 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.
 [12] 董群锋,向宁静,李俊杰.太赫兹波斜入射均匀非磁化等离子体中传输特性研究[J].装备环境工程,2019,16(1):118-121.
 [13] 陈春梅,摆玉龙.太赫兹波斜入射到磁化等离子体的数值研究[J].强激光与离子束,2018,30(1):51-55.
 [14] 周天翔,陈长兴.太赫兹波在磁化等离子体中传输特性[J].强激光与离子束,2016,28(7):103-107.
 [15] 刘少斌,袁乃昌.斜入射到非磁化等离子体的电磁波的吸收[J].系统工程与电子技术,2003,25(11):1347-1350.
 [16] 方圆.再入等离子体鞘层中的电磁波传输特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.