

文章编号: 2095-4980(2020)02-0184-06

太赫兹波斜入射磁化等离子体的传播特性

董群锋¹, 向宁静¹, 李应乐²

(1.咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2.陕西学前师范学院 物理与电子系, 陕西 西安 710100)

摘要: 针对飞行器再入大气的“黑障”问题, 基于等离子体电子密度 Epstein 分布, 建立了太赫兹波穿过磁化等离子体鞘套的一维模型。计算了太赫兹波斜入射磁化等离子体鞘套的透射率和衰减; 分析了等离子体碰撞频率、磁场强度、入射角等因素对太赫兹波传播特性的影响。研究表明, 外加磁场强度增大, 透射率的最小值和衰减峰值向较高太赫兹波频率方向移动; 电磁波入射角变大, 透射率变小, 衰减变大; 当入射角小于等于 60°时, 大气窗口 0.22 THz 处最大衰减为 5.32 dB。研究结果为解决“黑障”问题提供了重要参考。

关键词: 磁化等离子体; 太赫兹波; 黑障; 衰减

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: doi: 10.11805/TKYDA2018116

Propagation characteristics of oblique incidence terahertz electromagnetic wave in inhomogeneous unmagnetized plasma

DONG Qunfeng¹, XIANG Ningjing¹, LI Yingle²

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

Abstract: The communication blackout when the space vehicle at ultra-high speed is reentering the atmosphere has always been a challenging task. Based on the Epstein distribution of electron density, the models of oblique incidence terahertz wave propagation are established for magnetized plasma inhomogeneous plasma sheath. The transmittance and attenuation of terahertz wave are numerically calculated. The effects of collision frequency, magnetic field intensity, incident angle, etc. on THz wave attenuation are analyzed. The results shows that with the increase of magnetic field intensity, the minimum transmittance and attenuation peak move to the direction of higher THz frequency. When the electromagnetic wave incident angle becomes larger, the transmittance decreases, and the attenuation increases. When the incident angle is less than or equal to 60°, the maximum attenuation at 0.22 THz of atmospheric window is 5.32 dB. This study provides a theoretical basis for solving the blackout problem.

Keywords: magnetized plasma; terahertz wave; blackout; attenuation

太赫兹波是指频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 太赫兹波处于微波波段与红外波段之间, 被称为“太赫兹鸿沟(THz Gap)”^[1]。由于其在电磁波谱中的特殊位置, 它具有很多独特的性质和优点。太赫兹波在基础研究领域, 如物理学、化学、天文学、分子光谱学、生命科学和医药科学等方面的重要性逐渐显现。与光学波段相比, 太赫兹波在传播过程中由微粒造成的散射损失更少, 可以在沙尘或浓烟环境下进行通信; 与微波波段相比, 太赫兹波段有更大的带宽, 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^[3-4]一直都是人们关注的难题, 国内外学者做了许多研究工作, 但大多集中于微波频段(频率小于 100 GHz)^[5-9]。近年来, 利用 THz 波来穿透等离子体

收稿日期: 2018-06-03; 修回日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61102018); 中国博士后基金资助项目(2014M562371); 陕西省教育厅专项科研项目(18JK0833); 陕西省自然科学基金基础研究资助项目(2019JQ-901); 咸阳师范学院中青年拔尖、青蓝计划人才培养资助项目(XSYBJ201903; XSYQL201609)

作者简介: 董群锋(1977-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为天线罩及电磁波传播。email:qunfengdong1028@163.com

鞘套成为解决“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:刘少斌等应用温采尔-克劳迈斯-勃立鲁英(Wentzel-Kramer-Brillouin, 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^[10]。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^[11]。YUAN C 研究了高温非磁化等离子体中 THz 波的传播特性^[12]。ZHENG L 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^[13-14]。田媛等研究了非均匀碰撞等离子体中 THz 波的传播特性^[15]。董群锋等研究了太赫兹波在均匀磁化等离子体中的传输特性^[16]。陈春梅等研究了太赫兹波斜入射磁化均匀等离子体中的传输特性^[17]。飞行器的再入大气的试验数据表明^[18],飞行器表面的等离子体鞘套的电子密度是非均匀的,电子密度与飞行高度和速度有关。本文基于飞行器表面的电子密度分布模型,对太赫兹波斜入射磁化等离子体鞘套的传播特性进行了研究,分析了等离子体碰撞频率、磁场强度、入射角等因素对太赫兹波传播特性的影响。

1 理论模型

考虑一维情况,等离子体在 z 轴方向不均匀,电磁波沿 xoz 面斜入射到厚度为 d 不均匀磁化等离子体中,电场沿 y 轴,如图 1 所示^[9]。

右旋偏振、磁化冷等离子体的介电常数为^[17]:

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

式中: ω 为电磁波角频率; $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}$ 为等离子体频率, 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; ν_{en} 为碰撞频率, $\nu_{en} = 2\pi f_{en}$, f_{en} 为电子与中性粒子的碰撞频率; $\omega_c = \frac{eB}{m_e}$ 为电子回旋频率, B 为磁场强度。

等离子体中的传播常数为^[9]:

$$k = k_0 \sqrt{\varepsilon_r} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

式中: k_0 为自由空间的波数; α 为衰减系数; β 为相移系数。

一维情况下非均匀等离子体内电磁波的波动方程可写为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k^2 E_y = 0 \quad (3)$$

第 n 层内传播的电磁波的场量为: $\exp\left[-j\frac{\omega_0}{c} n_n (x \sin \theta_n \pm z \cos \theta_n)\right]$ 。其中: \pm 分别对应向上和向下传播的波, θ_n 为第 n 层的入射角。由波动方程可得非均匀等离子体内电磁波的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + [k^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n] E_y = 0 \quad (4)$$

方程的解为:

$$E_y = E_0 \exp\left[\pm j \int_0^z \sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n} dz\right] \quad (5)$$

令 $\omega = \sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n}$, 则 WKB 解有效条件为:

$$\left| \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\omega^2} \frac{d\omega}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^3} \frac{d^2\omega}{dz^2} \right| \ll 1 \quad (6)$$

显然,该条件要求电磁波的波数在一个波长范围内变化很小。这个条件是很容易实现的,除非等离子体的密度变化非常大或电磁波的频率极低。

当电磁波从 $x=0$ 处入射到等离子体内部并在 $x=d$ 处被穿出,电磁波通过非均匀等离子体的传输功率为:

$$P = P_0 \exp\left[-2 \operatorname{Im} \left(\int_0^d \sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n} dz \right)\right] \quad (7)$$

式中: P_0, P 分别为入射波功率和透射功率。

电磁波斜入射非均匀等离子体的透射率 T 和衰减 A 为:

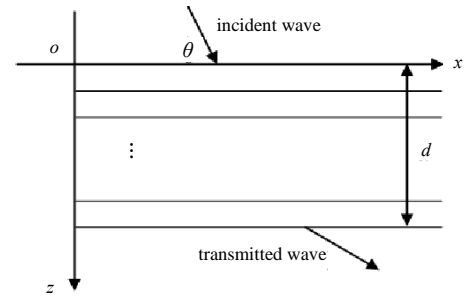


Fig.1 Schematic diagram of the THz wave propagation
图 1 等离子体中太赫兹波斜入射传输示意图

$$T=P/P_0 \quad (8)$$

$$A = \left| 10 \lg \frac{P}{P_0} \right| = \left| 8.686 \operatorname{Im} \left(\int_0^d \sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_n} dz \right) \right| \quad (9)$$

2 数值计算与结果分析

2.1 等离子体的密度

飞行器再入大气形成的等离子体鞘套电子密度分布是影响鞘套电磁特性的重要参数, 相关文献报道了均匀分布、抛物线分布、正态分布等^[9]。在中低空飞行器表面等离子体鞘套的电子密度近似为 Epstein 分布^[18], 其表达式为:

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

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。根据美国飞行试验数据, 等离子体鞘套的电子密度取值范围为 $10^{10} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 本文选取 17 Ma 时的电子密度 10^{18} m^{-3} ^[18]。

2.2 电磁波频率对太赫兹波传输特性的影响

在计算中, 将 10 cm 等离子体鞘层分为 1 000 层, 在不同条件下研究太赫兹波的传输特性。取等离子体的电子密度峰值 n_0 为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 f_{en} 为 0.2 THz, 入射角为 30° , 等离子体的厚度 d 为 10 cm 时, 磁化等离子体中太赫兹传播特性随太赫兹波频率的变化关系如图 2 所示。

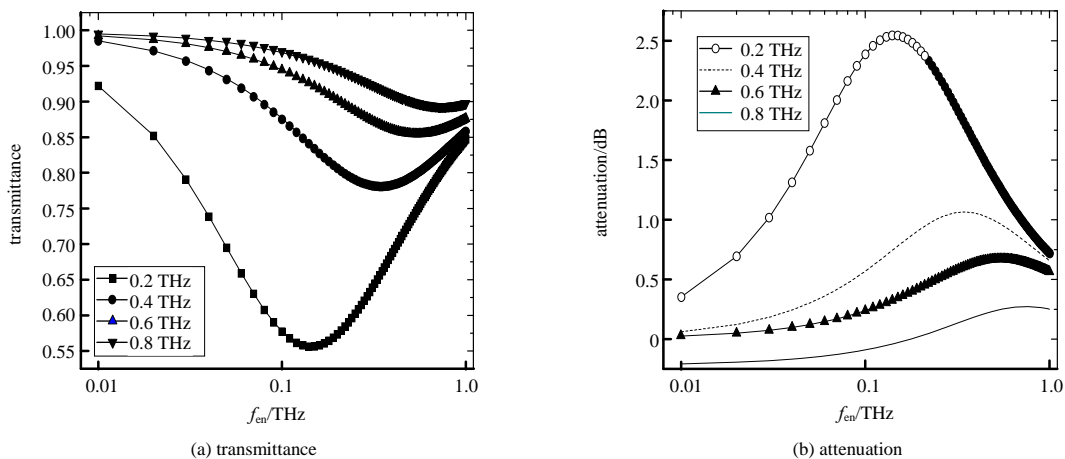


Fig.2 THz wave propagation properties varying with incident wave frequency

图2 太赫兹波的传输特性随入射波频率的变化关系

由图 2 可以看出, 太赫兹波频率增加, 透射率增加, 衰减减小。等离子体碰撞频率增加, 透射率先减小后增加, 衰减先增加后减小。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, 这与均匀磁化等离子体中的太赫兹波传播的结论一致^[16]。当太赫兹波频率接近等离子体碰撞频率时, 透射率达到最小值, 衰减达到峰值。入射波频率增大, 衰减的峰值减小, 对应的碰撞频率增大。

2.3 外加磁场强度对太赫兹波传输特性的影响

取等离子体的电子密度的峰值 n_e 为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 f_{en} 为 0.2 THz, 入射角为 30° , 等离子体的厚度 d 为 0.10 m 时, 磁化等离子体中太赫兹传播特性随太赫兹波频率和碰撞频率的变化关系如图 3 所示。由图 3 可以看出, 外加磁场强度增大, 透射率的最小值和衰减峰值向较高太赫兹波频率方向移动。因此, 可以通过调节外加磁场强度的大小, 使磁化等离子体的衰减改变, 实现通信。

2.4 入射角对太赫兹波传输特性的影响

取等离子体的电子密度的峰值 n_e 为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 f_{en} 为 0.2 THz , 磁感应强度 2 T , 等离子体的厚度 d 为 0.10 m 时, 磁化等离子体中太赫兹传输特性随入射角的变化关系如图 4 所示。由图 4 可以看出, 入射角变大, 太赫兹波在等离子体中的传播距离增大, 等离子体中电子吸收的能量变大, 透射率变小, 衰减变大。随着太赫兹频率的增加, 透过率增大, 衰减减小。当入射角小于等于 60° 时, 大气窗口 0.22 THz 处最大衰减为 5.32 dB 。

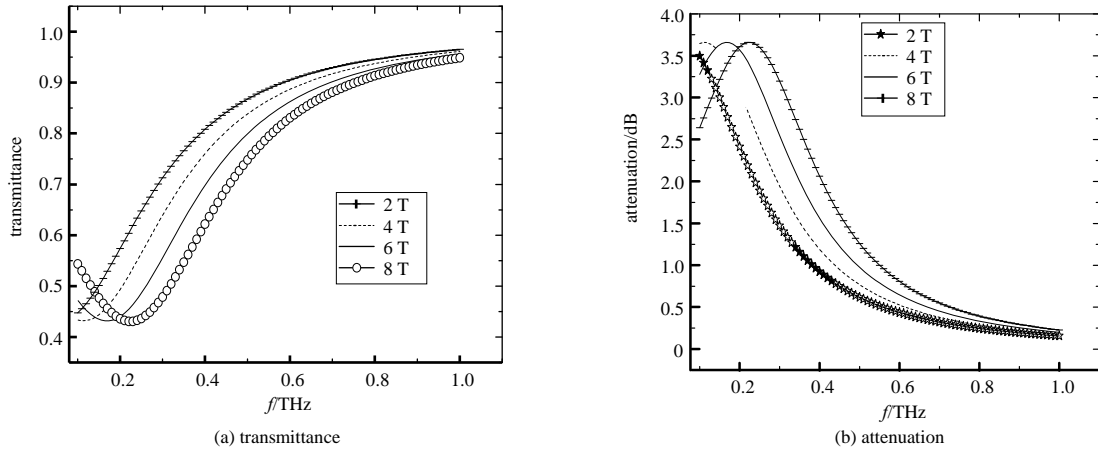


Fig.3 THz wave propagation properties varying with incident magnetic field intensity
图3 太赫兹波的传输特性随磁场强度的变化关系

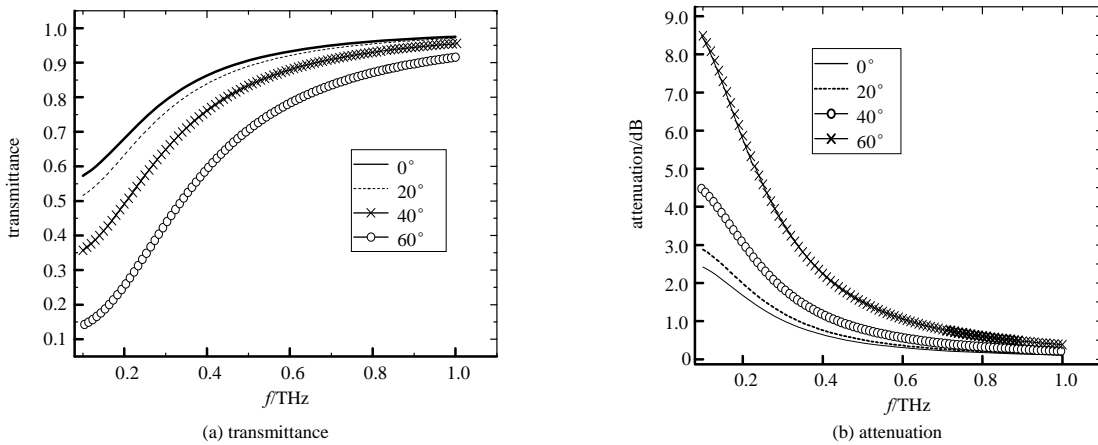


Fig.4 THz wave propagation properties varying with incident angle
图4 太赫兹波的传输特性随入射角的变化关系

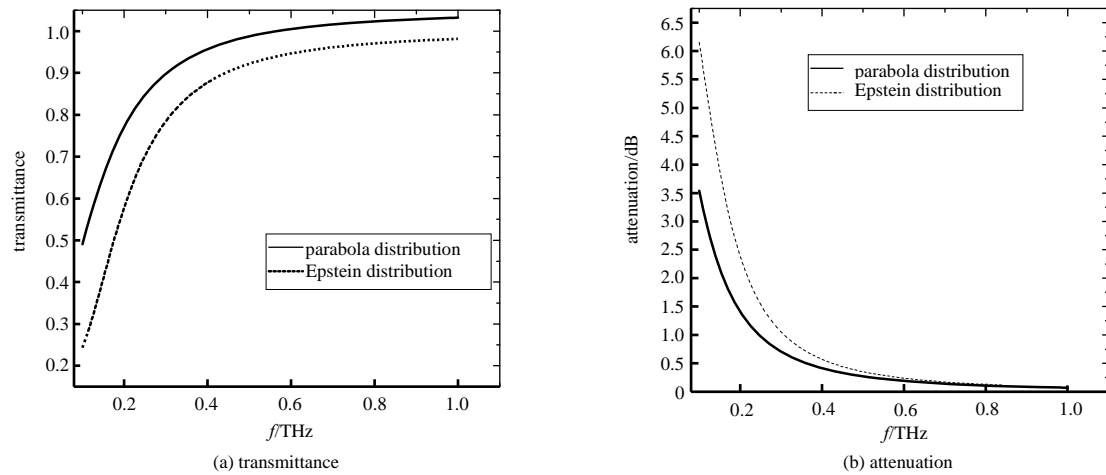


Fig.5 THz wave propagation properties varying with the distribution of electron density
图5 太赫兹波的传输特性随电子密度分布的变化关系

2.5 电子密度分布对太赫兹波传输特性的影响

取等离子体的电子密度的峰值 n_e 为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率 f_{en} 为 0.1 THz, 磁感应强度 2 T, 入射角为 30° , 等离子体的厚度 d 为 0.10 m 时, 等离子体中电子密度分布对太赫兹传输特性的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出, 在相同条件下, 电子密度为抛物线分布, 太赫兹波透射率大而衰减小; 电子密度为 Epstein 分布, 透射率小而衰减大。同时, 峰值电子密度和等离子体厚度对太赫兹波的影响表现在: 等离子体的电子峰值密度增大, 透过率减小, 衰减增大; 等离子体的厚度增大, 透过率减小, 衰减增大, 这和磁化均匀等离子体中的太赫兹波传输特性结论一致^[16], 本文在此不做详细计算。

3 结论

依据等离子体电子密度试验数据得到的电子密度 Epstein 分布, 建立了一维等离子体中太赫兹波斜入射磁化等离子体鞘套的传输特性模型, 并进行了数值仿真。结果表明, a) 对于同一入射波频率, 太赫兹波的透过率随碰撞频率的增大先减小后增大, 衰减先增大后减小; 当太赫兹波频率接近等离子体碰撞频率时, 透射率达到最小值, 衰减达到峰值。入射波频率增大, 衰减峰值对应的碰撞频率增大。b) 外加磁场强度增大, 透射率的最小值和衰减峰值向较高太赫兹波频率方向移动。c) 电磁波入射角变大, 透射率变小, 衰减变大; 当入射角小于等于 60° 时, 大气窗口 0.22 THz 处最大衰减为 5.32 dB。d) 在相同条件下, 电子密度 Epstein 分布对太赫兹波的传输特性影响比密度抛物线分布大, 在大气窗口 0.22 THz 处, 衰减大于 0.78 dB。本文工作为飞行器再入大气中的黑障问题提供重要参考。

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. (HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Science China: Scientia Sinica Informationis, 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): 081301.
- [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] 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.
- [5] 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. (CHEN Yuxu, ZHAO Qing, BO Yong, et al. Numerical simulation and experimental verification of electromagnetic transmission characteristics of plasma sheath[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 290–294.)
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李江挺, 郭立新, 金莎莎, 等. 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, JIN Shasha, et al. EM wave propagation characteristic in plasma sheath[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(3): 494–500.)
- [9] 郑灵. 飞行器等离子体鞘套对电磁波传输特性的影响研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (ZHENG Ling. Study of EM wave propagation in spacecraft plasma sheath[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [10] LIU Shaobin, ZHOU Tao, LIU Meilin, 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.
- [11] 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): 194101. (CHEN Wenbo, GONG Xueyu, DENG Xianjun, et al. Propagation characteristics of THz electromagnetic waves in time varying un-magnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(19): 194101.)

- [12] YUAN C,ZHOU Z,XIANG X,et al. Propagation properties of broadband terahertz pulses through a bounded magnetized thermal plasma[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, 2011,269(1):23–29.
- [13] 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.
- [14] ZHENG L,ZHAO Q,LIU S Z,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.
- [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] 董群锋,郭立新,李应乐,等. 太赫兹波在均匀磁化等离子体中的传播特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1):38–42. (DONG Qunfeng,GUO Lixin,LI Yingle,et al. Terahertz electromagnetic wave propagation in uniform magnetized plasma[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):38–42.)
- [17] 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):013101. (CHEN Chunmei,BAI Yulong,ZHANG Jie,et al. Numerical study of oblique incidence of terahertz wave to magnetized plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018,30(1):013101.)
- [18] 方圆. 再入等离子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. (FANG Yuan. The study on transmission properties of electromagnetic waves in re-entry plasma sheath[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2014.)

(上接第 179 页)

- [12] Communication Industry of the People's Republic of China. YD/T 984–1998 methods for calculating attenuations by atmospheric gases and rain in the satellite communication link[S]. 1998:1–3.
- [13] YANG Xiaofan,WANG Guoyu,WANG Liandong,et al. Study on the properties of terahertz-wave propagation in complex atmosphere[C]// 7th European/UK–China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies. Chengdu,China:[s.n.], 2014:1–5.
- [14] YANG Xiaofan,MEI Peng,ZENG Yonghu,et al. Research on the atmospheric attenuation of THz wave at any heights based on fitting method[C]// 2016 IEEE MTT–S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. Chengdu,China:[s.n.], 2016:1–3.
- [15] YANG Xiaofan,WANG Yahua,ZENG Yonghu,et al. China different heights annually THz wave atmospheric absorption calculation[C]// 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. Nanjing,China:[s.n.], 2016:1–4.