

激光与光电子学进展

均匀非磁化等离子体对电磁波吸收特性的影响

张洁^{1,2*}, 赵善超¹, 韩冰¹, 张国栋¹

¹西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²西北师范大学甘肃省智能信息技术与应用工程研究中心, 甘肃 兰州 730070

摘要 基于“黑障”问题,建立了“自由空间-等离子体层-自由空间”三层结构的物理模型。在此模型的基础上利用解析方法进行仿真,研究在不同厚度等离子体层的前提下,等离子体吸收率与电磁波频率之间的关系。分别改变等离子体中电子密度、外加磁场强度以及电子碰撞频率,研究等离子体层对左旋及右旋圆极化波的吸收情况以及电磁波在等离子体中单程衰减。研究表明,改变等离子体层厚度、电子密度、外加磁场强度以及电子碰撞频率影响参数后,等离子体对电磁波的吸收特性及单程衰减也随之发生改变,仿真结果对降低等离子体层的吸收率和解决“黑障”问题起到一定的参考作用。

关键词 表面光学; 等离子体; 左旋圆极化波; 右旋圆极化波; 黑障; 吸收率

中图分类号 O451

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0319001

Influence of Uniform Unmagnetized Plasma on Electromagnetic Wave Absorption Characteristics

Zhang Jie^{1,2*}, Zhao Shanchao¹, Han Bing¹, Zhang Guodong¹

¹College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University,
Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Engineering Research Center of Gansu Province for Intelligent Information Technology and Application,
Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract Based on the “blackout”, the physical model of “free space-plasma layer-free space” is established. On the basis of this model, the analytical method is used to simulate and study the relationship between plasma absorption rate and electromagnetic wave frequency under the premise of different thickness plasma layer. The absorption of left-handed and right-handed circularly polarized waves by plasma layer and the one-way attenuation of electromagnetic waves in plasma were studied by changing the electron density, external magnetic field intensity and electron collision frequency, respectively. The results show that the absorption characteristics and one-way attenuation of electromagnetic waves by plasma change with the change of plasma layer thickness, electron density, external magnetic field strength, and electron collision frequency. The simulation results can be used as a reference for reducing the absorption rate of plasma layer and alleviating the problem of the “blackout”.

Key words optics at surfaces; plasma; left-handed circularly polarized waves; right-handed circularly polarized waves; blackout; absorption rate

收稿日期: 2021-04-02; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 甘肃省科技计划项目(20JR10RA080)、西北师范大学青年教师能力提升计划项目(NWNU-LKQN-17-14)

通信作者: *zhangjie@nwnu.edu.cn

1 引言

高超声速飞行器再入地球大气层时,飞行器外部的隔热材料及周围的空气在高速摩擦的作用下发生电离,形成包含大量电子、离子以及中性粒子的等离子体鞘套,对入射其中的电磁波产生吸收、反射等负面影响,进而影响地面与飞行器之间的正常通信,这就是所谓的“黑障”现象^[1]。随着太赫兹 (THz) 技术的不断发展,大量学者对于等离子体与太赫兹波、微波的相互作用进行了研究^[2-8]。Liu 等^[5]基于时域有限差分算法研究了太赫兹波在均匀磁化冷等离子体中的反射系数和透射系数,验证了太赫兹波具有较强的穿透能力。薄勇等^[6]研究了电磁波在非均匀磁化等离子体鞘套中的传输特性。孟令辉等^[7]利用解析方法研究了太赫兹波在高温等离子体中的传输特性;李奇等^[8]利用数值方法以及三维全波模拟分析了电磁波在非均匀等离子体中的传播特性。上述这些学者研究的重点均是改变影响参数后等离子体对电磁波反射系数等的变化情况,但关于等离子体对电磁波的吸收特性研究较少,等离子体的吸收作用体现在与电子回旋频率相关的共振吸收以及电子与微观粒子之间的碰撞吸收,吸收作用最终导致入射电磁波的衰减增加,吸收效应是产生“黑障”问题的另一原因。本文以“自由空间-等离子体层-自由空间”三层物理结构为基础,通过改变等离子体层厚度、外加磁场强度、电子密度等影响因素,分析了等离子体对电磁波吸收特

性以及电磁波在等离子体层中单程衰减的变化情况。

2 物理模型

在图 1 展示的物理模型中,等离子体是均匀非磁化的,这与实际再入过程中产生的等离子体鞘套有所区别。但绝大多数地面实验,例如辉光放电、介质阻挡放电等^[9],均是在密闭空间中产生均匀等离子体。因此研究电磁波在均匀非磁化等离子体中的传播具有一定的实际意义,且为研究电磁波在实际等离子体鞘套中的传输特性提供了理论参考。

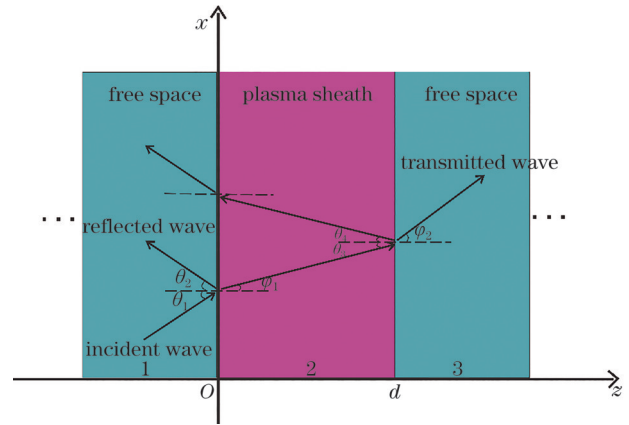


图 1 电磁波透射等离子体层的模型图

Fig. 1 Model diagram of electromagnetic wave transmitting plasma layer

根据 Appleton 公式^[10]等离子体鞘套的相对介电常数 ϵ_r 可以表示为

$$\epsilon_r = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \left\{ \left[1 - i \frac{\nu_e}{\omega} - \frac{\left(\frac{\omega_{ce} \sin \Phi}{\omega}\right)^2}{2 \left[1 - i \frac{\nu_e}{\omega} - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \right]} \right] \pm \left[\frac{\left(\frac{\omega_{ce} \sin \Phi}{\omega}\right)^4}{4 \left[1 - i \frac{\nu_e}{\omega} - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \right]^2} + \frac{\omega_{ce} \cos \Phi}{\omega} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中: ω 是入射电磁波频率; 电子回旋频率 $\omega_{ce} = eB/m_e$; B 是磁感应强度; ν_e 是电子碰撞频率; Φ 是磁场方向与电磁波传播方向之间的夹角; 等离子体频率 $\omega_p = \sqrt{e^2 n_e / m_e \epsilon_0}$, 其中 e 是电子电荷量, n_e 是等离子体电子密度, m_e 是电子质量, ϵ_0 是真空中的介电常数。当磁场方向与电磁波传播方向一致时, 非磁化等离子体的相对介电常数^[11]化简为

$$\epsilon_r = 1 - \frac{(\omega \pm \omega_{ce}) \omega_p^2}{\omega \left[(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu_e^2 \right]} - i \frac{\nu_e \omega_p^2}{\omega \left[(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu_e^2 \right]}, \quad (2)$$

式中: “ \pm ” 分别表示入射电磁波是左旋偏振和右旋偏振。根据图 1 中展示的三层模型结构, 电磁波以一定的角度从自由空间射入等离子体鞘套, 在分界面会发生折射和反射。反射波和入射波在同种介质中传播, 根据反射定律, 入射角 θ_1 等于反射角 θ_2 , 折射角为 ϕ_1 。根据电磁波在不同介质中传播时的折射定律^[12], 可得到,

$$k_i \sin \theta_1 = k_p \sin \varphi_1, \quad (3)$$

式中; k_i 是电磁波在真空中的波数;电磁波在均匀非磁化等离子体中的波数表示为 $k_p = \omega \sqrt{\epsilon_r} / c$ 。模型中考虑的电磁波极化方式是圆极化,根据麦克斯韦方程组的微分形式,电磁波在均匀等离子体中传播的波动方程可以表示为

$$\nabla^2 E + kE = 0, \quad (4)$$

式中: $k = k_p^2 - k_i^2$ 。解析法是研究电磁波在介质中传播的最基本的方法,以求解波动方程为基础,其中 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 方法求解的有效条件是 $dk/k^2 dz \ll 1$ 。考虑到均匀非磁化等离子体介电特性变化缓慢,完全符合 WKB 方法的条件,因此能够得到比较精确的解。利用 WKB 近似法^[13]对(4)式求解,

$$E_y(z) = E_0 \exp \left[j \int_0^z \sqrt{k_p^2(z) - k_i^2 \sin^2 \theta_1} dz \right]. \quad (5)$$

当电磁波完整透过等离子体层时,电磁波总的能量衰减为

$$\frac{E_y(z)}{E_0} = \exp \left\{ -2 \operatorname{Im} \left[\int_0^z \sqrt{k_p^2(z) - k_i^2 \sin^2 \theta_1} dz \right] \right\}, \quad (6)$$

则电磁波在等离子体层中的单程衰减 A_{Att} 可以表示为

$$A_{Att} = -10 \lg \frac{E_y(z)}{E_0} = 8.686 \left\{ -2 \operatorname{Im} \left[\int_0^d \sqrt{k_p^2(z) - k_i^2 \sin^2 \theta_1} dz \right] \right\}. \quad (7)$$

自由空间层 1(η_1)和 3(η_3)的波阻抗相等,即 $\eta_1 = \eta_3$ 。等离子体鞘套中的波阻抗 $\eta_2 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0 \epsilon_r}$,其中 μ_0 是真空中的磁导率。首先 2,3 层之间的反射

系数可表示为

$$\gamma_{2,3} = \frac{\eta_3 \cos \theta_3 - \eta_3 \cos \varphi_2}{\eta_3 \cos \theta_3 + \eta_3 \cos \varphi_2}. \quad (8)$$

根据(8)式,通过递推正演,可以得到 1,2 层之间的反射系数^[14]为

$$\gamma_{1,2} = \frac{\eta_{eff} \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \varphi_1}{\eta_{eff} \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \varphi_1}, \quad (9)$$

式中: η_{eff} 是等效波阻抗,可以表示为

$$\eta_{eff} = \eta_2 \frac{1 + \gamma_{1,2} \exp(-2j dk_p \cos \varphi_2)}{1 - \gamma_{1,2} \exp(-2j dk_p \cos \varphi_2)}. \quad (10)$$

则 1,2 层之间的透射系数($\tau_{1,2}$)可以表示为

$$\tau_{1,2} = \frac{(1 + \gamma_{1,2})}{1 + \gamma_{1,2} \exp(-j k_p d \cos \varphi_1)}. \quad (11)$$

综上所述,均匀非磁化等离子体层对电磁波的总反射系数 $\gamma = \gamma_{1,2}$,总透射系数 τ 为

$$\tau = (1 + \gamma_{2,3}) \tau_{1,2} \exp(-j k_p d \cos \varphi_1). \quad (12)$$

反射率 $F = |\gamma|^2$,透射率 $T = |\tau|^2$,等离子体对入射电磁波的吸收率 A 可以用下式^[15]表示

$$A = 1 - F - T. \quad (13)$$

3 仿真计算结果

3.1 等离子体吸收率随参数的变化

图 2 展示的是不同厚度(d)的等离子体层对入射电磁波的吸收率特性曲线。参数设置为 $\theta_1 = 0^\circ$, $\nu_e = 100$ GHz,磁感应强度 $B = 5$ T。图 2(a)中电磁波为左旋圆极化波,随着 d 从 0.05 m 逐渐增加到 1 m,吸收率峰值逐渐增大且下降趋势越来越缓慢,当 $d = 1$ m 时,在左旋圆极化波频率等于 6 THz 处,吸收率仍大于 0.9。如图 2(b)所示,在其他影响参

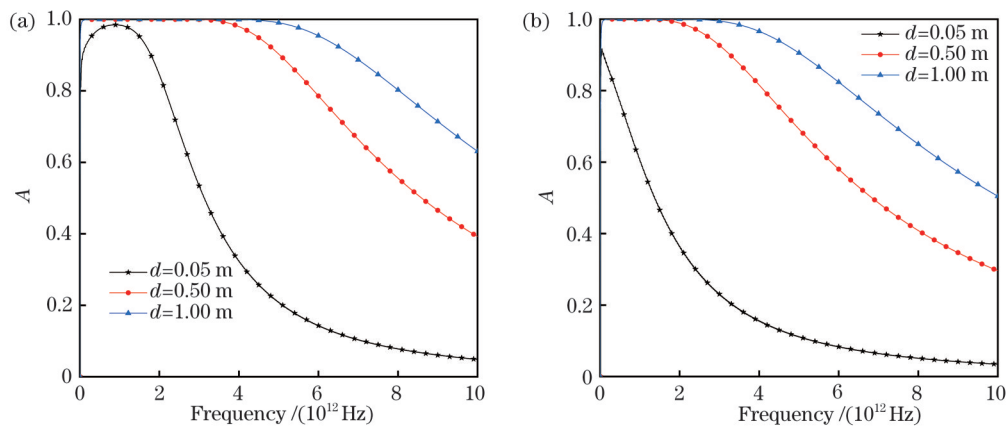


图 2 不同厚度的等离子体层对入射电磁波的吸收特性。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波

Fig. 2 Absorption characteristics of incident electromagnetic waves by plasma layers with different thicknesses. (a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

数不变的前提下,等离子体层对右旋圆极化波的吸收率峰值与其厚度成正比。等离子体层厚度增大,其带电粒子数增加,因此电磁波入射到等离子体内部时,其中的电子和离子受到电磁波的电场影响而加速运动,加剧对电磁波能量的碰撞吸收,且当两种极化方式的电磁波频率越接近电子回旋频率时,共振吸收作用表现得越强烈,等离子体对电磁波的吸收率随之增大。

控制 $\theta_1=0^\circ$, $\nu_e=100$ GHz, 磁感应强度 $B=5$ T。图 3(a) 展示的是在不同电子密度的前提下,等离子体层对左旋圆极化波的吸收率特性曲线。在

$n_e=10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、 $n_e=10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以及 $n_e=10^{20} \text{ m}^{-3}$ 这三种情况下,随着电磁波频率不断增加,吸收率曲线均出现“双峰值”的特征。这是在外加磁场的作用下,产生的低吸收带将吸收峰分成了两个峰值,其中共振吸收作用产生左侧峰值,而右侧峰值是碰撞吸收产生的。图 3(b) 为等离子体层对右旋圆极化波的吸收率曲线,随着电磁波频率增加到一定数值后,均会出现吸收率峰值。但整体来看,随着电子密度逐渐增大,吸收率波峰整体向高频移动,且吸收率峰值范围逐渐拓宽,这是共振吸收作用和碰撞吸收作用同时增强导致的结果。

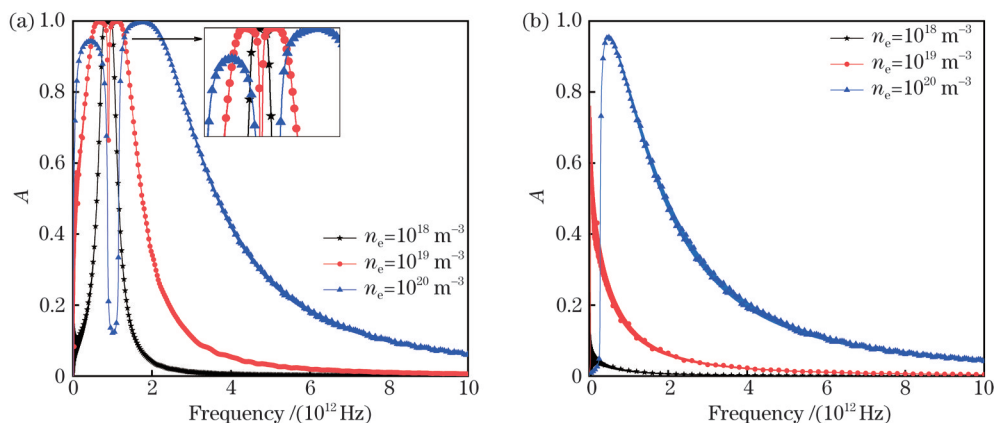


图 3 不同电子密度的前提下等离子体层对电磁波的吸收率。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波
Fig. 3 Absorption rate of electromagnetic wave by plasma layer under the premise of different electron density. (a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

对于图 4(a) 中的左旋圆极化波,当 $B=5$ T 时,在电磁波频率处于 $0.08 \sim 2.35$ THz 范围内,吸收率一直处于接近“1”的水平。随着外加磁场的磁感应强度从 5 T 增加到 15 T,等离子体层的吸收率的峰逐渐变化。这是由于电子回旋频率决定等离子体对电

磁波吸收率的峰值位置,电子回旋频率与磁感应强度成正比,因此吸收率的峰向高频移动。而当电磁波的极化方式为右旋圆极化时,等离子体对电磁波的吸收率峰值与磁感应强度成反比。这是由于磁感应强度增大,电子回旋频率也随之增大,电磁波难以

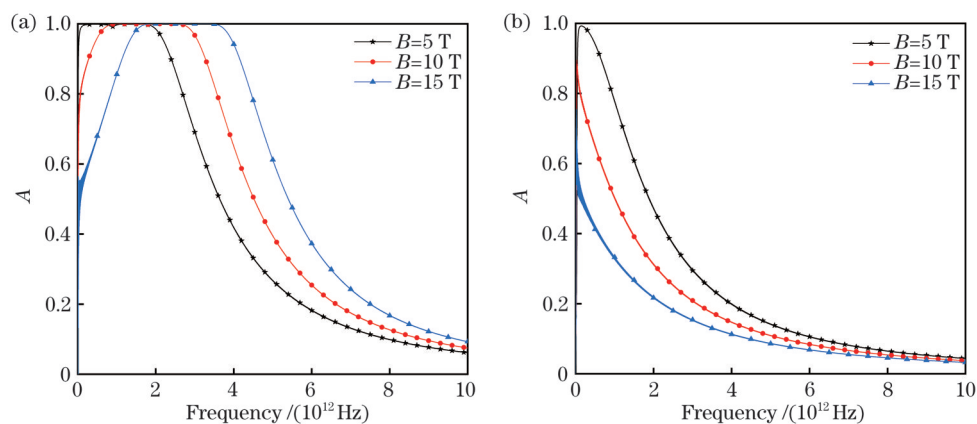


图 4 不同磁感应强度的前提下等离子体层对电磁波的吸收率。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波
Fig. 4 Absorption rate of electromagnetic wave by plasma layer under the premise of different magnetic induction intensities. (a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

达到电子回旋频率附近,因此共振吸收减弱,整体吸收率反而降低。当 B 分别等于 5 T、10 T 以及 15 T 时,达到波峰时的电磁波频率处于 0.08~0.15 THz 范围内,因此采用高于此频率范围的右旋圆极化波作为载波,可明显降低等离子体的吸收率。

图 5(a)中的电磁波是左旋圆极化波, B 设置为 5 T,当 $\nu_e=10^{10}$ Hz 时,波谷位置出现在电磁波频率为 1.96 THz 附近。随着电子碰撞频率增大,吸收带整体上移,但出现波谷时的电磁波频率未发生改变。主要原因是外加磁场的磁感应强度未发生改变,电子回旋频率是固定的,但随着粒子碰撞频率

逐渐接近电磁波频率,将导致碰撞吸收效果增强。因此吸收带上移,但波谷的位置不发生改变。

图 5(b)展示的是在一定电子碰撞频率的前提下等离子体层对右旋圆极化电磁波的吸收率曲线,当电子碰撞频率分别为 10^{10} Hz、 10^{11} Hz 以及 10^{12} Hz 时,等离子体吸收率曲线随电磁波频率的增加均出现波峰,且电子碰撞频率越大,等离子体层的吸收率波峰范围也就越广,其主要原因是等离子体中电子与离子中性粒子之间的碰撞增强,导致碰撞吸收效应增强。因此,降低电子碰撞频率是减小等离子体吸收率的有效方式之一。

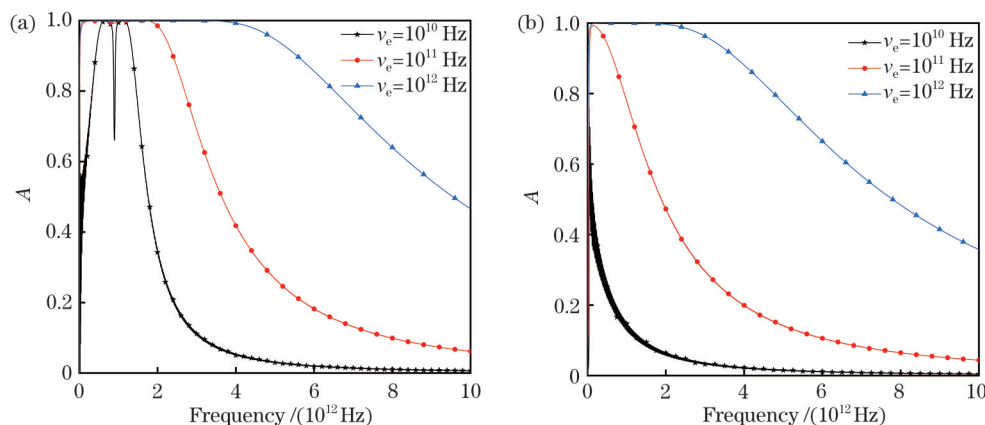


图 5 不同电子碰撞频率的前提下等离子体层对电磁波的吸收率。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波

Fig. 5 Electromagnetic wave absorption rates of plasma layer under different electron collision frequencies. (a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

3.2 电磁波衰减随等离子体参数的变化

电子密度以及电子和微观粒子之间的碰撞频率会导致电磁波在等离子体鞘套中产生较大的衰减,这是产生“黑障”问题的主要原因^[16]。因此针对这两种影响因素,分析了电磁波在“自由空间-等离

子体层-自由空间”中的单程衰减 A_{Att} 。图 6(a)展示的是左旋圆极化波在等离子体中的衰减特性曲线。可以看出,随着电子密度的增加, A_{Att} 曲线的峰值逐渐向上方移动。当 $n_e=10^{15} \text{ m}^{-3}$ 时, A_{Att} 甚至达到 196 dB。图 6(b)中展示的右旋圆极化波 A_{Att} 的值要

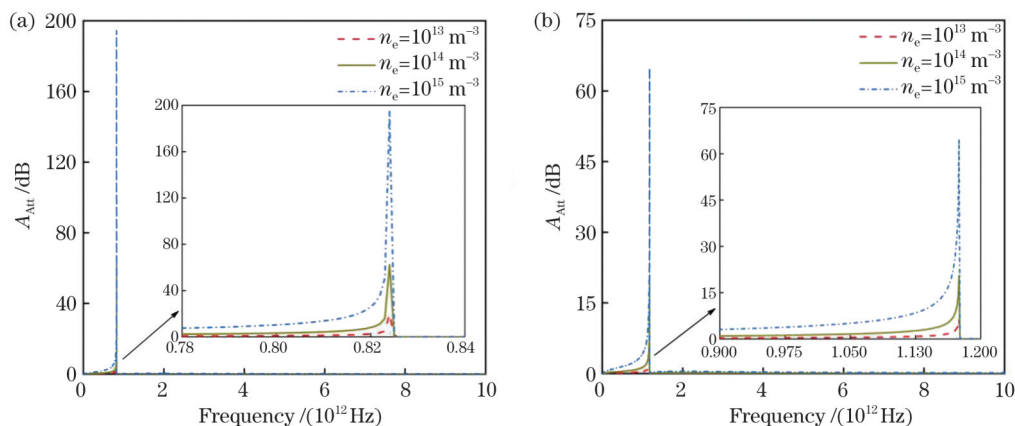


图 6 不同电子密度的前提下电磁波的单程衰减。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波

Fig. 6 Single trip attenuation of electromagnetic waves with different electron densities. (a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

始终低于 70 dB。而在 $n_e=10^{13} \text{ m}^{-3}$ 以及 $n_e=10^{14} \text{ m}^{-3}$ 这两种情况下,右旋圆极化波的 A_{Att} 始终低于 30 dB,处于正常通信允许的衰减值范围内。当电子回旋频率一定时,等离子体对右旋圆极化波的吸收、反射等负面效应减弱,因此电磁波透过等离子体层时的能量损耗较小, A_{Att} 也随之降低。

如图 7(a) 所示,对于左旋圆极化波,在 $\nu_e=10^{10} \text{ Hz}$ 以及 $\nu_e=10^{11} \text{ Hz}$ 这两种情况下, A_{Att} 随入射电磁波频率在同一数量级中变化,但当 $\nu_e=10^{12} \text{ Hz}$ 时, A_{Att} 曲线的峰值接近 20 dB。因此降低电子碰撞频

率,可明显降低左旋圆极化波在等离子体层中的衰减。图 7(b) 展示的是右旋圆极化波在等离子体中的 A_{Att} 曲线变化情况,可以看出,电子碰撞频率为 10^{12} Hz 的 A_{Att} 峰值要大于其余二者的情况。但当电磁波频率处于 0.125~0.2 THz 范围内时, $\nu_e=10^{10} \text{ Hz}$ 时的 A_{Att} 要大于 $\nu_e=10^{11} \text{ Hz}$ 以及 $\nu_e=10^{12} \text{ Hz}$ 时的情况,这是由于等离子体中的电子与其他粒子过于频繁地发生碰撞,电子还未来得及从电磁波的电场中获得能量,但自身能量处于消耗的状态,衰减反而下降。

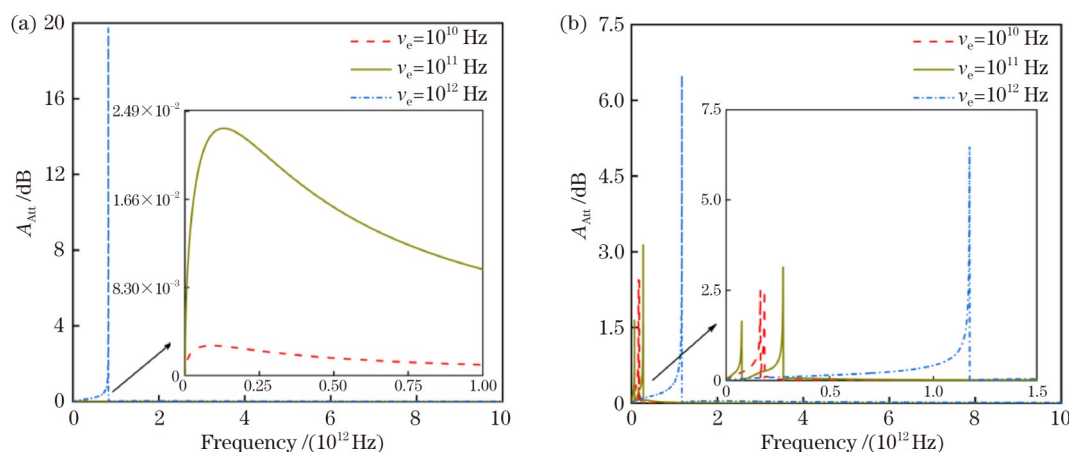


图 7 不同电子碰撞频率的前提下电磁波的单程衰减。(a)左旋圆极化波;(b)右旋圆极化波

Fig. 7 Single trip attenuation of electromagnetic wave under the premise of different electron collision frequencies.

(a) Left-handed circularly polarized wave; (b) right-handed circularly polarized wave

4 结 论

本文通过建立的物理模型,研究了太赫兹波段的电磁波在均匀非磁化等离子体层中的传输特性。利用解析方法对改变等离子体物理参数后得到的结果进行分析,得出以下结论:

1) 在保持其他参数一定的条件下,改变特定的影响因素后,研究了等离子体层对电磁波吸收特性的变化规律。等离子体对左旋圆极化波的吸收率曲线峰值与等离子体层厚度、电子密度以及电子碰撞频率均成正比,与外加磁场的磁感应强度成反比。但对于左旋圆极化波,吸收率峰值与影响参数不是简单的正比或反比关系。基于该研究结果,对于降低等离子体层对电磁波的吸收率给出了建议。

2) 改变等离子体层中电子密度以及电子碰撞频率后,研究了电磁波在等离子体层中的单程衰减。增加电子密度,左旋及右旋圆极化波在等离子体中的衰减均会增加,但左旋圆极化波的衰减要明显高于右旋圆极化波。提高电子碰撞频率,两种极

化方式电磁波的单程衰减曲线峰值随之增加,但始终在同一个数量级中变化。该结果对解决“黑障”问题起到了一定的参考作用。

3) 模型中等离子体是各向同性均匀分布的,下一步将研究电磁波在非均匀非磁化等离子体中传输特性,等离子体电子密度将采用“双高斯”分布模型,更加符合实际飞行器再入过程中所产生的等离子体鞘套的特征。

参 考 文 献

- [1] Liu J F, Ma H Y, Jiao Z H, et al. Effects of dynamic plasma sheath on electromagnetic wave propagation and bit error rate under external magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(8): 2706-2714.
- [2] Xu Y X, Qi X, Yang X. PIC-MCC simulation of electromagnetic wave attenuation in partially ionized plasmas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2014, 23(1): 015002.
- [3] Liu Y D, Xu Z, Hu J, et al. Research on quality of

- agricultural products by terahertz spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0100005.
- 刘燕德, 徐振, 胡军, 等. 太赫兹光谱检测技术对农产品品质检测的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0100005.
- [4] Yu K, Cong M Y, Dai W C. Simulation analysis of infrared radiation suppression effect of solid particles on aircraft exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2129001.
- 于鲲, 丛明煜, 戴文聪. 飞机尾焰的固体粒子红外辐射抑制效果仿真分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2129001.
- [5] Liu H Y, Chao Y. Research on terahertz band electromagnetic characteristics of propagation and scattering in the cold magnetized plasma medium[J]. *Optik*, 2020, 217: 164905.
- [6] Bo Y, Zhao Q, Luo X G, et al. Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(3): 035201.
- 薄勇, 赵青, 罗先刚, 等. 电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(3): 035201.
- [7] Meng L H, Ren H B, Liu J X. Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(17): 174101.
- 孟令辉, 任洪波, 刘建晓. 高温等离子体中太赫兹波的传输特性[J]. *物理学报*, 2018, 67(17): 174101.
- [8] Li Q, Li J, Fang J Y, et al. Calculation and simulation on plane-wave absorption characteristics of magnetized plasma[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(5): 35-40.
- 李奇, 李晶, 方进勇, 等. 磁化等离子体对平面电磁波吸收特性的数值研究与全波仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(5): 35-40.
- [9] Huang M S, Xu Y W, Cheng M. Atmospheric pressure and large volume non-equilibrium plasma discharge technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500007.
- 黄民双, 许友文, 程苗. 大气压大体积非平衡等离子体放电技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500007.
- [10] Heald M A, Wharton C B, Furth H P. Plasma diagnostics with microwaves[J]. *Physics Today*, 1965, 18(9): 72-74.
- [11] Geng X N, Xu D G, Li J N, et al. Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath around air vehicle[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(3): 78-83.
- 耿兴宁, 徐德刚, 李吉宁, 等. 太赫兹波在飞行器等离子体鞘套中的传输特性[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(3): 78-83.
- [12] Chen C M, Bai Y L, Zhang J, et al. Numerical study of oblique incidence of terahertz wave to magnetized plasma[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(1): 51-55.
- 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): 51-55.
- [13] Moiseeva N M, Moiseev A V. Matrix WKB solution for electromagnetic waves in an inhomogeneous gyrotropic layer[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1096(1): 012106.
- [14] Liu J X, Du W C, Gu K D, et al. Study of the terahertz wave propagate in high temperature plasma band gap[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2020, 66: 383-389.
- [15] Liu J X, Ju L, Du P, et al. An improved cascaded SO-FDTD method for high temperature magnetized plasma[J]. *Computer Physics Communications*, 2019, 235: 153-158.
- [16] Chen J M, Yuan K, Shen L F, et al. Studies of terahertz wave propagation in realistic reentry plasma sheath[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2016, 157: 21-29.