

激光与光电子学进展

太赫兹波在非均匀等离子体鞘层中的传播特性

张洁^{1,2*}, 韩冰^{1,2}, 赵善超^{1,2}, 张国栋^{1,2}¹西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;²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 当飞行器以超高速返回大气层时, 飞行器表面的空气发生电离, 形成严重阻碍地面与飞行器之间通信的等离子鞘层。针对再入飞行器表面的等离子鞘层的特性, 建立了具有非均匀电子密度和非均匀电子碰撞频率的等离子鞘层模型。基于非均匀介质的等效波阻抗思想, 探讨了太赫兹波在具有不同分布特性的等离子体鞘层中的传播规律, 研究了左右两种极化方式的太赫兹波在等离子体鞘层中的传播特性受不同因素的影响。研究发现太赫兹波在等离子体鞘层中的相移特性主要受入射角影响, 且与波所处的位置和波的频率有关, 与波的极化方式无关, 相移特性呈周期性变化。左右两种极化方式的太赫兹波的传播特性在低频范围内受相同因素影响的差异较大, 随着传输频率的升高, 两种极化方式的传播特性逐渐趋于一致。

关键词 傅里叶光学与信号处理; 太赫兹波; 等离子体鞘层; 黑障; 传输特性

中图分类号 O451

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1707002

Propagation Characteristics of Terahertz Waves in Inhomogeneous Plasma Sheath

Zhang Jie^{1,2*}, Han Bing^{1,2}, Zhao Shanchao^{1,2}, Zhang Guodong^{1,2}¹College of Physics and Electronic Engineering, North West Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;²Intelligent Information Technology and Application Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract When an aircraft reenters the atmosphere at hypervelocity, a plasma sheath that can block communication with the ground is formed due to the air ionization on the vehicle surface. In this study, a plasma sheath model with the inhomogeneous electron density and electron collision frequency is established to investigate the plasma sheath characteristics on the surface of the reentry vehicle. The terahertz wave propagation in the plasma sheaths with different distribution characteristics is discussed based on the idea of the equivalent wave impedance in inhomogeneous media. The effects of different factors on the propagation characteristics of left-handed and right-handed circularly polarized terahertz wave in the plasma sheath are studied. The results show a periodic phase shift of the terahertz wave in the plasma sheath, which is mainly affected by the incident angle. This periodicity has nothing to do with wave polarization but is related to wave position and frequency. The propagation characteristics of the two polarization modes of terahertz waves greatly differ under the same factors at low frequencies. The propagation characteristics of the two polarization modes gradually approach with the transmission frequency increase.

Key words Fourier optics and signal processing; terahertz wave; plasma sheath; blackout; propagation characteristic

1 引言

近年来,随着空天领域技术的发展,如何避免再入飞行器受到“黑障”的影响仍然是一项重要的研究课题^[1-2]。当飞行器返回大气层时,飞行器的速度可以达到几十马赫,飞行器表面与空气剧烈摩擦产生大量的

热量,使飞行器周围的空气发生电离,形成致密的等离子鞘层,即为“黑障”^[3]。“黑障”的存在使外界的信号不能及时完整地传达到飞行器的接收端,严重影响了飞行器与外界的有效通信。

由于太赫兹波具有优秀的宽带性和稳定性,使太赫兹波在信息传输及信号检测等领域受到广泛关

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 甘肃省科技计划资助(20JR10RA080)

通信作者: *zhangjie@nwnu.edu.cn

注^[4-5]。Wang 等^[6]基于太赫兹波的高频性,使用时域光谱技术对分层材料中的缺陷位置进行分析。Wu 等^[7]对等离子体平板中太赫兹波的色散特性进行研究,实现了对等离子诱导透明效应的有效调控。Pavlenko 等^[8]基于天线的辐射场研究了电磁波通过冷等离子体瞬态传输特性。Ouyang 等^[9]提出了在钝头再入飞行器底部安装天线以削弱“黑障”的思路。He 等^[10]研究了不同密度的介质对不同特性的偏振波的传输特性的影响。Geng 等^[11]利用散射矩阵法研究了太赫兹在高超声速钝头周围等离子体鞘内的传播特性。Chen 等^[12]研究了太赫兹波在高温高超声速等离子体鞘层中的传播特性。Rao 等^[13]研究了太赫兹波在以陶瓷作为衬底的尘埃等离子体中的传播特性。这些工作对太赫兹波在等离子体中的传播特性做了充分的研究,但是大多数工作将等离子体视为均匀介质,或者只将等离子体的非均匀性体现在电子密度上,忽略了电子碰撞频率的非均匀性。本文在建立非均匀等离子体鞘层分层模型的基础上,将电子密度和电子碰撞频率都设置为非均匀分布,研究了等离子体鞘层中太赫兹波的传输特性受传输频率、入射角度、等离子体中电子密度、电子碰撞频率以及等离子体外加磁场强度的影响。为“黑障”问题的理论分析提供一定参考。

2 基本原理

本文研究的太赫兹波斜入射非均匀等离子体鞘层模型如图 1 所示。子层等离子体设置为区域 (i) 。

根据 Appleton 公式^[14],第 i 层等离子体的相对介电常数可以描述为

$$\epsilon_r(\omega, i) = \left\{ 1 - \frac{\omega_{p,i}^2(\omega \pm \omega_c)}{\omega[(\omega \pm \omega_c)^2 + \nu_{e,i}^2]} \right\} - j \left[\frac{\nu_{e,i}}{\omega} \frac{\omega_{p,i}^2}{(\omega \pm \omega_c)^2 + \nu_{e,i}^2} \right] \quad (i \in N^*), \quad (1)$$

式中: $\omega_{p,i} = \sqrt{e^2 n_{e,i} / m_e \epsilon_0}$ 为第 i 层等离子体区域中的等离子体频率; $\nu_{e,i}$ 和 $n_{e,i}$ 分别为第 i 层等离子体区域中的电子碰撞频率 ν_e 和电子密度 n_e , $\epsilon_0 = 8.854 \times$

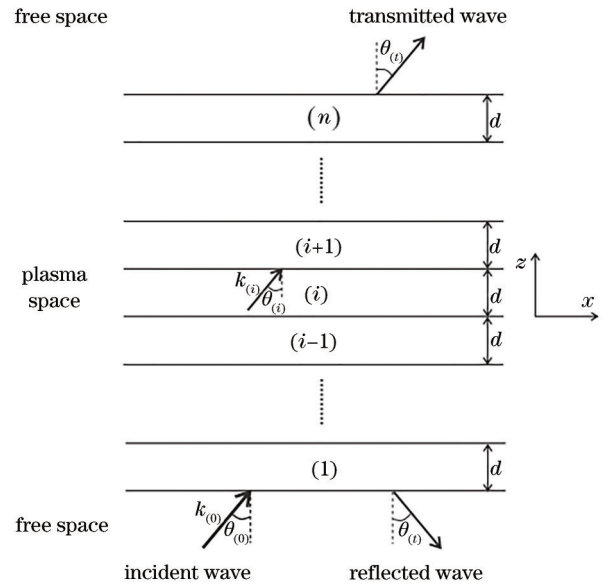


图 1 太赫兹波斜入射非均匀等离子体鞘层原理图

Fig. 1 Schematic diagram of terahertz wave oblique incidence to inhomogeneous plasma sheath

10^{-12} F/m 为真空相对介电常数; 等离子体的电子回旋频率为 $\omega_{ce} = eB/m_e$, 电子电荷为 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.109 \times 10^{-31}$ kg 为电子质量; $\omega = 2\pi f$ 为太赫兹波传输频率; “ \pm ”指明波的极化方式; $j = \sqrt{-1}$ 是虚数单位。

根据等离子体各层之间的边界条件^[15]和 Snell 定律得

$$k_{(i+1)} \sin \theta_{(i+1)} = k_{(i)} \sin \theta_{(i)}, \quad (2)$$

式中: $k_{(i)} = k_{(0)} \sqrt{\epsilon_r(\omega, i)}$ 为第 i 层等离子体中传播常数, $k_{(0)} = \omega/c$ 为太赫兹波在真空中的传播常数, c 为光速; $\theta_{(i)}$ 为波从第 i 层等离子体到第 $i+1$ 层等离子体的入射角。

根据等效波阻抗思想^[16],可以得到总数为 n 层的等离子体中,每个子层与其相邻层的反射系数和透射系数可以分别被表示为

$$R_{(i)} = \frac{\eta_{ef(i+1)} \cos \theta_{(i)} - \eta_{(i)} \cos \theta_{(i+1)}}{\eta_{ef(i+1)} \cos \theta_{(i)} + \eta_{(i)} \cos \theta_{(i+1)}}, \quad (3-a)$$

$$T_{(i+1)} = \frac{1 + R_{(i)}}{\exp[jk_{(i+1)}d \cos \theta_{(i+1)}] + R_{(i+1)} \exp[-jk_{(i+1)}d \cos \theta_{(i+1)}]}, \quad (3-b)$$

式中: $\eta_{(i)} = \eta_{(0)} / \sqrt{\epsilon_r(\omega, i)}$ 为第 i 子层波阻抗, $\eta_{(0)} = \eta_{(n+1)} = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 为真空波阻抗; $\eta_{ef(i)}$ 为等离子体中第 i 层到第 n 层区域的等效波阻抗, 定义为

$$\eta_{ef(i)} = \eta_{(i)} \frac{\eta_{ef(i+1)} \cos \theta_{(i)} + j\eta_{(i)} \cos \theta_{(i+1)} \tan(k_{(i)}d \cos \theta_{(i)})}{\eta_{ef(i)} \cos \theta_{(i+1)} + j\eta_{(i+1)} \cos \theta_{(i)} \tan(k_{(i)}d \cos \theta_{(i)})}, \quad (4)$$

可以推知当 $i=n$ 时, 存在 $\eta_{ef(i+1)} = \eta_{ef(0)}$ 。

综上可得,太赫兹波穿透等离子体的总透射率可以被表示为

$$\tau = \left| \prod_{i=1}^{n+1} \frac{\eta_{(i)} \cos \theta_{(i-1)}}{\eta_{(i-1)} \cos \theta_{(i)}} T_{(i)} \right|^2, \quad (5)$$

总反射率为

$$\Gamma = \left| \frac{\eta_{\text{ef}(1)} \cos \theta_{(0)} - \eta_{(0)} \cos \theta_{(1)}}{\eta_{\text{ef}(1)} \cos \theta_{(0)} + \eta_{(0)} \cos \theta_{(1)}} \right|^2, \quad (6)$$

总吸收率定义为

$$A = 1 - \Gamma - \tau. \quad (7)$$

3 数值模拟与讨论

当飞行器在海拔 60~90 km, 飞行速度在 18~27 Ma 时, 飞行器周围空气流场峰值温度在 10000 K 左右, 空气流场峰值压强在 1.01325×10^5 Pa 左右,

表 1 等离子体鞘层的不同电子密度和电子碰撞频率的分布模型

Table 1 Distributions of different electron densities and collision frequencies in plasma sheath

| No. | Profile | Function |
|-------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Case1 | Gaussian | $n_e = n_0 \exp[-1000 \times (z - d/2)^2]$ $\nu_e = 2\pi f_0 \exp[-1000 \times (z - d/2)^2]$ |
| Case2 | Parabolic | $n_e = n_0 [1 - (1 - 2z/d)^2]$ $\nu_e = 2\pi f_0 [1 - (1 - 2z/d)^2]$ |
| Case3 | Bi-exponential | $n_e = \begin{cases} n_0 \{1 + \exp[-200 \times (z - d/4)]\}^{-1} & (0 < z \leq d/2) \\ n_0 \{1 + \exp[200 \times (z - 3d/4)]\}^{-1} & (d/2 < z \leq d) \end{cases}$ $\nu_e = \begin{cases} 2\pi f_0 \{1 + \exp[-200 \times (z - d/4)]\}^{-1} & (0 < z \leq d/2) \\ 2\pi f_0 \{1 + \exp[200 \times (z - 3d/4)]\}^{-1} & (d/2 < z \leq d) \end{cases}$ |

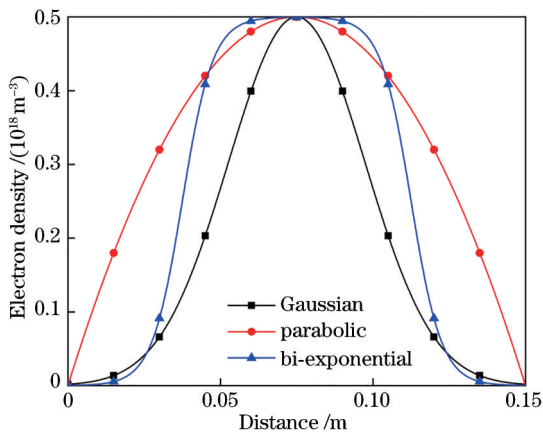


图 2 等离子体鞘层中电子密度的不同分布模型

Fig. 2 Different profiles of electron densities in plasma sheath

3.1 入射角的影响

本节讨论了不同入射角下的仿真结果。入射角 $\theta_{(0)}$ 假设分别为 0° 、 45° 、 60° 。其他参数设置为 $n_0 = 0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $B=0.5 \text{ T}$, $f_0=0.2 \text{ THz}$, $f=0.01 \sim 1 \text{ THz}$, $d=0.15 \text{ m}$ 。在图 3 中, 描述了不同分布特性的等离子体鞘层中, 太赫兹波的透射率随传输频率变化而变化的规律 (其中 LCP 表示左极化波, RCP 表示右极化波)。透射率随着传输频率的增加而增大, 随入射角的

空气中的氮气和氧气完全离解, 产生的电子密度可以高达 $10^{17} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ [17]。基于 Zhou 等 [18] 的工作, 本文建立如表 1 和图 2 所示的等离子体鞘层电子密度的 3 种不同的函数分布模型。本研究中假设电子碰撞频率的分布与电子密度分布的趋势具有一致的非均匀性。等离子体鞘层参数的取值范围为: 峰值电子碰撞频率为 $f_0 = 0.1 \sim 0.5 \text{ THz}$, 峰值电子密度为 $n_0 = 0.1 \times 10^{18} \sim 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 等离子层厚度为 $d=0.15 \text{ m}$ 。等离子体鞘层中的空间位置用 z 表示。

减小而增大, 当入射角为零时, 透射率最大。这是因为入射角减小时, 会增大进入等离子体中的电磁波的能量。因此, 入射角越小, 透射率越大。

图 4 展示了不同等离子鞘层分布中太赫兹波的传输特性。图 4(a) 为太赫兹波穿透不同分布的等离子体鞘层的透射率 τ 的变化。对每种极化方式都存在 $\tau_{\text{case1}} > \tau_{\text{case3}} > \tau_{\text{case2}}$, 对每种分布都存在 $\tau_{\text{LCP}} > \tau_{\text{RCP}}$ 。图 4(b) 表示当 $f=1 \text{ THz}$ 时, 在等离子体子层中不同位置的太赫兹波的幅值 M 的变化, 假设初始幅值为 1, 对每种极化方式都存在 $M_{\text{case1}} > M_{\text{case3}} > M_{\text{case2}}$, 对每种分布都存在 $M_{\text{LCP}} > M_{\text{RCP}}$ 。可以发现 3 种分布的太赫兹波在空间位置 $z=0.03 \sim 0.12 \text{ m}$ 的振幅都有显著下降。太赫兹波的振幅在高斯分布中衰减最慢, 在双指数分布中 RCP 和 LCP 的振幅差异最大, 在抛物线分布中振幅最平稳。

由式 (3-b) 可以发现透射系数为复数, 式 (3-b) 可以表示为

$$T_{(i)} = M_{(i)} \angle \arctan P_{(i)}, \quad (8)$$

式中: $M_{(i)} = \sqrt{(\text{Re}(T_{(i)}))^2 + (\text{Im}(T_{(i)}))^2}$ 描述了太赫兹波在等离子体中传播的振幅变化特性; $P_{(i)} = \text{Im}(T_{(i)})/\text{Re}(T_{(i)})$ 描述了太赫兹波在等离子体中的相位变化特性。

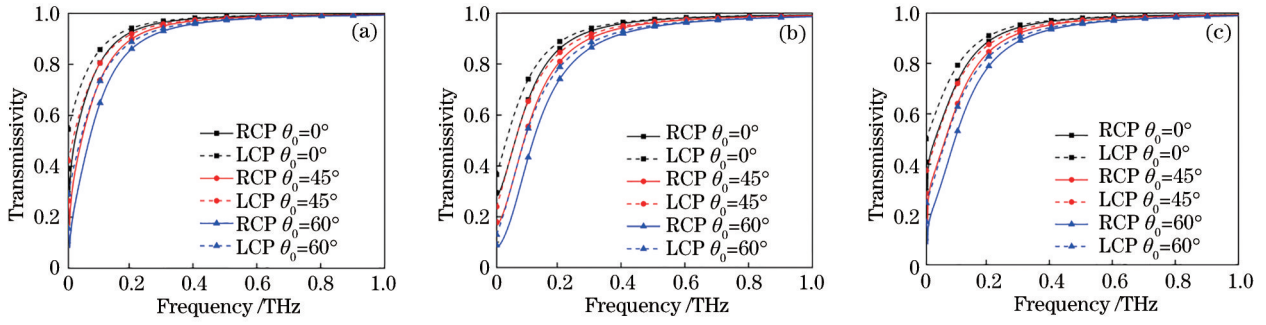


图 3 太赫兹波在不同分布的等离子体鞘层中以不同入射角入射的透射率。(a)高斯分布;(b)抛物线分布;(c)双指数分布
Fig. 3 Transmittance of terahertz waves incident at different incident angles in plasma sheaths with different profiles.

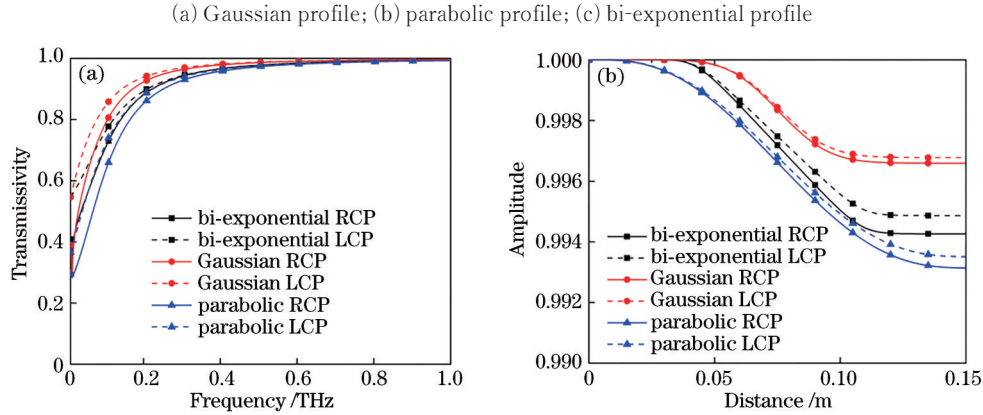


图 4 太赫兹波在不同分布的等离子体鞘层中的传输特性。(a)透射率;(b)幅度
Fig. 4 Propagation characteristics of terahertz waves in plasma sheaths with different profiles. (a) Transmissivity; (b) amplitude

以左极化波为例,图 5 描述了双指数分布的等离子体鞘层中太赫兹波的相移特性。从图 5 中可以看出,相移随传输频率的增加和波在等离子体中传输距离周期性变化,周期随入射角的增加而增加。这是因为随着太赫兹波的频率和空间位置的变化,太赫兹波与等离子体之间周期性地形成半波长介质窗^[19],半波

长介质窗产生的条件满足:

$$d_{(i)} = (1 + m)c / (2f \sqrt{\epsilon_r(\omega, i)} \cos \theta_{(i)}) (m \in N), \quad (9)$$

式中, $d_{(i)}$ 为波所在的空间位置, $d_{(i)}$ 满足式(9)时,太赫兹波可以无反射地传输。这种现象意味着在同一频带内减小入射角可以获得更多可选的和更稳定的传输频率。

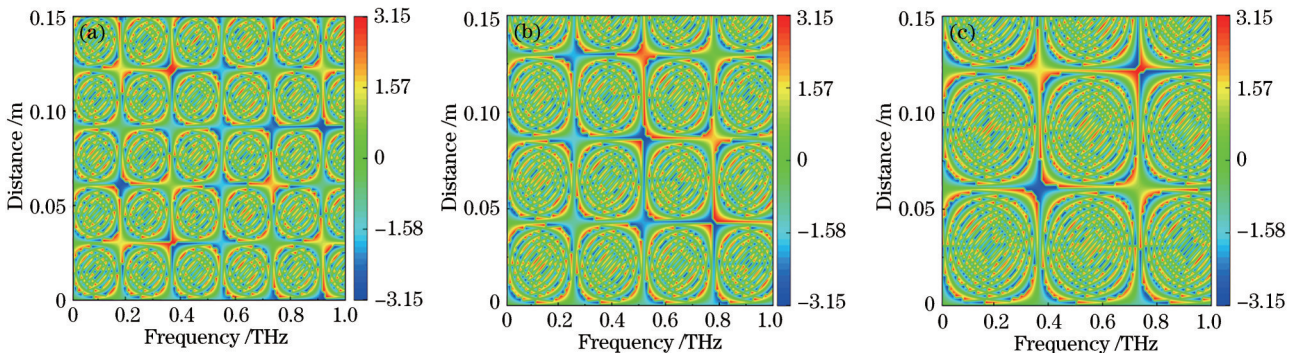


图 5 不同入射角 $\theta_{(0)}$ 时太赫兹波在等离子鞘层中的相移特性。(a) $\theta_{(0)} = 0^\circ$; (b) $\theta_{(0)} = 45^\circ$; (c) $\theta_{(0)} = 60^\circ$

Fig. 5 Phase-shift characteristics of terahertz wave in plasma sheath at different incident angles $\theta_{(0)}$. (a) $\theta_{(0)} = 0^\circ$; (b) $\theta_{(0)} = 45^\circ$; (c) $\theta_{(0)} = 60^\circ$

3.2 外加磁场强度的影响

由于飞行器的客观条件限制^[20],选取外加磁场分别为 0、0.5、1.0 T。其他参数选取为 $n_0 = 0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $f_0 = 0.1 \text{ THz}$, $f = 0.01 \sim 1 \text{ THz}$, $d = 0.15 \text{ m}$ 。选用具有双指数分布的电子密度和电子碰撞频率的等

离子体鞘层模型。

图 6 描述了外加磁场对太赫兹波透射率的影响。对于右极化波,随着外加磁场强度的增加,出现了“谷移”现象,且其最小值也在增加。该现象可应用于太赫兹波信道的选择。而左极化波的透射率曲线不存在

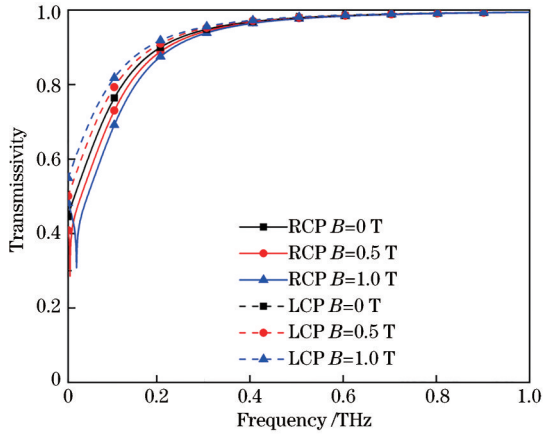


图 6 不同外加磁场对非均匀等离子体鞘层中太赫兹波的透射率的影响

Fig. 6 Effects of different external magnetic fields on transmissivity of terahertz waves in inhomogeneous plasma sheath

“谷移”现象,但是相同的外加磁场条件下左极化波的透射率总是略高于右极化波的透射率,因此左极化波在实际应用中可以作为较好的波源。同时,可以发现当 $B=0$ 时,右极化波和左极化波的曲线是重合的。这是因为当等离子体外部没有施加磁场时,两种极化方式的波对等离子体没有影响,等离子体的回旋频率保持为 0。从物理上讲,当外加磁场作用于等离子体粒子时,等离子体粒子的受到的洛伦兹力增大,使得粒子运动曲线接近磁力线。这种使粒子的运动从无序到有序的行为降低了等离子体中粒子无序碰撞的能量损耗,使太赫兹波在等离子体中经历更少的能量衰减,提高了太赫兹波在等离子体中的透射率。

3.3 电子密度的影响

在本节中,非均匀等离子体鞘层中的峰值电子密度分别设为 0.1×10^{18} 、 0.5×10^{18} 、 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,外加磁场强度为 $B=0.5 \text{ T}$ 。

从图 7 中可以明显地发现,等离子体对太赫兹波

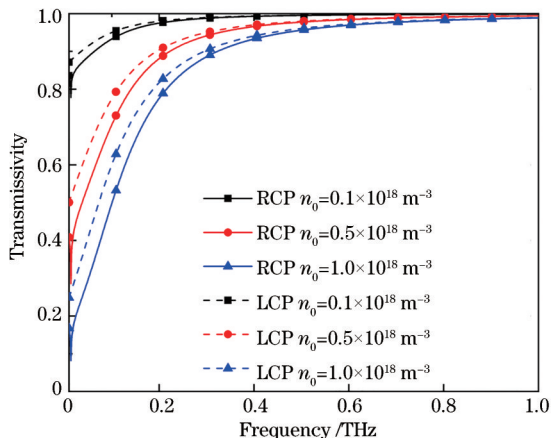


图 7 不同电子密度对非均匀等离子体鞘层中太赫兹波的透射率的影响

Fig. 7 Effects of different electron densities on transmissivity of terahertz waves in inhomogeneous plasma sheath

的透射率随等离子体电子密度的增加而降低。右极化波和左极化波的透射率的曲线都不存在“谷移”现象。对比发现当 $n_0=1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时的透射率曲线初始值约为 0.8,而当 $n_0=1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时的透射率曲线初始值仅约为 0.2,且电子密度越大,透射率曲线增长越慢,可以证明电子密度的增大是导致“黑障”的主要因素。这是因为随着电子密度的增加,太赫兹波的能量更多地作用于等离子体中的内部损耗,导致太赫兹波在等离子体中的能量衰减增大,透射率降低。但电子密度的改变对等离子体的回旋频率没有影响,右极化波的透射率曲线的“谷移”不能通过改变电子密度得到有效利用。

3.4 电子碰撞频率的影响

在本节中,非均匀等离子体鞘层中的峰值电子碰撞频率分别为 0.1、0.3、0.5 THz,外加磁场强度为 $B=0.5 \text{ T}$,峰值电子密度 $n_0=0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。

图 8 显示了透射率随等离子体电子碰撞频率的变化。结果表明,随着电子碰撞频率增加,透射率先增大后减小。这一趋势的拐点范围在 0.2~0.3 THz。当透射频率小于 0.2 THz 时,透射率随电子碰撞频率的增加而增加。当透射率大于 0.3 THz 时,随着电子碰撞频率的增加,透射率降低。这是因为随着等离子体中电子碰撞的频率的变化,等离子体和太赫兹之间的共振频率不能有效地发挥作用。当太赫兹波的透射频率在较低范围时,电子碰撞频率的增加促使更多的电子参与有序运动,从而导致透射率的增加。当透射率在较高范围时,电子碰撞频率的增加会抑制等离子体共振频率有效地发挥作用,使透射率降低。

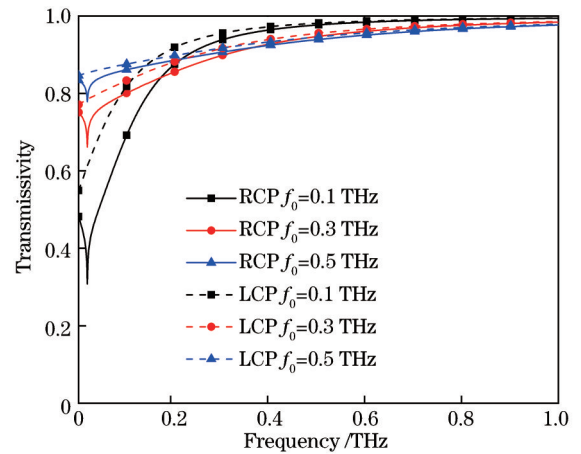


图 8 不同电子碰撞频率对非均匀等离子体鞘层中太赫兹波的透射率的影响

Fig. 8 Effects of different electronic collision frequencies on transmissivity of terahertz waves in inhomogeneous plasma sheath

4 结 论

通过建立分层非均匀等离子体鞘层模型,研究了

太赫兹波斜入射电子密度和电子碰撞频率在具有非均匀特性的等离子体鞘层中的传输特性。理论推导了太赫兹波在非均匀等离子体鞘层的反射率、透射率与吸收率的计算式。以透射率为例,探讨了不同因素对太赫兹波在等离子体鞘层中传输特性的影响,得出以下结论:增加太赫兹波的频率是提高透射率最有效的措施;透射率随外加磁场和电子碰撞频率的增大而增大,但是随着入射角和电子密度的增加逐渐减小;相移特性控制太赫兹波在同一波段的稳定性,其变化周期随入射角的增大而增大,入射角越大,周期越大,波在同一波段的稳定性越差;右极化波和左极化波具有不同的传输特性,在相同条件下,左极化波比右极化波具有更高的透射率,但是可以通过改变外加磁场的强度实现对右极化波的信道选择。该工作针对再入飞行器的“黑障”问题,为太赫兹波在超高速再入飞行器周围流场的非均匀等离子体鞘层中传输特性的数值分析提供了一种新思路,对这一领域的理论研究有一定的参考价值。

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] Lyu X T, Jiang C X, Ge N. Outage probability analysis and dynamic criterion calculation under the plasma sheath channel[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(6): 1995-2002.
- [3] Tang R X, Mao M Y, Yuan K, et al. A terahertz signal propagation model in hypersonic plasma sheath with different flight speed[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(4): 043509.
- [4] Statom T K. Plasma parameters from reentry signal attenuation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(3): 494-502.
- [5] 尹晓琴, 范书振, 李永富, 等. 和频、差频共存的太赫兹波上转换探测理论分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1214001.
Yin X Q, Fan S Z, Li Y F, et al. Theoretical analysis of terahertz-wave frequency up-conversion detection based on coexisting difference-and sum-frequency generation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1214001.
- [6] 王奇书, 牟达, 周桐宇, 等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1712003.
Wang Q S, Mu D, Zhou T Y, et al. Terahertz nondestructive test of delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1712003.
- [7] 吴经纬, 牛力, 王庆伟, 等. 太赫兹平行平板波导中等离子体诱导透明效应的调控[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1914005.
Wu J W, Niu L, Wang Q W, et al. Modulation of plasmon-induced transparency effect in terahertz parallel-plate waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1914005.
- [8] Pavlenko I V, Girka I O, Trush O V, et al. Exact analytical calculation and numerical modelling by finite-difference time-domain method of the transient transmission of electromagnetic waves through cold plasmas[J]. *Journal of Plasma Physics*, 2020, 86(3): 905860310.
- [9] Ouyang W C, Jin T, Wu Z W, et al. Study of terahertz wave propagation in realistic plasma sheath for the whole reentry process[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(1): 460-465.
- [10] 贺敬航, 段锦, 战俊彤, 等. 水下介质浓度对激光偏振传输特性影响的分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0529002.
He J H, Duan J, Zhan J T, et al. Analysis of influence of underwater medium concentration on laser polarization transmission characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0529002.
- [11] Geng X N, Xu D G, Li J N, et al. Terahertz wave propagation characteristics in plasma sheath around a hypersonic blunt cone[J]. *Optik*, 2020, 206: 163633.
- [12] Chen K, Xu D G, Li J N, et al. Propagation characteristics of terahertz wave in hypersonic plasma sheath considering high temperature air chemical reactions [J]. *Optik*, 2020, 208: 164090.
- [13] Rao Q W, Xu G J, Wang P F, et al. Study on the propagation characteristics of terahertz waves in dusty plasma with a ceramic substrate by the scattering matrix method[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 263.
- [14] Heald M A, Wharton C B, Furth H P. Plasma diagnostics with microwaves[J]. *Physics Today*, 1965, 18(9): 72-74.
- [15] Laroussi M, Roth J R. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1993, 21(4): 366-372.
- [16] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Xie C F, Rao K J. *Electromagnetic field and wave*[M]. 3th ed. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [17] 乐嘉陵. 再入物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
Le J L. *Physics of reentry*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [18] Zhou Z K, Wan X H, Li X L, et al. SO-FDTD analysis on transmission characteristics of terahertz wave in plasma [J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(7): 072105.
- [19] 张洪欣, 沈远茂, 韩宇南. 电磁场与电磁波[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
Zhang H X, Shen Y M, Han Y N. *Field and wave electromagnetics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [20] Zhao Q, Bo Y, Lei M D, et al. Numerical evaluation of external magnetic effect on electromagnetic wave transmission through reentry plasma layer[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(11): 112123.