

太赫兹波入射到高温等离子体的特性研究

李珊珊, 摆玉龙*, 马小艳, 孙洪阳

西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 针对高温等离子体对太赫兹波的传输特性, 采用单层介质矩阵传输模型的求解方法, 研究太赫兹在等离子体电子密度、厚度、外加磁场强度和温度影响下的变化规律。数值分析结果发现, 不同条件下高温等离子体对太赫兹波产生的传输特性不同, 等离子体电子密度和厚度越大, 反射率越大, 透射率越小; 外加磁场可以改善衰减情况, 因此等离子体电子密度越小, 厚度越小, 温度越高, 对穿过电磁波的影响越小, 通过调节外加磁场的大小, 避开衰减峰值, 可以缓解通信“黑障”现象。

关键词 表面光学; 太赫兹波; 高温等离子体; 磁化; 传输特性; 黑障

中图分类号 TN011; V271

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202419

Characteristics of Terahertz Wave Propagating in High-Temperature Plasma

Li Shanshan, Bai Yulong*, Ma Xiaoyan, Sun Hongyang

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

Abstract A single-layer dielectric matrix transmission model was developed to study the transmission characteristics of terahertz waves in high temperature plasma. The variation in the terahertz wave under the influences of plasma electron density, thickness, applied magnetic field strength, and temperature was studied. The numerical analysis results indicate that under different conditions, the high-temperature plasma exhibits different transmission characteristics for the incident wave. The reflectivity increases and transmittance decreases with increasing plasma-electron density and thickness; then, a magnetic field can be used to improve the attenuation. Therefore, the thickness decreases with decreasing electron density of the plasma, and the influence of the increasing temperature on electromagnetic waves decreases. Adjusting the magnitude of the applied magnetic field and avoiding the attenuation peak can prevent communication blackouts.

Key words optics at surfaces; terahertz wave; high temperature plasma; magnetization; transmission characteristics; blackout

OCIS codes 240.6700; 350.5400; 350.5610

1 引言

超音速飞行器进入大气层时, 高速流动的气体与飞行器表面摩擦使气体温度迅速升高, 气体被电离成高温等离子体^[1-4]。高温等离子体包裹在天线仓上方会严重影响通信的性能, 甚至会造成通信系统链路中断, 这就是著名的通信“黑障”现象^[5]。人们通过大量的地面试验研究表明^[6], 当入射电磁波的频率低于等离子体的频率时, 电磁波无法透过等

离子体层而被反射回来, 因此信息无法被传输出去而造成通信中断现象。

太赫兹 (THz) 波是频率介于微波与红外之间的电磁波, THz 波具有高透射性、低能量性、时空相干性和瞬态性等特点^[7]。近年来随着 THz 波技术的不断发展与应用^[8-9], 人们认识到 THz 频段的电磁波具有较强的抗干扰能力^[10]。因此研究 THz 在等离子体中的传输特性, 把通信频率提升到 THz 波段, 对解决黑障问题有一定的研究意义^[11-12]。

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-07-09; 录用日期: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(41861047)、西北师范大学科研能力提升团队项目(NWNU-LKQN-1706)

* E-mail: Baiyulong@nwnu.edu.cn

2012年郑灵等^[13]通过理论和实验研究了THz波在非磁化等离子体中传输的特性,理论和实验结果均表明利用THz波段通信是解决黑障的可选途径。2016年姚长江等^[14]讨论了尘埃对等离子体衰减特性的影响,得出在温度、压强和频率等条件下的衰减变化趋势。2017年尹娟等^[15]对表面等离子体耦合到自由空间中光束进行研究,解决了表面等离子体集成光路中的探测问题。陈伟等^[16]研究THz波在时空非均匀等离子体中的变化规律,发现了电子密度弛豫时间越长、温度越高、压强越大,THz波的穿透能力越强。2018年陈春梅等^[17]研究THz波斜入射到磁化等离子体的数值,通过改变入射角来研究THz波的传输特性的改变。之前的大多数研究都是以冷等离子体为模型,很少考虑温度的影响,本文将结合实际情况,研究高温等离子体对THz波传输特性的影响。

2 传输模型与计算分析

2.1 物理模型

图1为电磁波在等离子体中的矩阵传播模型,采用横电波(TE)垂直入射到分界面 $z=0$ 的真空区域0中,区域1的高温等离子体中既有透射波又有反射波,真空区域2中只有透射波。设介质层的厚度为 d , $z_0=0$, $z_1=-d$, $z_0-z_1=d$;入射点 M_0 的入射波和反射波幅值分别为 B_0 和 $A_0=RB_0$, R 为反射系数;透射点 N 处的入射波和反射波幅值为 $B_2=TB_0$ 、 $A_2=0$, T 为透射系数。于是从 M_0 点到 N 点的传输矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ TB_0 \exp(-ik_{2z}z_1) \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{V}}_{10} \begin{bmatrix} RB_0 \exp(ik_{0z}z_0) \\ B_0 \exp(-ik_{0z}z_0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

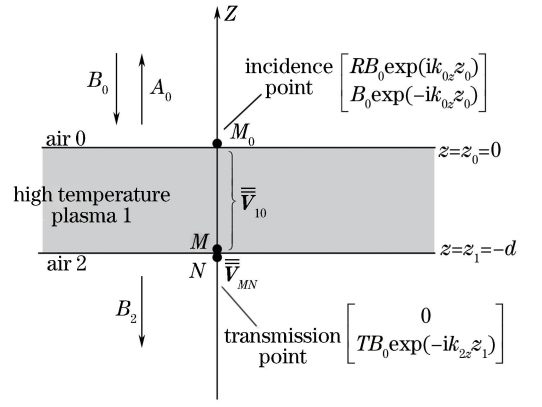


图1 电磁波在等离子体中的矩阵传播模型

Fig. 1 Matrix propagation model of electromagnetic wave in plasma

式中, k_{0z} 为入射波在 z 方向的分量, k_{2z} 为透射波在 z 方向的分量, $\bar{\mathbf{V}}_{MN}$ 为穿越分界面从 M 到 N 点的传播矩阵。 $\bar{\mathbf{V}}_{10}$ 为从 M_0 到 M 点的传输矩阵,表示为

$$\bar{\mathbf{V}}_{10} = \frac{1 + p_{01}^{\text{TE}}}{2} \begin{bmatrix} \exp(-ik_{1z}d) & R_{01}(-ik_{1z}d) \\ R_{01} \exp(ik_{1z}d) & \exp(ik_{1z}d) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $R_{l(l+1)} = -R_{(l+1)l} = \frac{1 - p_{l(l+1)}}{1 + p_{l(l+1)}}$, $p_{l(l+1)}^{\text{TE}} = \frac{\mu_l k_{(l+1)z}}{\mu_{(l+1)} k_{lz}}$,其中 $l=0,1,2$ 代表图1中不同的介质层, R_{01} 为介质0到介质1之间的反射系数, p_{01} 为TE从介质0到介质1之间的比例系数。 $R_{l(l+1)}$ 为从区域 l 到区域 $(l+1)$ 交界面的反射系数, k_{1z} 为等离子体中的波数 k 在 z 方向的分量, μ_l 为第 l 层介质层的磁导率, $p_{l(l+1)}^{\text{TE}}$ 为TE从区域 l 到区域 $(l+1)$ 交界面的比例系数,根据(1)式和(2)式可求出反射系数 R 和透射系数 T 分别为

$$R = -\frac{\frac{1}{4}(1 + p_{12})(1 + p_{01}) [R_{01} + R_{12} \exp(i2k_{1z}d)]}{\frac{1}{4}(1 + p_{12})(1 + p_{01}) [1 + R_{01} R_{12} \exp(i2k_{1z}d)]} = \frac{R_{01} + R_{12} \exp(i2k_{1z}d)}{1 + R_{01} R_{12} \exp(i2k_{1z}d)}, \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{4} \left(\frac{1 + p_{12}}{p_{12}} \right) \left(\frac{1 + p_{01}}{p_{01}} \right) \left[\frac{(1 - R_{01}^2)(1 - R_{12}^2)}{1 + R_{12} R_{01} \exp(i2k_{1z}d)} \right] \exp[-i(k_{2z} - k_{1z})d] = \frac{4 \exp[-i(k_{2z} - k_{1z})d]}{(1 + p_{01})(1 + p_{12}) [1 + R_{12} R_{01} \exp(i2k_{1z}d)]}, \quad (4)$$

式中, $1 - R_{01}^2 = \frac{4p_{01}}{(1 + p_{01})^2}$ 和 $1 - R_{12}^2 = \frac{4p_{12}}{(1 + p_{12})^2}$ 。

考虑电磁波垂直入射到高温等离子体,对于垂

直入射 $R_{01} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$, $R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1}$, ϵ_r 为高温等离子体的介电常数,代入(3)式和(4)式中可得反射系数 R 和透射系数 T 为

$$R = \frac{1 - \epsilon_r}{1 + \epsilon_r + 2\sqrt{\epsilon_r} \coth(ik_{1z}d)}, \quad (5)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_r} \exp(ik_{1z}d)}{(1 + \epsilon_r) \sinh(ik_{1z}d) + 2\sqrt{\epsilon_r} \coth(ik_{1z}d)} \quad (6)$$

(5)式和(6)式所得结果与郑灵等^[13]所得结果一致,表明计算的正确性。

高温等离子体的相对介电常数为^[18]

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - iv_{en} \pm \omega_c)} \cdot \left[1 + \frac{\omega\omega_p^2}{(\omega - iv_{en} \pm \omega_c)^3} \frac{k_b\omega^{-1}}{m_e c^2} \right], \quad (7)$$

式中, ω_p 为等离子体角频率, $\omega_p = \sqrt{N_e \times e^2 / (\epsilon_0 m_e)}$, 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, ω 为电子温度, k_b 为玻尔兹曼常数, c 为真空中的光速, v_{en} 为碰撞频率, $\omega_c = eB/m_e$ 为回旋频率, B 为磁场强度。

从而得到电磁波的反射率 r , 透射率 t 和衰减值 α 为^[19]

$$r = |R|^2, t = |T|^2, \alpha = -\lg t. \quad (8)$$

2.2 对比分析

电磁波与等离子体相互作用主要的物理计算模

型有半空间无限大模型(早期电磁波研究)、锐边界等离子体模型、不均匀锐利边界模型、周期性等离子体模型。Kalluri^[20]利用半空间无限大模型计算电磁波的反射特性;均匀锐边界等离子体模型是有限体积等离子体中电磁波传播最简单的理想化模型, Laroussi^[21]利用锐利边界模型研究电磁波在等离子体中的传播特性;不均匀锐利边界模型根据不同情况下等离子体的扩散情形采用 Epstein 函数、e 指数分布、抛物线分布和 bell-like 等来研究等离子体的空间分布特性, Yang^[22]利用 Epstein 函数来描述电磁波在等离子体中传输;周期性等离子体模型是在真空或介质间周期性地排布等离子体,是近年来新提出的模型,杨涓等^[23]利用该模型研究电磁波在磁化等离子体表面的功率反射系数。

在电磁波分层介质传播矩阵法的基础上采用单层介质模型,求得电磁波在等离子体中的透射率、反射率和衰减。为表明模型的正确性,利用推导公式计算 THz 波垂直入射等离子体中的反射率与透射率,并与已有文献模型(Zheng's formula)^[13]进行分析,取入射 THz 波频率为 0.1~1 THz,等离子体碰撞频率为 0.01 THz,等离子体厚度为 5 cm,等离子体密度为 10^{18} m^{-3} ,所得结果如图 2 所示。

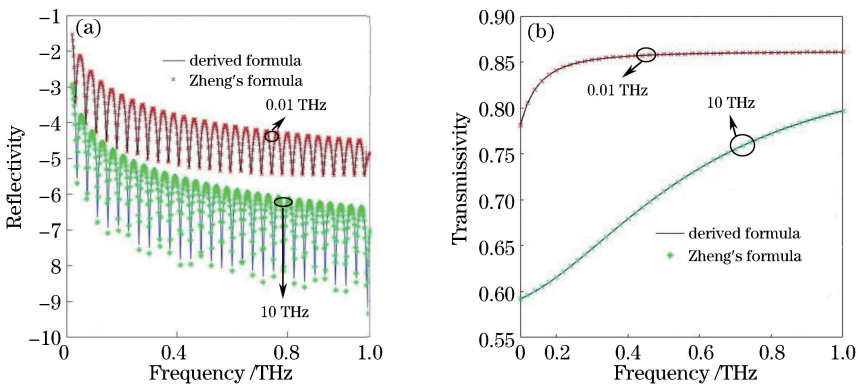


图 2 本文公式与已有文献公式对比图。(a)反射率曲线;(b)透射率曲线

Fig. 2 Comparison between the present formula and the existing literature formula. (a) Reflectivity curves; (b) transmissivity curves

3 模拟结果与分析

研究 THz 波入射磁化高温等离子体中的传播特性,通过改变等离子体的电子密度、厚度、外加磁场强度、温度获得 THz 反射率、透射率和衰减的变化情况。

首先研究磁化高温等离子体密度对 THz 波传输特性的影响。参数选取如下:入射 THz 波的频率增加,透射率增加,衰减减小;等离子体电子

0.1~1 THz,高温等离子体厚度 $d=0.05 \text{ m}$,碰撞频率 $v_{en}=5 \times 10^{12} \text{ rad/s}$,外加磁场强度 $B=5 \text{ T}$,等离子体温度 $\omega=200 \text{ keV}$ 。THz 波入射到磁化高温等离子体中的传输特性随电子密度的变化关系如图 3 所示。

由图 3(a)可以看出,由于高温等离子体的温度高,电子运动的速度大,随着 THz 频率的增加反射率减小,随着高温等离子体电子密度的增加,THz 的反射率增加。图 3(b)和(c)可以看出随 THz 密度越大,透射率越小,衰减越大。这些结论与

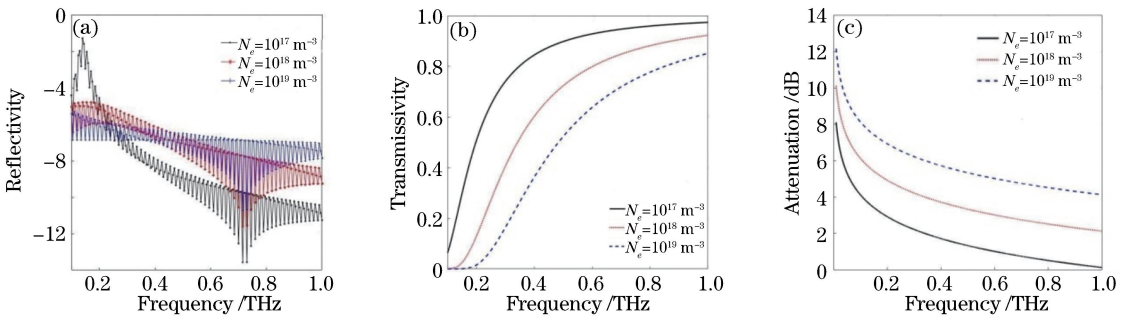


图3 THz波的传输特性随等离子体电子密度的关系。(a)反射率曲线;(b)透射率曲线;(c)衰减曲线

Fig. 3 Relationship between THz wave propagation characteristics and plasma electron density. (a) Reflectivity curves; (b) transmissivity curves; (c) attenuation curves

THz波穿过冷等离子体的结论一致,不管是冷等离子体还是高温等离子体,电子密度增加都是增加了电子从入射波中吸收的能量,使THz波的穿透力减弱,衰减增加。

接下来研究磁化高温等离子体厚度在2~6 cm

内变化时对THz波传输特性的影响,入射THz频率为0.1~1 THz,电子密度 $N_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}$,碰撞频率 $\nu_{en} = 5 \times 10^{12} \text{ rad/s}$,外加磁场强度 $B = 5 \text{ T}$,等离子体温度 $\omega = 200 \text{ keV}$,数值分析的结果如图4所示。

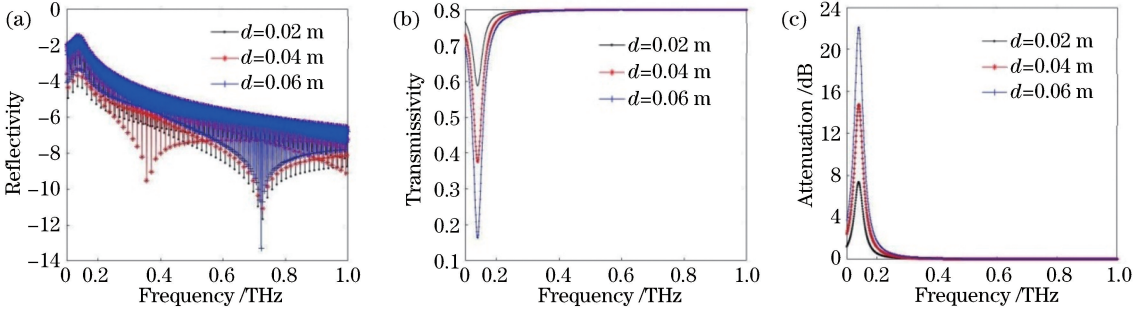


图4 THz波的传输特性随等离子体厚度变化的关系。(a)反射率曲线;(b)透射率曲线;(c)衰减曲线

Fig. 4 Relationship between THz wave propagation characteristics and plasma thickness. (a) Reflectivity curves; (b) transmissivity curves; (c) attenuation curves

由图4(a)可以看出等离子体厚度不同时,随着入射波频率的增加,反射率减小,高温等离子体厚度的变化对反射率的影响很小,但对透射和衰减的影响比较大。高温等离子体厚度 d 的增加会使THz波的透射率减小,衰减增加,这是因为一方面厚度的增加加大了THz波的传输距离,与中性粒子的碰撞增加消耗了更多的能量,另一方面厚度增加导致电子数目变多,从THz波中吸收的能量越多。THz波入射频率增加时,透射率增加,衰减减小。

然后研究磁化条件下外加磁场强度在6~10 T变化时对THz波传输特性的影响。其中入射THz的频率为0.1~1 THz,电子密度 $N_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}$,碰撞频率 $\nu_{en} = 5 \times 10^{12} \text{ rad/s}$,等离子体温度 $\omega = 200 \text{ keV}$,图5是数值计算与分析的结果。

由图5(a)可知反射率取对数坐标时,外加磁场的增加反射率增加,THz波频率的增加反射率降

低。外加磁场的大小影响透射率和衰减峰值的大小和位置,外加磁场越大,反射率越小,透射率峰值越大,这是因为外加磁场条件下,等离子体中自由电子会以一定的频率在磁场入射的平面内作周期性运动,因此自由电子运动受到了磁场的限制。从图5(b)和(c)可以看出随着入射波的频率增加,透射率先降低后增加到峰值;衰减率先增加到峰值再减小,相同外加磁场强度下透射率最低时对应的衰减最大,因此在外加磁场为6,8,10T的情况下,调整入射波的频率在0.5~0.8 THz时,可以有效缓解通信中断的“黑障”问题。

最后研究不同等离子体温度对THz传输特性的影响。其中入射电磁波的频率为0.1~1 THz,电子密度 $N_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}$,碰撞频率 $\nu_{en} = 5 \times 10^{12} \text{ rad/s}$,外加磁场强度 $B = 5 \text{ T}$,厚度 $d = 0.05 \text{ m}$ 。等离子体温度为100~300 keV范围内变化时THz波的传输特性曲线如图6所示。

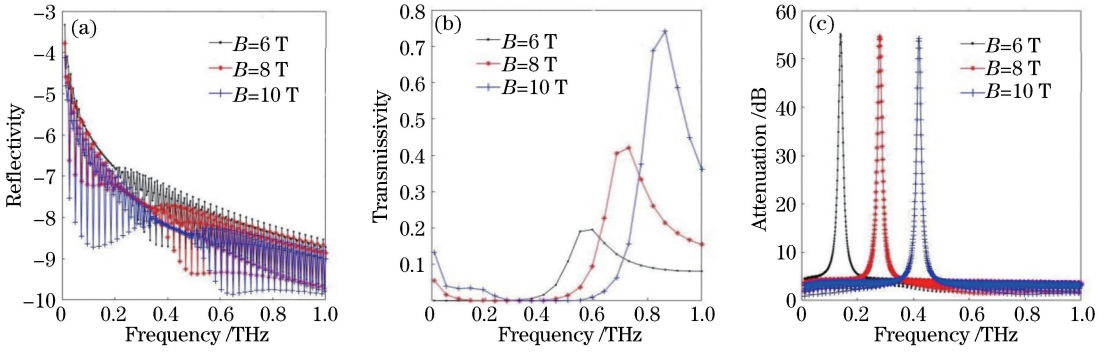


图5 太赫兹波的传输特性随外加磁场强度化的关系。(a)反射率曲线;(b)透射率曲线;(c)衰减曲线

Fig. 5 Relationship between THz wave propagation characteristics and applied magnetic field intensity.

(a) Reflectivity curves; (b) transmissivity curves; (c) attenuation curves

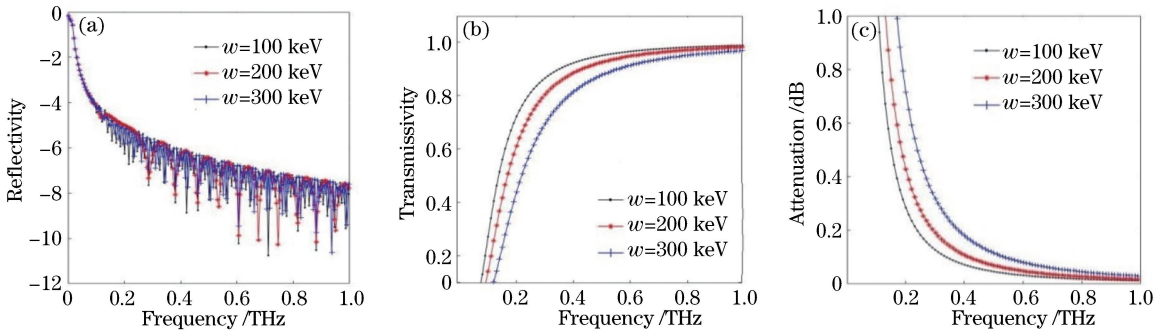


图6 THz波的传输特性随外等离子体温度的关系。(a)反射率曲线;(b)透射率曲线;(c)衰减曲线

Fig. 6 Relationship between THz wave propagation characteristics and plasma temperature. (a) Reflectivity curves;

(b) transmissivity curves; (c) attenuation curves

由图6(a)可知,等离子对低频THz波的反射系数影响较大,等离子体温度越高,反射系数越小,随着THz波频率的增加,温度的变化对反射系数几乎没有影响。图6(b)和(c)可知温度越高,透射率越低,衰减越高,这是因为温度与等离子体的碰撞率成正比,温度越高,等离子体的碰撞率越大,当THz波入射到等离子体中时更多的能量被吸收。但随THz波频率的增加透射率变大,透射率逐渐增加,衰减降低,这是因为THz波频率增加时周期减小且远小于等离子体的弛豫时间,等离子体对THz波的吸收减小。因此增加THz波的入射频率可以缓解温度对传输特性的影响。

4 结论

利用已有电磁波的传输模型,通过计算和仿真分析,对不同条件下太赫兹入射高温等离子体的变化规律进行研究。等离子体电子密度对太赫兹的传输影响很大,电子密度越高吸收能量越多,太赫兹波的反射率越大,透射率越小,衰减越大;等离子体厚度增加,等离子体与电磁波间相互作用时间变长,从而吸收更多的能量,衰减增加;外加磁场能有利于降

低反射率系数,调节外加磁场的大小,避开衰减峰值所在的位置,可以有效缓解通信“黑障”现象;等离子体温度对低频率的入射波影响较大,提高入射波频率可以减缓温度对传输的阻碍。因此要想缓解“黑障”现象,应该调节好等离子体电子密度、厚度、外加磁场强度、温度与入射波频率之间的关系,选择合适的参数。在接下来的工作中可以研究高温等离子体的相对介电常数在计算的频率范围内的变化情况(不同的参数温度,磁场强度等),可以明确知道在哪些频率窗口介电常数出现负值,此时电磁波在等离子体层存在的形式是倏逝波。

参考文献

- [1] Keidar M, Kim M, Boyd I. Electromagnetic reduction of plasma density during atmospheric reentry and hypersonic flights [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(3): 445-453.
- [2] 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.

- [3] Huang S J, Li F. A finite-difference time-domain analysis of electromagnetic propagation in magnetized plasmas [J]. Chinese Journal of Computation Physics, 2005, 22(4): 319-324.
黄守江, 李芳. 电磁波在磁化等离子体中传播的时域有限差分模拟[J]. 计算物理, 2005, 22(4): 319-324.
- [4] Luebbers R, Hunsberger F P, Kunz K S, *et al.* A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for dispersive materials [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1990, 32(3): 222-227.
- [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] Vidmar R J. On the use of atmospheric pressure plasma as electromagnetic reflectors and absorbers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990, 18(4): 733-741.
- [7] Hong W, Yu C, Chen J X, *et al.* Millimeter wave and terahertz technology [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(8): 1086-1107.
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.
- [8] Jiang G T, Zhang L L, Wu T, *et al.* THz wave generation from air plasma induced by off-axis vortex beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614026.
蒋广通, 张亮亮, 吴同, 等. 离轴涡旋光束诱导空气等离子体产生太赫兹波[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614026.
- [9] Zhai L, Wang T, Bai M S, *et al.* Real-time loss measurement of reflecting mirrors applied in plasma environment[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0712001.
翟亮, 王涛, 白满社, 等. 应用于等离子体环境的反射镜损耗的实时测量[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0712001.
- [10] Liu J F, Xi X L, Wan G B, *et al.* Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving-window finite-difference time-domain method [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(3): 852-855.
- [11] Liu F, Zhu Z B, Cui W Z, *et al.* Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 857-866.
刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 857-866.
- [12] Yuan Z C, Shi J M. Mitigation of reentry communication blackout[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 504-507.
袁忠才, 时家明. 飞行器再入大气层通信黑障的消除方法[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 504-507.
- [13] Zheng L, Zhao Q, Liu X Z, *et al.* Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 245202.
郑灵, 赵青, 刘述章, 等. 太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 245202.
- [14] Yao C J, Yang C H, Chen Y Y. Influence of dust particles on attenuation characteristic of plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 023005.
姚长江, 杨翠红, 陈云云. 尘埃粒子对等离子体衰减特性的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 023005.
- [15] Yin J, Chen Y G. Coupling surface plasmon polaritons into beams in free space [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 042401.
尹娟, 陈跃刚. 表面等离子体激元耦合到自由空间中光束的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 042401.
- [16] Chen W, Guo L X, Li J T, *et al.* Propagation characteristics of terahertz waves in temporally and spatially inhomogeneous plasma sheath [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 084102.
陈伟, 郭立新, 李江挺, 等. 时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 084102.
- [17] 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.
- [18] 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): 023301.
- [19] Xie C F, Rao K J. Electromagnetic fields and

- electromagnetic waves[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 236-241.
- 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 236-241.
- [20] Kalluri D K. On reflection from a suddenly created plasma half-space: transient solution [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16(1): 11-16.
- [21] Laroussi M. Scattering of electromagnetic waves by a layer of air plasma surrounding a conducting cylinder [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996, 17(12): 2215-2232.
- [22] Yang H W. A FDTD analysis on magnetized plasma of Epstein distribution and reflection calculation [J]. Computer Physics Communications, 2009, 180(1): 55-60.
- [23] Yang J, Zhu L M, Su W Y, *et al.* Calculation of the wave reflecting characteristics of magnetized plasma surface [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(7): 3236-3240.
- 杨涓, 朱良明, 苏维仪, 等. 电磁波在磁化等离子体表面的功率反射系数计算研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(7): 3236-3240.