

文章编号: 2095-4980(2015)02-0203-06

等离子体鞘套中太赫兹波传输特性研究

李拴涛, 李 军, 朱忠博, 崔万照

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要: 采用散射矩阵方法(SMM)研究太赫兹波在非磁化、非均匀等离子体鞘套中的传输特性。在假定等离子体电子密度分布为双指数分布条件下, 对太赫兹波斜入射等离子体时的功率反射系数、透射系数及吸收系数进行了仿真, 还对其随太赫兹波的入射角度、太赫兹波的频率、等离子体的碰撞频率、等离子体分布形态的变化规律进行了总结。研究结果表明, 在上述条件下, 太赫兹波在等离子体中均有较好的传输特性。总体上来说, 随着太赫兹波频率的提高, 太赫兹波在等离子体中的透射性更好, 可以考虑提升载频至太赫兹波段来解决通信黑障问题。

关键词: 等离子体鞘套; 太赫兹波; 功率透射系数; 功率吸收系数

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0203

Studies on terahertz wave propagation in plasma sheath

LI Shuantao, LI Jun, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: The propagation characteristics of terahertz wave in non-magnetized and non-uniform plasma sheath are studied by the Scattering Matrix Method(SMM). The terahertz wave power reflection, transmission and absorption are simulated when the wave obliquely radiate the plasma, given that the electron density distribution of the plasma sheath is in double-exponential distribution. The variations of the terahertz wave power reflection, transmission and absorption with incident angle, terahertz frequency, plasma collision frequency and plasma distribution shape are summarized. The numerical results show that the terahertz wave has good propagation characteristics under these conditions. Overall, the transmittance of terahertz wave is better in plasma as its frequency increases, therefore, increasing the carrier frequency to terahertz band can be considered for solving blackout problem.

Key words: plasma sheath; terahertz wave; power transmission coefficient; power absorption coefficient

飞行器高速再入大气层时, 气动加热导致飞行器表面被等离子体包覆, 形成等离子体鞘套, 鞘套对传统的 S、C 测控频段产生屏蔽, 会导致飞行器与地面测控站之间通信中断, 飞行器处于盲监控状态, 造成黑障现象^[1]。针对黑障问题, 国内外提出了很多减轻黑障效应的方法^[2-6], 例如, 改进飞行器的气动外形^[2-3,6], 加磁窗或正交电磁场^[2-6], 三波/拉曼散射^[2,6], 喷注亲电子液体等等^[2-3,6]。但是这些方法带来了飞行器设计和发射成本增加, 而且都只是在一定程度上减轻了黑障效应, 并未彻底解决黑障问题。对于我国未来探月采样返回器再入地球大气层及火星探测器进入火星大气^[7-8], 黑障问题仍然是亟待解决的一项技术难题。

近年来研究表明, 太赫兹波在等离子体中具有高穿透性, 提升载波频率是有效突破黑障的一条途径^[9], 从而等离子体鞘套中太赫兹波的传输特性研究成为利用太赫兹波解决黑障的首要问题。马平等人对 100 GHz 和 220 GHz 两个频点太赫兹波在等离子体中的传输特性进行了数值模拟和实验研究, 并与 Ka 波段(35 GHz)电磁波的衰减特性进行了比对分析^[10]。袁承勋等人研究了太赫兹波在磁化、均匀等离子体中的功率吸收特性^[11]。郑灵等人研究了太赫兹波在非磁化、均匀等离子体中的反射、透射以及衰减特性, 并在激波管上开展了太赫兹波段(0.22 THz)电磁波在等离子体中的衰减特性实验^[12]。针对黑障区等离子体鞘套的实际分布难以获取, 本文拟采用

收稿日期: 2014-07-18; 修回日期: 2014-11-29

基金项目: 重点实验室基金项目资助(9140C530404130C53193)

简化模型, 对非磁化、非均匀等离子体中太赫兹波功率反射系数、透射系数及吸收系数进行仿真分析。

1 物理模型

1.1 鞘套模型

理论分析及实验测量均认为, 再入飞行器在高空飞行时, 与大气摩擦产生的等离子体流在最内部和流层最外部等离子体密度相对较小, 而在中间部位密度较大^[13], 所以本文采用等离子体密度呈双指数分布的鞘套模型, 见图1。

设电子密度的分布为:

$$N_e(x) = \begin{cases} N_0 e^{\frac{x-x_1}{x_{10}}}, & 0 \leq x \leq x_1 \\ N_0 e^{-\frac{x-x_1}{x_{20}}}, & x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: 在 x_1 处电子密度达到峰值 N_0 ; x_{10}, x_{20} 分别表示在 II, III 区域中电子密度分布的陡峭程度; x_2 表示等离子体层的总厚度。

1.2 散射矩阵方法

散射矩阵方法(SMM)是将非均匀介质进行分层, 每一薄层视为均匀介质, 从而通过求解每层均匀介质中的场分布及边界条件来获得整个等离子体层的功率反射与透射系数^[14]。

设等离子体鞘套分为 N 层, 第 n 层的电子密度为 $N_e(n)$, 厚度为 $d_{n+1} - d_n$, 总厚度为 d_p 。分层等离子体中电波传播模型如图2所示。

为了计算简便, 本文假设入射波为 TE 波, 入射区域中的总电场可表示为:

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{e}_z E_0 (e^{-jk^{(0)}(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0)} + A e^{-jk^{(0)}(-x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0)}) \quad (2)$$

第 n 层的总电场可表示为:

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{e}_z E_0 (B_n e^{-jk^{(n)}(x \cos \theta_n + y \sin \theta_n)} + C_n e^{-jk^{(n)}(-x \cos \theta_n + y \sin \theta_n)}) \quad (3)$$

透射区域中只有透射波, 电场可表示为:

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{e}_z D E_0 e^{-jk^{(p)}(x \cos \theta_p + y \sin \theta_p)} \quad (4)$$

定义 B_n 和 C_n 是第 n 层的复散射系数, A, D 分别为入射波总的反射与透射系数。 $\theta_0, \theta_n, \theta_p$ 分别是波在第 $0, n, p$ 层的传播方向与 x 轴之间的角度。 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 分别是 x, y 和 z 方向的单位向量。

第 n 层等离子体的复介电常数和传播常数分别为:

$$\epsilon_r^n = 1 - \frac{\omega_{p,n}^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (5)$$

$$k^{(n)} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r^n} \quad (6)$$

式中: $\omega_{p,n}$ 是第 n 层的等离子体频率; ν 是碰撞频率; ω 是入射波的频率; c 为自由空间中的光速。

根据第 n 层分界面的边界条件可得:

$$\begin{pmatrix} B_n \\ C_n \end{pmatrix} = S_n \begin{pmatrix} B_{n-1} \\ C_{n-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 S_n 是第 n 层边界的散射矩阵, 则:

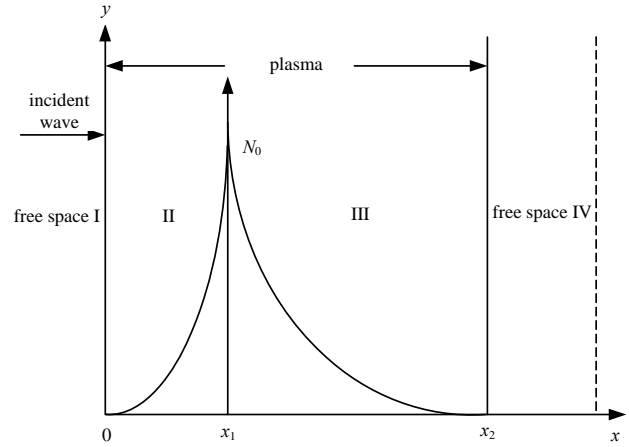


Fig.1 Plasma sheath model of double exponential electron density distribution
图1 电子密度呈双指数分布的鞘套模型

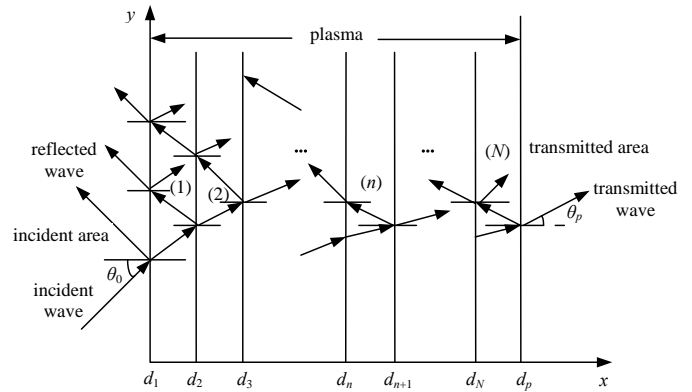


Fig.2 Electromagnetic wave propagation model in stratified plasma
图2 分层等离子体中电磁波传播模型

$$S_n = \begin{pmatrix} e^{-jk^{(n)}d_n \cos \theta_n} & e^{jk^{(n)}d_n \cos \theta_n} \\ k^{(n)} \cos \theta_n e^{-jk^{(n)}d_n \cos \theta_n} & -k^{(n)} \cos \theta_n e^{jk^{(n)}d_n \cos \theta_n} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} e^{-jk^{(n-1)}d_n \cos \theta_{n-1}} & e^{jk^{(n-1)}d_n \cos \theta_{n-1}} \\ k^{(n-1)} \cos \theta_{n-1} e^{-jk^{(n-1)}d_n \cos \theta_{n-1}} & -k^{(n-1)} \cos \theta_{n-1} e^{jk^{(n-1)}d_n \cos \theta_{n-1}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 $n=1$ 时:

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} = S_1 \begin{pmatrix} A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

在 $x = d_p$ 处:

$$\begin{pmatrix} B_N \\ C_N \end{pmatrix} = V_p \cdot D \quad (10)$$

式中,

$$V_p = \frac{1}{2k^{(N)} \cos \theta_N} \begin{pmatrix} (k^{(N)} \cos \theta_N + k^{(p)} \cos \theta_p) e^{j(k^{(N)} \cos \theta_N - k^{(p)} \cos \theta_p) d_p} \\ (k^{(N)} \cos \theta_N - k^{(p)} \cos \theta_p) e^{-j(k^{(N)} \cos \theta_N + k^{(p)} \cos \theta_p) d_p} \end{pmatrix} \quad (11)$$

由第一层迭代到最后一层透射层, 可得:

$$\left(\prod_{n=N}^2 S_n \right) S_1 \begin{pmatrix} A \\ 1 \end{pmatrix} = V_p \cdot D \quad (12)$$

记 S_g 为总散射矩阵: $S_g = \left(\prod_{n=N}^2 S_n \right) S_1$ 。

将 S_g 表示为 $S_g = (S_{g1}, S_{g2})$, 代入公式(12), 可得最终反射系数 A 与透射系数 D :

$$\begin{pmatrix} A \\ D \end{pmatrix} = -(S_{g1}, -V_p)^{-1} S_{g2} \quad (13)$$

则功率反射系数、功率透射系数及功率吸收系数可分别表示为:

$$R = |A|^2, T = |D|^2, Q = 1 - R - T \quad (14)$$

2 数值仿真与结果分析

采用双指数分布的鞘套模型, 模型参数为 $x_{10} = 2 \times 10^{-3}$, $x_{20} = 8 \times 10^{-3}$, $x_1 = 2 \text{ cm}$, $x_2 = 10 \text{ cm}$ 。利用 SMM 分层算法, 研究太赫兹波在等离子体中的功率反射系数、透射系数及吸收系数随太赫兹波频率、入射角度、等离子体碰撞频率及等离子体分布形态的变化规律。

2.1 不同入射角度下的太赫兹波传输特性

选取等离子体的峰值电子密度为 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 碰撞频率为 0.1 THz , 入射角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 时等离子体中太赫兹波的传输特性如图 3 所示。

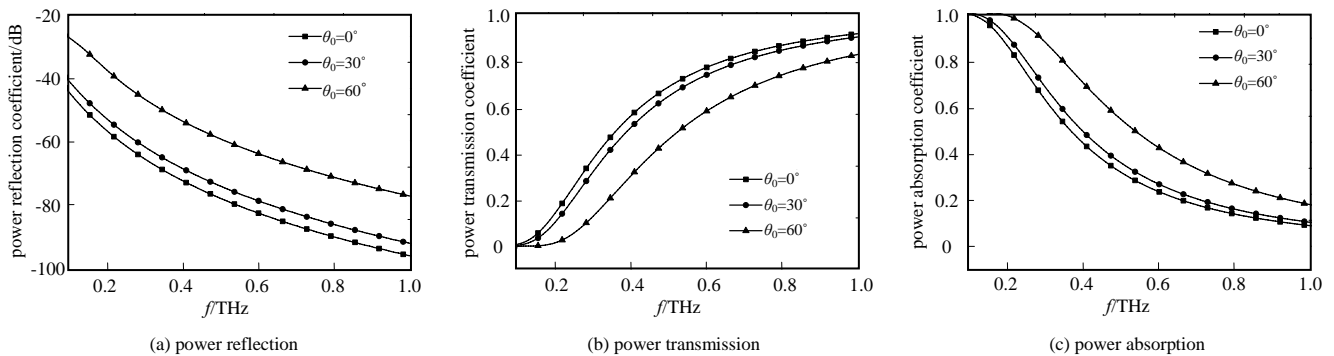


Fig.3 Terahertz wave propagation characteristics varied with incident angles
图 3 入射角度不同时的太赫兹波传输特性

从图 3(a)可以看到, 随着太赫兹波入射角度的增加, 同一频点处的功率反射系数增加。入射角从 0° 增加到 30° , 反射系数增大几个 dB, 而从 30° 到 60° , 反射系数增加了十几个 dB。从图 3(b)可以看出, 随着入射角度的

增大,同一频点对应的功率透射系数减小,但是随着太赫兹波频率的提高,透射系数呈上升趋势。从图3(c)可以看出,随着入射角度的增加,同一频点处的功率吸收系数增大。所以对于飞行器天线辐射的电磁波,应尽量使得波的传播方向垂直入射等离子体,可以减小反射和吸收功率,增大透射功率。

2.2 不同碰撞频率下的太赫兹波传输特性

选取等离子体的峰值电子密度为 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 入射角为 0° , 碰撞频率分别为 0.01 THz、0.1 THz 和 1 THz 时等离子体中太赫兹波的传输特性如图4所示。

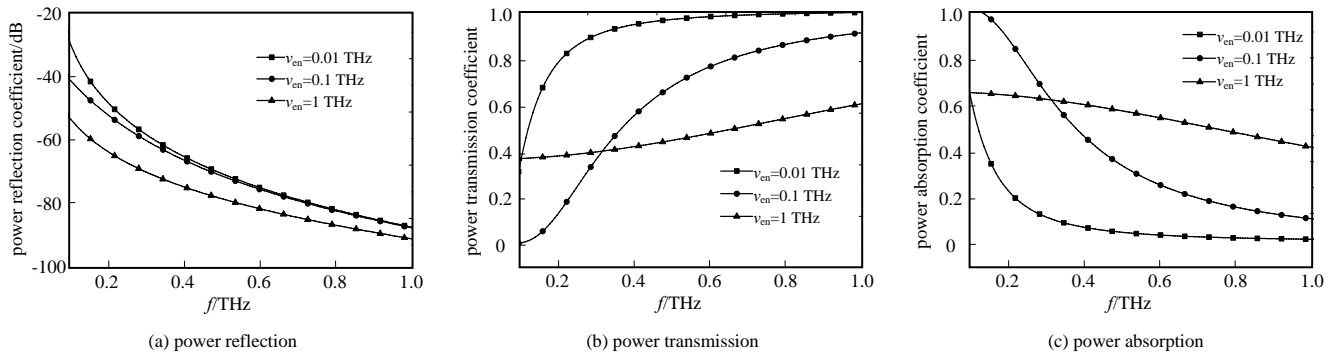


Fig.4 Terahertz wave propagation characteristics varied with plasma collision frequencies

图4 等离子体碰撞频率不同时的太赫兹波传输特性

从图4(a)可以看出,等离子体碰撞频率增大时,同一频点处对应的功率反射系数减小。同时,当太赫兹波频率超过 0.5 THz 时,对于等离子体碰撞频率为 0.01 THz 和 0.1 THz 情况下的功率反射系数基本相同,这是由于此时太赫兹波的频率已经远超过所选取的等离子体密度对应的等离子体特性频率,所以此时低碰撞频率对于太赫兹波反射的影响很小。从图4(b)可以看出,在太赫兹低频段($<0.32 \text{ THz}$)的时候,等离子体碰撞频率从 0.01 THz 增大到 0.1 THz,同一频点处所对应的功率透射系数减小,而当碰撞频率继续增大到 1 THz 时,透射系数反而大于 0.1 THz 时的情况;在太赫兹高频段,随着等离子体碰撞频率增加,同一频点处所对应的透射系数减小。这是由于在太赫兹低频段,碰撞频率 0.1 THz 较另外 2 种情况与入射太赫兹波频率更为接近,从而 0.1 THz 时的碰撞吸收相对较大,功率透射系数也就较小。同理在太赫兹高频段的时候,同一频点处 1 THz 的碰撞频率对应的功率透射系数就较小。从图4(c)可以看出,入射太赫兹波频率和等离子体碰撞频率均为 0.1 THz 时,功率吸收系数接近 1,这是由于等离子体的碰撞频率与入射太赫兹波频率相等时,发生了强烈的碰撞吸收。在太赫兹波的高频段($>0.32 \text{ THz}$),等离子体碰撞频率越高,功率吸收系数越大。这是由于当入射波频率很高时,就需要高的等离子体碰撞频率才能响应电磁波电场部分的加速作用,使得等离子体中的电子吸收入射波的能量。

2.3 不同等离子体分布形态下的太赫兹波传输特性

选取入射角为 0° , 等离子体的峰值电子密度为 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 等离子体的碰撞频率为 0.1 THz, 模型参数 $x_{20} = 8 \times 10^{-3}$ 保持不变,当 x_{10} 分别为 2×10^{-3} , 3×10^{-3} , 4×10^{-3} 时等离子体中太赫兹波的传输特性如图5所示。

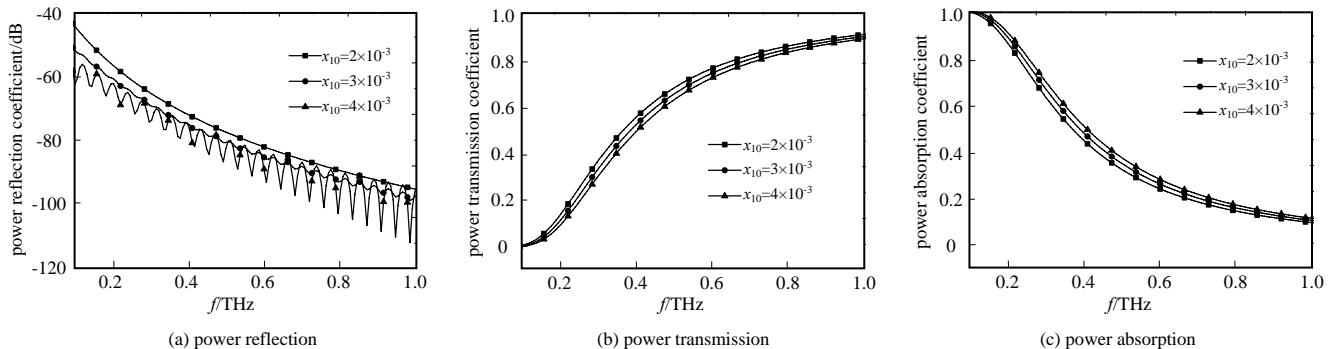


Fig.5 Terahertz wave propagation characteristics varied with plasma distribution shapes

图5 等离子体分布形态不同时的太赫兹波传输特性

从图5(a)可以看出, $x_{10} = 3 \times 10^{-3}$ 时,功率反射系数出现小幅度振荡,当 x_{10} 增大到 4×10^{-3} 时,振荡幅度上升,郑灵在分析太赫兹波在均匀等离子体中的反射特性时也发现了反射曲线幅度振荡的现象^[12]。这是由于 $x_{10} = 2 \times 10^{-3}$

时,等离子体密度分布梯度比较大,II区域边缘电子密度相对较低,多次反射不明显,所以反射曲线基本是光滑的。而当 x_{10} 增大时,电子密度在II区域的分布情况就越接近均匀平板模型,电磁波在等离子体内多次反射形成振荡。从图5(b)可以看出,随着 x_{10} 增大,同一频点对应的功率透射系数减小。从图5(c)可以看出,随着 x_{10} 的增大,同一频点处的功率吸收系数增加。这是由于 x_{10} 的增大,使得II区域的电子密度上升,整个等离子体分布区域总的电子数量随之增加,从而更多的电子与中性粒子发生碰撞,将入射电波的能量吸收掉。

3 结论

本文通过数值仿真太赫兹波在非磁化、非均匀等离子体中的传输特性,可以得到,针对不同等离子体参数的情况,太赫兹波的传输特性也会有所不同。总体来说,入射太赫兹波频率越高,则功率透射系数越大,反射系数和吸收系数越小。可以考虑使用太赫兹波来解决通信黑障问题。但是针对实际问题,还有待于开展飞行试验以期获取与真实再入过程相接近的等离子体鞘套模型,对太赫兹波在实际鞘套中的传输特性进行分析,进而提出太赫兹黑障解决方案。

参考文献:

- [1] Hartunian R A, Stewart G E, Ferguson S D, et al. Causes and mitigation of radio frequency(RF) blackout during reentry of reusable launch vehicles[R]. Aerospace report No.ATR-2007(5309)-1.
- [2] Charles H J. Recommendations from the workshop on communications through plasma during hypersonic flight[R]. U.S. Air Force T&E Days 2009:AIAA 2009-1718, 2009.
- [3] Eric D G, John E F. Review of leading approaches for mitigating hypersonic vehicle communications blackout and a method of ceramic particulate injection via cathode spot arcs for blackout mitigation[R]. NASA TM-2010-216220, 2010.
- [4] Stenzel R L, Urrutia J M. A new method for removing the blackout problem on reentry vehicles[J]. Journal of Applied Physics, 2013,113:103303.
- [5] Lago Viviana, Tinon Emanuelle. Experimental investigation of supersonic plasma flow fields modification by magnetic fields[C]// 18th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Tours, France:[s.n.], 2012:24-28.
- [6] 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. (YUAN Zhongcai, SHI Jiaming. Mitigation of reentry communication blackout[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5):504-507.)
- [7] 左光, 侯砚泽, 陈冲, 等. 载人航天月地返回再入问题研究[J]. 航天器工程, 2013,22(6):112-118. (ZUO Guang, HOU Yanze, CHENG Chong, et al. Issues on moon-earth reentry of manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6):112-118.)
- [8] 崔平远, 窦强, 高艾. 火星大气进入段通信“黑障”问题研究综述[J]. 宇航学报, 2014,35(1):1-12. (CUI Pingyuan, DOU Qiang, GAO Ai. Review of communication blackout problems encountered during Mars entry phase[J]. Journal of Astronautics, 2014,35(1):1-12.)
- [9] 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. (LIU Feng, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):857-866.)
- [10] 马平, 秦龙, 石安华, 等. 毫米波与太赫兹波在等离子体中传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(11):2965-2970. (MA Ping, QIN Long, SHI Anhua, et al. Millimeter wave and terahertz wave transmission characteristics in plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(11):2965-2970.)
- [11] YUAN C X, ZHOU Z X, SUN H G, et al. Propagation of broadband terahertz pulses through a dense-magnetized-collisional-bounded plasma layer[J]. Physics of Plasma, 2010,17:113304.
- [12] 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):245202-1-245202-7. (ZHENG Ling, ZHAO Qing, LIU Shuzhang, et al. Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(24):245202-1-245202-7.)
- [13] 赵汉章, 吴是静, 董乃涵. 不均匀等离子体鞘套中电磁波的传播[J]. 地球物理学报, 1983,26(1):9-16. (ZHAO Hanzhang, WU Shijing, Dong Naihan. On the propagation of electromagnetic wave in a inhomogeneous plasma sheath[J]. Acta Geophysica Sinica, 1983,26(1):9-16.)