

太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究*

郑灵[†] 赵青[†] 刘述章 邢晓俊

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2012年6月13日收到; 2012年7月9日收到修改稿)

本文对太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性进行了理论和实验研究, 得到了非磁化等离子体中太赫兹波传输特性随太赫兹波频率、等离子体密度、碰撞频率和厚度的变化规律. 发现了一些新的现象: 随着太赫兹波频率增加, 反射率曲线出现周期性振荡, 振荡周期为 0.03 THz. 随着太赫兹波频率增加, 振荡幅度增加; 随着等离子体密度增加, 振荡幅度减小; 随着等离子体碰撞频率增加, 振荡幅度增加. 反射率曲线出现振荡的原因是电磁波在 $z = 0$ 和 $z = -d$ 界面处的多次反射所致. 以激波管为实验平台进行了 0.22 THz 太赫兹波在等离子体中传输特性的实验研究, 实验结果和理论结果符合较好. 理论和实验结果均表明, 采用太赫兹来实现地面与飞行器之间的通信互联是解决黑障问题的可选途径之一.

关键词: 等离子体, 太赫兹波, 非磁化

PACS: 52.40.Db, 52.40.kh, 41.20.Jb, 94.05.-a

1 引言

宇宙飞船、航天飞机等空间飞行器再入大气层返回地球时, 由于其飞行速度很高, 飞行器前端形成了一个很强的激波. 激波的压缩和大气的黏滞作用使得飞行器的动能大量转化为热能, 飞行器表面达到很高的温度, 气体和被烧蚀的耐热材料发生电离, 飞行器周围形成一层高温等离子体鞘层, 等离子体导致电磁波传输产生衰减, 因而地面与飞行器之间的通信严重失效, 甚至完全中断, 即飞行器遇到著名的“黑障”问题^[1-3]. 例如, 神州七号飞船返回舱脱离原来的轨道飞向地面的过程中, 大约在 240 s 的时间内暂时失去了与地面的联系. 黑障的出现, 甚至会导致雷达目标丢失, 威胁宇航员的生命.

近年来, 这一现象引起了越来越多人的注意^[4-9]. 美国曾进行了数十次实弹飞行来研究消除再入通讯中断的方法, 如喷射亲电物质降低等离子体电子密度、用强磁场冻结电子碰撞等, 但

都没有获得真正的技术突破^[10]. 随着我国航天事业的飞速发展, 解决“黑障”问题变得愈发迫切. 黑障区通信中断的最主要原因之一是: 等离子体鞘套电子密度剧烈增加, 从而使得等离子体频率大于通信载波频率. 美国 RAMC (Radio Attenuation Measurement-C, 射频衰减测量 -C) 试验表明, 等离子体鞘套密度最高可达 $5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$, 其截止频率为 0.21 THz^[11]. 目前国际通讯联盟已指定 0.2 THz 频段为下一步卫星间通讯之用^[12,13], 近年来, 太赫兹源、太赫兹天线的巨大进步也为这一问题提供了很大的机遇^[14,15]. 因此, 可以考虑采用太赫兹波来实现黑障区飞行器与外界的通信互联.

然而, 目前等离子体与电磁波相互作用方面的工作大多集中于微波频段 ($< 0.1 \text{ THz}$)^[16-20]. To-sun 等研究了太赫兹脉冲在直流辉光放电等离子体中的传输特性, 并从理论上进行了简单的分析^[21], Yuan 等人理论上研究了宽带太赫兹脉冲在磁化碰撞等离子体中的传输特性^[22]. 黑障区等离子体鞘套为非磁化等离子体, 而且由于太赫兹波的波长更短, 太赫兹波与等离子体发生相互作用时, 可能会

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2011CB301805)、国家国际科技合作专项项目 (批准号: 2011DFA63190)、国家高技术研究发展计划 (863 计划)(批准号: 2011AA7022016) 和微细加工光学技术国家重点实验室基金 (批准号: M160104012011E11) 资助的课题.

[†] E-mail: zqzhaq@sohu.com

[‡] E-mail: zhengling137@sohu.com

出现一些新的物理现象和规律. 因此, 研究太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性具有重要意义. 本文对太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性进行了理论与实验研究.

2 物理模型

本文采用 TE 波(横电波)垂直入射到非磁化等离子体中的传输模型, 如图 1 所示. 假设等离子体为均匀、非磁化、稳态、碰撞等离子体. TE 波沿 z 轴负向传播, 电场平行 y 轴方向, 磁场平行 x 轴方向. 介质分为三层, 分别表示为: 0- 空气, 1- 等离子体, 2- 空气. 等离子体厚度为 d .

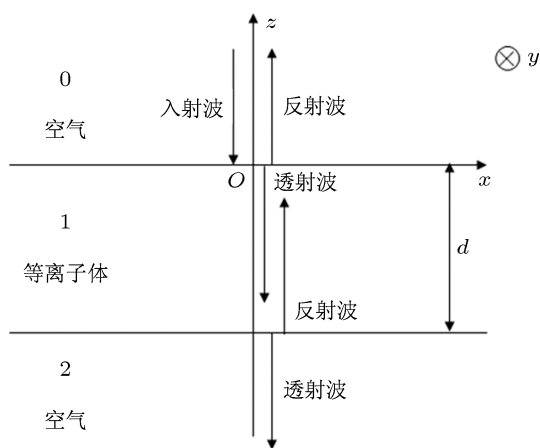


图 1 非磁化等离子体中电磁波传输物理模型

麦克斯韦方程组^[23-27]表示如下:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\mu_0\mathbf{H}, & \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega\varepsilon\mathbf{E}, \\ \nabla \cdot \varepsilon\mathbf{E} &= 0, & \nabla \cdot \mu_0\mathbf{H} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, ε 为介电常数, ω 为电磁波角频率, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度.

介质 0 中的场表示为

$$\begin{aligned} E_{0y} &= E_0(e^{jk_0z} + r e^{-jk_0z}), \\ H_{0x} &= \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_0(e^{jk_0z} - r e^{-jk_0z}), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, E_0 为入射波电场振幅, r 为 $z = 0$ 界面处的电磁波反射系数, k_0 为空气中电磁波波数.

介质 1 中的场表示为

$$\begin{aligned} E_{1y} &= E_{PT} e^{jkz} + E_{PR} e^{-jkz}, \\ H_{1x} &= \frac{k}{\omega\mu_0} (E_{PT} e^{jkz} - E_{PR} e^{-jkz}), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, E_{PT} 和 E_{PR} 分别为介质 1 中透射电场和反射电场振幅, k 为等离子体中电磁波波数.

介质 2 中的场表示为

$$\begin{aligned} E_{2y} &= E_0 t e^{jk_0z}, \\ H_{2x} &= \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_0 t e^{jk_0z}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, t 为电磁波透射系数.

由 $z = 0$ 和 $z = -d$ 界面处电场、磁场的连续性边界条件可得

$$\begin{aligned} E_{0y}|_{z=0} &= E_{1y}|_{z=0}, \\ H_{0x}|_{z=0} &= H_{1x}|_{z=0}, \\ E_{1y}|_{z=-d} &= E_{2y}|_{z=-d}, \\ H_{1x}|_{z=-d} &= H_{2x}|_{z=-d}. \end{aligned} \quad (5)$$

由 (5) 式可得电磁波反射系数 r 和透射系数 t 的表达式

$$\begin{aligned} r &= \frac{1 - \varepsilon_r}{1 + \varepsilon_r + 2\sqrt{\varepsilon_r} \coth(jkd)}, \\ t &= \frac{2\sqrt{\varepsilon_r} e^{jk_0d}}{(1 + \varepsilon_r) \sinh(jkd) + 2\sqrt{\varepsilon_r} \cosh(jkd)}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, ε_r 为非磁化等离子体的相对介电常数.

从而可以得到电磁波的反射率 R 、透射率 T 、衰减值 Att 为

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad \text{Att} = -10 \log_{10} T. \quad (7)$$

3 数值结果与分析

在上述物理模型和理论分析基础上, 本文研究了等离子体中太赫兹波反射率、透射率和衰减随等太赫兹波频率 f 、等离子体密度 n_e 、碰撞频率 f_{en} 和厚度 d 的变化规律.

3.1 等离子体密度对太赫兹波传输特性的影响

等离子体碰撞频率 $f_{en} = 0.01$ THz, 厚度 $d = 8$ cm 时, 等离子体中太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体密度的变化如图 2 所示.

由图 2(a) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 反射率减小; 随着等离子体密度增加, 反射率增加. 反射率曲线出现振荡, $n_e = 10^{11}/\text{cm}^3$ 和 $n_e = 10^{12}/\text{cm}^3$ 时, 振荡表现出明显的周期性, 振荡周期为 0.03 THz, 而当密度上升到 $n_e = 10^{13}/\text{cm}^3$

和 $n_e = 10^{14}/\text{cm}^3$ 时, 反射率振荡的周期性变得不是很明显. 随着太赫兹波频率增加, 振荡幅度增加; 随着等离子体密度增加, 振荡幅度减小. 反射率曲线出现振荡的原因是电磁波在 $z = 0$ 和 $z = -d$ 界面处的多次反射所致. Yuan 等在分析等离子体覆盖导体的电磁波反射特性时也发现了类似的现象 [26].

由图 2(b) 和 (c) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 透射率增加, 衰减减小. 即使对于 $10^{14}/\text{cm}^3$

这样高密度的等离子体, 0.22 THz 太赫兹波的衰减也只有 13 dB. 这是由于电磁波频率增加时, 电磁波的电场变化太快, 此时等离子体中的电子来不及响应如此快速变化的电场, 因而吸收的电磁波能量减小, 从而导致电磁波衰减下降. 等离子体密度增加时, 透射率减小, 衰减增加. 这是由于等离子体密度增加时, 更多的电子从电场吸收能量, 并通过碰撞传给了中性粒子, 使得电磁波衰减增加.

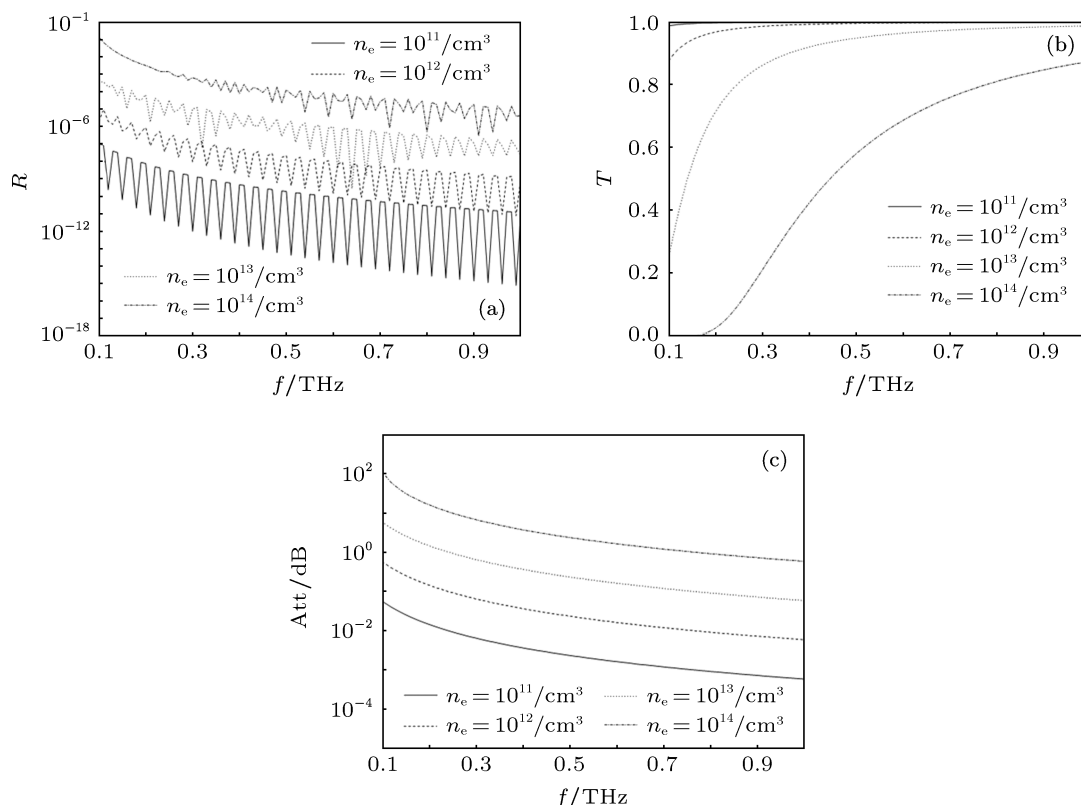


图 2 太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体密度的变化 (a) 反射率曲线; (b) 透射率曲线; (c) 衰减曲线

3.2 等离子体碰撞频率对太赫兹波传输特性的影响

等离子体密度 $n_e = 10^{11}/\text{cm}^3$, $d = 8 \text{ cm}$ 时, 等离子体中太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体碰撞频率的变化如图 3 所示.

由图 3(a) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 反射率减小; 随着等离子体碰撞频率增加, 反射率减小. 反射率曲线出现周期性振荡, 振荡周期为 0.03 THz. 随着太赫兹波频率增加, 振荡幅度增加; 随着等离子体碰撞频率增加, 振荡幅度也增加.

由图 3(b) 和 (c) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 透射率增加, 衰减减小. 随着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.

3.3 等离子体厚度对太赫兹波传输特性的影响

$n_e = 10^{11}/\text{cm}^3$, $f_{en} = 0.01 \text{ THz}$ 时, 等离子体中太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体厚度的变化如图 4 所示.

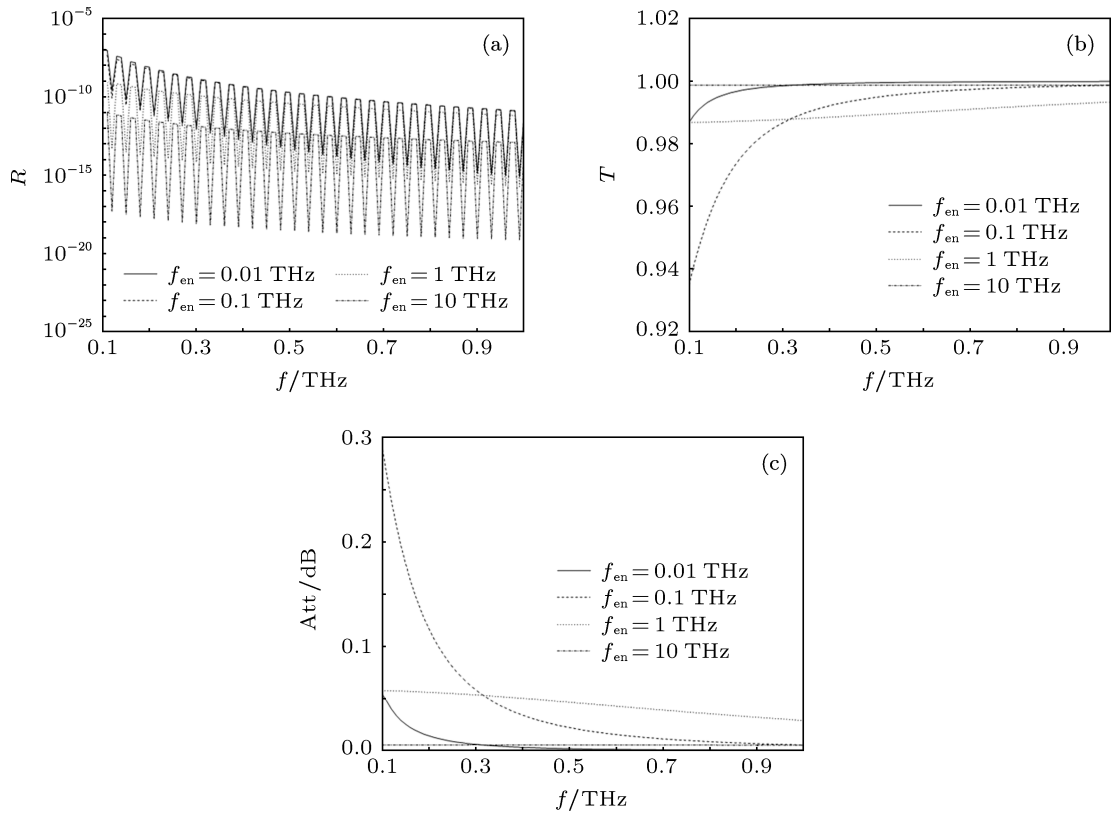


图3 太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体碰撞频率的变化 (a) 反射率曲线; (b) 透射率曲线; (c) 衰减曲线

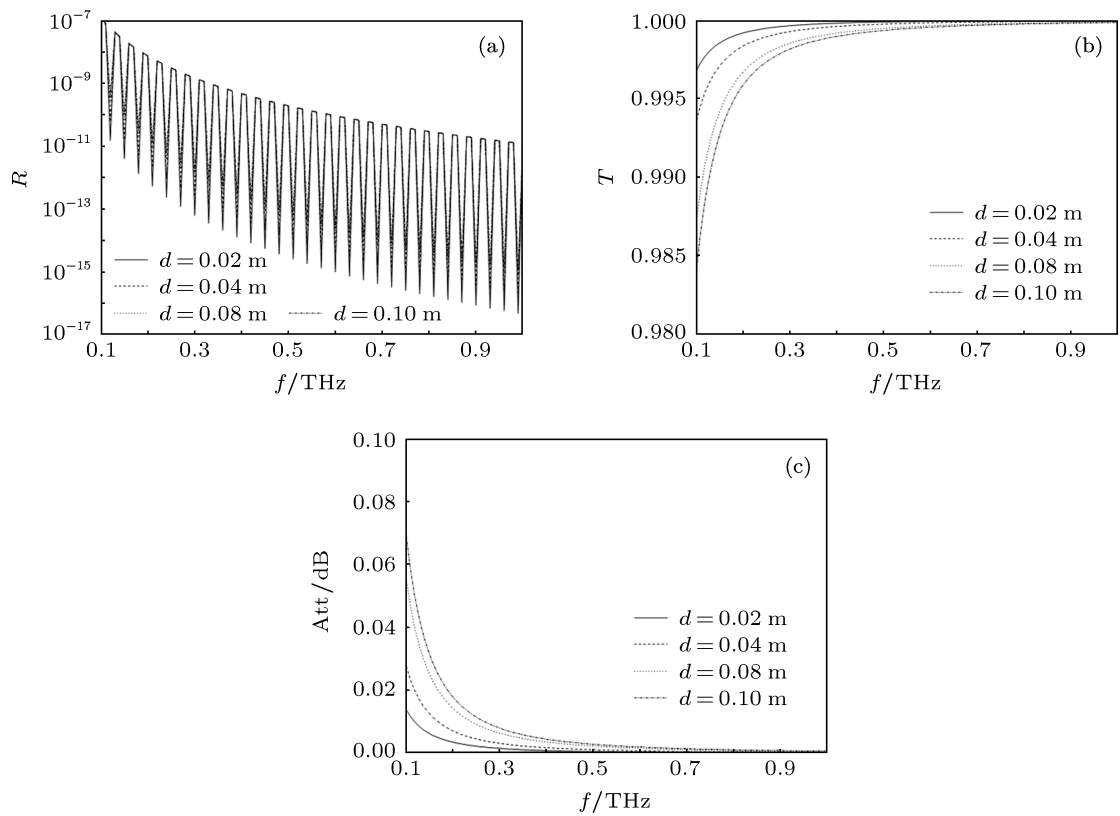


图4 太赫兹波传输特性随太赫兹波频率和等离子体厚度的变化 (a) 反射率曲线; (b) 透射率曲线; (c) 衰减曲线

由图 4(a) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 反射率下降; 随着等离子体厚度增加, 反射率基本无变化. 反射率曲线出现周期性振荡, 振荡周期为 0.03 THz. 随着太赫兹波频率增加, 振荡幅度增加.

由图 4(b) 和 (c) 可以看出, 随着太赫兹波频率增加, 透射率增加, 衰减减小. 随着等离子体厚度增加, 透射率减小, 衰减增加. 这是由于随着等离子体厚度增加, 太赫兹波与等离子体的作用距离增加, 从而衰减也增加.

4 实验结果

在理论分析基础上, 以激波管为实验平台, 搭建了等离子体中太赫兹波传输实验系统, 对 0.22 THz 太赫兹波在等离子体中的传输特性进行了实验研究, 实验装置示意图如图 5 所示. 激波管直径为 8 cm, 共进行了 5 次有效实验. 表 1 所示为实验中的等离子体密度和碰撞频率参数.

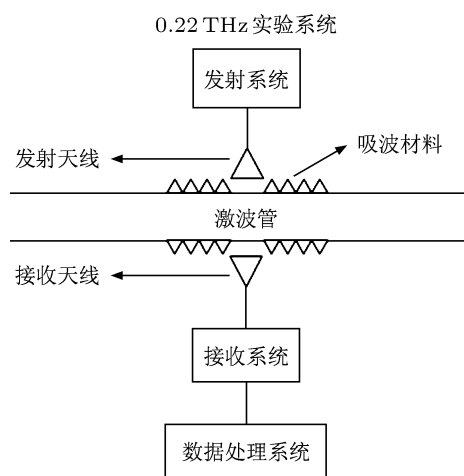


图 5 0.22 THz 太赫兹波在等离子体中传输特性实验装置示意图

图 6 为 0.22THz 太赫兹波衰减实验值和理论值的对比, 由图 6 可以看出, 对于相同的等离子体密度和碰撞频率, 0.22 THz 太赫兹波衰减实验值和理论值大体符合. 实验值和理论值之间的差异可能是实验测试系统带来的误差, 也可能来自等离子体密度和碰撞频率的计算误差. 由图 6 还可以看到, 即使对于 $2.4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 如此高密度的等离子体, 0.22 THz 太赫兹波理论和实验衰减值均小于 30 dB, 因此, 采用太赫兹来实现地面与飞行器之间的通信互联是解决黑障问题的可选途径之一.

表 1 等离子体密度和碰撞频率 *

实验数据点	n_e/cm^{-3}	f_{en}/Hz
1	9.0×10^{11}	8.2×10^{10}
2	3.0×10^{12}	9.2×10^{10}
3	3.2×10^{12}	9.7×10^{10}
4	7.3×10^{12}	1.0×10^{11}
5	2.4×10^{13}	1.2×10^{11}

* 表中参数是根据激波管的物理状态参数计算得到的.

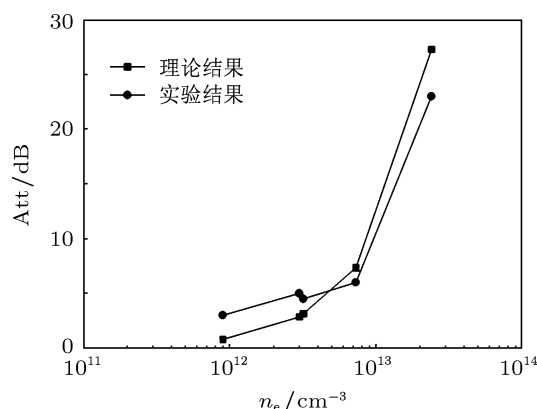


图 6 0.22 THz 太赫兹波衰减实验值和理论值对比

5 结论

本文对太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性进行了理论和实验研究, 得到了太赫兹波衰减随太赫兹波频率、等离子体密度、碰撞频率和厚度的变化规律: 1) 随着太赫兹波频率增加, 反射率减小, 透射率增加, 衰减减小. 2) 随着等离子体密度增加, 反射率增加, 透射率减小, 衰减增加. 3) 随着等离子体碰撞频率增加, 反射率减小, 透射率先减小后增加, 衰减先增加后减小. 4) 随着等离子体厚度增加, 反射率基本无变化, 透射率减小, 衰减增加. 5) 随着太赫兹波频率增加, 反射率曲线出现周期性振荡, 振荡周期为 0.03 THz. 随着太赫兹波频率增加, 振荡幅度增加; 随着等离子体密度增加, 振荡幅度减小; 随着等离子体碰撞频率增加, 振荡幅度增加. 反射率曲线出现振荡的原因是电磁波在 $z = 0$ 和 $z = -d$ 界面处的多次反射所致. 以激波管为实验平台进行了等离子体中 0.22 THz 太赫兹波传输特性的实验研究, 实验结果和理论结果符合较好. 理论和实验结果均表明: 采用太赫兹来实现地面与飞行器之间的通信互联是解决黑障问题的可选途径之一.

感谢中国空气动力研究与发展中心超高速所马平高级工程师和石安华研究员在实验方面提供的帮助.

- [1] Mitchell F H 1967 *Proc. IEEE* **55** 619
- [2] Rybak J P, Churchill R J 1971 *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.* **AES-7** 879
- [3] Zeng X J, Yu Z F, Bu S Q, Liu S, Ma P, Shi A H, Liang S C 2010 *Acta Aerodyn. Sin.* **28** 645
- [4] Keidar M, Kim M, Boyd I D 2008 *J. Spacecraft Rockets* **45** 445
- [5] Liu J F, Xi X L, Wan G B, Wang L L 2011 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **39** 852
- [6] Kim M, Keidar M, Boyd I D 2008 *J. Spacecraft Rockets* **45** 1223
- [7] Thoma C, Rose D V, Miller C L, Clark R E, Hughes T P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 043301
- [8] Chen Y Y, Song Y, Li Z H, H A Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034201
- [9] Kim M, Keidar M, Boyd I D 2008 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **36** 1198
- [10] Yang Y C 2010 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [杨永常 2010 硕士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
- [11] Schexnayder C J, Evans J S, Huber P W 1970 *NASA SP-252* 277
- [12] Wang Y 2011 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [王玥 2011 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [13] Shen J E, Rong J, Liu W X 2006 *Infrared Laser Eng.* **35** 342 (in Chinese) [申金娥, 荣健, 刘文鑫 2006 红外与激光工程 **35** 342]
- [14] Koch M 2007 *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Object* (Braunschweig) p325
- [15] Wang G Q, Wang J G, Li X Z, Fan R Y, Wang X Z, Wang X F, Tong C J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8459 (in Chinese) [王光强, 王建国, 李小泽, 范如玉, 王行舟, 王雪峰, 童长江 2010 物理学报 **59** 8459]
- [16] Yang H W, Chen R S, Zhang Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3464 (in Chinese) [杨宏伟, 陈如山, 张云 2006 物理学报 **53** 3464]
- [17] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 778 (in Chinese) [刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌 2004 物理学报 **53** 778]
- [18] Zheng L, Zhao Q, Liu S Z, Ma P, Huang C, Tang Y F, Chen X L, Xing X J, Zhang C Y, Luo X G 2012 *Prog. Electromagn. Res. M* **24** 179
- [19] Zheng L, Zhao Q 2011 *2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* Harbin, China August 12–14, 2011 p4535
- [20] Ma C G, Zhao Q, Luo X G, He G, Zheng L, Liu J W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055201 (in Chinese) [马春光, 赵青, 罗先刚, 何果, 郑灵, 刘建卫 2011 物理学报 **60** 055201]
- [21] Tosun Z, Akbar D, Altan H 2009 *34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* Busan, Korea, September 21–25, 2009, p1
- [22] Yuan C X, Zhou Z X, Xiang X L, Sun H G, Pu S Z 2010 *Phys. Plasmas* **17** 113304
- [23] Yang H W, Tang W C, Kong X K 2007 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **28** 547
- [24] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **23** 1803
- [25] Chaudhury B, Chaturvedi S 2006 *Phys. Plasmas* **13** 123302
- [26] Yuan C X, Zhou Z X, Sun H G 2010 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **38** 3348
- [27] Jamison S P, Shen J L, Jones D R, Issac R C, Ersfeld B, Clark D, Jaroszynski D A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4334

Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma*

Zheng Ling[‡] Zhao Qing[†] Liu Shu-Zhang Xing Xiao-Jun

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 13 June 2012; revised manuscript received 9 July 2012)

Abstract

The space crafts, such as spaceship, space shuttle and so on, will face a famous “blackout” problem when they re-enter the earth’s atmosphere at high velocity. The plasma sheath severely affects the propagation of the incident electromagnetic wave and causes severe electromagnetic wave attenuation, which results in the communication failures between the space crafts and the ground control center. It is important to study the properties of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma, for using the terahertz wave communication is an alternative method to solve the reentry blackout problem. The terahertz wave propagation characteristics in non-magnetized plasma are studied in this paper. The variations of the terahertz wave propagation properties with the terahertz wave frequency, plasma density, plasma collision frequency and the thickness of the plasma are acquired. Some new phenomena are found i.e., there appears periodic oscillation on the reflectivity curve with the increase of terahertz wave frequency, and the period of oscillation is 0.03THz. The oscillation amplitude increases with the increase of terahertz frequency, decreases with the increase of plasma density, and increases with the increase of plasma collision frequency. The oscillation is attributed to the multiple reflections of the electromagnetic wave at the interfaces at $z = 0$ and $z = -d$. The terahertz wave propagation properties in plasma are studied experimentally with the shock tube, and the experimental results match well with the theoretical ones. Both the theoretical and experimental results indicate that using terahertz wave communication is an effective way to solve the reentry blackout problem.

Keywords: plasma, terahertz wave, non-magnetized

PACS: 52.40.Db, 52.40.kh, 41.20.Jb, 94.05.–a

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301805), the National Special Projects of International Scientific and Technological Cooperation (Grant No. 2011DFA63190), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7022016), and the Foundation of the State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication (Grant No. M160104012011E11).

[†] E-mail: zqzhaoq@sohu.com

[‡] E-mail: zhengling137@sohu.com