

# 等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究\*

郑灵<sup>1)</sup> 赵青<sup>1)†</sup> 罗先刚<sup>2)</sup> 马平<sup>1)</sup> 刘述章<sup>1)</sup> 黄成<sup>2)</sup> 邢晓俊<sup>1)</sup>  
张春艳<sup>1)</sup> 陈旭霖<sup>1)</sup>

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

(2011年10月19日收到; 2012年1月4日收到修改稿)

本文对 35 GHz 和 96 GHz 电磁波在等离子体中的传输特性进行了理论与实验研究, 得到了电磁波衰减随等离子体密度、碰撞频率和电磁波频率的变化规律. 等离子体密度增加一个数量级时, 电磁波衰减增加一个数量级; 随着等离子体碰撞频率的增加, 电磁波衰减先增加后减小; 随着电磁波频率的增加, 衰减下降. 以激波管为实验平台进行了电磁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吻合较好. 理论和实验结果均表明, 提高电磁波频率是解决黑障问题的有效途径.

**关键词:** 等离子体, 电磁波传输

**PACS:** 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

## 1 引言

当宇宙飞船、航天飞机等空间飞行器再入大气层返回地球时, 飞行速度极高, 可以达到音速的十几倍到几十倍, 这使得飞行器前端形成了一个很强的激波. 飞行器头部周围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, 气体和被烧蚀的防热材料均发生电离, 在飞行器周围形成一层高温等离子体鞘层, 等离子体鞘层和电磁波发生相互作用, 电磁波传输产生衰减, 导致地面与飞行器之间的通信严重失效, 甚至完全中断, 同时亦会导致雷达目标丢失, 威胁宇航员的生命, 即飞行器遇到著名的“黑障”问题. 近年来, 这一现象引起了越来越多人的注意<sup>[1-5]</sup>.

2008年, Lan等人对高碰撞频率等离子体中电磁波的传输特性进行了数值研究<sup>[6]</sup>; 2008年, Kei-

dar等人理论上研究了外加电场和磁场下, 等离子体对电磁波衰减的影响<sup>[7]</sup>; 2009年, Thoma等人理论上研究了高密度磁化碰撞等离子体中电磁波的传输情况<sup>[8]</sup>; 2010年, Zeng等人对高超声速飞行器模型及其雷达散射截面进行了研究<sup>[9]</sup>.

研究电磁波在等离子体中的传输特性对于解决黑障问题具有重要意义<sup>[10-16]</sup>. 然而, 目前大多数工作均集中于理论和数值模拟, 实验方面工作开展还很少. 本文对电磁波在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

本文对电磁波通过圆柱形等离子体后的传输特性进行了研究, 等离子体直径  $d = 0.08$  m.

分析电磁波在等离子体中的传输特性时, 一般通过考虑它的介电常数来分析电磁波在其中的传输特性<sup>[17-20]</sup>. 本文采用电磁波沿  $z$  轴正向垂直

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2011CB301805), 国际合作项目(批准号: OS20122R0151), 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: zhengling137@sohu.com

入射到非磁化均匀等离子体中的传输模型, 如图 1 所示.

等离子体相对介电常数为

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2} - i \frac{v_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2}, \quad (1)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电磁波频率,  $v_{en} = 2\pi f_{en}$ ,  $f_{en}$  为等离子体中电子与中性气体分子的碰撞频率,  $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$  为等离子体角频率,  $n_e$  为等离子体电子密度,  $e$  为电子电量,  $m_e$  为电子质量,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m 为真空介电常数.

均匀等离子体中电磁波波动方程<sup>[21-23]</sup>为

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0. \quad (2)$$

方程 (2) 的均匀平面波解为

$$E(z) = E_0 e^{-ikz}, \quad (3)$$

其中, 波数  $k = \beta - i\alpha$ ,

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{2}} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2}\right)^2 + \left(\frac{v_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2}\right)^2}}, \quad (4)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{2}} \sqrt{-1 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2}\right)^2 + \left(\frac{v_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{en}^2}\right)^2}}, \quad (5)$$

其中,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率.

假设入射电磁波功率为  $P_0$ , 则经过等离子体后的电磁波功率  $P_1$  为

$$P_1 = P_0 e^{-2\alpha d}. \quad (6)$$

因此, 电磁波通过等离子体后的衰减为

$$\text{Att} = \left| 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \right| = 8.68\alpha d (\text{dB}). \quad (7)$$

### 3 数值结果

#### 3.1 电磁波衰减随等离子体密度的变化

分别固定等离子体碰撞频率  $f_{en} = 10^9$  Hz,  $10^{10}$  Hz,  $10^{11}$  Hz 和  $10^{12}$  Hz 时, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减随等离子体密度的变化如图 2 所示.

由图 2(a)—(d) 中都可以看出, 在相同的等离子体密度和碰撞频率下, 35 GHz 电磁波衰减量都大于等于 96 GHz 电磁波衰减量. 当等离子体碰撞频率不变时, 随着等离子体密度增加, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减均增大, 同时二者差值增加. 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.

比较图 2(a)—(d) 可知, 当等离子体密度不变时, 随着等离子体碰撞频率增加, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减差值先增加后减小,  $f_{en} = 10^{12}$  Hz 时, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减曲线基本重合. 下一节将进一步研究电磁波衰减和等离子体碰撞频率

的关系.

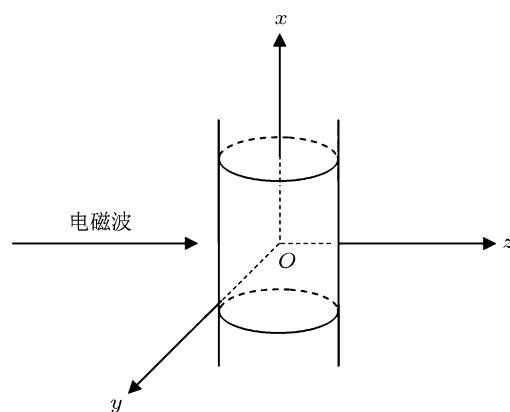


图 1 等离子体中电磁波传输物理模型

#### 3.2 电磁波衰减随等离子体碰撞频率的变化

分别固定等离子体密度  $n_e = 10^{16}/\text{m}^3$ ,  $10^{17}/\text{m}^3$ ,  $10^{18}/\text{m}^3$  和  $10^{19}/\text{m}^3$  时, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减随等离子体碰撞频率的变化如图 3 所示.

由图 3(a)—(d) 可以看出, 在相同的等离子体密度和碰撞频率下, 35 GHz 电磁波衰减量均大于等于 96 GHz 电磁波衰减量. 与电磁波衰减随等离子体密度的变化规律有所不同, 随着等离子体碰撞频率的增加, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减量均先增

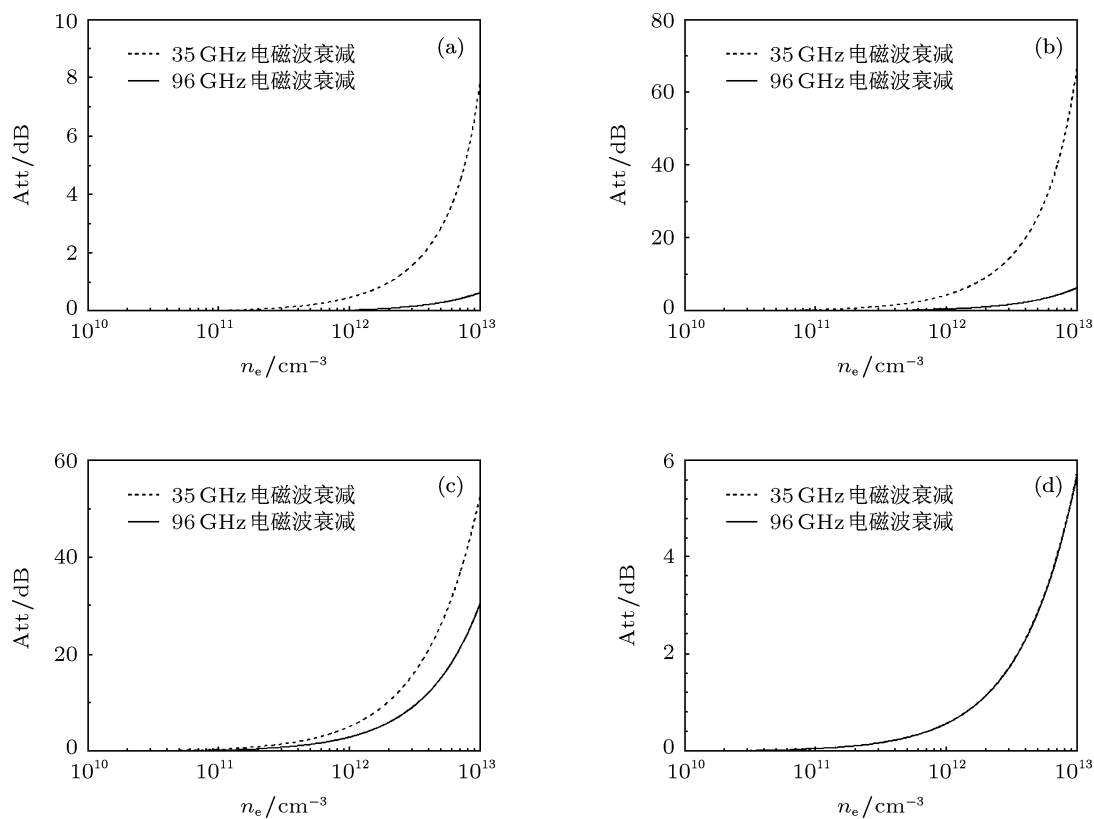


图2 电磁波衰减随等离子体密度的变化 (a)  $f_{en} = 10^9$  Hz; (b)  $f_{en} = 10^{10}$  Hz; (c)  $f_{en} = 10^{11}$  Hz; (d)  $f_{en} = 10^{12}$  Hz

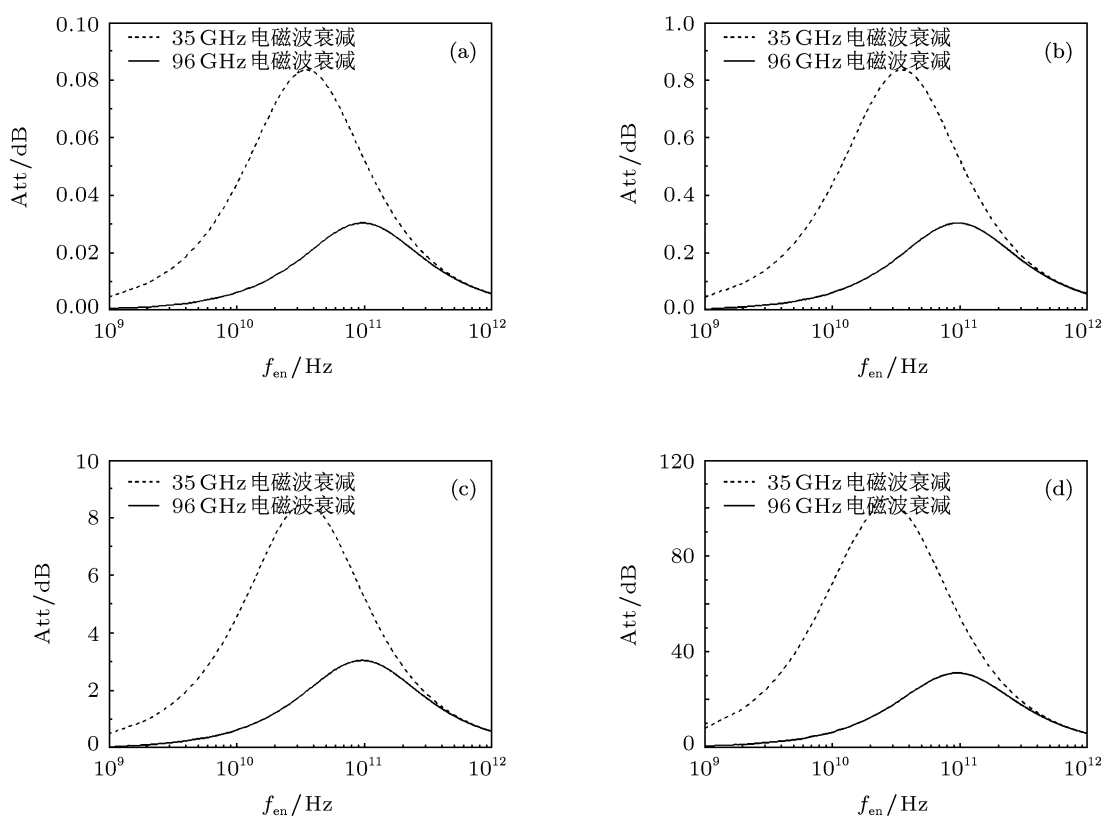


图3 电磁波衰减随等离子体碰撞频率的变化 (a)  $n_e = 10^{16}/m^3$ ; (b)  $n_e = 10^{17}/m^3$ ; (c)  $n_e = 10^{18}/m^3$ ; (d)  $n_e = 10^{19}/m^3$

大后减小. 在等离子体碰撞频率较高时, 35 GHz 电磁波衰减曲线和 96 GHz 电磁波衰减曲线基本重合. 这是由于碰撞频率增加时, 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, 这使得电磁波衰减增加; 而当碰撞频率过高时, 电子在碰撞前被电磁波加速的时间很短, 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.

由图 3(a)—(d) 还可以看出, 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减曲线均存在峰值, 表 1 给出了不同密度下 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减峰值对应的碰撞频率. 由图 3 和表 1 可以看出, 对于 35 GHz 电磁波而言, 等离子体碰撞频率  $f_{en} = 35$  GHz 附近, 电磁波衰减存在峰值; 对于 96 GHz 电磁波而言, 等离子体碰撞频率  $f_{en} = 96$  GHz 附近, 电磁波衰减存在峰值. 即  $f = f_{en}$  附近, 电磁波衰减存在峰值, 这是由于等离子体对电磁波产生了共振吸收.

比较图 3(a)—(d), 并由表 1 可知, 随着等离子体密度的增加, 电磁波衰减峰值位置向等离子体碰撞频率低端稍微有所移动, 而且, 35 GHz 电磁波衰减峰值位置移动更为明显. 另外, 比较图 3(a)—(d) 还可以看到, 随着等离子体密度的增加, 电磁波衰减量增加, 等离子体密度增加一个数量级时, 电磁波衰减也增加一个数量级.

表 1 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减峰值对应的碰撞频率

$N_e/m^{-3}$	35 GHz 电磁波衰减峰值	96 GHz 电磁波衰减峰值
	对应的碰撞频率/GHz	对应的碰撞频率/GHz
$10^{16}$	35	96
$10^{17}$	35	96
$10^{18}$	34	96
$10^{19}$	27	94

#### 4 实验结果

在理论结果和分析基础上, 以激波管为实验平台, 搭建了等离子体中电磁波传输实验系统, 对电

磁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 4 所示. 实验中, 采用 35 GHz 测试系统和 96 GHz 测试系统同时进行实验, 激波管直径为 0.08 m, 共进行了 4 次实验. 表 2 所示的等离子体密度和碰撞频率数据是根据实验时激波管的物理状态参数计算出来的, 并以此作为理论计算的基础参数.

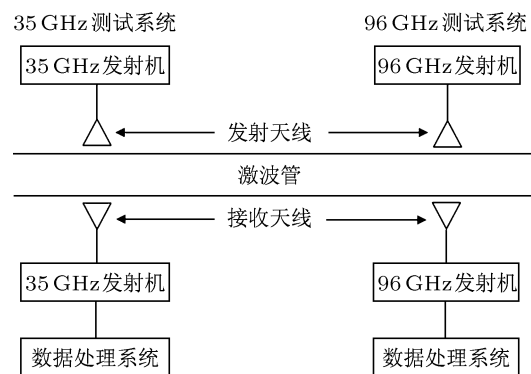


图 4 电磁波在等离子体中传输特性实验装置示意图

表 2 等离子体密度和碰撞频率

数据点	$n_e/m^{-3}$	$f_{en}/10^{10}$ Hz
1	$5.0 \times 10^{16}$	4.0
2	$5.9 \times 10^{16}$	4.0
3	$7.3 \times 10^{16}$	4.2
4	$6.0 \times 10^{17}$	4.0

表中参数是根据激波管的物理状态参数计算得到的.

图 5 给出了 35 GHz, 96 GHz 电磁波衰减理论值的对比, 图 6 为 35 GHz, 96 GHz 电磁波衰减实验值的对比. 由图 5、图 6 可以看出, 在相同的等离子体密度和碰撞频率下, 35 GHz 电磁波衰减量的理论值和实验值均大于 96 GHz 电磁波衰减量. 由此可以看出, 提高电磁波频率是解决黑障问题的有效途径.

图 7 为 35 GHz 电磁波衰减实验值和理论值的对比, 图 8 为 96 GHz 电磁波衰减实验值和理论值的对比. 由图 7、图 8 可以看出, 对于相同的等离子

体密度和碰撞频率, 35 GHz, 96 GHz 电磁波衰减理论值和实验值均大体符合. 由图 7、图 8 还可以看出, 35 GHz, 96 GHz 电磁波衰减实验值和理论值之

间均存在一定差异, 这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.

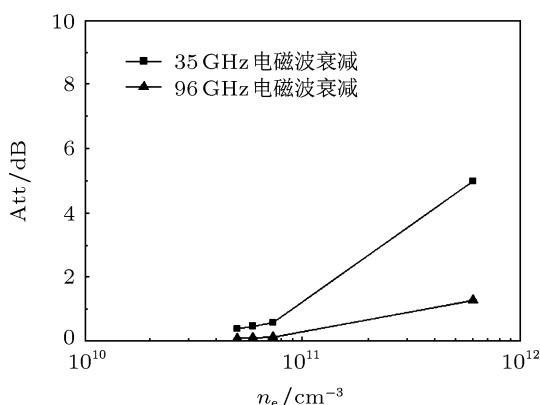


图 5 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减理论值对比

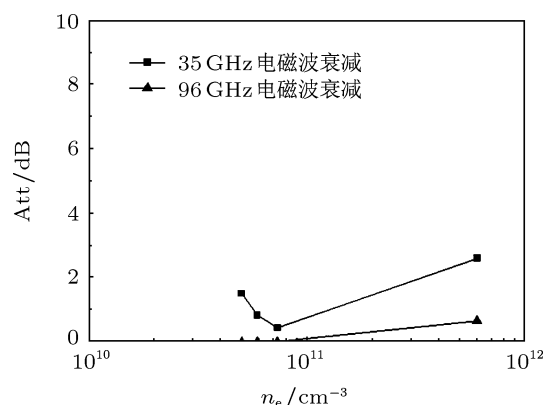


图 6 35 GHz 和 96 GHz 电磁波衰减实验值对比

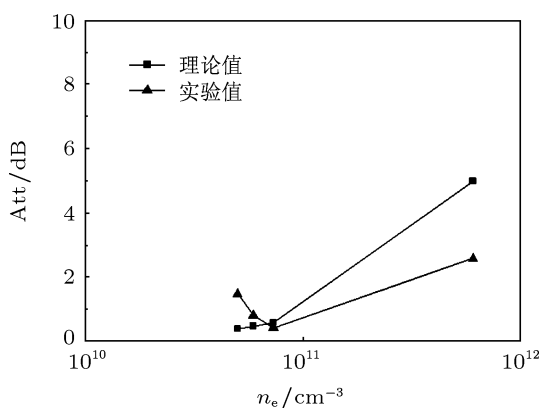


图 7 35 GHz 电磁波衰减实验值和理论值对比

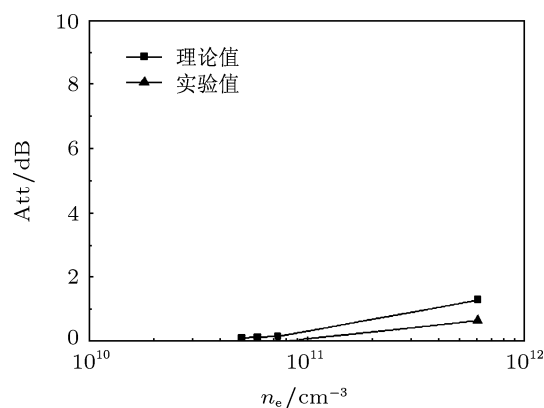


图 8 96 GHz 电磁波衰减实验值和理论值对比

## 5 结论

本文对 35GHz 和 96GHz 电磁波在等离子体中的传输特性进行了理论和实验研究, 得到了电磁波衰减随等离子体密度、碰撞频率和电磁波频率的变化规律. 等离子体密度增加一个数量级时, 电磁

波衰减增加一个数量级; 随着等离子体碰撞频率的增加, 电磁波衰减先增加后减小; 随着电磁波频率的增加, 衰减下降. 以激波管为实验平台进行了等离子体中电磁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, 提高电磁波频率是解决黑障问题的有效途径.

[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] Liu J F, Xi X L, Liu Y 2008 *8th International Symposium on An-*

*tennas, Propagation and EM Theory* Kunming, China, November 2-5, 2008 p442  
 [4] Kim M, Keidar M, Boyd I D 2008 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **36** 1198

- [5] Liu J F, Xi X L, Wan G B, Wang L L 2011 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **39** 852
- [6] Lan C H, Jiang Z H, Chen Z Q, Liu M H, Hu X W 2008 8th *International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory* Kunming, China, November 2–5, 2008 p913
- [7] Keidar M, Kim M, Boyd I D 2008 *J. Spacecraft Rockets* **45** 445
- [8] Thoma C, Rose D V, Miller C L, Clark R E, Hughes T P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 043301
- [9] 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
- [10] Kuo S P, Faith J 1997 *Phys. Rev. E* **56** 2143
- [11] 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]
- [12] 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]
- [13] Hu Q L, Liu S B, Li W 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1050
- [14] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H, Liu K F, Gu C L, Pan Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1317 (in Chinese) [刘明海, 胡希伟, 江中和, 刘克富, 辜承林, 潘垣 2002 物理学报 **51** 1317]
- [15] Tang D L, Sun A P, Qiu X M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1724 (in Chinese) [唐德礼, 孙爱萍, 邱孝明 2002 物理学报 **51** 1724]
- [16] Tang D L, Sun A P, Qiu X M, Chu P K 2003 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **31** 405
- [17] Zhao Q, Liu S Z, Tong H H 2009 *Plasma Technology and Its Applications* (Beijing: National Defense Industry Press) p40 (in Chinese) [赵青, 刘述章, 童洪辉 2009 等离子体技术及应用 (北京: 国防工业出版社) 第 40 页]
- [18] Yang H W, Chen R S 2007 *Opt. Quantum Electron.* **39** 1245
- [19] 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
- [20] Kolner B H, Buckles R A, Conklin P M, Scott R P 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 505
- [21] Angus J R, Krasheninnikov S I, Smolyakov A I 2010 *Phys. Plasmas* **17** 102115
- [22] Weston V H 1967 *Phys. Fluids* **10** 632
- [23] Cheng G X, Liu L 2010 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **38** 3109

# Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma\*

Zheng Ling<sup>1)</sup> Zhao Qing<sup>1)†</sup> Luo Xian-Gang<sup>2)</sup> Ma Ping<sup>1)</sup> Liu Shu-Zhang<sup>1)</sup>  
Huang Cheng<sup>2)</sup> Xing Xiao-Jun<sup>1)</sup> Zhang Chun-Yan<sup>1)</sup> Chen Xu-Lin<sup>1)</sup>

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

2) (*State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(Received 19 October 2011; revised manuscript received 4 January 2012)

## Abstract

The aircrafts, such as space shuttle, spaceship and so on, are facing the well-known “blackout” problem when they reentry into the atmosphere. The plasma sheath leads electromagnetic waves to attenuation, and the communications between the aircrafts and the ground to losing, and even completely interrupte, thereby resulting in the loss of radar targets and threatening the lives of the astronauts. Therefore, it is important to study the properties of the electromagnetic wave transmission in plasma. The characteristics of electromagnetic wave transmission in plasma are studied theoretically and experimentally in this paper. The variations of the electromagnetic wave attenuation with plasma density, collision frequency and electromagnetic wave frequency are obtained. The electromagnetic wave attenuation increasean an order of magnitude with plasma density increasing an order of magnitude. The electromagnetic wave attenuation first increases and then decreases with plasma collision frequency increasing, the electromagnetic wave attenuation decreases with the increase of electromagnetic wave frequency. The electromagnetic wave transmission properties in plasma are studied experimentally with shock tube, and the experimental results accord well with the theoretical results. The results show that increasing the electromagnetic wave frequency is an effective way to solve the reentry blackout problem.

**Keywords:** plasma, electromagnetic waves transmission

**PACS:** 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301805), the International Cooperation Projects (Grant No. OS2012R0151), 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: zhengling137@sohu.com