

毫米波在等离子体中的衰减特性研究*

马春光¹⁾ 赵青^{1)†} 罗先刚²⁾ 何果¹⁾ 郑灵¹⁾ 刘建卫¹⁾

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)

(2010年4月7日收到; 2010年7月13日收到修改稿)

为了研究毫米波与等离子体的相互作用, 采用时域积分法对毫米波在等离子体中传输时的衰减特性进行了仿真, 初步研究了毫米波在等离子体中传输时的衰减与等离子体密度、碰撞频率及其工作频率之间的关系. 通过理论结果和仿真结果的分析比较, 验证了仿真可以为理论研究提供数据支撑的可行性.

关键词: 毫米波, 等离子体, 时域积分法, 衰减

PACS: 52.25.-b, 52.40.Db, 52.65.-y

1. 引言

飞行器的等离子体隐身和再入通讯的“黑障”问题等方面受到广泛关注^[1-5], 因此研究电磁波在等离子体中的衰减特性有重要意义^[6-9]. 涉及到电磁波与等离子体相互作用的问题, 通过实验研究起来比较困难而且费用较高. 但通过数值仿真可以对毫米波在等离子体中的衰减特性进行初步分析, 为深入研究电磁波与等离子体的相互作用提供参考.

2. 理论分析

由亥姆霍兹方程 $\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$, 其中 $k^2 = k_0^2 \epsilon_r$, 可以得到平面波的传播因子 $e^{j(kr - \omega t)}$. $k = nk_0$ 为毫米波在等离子体中的波数, k_0 为真空中的波数, ϵ_r 是等离子体的相对介电常数, 并且是一个复数, 其表达式^[10]为

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu}{\omega} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}. \quad (1)$$

等离子体的复折射率 n 的表达式^[11]为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \beta + j\alpha. \quad (2)$$

用平面传播模式导出毫米波在非磁化等离子体内传播的相位系数 β 和衰减系数 α 为

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2} \left[- \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

则平面波的传播因子 $e^{j(k \cdot r - \omega t)} = e^{-\alpha k_0 r} e^{j(\beta k_0 r - \omega t)}$. 其中, ω 为电磁波的角频率, $\omega_p = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ 为等离子体的角频率, ν 为电子与中性粒子的碰撞频率. 毫米波在等离子体中传播距离 r 时, 等离子体吸收造成的能量衰减 S 可表示为

$$\begin{aligned} S &= -20 \lg e^{-\alpha k_0 r} \approx 8.7 \alpha k_0 r \\ &= 8.7 \frac{\alpha \omega r}{c}. \end{aligned} \quad (5)$$

毫米波在等离子体中传输造成的功率衰减^[11]可表示为

$$\begin{aligned} S &= 10 \lg \left(\frac{P_t}{P_1 - P_r} \right) \\ &= G_t - 10 \lg (1 - 10^{G_r/10}), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, P_t, P_1, P_r 分别为透射波功率, 入射波功率, 反射波功率; G_t, G_r 分别为透射衰减增益和反射增益. 在下面的实验模型中, 等离子体对毫米波的反射增益较小, 可以认为 $S \approx G_t$.

* 国家自然科学基金 (批准号: 107725029) 和微细加工光学技术国家重点实验室开发基金 (批准号: M17010401ZDSYS09-1) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn

3. 物理模型

为了研究毫米波在等离子体中的衰减特性,使用 3 mm 的喇叭天线对毫米波在等离子体中传输时的衰减情况进行数值仿真. 喇叭天线的增益为 21.33 dB,喇叭天线及其方向图如图 1 所示.

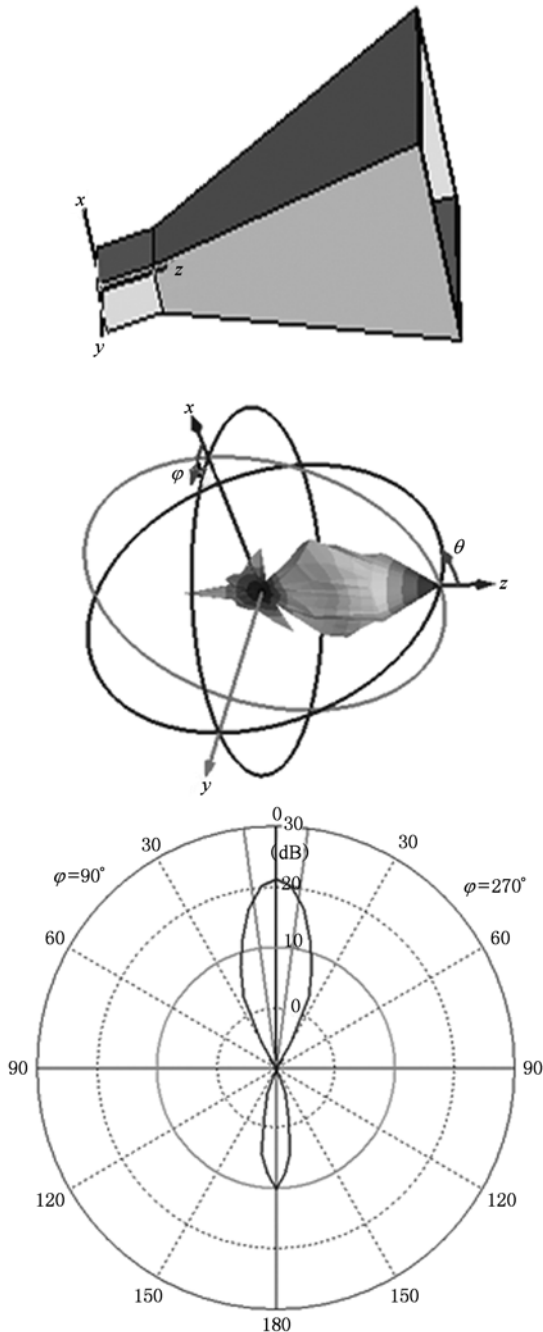


图 1 喇叭天线及其方向图

在距离天线 5 mm 处设置一等离子体圆柱,圆柱底面半径约为 40 mm,毫米波在等离子体中传输

特性实验的物理模型如图 2 所示.

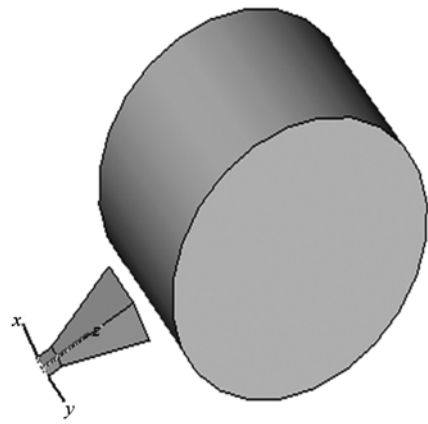


图 2 毫米波传输特性实验物理模型

4. 数值仿真与分析

4.1. 改变毫米波的工作频率

等离子体的密度 $n_e = 5.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,碰撞频率 $\nu = 1.0 \times 10^{10} \text{ Hz}$,在不同工作频点时,毫米波在等离子体中传输的衰减情况如图 3 所示. 当等离子体密度和碰撞频率不变时,随着毫米波工作频率的提高,等离子体复折射率的实部 β 的值逐渐增大,虚部 α 的值逐步减小,则毫米波在等离子体中传输时的衰减量逐渐减小.

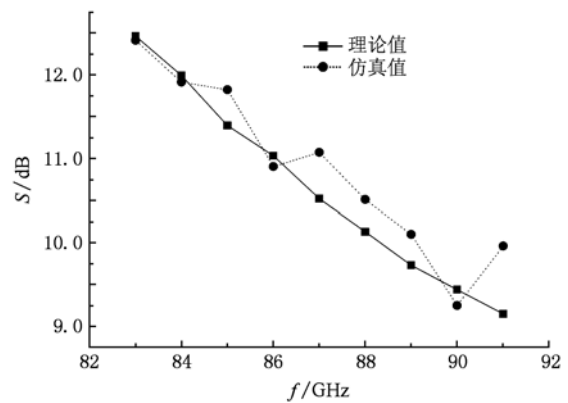


图 3 工作频率与衰减量的关系图

4.2. 改变等离子体的密度

毫米波的工作频率 $f = 86 \text{ GHz}$,碰撞频率 $\nu = 1.0 \times 10^{10} \text{ Hz}$,逐步提高等离子体的密度,毫米波在等离子体中传输时的衰减情况如图 4 所示. 当毫米

波的工作频率和等离子体的碰撞频率不变时,随着等离子体密度的增加, β 值逐渐减小, α 值逐渐增加,毫米波在其中传输时的衰减量逐渐增大.

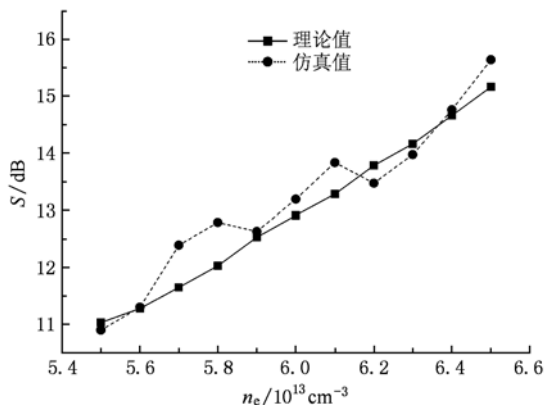


图4 等离子体密度与衰减量的关系图

4.3. 改变等离子体的碰撞频率

毫米波的工作频率 $f = 86$ GHz, 等离子体的密度 $n_e = 5.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 改变等离子体的碰撞频率, 对此种情况下毫米波在等离子体中的传输衰减情况如图5所示. 当毫米波的工作频率和等离子体密度不变时, 随着碰撞频率的逐步增加, β 和 α 值都逐步增加, 但 β 值变化不是很明显, 从而毫米波在等离子体中传输时的衰减量仍逐渐增大; 但是, 在碰撞频率 10—12 GHz 范围内, 介电常数变化不大, 衰减量基本不变.

4.4. 误差分析

在理论推导毫米波在等离子体中传播时的衰减量时, 主要基于平面波的传播特性, 而实验中 3 mm 喇叭天线发射的是柱面波; 另外, 由于等离子体边界的反射作用, 导致反射功率小于实际值, 而仿真采用简化模型, 近似认为 $S \approx G_1$; 同时认为毫米波

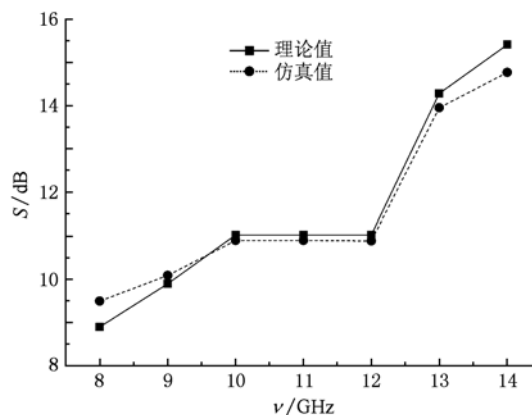


图5 碰撞频率与衰减量的关系图

通过等离子体柱后的辐射功率全部被接收喇叭接收, 这些都会造成仿真结果与理论结果的误差. 通过对理论值和仿真值的分析, 可知两者平均相对误差为 2.77%. 为了减小两者之间的误差, 在保证喇叭的 3 dB 波束角完全包含在等离子体区域内的前提下, 适当调整喇叭与等离子体柱之间的距离, 使毫米波以接近平面波的方式入射.

5. 结 论

随着等离子体密度和碰撞频率的增加, 毫米波在等离子体中传输时衰减量逐步增加, 但适当提高工作频率可以减小衰减量. 仿真结果和理论计算结果都证明了这一点, 由于物理模型建立的比较合理, 仿真结果与理论结果能够得到很好的符合, 可见用仿真的方法研究电磁波与等离子体相互作用是可行的. 下一步的工作是研究太赫兹波与等离子体的相互作用, 同时, 协调好工作频率与等离子体密度、碰撞频率三个参量之间的关系, 开展太赫兹波在等离子体中的传输特性研究.

[1] 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]
 [2] 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]
 [3] Su W Y, Yang J, Wei K, Mao G W, He H Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3101 (in Chinese) [苏维仪、杨 涓、魏 昆、毛根旺、何洪庆 2003 物理学报 **52** 3101]

[4] Sharma A K, Amrita 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 1
 [5] Dunn M G. 1971 *The Entry Plasma Sheath and its Effect on Space Vehicle Electromagnetic Systems* (Washington: NASA) p33
 [6] Xie H Q, Liu P Q 2007 *Chin. Phys. Soc.* **16** 766
 [7] Liu H M, Hu X W, Jiang Z H, Lu X P, Gu C L, Pan Y 2009 *Chin. Phys.* **18** 1225
 [8] Laroussi M, Roth J R 1993 *IEEE Trans Plasma Sci.* **21** 366
 [9] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans Plasma Sci.* **18** 733

[10] Yan Y, Su D L 2003 *IEEE Trans plasma Sci.* CEEM' S2003 518

(Cambridge: Cambridge University Press)

[11] Hutchinson I H 1987 *Principles of plasma diagnostics*

Study on attenuation characteristics of millimeter wave in plasma^{*}

Ma Chun-Guang¹⁾ Zhao Qing^{1)†} Luo Xian-Gang²⁾ He Guo¹⁾ Zheng Ling¹⁾ Liu Jian-Wei¹⁾

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

2) (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 7 April 2010; revised manuscript received 13 July 2010)

Abstract

In order to study the interaction between millimeter wave and plasma, by using time-domain integration method to simulate the attenuation characteristics of millimeter wave propagation in the plasma, this paper makes preliminary study on the relationships between the attenuation value of millimeter waves propagation in the plasma, plasma density, the collision frequency and operation frequency. By comparing and analyzing the theoretical results with simulation results, the feasibility of the fact that simulation can be used to provide data support for the theoretical study is verified.

Keywords: millimeter wave, plasma, time-domain integration, attenuation

PACS: 52.25.-b, 52.40.Db, 52.65.-y

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775029) and the State Key Laboratory Development Foundation for Micro-fabrication Optical Technology of China (Grant No. M17010401ZDSYS09-1).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaq@uestc.edu.cn