

文章编号: 2095-4980(2023)06-0809-05

Ka 波段电磁波在大气等离子体中的透射特性

郑强林^{a,b}, 闫二艳^{a,b}, 杨浩^{a,b}, 聂勇^{a,b}, 鲍向阳^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 在大气环境模拟实验平台上, 利用 S 波段高功率微波(HPM)击穿大气产生等离子体, 开展 Ka 波段电磁波在等离子体中的传输特性实验研究, 得到不同频率电磁波下等离子体传输衰减规律, 并发现电磁波与大气等离子体相互作用呈现透射新颖现象: Ka 频段透射增强或减弱呈振荡形式, 透射增强最大增幅接近 2 倍, 最大增强频段附近透射增强以周期性规律出现, 间隔周期约为 80 MHz。随着气压升高, 透射增强现象仍然存在, 但增强幅度随之减小。理论分析了可能引起透射增强的原因, 该试验研究成果为 HPM 大气等离子体在隐身、黑障通信等方面的应用提供了可能。

关键词: 电磁波; 等离子体; 透射增强

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022090

Propagation analysis of Ka-band electromagnetic wave in atmospheric plasma

ZHENG Qianglin^{a,b}, YAN Eryan^{a,b}, YANG Hao^{a,b}, NIE Yong^{a,b}, BAO Xiangyang^{a,b}

(a.Institute of Applied Electronics; b.Key Laboratory of High Power Microwave Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: S-band High Power Microwave(HPM) is employed to produce the plasma in the atmosphere environment simulation chamber. The experiment researches on Ka-band microwave propagating characteristics in atmospheric plasma are performed, and the Ka-band microwave attenuation characteristics of atmospheric plasma are obtained. Some novelty propagation characteristics in the interaction of electromagnetic wave and atmospheric plasma are found: the electromagnetic wave transmission signal enhancement effect appears oscillation on Ka-band; the maximum value of propagation enhancement is almost 2 times, and the period of oscillation is 80 MHz. The phenomenon of propagation enhancement also occurs with the enhancing of buffer gas pressure, but the amplitude decreases. The reasons of propagation enhancement are analyzed. The research results provide important technical support for the application of plasma in stealth and black barrier communications.

Keywords: electromagnetic waves; plasma; propagation enhancement effect

飞行器在大气层高速飞行时, 与大气强烈作用, 其头部会形成激波, 波后气体温度、压强迅速上升, 导致大气电离产生等离子体。这种非均匀碰撞的等离子体对电磁波信号有很强的衰减作用, 会使飞行器与地面的互联互通中断, 出现航天飞行器最为普遍的“黑障”问题。研究电磁波在大气等离子体中的透射特性, 有利于更好地认识航天飞行器载入大气时与地面通信出现的“黑障”问题。大气等离子体主要由实验室人为控制产生等离子体, 模拟大气电离层的环境状态。

郑灵等^[1]对频率为 35 GHz 和 96 GHz 的电磁波传输特性进行了理论和实验研究, 得出随着频率提高, 电磁波在等离子体中的衰减减小的结论。刘明海等^[2]对大气层人造等离子体进行研究, 发现电磁波在等离子体中的能量衰减与电磁波频率、等离子体密度及其分布、电子温度及大气层高度密切相关。Destler 等^[3]实验研究了 X 波段电磁波在等离子体中的透射特性, 发现电磁波透射等离子体后衰减达 30 dB 以上。林敏等^[4]经过理论计算, 得出电磁波衰减随电子密度增加而增大, 随电磁波频率的增加而减小的结论。认为等离子体碰撞频率存在最佳值使得衰减最大, 提高等离子体电子密度和覆盖均匀性有利于增大等离子体对电磁波的衰减效果。现有公开文献大多只针对等离子体在电磁波的衰减、吸收、透射特性方面进行了研究, 在等离子体对电磁波的透射增强方面很少

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-07

涉及。聂勇等^[5]利用理论和数值模拟仿真印证了在大气等离子体实际测量中呈现出透射增强特性。

电磁波在等离子体内的传播特性与等离子体的电子密度、碰撞频率以及电磁波频率有关。开展大气等离子体中电磁波传输特性研究,分析电磁波传输特性与等离子体参数的关系,是研究“黑障”问题的基础。本文利用高功率微波击穿大气产生的大气等离子体,开展了Ka波段电磁波在等离子体中的传输特性实验研究,得出不同频率电磁波下等离子体传输衰减规律,发现电磁波与大气等离子体相互作用呈现出透射新颖特性。

1 基本理论

典型的等离子体是一种典型的色散媒质,其满足亥姆赫兹方程 $\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$ 。无限大等离子体中平面波可表示为: $\mathbf{E}(r,t) = \mathbf{E}e^{j(\omega t - kr)}$,其中 $k^2 = k_0^2 \epsilon_r$, k_0 为电磁波在等离子体中的波数, ϵ_r 为低温、非磁化、碰撞等离子体的相对介电常数,且是一个复数,可表示为^[6-7]:

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

式中: ω 为电磁波角频率; ν 为电子动量转移碰撞频率; $\omega_p = (n_e e^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$ 为等离子体角频率, m_e 为电子质量, e 为电子电量, ϵ_0 为自由空间介电常数, n_e 为局限在确定位置的等离子体电子数密度。

大气环境模拟实验是利用S波段高功率微波击穿大气,产生一种低温无碰撞等离子体。令 $\nu = 0$,则由式(1)可得低温无碰撞等离子体的介电常数表达式为:

$$\epsilon_r = (1 - \omega_p^2 / \omega^2) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,低温无碰撞等离子体可看作一种相对介电常数小于1的色散媒质,这与经典电磁学理论中介质相对介电常数大于1完全不同。基于这些差异,本文研究了电磁波穿过相对介电常数小于1的色散媒质的透射现象。

2 实验研究

实验装置如图1所示,大功率S波段微波通过天馈系统馈入大气环境模拟室内,经由反射聚焦天线在焦点中心形成强场区,击穿大气形成等离子体。S波段电磁波垂直极化,为防止S波段信号进入Ka波段的透射系统,在真空室水平观察窗方向,架置水平极化的Ka波段收发天线,且收发天线置于大气环境模拟室内。

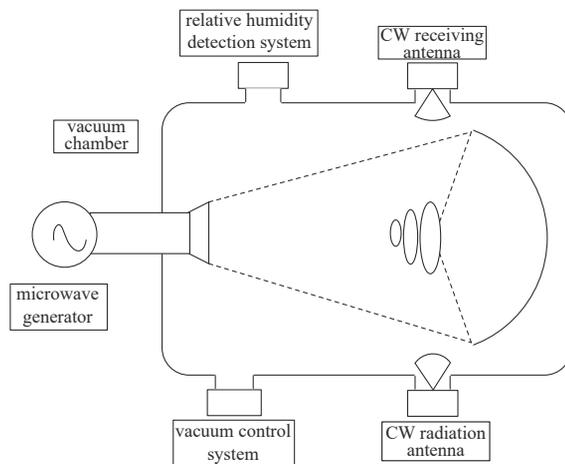


Fig.1 Sketch of the experimental device

图1 实验装置简图

实验场景如图2所示,信号源产生Ka波段点频信号,经放大器放大后馈入发射天线,信号穿过等离子体区域后进入同频段接收天线,最后经由检波器对其幅值进行检波,数据显示于示波器。大气环境模拟室内气压维持在50 Pa,根据Epstein等的文献分析以及实验室等离子体空间分布特性,等离子体空间分布满足 $x_m = 0$, $\sigma = 0.0316$ 的高斯分布,该气压状态下等离子体密度为 10^{17}m^{-3} 量级。

典型透射波形如图3所示,其中方波为微波源触发信号,三角波为Ka波段电磁波经过等离子体后检波产生的透射增强信号。由于大气环境模拟实验平台所产生的等离子体密度分布不均匀,且电磁波经过不同密度的等

离子体透射系数不同，因此透射信号形成如图 3 所示的三角波形状。

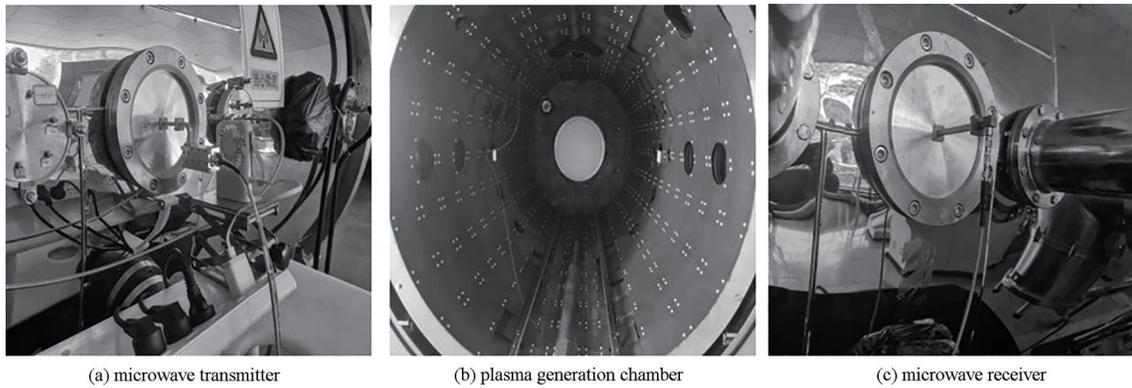


Fig.2 Diagram of experimental site
图 2 微波透射系统实验场景图

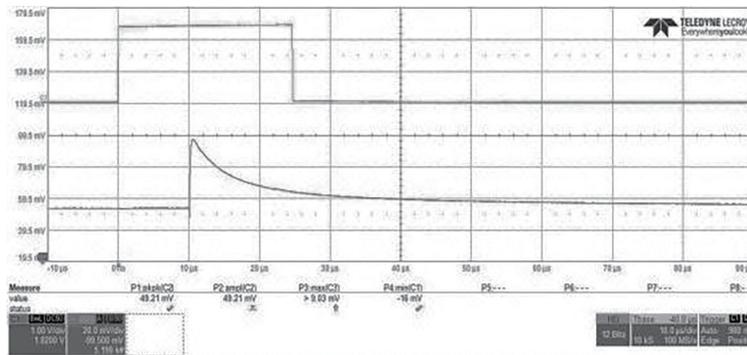


Fig.3 Typical demodulation curves of Ka-band microwave
图 3 Ka 波段典型电磁波透射检波曲线

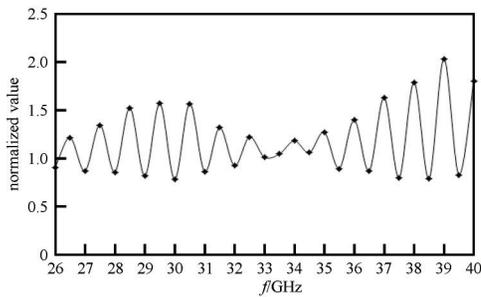


Fig.4 Normalized curve of Ka-band microwave
图 4 Ka 波段电磁波透射归一化曲线

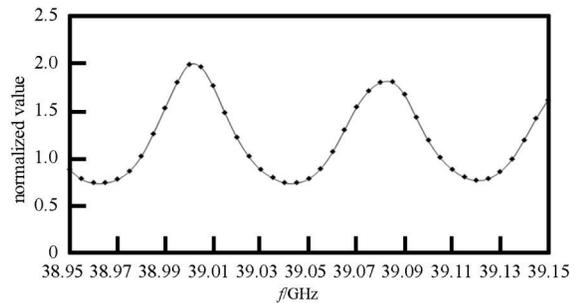


Fig.5 Normalized curve of Ka-band microwave at a step of 5 MHz
图 5 5 MHz 步进透射归一化曲线

对 Ka 波段入射电磁波每步进 500 MHz 进行最大检波值记录，并将最大检波幅值进行归一化处理，得到 Ka 波段透射曲线如图 4 所示。从图中可以看出，Ka 波段整个频段内透射曲线呈振荡形式，部分频点归一化透射曲线呈减弱状态，部分频点归一化透射曲线呈增强状态，其中在 39 GHz 附近透射增强效果最为显著。

为更好地分析透射增强周期特性，在 39 GHz 附近进行点频加密扫描，得到每步进 5 MHz 的透射归一化曲线，如图 5 所示。从图中可以看出，透射增强以周期性规律出现，每间隔 80 MHz 左右会出现一次。

此外，针对不同气压，测试了 Ka 波段各频率下的透射归一化曲线，如图 6 所示。其中矩形为 50 Pa 气压下的透射曲线，菱形为 100 Pa 气压下的透射曲线，三角为 300 Pa 气压下的透射曲线。可以看出，随着气压的升高，

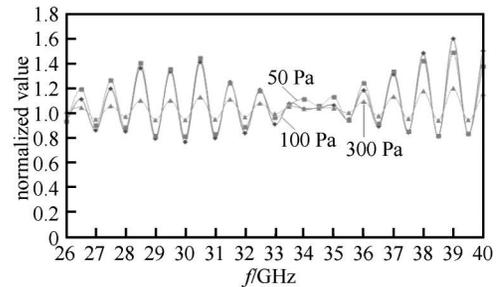


Fig.6 Comparison of enhancement under different air pressures
图 6 不同气压下各频率透射增强比较

透射增强现象仍然存在,但增强的幅度随之减小。整个频带内,透射增强和减弱包络呈振荡状态。

3 实验现象初步分析

国内外文献对于微波透射增强现象罕见报道,介于高功率微波大气等离子体非均匀、弱电离、强碰撞、非磁化的特性,结合电磁波入射多层介质会产生折射、反射的性质^[8],可以用该理论予以初步解释。

当入射波传播到2种不同介质的分界面时,通常会发生反射与透射现象。以3层材料为例,入射波垂直入射电场平面,根据相关理论^[9-11],在分界面的功率反射系数 R 、透射系数 T 为:

$$\begin{cases} R = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos(2k_2d)}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos(2k_2d)} \\ T = \frac{n_3}{n_1} \times \frac{t_{12}^2 t_{23}^2}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos(2k_2d)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 分别为3种材料的折射率; d 为中间层材料的厚度; k_2 为中间层材料的波常数; r_{12} 为电磁波从第1层材料入射至第2层材料的反射系数, $r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$; r_{23} 为电磁波从第2层材料入射至第3层材料的反射系数, $r_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$; t_{12} 为电磁波从第1层材料入射至第2层材料的透射系数, $t_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$; t_{23} 为电磁波从第2层材料入射至第3层材料的透射系数, $t_{23} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3}$; $k_2d = \frac{2\pi}{\lambda} n_2d$ 。

若 $n_1 < n_2 < n_3$ 或 $n_1 > n_2 > n_3$,且 $2n_2d = N\lambda$ ($N=1,2,3,\dots$),则有 $\cos(2k_2d) = 1$,此时有:

$$\begin{cases} R_{\max} = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + |2r_{12}r_{23}|}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + |2r_{12}r_{23}|} \\ T_{\min} = \frac{n_3}{n_1} \times \frac{t_{12}^2 t_{23}^2}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + |2r_{12}r_{23}|} \end{cases} \quad (4)$$

这种情况可看作是左右两面的2束反射波干涉相长,透过中介质的2束透射波干涉相消,造成功率反射系数变大。

若 $n_1 < n_2 < n_3$ 或 $n_1 > n_2 > n_3$,且 $2n_2d = (2N-1)\lambda/2$ ($N=1,2,3,\dots$),则有 $\cos(2k_2d) = -1$,此时有:

$$\begin{cases} R_{\min} = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - |2r_{12}r_{23}|}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 - |2r_{12}r_{23}|} \\ T_{\max} = \frac{n_3}{n_1} \times \frac{t_{12}^2 t_{23}^2}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 - |2r_{12}r_{23}|} \end{cases} \quad (5)$$

这种情况可看作是左右两面的2束反射波干涉相消,透过中间媒质的2束透射波干涉相长,造成功率透射系数变大。

另外,在 $n_2 > n_1, n_2 > n_3$ 或 $n_2 < n_1, n_2 < n_3$ 的情况下,也会出现这种使功率透射系数或功率反射系数变大的现象。

4 结论

本文针对Ka波段的电磁波透射大气等离子体开展了实验研究。获得了等离子体对入射电磁波的衰减特性、吸收特性及在部分频点对电磁波透射增强特性。通过实验测量获得Ka波段电磁波穿过低温、无碰撞、密度分布不均匀大气等离子体的透射增强特性,Ka波段整个频段内透射曲线呈振荡形式,最大增强幅度几近2倍,理论分析了可能引起透射增强的原因。由于非均匀碰撞等离子体的理论分析模型和参数选取比较复杂,对透射增强的机理尚无准确的认识,对透射增强周期以及幅值还无法进行有效的估算,电磁波和非均匀碰撞等离子体的相互作用机理还需深入研究。

参考文献:

- [1] 郑灵,赵青,罗先刚,等. 等离子体中电磁波传输特性理论和实验研究[J]. 物理学报, 2012,61(15):343-349. (ZHENG Ling, ZHAO Qing, LUO Xiangang, et al. Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma[J]. Acta

- Physica Sinica, 2012,61(15):343-349.)
- [2] 刘明海,胡希伟,江中和,等. 电磁波在大气层人造等离子体中的衰减特性[J]. 物理学报, 2002,51(6):1317-1320. (LIU Ming hai,HU Xiwei,JIANG Zhonghe,et al. Property of electromagnetic wave attenuation in the artificial plasmas of atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2002,51(6):1317-1320.)
- [3] DESTLER W W, DEGRANGE J E, FLEISCHMANN H H, et al. Experimental studies of high-power microwave reflection, transmission, and absorption from a plasma-covered plane conducting boundary[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(9): 6313-6318.
- [4] 林敏,徐浩军,魏小龙,等. 电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究[J]. 物理学报, 2015,64(5):321-327. (LIN Min,XU Haojun,WEI Xiaolong,et al. Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(5):321-327.)
- [5] 聂勇,闫二艳,杨浩,等. 电磁波在非均匀碰撞等离子体中的透射增强效应[J]. 强激光与粒子束, 2021,33(2):57-63. (NIE Yong, YAN Eryan,YANG Hao,et al. Electromagnetic wave transmission enhancement effect in non-uniform collision plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021,33(2):57-63.)
- [6] LAROUSSE 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, 2002,21(4):366-372.
- [7] KALLURI D K, LEE J H, EHSAN M M. FDTD simulation of electromagnetic pulse interaction with a switched plasma slab[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2003,24(3):349-365.
- [8] 赵荣,侯德亭,陈勇,等. 高功率微波在自生等离子体中的传输特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(3):216-219. (ZHAO Rong,HOU Deting,CHEN Yong,et al. Propagation analysis of high power microwave in self-generated plasma[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(3):216-219.)
- [9] 江遵汉,张祖荣. 电磁波在均匀薄膜上的反射和透射[J]. 物理与工程, 2014(S2):9-12. (JIANG Linhan,ZHANG Zurong. Reflection and Transmission of Electromagnetic wave on the surface of homogeneous coating[J]. Physics and Engineering, 2014 (S2):9-12.)
- [10] 刘新芽. 电磁波在多层介质内的透射[J]. 光学学报, 1995,15(1):122-125. (LIU Xinya. The transmission of electromagnetic waves in multilayer media[J]. Acta Optica Sinica, 1995,15(1):122-125.)
- [11] 周琦,刘新芽. 多层介质中电磁波的反射与透射[J]. 南昌大学学报(理科版), 2003,23(1):37-44. (ZHOU Qi,LIU Xinya. The reflection and transmission of electromagnetic wave in multilayer media[J]. Journal of Nanchang University(Natural Science), 2003,23(1):37-44.)

作者简介:

郑强林(1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为微波等离子体相关技术 .email:robberzql@126.com.

闫二艳(1978-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为等离子体特性研究.

杨浩(1992-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为等离子体特性研究.

聂勇(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为等离子体特性研究.

鲍向阳(1973-), 男, 本科, 实验员, 主要工作为微波高功率实验.