



·等离子体及应用技术·

放电功率变化对电磁波在电感耦合闭式 等离子体中的衰减特性*

林茂^{1,2}, 徐浩军¹, 魏小龙¹, 韩欣珉¹, 常怡鹏¹, 林敏¹

(1. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 西安 710038; 2. 93802 部队, 西安 712200)

摘要: 射频电感耦合等离子体(ICP)放电方式能够在较宽的压强范围内产生大面积、密度高的等离子体,在对电磁波衰减应用中具有较大优势。通过研究ICP等离子体与电磁波相互作用的过程,改进闭式等离子体模型,建立电磁波在非均匀等离子体中传播的分层计算模型,对实测诊断分布情形下等离子体与电磁波的相互作用进行研究,得到不同功率条件下电磁波衰减的变化情况;提出射频电感耦合闭式等离子体用于电磁波衰减的方法并实验验证,基于等离子体覆盖金属平板的测量模型,在实验室内搭建了以金属板为衬底的弓形微波反射测试系统,研究了闭式等离子体对4~8 GHz频段范围内微波反射的作用特性,以及不同射频功率对微波反射的影响规律,并将实验测量与计算结果进行对比分析。实验表明,通过功率调节,电感耦合闭式等离子体对5.92~6.8 GHz频带电磁波具有明显的衰减作用。

关键词: 电感耦合等离子体; 电磁波衰减; 分层模型

中图分类号: TM31

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200320

Attenuation characteristics of electromagnetic wave in inductive coupled plasma based on variation of discharge power

Lin Mao^{1,2}, Xu Haojun¹, Wei Xiaolong¹, Han Xinmin¹, Chang Yipeng¹, Lin Min¹

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Troop No.93802 of PLA, Xi'an 712200, China)

Abstract: The application of Inductively Coupled Plasma (ICP) can cause a wide range high density plasma and has great advantages in electromagnetic wave attenuation. Studying the process of interaction between ICP and electromagnetic wave, we established the electromagnetic wave propagation in inhomogeneous plasma, adopted hierarchical model for the diagnosis of the interaction of plasma and electromagnetic wave, and studied the electromagnetic wave attenuation under different conditions of input power. The experiment method of inductively coupled plasma for attenuation electromagnetic wave was proposed. Based on the model of plasma covering over the metal plate, the arch system for measurement of microwave reflectivity of plasma was established. The interaction of closed-plasma and electromagnetic wave with a bandwidth of 4~8 GHz was studied, the effect on microwave reflection of different rf power was evaluated analyzed, and the experimental measurement and calculation results were analyzed. The experimental results show that the inductively coupled plasma attenuates the electromagnetic wave in 5.92~6.8 GHz band obviously by power regulation.

Key words: inductively coupled plasma; attenuation of electromagnetic wave; hierarchical model

等离子体能够衰减入射雷达波能量,主要是通过等离子体对电磁波的反射、折射、吸收、散射、变频及相移等机制,降低雷达的探测概率,并可通过控制等离子体参数(如等离子体频率、碰撞频率等)来满足特定要求从而规避不同频段电磁波的探测^[1-3]。飞行器闭式等离子体电磁波衰减技术应用的关键是等离子体发生装置能够在飞行环境和机载条件下稳定产生一定尺寸和状态的等离子体^[4],在有效降低强散射部位 RCS 的同时,避免发生装置引

* 收稿日期:2020-11-26; 修订日期:2021-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12075319)

作者简介:林茂(1988—),男,博士,主要从事低气压等离子体放电技术研究。

起额外散射。获得等离子体的方式有许多种,针对电磁波衰减应用,较为理想的方案是选择一种易电离、低能耗、结构简单、便于维护的放电方式。要改变等离子体参数,这与放电气体的种类、气压、采用的电源种类以及施加的电场频率、功率有关,并且不同等离子体发生器特性与相应的用途息息相关^[5]。在特殊工况下,与改变其他工作条件相比,通过调整 ICP 电源参数无疑相对容易,且易于实现,具有更强的可操作性。尤其在一些特殊环境(机载工况)下,通过设定固定的闭式腔体体积、放电气体和气压等条件下,研究揭示以最低的射频输入功率来获得最佳的等离子体参数,得到电源在一定功率范围的最优化方案实现对等离子体参数的影响,具有重要意义。等离子体参数是实现电磁波衰减的必要条件,因此需要对现有的射频电源与等离子体参数的关系进行揭示,采用数值模拟、电磁波衰减测试、光谱信号强度检测、Langmuir 探针等方法建立等离子体参数与射频电源参数之间的规律,是实现 ICP 调控的重要基础和前提^[6-7]。

Ventzek 等人^[8]采用二维混合模拟方法研究了单频线圈的功率对等离子体径向均匀性的影响,当线圈的沉积功率为 100 W 时,由于沉积功率较小,电子密度较低,趋肤深度较大,电场在等离子体中穿透很深,等离子体密度的空间分布较均匀。当四匝线圈的沉积功率为 2000 W 时,由于电子密度较高,趋肤深度较小,等离子体主要产生在介质窗附近很薄的区域内,电子被局域在介质窗下方,电子密度的均匀性较差。Fukasawa 等人^[9]在实验上观察了等离子体的均匀性随输入功率的变化,实验结果表明,当输入功率从 1000 W 减小到 200 W 时,电子密度的均匀性先变好后变坏,输入功率为 600 W 时电子密度的均匀性最好,但未考虑频率对电子密度的影响。Amorim 等人^[10]在 11.4 MHz 的 Ar-ICP 中观察到了感性放电的两种放电模式, E 和 H 模式, 以及 E-H 模式跳变现象, 结果显示 E-H 模式跳变的功率阈值和 ICP 源的结构、气体参数, 电源工作频率等因素有关。国内大连理工大学物理学院团队对比研究了驱动频率为 13.56 MHz/2 MHz 柱状感性耦合等离子体中电子密度和电子温度的径向分布规律, 结果表明: 在高频和低频放电中, 输入功率的增加对等离子体参数产生了不同的影响, 高频放电中主要提升了电子密度, 低频放电中则主要提升了电子温度, 且产生均匀性较好的等离子体^[11]。张昀等利用 Langmuir 探针测量了不同放电气压对等离子体参数的影响^[12-13]。刘巍等对感性放电中放电条件的变化对等离子体的影响进行研究, 放电过程中容性放电模式(E 模式)和感性放电模式(H 模式)的转变, 射频偏压对等离子体的影响等由于 ICP 的复杂性, 至今仍然有许多问题需要继续研究^[14]。曹金祥等^[15]对螺旋型 ICP 应用在天线罩形腔的电磁散射特性进行了理论和实验分析。

因此,基于以上研究,文章首先基于 Maxwell 方程改进电磁波在非均匀等离子体中传播的分层计算模型,研究多项式拟合分布情形下等离子体对电磁波的双程衰减,得到电磁波在等离子体中的传播特性。其次,提出电感耦合闭式等离子体用于电磁波衰减的方法并实验验证,基于等离子体覆盖金属平板的测量模型,搭建以金属板为衬底的弓形电磁波反射测试系统,研究闭式等离子体对 4~8 GHz 频段范围微波的反射效果、射频输入功率对衰减情况的影响,以及单因素对等离子体动态调控的现实方案。并结合实验对不同分层计算模型结果进行验证,通过实验的方法修正仿真中的参数设置,并为下一步相关仿真和实验研究提供基础。

1 电磁波在等离子体中衰减特性的仿真与实验研究

1.1 分层计算模型

文章基于闭式等离子体衰减电磁波的概念,设计电感耦合放电闭式等离子体发生装置,近似认为电磁波反射测试的金属衬板结构是理想的导体,忽略放电线圈尺寸对电磁波反射的影响^[16],腔体材质选择对电磁波无损耗石英透波材料。在前期的闭式等离子体放电实验和国内外研究现状发现,等离子体参数分布呈现非较强的均匀性,尤其在高气压条件下更为明显。对于电磁波在非均匀等离子体中传播特性的研究,分层计算方法具有计算过程简单、易于实现的优点,且具有较高的精度。基本思路是将闭式腔体内等离子体分成许多个等离子体子层,当层数很多时,每一层中的等离子体密度可以看作是均匀分布的。在几何光学近似条件下,认为平面电磁波在非均匀等离子体中的传播等效为在多层介质中传播的共同作用。入射电磁波在每一层等离子体中只考虑一次反射并忽略二次反射,在腔体层可以无损耗通过,且在金属底板表面全反射,计算模型示意图见图 1。

电磁波由空气斜入射到闭式等离子体中,其反射过程满足菲涅耳公式,功率反射系数 η 表示为:

(1)电磁波电场分量垂直入射面时

$$\eta = \left| \frac{\sin(\theta_0 - \theta_1)}{\sin(\theta_0 + \theta_1)} \right|^2 = \left| \frac{\cos \theta_0 - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_0}}{\cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_0}} \right|^2 \quad (1)$$

(2) 电磁波电场分量平行入射面时

$$\eta = \left| \frac{\tan(\theta_0 - \theta_1)}{\tan(\theta_0 + \theta_1)} \right|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_0}}{\varepsilon_r \cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_0}} \right|^2 \quad (2)$$

式中: θ_0 和 θ_1 分别为电磁波的入射角和折射角, 且满足

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3)$$

当入射电磁波在分层等离子体中传播时, 在相邻等离子体层的交界处一部分被反射, 一部分进入到下一层等离子体, 可以得到第 i 层等离子体的反射系数为

$$C_R(i) = \frac{(\varepsilon_r(i-1) \cos \theta_{i-1} - \sqrt{\varepsilon_r(i-1)\varepsilon_r(i) - \varepsilon_r^2(i-1) \sin^2 \theta_{i-1}})}{(\varepsilon_r(i-1) \cos \theta_{i-1} + \sqrt{\varepsilon_r(i-1)\varepsilon_r(i) - \varepsilon_r^2(i-1) \sin^2 \theta_{i-1}})} \quad (4)$$

第 i 层等离子体的传输系数为

$$C_T(i) = \exp\left(\frac{-2\alpha(i)l(i)}{\cos \theta_i}\right) \quad (5)$$

将闭式等离子体均分为 n 层, 当电磁波由入射到再次传播回等离子体边缘处的能量 P_r 为

$$P_r = P_0 \left\{ |C_R(1)|^2 + \sum_{i=2}^n \left[|C_R(i)|^2 \times \prod_{m=1}^{i-1} \left((1 - |C_R(m)|^2) |C_T(m)|^2 \right) \right] \right\} \quad (6)$$

式中: P_0 为电磁波在入射处的能量; $l(i)$ 为第 i 层等离子体的厚度, 这里取 $l = d/n$ 。

定义电磁波在等离子体中的双程衰减 a 为

$$a = \left| 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_0} \right) \right| \text{ (dB)} \quad (7)$$

1.2 闭式等离子体密度分布近似

图 2 是平板型 ICP 等离子体发生装置, 其中, 放电腔室采用厚度为 4 cm 的石英玻璃熔合制作而成。射频天线为平面盘形线圈, 采用外径为 8 mm、内径为 6 mm 的空心铜管绕制而成, 共绕 4 圈, 整个线圈直径为 19.2 cm。

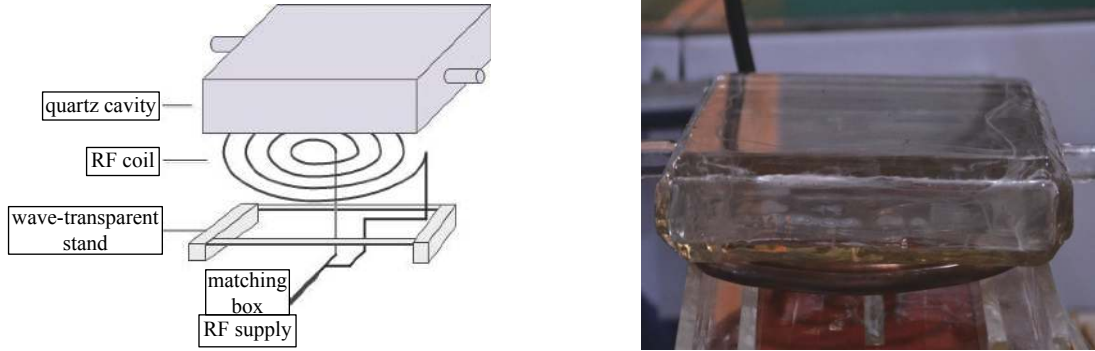


Fig. 2 Schematic diagram and picture of discharge chamber and antenna of flat plate ICP generator

图 2 平板型 ICP 发生装置的放电腔室与天线示意图和实物图

选取由发射光谱法诊断获得的各采集点电子密度分布为例^[17], 对这些数据点进行 4 次多项式拟合, 得到分布函数式 (8)。其中, 测量值对应的放电条件为放电功率 $P_{in} = 300$ W、工作气压 $p = 100$ Pa, 计算过程中采用电子密度的对数形式 $\lg(n_e)$ 进行拟合, 单位为 m^{-3} 。

$$\lg n_e(z) = -0.060 2z^4 + 0.481 1zz^3 - 1.348 3z^2 + 1.818 6z + 16.184 3 \quad (8)$$

图 3 是各采集点的电子密度测量值及其拟合曲线。利用有限的采集点测量值, 多项式拟合方法能够较好地反映闭式等离子体电子密度分布的实际情况。

以闭式等离子体为研究对象, 采用分层计算模型, 研究电子密度分布与入射电磁波频率反射的关系。具体过

程: 定义一个无磁场非均匀等离子体层, 等离子体厚度取为放电腔室的高度, 即 $d=4\text{ cm}$, 将等离子体等分为 $N=500$ 层, 其他参数如电子密度、电磁波入射角度与频率以及电子碰撞频率可变, 利用计算模型分析电磁波在等离子体传播后的衰减情况。在本文实验过程中, 放电气压在 $20\sim 500\text{ Pa}$ 内可调, 处于中等气压范围, 电子碰撞频率可由低空大气环境下低温等离子体的有效电子碰撞频率确定, 即与电子密度相关, 表示为

$$\nu = 2.3 \times 10^{-14} \omega_p^2 T \quad (9)$$

图 4 为等离子体密度分布测量结果的多项式拟合, 电磁波入射角分别为 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, 入射电磁波频率在 $0.2\sim 20\text{ GHz}$ 范围时, 电磁波在闭式等离子体中的衰减计算结果。可以看出, 等离子体对电磁波的衰减随着入射角的减小而减小。

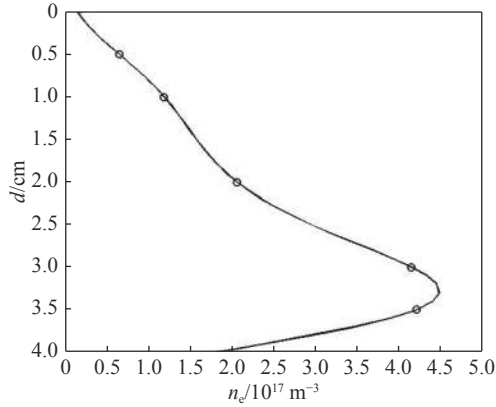


Fig. 3 Electron density measurement and fitting results of closed plasma

图 3 闭式等离子体电子密度测量值与拟合结果

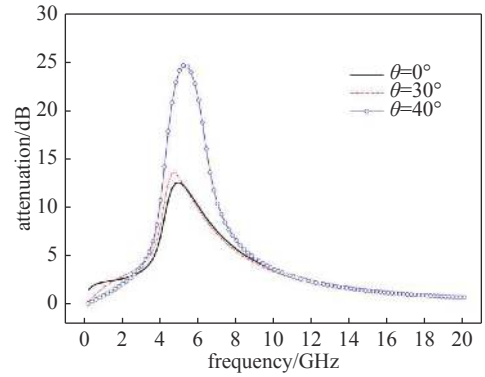


Fig. 4 Attenuation of measured electron density values

图 4 电子密度为实测值的衰减情况

盘香型 ICP 等离子体参数与功率在一定范围内的近似关系为

$$P = P_f f_p^2 + P_d d \quad (10)$$

式中: f_p 用以反映最底层等离子体的密度, 在 $d \in [0.005\text{ m}, 0.04\text{ m}]$, $f_p \in [7\text{ GHz}, 11\text{ GHz}]$ 范围内, $P_d = 4\ 342.3$, $P_f = 3.621\ 4 \times 10^{-18}$ 。以 θ 的限制来反映等离子体密闭腔体的安装限制, 取 $\theta \in [30^\circ, 45^\circ]$ 。

1.3 实验装置与测试原理

为验证仿真计算等离子体对入射电磁波的衰减模型精度, 在实验室内搭建了以金属板为衬底的电磁反射弓形测试系统。测量系统参照 GJB 2038-94(《雷达吸波材料反射率测试方法》)中提供的 RAM 反射率弓形测试法进行搭建, 主要由安立 MS46322A 型微波矢量网络分析仪(工作频段为 $1\text{ MHz}\sim 40.0\text{ GHz}$)、宽带喇叭天线、角锥型吸波材料和弓形框架组成, 喇叭天线端面与 ICP 发生器的上表面相距最小距离为 183 cm , 且喇叭天线的最小电磁波频率为 2 GHz , 其对应波长 $\lambda=15\text{ cm}$, 可以满足天线发射距离大于 10λ 的远场基本条件, 采用图 5(a)中上部所示的平行双天线测量 S_{21} 或 S_{12} 参数的直通校准方法进行微波反射的测量, 矢量网络分析仪如图 5(b)所示。同时为了减小周围物体等对干扰测量设备的影响, 对强反射部位进行贴附处理, 减小背景信号干扰。



(a) microwave reflection arch test



(b) microwave network analysis instrument

Fig. 5 Experimental setup and device

图 5 实验装置实物图

2 实验结果与仿真计算对比分析

为研究电磁波在等离子体中的衰减特性,在实验过程中,主要通过调节不同的射频输入功率,获得不同电子密度状态的等离子体,分别完成了4~8 GHz范围内的扫频测量,研究等离子体对入射电磁波的衰减作用,分析电磁波衰减的影响规律。放电气体工质为纯氩气,气压为100 Pa,放电腔室采用厚度为1 cm的石英腔体,同时保证其气密性高、结构强度可靠。腔室内部空间的长宽尺寸为20 cm×20 cm、高为4 cm。在腔室左右相对的两边,通过一个直径为15.8 mm的石英管连接KF16接头,分别用于提供工质气体和维持腔内低压环境。射频天线为平面盘香形线圈参数值参照1.2节。

微波反射测量选择在ICP放电转变至H模式并达到稳定放电工作2 min后,在相同测量背景的情况下,再进行相关的数据采集。图6~图10是不同射频输入功率时电感耦合等离子体对4~8 GHz频段范围内电磁波的衰减情

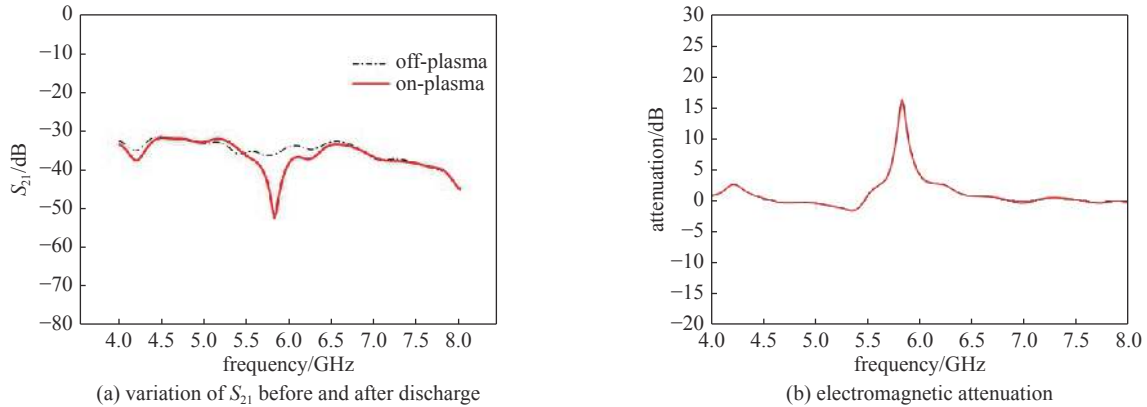


Fig. 6 Attenuation of microwave in ICP when the power is 200 W

图6 功率为200 W时ICP等离子体对电磁波的衰减变化

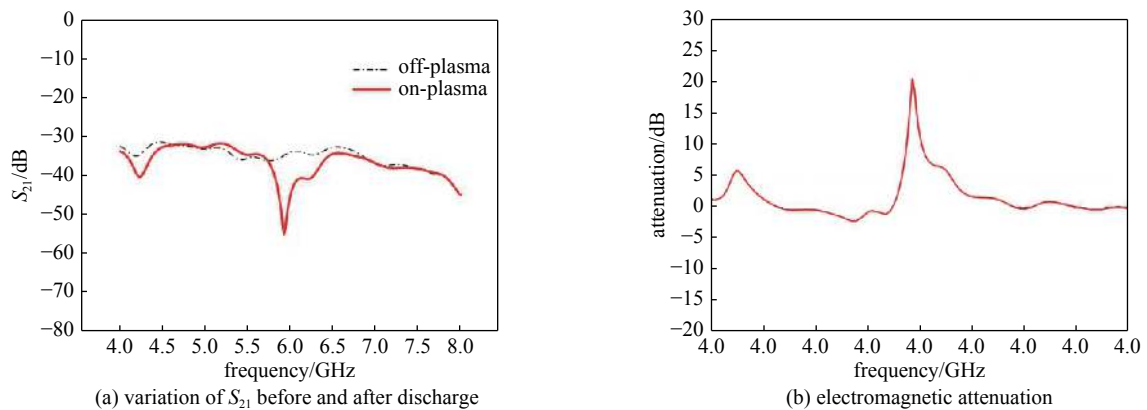


Fig. 7 Attenuation of microwave in ICP when the power is 300 W

图7 功率为300 W时ICP等离子体对电磁波的衰减变化

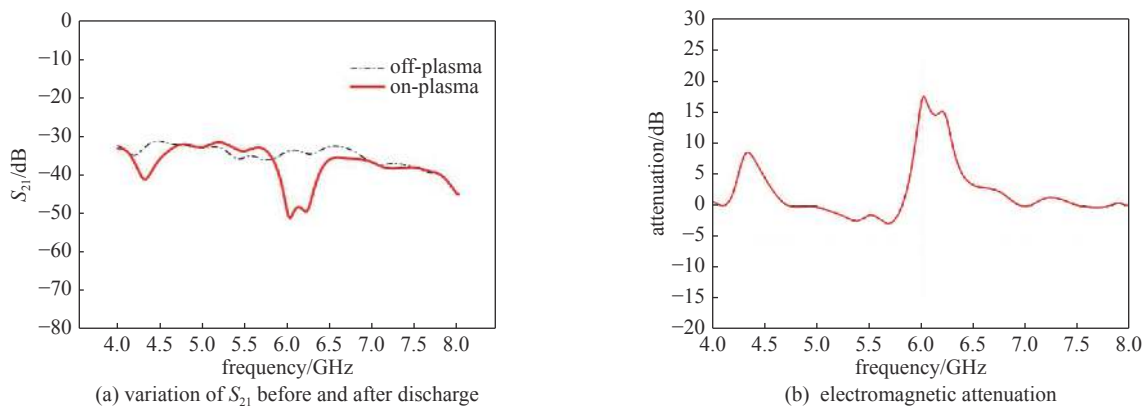


Fig. 8 Attenuation of microwave in ICP plasma when the power is 400 W

图8 功率为400 W时ICP等离子体对电磁波的衰减变化

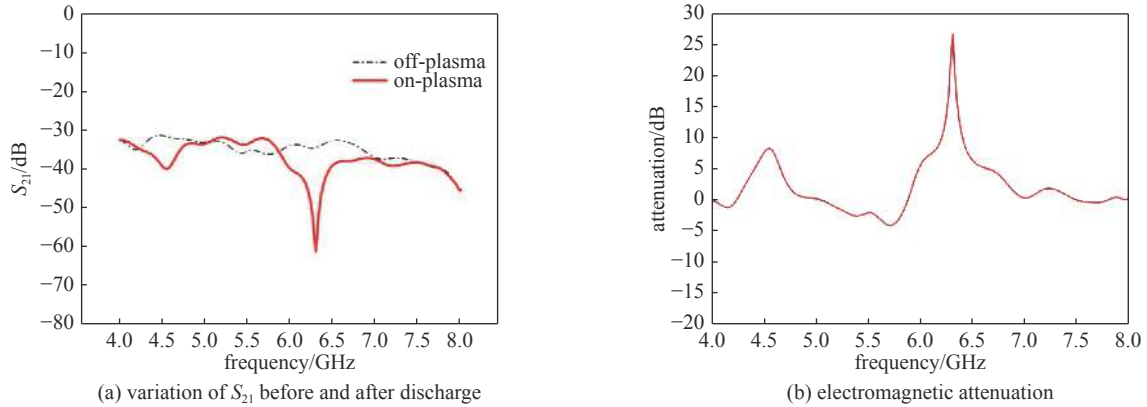


Fig. 9 Attenuation of microwave in ICP plasma to when the power is 500 W

图9 功率为500 W时ICP等离子体对电磁波的衰减变化

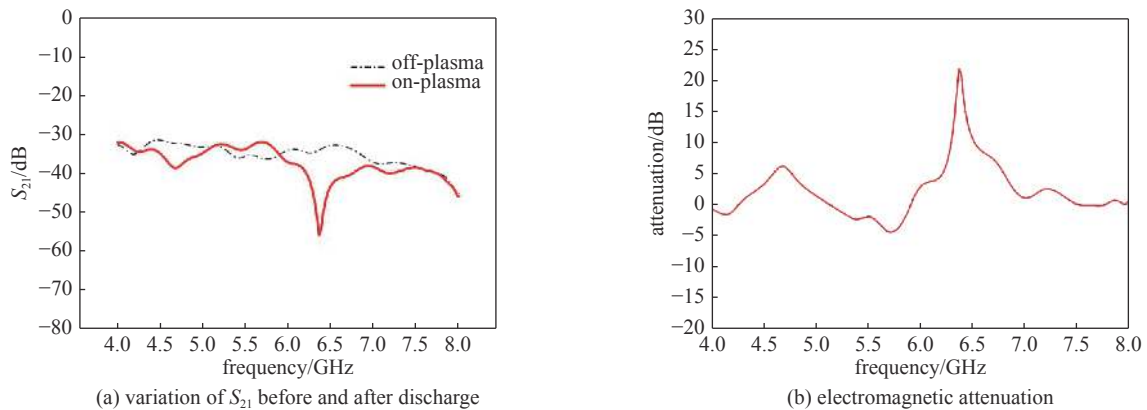


Fig. 10 Attenuation of microwave in ICP plasma when the power is 600 W

图10 功率为600 W时ICP等离子体对电磁波的衰减变化

况,图(a)为等离子体产生前后电磁波回波信号的实测数据,图(b)为相应的电磁波衰减值。其中,对应的射频输入功率分别为200, 300, 400, 500, 600 W。由于采用的等离子体覆盖金属板的测量模型,因此这里得到的是电磁波在等离子体中的双程衰减。

实验采用5个射频功率点进行采样,由微波衰减情况可以看出,在4~8 GHz频段范围内,ICP等离子体对电磁波的衰减情况可以分为三个频段:两个衰减带和一个反射带,除了存在5.0~5.5 GHz频段等离子体对电磁波具有较小的反射增强作用外,其他频段则衰减或不增强反射电磁波,其中在4.35 GHz左右的窄带具有微弱的衰减作用,主衰减带5.65~6.9 GHz内则具有较为明显的衰减效果,即ICP等离子体基本上对该频段的电磁波反射是衰减的。随着射频放电功率的提高,ICP等离子体对电磁波的衰减作用增强,反射带的反射效果也在增大,而且产生作用的频段范围略向高频段移动,如7.25 GHz左右的窄带的衰减效果在功率为500 W之后才有显现出来。在5.92~6.8 GHz频带内,衰减值一直大于0 dB,即等离子体对电磁波都是呈现衰减作用,并随着射频功率的增加,衰减作用越来越明显,图11给出了该频带内等离子体对电磁波的平均衰减量随射频功率的变化情况,可以看出,功率由200 W增加400 W过程中,等离子体对电磁波的衰减明显增大,由400 W增大到600 W,电磁波的衰减量基本保持不变。而且随着射频输入功率的提高,电磁波的衰减峰值也在增大,最大可达-25 dB,其对应的电磁波频率也逐渐在增大,如图12所示。

提高输入功率可以增加等离子体电子密度,使得电磁波的衰减量也增大,等离子体对电磁波的吸收频带变宽,衰减峰值所对应的电磁波频率逐渐向高频段移动。另外,受限于感性放电方式及耦合效率的因素,电感耦合放电等离子体的电子密度达到一定值($10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)后,增大放电功率对电子密度的提升作用在减弱。

利用电磁波在等离子体中传播的分层计算方法,以发生器内等离子体电子密度测量值的多项式拟合结果作为电子密度近似分布,基于非均匀等离子体覆盖金属平板的计算模型,得到400 W射频放电功率下等离子体对入射电磁波的双程衰减,并将两种不同层数设置(300层、500层)的分层仿真计算结果与实验测量结果进行对比,如图13所示。

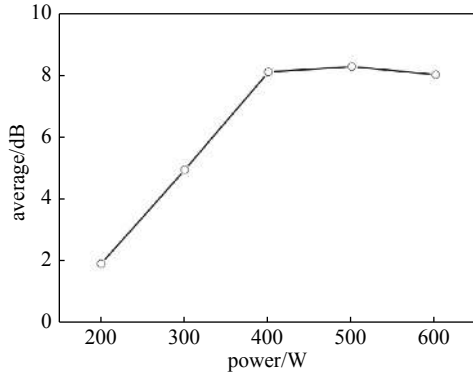


Fig. 11 Variation of average attenuation in 5.92~6.8 GHz frequency band

图 11 5.92~6.8 GHz 频段平均衰减的变化情况

由图 13 得到仿真与实验获得的 ICP 等离子体能够对一定频段内的电磁波产生有效的衰减作用。其中仿真参数设置对电磁波衰减结果存在较大区别, 当等离子体分为 300 层时, 在频率 5.8 GHz 处电磁波计算衰减峰值为 14.4 dB; 当等离子体分为 500 层时, 在频率 6.03 GHz 处电磁波计算衰减峰值为 18.2 dB; 从实验数据可以得到在频率 6.02 GHz 处电磁波衰减峰值为 17.6 dB, 两种参数设置下电磁波的变化趋势总体近似一致, 且等离子体分为 500 层的计算电磁波衰减量峰值和频率与实际较为接近, 误差较小, 能够反映实际电磁波衰减变化的规律。但是, 从图 13 中也发现计算结果与实验结果存在的一些差别: 实验结果中, 等离子体对电磁波的衰减效果主要体现在 5.92~6.8 GHz 频段内, 其他频段内则既有衰减也有反射增强, 然而在分层计算中, 在 4~8 GHz 频段范围内未出现反射增强效果。这是可能因为实验引入及其金属平板造成额外的反射。与此同时, 分层数的选择引起的结果不同, 这也说明分层计算模型在仿真过程中参数的选择会对结果造成较大影响, 且分层数过多对算法的计算负担会大大增加, 合理选择仿真参数, 下一步还需要结合实验和其他仿真方法进行参数最优化的选择。

由于等离子体振荡是一种静电的高频振荡, 也会辐射一定的电磁波。文献 [18] 表明, 不同电子密度的等离子体向外辐射不同波段的电磁波, 例如, 电子密度为 10^{14} , 10^{18} , 10^{28} m^{-3} 的等离子体的辐射波分别处于米波段、厘米波段和可见光波段。通过与文献 [15] 中 ICP 应用在天线罩形腔的电磁散射的实验结果对比, 文献得出 ICP 装置对 C 波段和 X 波段的微波有较强衰减效果, 并且随着功率的提高, ICP 对入射波的衰减率不断提高, 当 25 Pa, 功率 1700 W 时, Ar-ICP 对 5~7 GHz 微波的衰减较高, 平均衰减达到 15 dB, 衰减峰达到 31 dB, 参数设置和发生环境虽与本文有一定区别, 但得到的电磁波衰减结果近似。同时证明, 平面型 ICP 可以达到与文献 [19] 中非均匀圆柱形等离子体类似的电磁波衰减效果, 因此, 利用闭式等离子体对电磁波的衰减是可行的。

3 结 论

搭建等离子体覆盖金属平板的测量模型和电磁波衰减测试系统, 分析了闭式等离子体对 4~8 GHz 频段范围电磁波的反射效果及衰减情况, 首先, 研究在不同的射频输入功率下电磁波在非磁化等离子体中的衰减特性, 并将实验结果与计算结果进行对比分析。实验结果表明, 当工作气压一定时, 随着放电功率的增大, 等离子体电子密度相应地增大, 电磁波在等离子体中的衰减幅值也在继续增大, 衰减频段轻微向高频段移动, 这是因为射频源放电功率的增加, 等离子体吸收的功率也随之增加, 提高了电离度, 使得电子密度随之增加; 其次, 通过两种分层计算模型结果与实验结果进行对比, 表明不同层数计算的仿真结果会对结果造成不同的误差, 在计算资源有限的情况下, 选取合适的仿真参数还需结合实验结果进行优化设计。因此, 文章提出电感耦合闭式等离子体用于电磁波的衰减

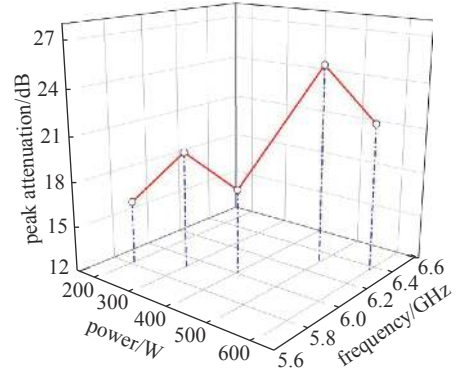


Fig. 12 Variation of attenuation peak of 5.92~6.8 GHz frequency band

图 12 5.92~6.8 GHz 频段衰减峰值的变化情况

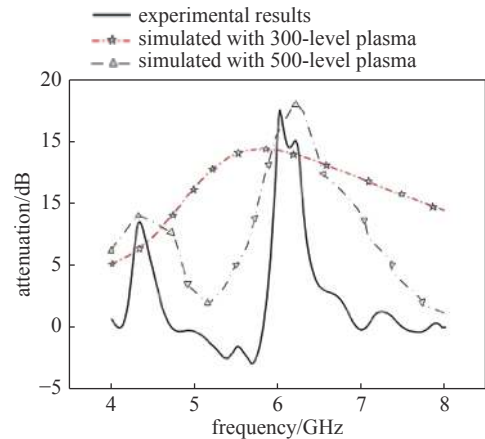


Fig. 13 Comparison between calculation and experiment of electromagnetic wave attenuation by plasma at 400 W

图 13 功率为 400 W 时等离子体对电磁波衰减的计算与实验对比

是可行的,通过单功率参数变化调节等离子体,使其满足一定范围内电磁波衰减频段动态可调,为下一步实际应用提供一定的研究基础。

参考文献:

- [1] Xu Shuyan, Ostrikov K N, Li Y, et al. Low-frequency, high-density, inductively coupled plasma sources: Operation and applications[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2549-2557.
- [2] Godyak V A, Alexandrovich B M. Plasma and electrical characteristics of inductive discharge in a magnetic field[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(7): 3553-3560.
- [3] 戴栋, 宁文军, 邵涛. 大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9. (Dai Dong, Ning Wenjun, Shao Tao. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9)
- [4] 朱寒, 何湘, 陈秉岩, 等. 容性耦合射频放电等离子体的仿真模拟与实验诊断研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3504-3511. (Zhu Han, He Xiang, Chen Bingyan, et al. Simulations and experimental diagnostic of capacitively coupled RF discharge plasma [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3504-3511)
- [5] Lee H C, Chung C W. E-H heating mode transition in inductive discharges with different antenna sizes[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 053505.
- [6] Lee H C, Chung C W. Effect of antenna size on electron kinetics in inductively coupled plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20: 101607.
- [7] Jun H S, Chang H Y. Development of 40 MHz inductively coupled plasma source and frequency effects on plasma parameters[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 041501.
- [8] Ventzek P L G, Hoekstra R J, Kushner M J. Two-dimensional modeling of high plasma density inductively coupled sources for materials processing[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1994, 12(1): 461-477.
- [9] Fukasawa T, Nouda T, Nakamura A, et al. RF self-bias characteristics in inductively coupled plasma[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32: 6076.
- [10] Amorim J, Maciel H S, Sudano J P. High-density plasma mode of an inductively coupled radio frequency discharge[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1991, 9(2): 362-365.
- [11] 张改玲, 滑跃, 郝泽宇, 等. 13.56 MHz/2 MHz柱状感性耦合等离子体参数的对比研究[J]. *物理学报*, 2019, 68: 105202. (Zhang Gailing, Hua Yue, Hao Zeyu, et al. Experimental investigation of plasma parameters in 13.56 MHz/2 MHz cylindrical inductively coupled plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68: 105202)
- [12] 张响, 王波, 王荷军. 射频感应耦合等离子体朗缪尔双探针诊断分析[J]. *真空*, 2016, 53(3): 56-61. (Zhang Yun, Wang Bo, Wang Hejun. Langmuir double probe diagnostic analysis of RF inductively coupled plasma [J]. *Vacuum*, 2016, 53(3): 56-61)
- [13] 王荷军, 王波, 刘云辉, 等. 放电参量对射频容性耦合等离子体电子密度的影响[J]. *真空*, 2017, 54(4): 26-30. (Wang Hejun, Wang Bo, Liu Yunhui, et al. Influence of discharge parameters on electron density of RF capacitively coupled plasma [J]. *Vacuum*, 2017, 54(4): 26-30)
- [14] Wen Deqi, Liu Wei, Gao Fei, et al. A hybrid model of radio frequency biased inductively coupled plasma discharges: description of model and experimental validation in argon[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, 25: 045009.
- [15] 汪建. 射频电感耦合等离子体及模式转变的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014. (Wang Jian. Experimental study on radio frequency inductively coupled plasmas and mode transition [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.)
- [16] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013. (Sang Jianhua. Low-observable technologies of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.)
- [17] 苏晨, 徐浩军, 林敏, 等. 封闭式等离子体发生器设计及其放电等离子体参数分布实验研究[J]. *高电压技术*, 2013, 39(7): 1668-1673. (Su Chen, Xu Haojun, Lin Min, et al. Design on closed plasma generator and experimental study on its plasma parameters distribution [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(7): 1668-1673)
- [18] 何湘. 飞机局部等离子体隐身探索研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010. (He Xiang. Studies on plasma stealth technique application in parts of plane [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.)
- [19] 赵日康, 张紫浩, 张林, 等. 圆柱形等离子体对微波散射的数值模拟与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 053001. (Zhao Rikang, Zhang Zihao, Zhang Lin, et al. Microwave scattering by inhomogeneous plasma column [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 053001)