

电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究

林敏 徐浩军 魏小龙 梁华 张艳华

Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma

Lin Min Xu Hao-Jun Wei Xiao-Long Liang Hua Zhang Yan-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 055201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.055201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含螺旋单元频率选择表面的宽频带强吸收复合吸波体

Composite absorber of broadband and high attenuation with spiral frequency selective surfaces

物理学报.2014, 63(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205202>

垂直相交高功率微波大气击穿的理论研究

Theoretical study on the air breakdown by perpendicularly intersecting high-power microwave

物理学报.2013, 62(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205202>

微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟

Particle-in-cell simulation of corona discharge in low pressure in stepped impedance transformer

物理学报.2013, 62(2): 025201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025201>

太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究

Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma

物理学报.2012, 61(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.245202>

等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究

Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma

物理学报.2012, 61(15): 155203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155203>

# 电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究\*

林敏<sup>†</sup> 徐浩军 魏小龙 梁华 张艳华

(空军工程大学, 航空航天工程学院, 西安 710038)

(2014年7月19日收到; 2014年10月16日收到修改稿)

针对等离子体隐身技术在航空航天领域的良好应用前景, 开展垂直入射到具有金属衬底的非磁化等离子体中电磁波衰减特性的理论与实验研究. 利用WKB方法对电磁波衰减随等离子体参数的变化规律进行了理论分析. 利用射频电感耦合放电方式产生稳定的大面积等离子体层, 搭建了等离子体反射率弓形测试系统, 进行了电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究. 利用微波相位法和光谱诊断法, 得到不同放电功率下的等离子体电子密度, 其范围为  $8.17 \times 10^9$ — $7.61 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . 本实验获得的等离子体可以使 2.7 GHz 和 10.1 GHz 电磁波分别得到一定的衰减, 且电磁波衰减的理论与实验结果符合较好. 结果表明, 提高等离子体电子密度和覆盖均匀性有利于增强等离子体对电磁波的衰减效果.

**关键词:** 等离子体隐身, ICP 放电, 电磁波衰减, 电子密度

**PACS:** 52.40.Db, 52.35.Hr, 52.25.Os

**DOI:** 10.7498/aps.64.055201

## 1 引言

等离子体对电磁波有着可控的吸收、散射及反射特性, 在飞行器隐身和雷达通讯等航空航天领域具有良好的应用前景, 受到世界各军事强国的广泛关注<sup>[1-5]</sup>. 等离子体隐身技术是一种新概念、新原理的隐身技术, 其基本的原理是通过等离子体层对雷达波具有特殊的吸波和折射等特性, 使其反射回雷达接收机的能量很少, 因而使敌方的探测系统难以侦察和发现, 从而达到隐身的目的<sup>[6]</sup>. 对于现代飞行器而言, 等离子体隐身具有不需要改变飞行器气动外形便可降低其雷达散射截面(RCS)以及吸波频段宽、使用简便有效等优点, 但也面临着在低空开放环境下不易产生和维持大尺度且一定密度的等离子体等问题, 为此, 也有学者提出了闭式等离子体隐身技术的概念<sup>[7]</sup>.

在上世纪60年代, Swarner首次发表等离子体覆盖导体目标RCS的研究成果<sup>[8]</sup>; 美国休斯(Hughs)实验室在90年代中期开展等离子体隐身实验, 测量了充满等离子体的陶瓷罩包裹的微波

反射器RCS, 发现在4—14 GHz 频率范围内缩减20—25 dB<sup>[9]</sup>; Petrin, Kim等利用WKB方法进行等离子体对电磁波的衰减效应的数值研究, 分析了不同等离子体参数对电磁波传播的影响<sup>[10,11]</sup>; 刘少斌等采用时域有限差分(FDTD)方法对电磁波在非磁化等离子体和色散媒质中的传播特性进行研究<sup>[12,13]</sup>; Wolf等采用DBD方式产生等离子体覆盖金属平板并对其RCS的影响规律进行研究<sup>[14]</sup>; 杨敏等针对高速飞行器存在的无线通信黑障问题, 利用大面积辉光放电等离子体产生方式, 进行了时变等离子体中信号传输特性的实验研究<sup>[15]</sup>; 王亮采用射频电容耦合放电方式, 建立了天线罩等离子体发生系统, 研究了特定频率范围内入射电磁波能量在等离子体中传播的衰减规律及其参数影响<sup>[16]</sup>.

当前, 军用飞行器隐身面临的主要威胁来自雷达, 研究低能耗条件下飞行器表面形成均匀稳定的等离子体层及其对电磁波的衰减特性是实现等离子体隐身技术的关键所在. 实验室常用的大面积等离子体产生技术有容性耦合等离子体、感性耦合等离子体和辉光放电等离子体, 且多数研究工作都集

\* 国家自然科学基金(批准号: 51276197)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [lm\\_acad@sina.com](mailto:lm_acad@sina.com)

中在材料处理、信号传输和天线隐身设计等方面，而关于感性耦合等离子体对电磁波的衰减效应的实验工作开展得较少。本文采用射频电感耦合放电方式，在低气压密闭腔体内获得了稳定均匀的大面积等离子体片，对电磁波在感性耦合等离子体中的衰减效应进行了理论与实验研究。

## 2 物理模型

### 2.1 理论模型

利用WKB方法对垂直入射到具有金属衬底的非磁化等离子体时电磁波衰减特性进行研究<sup>[10]</sup>，采用的计算模型如图1所示。等离子体是一种典型的色散媒质，冷的、非磁化的、碰撞等离子体的相对介电常数表示为

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

其中， $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$  是等离子体角频率， $\omega = 2\pi f$ ， $f$  是电磁波频率， $\nu = 2\pi f_{en}$ ， $f_{en}$  是电子与中性粒子的碰撞频率， $n_e$  是等离子体电子密度， $e$  是电子电量， $\epsilon_0$  是真空介电常数， $m_e$  是电子质量。

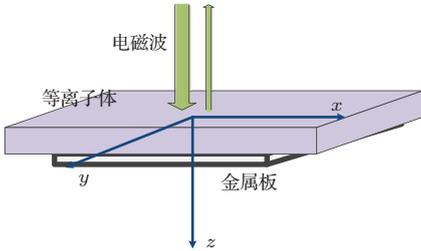


图1 等离子体覆盖金属平板计算模型

电磁波在等离子体中的传播常数也可写为

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}. \quad (2)$$

通常，令  $k = \beta - i\alpha$ ， $\beta$  和  $\alpha$  分别为电磁波的相位常数和衰减常数

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left( \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left( \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}, \\ \alpha &= \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left[ - \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left( \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left( \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

一维情况下，电磁波在均匀非磁化等离子体中的波动方程<sup>[17,18]</sup>可写为

$$\nabla^2 E(z) + k^2(z)E(z) = 0. \quad (4)$$

其WKB方法的解为

$$E(z) = E_0 \exp[-i \int_0^z k(z') dz']. \quad (5)$$

WKB解有效条件为

$$\frac{1}{k} \frac{dk}{dz} \ll 1. \quad (6)$$

该条件要求电磁波的波数在一个波长范围内变化很小。除非等离子体的密度变化非常大或电磁波的频率极低，这个条件是易于实现的。

电磁波沿Z轴方向垂直入射到等离子体层后，在金属平板表面被反射回来，再次被等离子体吸收。当电磁波再次传播到入射处时，其功率P则为

$$P = P_0 \exp(-4\alpha l), \quad (7)$$

其中， $P_0$  是入射电磁波功率， $l$  是等离子体层厚度。

所以，通过等离子体后电磁波的双程衰减Att为

$$\text{Att} = \left| 10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) \right| = 17.37\alpha l (\text{dB}). \quad (8)$$

### 2.2 数值结果分析

许多研究结果表明，等离子体具有高通滤波器的性质，当入射电磁波频率大于等离子体频率时，电磁波可以入射到等离子体内部，并被衰减。相反，当入射电磁波的频率小于等离子体频率时，等离子体将强烈反射入射的电磁波。因此，等离子体参数和电磁波频率的选择会直接影响着隐身效果。图2给出了在入射电磁波频率为2.7 GHz，不同的

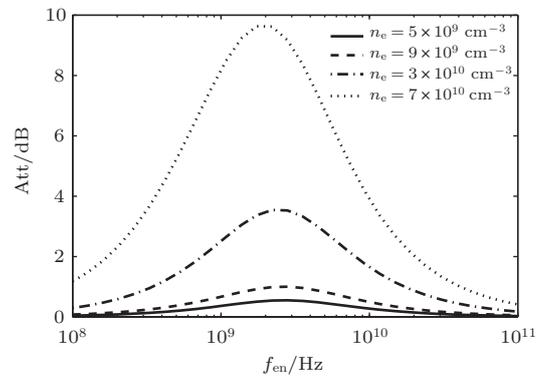


图2 不同电子密度时电磁波衰减的变化情况

等离子体电子密度时, 电磁波衰减随等离子体碰撞频率的变化关系. 可以看出, 在一定的等离子体碰撞频率下, 电磁波衰减量随着等离子体电子密度的增加而增大. 这是因为等离子体电子密度的增大, 具有更多的电子从电场吸收能量, 并通过碰撞传给中性粒子, 从而电磁波衰减增大. 当等离子体电子密度大于  $10^{10}$  量级时, 电磁波衰减量明显增加, 这是由于此时对应的等离子体频率接近入射电磁波的频率, 电磁波传播时靠近截止区引起共振吸收, 能够引起较大的电磁波衰减.

图 3 是在等离子体电子密度为  $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 不同的入射电磁波频率时, 电磁波衰减随等离子体碰撞频率的变化关系. 我们可以看出, 入射电磁波频率较低时, 等离子体对电磁波具有较为明显的衰减. 当入射电磁波频率增大, 电磁波衰减的峰值则随之减小, 这是因为处于该电子密度的等离子体对应的截止频率为 2 GHz, 增大电磁波频率会远离截止区, 等离子体对电磁波的衰减以碰撞吸收为主, 当电磁波的频率过高时, 等离子体中电子运动跟不上电磁波的变化, 电子基本上没有极化作用, 使得等离子体中的电子不能吸收电磁波的能量, 因而电磁波衰减量减小. 另外, 对于一定的等离子体密度和入射电磁波频率, 存在一个最佳的等离子体碰撞频率使得电磁波衰减取得最大值, 过小或过大的碰撞频率都不能起到电磁波衰减的作用. 随着入射电磁波频率增大, 电磁波衰减峰值所对应的碰撞频率也有所增加, 且越接近入射电磁波频率时, 取得越大的衰减效果.

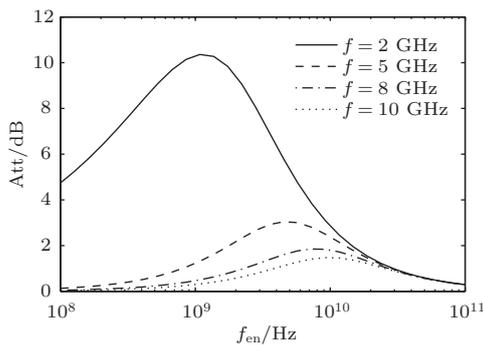


图 3 不同入射电磁波频率时电磁波衰减的变化情况

### 3 实验布置

为了研究等离子体对电磁波的衰减效应, 搭建了如图 4 所示的实验测试系统. 该测试系统包括

平板型真空腔室、供气和抽气、冷却水系统、等离子体发射光谱诊断系统和微波反射弓形测量系统组成.

微波反射弓形测量系统由安立公司生产的 37347C 型微波矢量网络分析仪、微波天线、样板、弓形框及若干吸波材料组成. 微波天线与 37347C 型矢量网络分析仪相连接, 实现微波信号的发射与接收. 由硬铝做成的标准板放置于等离子体发生器下方, 两者一起固定于样板架上. 由发射天线发出的微波信号经过等离子体层后, 在铝板表面反射后再次通过等离子体层, 回到接收天线, 并由微波矢量网络分析接收记录微波信号的变化情况.

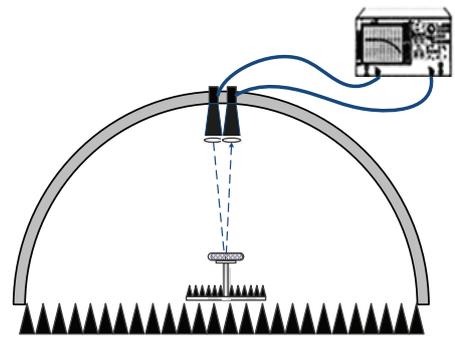


图 4 测量系统整体示意图

图 5 是平板型 ICP 等离子体发生器的实物及示意图. 平板真空腔室采用厚度为 1 cm 的石英玻璃制作而成, 其内部空腔的长宽高分别为 20 cm, 20 cm, 4 cm. 在腔室左右相对的两边各安装一个直径为 15.8 mm 的高硼硅玻璃管用于连接 KF16 规管接头, 在实验过程中, 一端连接气源气瓶以通入高纯氩气, 另外一端连接真空机械泵进行持续抽气以保持腔室内气压. 实验采用的电源为中科院微电子所研制的 MSY-I 型脉冲射频功率源, 工作电压 12—32 V 连续可调, 频率为 13.56 MHz. 为保证有足够的功率溃入等离子体中并防止过大的功率返回功率源, 在功率源和射频天线之间需要射频匹配器以调节前向功率和反射功率, 实验采用的是 SP-I 型射频匹配器. 射频天线是平面盘香型线圈, 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. 为保证放电电极能够长时间稳定工作, 在铜管中持续通有冷却水. 考虑微波反射测量的影响, 对实验空间内的金属仪器和其他强散射点均采用粘贴吸波材料处理.

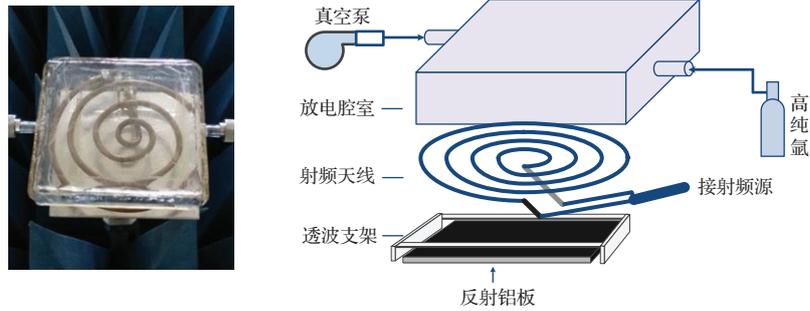


图5 等离子体发生器与金属板的实物及示意图

等离子体发射光谱携带了丰富的等离子体参数信息, 采用发射光谱法诊断等离子体参数已得到了广泛的应用<sup>[19,20]</sup>. 发射光谱诊断系统由光纤、光谱仪和计算机组成. 将光纤探头垂直固定于光信号接收部位, 采用荷兰 Avantes 公司的 Avaspec-2048-M 型四通道光谱仪, 同步测量波长范围 200—1100 nm 内发射光谱的谱线强度, 由与其连接的计算机控制采集并存储数据.

#### 4 实验结果与讨论

在 ICP 等离子体产生过程中, 保持平板腔室气压稳定在一定值, 选取不同的放电功率, 并且在每个放电功率点进行多次测量, 保证获得的等离子体具有较好的重复性. 采用微波相位法和发射光谱法监测等离子体电子密度变化, 从而研究不同状态的等离子体与电磁波衰减的变化关系.

电子碰撞频率影响着等离子体的介电常数和电导率, 是影响等离子体电磁散射特性的关键参数之一. 采用文献<sup>[21]</sup>关于有效电子碰撞频率的经验公式

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

$$\nu = 8.7841 \times 10^4 P \sqrt{T}, \quad (10)$$

其中,  $P$  是气体压力, 取为实验值 100 Pa,  $T$  是等离子体的温度, 取为室温 300 K. 利用上述式子可以得到电子碰撞频率的理论值.

电子密度是表征等离子体状态的重要参数, 对等离子体电磁散射特性起到重要的影响. 考虑本实验的等离子体是在无外磁场、低气压的密闭腔室环境下产生的, 可将其近似作为弱电离等离子体. 对于弱碰撞、低密度非磁化等离子体, 电磁波通过厚度为  $l$  的各向同性平板型等离子体, 相对在同样厚

度的空气中传播, 其相移量为

$$\Delta\phi = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e c \omega} \int_0^l n_e(x) dx. \quad (11)$$

则微波探测路径上等离子体的弦平均密度为

$$\bar{n}_e = \frac{\int_0^l n_e(x) dx}{l} = \frac{2\varepsilon_0 m_e c \omega}{e^2} \frac{\Delta\phi}{l}. \quad (12)$$

利用上式就可以得到微波探测路径上等离子体电子密度的弦平均值. 由于本装置获得的等离子体所能达到的电子密度峰值<sup>[22]</sup>约为  $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , 对应等离子体截止频率约为 8.02 GHz, 因此, 微波相位法测量电磁波频率可选为 10.1 GHz. 实验中, 射频电源放电功率从 200 W 逐渐递增至 800 W, 并观测该过程中等离子体电子密度的变化情况. 图 6 是测得的电子密度随放电功率的变化关系.

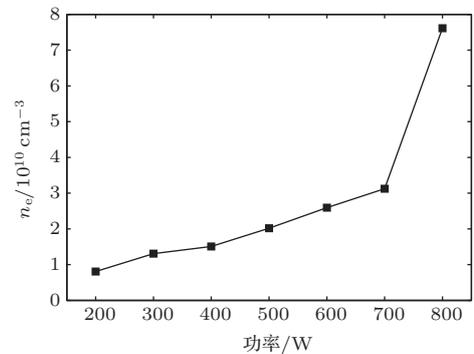


图6 电子密度随放电功率的变化关系

从图 6 可以看出, 在前期阶段, 随着放电功率的增加, 电子密度逐渐增大, 但幅度较小. 这是因为在低功率条件下, ICP 放电处于容性耦合放电 (E 模) 工作状态, 其主要是靠容性放电维持, 此时电子密度较低, 在  $8.17 \times 10^9 - 3.12 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  范围内变化. 随着放电功率的提高, 线圈电流也在增大, 当线圈高频电流大于某一阈值时, 等离子体电子密度出现一个较大增幅的突变, 这是因为线圈电流的

增大使得等离子体中的感生电场得到加强, 电子从中获得了更多的能量, 等离子体电离度提高, 电子密度迅速增大至  $7.61 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . 此时 ICP 放电进入感性耦合放电 (H 模) 工作状态, 主要靠感性放电成分维持.

等离子体发射光谱的强度变化是电子密度变化的一个特征, 有助于我们观察电子密度随放电功率的变化情况. 考虑到是整个腔室范围内等离子体对电磁波的衰减作用, 采集过程是将光纤探头固定在放电腔室的侧面进行的. 图 7 是功率为 300 W 时 ICP 放电发光图及波长 680—880 nm 范围内测得的谱线相对强度. 在本次实验中, 考虑采用 Ar750.4 nm 谱线强度的变化来分析电子密度的变化, 这是因为在有效电子温度变化不大时, 该波长的谱线强度和 Ar 原子密度的比值与电子密度成近似的正比关系 [23].

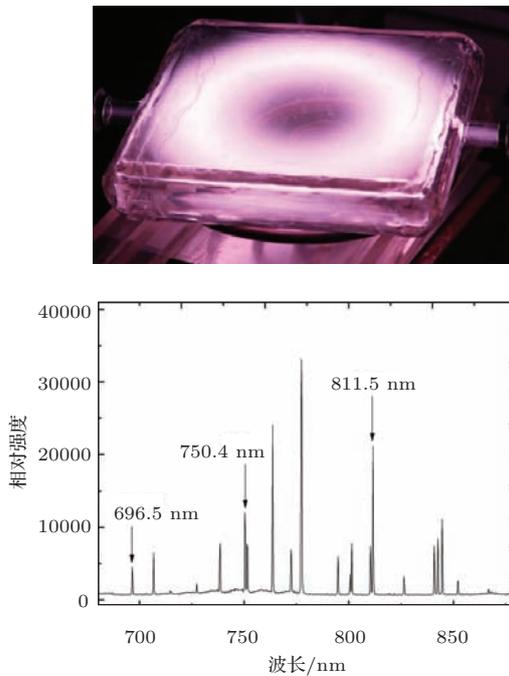


图 7 功率为 300 W 时放电发光及谱线相对强度

图 8 是不同放电功率下测得 Ar750.4 nm 谱线强度的变化情况. 可以看出, Ar750.4 nm 谱线强度随放电功率的变化趋势与计算得到的电子密度基本一致, 在 E 模放电下, 谱线相对强度随着放电功率的增大而缓慢增加, 当功率增大到 800 W 时, 放电进入 H 模工作, 谱线相对强度急剧上升. 同时, 可以观察到由于趋肤效应使得等离子体分布由原先充满腔室空间向电极附近集中.

图 9 为 2.7 GHz 电磁波通过等离子体后衰减的实验值和理论值对比. 可以看出, 随着放电功率的增大, 等离子体电子密度在提高, 电磁波衰减量的理论值和实验值均表现出增加的趋势. 当 ICP 放电模式发生转换时, 由于电子密度的迅速提高, 电磁波衰减量理论值随之出现一个增大的突变. 而电磁波衰减的实验值则出现下降的变化, 我们推测可能由两个原因导致这个现象. 一是由于 ICP 放电在 E 模工作时, 电子密度低但分布比较均匀, 等离子体充满平板型发生器的整个空间, 一旦进入 H 模放电后, 电子密度高但等离子体分布表现得不均匀, 且集中到电极附近, 为明亮聚集状的等离子体团 [24]. 于是, 在电子密度增加和分布不均匀共同作用下, 表现为电磁波衰减的减弱; 二是由于电子密度的突变增大, 使得等离子体频率也随之增大, 导致入射电磁波的频率接近截止区, 从而引起电磁波衰减量减小. 对于此问题, 我们测量了入射电磁波频率为 10.1 GHz 时等离子体对电磁波的衰减情况. 另外, 还可以看出, 电磁波衰减量的理论与实验值存在着一定的差异, 这有可能是测试系统和等离子体参数的计算所引起的误差.

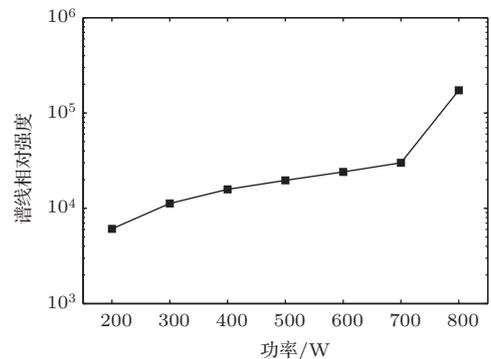


图 8 Ar750.4 nm 谱线强度随放电功率的变化情况

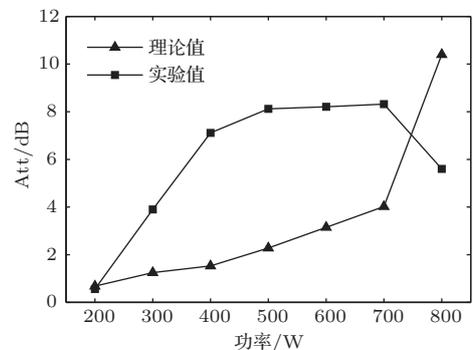


图 9 2.7 GHz 电磁波衰减的实验值和理论值对比

图 10 是 2.7 GHz 和 10.1 GHz 电磁波衰减实验值的对比. 可以看出, 通过相同状态的等离子体, 2.7 GHz 和 10.1 GHz 电磁波的衰减具有相同的变化趋势, 随着放电功率的增加而增大, 当放电功率达到 800 W 时, 均出现明显的下降. 由前面可知, 此放电状态下等离子体电子密度为  $7.61 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 对应等离子体频率为 2.47 GHz, 远小于测量电磁波频率 10.1 GHz. 因此, ICP 放电进入 H 模工作状态时出现的电磁波衰减量下降是由于等离子体分布的不均匀性引起的. 另外, 2.7 GHz 电磁波的衰减量会大于 10.1 GHz 电磁波的衰减, 这与前面理论计算结果一致, 对于高频段电磁波而言, 需要进一步提高等离子体电子密度, 以提升电磁波衰减效果.

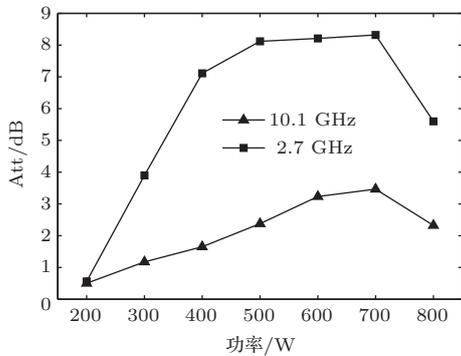


图 10 2.7 GHz 和 10.1 GHz 电磁波衰减实验值的对比

## 5 结 论

本文对垂直入射到非磁化等离子体中电磁波的衰减特性进行理论与实验研究. 利用 WKB 方法对非磁化等离子体覆盖金属平板模型进行理论计算, 得到电磁波衰减随电子密度增加而增大, 随着电磁波频率的增加而减小, 等离子体碰撞频率存在最佳值使得衰减最大. 在低气压密闭腔体内, 利用射频电感耦合放电方式获得稳定的大面积等离子体片, 其电子密度范围为  $8.17 \times 10^9$ — $7.61 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 可以使 2.7 GHz 和 10.1 GHz 电磁波得到一定的衰减, 且电磁波衰减的理论与实验结果符合较好. 结果表明, 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. 该工作可为等离子体与电磁波衰减作用和飞行器等离子体隐身研究提供较好的参考作用.

## 参考文献

- [1] Alexeff I, Anderson T, Parameswaran S, Pradeep E, Hulloli J, Hulloli P 2006 *IEEE. Trans. Plasma. Sci.* **34** 166
- [2] Destler W W, DeGrange J E, Fleischmann H H, Rodgers J, Segalov Z 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 6313
- [3] Vidmar W 1990 *IEEE. trans. Plasma. Sci.* **18** 733
- [4] Eugen Statnic, Valentin Tanach 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 465
- [5] Zhang Y X, Liu S G, Yan Y, Jia J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 105202
- [6] Zhuang Z W, Yuan N C, Liu S B, Mo J J 2005 *Plasma Stealthy Technology* (Beijing: Science Press) pp44-46 (in Chinese) [庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 莫锦军 2005 等离子体隐身技术 (北京: 科学出版社) 第 44—46 页]
- [7] Li Y, Zhang W J, Mo J J, Yang H J, Yuan N C 2008 *Journal of Microwaves.* **24** 23 (in Chinese) [李毅, 张伟军, 莫锦军, 袁乃昌 2008 微波学报 **24** 23]
- [8] Swarner W G 1963 *IEEE Tran. Antennas Propag.* **11** 558
- [9] Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W 1992 AD-A250710
- [10] Petrin A B 2001 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **29** 471
- [11] Kim H C, Verboncoeur J P 2007 *Computer Phys. Communications* **177** 118
- [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] Dai Y, Liu S B, Wang S Y, Kong X K, Chen C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 065202
- [14] Wolf S, Arjomandi M 2011 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **44** 315202
- [15] Yang M, Li X P, Liu Y M, Shi L, Xie K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明, 石磊, 谢楷 2014 物理学报 **63** 085201]
- [16] Wang L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Heifei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王亮 2009 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [17] Cheng G X, Liu L 2010 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **38** 3109
- [18] Weston V H 1967 *Phys. Fluids* **10** 632
- [19] Lin M, Xu H J, Su C, Liang H, Wei X L 2014 *Spectrosc. Spect. Anal.* **34** 1594 (in Chinese) [林敏, 徐浩军, 苏晨, 梁华, 魏小龙 2014 光谱学与光谱分析 **34** 1594]
- [20] Srarni A, Nikiforov A Y, Leys C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 063504
- [21] Hu B J, Wei G 1999 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **27** 1131
- [22] Gilles Cunge, Brendan Crowley, David Vender, Turner M M 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 576
- [23] KiKitajima T, Nakano T, Makabe T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 091501
- [24] Amorim J, Maciel H S, Sudano J P 1991 *J. Vac. Sci. Technol. B* **9** 362

# Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma\*

Lin Min<sup>†</sup> Xu Hao-Jun Wei Xiao-Long Liang Hua Zhang Yan-Hua

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

( Received 19 July 2014; revised manuscript received 16 October 2014 )

## Abstract

Plasma stealth technology has many unique advantages, hence it has a promising application in the aviation and aerospace fields. The attenuation characteristics of vertical incidence of electromagnetic waves into unmagnetized plasmas with metal underlay are studied theoretically and experimentally in this paper. Regulations for the change of electromagnetic wave attenuation with plasma parameters are analyzed in theory using WKB method. A large-area plasma slab is generated stably by inductively coupled discharge, and the reflectivity arch test system of plasma slab is set up. While the attenuation effects of electromagnetic wave in unmagnetized plasmas are studied experimentally. The electron density of plasma generated at different discharge powers is obtained by using the microwave phase and plasma spectrum diagnostic technique, ranging from  $8.17 \times 10^9$  to  $7.61 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . The plasma generated by inductively coupled plasma (ICP) has an effect on the attenuation of electromagnetic waves, and the experimental results accord well with the theoretical ones. Results show that increasing the plasma electron density and covering homogeneity can contribute to improving the attenuation effect of plasma on electromagnetic waves.

**Keywords:** plasma stealth, ICP discharge, electromagnetic wave attenuation, electron density

**PACS:** 52.40.Db, 52.35.Hr, 52.25.Os

**DOI:** [10.7498/aps.64.055201](https://doi.org/10.7498/aps.64.055201)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51276197).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lm\\_acad@sina.com](mailto:lm_acad@sina.com)