

低压氩气电感耦合等离子体特性分析及光谱诊断

宋志杰, 徐浩军, 魏小龙, 陈增辉, 宋飞龙, 张文远

空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

摘要 电感耦合等离子体具有电子密度高、放电面积大、工作气压宽、结构简单等特点, 在等离子体隐身领域具有突出的潜在优势。相对于开放式等离子体, 闭式等离子体更适应于飞行器表面空气流速高、气压变化大的特殊环境。研究着眼于飞行器关键部件的局部隐身应用, 设计了一种镶嵌于不锈钢壁中的圆柱形石英腔体结构, 利用电感耦合放电的方式在腔体中产生均匀的平板状等离子体。由于增加了接地金属, 降低了腔体内的钳制电位, 同之前的纯石英腔体相比, 该结构显著改善了等离子体的均匀性。研究了该闭式腔体内氩气电感耦合等离子体(ICP)的放电特性和发射光谱, 实验中放电功率达到 150 W 时, 可以明显观察到 ICP 的 E-H 模式转换, 此时发射光谱和电子密度都呈现阶跃式增长。氩气发射光谱强度随放电功率升高显著增加, 但是不同谱线强度增加幅度并不一致, 分析认为是受不同的跃迁概率和激发能的影响。根据等离子体的发射光谱, 利用玻尔兹曼斜率法对电子激发温度进行诊断, 得到电子激发温度在 2 000 K 以上, 并且随功率升高而降低, 因为功率增大使电子热运动增强, 粒子间的碰撞加剧, 碰撞导致的能量消耗也更大。电子激发温度沿腔体径向呈近似均匀分布, 分布趋势受功率影响不大。针对利用发射光谱诊断电子密度误差较大、计算繁琐的问题, 引入 Voigt 卷积函数, 经过拟合滤除多余展宽项的影响, 得到准确的 Stark 展宽半高宽。最终利用发射光谱 Stark 展宽法计算了电子密度, 腔体中心处的峰值密度可以达到 $7.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。随着放电功率增大, 线圈中容性分量降低, 耦合效率增大, 电子密度随之增大, 但空间分布趋势基本不受功率影响。

关键词 等离子体隐身; 电感耦合等离子体; 发射光谱; 电子激发温度; 电子密度

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1242-05

引言

等离子体隐身的基本原理是利用等离子体发生器在飞行器表面形成等离子层, 通过设计等离子体的特征参数, 使照射到等离子体上的雷达波被吸收或改变传播方向。针对飞行器表面空气流速高、气压变化大的特殊环境, 利用电感耦合放电在闭式腔体内产生的等离子体(inductively coupled plasma, ICP)具有放电状态稳定、电子密度高等优点, 在飞行器机翼前缘、进气道、雷达舱等关键部位的局部隐身上有广阔的应用前景^[1]。

国内外学者在 ICP 的放电形态和参数诊断方面开展了一定的数值模拟和实验研究。程嘉等研究了 CFD-ACE+软件中 ICP 的建模方法^[2]。狄小莲等开展了平板型线圈大面积金属腔放电实验, 结果表明天线的电感量是 ICP 放电的关键, 而功率耦合效率与线圈的 Q 值、放电参量等密切相关^[3]。高鹏等研究了一种圆柱形夹层 ICP 的光谱强度变化,

并采用朗缪尔探针对电子密度和电子温度的变化进行了研究^[4]。

受限于其应用方向, 大部分是针对刻蚀气体 ICP 方向的研究。针对飞行器局部隐身应用, 本课题组前期设计了低压闭式石英腔体 ICP 发生器, 但由于受到环形电磁场的影响, 腔体内等离子体分布呈现极不均匀的圆环状, 这对于降低电磁反射特性是不利的^[5-7]。为了提高 ICP 的均匀性, 本文对纯石英腔体结构进行了改进, 设计了石英-不锈钢镶嵌一体式腔体结构, 并进行了氩气电感耦合放电实验, 显著提高了 ICP 的均匀性。利用发射光谱法对电子激发温度和电子密度的分布特性进行了分析研究。

1 实验部分

实验系统安装如图 1 所示, 主要组成部分有电源及匹配系统、氩气低压系统、天线及放电腔体和光谱诊断测试系统。放电腔体为扁圆柱形, 直径 22 cm, 厚 8 cm, 侧壁使用不

收稿日期: 2018-04-15, 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776222)资助

作者简介: 宋志杰, 1989 年生, 空军工程大学等离子体动力学重点实验室研究生 e-mail: szjlyj@163.com

锈钢,上下表面镶嵌透波石英窗。这样的结构相对于纯石英腔体更易于与飞行器表面的金属结构进行衔接,并且可以确保较高的强度并提供良好的接地,上下表面的石英窗便于射频天线的功率耦合以及光谱诊断系统的信号采集。腔体通过密封管连接装有高纯氩气(纯度 99.999%)的钢瓶,另一侧连

接油旋片真空泵(GLD-N051)和电阻式真空计(ZDZ-52M)。实验前用真空泵将腔内压强抽至 1 Pa 以下,打开氩气钢瓶气阀,使腔体内充满氩气,然后再抽至 1 Pa 以下,再充入氩气。循环多次以确保腔体内无杂质气体。最后调节气阀使腔体内气压维持在 10 Pa。

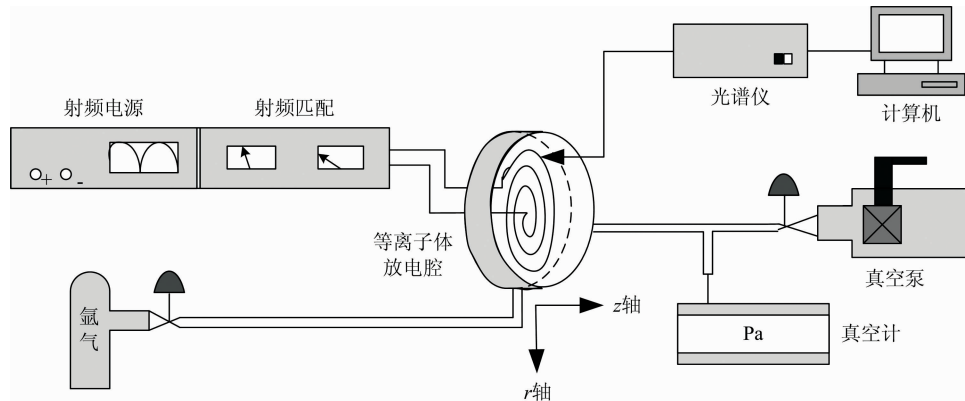


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

实验时将圆柱形腔体侧向放置,在两个圆形石英窗的其中一个上固定盘香形螺旋线圈天线,天线由直径 8 mm 的空心黄铜管绕制而成,共 3 匝,线圈通过绝缘橡胶管连接水冷循环系统。天线由 13.56 MHz 射频功率源(MSY-1)驱动,最大功率 1 000 W。天线与功率源之间连接电容匹配器(SP-1),可以实现自动调节匹配,确保反射功率小于 10 W。

光谱诊断测试系统采用四通道光谱仪(Avaspec-2048-M),可以同步测量波长范围 200~1 100 nm 的发射光谱谱线强度,测量精度 10^{-3} nm。将光纤探头置于腔体石英窗外,探头与石英窗距离 2 mm,测量腔体不同半径处的发射光谱数据,由计算机采集并储存数据。光谱仪积分时间设定为 10 ms。

2 结果与讨论

2.1 ICP 放电特性

按第一节所述方法完成洗气后,维持腔体内气压在 10 Pa 以下,不同功率下的氩气电感耦合放电图像如图 2 所示。放电功率为 50 W 时,等离子体开始起辉,腔体内近似充满不均匀的稀薄等离子体。此时等离子体处于 E 模式,主要由线圈间的容性高压驱动。继续增大功率,等离子体的亮度随功率缓慢增加。如图 2(b)所示,当功率达到 150 W 时,亮度突然增加,此时等离子体转换为 H 模式,ICP 主要由线圈感应产生的电场驱动。在射频电场的影响下,ICP 中出现一个中心高亮区和边缘暗区。与前期研究相比,由于增加了接地金属,有效降低了等离子体的钳制电位,ICP 均匀性得到显著提高。如图 2(c)和(d)所示,随着放电功率逐渐增大,ICP 亮度也随之增加,并且亮区逐渐增大,暗区逐渐缩小。这是因为随着功率升高,腔体内的物理化学反应更加剧烈,气体电离度增加,电子数量随之增加。另外功率增加也导致电子

能量增加,电子的随机热运动更加剧烈,粒子的扩散效应增强。电子数量和能量的增加导致粒子间的碰撞反应频率和强度增加,发射光谱因此得到增强;而扩散效应的加强导致亮区增大。

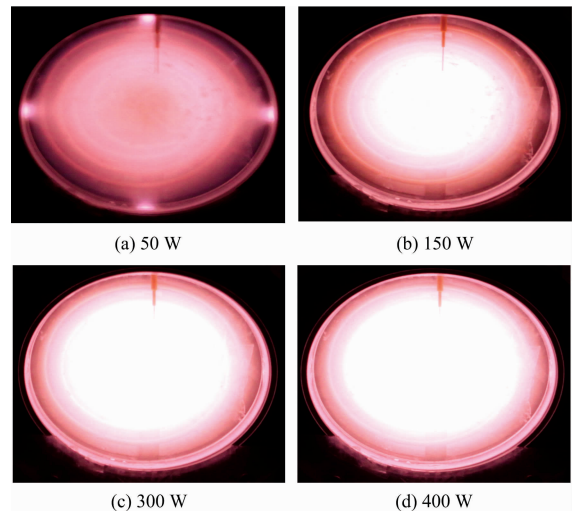


图 2 不同功率下的 ICP 放电图像

Fig. 2 Images of ICP discharging at different power

2.2 氩气发射光谱

光谱诊断是一种非介入式的诊断技术,对等离子体没有干扰,并且操作简便,对不同类型的等离子体都可以进行诊断。本文主要选取 $4p-4s$ 能级跃迁产生的氩原子发射光谱,波长集中在 690~930 nm。图 3 为放电功率 200 W,腔体内气压为 10 Pa,光纤探头在腔体圆心处测得的 ICP 发射光谱强度图。

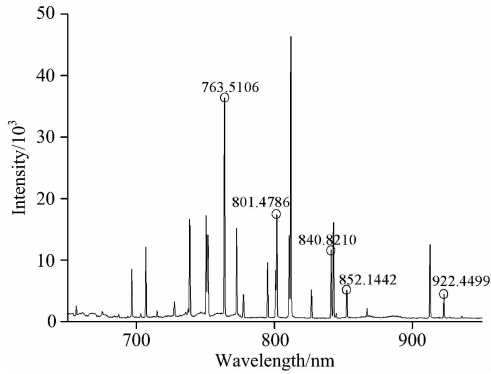


图 3 氩气 ICP 发射光谱

Fig. 3 Emission spectrum of argon ICP

在下一节的电子温度计算中, 两谱线上能级激发能之差越大, 计算结果越精确。综合考虑上能级激发能和谱线强度区分度, 本文选取波长分别为 763.510 6, 801.478 6, 840.821 0, 852.144 2 和 922.449 9 nm 的五条谱线进行分析。五条谱线在腔体圆心处的发射光谱强度随功率变化关系如图 4 所示。每条谱线强度都随功率增加而增加, 且二者近似呈正相关的线性关系。但是可以看出在功率为 150 W 时, 各条谱线强度有明显的陡升现象, 这与 2.1 中描述的 E-H 模式转换时的放电特性相一致。

谱线强度表现出气体内部粒子碰撞激发的程度, 碰撞激发越剧烈, 谱线强度越强。碰撞激发受到谱线的跃迁概率和上能级激发能双重影响, 不同谱线的跃迁概率和上能级激发能不同, 因此不同谱线的强度随放电功率的升高增加的幅度并不相同。例如, 763.510 6 nm 谱线与 922.449 9 nm 谱线上能级激发能相同, 但跃迁概率是其四倍多, 因此其谱线强度随功率升高增加的幅度也近似为 922.449 9 nm 谱线的四倍多。而 801.478 6 nm 谱线虽然跃迁概率比 840.821 0 nm 谱线小一倍多, 但是其上能级激发能比 840.821 0 nm 谱线低 0.207 4 eV, 即所需电子激发能量更小。因此, 随功率升高, 吸收相同能量时碰撞激发到较低激发电位的氩原子数量增加的更多, 对应的光谱强度就更高。

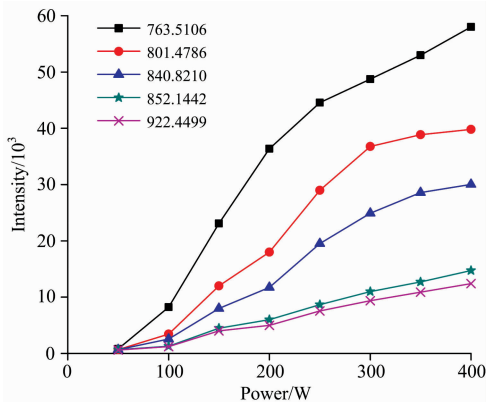


图 4 谱线强度随功率变化曲线

Fig. 4 Spectrum intensity vs discharging power

2.3 等离子体参数的光谱诊断

电子激发温度 T_e 和电子密度 n_e 是放电等离子体最重要的基本参数, 对理解放电物理起到非常重要的作用, 有助于针对其吸波特性实现等离子体优化。

2.3.1 电子激发温度

ICP 中的电子密度一般低于 10^{21} m^{-3} , 此时等离子体不满足热力学平衡条件, 其内部的各种粒子碰撞的活跃程度不足以使各类温度达到平衡, 只能通过发射光谱测得电子激发温度。可以认为 ICP 在光学上是稀薄的, 原子能级不存在阶梯激发, 串级跃迁、第二类非弹性碰撞等次级过程, 此时其内部电子能级分布是遵循 Boltzmann 规律的, 根据原子线的绝对强度可以计算出电子激发温度。

光谱线强度可表示为^[8-9]

$$I_i = n_0 \frac{g_i}{g_0} \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{kT_e}\right) A_i h / \lambda_i \quad (1)$$

式中, n_0 为基态的原子数密度; g_i 和 g_0 分别为激发态和基态的统计权重; ϵ_i 为激发态 i 的能级; k 为 Boltzmann 常数; T_e 为电子激发温度; A_i 为跃迁概率; h 为普朗克常数; λ_i 为发射谱线波长。因此, 同一原子的两条发射谱线的强度比为

$$\frac{I_i}{I_j} = \frac{A_i g_i \lambda_j}{A_j g_j \lambda_i} \exp\left(-\frac{\epsilon_i - \epsilon_j}{kT_e}\right) \quad (2)$$

由此, 代入两条谱线的相应参数, 可计算求得电子激发温度 T_e , 但误差较大。式(2)两端取对数, 可得

$$\ln\left(\frac{I_i \lambda_i A_j g_j}{I_j \lambda_j A_i g_i}\right) = -\frac{\epsilon_i - \epsilon_j}{kT_e} \quad (3)$$

记做

$$\ln\left(\frac{I \lambda}{A g}\right) = -\frac{\epsilon}{kT_e} + C \quad (4)$$

C 为任意常数。选取放电腔体圆心处的光谱强度数据, 以 $\ln\left(\frac{I \lambda}{A g}\right)$ 为纵坐标, ϵ 为横坐标绘制散点图, 对离散点进行最小二乘法线性拟合, 结果如图 5 所示。得到拟合曲线的斜率为 $-\frac{1}{kT_e}$, 即可求得电子激发温度 T_e 。计算中所需光谱数据引自美国国家标准技术学会网站, 如表 1 所示。

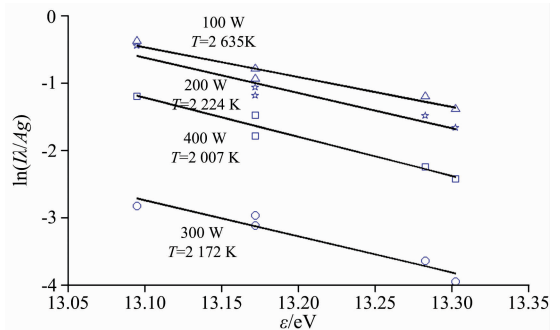


图 5 Boltzmann 斜率曲线

Fig. 5 The Boltzmann slope curve

沿 ICP 放电腔体的径向 (r 方向) 从圆心位置每隔 2 cm 进行一次光谱数据测量, 经计算得到的电子激发温度沿径向的分布如图 6 所示。可以看出 T_e 随功率升高逐渐降低, 这是因为尽管功率升高电子获得的能量增大, 但是更高的功率

同时使电子热运动增强, 粒子间的碰撞加剧, 因此碰撞导致的能量消耗也更大。由于 E 模式时存在明显的电容分量, 100 W 时的 T_e 明显高于 ICP 进入 H 模式后 ($P > 150$ W) 的 T_e 。除了靠近金属腔壁处的鞘层中温度略高外, T_e 沿径向呈近似均匀分布, 并且功率对 T_e 分布的影响很小。

表 1 氩原子光谱数据

Table 1 The spectral constant of Ar atom

λ/nm	ϵ/eV	A/s^{-1}	g
763.510 6	13.172	2.45×10^7	5
801.478 6	13.095	9.28×10^6	5
840.821 0	13.302	2.23×10^7	5
852.144 2	13.283	1.39×10^7	3
922.449 9	13.172	5.03×10^6	5

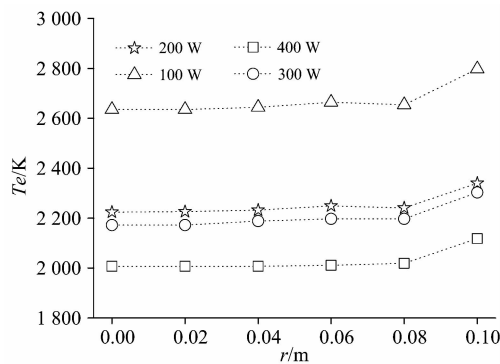


图 6 不同功率下的电子激发温度分布

Fig. 6 The distribution of T_e at different power

2.3.2 电子密度

利用光谱谱线的展宽机制可以有效地测量等离子体的电子密度。对于 ICP 等低温等离子体, Stark 展宽是主要的展宽机制, 其谱线半高宽与电子密度直接相关, 其关系为^[10-11]

$$\Delta\lambda_{i/2} = 2\omega\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) + 3.5\omega\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) \times \alpha\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right)^{1/4} \times \left(1 - 0.068\sqrt{\frac{T_e}{n_e}}\right)^{-1/3} \quad (5)$$

式(5)中: $\Delta\lambda_{i/2}$ 为 Stark 展宽的半高宽, ω 为电子碰撞展宽系数; α 为粒子碰撞展宽系数; n_e 为电子密度; T_e 在式中的单位换算为 eV。其中, ω 和 α 与电子温度有关, 但其变化非常缓慢, 可近似为常数, 其值可从 Griem 的计算中获取^[12-13]。

根据式(5), 只要得到 Stark 展宽的半高宽 $\Delta\lambda_{i/2}$, 就可以计算出 n_e 。但是从实验中测得的 Ar 发射光谱谱线展宽包括 Stark 展宽、自然展宽、多普勒展宽和仪器展宽等多种成分, 需要经过一定的计算和近似才能得到 $\Delta\lambda_{i/2}$ 。自然展宽为常量, 一般为 10^{-5} nm ^[14], 多普勒展宽和仪器展宽的谱线轮廓为 Gaussian 函数, Stark 展宽的分布为 Lorentzian 函数, 因此实测谱线展宽轮廓函数为 Gaussian 函数与 Lorentzian 函数的卷积——Voigt 函数。忽略其他展宽机制, 卷积后得

到三种函数半高宽的关系为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{i/2}^V \approx \left[(\Delta\lambda_{i/2}^G)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_{i/2}^D}{2}\right)^2 \right]^{1/2} + \frac{\Delta\lambda_{i/2}^S}{2} \\ \Delta\lambda_{i/2}^S = \gamma(\Delta\lambda_{i/2}^G) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\Delta\lambda_{i/2}^V$ 为实验中实测的谱线半高宽, $\Delta\lambda_{i/2}^G$ 是包含多普勒展宽和仪器展宽的 Gaussian 函数分量。用测得的谱线轮廓与 Voigt 函数的参数表^[15]进行拟合, 可以得到参数 γ , 于是根据式(6)就可以得到 Stark 展宽半高宽 $\Delta\lambda_{i/2}^S$, 将 $\Delta\lambda_{i/2}^S$ 代入式(5)就可以计算出电子密度。

沿腔体径向不同测量点处的电子密度分布如图 7 所示。可以看到 400 W 时的电子密度峰值可以达到 $7.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 虽然天线的加热电场呈环状, 其强度峰值区位于 $r = 0.05 \text{ m}$ 处, 但是 n_e 峰值出现在腔体中心处, 与加热电场的峰值区并不一致, 并且距离腔体中心越远, n_e 越小。这是因为在 ICP 中存在着直流双极电势, 电势的分布与电场不同, 受电场影响, 电势形成一个势阱, 势阱的势能在腔体中心达到最大, 因此势阱将大量的低能电子束缚在腔体中心附近。

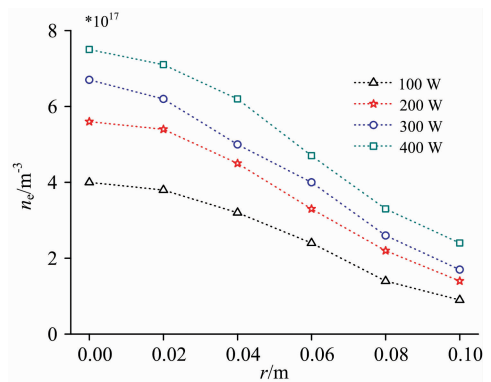


图 7 不同功率下的电子密度分布

Fig. 7 The distribution of n_e at different power

当功率升高时, 电子密度也随之增大, 分析原因如下: 首先, 功率的升高直接增强了电子从趋肤层中获得能量的效率。其次, 功率升高, 欧姆加热增强, 电离度增大。当功率从 100 W 升高到 200 W 时, n_e 增大幅度最大。同电子激发温度一样, 这也是由于 ICP 从 E 模到 H 模的转换中, 容性分量降低, 总的功率耦合效率增大导致的。

虽然功率对 n_e 值影响较大, 但是对 n_e 的分布影响不大, 因为在冷等离子体中电子密度的分布主要受扩散和传输效应的影响, 而功率对扩散和运输没有影响。

3 结论

在带有接地装置的闭式石英腔体中可以产生更加均匀的电感耦合等离子体。ICP 放电过程中具有明显的 E-H 模式转换, 进入 H 模式的 ICP 发射光谱明显增强, 电子密度也明显增加。电子激发温度随功率升高而降低, 电子密度随功率升高而增大, 放电功率 400 W 时腔体圆心处的峰值密度可以达到 $7.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。

References

- [1] Wei Xiaolong, Xu Haojun, Li Jianhai, et al. Journal of Applied Physics, 2015, 117(20): 203301.
- [2] CHENG Jia, JI Lin-hong, ZHU Yu(程 嘉, 季林红, 朱 煜). Journal of Tsinghua University(清华大学学报), 2010, 50(2): 250.
- [3] DI Xiao-lian, XIN Yu, NING Zhao-yuan(狄小莲, 辛 煜, 宁兆元). Acta Physica Sinica(物理学报), 2006, 55(10): 5311.
- [4] GAO Peng, CHEN Jun-fang, FENG Jun-qin(高 鹏, 陈俊芳, 冯军勤). The Journal of Light Scattering(光散射学报), 2013, 25(3): 297.
- [5] WEI Xiao-long, XU Hao-jun, LIN Min, et al(魏小龙, 徐浩军, 林 敏, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(4): 1170.
- [6] WEI Xiao-long, XU Hao-jun, LI Jian-hai, et al(魏小龙, 徐浩军, 李建海, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2015, 64(17): 175201.
- [7] Lin Min, Xu Haojun, Wei Xiaolong, et al. Plasma Science and Technology, 2015, 17(10): 847.
- [8] Liu Qiuyan, Li Hong, Chen Zhipeng, et al. Plasma Science and Technology, 2011, 13(4): 451.
- [9] Jamroz P, Zyrnicki W. Vacuum, 2008, 82(6): 651.
- [10] Vladimir N. Ochkin Spectroscopy of Low Temperature Plasma. Russia: Wiley-VCH, 2009, 03.
- [11] Joshi N K, Sahasrabudhe S N, Sreekumar K P, et al. The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, 2003, 26(2): 215.
- [12] Griem H R. Plasma Spectroscopy. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [13] Griem H R. Physical Review, 1962, 128(2): 515.
- [14] Finn G D, Mugglestone D. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1965, 129(2): 221.
- [15] Ganapathy S, Parthasarathi V. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 1977, 15(2): 63.

Characteristics Study and Parameters Diagnosis by Spectral Analysis of Low Pressure Argon Inductively Coupled Plasma

SONG Zhi-jie, XU Hao-jun, WEI Xiao-long, CHEN Zeng-hui, SONG Fei-long, ZHANG Wen-yuan
Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

Abstract The inductively coupled plasma (ICP) has more advantages over other plasma sources in radar stealth, including simple antenna structure, a wide pressure range, large area and high electron density. Compared with the open-type plasma, closed-type plasma is more compatible with the flying environment of aircraft, where the air flows fast and pressure changes fiercely. A newly designed cylindrical closed chamber made of quartz windows inlaid in stainless steel was used to generate planar ICP for the potential application in stealth design of aircraft local. Compared with previous all-quartz chamber, the new structure effectively improved the homogeneity of ICP because of the ground connection. The discharging characteristics and emission spectrum of ICP in the closed chamber was studied. Obvious E-H mode transition was observed when the power came to 150 W in experiment. The spectrum intensity and electron density increased in a huge step at the transition point. Over the whole discharging progress, the spectrum intensity increased with power, but because of the diversity in transition probability and excitation energy of spectral lines, the increasing amplitude was also different. Based on the emission spectrum of ICP, the electron excitation temperature was diagnosed by the Boltzmann slope method. The electron excitation temperature was above 2 000 K and the higher of the power, the lower of the temperature. Because higher power enhanced the thermal motion of electrons and then the collision between particles became fiercer. This kind of collision consumed more energy so the temperature came down. The distribution of electron excitation temperature along the radial direction was approximately homogeneous. And the power had little influence on the distribution. A Voigt convolution function was introduced to solve the problem of big error and cockamamie calculation about spectrum diagnosis of electron density. The interferential broadenings of argon emission spectrum were eliminated by fitting calculation. So the accurate full width at half maximum of Stark broadening was obtained. Then the electron density was calculated by Stark broadening method. The peak electron density came to $7.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ at the center of chamber. The electron density increased with power because the coupling efficient was enhanced. Power had little influence on the spatial distribution of electron density.

Keywords Plasma stealth; Inductively coupled plasma; Emission spectra; Electron excitation temperature; Electron density

(Received Apr. 15, 2018; accepted Aug. 28, 2018)