

# 射频电感耦合闭式等离子体产生与光谱诊断的实验

林敏, 徐浩军, 魏小龙, 梁华, 苏晨

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 设计了一种闭式等离子体发生装置,采用射频电感耦合方式,以氩气为工作气体,在封闭式腔体低气压环境下进行放电实验。利用发射光谱法,测量了密闭腔体侧面方向的 Ar 谱线数据,研究了等离子体电子激发温度和电子密度随空间位置的分布规律以及不同射频功率对电子激发温度和电子密度的影响。等离子体中电子激发温度的变化通过玻尔兹曼斜率法进行分析,电子密度的变化则通过分析 Ar 原子 750.4 nm 谱线强度变化获得。实验结果表明,该发生装置能够产生均匀持续的等离子体层,等离子体中电子激发温度约为 9 500 K。等离子体电子密度和电子激发温度随着输入射频功率的增加而增大,但变化幅度在减弱;当足够的输入功率时,等离子体层参数随位置的变化幅度较小。

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

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.003

**中图分类号** V218;O657.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0010-05

## Experimental Study of Generation and Spectroscopic Diagnosis of Inductively Coupled Plasma in Closed Cavity

LIN Min ,XU Hao-jun ,WEI Xiao-long ,LIANG Hua ,SU Chen

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

**Abstract:** In this paper, a closed plasma generator is designed. The discharge experiments are carried out in the closed cavity under low pressure environment by adopting the method of inductively coupled plasma (ICP) and taking argon as a working gas. The distribution rules of the electron excitation temperature, electron density, and the effect of RF power on the electron excitation temperature and electron density are investigated by means of emission spectrum. The changes in the electron excitation temperature are analyzed by using the method of the Boltzmann plot, and the variations in the electron density are derived from the analysis of Ar 750.38 nm line intensity. A uniform plasma sheet is produced stably by the closed plasma generator, in which the electron excitation temperature is about 9 500 K. The electron density and electro excitation temperature can be enhanced by improving RF power. With adequate input power, the variations of parameters of the closed plasma at different positions change little.

**Key words:** inductively coupled plasma; plasma stealth; emission spectrum; electron excitation temperature; electron density

**收稿日期:** 2014-06-03

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51276197)

**作者简介:** 林敏(1988—),男,浙江苍南人,博士生,主要从事等离子体隐身研究.E-mail: lm\_acad@sina.com

**引用格式:** 林敏,徐浩军,魏小龙,等. 射频电感耦合闭式等离子体产生与光谱诊断的实验研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):10-14. LIN Min ,XU Haojun ,WEI Xiaolong ,et al.Experimental Study of Generation and Spectroscopic Diagnosis of Inductively Coupled Plasma in Closed Cavity[J]. Journal of Air Force Engineering University:Natural Science Edition,2015,16(2):10-14.

等离子体对电磁波具有可控的吸收、散射及反射特性,受到了许多国家的广泛关注,在目标隐身和雷达通讯的应用上进行了大量的研究,等离子体隐身是其中的一个重要方向<sup>[1-4]</sup>。针对等离子体隐身在飞行器上的应用特点,需要解决低空开放环境下在目标表面形成并维持稳定的、满足状态要求的等离子体层等问题。文献[5]提出的闭式等离子体隐身技术,该方法将目标的重点部位的单层蒙皮改作双层结构,并在双层蒙皮间产生等离子体,对重点部位进行屏蔽,从而减小目标的雷达散射截面。飞行器目标的强散射源采用闭式等离子体隐身技术后,实现目标强散射源的局部隐身具有较好的可行性<sup>[5-6]</sup>。文献[7]针对实现天线罩等离子体隐身,采用低气压电容耦合放电方式,研究了天线罩薄层等离子体对微波反射的影响。文献[8]考虑在进气道等腔体结构的隐身,利用荧光灯等离子体管覆盖金属腔体内壁,测量了等离子体对电磁波的回波衰减。文献[9]结合雷达舱的等离子体隐身技术,设计了以氩气为工质的微波等离子体发生器,对等离子体与电磁波相互作用进行研究。

等离子体发射光谱携带了丰富的等离子体参数信息,可以通过谱线的波长和频率诊断等离子体参数。相对于其他的等离子体诊断技术,发射光谱法具有无干扰、操作简单、非介入等优点,并在等离子体参数诊断方面得到了广泛的应用<sup>[10-12]</sup>。

本文设计了一种低气压闭式等离子体的发生装置,以氩气为工作气体,利用射频电感耦合放电方式在封闭式腔体中产生等离子体,采用发射光谱法对腔体内等离子体的电子激发温度和电子密度分布特性进行研究。

## 1 实验装置与计算方法

### 1.1 实验装置

实验装置见图 1,主要包括射频功率源与射频天线、放电腔体、光谱诊断系统以及气路部件。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。采用 SP-I 型射频匹配器保证有足够的功率注入等离子体中,并避免过大的功率返回功率源。射频天线是平面盘香型线圈,采用直径为 1 mm 铜线绕制而成,共绕 4 圈,每圈间距 9 mm。放电腔体采用厚度为 1 cm 的平板玻璃胶合压制而成,其空腔结构尺寸为 10 cm×10 cm×2 cm。利用安装在腔室两侧的玻璃管,一端连接气瓶以通入高纯氩气,另一端连接真空机械泵以持续抽气,保证腔

内气压均衡稳定。发射光谱诊断系统由光纤、Avaspec-2048-M 型四通道光谱仪和计算机组成,实验过程中将光纤探头垂直固定于光信号接收部位,同步测量波长范围 200~1100 nm 内发射光谱的谱线强度,并由与其连接的计算机控制采集并存储数据。

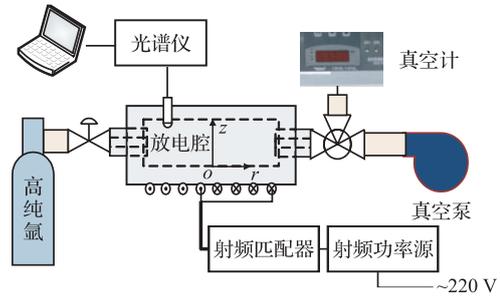


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

### 1.2 计算方法

等离子体参数分布对等离子体隐身效果有着重要的影响,利用实验测得的 Ar 发射谱线对空腔内等离子体分布情况进行分析。假定在局域热力学平衡的条件下,电子激发温度可以认为与电子温度具有相同的变化趋势,可近似表示电子温度,处于各种能级的原子数目是遵循玻尔兹曼分布规律的,可由玻尔兹曼斜率法对电子激发温度进行计算<sup>[13-14]</sup>。此时,光谱线强度可表示为:

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

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;  $E_i$  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;  $\lambda_i$  为发射谱线波长。同一原子的 2 条发射谱线的强度比为:

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

对式(2)两端取对数,代入谱线的相应参数,可计算求得电子激发温度  $T_e$ , 得:

$$\ln\left(\frac{I_i \lambda_i A_j g_j}{I_j \lambda_j A_i g_i}\right) = -\frac{E_i - E_j}{kT_e} + C \quad (3)$$

以  $\ln\left(\frac{I\lambda}{Ag}\right)$  为纵坐标,  $E$  为横坐标作玻尔兹曼曲线,对曲线作线性拟合,则拟合曲线的斜率为  $-\frac{1}{kT_e}$ , 即可求得电子激发温度  $T_e$ 。

在有效电子温度变化不大时,750.4 nm 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,因而可以采用 750.4 nm 谱线强度来分析电子密度的变化<sup>[15-16]</sup>。

### 2 结果与分析

由气源气瓶将氩气通入空腔,并控制腔内压力稳定在 133.33 Pa 左右。调节匹配器电容,分别设定射频电源功率为 40 W、50 W、65 W,直至腔体内出现气体电离发光。由于实验条件以及加工限制,本实验系统并非完全轴向对称的,但是根据文献[17]中射频电感耦合放电实验的结论,电磁场大致结构以及吸收功率的空间分布与轴对称系统类似,并考虑到等离子体厚度影响着入射电磁波的作用行程,光谱数据采集分别在轴向方向上取  $z=0.5\text{ cm}$ ,  $1\text{ cm}$ ,  $1.5\text{ cm}$ , 径向方向上取  $r=0\text{ cm}$ ,  $1\text{ cm}$ ,  $2\text{ cm}$ ,  $3\text{ cm}$ , 采集过程均在腔体侧面进行。

选择波长 660~800 nm 范围内的光谱,分别得到上述不同空间位置的光谱图,典型的射频电感耦合氩气等离子体发射光谱图( $z=1\text{ cm}$ ,  $r=0\text{ cm}$  处)见图 2。

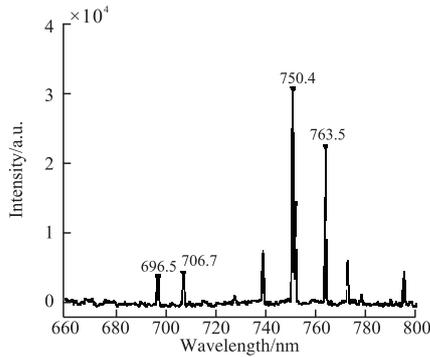


图 2 射频电感耦合氩气等离子体发射光谱图( $z=1\text{ cm}$ ,  $r=0\text{ cm}$ )

Fig.2 Emission spectrums of argon ICP plasma ( $z=1\text{ cm}$ ,  $r=0\text{ cm}$ )

为计算得到等离子体电子激发温度,选取 5 条发射光谱的相对强度较强谱线,波长分别为 696.5 nm,706.7 nm,750.4 nm, 751.4 nm,763.5 nm,计算中所需要的光谱学常数见表 1。

表 1 Ar I 光谱学常数

Tab.1 Spectrum constant of Ar I

$\lambda / \text{nm}$	$A / \text{s}^{-1}$	$E / \text{eV}$	$g$
696.5	$6.39 \times 10^6$	13.33	3
706.7	$3.80 \times 10^6$	13.30	5
750.4	$4.45 \times 10^7$	13.48	1
751.4	$4.02 \times 10^7$	13.27	1
763.5	$2.45 \times 10^7$	13.17	5

将光谱学常数以及实验测得的相对光强代入式(3)中,可以得到不同腔体位置与射频功率条件下的电子激发温度,计算结果见图 3。在本实验条件下,等离子体中电子激发温度在腔体侧面的空间分布较

为均匀,电子激发温度在 9 500 K 左右。随着射频功率的增大,射频电源提供的能量增大,自由电子能量增加,氩内部电子由碰撞获得能量增加,电子激发温度有所提高,但增加的幅度减弱,因为在一定的气压下,射频功率达到一定值后,对气体的电离作用相对不是很明显。除了在图 3(c)有明显的下降变化外,电子激发温度随不同位置呈较小的波动变化,这是由于腔体结构较小,且气体进出口布置不对称,造成腔体内部在轴向方向( $z$  轴)上气压分布不均匀,以及放电线圈在腔体一侧放置,导致氩内部电子由碰撞所获得的能量在该方向上有所差别,文献[18]利用流场仿真软件给出腔体内部的压力分布情况也说明了这一点。

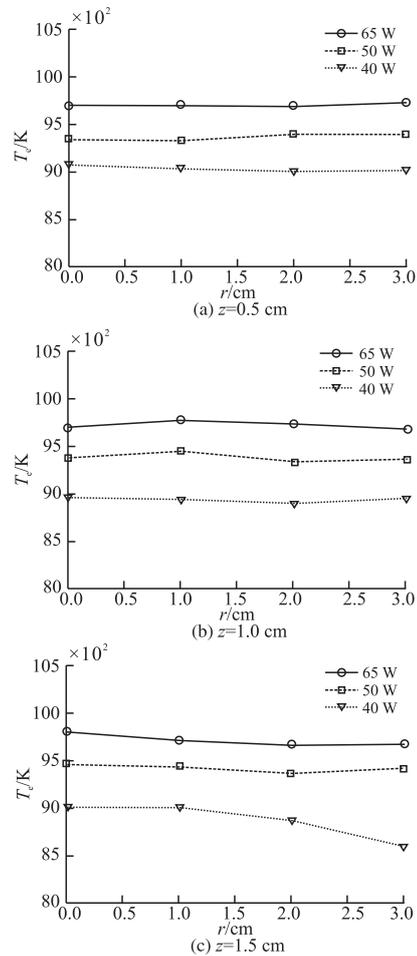


图 3 电子激发温度在不同空间位置上的分布

Fig.3 Distribution of electron excitation temperature at different positions

图 4 给出了采用 Ar 750.4 nm 的谱线相对强度来标示等离子体电子密度的分布情况。随着射频功率的增加,等离子体吸收的功率随之增加,电子与中性气体的碰撞更为频繁,电子密度也随之增大,但在一定的气压下,其增大的幅度在减弱。当射频功率为 50 W 和 65 W 时,电子密度在腔体的空间分布较为均匀,沿轴向方向的分布基本不发生变化,随径向

距离的增加逐渐减少且幅度很小。当射频功率为 40 W 时,随着轴向方向上距离的增大,电子密度略有降低,且在轴向最远处 ( $z = 1.5$  cm),随着径向距离的增加,激发温度和电子密度均有明显的降低变化。这是因为,当射频功率为 40 W,腔体反应室处于刚起辉状态,射频功率主要在线圈附近沉积到等离子体中,距线圈近的位置等离子体中电子获得能量高,气体电离度提高,电子密度随之增大。而距线圈远的等离子体所能吸收的功率较少,气体电离低,使得电子激发温度和电子密度较小,并且在腔体器壁附近由于扩散和复合作用,电子密度也有一定程度的减小,所以在边界处出现较大的降低变化。

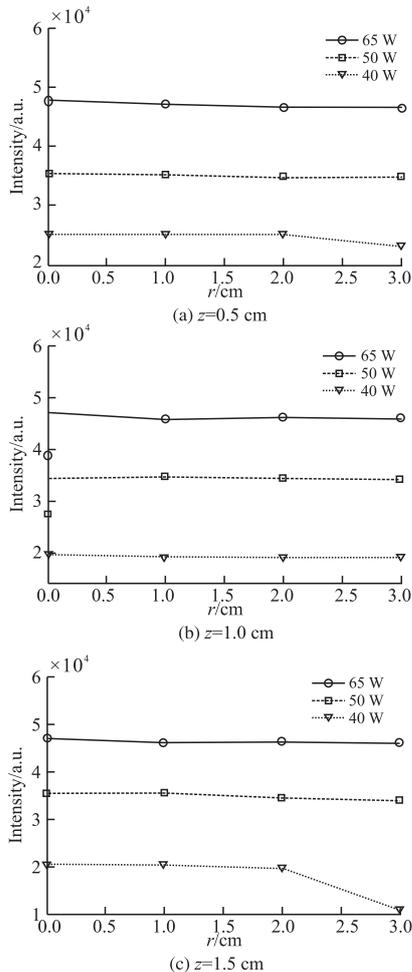


图4 Ar 750.4 nm 光谱强度在不同空间位置的变化  
Fig.4 Intensity of Ar 750.4 nm at different positions

### 3 结论

如何形成持续稳定的等离子体层并对目标强散射源进行遮蔽是实现闭式等离子体隐身技术的关键点。基于闭式等离子体隐身的理念,本文设计了一种封闭式的等离子体发生装置,开展了射频电感耦合放电等离子体实验,利用发射光谱法,分析了腔体

内等离子体电子激发温度和电子密度的分布规律。结果表明:该等离子体发生装置能够产生一定尺寸的均匀持续的等离子体层,并得以下结论:

1)随着射频功率的增加,等离子体中电子激发温度有所上升,但增加的幅度减弱,腔内等离子体电子激发温度在 9 500 K 左右;

2)等离子体电子密度随着射频功率的增加而增大,且变化幅度在减弱;随着与放电线圈距离的增大而减小;

3)当输入射频功率较低时,腔体内等离子体参数出现较为明显的变化。提高射频功率至一定值,可以使腔体内等离子体参数更为均匀并稳定;

由于实验条件限制,本文只是在小型封闭式腔体内产生等离子体层,可为闭式等离子体隐身提供一种思路。下一步将对稳定地产生更大尺寸的等离子体层及其对电磁波的相互作用进行深入研究。

### 参考文献(References):

- [1] Jenn D C. Plasma Antennas: Survey of Techniques and the Current state of the Art[R]. NPS-CRC-03-001, 2003.
- [2] Anderson T, Alexeff I, Parameswaran S, et al. Experimental and Theoretical Results with Plasma Antennas[J]. IEEE trans on Plasma Sci, 2006, 34:166-172.
- [3] 庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 等. 等离子体隐身技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZHUANG Zhaowen, YUAN Naichang, LIU Shaobin, et al. Plasma Stealthy Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [4] Destler W W, De Grange 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]. J Appl Phys, 1991, 69(9):6313-6318.
- [5] 李毅, 张伟军, 莫锦军, 等. 闭式等离子体隐身技术及等离子体参数的优化[J]. 微波学报, 2008, 20(1): 23-25.  
LI Yi, ZHANG Weijun, MO Jinjun, et al. Closed-Plasma Stealthy Technique and Optimization of the Plasma Parameters[J]. Journal of Microwaves, 2008, 20(1): 23-25. (in Chinese)
- [6] Beskar C R. Cold Plasma Cavity Active Stealth Technology[R]. AD-A432633, 2004.
- [7] 王亮. 薄层等离子体与表面等离子体激元的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.  
WANG Liang. Experimental Study of Thin-layer Plasma and Surface Plasmons[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chi-

- nese)
- [8] 何湘, 陈建平, 楚然, 等. 等离子体用于腔体的雷达散射截面减缩的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1295-1298.  
HE Xiang, CHEN Jianping, CHU Ran, et al. Experimental Investigation on Radar cross Section Reduction of Plasma Covered Cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1295-1298. (in Chinese)
- [9] 朱冰. 导弹雷达舱等离子体隐身原理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
ZHU Bing. Study on Stealth Theory of Plasma in Missile Radar-Dome[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [10] 林敏, 徐浩军, 苏晨, 等. 低气压闭式等离子体放电实验及光谱诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1594-1598.  
LIN Min, XU Haojun, SU Chen, et al. Experimental Study on Closed Plasma Discharging Under low Pressure and Spectroscopic Diagnosis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1594-1598. (in Chinese)
- [11] 翁国峰, 马志斌. 溴甲烷的等离子体发射光谱测量[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3391-3394.  
WENG Guofeng, MA Zhibin. Plasma Emission Spectroscopy of Methyl Bromide[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3391-3394. (in Chinese)
- [12] Donnelly V M. Plasma Electron Temperatures Electron Energy Distributions Measured by Trace Rare Gases optical Emission Spectroscopy[J]. J Phys D: Appl. Phys., 2004, 37(4): R217.
- [13] Griem H R. Plasma Spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [14] Dong Lifang, Ran Junxia, Mao Zhiguo. Direct Measurement of Electron Density in Micro-Discharge at Atmospheric Pressure by Stark Broadening[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 161501.
- [15] KiKitajima T, Nakano T, Makabe T. Increased O(1D) Metastable Density in Highly Ar-Diluted Oxygen Plasmas[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 091501.
- [16] Daltrini A M, Moshlakev S A, Monteiro M J R, et al. Mode Transitions and Hysteresis in Inductively Coupled Plasmas[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(7): 073309.
- [17] 迈克尔·A·力伯曼, 阿伦·J·里登伯格. 等离子体放电原理与材料处理[M]. 蒲以康, 译. 北京: 科学出版社, 2007.  
Michael A L, Allan J L. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing [M]. PU Yikang, trans. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [18] 苏晨, 徐浩军, 林敏. 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. Experimental Study on Closed Plasma Generator and Distribution of Plasma Parameters [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1668-1673. (in Chinese)

(编辑:徐敏)