

小功率平面螺旋电感耦合微波等离子体源的研究

廖 斌, 周 蓓, 曹焕丽, 朱守正
(华东师范大学信息学院电子系, 上海 200241)

摘 要: 本文提出一种基于平面螺旋微带的 2.45GHz 小功率电感耦合微波等离子体源, 根据等效变压器耦合模型分析等离子体源的谐振特性, 通过微波等离子体吸收功率与等离子体阻抗之间的关系, 研究不同气压条件下的放电规律. 研究表明, 在低气压条件下, 输入功率不超过 220mW 时, 空气开始放电; 而在常压条件下, 输入功率不超过 1.5W 时, 氩气开始放电, 随着微波等离子体的激励, 小功率微波等离子体源的谐振频率和 S 参数都发生变化. 这为电感耦合微波等离子体源的小型化研究提供了理论基础.

关键词: 平面螺旋微带; 小功率电感耦合微波等离子体源; 谐振特性; 气体放电; S 参数

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1860-05

Study on Low Power Inductively-Coupled Microwave Plasma Source Based on Planar Spiral Microstrip

LIAO Bin, ZHOU Bei, CAO Huan-li, ZHU Shou-zheng

(Department of Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: A low power inductively-coupled microwave plasma source based on planar spiral microstrip at 2.45GHz is presented in this paper. The resonant characteristics of the plasma source are analyzed with equivalent transformer coupled circuit model, and the discharges in various gas pressure based on the interrelation between absorbed power and plasma impedance are studied. The research shows that air plasma is ignited in low pressure as the input power is less than 220mW, and Ar plasma is ignited in atmospheric pressure as the input power is less 1.5W. The resonant frequency and S parameter of low power microwave plasma source change with excitation of microwave plasma. This may be a theoretical guidance for miniaturization of inductively-coupled microwave plasma source.

Key words: planar spiral microstrip; low power inductively-coupled microwave plasma source; resonance; gas discharge; S parameter

1 引言

基于微系统的小功率微波等离子体技术是一项近几年发展起来的集微电子技术、微波技术和等离子体技术于一体的高新技术. 其基本思想是采用微带电路和小功率微波激励形成小尺寸的等离子体, 例如用不超过 3~5 瓦的微波功率使气体电离, 产生 10mm 甚至 0.2mm 尺寸的等离子体. 这种基于微系统的小功率微波等离子体具有很多突出优点, 如结构简单、使用寿命长、状态稳定、无电极污染、易与其它 MEMS 器件集成等等. 由于此项技术在生物 MEMS 的杀菌消毒、小尺寸材料的处理以及微化学分析系统等领域具有良好的应用前景^[1,2], 因而受到越来越广泛的关注.

电感耦合等离子体 (Inductively-coupled plasma, 简称

ICP) 是一种使用电感线圈进行无电极放电产生等离子体的方式. 它具有结构简单、高效率、长寿命和低污染等优点, 因此得到广泛的应用^[2]. 但是频率较低时, ICP 源的尺寸大, 自身损耗也大, 使得等离子体激励的效率很低^[3,4]. 因此如何减小线圈的电阻, 使等离子体源的品质因数增大, 从而提高等离子体激励的效率, 就成为问题的关键. 目前国外这种等离子体源的最小尺寸为外径 5mm, 最高工作频率大约在 450MHz^[5]. 为了使等离子体源的尺寸和放电功率进一步减小, 本文提出了一种基于平面螺旋微带的 2.45GHz 小功率电感耦合微波等离子体源, 根据等效变压器耦合模型分析等离子体源的谐振特性, 通过微波等离子体吸收功率与等离子体阻抗之间的关系, 研究不同气压条件下的放电规律. 此项研究在国内还未见报道.

收稿日期: 2007-11-15; 修回日期: 2009-03-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60471015)

2 理论基础

为了分析小功率平面螺旋电感耦合微波等离子体源的工作原理,首先要建立一个等效电路模型.在这个等效电路中,等离子体电流效应等效为单圈的电感 L_p ,电子碰撞效应等效为电阻 R_p ,而平面螺旋线圈等效为串联的电感 L_c 和电阻 R_c [6].由于激励的等离子体靠近线圈表面,因此两者之间存在互感 M .这样就形成了一个等效变压器耦合模型,如图 1 所示.

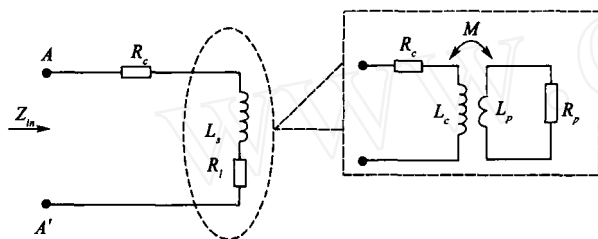


图1 等效变压器耦合模型

假定微波等离子体密度是均匀的.在图 1 中,从 A-A' 参考面看进去的输入阻抗 Z_{in} 为 [7]

$$Z_{in} = R_s + jX_s = R_c + R_l + j\omega L_s \quad (1)$$

式中: R_l 为平面螺旋线圈到等离子体的辐射损耗电阻

$$R_l = \left[\frac{(\omega M)}{Z_p^2} \right]^2 R_p \quad (2)$$

L_s 为平面螺旋线圈的电感

$$L_s = L_c - \left[\frac{(\omega M)}{Z_p^2} \right]^2 L_p \quad (3)$$

其中

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2} \quad (4)$$

因此 A-A' 参考面的反射系数 S_{11} 为:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (5)$$

式中 Z_0 为 50Ω 的特性阻抗.

根据下式

$$P_{吸收} = \frac{R_l}{R_l + R_c} (P_f - P_r) \quad (6)$$

式中 P_f 和 P_r 分别为入射功率和反射功率.为了使通过平面螺旋线圈输入到等离子体的功率最大,而从等离子体反射的功率最小,即等离子体的吸收功率最大,必须在微波源和平面螺旋线圈之间加一个容性匹配网络,如图 2 所示.其中 C_T 为调谐电容, C_L 为调配电容, Z_0 为 50Ω 的特性阻抗, C_T 和 C_L 组成匹配网络.

在图 2 中,从 B-B' 参考面看进去的输入导纳 Y_{in} 为

$$Y_{in} = G_{in} + jB_{in} = jX_L + \frac{1}{R_s + j(X_T + X_s)} \quad (7)$$

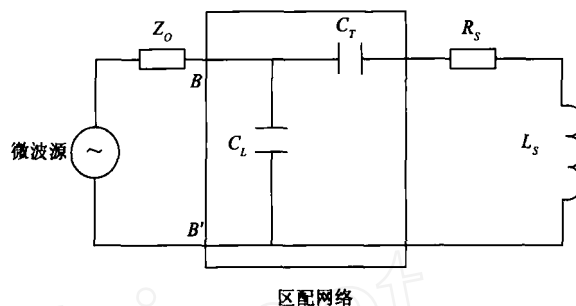


图2 平面螺旋电感耦合微波等离子体源的匹配等效电路

式中 $X_L = \omega C_L$, $X_T = -(\omega C_T)^{-1}$, $X_s = \omega L_s$.

整理式(7),得到

$$G_{in} = \frac{R_s}{R_s^2 + (X_T + X_s)^2} \quad (8)$$

和

$$B_{in} = X_L - \frac{X_T + X_s}{R_s^2 + (X_T + X_s)^2} \quad (9)$$

要达到匹配,必须使 $G_{in} = Z_0^{-1}$, $B_{in} = 0$,即

$$C_L = \frac{1}{2\omega R_s} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2R_s}{Z_0}\right)^2} \quad (10)$$

$$C_T = \left(\omega^2 L_s - \frac{Z_0 - R_s}{Z_0 C_L} \right)^{-1} \quad (11)$$

此时从 B-B' 参考面看进去的反射系数 $S_{11} = 0$.

3 数值计算

根据文献[8,9],取平面螺旋微带线圈匝数 $n = 3$,调谐电容 C_T 采用叉指电容,调配电容 C_L 采用微带突变结构,则小功率电感耦合微波等离子体源天线如图 3 所示,其中 AA' 面为螺旋线圈的轴向剖面, BB' 面为紧贴天线表面的水平剖面.金属导带选用铜,介质基片厚度为 0.6mm ,介电常数为 2.5,激励选择底馈方式.为了使小功率微波等离子体源谐振在 2.45GHz 左右,调节螺旋微带线宽度、线间距及电容 C_T 和 C_L 等参数,采用电磁仿真软件 HFSS 进行数值计算,得到仿真的 S_{11} ,如图 4 所示.从图 4 可以看到,谐振频率在 2.48GHz ,对应的反射损耗为 -27.38dB , Q 值为 820.图 5 是小功率电感耦

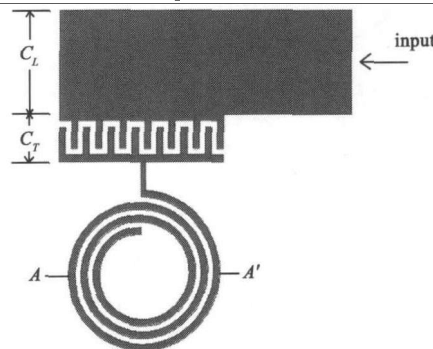


图3 电感耦合微波等离子体源示意图

合微波等离子体源天线的电磁场仿真结果.

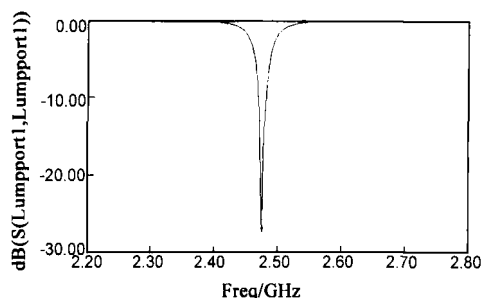


图4 S_{11} 仿真曲线

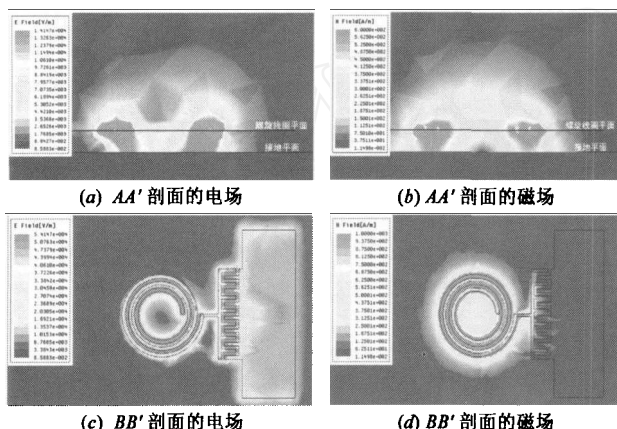


图5 平面微带螺旋天线的电磁场分布

从图5可以看到,在线圈半径大约2/3处电磁场最强,而在轴心和其他区域则较弱;从电感线圈表面开始,电磁场随着轴向距离的增大而减弱;电场、磁场沿螺旋电感线圈呈环状分布,且终端开路处电场最强、磁场最弱,而沿螺旋线圈电场逐渐减弱.由于螺旋线圈的聚焦作用,使感应辐射的能量相对集中,从而得到等离子体激发所需要吸收的能量.另外在叉指电容区域电场较强,致使损耗增大,因此本文还提出了一种螺旋线圈的自谐振结构,即不使用叉指电容耦合,如图6所示.此时微波等离子体源的谐振频率主要由螺旋线圈的自谐振频率决定,并联电容 C_L 进行调配.

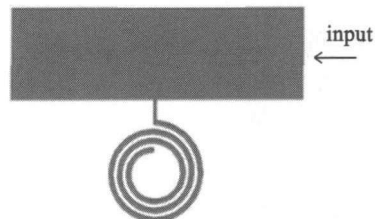
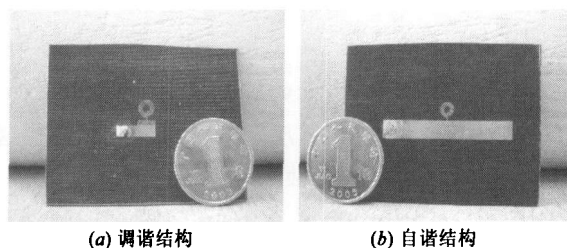


图6 自谐振结构的小功率电感耦合微波等离子体源

4 实验结果及分析

根据仿真结果,研制了基于平面螺旋微带的小功率电感耦合微波等离子体源,如图7所示(一枚 $\Phi = 19\text{mm}$ 的一角硬币作尺寸参考).使用矢量网络分析仪 Agilent N5230A 测量,得到 S_{11} , 结果如图8所示.



(a) 调谐结构 (b) 自谐振结构
图7 小功率电感耦合微波等离子体源

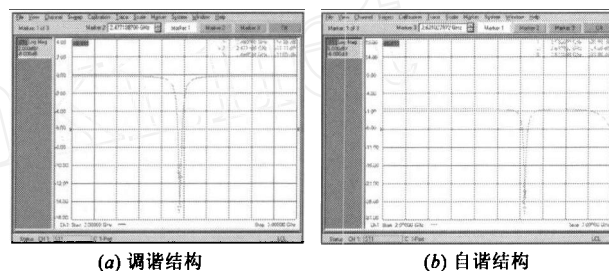


图8 实测 S_{11}

从图8(a)可以看到,谐振结构的小功率微波等离子体源天线,其谐振频率在2.48GHz,谐振点处的 S_{11} 为-14.26dB, Q 值为297.与仿真结果比较,发现谐振频率基本吻合,但 Q 值减小了.这可能是介质基片的非理想损耗所造成的.而从图8(b)可以看到,自谐振结构的小功率微波等离子体源天线,其谐振频率在2.62GHz,谐振点处的 S_{11} 为-26.99dB, Q 值为1200.

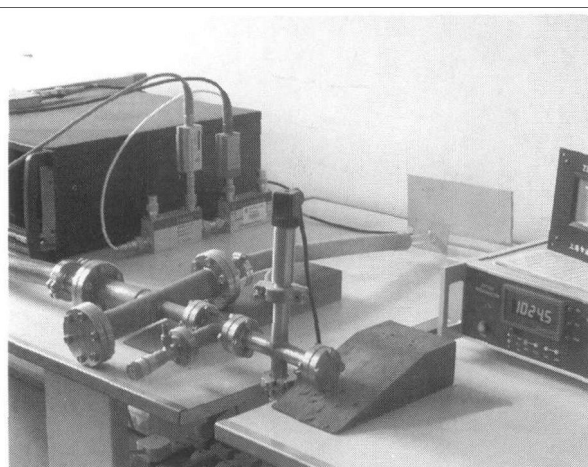
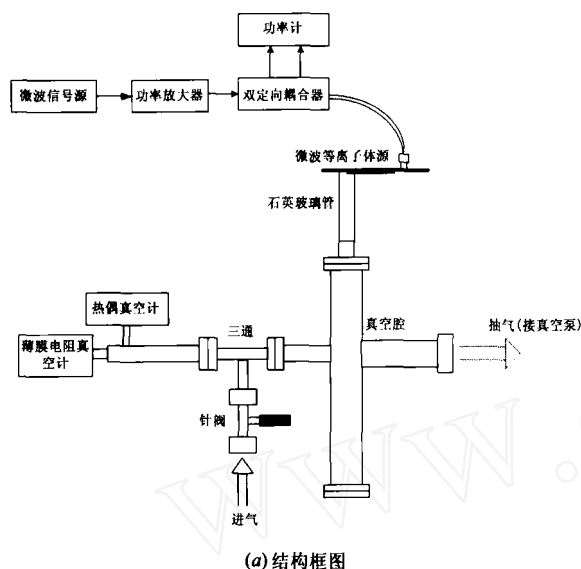
4.1 实验装置

本研究的实验装置如图9所示,主要设备包括微波信号源 AV3619 矢量网络分析仪(电子科技集团公司第41研究所)、功率计 Agilent E4418B(探头 E4412A)和 HP436A(探头 8481A)、数字型电阻薄膜真空计 ZDY-2A1 和热偶真空计 ZDO-1A(上海通用机械技术研究所)、机械真空泵 2XZ-4B(四川成都南光机器有限公司)、微波功率放大器、定向耦合器等.

4.2 实验结果及分析

对于调谐结构的小功率电感耦合微波等离子体源,当填充空气,气压为5Pa、输入功率为220mW时,空气开始放电,此时 $|S_{11}| = -9.2\text{dB}$;随着输入功率增大,放电效果明显增强,当气压为5Pa、输入功率为458mW时,激励起如图10(a)所示的空气等离子体,此时 $|S_{11}| = -13\text{dB}$.当填充氩气,气压为一个大气压(1029.6mbar)、输入功率为1.3W时,氩气开始放电,此时 $|S_{11}| = -6.33\text{dB}$;当输入功率为2.8W时,激励起如图10(b)所示的氩气等离子体,此时 $|S_{11}| = -10.2\text{dB}$.

对于自谐振结构的小功率电感耦合微波等离子体源,当填充空气,气压为5Pa、输入功率为125mW时,空气开始放电,此时 $|S_{11}| = -16.7\text{dB}$;当气压为5Pa、输入功率增大为362mW时激励起如图11(a)所示的空气等离子体,此时 $|S_{11}| = -14.7\text{dB}$.当填充氩气,气压为一



(b) 实验装置图

图9 小功率微波等离子体源实验系统

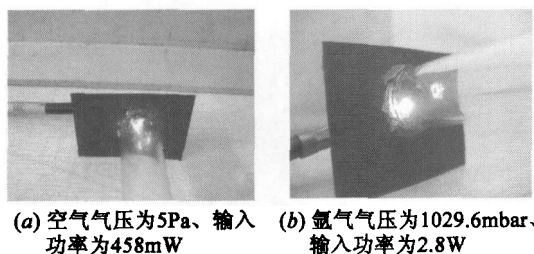


图10 小功率电感耦合微波等离子体的激励(调谐结构)

个大气压(1023.7mbar)、输入功率为1.2W时,氩气开始放电,此时 $|S_{11}| = -8.45\text{dB}$;当输入功率为1.5W时,激励起如图11(b)所示的氩气等离子体,此时 $|S_{11}| = -12\text{dB}$ 。因此在一个大气压(氩气)下,输入较小的功率,可以较容易地激励起微波等离子体。

通过实验可以看到,自谐结构的小功率电感耦合微波等离子体源更容易激励起微波等离子体,但体积较大。而当填充氩气,气压为一个大气压、输入功率不超过3W时,小功率电感耦合微波等离子体源都能激励起稳定的微波等离子体。

随着微波等离子体的激励,小功率电感耦合微波等离子体源的谐振频率和 S_{11} 发生变化,图12为微波等离子体激励以后 S_{11} 的变化曲线。可以看到,微波等离子体激励以后,小功率电感耦合微波等离子体源的谐振频率减小(在2476MHz附近)。这主要是由于微波等离子体激励后等离子体阻抗的影响所造成的。

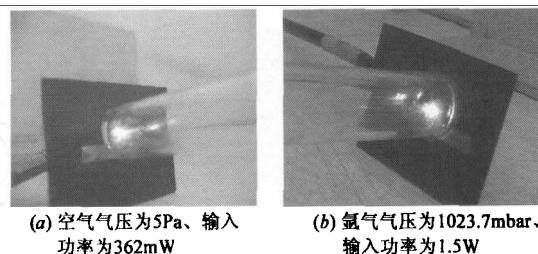
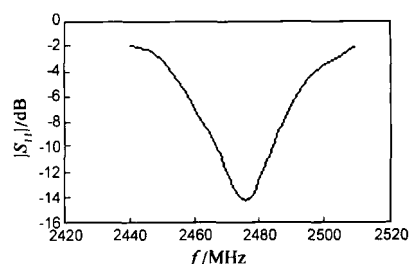


图11 小功率电感耦合微波等离子体的激励(自谐结构)

图12 微波等离子体激励后 S_{11} 的变化曲线, 空气气压为5Pa, 输入功率为458mW

5 结论

根据变压器耦合模型分析小功率电感耦合微波等离子体源的谐振特性,通过微波等离子体吸收功率与等离子体阻抗之间的关系,研究不同气压条件下的放电规律。研究结果表明,在低气压条件下,输入功率不超过220mW时,空气开始放电;而在常压条件下,输入功率不超过1.5W时,氩气开始放电。因此本文提出的基于平面螺旋微带的2.45GHz小功率电感耦合微波等离子体源,体积更小、放电功率更低。而随着微波等离子体的激励,小功率微波等离子体源的谐振频率减小, S 参数也发生变化。这为电感耦合微波等离子体源的小型化研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Felipe Iza, Jeffrey A Hopwood. Low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(4): 782-787.
- [2] J Hopwood. A microfabricated inductively-coupled plasma generator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(3): 309-313.
- [3] J G Yang, N S Yoon, B C Kim, J H Choi, G. S. Lee, S M Hwang. Power absorption characteristics of an inductively coupled plasma discharge [J]. IEEE Transactions on Plasma Sci-

- ence, 1999, 27(3): 676 – 681.
- [4] D S Lee, Y K Lee, H Y Chang. Characteristics of an inductively coupled plasma source using a parallel resonance antenna [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2004, 13(4): 701 – 706.
- [5] Yu Yin, Jason Messier, Jeffrey A. Hopwood. Miniaturization of inductively coupled plasma sources [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(5): 1516 – 1524.
- [6] R Rodriguez, J M Dishman, F T Dickens, E W Whelan, Modeling of two-dimensional spiral inductors [J]. IEEE Trans Comp, Hybrids, Manufact Technol, 1980, CHMT-3(4): 535 – 541.
- [7] I M El-Fayoumi, I R Jones. The electromagnetic basis of the transformer model for an inductively coupled RF plasma source [J]. Plasma Sources Sci Technol, 1998, 7(2): 179 – 185.
- [8] 廖斌, 曹焕丽, 朱守正. 平面螺旋电感耦合微波等离子体源的建模分析 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 400 – 404.
Liao Bin, Cao Huan-li, Zhu Shou-zheng. Modeling of planar spiral inductively-coupled microwave plasma source [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 400 – 404. (in Chinese)
- [9] 周蓓, 廖斌, 朱守正. ICP 源平面微带螺旋天线参数对性能的影响 [J]. 应用科学学报, 2007, 25(4): 359 – 364.
Zhou Bei, Liao Bin, Zhu Shou-zheng. Parameters' impact on

performance of antenna in planar microstrip spiral ICP source [J]. Journal of Applied Sciences (China), 2007, 22(3): 400 – 404. (in Chinese)

作者简介:



廖斌 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 微波教研室主任, IEEE 会员, 美国密歇根大学 (University of Michigan) 电子工程和计算机科学系访问学者. 主要从事微小功率微波等离子体源及应用、天线、电波传播预测、电磁兼容等方面的教学和科研工作, 已发表研究论文 30 多篇.
E-mail: bliao@ee.ecnu.edu.cn



周蓓 女, 1982 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为微带天线、电磁场数值计算等.