

DOI: 10.7652/xjtuxb201406017

外加磁场对小功率电感耦合微波 微等离子体激励的影响

廖斌, 王新刚, 黄加华, 朱守正

(华东师范大学信息学院电子系, 200241, 上海)

摘要: 为使小功率微波微等离子体源进一步小型化,提出了通过外加磁场减小微波微等离子体激励功率的方法。首先对 2.45 GHz 平面微带渐变螺旋天线进行数值仿真,得到最佳结构尺寸;其次在螺旋天线上加载高斯磁感应强度分别为 360、990 和 2 840 Gs 的环形磁铁,测试得到加载磁场前后的 S 参数;最后通过改变磁铁及磁极方向,研究其对小功率电感耦合微波微等离子体激励的影响。实验结果表明:当空气气压为 666.6 Pa 时,磁场强度和磁极方向均可使小功率微波微等离子体的激励功率和熄灭功率发生变化,且磁铁 S 极朝外更有利于激励;随着磁场强度的增大,激励功率逐渐减小;外加磁场时的最小激励功率比未加载磁场时的激励功率减小了 15%。该研究结果在微化学分析系统、小尺寸材料的表面处理等领域具有良好的应用前景。

关键词: 微波;微等离子体;螺旋天线;外加磁场;激励功率

中图分类号: TN99 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0098-05

Effects of Magnetic Field on Low-Power Inductively-Coupled Microwave Micro-Plasma Excitation

LIAO Bin, WANG Xingang, HUANG Jiahua, ZHU Shouzheng

(School of Information and Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: A method to decrease the igniting power of microwave microplasma through adding magnetic field is proposed to further miniaturize low-power microwave micro-plasma source. Simulation on a planar microstrip tapered spiral antenna at 2.45 GHz is performed to obtain the optimal structure. Values of S parameters are measured through applying the ring magnets of 360, 990 and 2 840 Gs on the spiral antenna. Finally, the excitation effects of low-power microwave micro-plasma are investigated by changing the magnetic field strength and the magnetic orientation. Experimental results show that both the igniting and the extinguishing of microwave microplasma changes with the changes in the strength and the orientation of the added magnetic fields at the air pressure of 666.6 Pa. The S-pole outward of the ring magnet motivates to ignite microwave micro-plasma more easily, and the igniting power decreases as the strength of added magnetic field increases. A comparison with the igniting power without adding magnetic field shows that the minimum igniting power with adding magnetic field reduces about 15%. It can be concluded that the proposed method has potential applications in the fields of micro-chemical-analysis system and surface processing of small-scale materials.

Keywords: microwave; micro-plasma; spiral antenna; applied magnetic field; igniting power

小功率微波微等离子体技术是一项近几年发展起来的集微电子(纳电子)技术、微波技术和等离子体技术于一体的高新技术。它通过微小功率微波激励起小尺寸的等离子体,如用不超过 3~5 W 的微波功率使气体电离,可产生尺寸为 10 mm 甚至 0.2 mm 的等离子体。与其他等离子体相比,小功率微波微等离子体具有寿命长、尺寸小和低污染等优点,在微化学分析系统、生物 MEMS 的杀菌消毒、小尺寸材料的表面处理以及微型推进器等领域具有良好的应用前景^[1-3],因而受到越来越广泛的关注。美国 Tufts 大学 Hopwood 教授研究了微波微等离子体的旋转、振荡和激励温度,粒子与微等离子体的相互作用以及微波频率对于微等离子体的影响等特性^[4-6]。美国 Michigan 大学 Gianchandani 教授通过直流微放电实验^[7],用不同大小的永久磁铁产生磁场,发现直流微等离子体电流随着磁场的增大而增大。清华大学蒲以康教授也对微波微等离子体的气体温度、电子密度和电子温度等进行了实验研究^[8]。然而,关于磁场对小功率电感耦合微波微等离子体激励的影响,在国内外还鲜有报道。本文在气压为 666.6 Pa(5.0 Torr)、高斯磁感应强度分别为 360、990 和 2 840 Gs 的空气条件下,通过外加磁铁研究不同磁场对小功率电感耦合微波微等离子体激励的影响,发现激励功率随着磁场强度的增大而减小,本文的研究结果可为小功率微波等离子体源的进一步小型化提供依据。

1 理论基础

根据离子动力学原理,在电磁场作用下一个带电粒子的运动方程为

$$m \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = q[\mathbf{E}(r,t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(r,t)] \quad (1)$$

式中: m 是带电粒子的质量; $\mathbf{v}(t)$ 是拉格朗日速度; q 是带电粒子的电量; $\mathbf{E}(r,t)$ 为电场; $\mathbf{B}(r,t)$ 为磁场。式(1)等号右边即为洛伦兹力。若有一个沿 z 方向的磁场 $\mathbf{B} = zB_0$ (其中 B_0 是一个常数)为外加横向磁场,电场 $\mathbf{E}$ 为 0,此时式(1)的各个分量为

$$m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B_0 \quad (2)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -qv_x B_0 \quad (3)$$

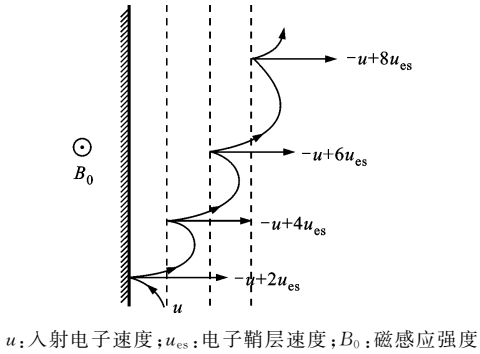
$$m \frac{dv_z}{dt} = 0 \quad (4)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 $\mathbf{v}(t)$ 在 x 、 y 、 z 方向的分量。

由于电子的质量比带电离子的质量要小很多,

因此只考虑电子的运动。电子在恒定磁场中主要由沿着磁场方向的自由运动和绕着磁场的回旋运动组成,此时电子回旋运动的半径保持不变,在运动过程中,磁场并没有改变电子能量。

在给定的微波功率的条件下,外加磁场会改变电子的运动轨迹以及电子与鞘层原来的碰撞模式,产生多种附加效应,使微波微等离子体密度增大^[9-10]、鞘层电压下降,从而有利于微波微等离子体的激发^[11]。当外加一个磁场时,首先电子横穿磁场的运动在很大程度上将被禁止,从而减小在垂直磁场方向上的非双极性扩散通量,这样可大大减小功率的损失;其次外加磁场将电子束缚在平面电感螺旋线圈附近的一个范围内,这样可以减小放电区域总的有效损失面积,用时又引导大部分逃逸的离子回到平面电感螺旋线圈附近,从而增加微等离子体的离子通量;最后外加磁场的存在使电子与振荡鞘层发生多次相关联的碰撞,这样使得电子最终获得更高的能量。图 1 为外加磁场后电子与鞘层碰撞后的轨迹分布图。



u :入射电子速度; u_{es} :电子鞘层速度; B_0 :磁感应强度
图 1 外加磁场电子和鞘层碰撞后的轨迹

2 数值仿真及实验装置

小功率电感耦合微波微等离子体源选取叉指型平面微带渐变螺旋天线。经过优化,渐变结构螺旋线圈匝数 $n=3$ 。仿真研究中,螺旋线圈金属导带选用金,厚度为 0.035 mm,金属导带刻蚀在介质基片上, Al_2O_3 陶瓷介质基片的相对介电常数为 9.8,厚度为 0.6 mm,激励采用 50 Ω 同轴线底馈。X-Y 平面为紧贴渐变螺旋线圈表面的水平剖面,Y-Z 面为渐变螺旋线圈的轴向剖面。仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可以看到,渐变螺旋线圈的电场由外向内逐渐增强,并且在最内圈达到峰值,而磁场的最大值位于螺旋电感的中间圈。电场和磁场类似于渐变螺旋管分布,能量基本上都集中在线圈的 2/3 处,其他区域都比较弱,并且左右两边分布基本对称。

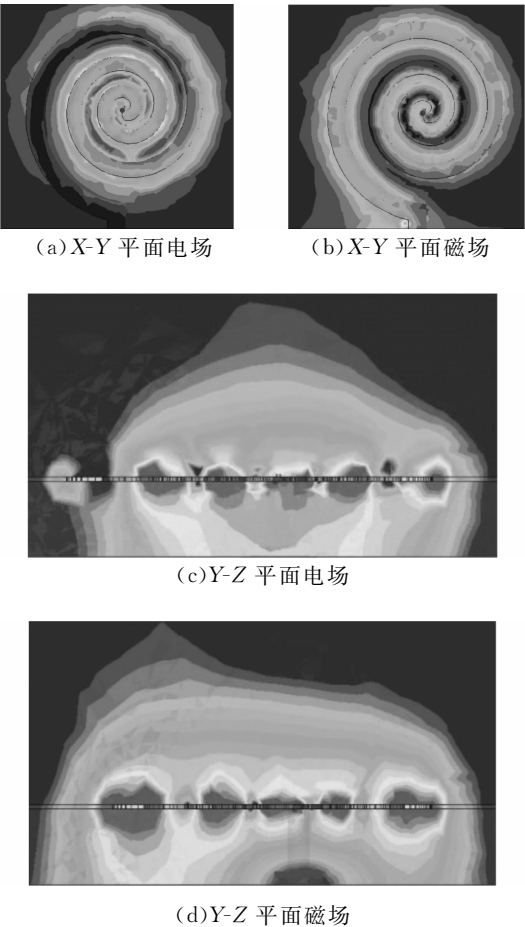


图 2 基于 Al_2O_3 陶瓷的渐变螺旋线圈电磁场分布图

根据数值仿真优化结果,研制了激励 2.45 GHz 小功率微波微等离子体的叉指型平面微带渐变螺旋天线,如图 3a 所示(硬币尺寸 $\Phi=19\text{ mm}$)。使用矢量网络分析仪 Agilent N5230A 测量,得到反射系数 S_{11} ,实测结果曲线如图 3b 所示。从实验结果可得,平面微带渐变螺旋天线的谐振频率为 2.515 GHz, S_{11} 为 -10.42 dB , Q 值为 125。谐振频率发生偏移可能是由于实际的基片介电常数和导带厚度等与仿真时的误差引起的。

小功率微波微等离子体实验系统主要由微波信号源 AV3619 矢量网络分析仪、微波功率计 Agilent E4418B(探头 E4412A)、机械真空泵 2XZ-4B、数字型电阻薄膜真空计 ZDY-2A1、功率放大器、双定向耦合器、射频开关和环形永磁铁等组成^[12],如图 4a 所示,环形磁铁如图 4b 所示。

3 实验结果及讨论

本文选取气压为 666.6 Pa、高斯磁感应强度分别为 0、360、990 和 2 840 Gs 这 4 种不同情况,研究不同磁场、不同磁极方向对小功率电感耦合微波微

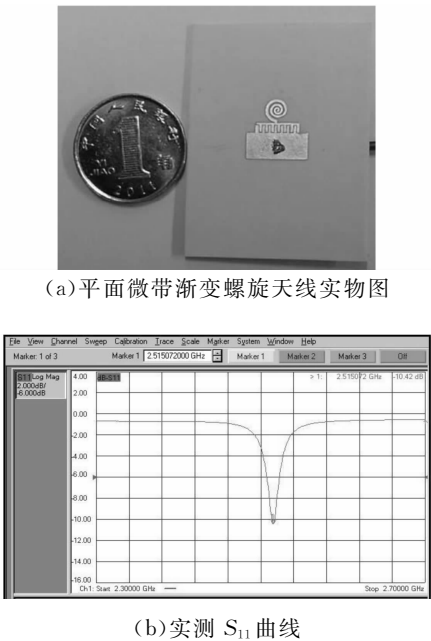
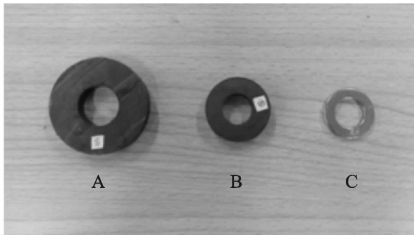
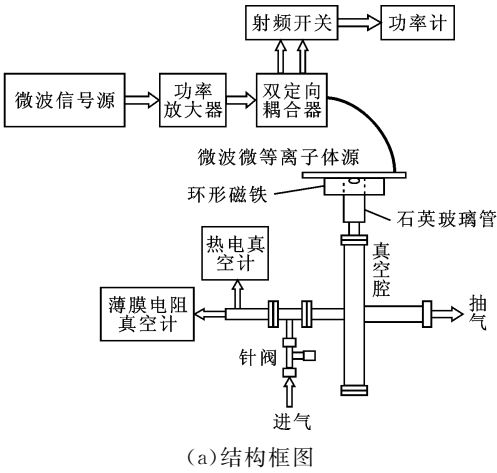


图 3 平面微带渐变螺旋天线实物及实测 S_{11} 曲线



(b) 环形磁铁

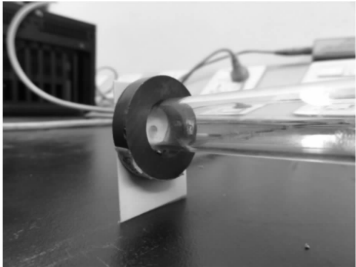
图 4 小功率微波微等离子体实验系统

等离子体激励功率和熄灭功率的影响。激励功率是指微波微等离子体点亮瞬间记录的输入功率值,而熄灭功率是指微波微等离子体激励后,减小入射功率在微等离子体熄灭的瞬间记录的输入功率值。

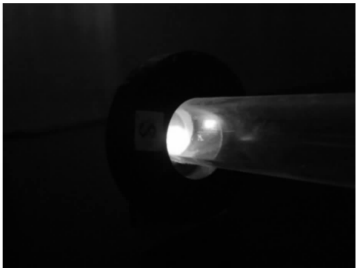
3.1 磁场强度对小功率微波微等离子体激励的影响

气压为 666.6 Pa、未加磁场时,小功率电感耦

合微波微等离子体源的谐振频率为 2.516 GHz, S_{11} 为-12.38 dB,微等离子体激励功率为 4.33 W,熄灭功率为 5.06 W。在小功率微波微等离子体源处加载不同磁铁(S 极朝外),当加载磁铁 A 时(高斯磁感应强度为 360 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐振频率为 2.515 GHz, S_{11} 为-10.10 dB,微等离子体激励功率为 4.57 W,熄灭功率为 5.47 W;当加载磁铁 B 时(高斯磁感应强度为 990 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐振频率为 2.514 GHz, S_{11} 为-8.94 dB,微等离子体激励功率为 4.04 W,熄灭功率为 4.08 W,激励的微等离子体如图 5 所示。



(a)小功率微波微等离子体激励前



(b)小功率微波微等离子体激励后

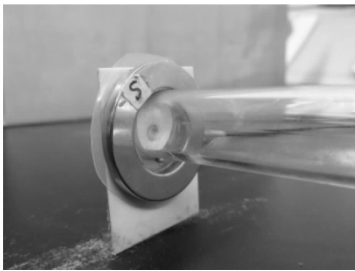
图 5 加载磁场(磁铁 B 且 S 极朝外)时小功率微波微等离子体的激励

加载磁铁 C 时(高斯磁感应强度为 2 840 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐振频率为 2.504 GHz, S_{11} 为-19.01 dB,微等离子体激励功率为 3.67 W,熄灭功率为 5.43 W,激励的微等离子体如图 6 所示。

未加磁场和加载不同磁场(S 极朝外)的小功率微波微等离子体激励功率和熄灭功率的变化如图 7a 所示。从图 7a 可以看到,S 极朝外时随着磁场强度的增大,激励功率在稍微增大后迅速下降,其值除了在高斯磁感应强度为 360 Gs 时比未加磁场时略大以外,其他值都比未加磁铁时小,而熄灭功率是先增大,后减小,之后又继续增大,呈现起伏状态。

3.2 磁极对小功率微波微等离子体激励的影响

改变磁铁的磁极方向,即磁铁位置从 S 极朝外变



(a)小功率微波微等离子体激励前



(b)小功率微波微等离子体激励后

图 6 加载磁场(磁铁 C 且 S 极朝外)时小功率微波微等离子体的激励

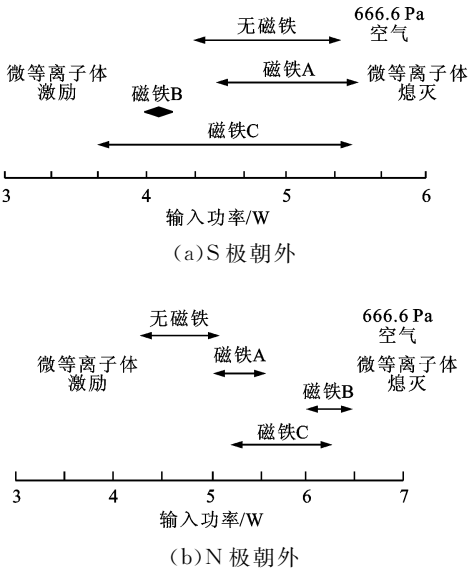


图 7 666.6 Pa 时有无磁铁的输入功率变化图

为 N 极朝外,而其他条件不变,气压仍为 666.6 Pa。当加载磁铁 A 时(高斯磁感应强度为 360 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐振频率为 2.516 GHz, S_{11} 为-10.05 dB,微等离子体激励功率为 5.07 W,熄灭功率为 4.58 W;当加载磁铁 B 时(高斯磁感应强度为 990 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐振频率为 2.514 GHz, S_{11} 为-8.92 dB,微等离子体激励功率为 6.05 W,熄灭功率为 6.43 W;当加载磁铁 C 时(高斯磁感应强度为 2 840 Gs),小功率电感耦合微波微等离子体源的谐

振频率为 2.512 GHz, S_{11} 为 -15.02 dB, 微等离子体激励功率为 5.24 W, 熄灭功率为 6.27 W。未加磁场和加载不同磁场(N 极朝外)的小功率微波微等离子体激励功率和熄灭功率的变化如图 7b 所示。

从图 7b 可以看到, 在 N 极朝外的条件下, 随着磁场强度的增大, 激励功率和熄灭功率都是先增大, 后减小。比较图 7a 和图 7b 可以发现, 当气压为 666.6 Pa 时, 除了在加载磁铁 A 的条件下熄灭功率在 N 极朝外比 S 极朝外要小以外, 其余的微波微等离子体的激励、熄灭功率 N 极朝外比 S 极朝外要大。另外, 微波微等离子体激励功率小于熄灭功率主要是由于气压引起的, 微等离子体激励功率与熄灭功率的变化还与平面微带渐变螺旋天线面对的负载阻抗有关。

4 结 论

本文基于叉指型平面微带渐变螺旋天线研究外加磁场(不同磁场强度、不同磁极方向等)对小功率电感耦合微波微等离子体激励的影响。研究表明, 在气压为 666.6 Pa 的空气条件下, 当外加高斯磁感应强度分别为 360、990、2 840 Gs 的不同磁场强度以及磁极方向改变(S 极朝外或 N 极朝外)时, 小功率电感耦合微波微等离子体的激励功率和熄灭功率均发生了变化。一般来说, 在气压为 666.6 Pa 时, 磁铁 S 极朝外更有利于小功率微波微等离子体的激励, 而且随着磁场强度的增大, 激励功率逐渐减小。本文研究可为小功率微波微等离子体源的进一步小型化提供研究基础。不同气压、不同频率情况下小功率微波微等离子体的激励将是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] HOPWOOD J. A microfabricated inductively-coupled plasma generator [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(3): 309-313.
- [2] IZA F, HOPWOOD J A. Low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, 31(4): 782-787.
- [3] MIURA N, HOPWOOD J. Instability control in microwave-frequency microplasma [J]. *The European Physical Journal: D*, 2012, 66(5): 20739-20745.
- [4] IZA F, HOPWOOD J. Rotational, vibrational, and excitation temperatures of a microwave-frequency microplasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(2): 498-504.
- [5] MIURA N, HOPWOOD J. Metastable helium density probe for remote plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(11): 113502.
- [6] XUE J, HOPWOOD J A. Microwave-frequency effects on microplasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(6): 816-822.
- [7] WILSON C G, GIANCHANDANI Y B. Miniaturized magnetic nitrogen DC microplasmas [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(1): 282-287.
- [8] ZHU X M, CHEN W C, PU Y K. Gas temperature, electron density and electron temperature measurement in a microwave excited microplasma [J]. *J Phys: D Appl Phys*, 2008, 41(10): 105212.
- [9] LIEBERMAN M A, LICHTENBERG A J. 离子体放电原理与材料处理 [M]. 蒲以康, 等译. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 赵晓云, 刘金, 段萍, 等. 伴有二次电子发射的磁化等离子体鞘层结构特性 [J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(4): 279-284.
- [11] ZHAO Xiaoyun, LIU Jinyuan, DUAN Ping, et al. Influence of Secondary Electron Emission on Structures of Magnetized Plasma Sheath [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(4): 279-284.
- [12] THANG D H, SASAKI K, MUTA H, et al. Characteristics of the plasma parameters in the fabrication of microcrystalline silicon thin films using 915 MHz ECR plasma [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 506/507(5): 485-488.
- [13] 廖斌, 周蓓, 曹焕丽, 等. 小功率平面渐变螺旋电感耦合微波等离子体源的研究 [J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 1860-1864.
- [14] LIAO Bin, ZHOU Bei, CAO Huanli, et al. Study on low power inductively-coupled microwave plasma source based on planar spiral microstrip [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(8): 1860-1864.

(编辑 刘杨)