射频电感耦合夹层等离子体中的模式转换

杜寅昌[1)] 曹金祥[1)†] 汪建[1)] 郑哲[1)] 刘宇[1)] 孟刚[2)] 任爱民[2)] 张生俊[2)]

1) (中科院基础等离子体物理重点实验室, 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

2) (试验物理与计算数学实验室, 北京 100076)

(2011 年 6 月 27 日收到; 2012 年 2 月 3 日收到修改稿)

本文利用微波相位法和光谱诊断法, 研究了 ICP 放电等离子体在圆台状夹层等离子体中 E 模和 H 模相互转换的物理现象. E 模和 H 模的之间转换过程是一个瞬间突变的, 转换点的输入功率随真空室压强的变化而变化. H 模向 E 模转换的阈值功率低于 E 模向 H 模转换的值, 等离子体参数随输入功率变化曲线类似于铁磁物质中的磁滞回线. Ar II 408.2 nm 谱线的强度的变化规律和电子密度随功率变化的规律基本一致. 通过本实验可以获得一种电子密度范围为 3.85×10^{11} cm$^{-3} < n_{\rm e} < 4.68 \times 10^{11}$ cm^{-3}, 外表面积为 0.3 m^2, 厚度为 2 cm 稳定工作的等离子体源.

关键词: ICP 放电, E-H 模, 等离子体源, 等离子体光谱

PACS: 52.70.Gw, 52.80.Pi

1 引 言

众所周知, 电感放电的历史十分悠久, 早在 1884 年,Hittorf 报道了一种 “无电极的环形放电” 现象 [1]. 射频电感耦合等离子体 (ICP) 放电, 其优点是能够在低气压下产生高密度等离子体, 射频功率的耦合效率高, 电极结构简单, 灵活多样, 且放电电极不会污染放电气体. 因此, 它在真空镀膜、半导体工业、电光源研究和国防工业等行业得到了十分广泛应用 [2].

ICP 放电的过程中会经历两种放电模式, 分别是容性耦合放电 (E 模) 和感性耦合放电 (H 模). E 模和 H 模转换的机理是取决于等离子体的能量得失的平衡 [3]. 在较低功率时,ICP 放电工作在 E 模, 等离子体主要由放电线圈之间产生的静电场驱动产生, 而线圈在等离子体中产生的感生电场对产生等离子体的贡献很小. 工作在 E 模下的等离子体特点是电子密度较低, 发射光谱强度也低, 但电子温度较高 [4]. 随着功率的增高, 线圈的感生电场也越来越强. 当线圈产生的感生电场足够维持等离子体的产生时 [5], 电子密度逐渐上升; 而在低密度下电感耦合效率又正比于电子密度 ($n_{\rm e}$). 这样相互促进的非线性机理导致等离子体的 $n_{\rm e}$ 迅速上升, 随着密度上升趋肤效应变得十分显著, 电感耦合效率逐渐下降, 从而达到 H 模的能量平衡 [3,6]. H 模等离子体的特点是电子密度较高、有强的发射光谱和较低的电子温度 [3], 电子能量分布函数 (eedf) 也随着 E-H 模转换而发生改变 [6]. 当功率降低的时候, 又会发生 H-E 模式转换的现象. 由于等离子体激发模式的改变、能量吸收和耗散的平衡, 导致激发 H 模和维持 H 模放电所需放电功率不同, H-E 模式转换的功率和线圈电流也会较 E-H 转换较低, 可以在实验中观察到 E-H 模相互转换的回线. Turner 和 Lieberman 对 ICP 放电进行了较详尽的理论分析 [7].

Cunge 等 [3] 利用插入真空腔内部的凹腔式电感线圈, 在长 80 cm 直径 20 cm 的圆柱形真空腔内部产生等离子体, 并利用光谱和朗缪尔探针观测了 ICP 放电模式转换的过程. Czerwiec 等 [5] 则利用一种 ICP 等离子体源在主真空室内部获取了稳定的等离子体喷流, 同样他们也是利用光谱诊断方法观察 ICP 放电的过程. Daltrini1 等 [6] 利用安装在石英玻璃的窗口上两匝平面电感线圈在长 40 cm,

† E-mail: jxcao@ustc.edu.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

直径 30 cm 的真空室内产生射频电感耦合放电等离子体, 通过光谱研究了等离子体的性质. 然而高频放电的模式转换在不同放电频率、工作物质的种类与压强、等离子体容器的形状等工作条件下, 仍有许多实验规律没有被人们掌握. 本文试图在此基础上开展一些实验研究工作.

我们设计了一种圆台形夹层容器, 并利用 ICP 放电开展了这种结构形状的等离子体 E 和 H 模式转换的实验观测. 实验中我们分别利用微波干涉法和光谱法对等离子体的参数进行监测. 通过不同放电气压和不同放电功率下的等离子体电子密度的诊断, 我们观测到这种结构容器 ICP 放电也存在着 E-H 模式转换的现象, 对其转换规律进行了初步的研究和探讨, 得到了一些有意义的实验结果. 该结果对研究高频等离子体模式转换规律、等离子体源放电参数与效率以及大面积等离子体源技术应用有很好的参考价值.

2 实验装置和原理

图 1 是本实验圆台形夹层等离子体发生器示意图. 实验系统由圆台形夹层真空室、抽气和供气、ICP 放电和等离子体参数诊断系统组成.

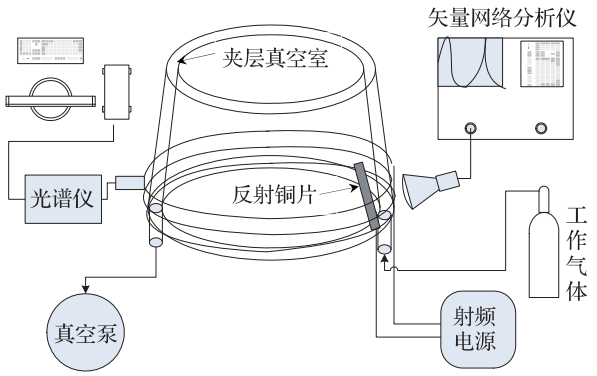

图 1 实验装置示意图

圆台形夹层真空室是由石英玻璃制作而成. 其上部内、外直径分别为 15 cm 和 20 cm, 底部内外直径分别为 25 cm 和 30 cm, 夹层间厚度均为 2 cm, 高为 40 cm, 外表面积为 0.3 m^2. 等离子体工作物质选用高纯 Ar, 通过质量流量控制系统进行气压调节, 从而使系统保持在稳定的工作状态. 为使电极能够长时间稳定工作, 放电电极采用空心铜管绕制, 我们在其中通有冷却水. 本实验射频电源选用的是 SY 型 1500 W 射频功率源, 频率 13.56 MHz, 通过 SP-I 型匹配器与电感线圈输入端相连接.

等离子体光谱诊断由 HORIBA 公司生产的 TRIAX550 型光谱仪完成. 放电过程中的光谱信号通过光纤传入光谱仪, 光谱仪输出的信号再送至计算机进行处理. 光谱仪的中心波长定为 405 nm, 一次曝光采集的光谱范围为 20 nm.

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了解发光工作物质的成分, 发射光谱的谱线的展宽可以得到等离子体中的电子密度 [8], 等离子体光谱强度可以用于诊断等离子的电子温度 [9]. 发光谱线参数可以通过 www.nist.gov 查到 [10]. 在本次实验中我们观测 Ar 离子的谱线, 通过谱线强度的变化来观察 ICP 放电的模式转换过程中的现象.

我们利用微波相位诊断方法得到等离子体的密度信息. 微波诊断系统由 Agilent 公司生产的 E8362B 型微波矢量网络分析仪和微波天线选用 BJ58 聚焦喇叭天线 (带宽 4.64—7.05 GHz) 组成. 由于等离子体容器的形状限制, 我们在真空室内侧正对微波天线的位置安装一片圆形铜片构成反射体 (如图 1 所示). 从微波天线发射的微波信号通过等离子体后, 在铜片表面反射后再通过等离子体并回到微波天线, 从而被微波矢量网络分析仪接收记录其相位变化值, 完成电子密度的诊断.

由于我们的实验是在无外磁场、低气压环境下产生的, 可把这种等离子体近似看成为弱电离等离子体. 对弱碰撞 (或无碰撞)、低密度非磁化均匀等离子体 $\nu \ll \omega_{\rm pe}, \omega$; $\omega_{\rm pe} < \omega$, 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

$$\Delta\phi = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_{\rm e} c\omega}\int_0^L n_{\rm e}(x)\mathrm{d}x, \tag{1}$$

于是, 微波探测路径上等离子体的弦平均密度为

$$\bar{n}_{\rm e} = \frac{\int_0^L n_{\rm e}(x)dx}{L} = \frac{2\varepsilon_0 mc}{e^2}\frac{\omega}{L}\Delta\phi. \tag{2}$$

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 [11].

3 实验结果与讨论

我们是通过对 ICP 放电过程中, 不同压强和不同放电功率下, 等离子体密度变化的监测, 来进行 E 模和 H 模之间相互转换实验研究的. 实验中我们选

定的放电气压分别为 50 Pa, 100 Pa,150 Pa, 200 Pa, 放电的起始功率从 200 W 逐渐上升直到发生 E 模向 H 模转换的现象. 通过降低放电功率, 观测 ICP 放电出现由 H 模向 E 模转换过程.

3.1 电子密度随馈入功率的变化

在电子密度诊断实验中, 我们选用 BJ58 型微波天线. 由于本实验放电真空室是一个圆台形夹层的特殊形状, 内圆空间狭小不宜放置微波天线, 为解决电子密度的诊断问题, 我们在真空室内侧贴上一铜片. 天线面距离铜片 5 cm. 实验中我们采用 1-port 校准技术 [12] 对这套微波测量系统进行了校准.

图 2 是在 4 种压强条件下获得的电子密度随馈入功率变化的一组实验曲线. 由图 2 可知, 在相同的放电压强下, 电子密度随着功率的增加而缓慢上升. 这是低功率环境下, ICP 放电维持在 E 模的情况. 此时 E 模放电主要由容性放电成分维持, 其显著的特点是电子密度低, 发射光谱的强度较弱. 在该装置中除上述现象外, 还表现出等离子体分布比较均匀, 且能够充满夹层空间.

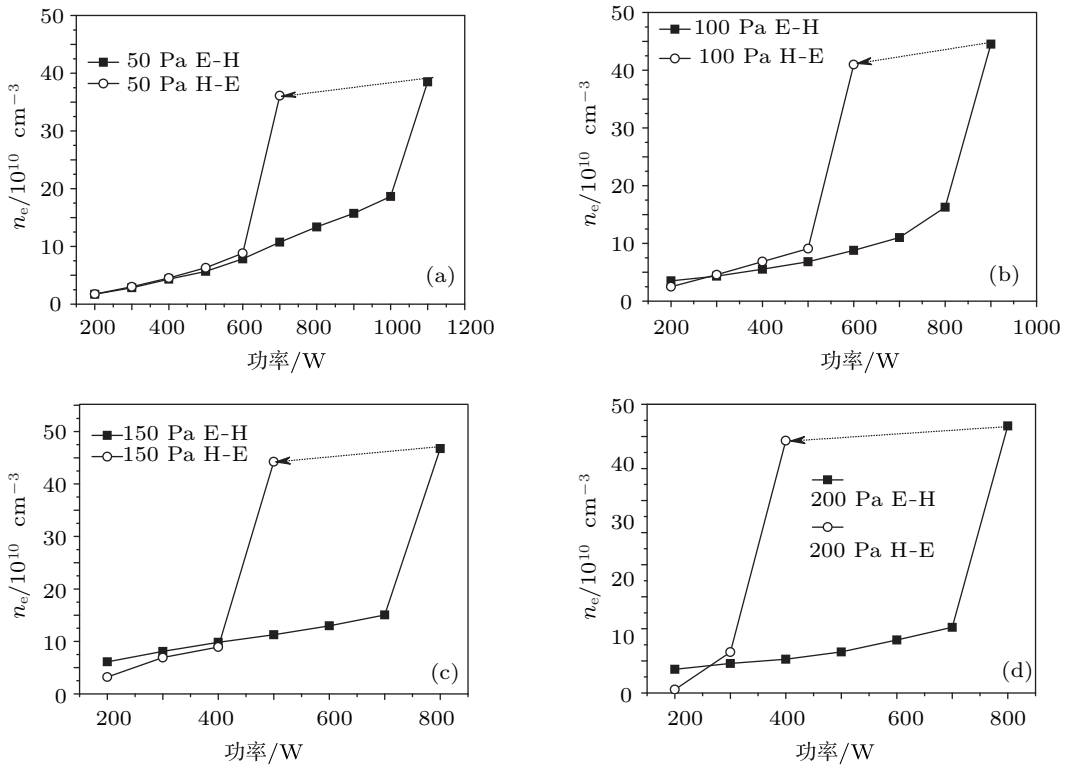

图 2 不同放电气压下, 电子密度随功率变化曲线 (a), (b), (c), (d) 放电气压分别 50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa

随着放电功率的提高, 线圈电流逐渐增大, 等离子体中的感生电场得到加强, 电子获得的能量迅速增加, 使得等离子体电离度提高, 电子密度迅速上升. 当线圈高频电流大于某一阈值时等离子体电子密度会出现一个突变, 此时 ICP 放电出现由 E 模向 H 模转换的现象, ICP 放电进入 H 模工作状态.

从图 2 我们还可以看出, 对于不同的压强, 进入 H 模时对应的电子密度也不同. 图 3 是四种压强条件下所对应进入 H 模时的电子密度值, 可以看出随着气压的上升进入 H 模以后电子密度是逐渐增加的. 当气压上升到 150 Pa 以后电子密度不再随气压的增加而增加, 此时出现饱和的现象.

在 E 模状态下等离子体主要由静电场维持, 而进入 H 模以后等离子体放电主要由感生电场维持 [8]. 在 E 模放电状态下电子密度变化范围在 1.73×10^{10} —1.83×10^{11} cm^{-3}. 实验中我们还观察到, 进入 H 模放电后等离子体分布主要集中到电极附近, 表现为明亮聚集状的等离子体团 [13], 等离子体电子密度增加十分显著, 从 1.51×10^{11} cm^{-3} 上升到 4.68×10^{11} cm^{-3}, 密度值提高了约 2—3 倍.

这是由于在进入 H 模以后 ICP 放电的激发机理变化, 由原来 E 模的静电场能量耦合方式转换为 H 模的感生电场的能量耦合方式, 耦合效率大大提高, 从而使电子密度显著上升.

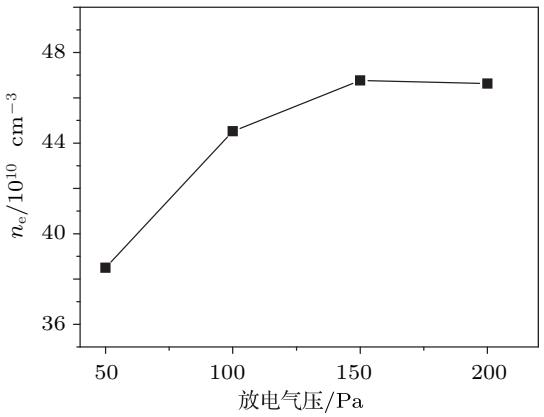

图 3 H 模电子密度随放电气压变化曲线

在 ICP 放电进入 H 模之后, 我们降低射频电源功率, 随着线圈中高频电流的减小, 由感生电场能量耦合过度到静电场能量耦合. 当功率小于某一值时 (如图 2(b) 中对应 600 W), H 模快速向 E 模转换 (如图 2 中箭头所示). 从图 2 我们可以看到四种压强条件下 E-H 和 H-E 功率回归线呈现出类似磁滞回线的特征. 四个压强条件下的 H-E 模式转换的功率阈值均小于 E-H 模式. 这是因为激发 H 模和维持 H 模放电所需的阈值功率不同造成的.

在实验中, 我们还观测到 E 模向 H 模转换过程中, 其功率阈值随放电气压改变也会发生变化. 图 4 是我们得到的该变化的实验曲线.

由图 4 中曲线 1 可知, 随着放电气压的增加, E 模向 H 模转换的阈值功率也逐渐降低. 这是由于放电气压的增加, 使得碰撞增强, 电子密度随之上升, ICP 放电的耦合效率得到提高, 阈值功率也就随之下降 [5,6]. 曲线 2 是在进入 H 模之后随之降低馈入功率, H 模向 E 模转换过程中阈值功率随压强变化的关系. 与曲线 1 类似随着气压的上升阈值功率随之下降, 图 4 表明随着 ICP 放电气压的提高, 放电更容易工作在 H 模. 除此之外, 对于相同气压两种模式转换的阈值功率差别较大, 如 50 Pa 两者差值为 500 W, 100 Pa 为 400 W, 150 Pa 为 400 W, 200 Pa 为 500 W. 显然相对本实验环境最佳阈值功率对应的压强是 100—150 Pa.

在 ICP 放电等离子体中可以观察到 E 模和 H 模两种不同的工作状态. Amorim 等 [13] 利用改进的 Langmuir 探针测量了 ICP 放电 E 模状态下电子密度在 5×10^{9} cm^{-3} $< n_e <$ 4×10^{10} cm^{-3}, 而在 H 模状态下为 10^{12} cm^{-3} $< n_e <$ 6×10^{12} cm^{-3}. Cunge 等 [14] 通过凹腔式 ICP 放电真空室, 在 E 模和 H 模的状态下获得的电子密度分别为 2×10^{8} cm^{-3} $< n_e <$ 3.5×10^{9} cm^{-3} 和 5×10^{10} cm^{-3} $< n_e <$ 8×10^{11} cm^{-3}. 而本实验在圆台形夹层真空腔内通过 ICP 放电获得了 E 模电子密度范围为 1.73×10^{10} cm^{-3} $< n_e <$ 1.83×10^{11} cm^{-3}, H 模电子密度范围为 3.85×10^{11} cm^{-3} $< n_e <$ 4.68×10^{11} cm^{-3}, 面积为 0.3 m^2, 厚度为 2 cm 稳定工作的等离子体源.

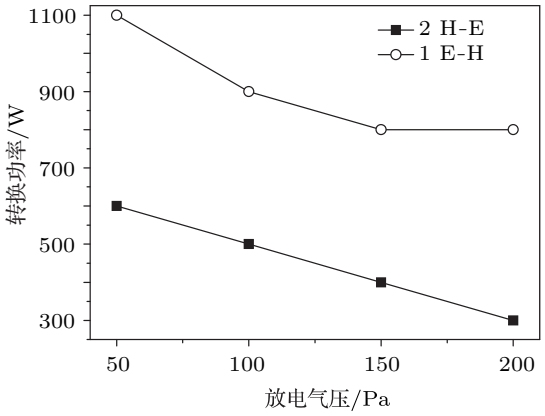

图 4 放电气压和转换功率的关系

3.2 光谱强度随功率的变化

等离子体发射光谱的强度变化也是 E 模和 H 模转换的一个显著的特征. 我们在实验中用 TRIAX550 型光谱仪采集了放电时 Ar 的发射光谱, 光谱范围 400—700 nm, 放电气压 100 Pa 功率 400 W, 如图 5 所示.

在实验中, 我们利用光谱仪对 3s23p4(3P)4p—3s23p4(3P)4s 跃迁 (Ar II 408.2 nm)[10] 光谱线进行测量. 图 6 是压强分别为 50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa 四个条件下, 等离子体发射的谱线强度随着功率的变化.

从图中我们可以看到 Ar II (408.2 nm) 谱线的强度在 E 模状态下变化不大, 但是随着 ICP 放电进入 H 模以后,Ar II (408.2 nm) 谱线的强度迅速增强. 由此可见在 E 模放电下, Ar II (408.2 nm) 谱线的相对强度随着功率的增加是缓慢变化的. 例如

在 50 Pa E 模放电下, 光谱相对强度随着功率的增加从 1057 变化到 4362, 而进入 H 模以后相对光谱强度变为 66762, 光谱强度显著增加. 100 Pa 对应的 E 模则光谱相对强度随着功率的增加从 1693 变化到 2818, 而进入 H 模以后相对光谱强度变为 213307. 光谱强度的增加是 E 模向 H 模转换的一个显著特征, 其中 H 模也叫做亮模 (bright mode)[5]. 电子密度的显著提高导致可以激发的电子和离子的数量大大增加, 增加了离子光谱的强度. 在 Ar 气放电等离子体中光谱强度突变的另一个可能的原因, 由于等离子体中电子能量分布函数的变化, 在发生 E-H 模式转换的时候电子能量分布函数从 Maxwel 分布变成 Druyvesteyn 分布 [6]. 并且由于趋肤效应导致等离子体在 H 模下相对于 E 模较为集中, 所以光谱强度迅速增大. 光谱强度的增强和电子密度的提高是随着放电模式的改变同步进行的.

随着功率的降低, ICP 放电由 H 模回到 E 模, 光谱强度随功率变化的曲线和电子密度随功率变化的曲线规律基本一致.

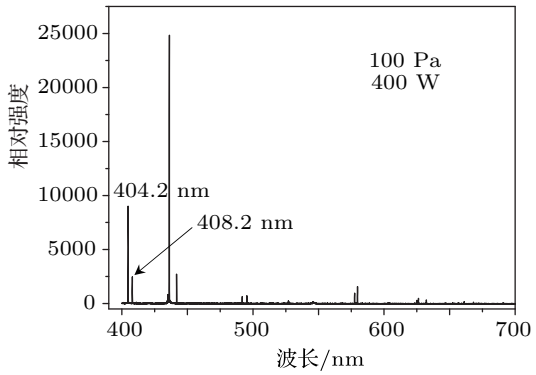

图 5 100 Pa, 400 W 放电发射光谱图

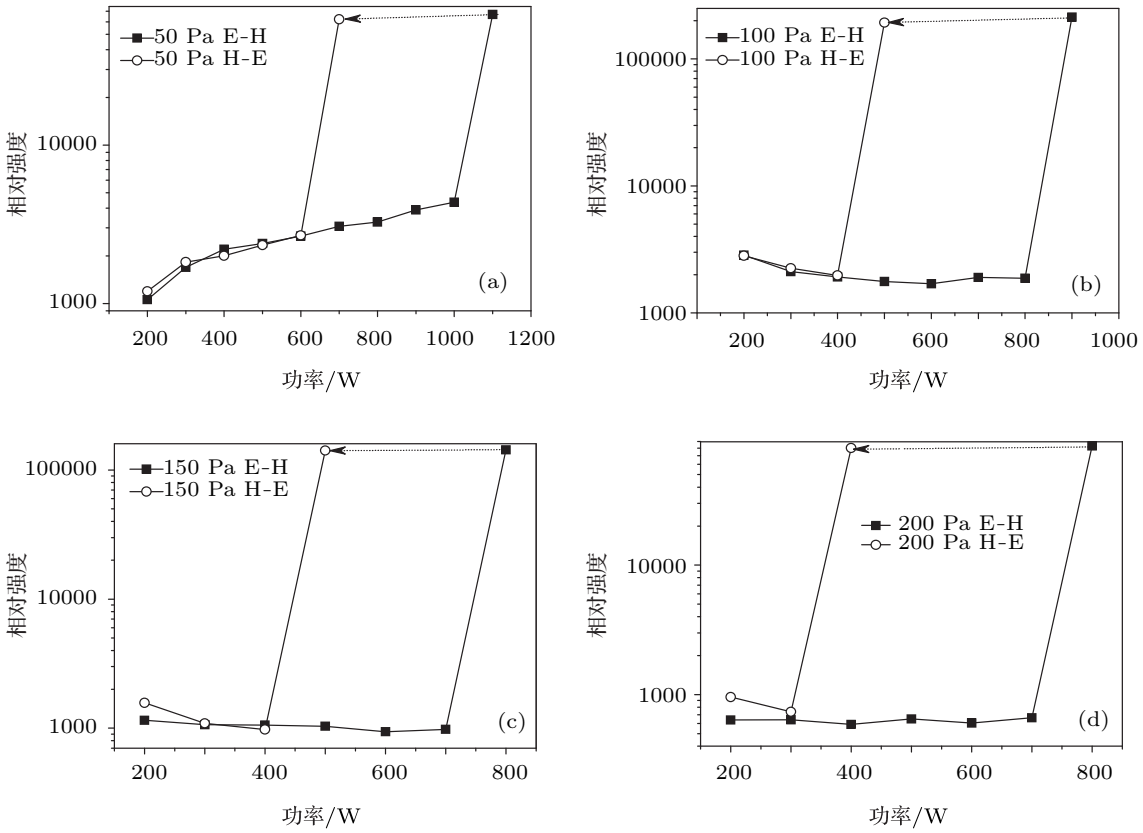

图 6 不同放电压强下, 谱线 (Ar II 408.2 nm) 强度随功率变化的曲线

4 结 论

本文利用微波相位法和光谱诊断法, 研究了 ICP 放电等离子体在圆台状夹层等离子体中 E 模和 H 模相互转换的物理现象. E 模 -H 模的转换过程是一个瞬间突变的, 转换点的输入功率随真空室压强的变化而不同. 由 H 模向 E 模转换和 H 模向 E 模转换过程中, 电子密度和光谱相对强度随输入功率的变化曲线类似于铁磁物质中的磁滞回线.

本实验在一圆台形夹层真空腔内通过 ICP 放电获得了电子密度范围为 3.85×10^{11} cm^{-3} $< n_{\rm e} <$ 4.68×10^{11} cm^{-3}, 面积为 0.3 m^2, 厚度为 2 cm 稳定工作的等离子体源. 该工作对研究 ICP 放电的模式转换规律和大面积等离子体源的制作有较好的参考价值.

[1] Lieberman M A, Lichtenberg A J 蒲以康译 2007 等离子体放电原理与材料处理, 第一版 (北京: 科学出版社) 第 350—352 页

[2] Eugen Statnic, Valentin Tanach 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 465

[3] Cunge G, Crowley B, Vender D, Turner M M 1999 *Plasma Sources Sci. Technol* **8** 576

[4] Tang X M, Manos D M 2000 *J. Vac. Sci. Technol.* A **18** 1359

[5] Czerwiec T, Graves D B 2004 *J. Phys.* D:*Appl. Phys.* **37** 2827

[6] Daltrini1 A M, Moshkalev1 S A , Monteiro1 M J R, Besseler1 E, Kostryukov A, Machida M 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 073309

[7] Turner M M, Lieberman M A 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 313

[8] Zhu X M, Pu Y K 2006 *Phys. Plasmas.* **13** 123501

[9] Liu L, Cao J X Niu T Y 2009 *Plasma Science and Technology* **11** 307

[10] www.nist.gov

[11] Hutchinson I H 2002 *Principles of Plasma Diagnostics* (Cambridge: Cambridge University Press) p116–117

[12] Wang Y, Cao J X, Song F L 2007 *Journal of Microwaves* **23** 29 (in Chinese) [王艳, 曹金祥, 宋法伦 2007 微波学报**23** 29]

[13] Amorim J, Maciel H S, Sudano J P 1991 *J. Vac. Sci. Technol.* B **9** 362

[14] Gilles Cunge, Brendan Crowley, David Vender, Turner M M 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 576

Mode transition of inductively coupled plasma in interlayer chamber

Du Yin-Chang[1)] Cao Jin-Xiang[1)†] Wang Jian[1)] Zheng Zhe[1)] Liu Yu[1)]

Meng Guang[2)] Ren Ai-Min[2)] Zhang Sheng-Jun[2)]

1) (*Key Laboratory of Basic Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China Department of Modern Physics, Hefei* 230026*, China*)

2) (*Test Physics and Numerical Mathematic Laboratory, Beijing* 100076*, China*)

(Received 27 June 2011; revised manuscript received 3 February 2012)

Abstract

We do some research on E-H mode transition of inductively coupled plasma (ICP) in the interlayer chamber, using the microwave phase and plasma spectrum diagnotic technique. The mode transition between E and H mode is a sudden changes phenomenon. The input power of the transition varies as the pressure changes in the chamber. The transition power from H to E is less than from E to H, so the hysteresis in power hence is established. The change of the relative spectral intensity is basically the same the variation of the electron density with input power. We obtain a stable plasma source, with an electron density ranging from 3.85×10^{11} cm^{-3} to 4.68×10^{11} cm^{-3}, an outer surface area of 0.3 m^2, and a thickness of 2 cm.

Keywords: ICP discharge, E-H Mode, plasma source, plasma spectrum

PACS: 52.70.Gw, 52.80.Pi

† E-mail: jxcao@ustc.edu.cn