

文章编号: 2095-2163(2021)01-0098-04

中图分类号: TL65

文献标志码: A

朗缪尔探针在射频离子源中的扰动仿真研究

侯文琦¹, 阳璞琼^{1,2}, 刘波¹, 关志全¹

(1 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2 磁约束核聚变研究重点实验室(南华大学), 湖南 衡阳 421001)

摘要: 准确的等离子体参数信息对射频离子源的研制十分重要, 为获得这些关键参数, 需要借助朗缪尔探针作为研究手段。研究利用 COMSOL 软件作为研究平台, 建立射频离子源的几何模型, 并加入探针作为变量, 通过仿真模拟得到不同功率下的电子密度、电子温度分布, 通过对比有、无探针加入的情况下所得参数的变化趋势, 来分析朗缪尔探针在射频离子源中的扰动情况。研究结果表明, 探针放入等离子体后, 会对等离子体产生扰动, 等离子体放电中心向右偏移大于 1 cm。该研究结果为射频离子源的设计以及朗缪尔探针的测量分析提供了参考。

关键词: 射频离子源; 朗缪尔探针; 理论模拟

Research on disturbance of Langmuir probe in radio frequency ion source

HOU Wenqi¹, YANG Puqiong^{1,2}, LIU Bo¹, GUAN Zhiquan¹

(1 School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China; 2 The Key Laboratory of Magnetic Confinement Nuclear Fusion Research(University of South China), Hengyang Hunan 421001, China)

[Abstract] Accurate plasma parameter information is very important to the development of radio frequency ion sources. To obtain these parameters, the Langmuir probe is selected as the research method. The research uses COMSOL software as the research platform to establish the geometric model of the radio frequency ion source, and adds the probe as a variable. Through simulation, the electron density and electron temperature distribution under different powers are obtained, and these parameters are compared with and without probes. So the disturbance of the Langmuir probe to the radio frequency ion source could be analyzed. The research results show that the simulation model is more reasonable through experiments; and after the probe is put into the plasma, the plasma will be disturbed, and the plasma discharge center shifts more than 1 cm to the right. Therefore, the research results provide a reference for the design of radio frequency ion source.

[Key words] radio frequency ion source; Langmuir probe; theoretical simulation

0 引言

朗缪尔探针能直接有效地检测出等离子体电子密度、电子温度等参数, 是一种结构简单、优质廉价、用途广泛的等离子体诊断工具^[1]。朗缪尔探针最初于 1924 年由 Irving Langmuir 发明, 用来研究水银灯放电的电子温度分布, 当年已经奠定了今天朗缪尔探针数据分析方法的基础, 而后因辉光放电荣获 1932 年诺贝尔化学奖。朗缪尔探针在国外已有将近一百年的发展历史, 针对不同的测量环境开发出了各种朗缪尔探针, 较为典型的开发公司有英国的 Hiden Analytical Ltd.、美国的 Scientific Systems 公司和爱尔兰的 Impedans Ltd. 等, 形成了极具集成性的产业化链发展趋势。在国内, 主要是各大高校和科研院所所在研究朗缪尔探针, 技术还未臻至成熟, 所以在工业生产中的使用也较少。研究分析可知, 朗缪

尔探针在国内极具发展前景, 在工程上的需求也很大, 但是国内的硬件设施和软件处理系统难以跟上实际应用场景中的工作需求^[2]。

在实际测量过程中, 由于射频等离子体处在一个剧烈变化的电磁环境中^[3], 探针诊断变得十分困难, 探针放入等离子体后, 会对等离子体产生扰动, 探针的表面及探针的支撑装置会额外增加等离子体的复合位置, 从而影响到等离子体的各种全局平衡^[4], 因此对朗缪尔探针对射频离子源产生的扰动来展开研究, 则显得尤为重要。

1 实验装置及仿真几何分析

射频离子源是中性束注入器件中最重要的部分, 相较于热阴极灯丝离子源, 具有使用寿命长、可靠性强及容易维护等特点, 因此得以应用在核聚变实验装置中。射频离子源通过射频感应加速电子,

基金项目: 国家自然科学基金(11675074)。

作者简介: 侯文琦(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 高功率电子学; 阳璞琼(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力电子技术、核能科学与工程研究。

通讯作者: 阳璞琼 Email: rocket80@163.com

收稿日期: 2020-11-06

碰撞激发气体产生等离子体。要发展高能量、高功率的中性束注入系统, 即需先完善大功率的射频离子源相关技术^[5-8]。其中, 在研制射频离子源的过程中, 获得准确的离子源参数信息十分关键。朗缪尔探针的出现给射频离子源等离子参数的诊断带来了极大便利。

1.1 实验装置

研究使用的设备如图 1 所示。该设备为一小型射频离子源系统, 系统中包括 1 MHz 10 kW 的射频发射机、射频天线线圈、等离子体放电室、真空泵以及其他辅助装置。



图 1 射频离子源实验装置

Fig. 1 Radio frequency ion source experimental device

离子源各部分主要技术参数和尺寸见表 1。放电室设计为一内径为 7.2 cm 的圆柱体, 采用外径约为 6 mm 的空心铜线制成 6 匝螺旋线圈作为外部激励, 铜线的外部包裹一层橡胶绝缘层, 线圈的内半径为 4.25 cm, 与放电室外径一致。在放电过程中采用氩气作为放电气体, 用于射频离子源的等离子体的激发。

表 1 离子源主要技术参数及尺寸

Tab.1 Main technical parameters and dimensions of ion source

序号	参数	值
1	线圈匝数	6
2	线圈铜管尺寸/mm	6
3	线圈半径/cm	4.25
4	线圈总宽度/cm	6.60
5	放电室长度/mm	200
6	放电室内径/mm	36

朗缪尔探针测量等离子体参数是一种直接有效的技术方法, 但在实际测量过程中, 往往会结合多种测量手段来综合考量测量结果, 研究中发现, 朗缪尔的探针测量结果并不准确, 所以最终目标就是分析朗缪尔探针的测量误差及提出相应的解决方案^[9]。在此之前, 通过 COMSOL 有限元分析软件来分析朗

缪尔探针等离子体内部的扰动情况。

1.2 仿真几何分析

研究中使用的朗缪尔探针如图 2 所示。探针头部采用耐高温的惰性导电材料: 钨, 除此之外的其他部分均用绝缘且耐高温的石英管密封。这是一个对称的双探针, 双探针对等离子体的干扰较小, 且不需要考虑参考电位, 更加适用于射频离子源下的等离子体诊断^[10]。仿真模型中也采用双探针的几何结构。

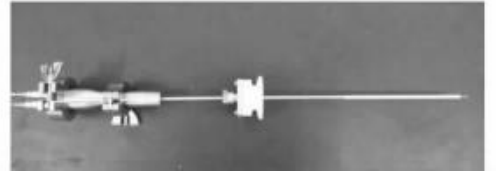


图 2 实验用朗缪尔探针

Fig. 2 Langmuir probe

结合实验所用的射频离子源设备, 构造出的仿真几何模型如图 3 所示, 该几何模型的尺寸与实验设备的尺寸一致。放电的初始条件为: 放电气体为氩气 (Argon), 工作气压为 2 Pa, 射频功率为 2 ~ 30 kW, 室温为 300 K, 电子密度初始值为 $1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, 初始电子平均能量为 5 eV, 电子迁移率为 $4.0 \times 10^{24} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 探针长度 2 mm, 探针半径为 0.05 mm, 探针放置的位置: (0.03, 0)。

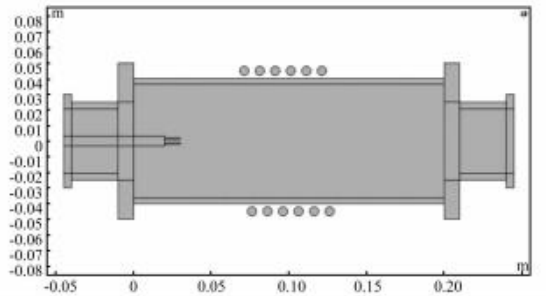


图 3 射频离子源几何结构图

Fig. 3 Geometric structure diagram of radio frequency ion source

采用 COMSOL 软件中的等离子体模块-感应耦合接口来研究离子源氩气放电过程, 通过求解一组电子密度和平均电子能的漂移扩散方程来求解电子密度和平均电子能量^[11-12]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e] = X_e, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e] + E\Gamma_e = X_e, \quad (2)$$

其中, X_e 为电子源, 获得该参数需对所有碰撞反应产生的电子进行求和, 假设有 M 个反应产生

或消耗电子,有 P 个电子-中性粒子碰撞。一般来说, $P \gg M$, 计算表达式如下:

$$X_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e, \quad (3)$$

其中, x_j 是反应 j 的目标物质的摩尔分数; k_j 是反应 j 的速率系数 (m^3/s), 由横截面数据计算得到; N_n 是总中性数密度 ($1/\text{m}^3$)。

在式(2)中, X_e 为电子能量损耗, 获得该参数需对所有反应的碰撞能量的损耗及逆行求和, 计算表达式如下:

$$X_e = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j, \quad (4)$$

其中, $\Delta \varepsilon_j$ 是反应 j 的能量损失 (V)。

能量扩散率 μ_e 根据下式计算:

$$\mu_e = \frac{1.01 \times 10^5}{p_g (\text{Pa})} \frac{T_g (\text{K})}{273.16} 1.52 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}), \quad (5)$$

由式(5)可计算出电子扩散率 D_e 、能量扩散率 D_e , 计算公式如下:

$$D_e = \mu_e T_e, \quad (6)$$

$$\mu_e = \frac{5}{3} \mu_e, \quad (7)$$

$$D_e = \mu_e T_e. \quad (8)$$

2 朗缪尔探针对射频离子源的扰动分析

2.1 放电中心位置的偏移

通过调研文献^[13-15]、查阅书籍^[4], 就会发现: 朗缪尔探针的伸入, 会对等离子体产生扰动。这里, 通过控制变量的方法得到了电子密度和电势的分布情况。通过观察电子密度分布情况, 具体如图4所示, 由于探针的伸入, 放电中心有很明显的偏移, 并且探针伸入越多, 偏移也越多。探针对应离子体的扰动, 一方面不可避免地会从等离子体局部抽取荷电粒子, 另一方面也会提供一个等离子体与地之间的射频低阻抗通道。

探针伸入前后电子温度的变化如图5所示, 两者的温度变化范围是一样的, 大约在 2.6 ~ 3.1 eV; 但内部电子温度分布差异很明显, 探针附近的电子温度明显上升, 导致这种情况的主要原因在于探针发热以及探针通电产生热。探针在离子源中收集电流时会受到带电粒子的轰击, 从而温度上升; 另一方面, 由于电流的热效应, 探针自身的温度也会上升。尤其是在较高的电压下收集电子时, 受到高电压的影响, 电子速度大幅加快, 以至于轰击产生更大的热效应; 与此同时, 探针上施加的电流值过大, 也将导致探针温度上升, 探针电阻随之变大, 严重影响测量

结果, 甚至还会烧毁探针。

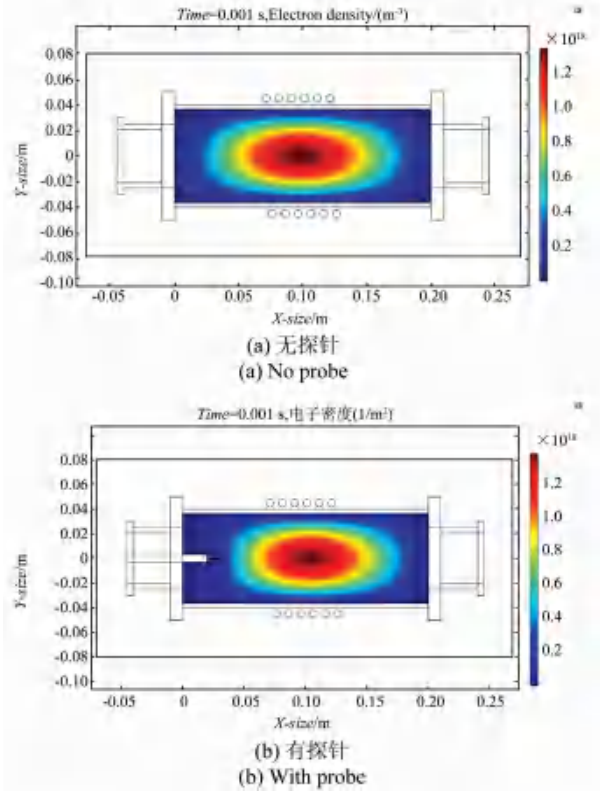


图4 射频离子源电子密度分布情况

Fig. 4 The electron density distributions of the radio frequency ion source

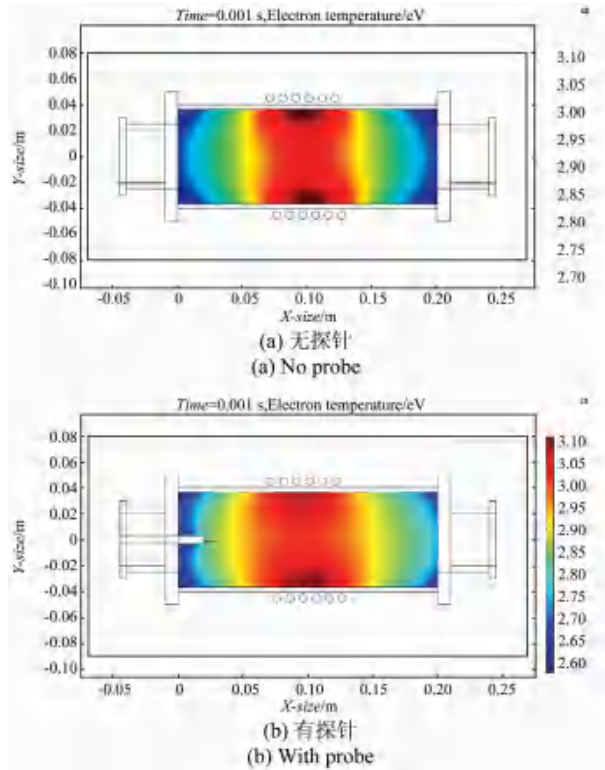
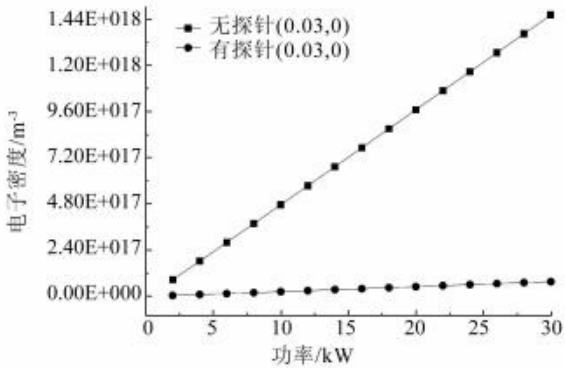


图5 射频离子源时电子温度分布情况

Fig. 5 The distribution of electron temperature

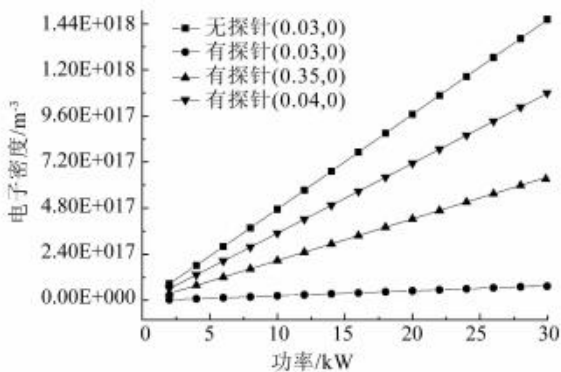
2.2 等离子体参数变化趋势

射频功率的大小对离子源放电会产生很大的影响。射频功率的大小会影响感应磁场的大小,从而影响到感应电场的大小,而电子获得能量的大小正取决于离子源内感应电场的大小。在仿真过程中,放电功率设置为2~30 kW,气压设置为2 Pa。电子密度随射频功率的变化趋势如图6所示,随着功率的增加,电子密度的大小几乎呈现出线性递增的趋势。因为功率增加,电子的有效碰撞次数也会随之增加,从而产生更多电子。另外,从图6(a)中可以看出,插入探针的曲线增长趋势十分缓慢,这是因为探针伸入等离子体中时周围会被一层空间电荷所包裹,这就是常说的鞘层,鞘层的原理相对较复杂,但能确定的是,探针表面的鞘层会吸引正离子、排斥电子,因此探针放置处的电子密度随功率变化相对缓慢。图6(b)测量的是距离探针位置0.5 cm、1 cm处电子密度的变化,从图6中曲线变化可以知道,远离探针的区域电子密度增长速度较快,伸入探针后电子密度向右漂移的距离大于1 cm。



(a) 有无探针对比

(a) With or without probe comparison



(b) 探针不同位置与无探针对比

(b) Comparison of different positions of probe and no probe

图6 电子密度随射频功率变化趋势

Fig. 6 Trend of electron density with RF power

3 结束语

通过 COMSOL 有限元分析软件对射频离子源的几何结构进行模拟分析,结合仿真所得图形和数据,分析了朗缪尔探针对于射频离子源的扰动情况。这些研究对下一步的工作提供了很好的指导。虽然其结构简单、造价便宜,但是在使用过程中,其数据的处理必然要考虑到自身对等离子体放电的扰动以及电磁干扰等因素。在后续研究中,将会对几何结构进行优化,并对朗缪尔探针测量所造成的误差进行深入分析,继而结合实验测量结果,找出有效的解决方法。

参考文献

- [1] 殷冀平,乔宏,蔺增,等. 基于 LabVIEW 的朗缪尔单探针数据处理系统[J/OL]. 真空:1-6[2020-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1174.TB.20200722.1652.002.html>.
- [2] 陈伟. 朗缪尔探针诊断系统的研制及其应用[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [3] 李文秋,王刚,相东,等. 等离子体鞘层中朗缪尔探针吸收离子电流理论的数值模拟[J]. 真空科学与技术学报,2016,36(11):1271-1278.
- [4] 帕斯卡·夏伯特,尼古拉斯·布雷斯韦特. 射频等离子体物理学[M]. 王友年,徐军,宋远红,译. 北京:科学出版社,2015.
- [5] 张黎,许永建,谢亚红,等. EAST 中性束注入射频离子源放电模拟研究[J]. 核技术,2019,42(2):76-81.
- [6] 高洋洋,胡纯栋,盛鹏,等. NBI 射频离子源探针信号采集系统[J]. 计算机系统应用,2016,25(4):63-67.
- [7] 戴阳,吴卫东,高映雪,等. Langmuir 探针诊断低压氩等离子体电子密度与温度[J]. 强激光与粒子束,2010,22(6):1234-1238.
- [8] 张健,任春生,齐雪莲,等. 射频感应等离子体的 Langmuir 探针和光谱诊断[J]. 核聚变与等离子体物理,2007,27(2):156-162.
- [9] HOPWOOD J. Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films,1993,11(1):152-156.
- [10] 李京勇,刘智民,谢亚红,等. 射频离子源朗缪尔双探针设计[J]. 真空科学与技术学报,2017,37(5):484-487.
- [11] BREZMES A O, BREITKOPF C. Fast and reliable simulations of argon inductively coupled plasma using COMSOL[J]. Vacuum,2015,116:65-72.
- [12] MESHCHERYAKOVA E, ZIBROV M, KAZIEV A V, et al. Langmuir probe diagnostics of low-pressure inductively coupled argon plasmas in a magnetic field[J]. Physics Procedia,2015,71:121-126.
- [13] AZOOZ A A, AL-JAWAADY Y A, ALI Z T. Langmuir probe RF plasma compensation using a simulation method[J]. Computer Physics Communications,2014,185(1):350-356.
- [14] THAKUR G, KHANAL R, NARAYAN B. Characterization of Arc Plasma by movable single and double Langmuir probes[J]. Fusion Science and Technology,2019,75(4):1-6.
- [15] JIN Yuzhong, ZHAO Wei, WATTS C, et al. Design and analysis of a divertor Langmuir probe for ITER[J]. Fusion Science and Technology,2019,75(2):120-126.