

面向未来磁约束聚变堆的大功率射频负氢离子源

高飞, 王友年

¹大连理工大学、物理学院、三束材料改性教育部重点实验室, 大连 116024

Email: ynwang@dlut.edu.cn

摘要: 中性束加热技术作为一种二次加热手段, 是实现磁约束核聚变的关键技术之一。相对正离子束而言, 负离子束在高速区具有更高的中性化效率, 因此在国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划和我国的中国聚变工程实验堆 (CFETR) 中已经把射频负氢离子源作为重要的研究方向。射频负氢离子源主要分为放电源区、扩散区和引出区。在放电源区采用大功率射频感性耦合放电, 产生高密度的氢等离子体 ($n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}, T_e \sim 20 \text{ eV}$); 在扩散区, 由于扩散效应及施加过滤磁场来冷却高能电子, 从而可以产生负氢离子; 在引出区, 通过在栅网上涂金属铯, 可以进一步增强负离子的产生。在基于负氢离子的中性束系统中, 射频负氢离子源是其关键部件之一, 如何产生大面积、高密度的负氢离子是提高中性束加热效率的核心问题。因此对大功率射频负氢离子源开展系统的研究, 将更好的探索提高负氢离子产额的有效方法。

大连理工大学射频等离子体模拟与实验研究团队 (PSEG) 在实验上自主设计并搭建了一套小型化的 10 kW 的射频感性耦合负氢离子实验平台, 并通过 VI 探针、Langmuir 探针等对射频功率耦合效率、等离子体电子特性等进行了实验诊断。在模拟上, 首先建立了整体模型和动理学方程混合模型快速计算分析等离子体的产生, 尤其是探索负氢离子的产生机制; 其次建立了三维流体仿真模拟, 优化负氢离子源的腔室结构、磁场位型等。研究结果表明: (1) 线圈匝数越多, 射频功率耦合效率越高; 随着气压的增加, 射频耦合效率呈现非线性的变化。(2) 采用低频放电有效地增加射频电场在等离子体中的入射深度, 而且避免了高频放电中的反常趋肤效应和负功率吸收的问题。(3) 低气压下电子满足非局域动力学理论, 大量的高能电子能够从放电源区直接到扩散区; 而高压下电子被局域在放电源区, 扩散区中的电子密度急剧下降。随着射频功率的增加, 能够有效的增加电子密度。(4) 负氢离子的密度随着气压的增加先增加后趋于饱和, 其中振动态 $\text{H}_2(6 \leq \nu \leq 11)$ 的解吸吸附过程是负氢离子产生的主要机制; 而 H_3^+ 与 H^- 的中和过程以及氢原子引起的解吸附过程是负氢离子的主要损失机制。(5) 改变负氢离子源上扩散腔室的器壁材料的透磁性, 能够有效的抑制底部横向冷却磁场对放电源区的影响, 从而提高等离子体的密度。

关键词: 射频感性耦合等离子体; 中性束加热; 实验诊断研究; 数值模拟研究

基金项目: 感谢国家磁约束聚变科学项目 (No. 2015GB114000) 和重点研发计划课题 (No. 2017YFE0300106) 对本论文的资助。