

兆瓦级射频离子源系统的研制

严龙文¹, 雷光玖¹, 刘东平², 李明¹, 张贤明¹, 赵森¹, 卜英南¹, 毕正华³, 谢炜明¹, 张余弦¹, 邹桂清¹, 魏会领¹, 范红玉³, 倪维元³, 刘璐³, 牛金海³, 黄丽萍¹, 陈浩¹, 耿少飞¹, 马雪珍¹, 曹建勇¹, 卢波¹, 周才品¹, 许敏¹, 段旭如¹, 刘永¹

¹ 中核集团核工业西南物理研究院, 成都 610225

² 大连理工大学, 大连 116024

³ 大连民族大学, 大连 116100

Email: lwyan@swip.ac.cn

摘要: 射频 (RF) 离子源是 ITER 和未来聚变堆中性束加热系统的关键部件[1], 需要对它的特性进行广泛深入的研究。利用核工业西南物理研究院的大功率射频离子源实验平台以及大连民族大学的射频等离子体源中型实验平台, 通过与国外等离子体物理研究所的密切合作, 我们开展了中性束大功率射频离子源的物理问题研究。主要内容包括: 高密度射频等离子体产生机理研究, 射频等离子体密度及其分布控制, 大功率射频离子源引出研究, 大功率射频等离子体诊断技术研究, 射频离子源优化设计的数值模拟研究, 射频等离子体负离子产生机理的模拟研究等。提高了大功率射频离子源的引出效率, 为自主设计中国聚变工程试验反应堆 (CFETR) 的中性束大功率离子源系统提供了理论依据。

大功率射频离子源系统已经在核工业西南物理研究院建成, 如图 1 所示。频率为 2MHz、功率为 80kW 的全固态射频发生器系统由 8 个功率为 10kW 的固态射频发生器单元和一台同向射频功率合成系统组成, 射频发生器的电效率达到了 92%, 其电压驻波比 (VSWR) 为 1.01, 达到了国际领先水平。在射频功率为 $P_{RF}=26\text{ kW}$ 时, 单个射频离子源的离子束引出参数为: 流强 20A/能量 32keV/功率 0.6MW, 而设计指标

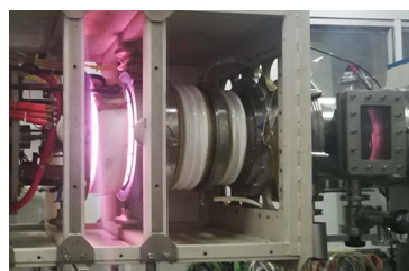


图 1 兆瓦级射频离子源的放电照片

是 20A/50keV/1MW, 引出参数主要是受到加速器高压电源 (电容器组容量) 的限制。在加速极下游 1.3 米处用红外成像技术测量的束密度分布为高斯分布, 束发散的角度小于 1.1° 。束的引出电流密度几乎随射频功率线性增加, 在 $P_{RF}=32\text{ kW}$ 时达到 240 mA/cm^2 。在等离子体栅极前面的离子密度大约为 $1 \times 10^{18}\text{ m}^{-3}$, 氢离子束的份额达到了 79%, 在射频功率较低时的等离子体均匀度在 90% 以上。目前, 对射频离子源的性能改进研究仍在进行之中。

关键词: 射频离子源; 固态射频源

参考文献:

[1] U. Fantz, *et al.* Towards powerful negative ion beams at the test facility ELISE for the ITER and DEMO NBI systems, Nucl. Fusion 2017, 57 (11) 116007.

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 11320101005)