

EAST中性束注入射频离子源 放电模拟研究

张黎^{1,2} 许永建¹ 谢亚红¹ 韦江龙¹ 梁立振¹ 胡纯栋¹

1(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 中性束注入加热是核聚变中非常重要的一种辅助加热手段,离子源所能达到的性能决定了东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)中性束注入所能达到的指标。为了实现长脉冲和高功率加热的需求,采用射频离子源取代传统的热阴极离子源已成为未来离子源发展的一种趋势。本文对射频离子源的结构设计和放电特性进行了理论模拟研究,给出了线圈匝数、匝间距、驱动器尺寸、放电气压和射频功率等参数与等离子体参数间的关系,为接下来射频离子源的研制和实验奠定一定的理论基础。

关键词 中性束注入, 射频离子源, 理论模拟, 放电特性

中图分类号 TL61+2.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020602

Simulation study on the discharge of radio frequency ion source for EAST neutral beam injector

ZHANG Li^{1,2} XU Yongjian¹ XIE Yahong¹ WEI Jianglong¹ LIANG Lizhen¹ HU Chundong¹

1(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] Neutral beam injection heating is a very important auxiliary heating method in nuclear method in nuclear fusion. The high current ion source is one of the key components of neutral beam injector. Its performance determines the achievable goals of the NBI for the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST). [Purpose] This study aims at the fundamental physical characteristics of radio frequency plasma discharge by simulating the discharge of radio frequency (RF) ion source. [Methods] The structure design and discharge characteristics of radio frequency ion source were simulated theoretically. Two-dimensional inductively coupled plasma model was used to simulate the RF ion source. The relationship between turns of coil, turn space, size of driver, air pressure, RF power and the discharge characteristics was analyzed. [Results] The simulation results gave the optimal parameters of the RF ion source for EAST NBI that can meet the future needs of long pulse operation and the future demands of high energy ion source of NBI. [Conclusions] The simulation results lay a foundation for the development and experimental study of RF ion source.

Key words Neutral beam injection, RF ion source, Theoretical simulation, Discharge characteristics

中国科学院合肥大科学中心重点研发项目(No.2016HSC-KPRD002)、国家自然科学基金(No.11505225)资助

第一作者: 张黎, 女, 1993年出生, 2018年于中国科学技术大学获硕士学位, 主要从事射频离子源等离子体特性分析

通信作者: 胡纯栋, E-mail: cdhu@ipp.ac.cn

收稿日期: 2018-03-19, 修回日期: 2018-09-05

Supported by Key Program of Research and Development of Hefei Science Center, Chinese Academy of Sciences (No.2016HSC-KPRD002) and National Nature Science Foundation of China (No.11505225)

First author: ZHANG Li, female, born in 1993, graduated from University of Science and Technology of China with a master's degree in 2018, focusing on the analysis of the characteristics of the radio frequency plasma discharge

Corresponding author: HU Chundong, E-mail: cdhu@ipp.ac.cn

Received date: 2018-03-19, revised date: 2018-09-05

在核聚变实验研究中,中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)是4种辅助加热方法中效率最高、物理机制最清楚的加热手段^[1-3]。目前东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST) NBI使用的是热阴极离子源,其性能在很大程度上决定了EAST NBI所能达到的最高指标。与传统的弧源相比,射频(Radio Frequency, RF)离子源具有以下优点:没有灯丝,离子源寿命长;机械结构简单,安装维护方便;射频功率通过传输隔离,射频驱动电源无需工作于高压区;没有灯丝电源和弧电源,供电系统相对简单^[4-5]。为了满足长脉冲运行和未来NBI高能离子源的要求,国内外众多的NBI研究团队已开始了RF离子源的研制以替代传统的热阴极离子源^[6-7]。EAST NBI团队调研了国内外RF源的发展现状并且结合已有的理论研究和实验基础展开了相关的设计和研究,由于是首次研制,因此开展了等离子体产生特性相关的模拟研究以优化RF源的设计。

NBI RF离子源可简单地分为两个部分:圆柱形驱动器、矩形扩展室。驱动器外部缠绕的射频线圈通过电感耦合激发气体放电产生等离子体,扩展室的主要作用是通过对磁场的降低电子温度。为了研究等离子体放电的基本物理特性,采用二维电感耦合等离子体模型进行数值模拟。

1 NBI RF离子源参数探讨

为了满足NBI高能高功率离子束引出的要求,射频离子源在设计时必须考虑等离子体放电特性,以使设计的离子源参数能满足实际要求。影响RF离子源放电特性的主要部件是驱动器,驱动器的尺寸以及缠绕在它外部的线圈匝数以及线圈的间距都会对等离子体的参数有影响。因此,进行驱动器相关参数的等离子体放电模拟研究是非常必要的。

1.1 放电模型及基本参数

本文采用的是二维流体模型来研究氢气放电过

程,主要是通过漂移扩散方程来求解电子密度和平均电子能量:

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

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

式中: R_e 是电子源,通过计算所有反应产生的电子求和获得; R_e 是电子能量损耗,通过所有反应的碰撞能量损耗求和获得;电子扩散率 D_e 、电子迁移率 μ_e 、能量扩散率 D_e 和电子流 Γ_e 是通过与电子迁移率有关的方程求得。

在放电过程中,可能发生的化学反应过程主要有弹性碰撞、电离、离解过程。在表1中,我们给出了模拟中所包含的主要反应过程及相关的参数。图1是各反应碰撞截面与电子能量的关系^[8]。

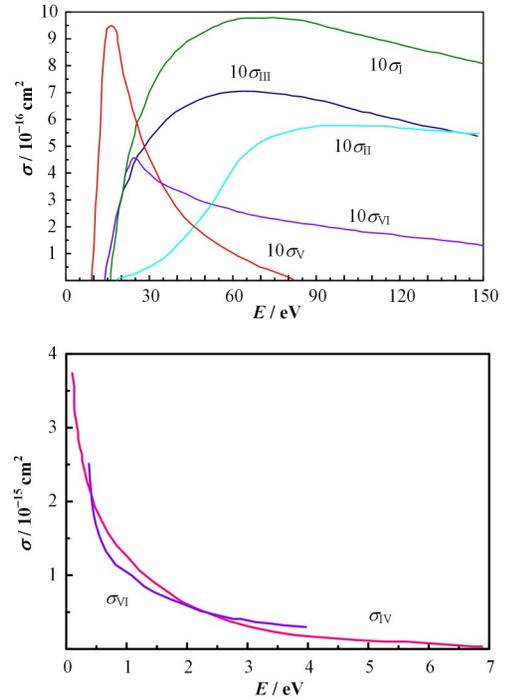


图1 氢放电中截面与电子能量的关系
Fig.1 Relationship between section and electron energy in hydrogen discharge

表1 氢放电空间产生各类粒子的过程及其特征值

Table 1 The Process and characteristic values of various types of particles produced by hydrogen discharge

序号 Number	反应 Reaction	阈能 Threshold energy / eV	最大截面 Maximum cross section $\sigma_{\max} / 10^{-16} \text{ cm}^2$	最佳能量 Optimum energy E_{\max} / eV
I	$\text{H}_2 + \text{e} = \text{H}_2^+ + 2\text{e}$	15.4	0.98	70
II	$\text{H}_2 + \text{e} = \text{H}^+ + \text{H} + 2\text{e}$	18	0.058	100
III	$\text{H} + \text{e} = \text{H}^+ + 2\text{e}$	13.6	0.7	64
IV	$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 = \text{H}_3^+ + \text{H}$	热能 Thermal energy	大(100) Large(100)	≈ 0
V	$\text{H}_2 + \text{e} = \text{H}_2^* + \text{e}$	8.8	0.9	17
VI	$\text{H}_3^+ + \text{e} = \text{H} + \text{H} + \text{H}$	热能 Thermal energy	大(100) Large(100)	≈ 0

电感耦合等离子体的二维示意图如图2所示。 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别为驱动器直径、扩展室长度、扩展室高度、驱动器高度。为了简化模拟研究,将扩展室在二维模拟过程中考虑为圆柱形,参考实际源扩展室的尺寸650 mm(L) \times 260 mm(W) \times 190 mm(H),利用体积/壁表面积比^[9]换算出圆柱形扩展室的直径,取 D_2 为360 mm,高度不变,以使模拟结果与实际结果相匹配。 D_1 、 D_3 、 D_4 分别为:20 cm、19 cm和12 cm。放电的初始条件为:电子密度为 $1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$,室温为300 K,初始电子平均能量5 eV和电子迁移率 $4.0 \times 10^{24} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

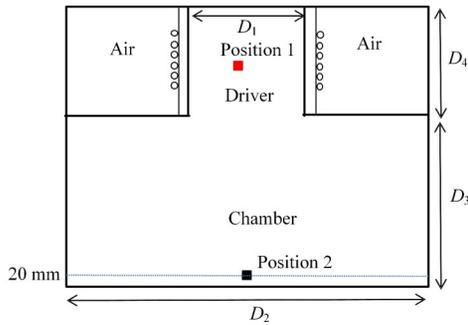


图2 射频离子源的模拟几何结构
Fig.2 Simulation geometry of RF ion source

1.2 线圈匝数及匝间距对等离子体参数的影响

线圈是射频离子源最核心的部件之一,通常采用圆筒螺旋状天线。在通电线圈内部有两种电场存在:线圈两端的高频电位差建立的轴向电场 E_1 和磁场变化产生的涡旋电场 E_0 。在两种电场的作用下,电子获得能量激发氢气分子形成等离子体。影响两种电场大小的参数主要是线圈电感,从天线线圈电感的理论值公式可以得出影响其大小的主要因素为线圈匝数和匝间距:

$$L = \frac{\pi k \mu_0 \mu_r N^2 r^2}{l} = \frac{\pi k \mu_0 \mu_r N r^2}{d} \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$; μ_r 为线圈内部磁芯的相对磁导率,空心线圈时, $\mu_r = 1$; N 为线圈匝数; r 为线圈截面半径; l 为线圈长度,等于匝间距离 d 与匝数的乘积; k 为修正系数,取决于线圈半径与线圈长度 l 的比值,假设 $x = 2r/l$,则 k 的值可由式(4)求出:

$$k = \frac{1}{1 + 0.45x - 0.005x^2} \quad (4)$$

因此,在调研了大量相关射频离子源文献的基础上^[10-15],放电模拟采用的线圈匝数分别为:2、3、4、5、6、7、8,线圈匝间距分别为:8 mm、9 mm、10 mm、11 mm。使用单一变量的方法分别对线圈匝数和匝间距进行了模拟放电的参数对比,固定驱动器直径

为20 cm,放电功率和气压分别是10 kW和2 Pa,取距离扩展室底部20 mm处的密度剖面中心线(图2)做电子密度曲线。

图3是在10 kW和2 Pa的模拟条件下得出的电子密度和电子温度的二维分布图,它表明电子密度的峰值出现在扩展室中心偏上的位置,而电子温度的最大值出现在侧壁即线圈安装的位置处。固定线圈匝间距为9 mm,改变线圈匝数得到的电子密度分布如图4所示。它显示随着线圈匝数的增加,电子

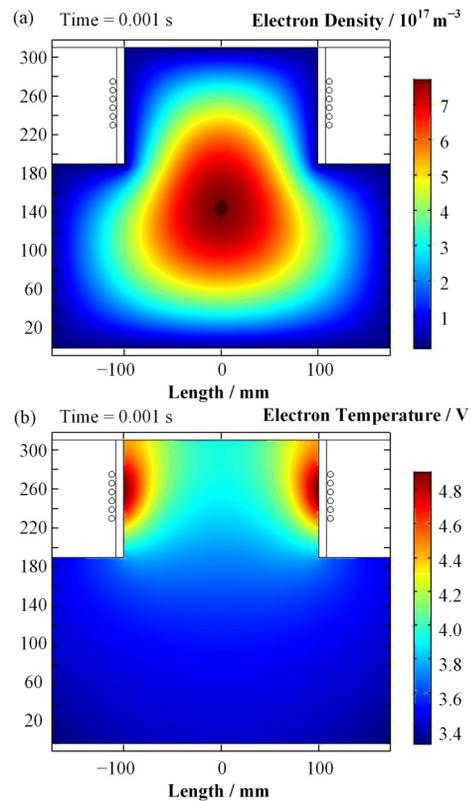


图3 等离子放电参数分布特性
(a) 电子密度分布, (b) 电子温度分布

Fig.3 The spatial distribution diagram of the plasma parameters (a) Electron density, (b) Electron temperature

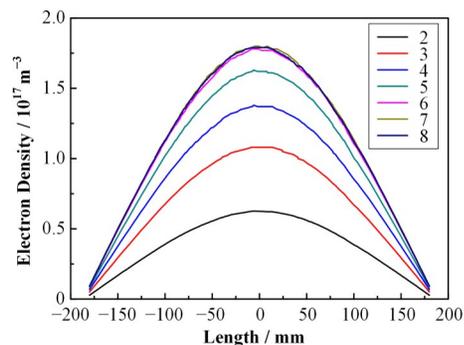


图4 线圈匝数对电子密度的影响 (10 kW, 2 Pa, 9 mm)
Fig.4 The effect of coil turns on electron density (10 kW, 2 Pa, 9 mm)

密度逐渐增大,有量级的跃变,当线圈匝数达到6匝并增加到更多时,电子密度的值基本保持不变。因此,设计RF离子源线圈的匝数选为6匝。

固定线圈匝数为6匝变换匝间距得到的电子密度分布如图5所示,它表明随着匝间距的变化,电子密度的大小没有明显变化,说明匝间距大小对电子密度的影响很小,从式(1)也可知线圈匝间距对线圈电感值的影响很小即其对电场的影响很小。然而在实际放电过程中,线圈是直接暴露在空气中的,在高功率放电下可能会因为线圈之间产生的高电压导致打火现象的发生,所以线圈匝间距不能太小。考虑到线圈匝间的绝缘,在EAST NBI射频离子源设计时选择匝间距为9 mm。

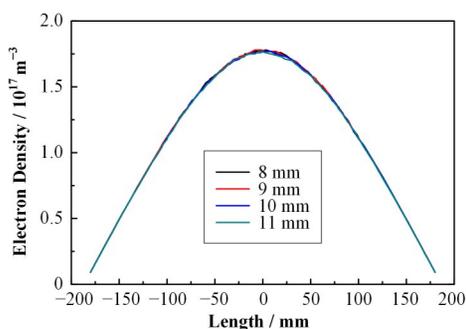


图5 线圈匝间距对电子密度的影响(10 kW, 2 Pa, 6匝)

Fig.5 The effect of coil spacing on electron density (10 kW, 2 Pa, 6 coils)

1.3 驱动器尺寸对等离子体参数的影响

固定线圈匝数6匝,匝间距9 mm,改变驱动器的直径对其进行等离子体放电模拟,结果如图6所示。图6上等离子体密度分布的情况表明随着驱动器尺寸的增加,等离子体密度逐渐增大,但变化幅度较小。因此在选择NBI射频离子源的驱动器尺寸时综合考虑了NBI离子源参数要求和引出区域的大

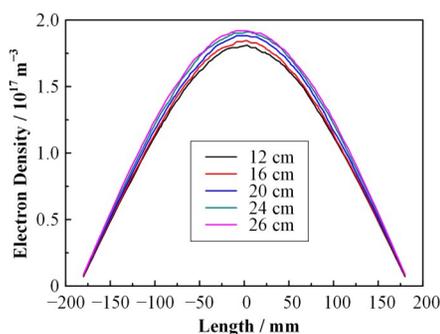


图6 驱动器尺寸对电子密度的影响(10 kW, 2 Pa, 6匝, 9 mm)

Fig.6 The effect of the size of driver on electron density (10 kW, 2 Pa, 6 coils, 9 mm)

小并参考国际同行的设计经验,且考虑到实验应用过程中可操作空间等因素,确定NBI射频离子源的驱动尺寸为20 cm。

2 EAST NBI射频离子源的放电特性分析

中性束用大面积强流离子源,对产生等离子体的相关参数有一定的要求,比如密度均匀性、密度的大小、电子温度的分布等。电子的密度值决定了等离子体的密度大小,等离子体密度决定着中性束引出的电流功率的大小,从而进一步影响中性束的加热效率。电子温度的大小对负氢离子的产生具有重要作用,温度越低越有利于负氢离子的产生。因此,必须展开等离子体放电特性的研究,以优化参数设计满足高功率强流离子源的实验需求。根据最终确定的EAST NBI射频离子源的参数,进行了一系列等离子体放电特性的研究,包括放电气压和射频功率对电子密度和电子温度的影响,测量点如图1的位置1(驱动中心)和位置2(扩展室底部)。

射频功率对离子源的放电具有重要影响,其大小对等离子体的参数具有至关重要的作用。射频功率会影响感应磁场的大小进而影响感应电场的大小,而感应电场的大小决定了电子获取能量的大小,线圈产生的电场和磁场分布如图7所示。图7显示电场和磁场的最大值均出现在线圈附近,当功率变化时,两者的值均会发生变化,因此研究功率对等离子体参数的影响是具有重要意义的。本文模拟采用的放电功率为5~43 kW,气压固定为2 Pa。从图8可以看出随着功率的增加,电子密度不断增大,几乎呈线性关系。这是因为随着功率的增加,电子耦合了更多的能量,电子的有效碰撞次数增加,导致放电更加完全,产生更多的电子。因此,在放电过程中,可以通过调节射频功率获得不同的电子密度以满足实验所需。电子温度随着功率的变化如图9所示。随着功率的不断增大,电子温度的大小基本保持不变,这与其他装置所做的实验结果相符合^[16-18]。这是因为电子吸收更多的功率使电子温度变大,但是这也导致了电子与粒子的碰撞次数增加,将更多的能量传递给了其他粒子,电子温度逐渐降低直到不能再与其他粒子进行有效碰撞。因此,功率的增加不能使最终放电稳定后的电子温度发生明显变化。

放电气压是影响离子源放电性能的重要运行参数,其大小与等离子体密度、均匀性和源效率都有密切的关系。本次模拟采用的放电气压为1~3 Pa,功率固定为10 kW。从图10可以看出,随着气压的增加,电子密度不断增大,这是因为随着气压的增加,

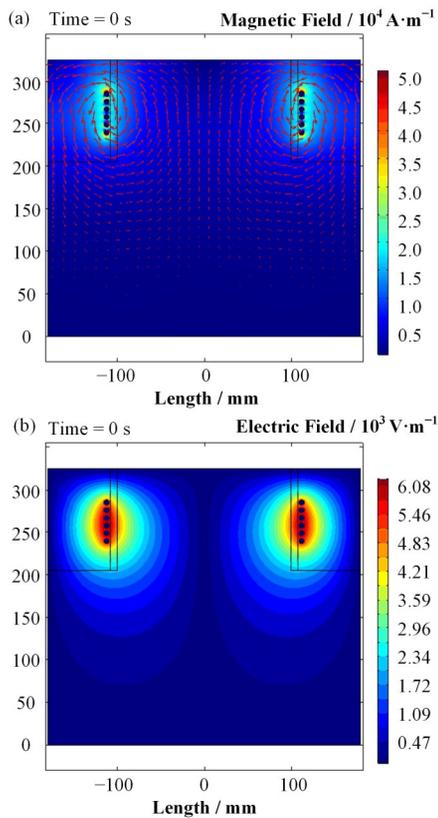


图7 射频线圈产生的磁场(a)和电场(b)分布 (10 kW, 2 Pa)
Fig.7 The distribution of magnetic field (a) and electric field (b) generated by RF coils (10 kW, 2 Pa)

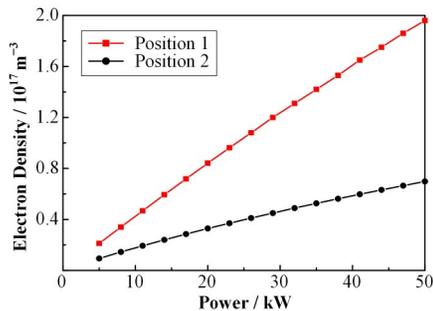


图8 功率对电子密度的影响 (2 Pa)
Fig.8 The effect of RF power on electron density (2 Pa)

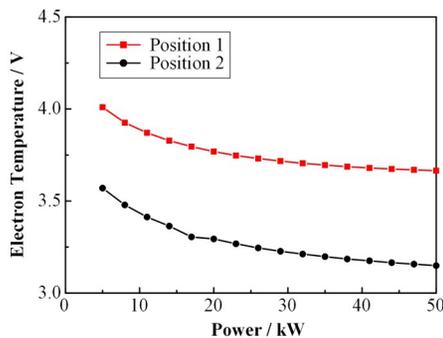


图9 功率对电子温度的影响 (2 Pa)
Fig.9 The effect of RF power on electron temperature (2 Pa)

电子的平均自由程减小,电子与周围粒子的碰撞次数增加,使等离子体的电离率增加,电离出更多的电子。图 11 为气压对电子温度的影响。随着气压的增大,电子温度不断降低,这是因为随着压强的增加,粒子密度增大,电子平均自由程减小,电子与粒子的碰撞截面增大,电子将更多的能量用于电离、激发等过程,导致电子能量降低,电子温度下降,这与实验结果相符^[16-18]。可通过调节气压改变电子密度和电子温度的大小进行放电实验研究,以寻求最佳的运行气压。

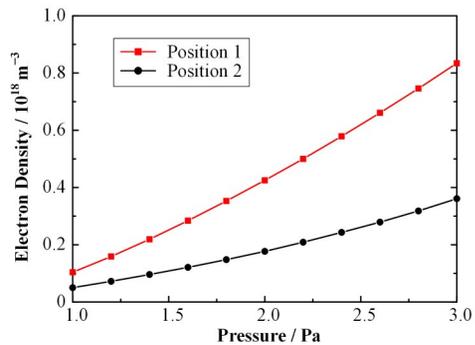


图10 气压对电子密度的影响 (10 kW)
Fig.10 The effect of gas pressure on electron density (10 kW)

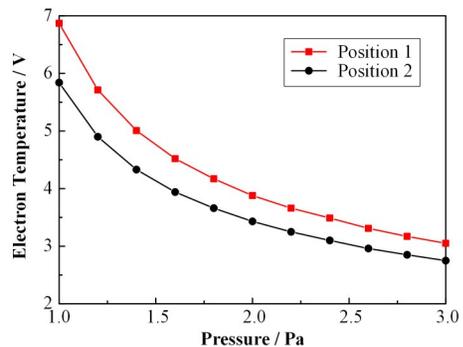


图11 气压对电子温度的影响 (10 kW)
Fig.11 The effect of gas pressure on electron temperature (10 kW)

3 结语

本文通过模拟实现了对射频离子源放电室结构的模拟优化并根据国内外同行的研究结果确定了 EAST NBI 射频离子源的结构。在此基础上研究了射频离子源的放电特性,包括射频功率和气压对电子温度和电子密度的影响。与国内外同行的实验结果相比,本文的模拟结果具有一定的参考价值,所用的物理模型能够用于研究射频离子源的放电特性分析。本文的研究结果为射频离子源的优化和实验放电奠定了一定的基础。在接下来的工作中,将会把 EAST NBI 射频离子源的实验结果与模拟结果进行

比对,进一步优化模型的设计。

参考文献

- 1 Hu C D, Xie Y H, Xie Y L, *et al.* Overview of development status for EAST-NBI system[J]. *Plasma Science and Technology*, 2015, **17**(10): 817–825. DOI: 10.1088/1009-0630/17/10/02.
- 2 Wan B N, Teams H T. Recent experiments in the EAST and HT-7 superconducting tokamaks[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, **49**(10): 593–598. DOI: 10.1088/0029-5515/49/10/104011.
- 3 Hu C D, Xu Y J, Xie Y L, *et al.* The recent development of the EAST neutral beam injector[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, **32**(5): 39–42. DOI: 10.1088/0256-307X/32/5/052901.
- 4 Gaio E, Kraus W, Martens C, *et al.* Studies on the radio frequency power supply system for the ITER NBI ion source[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2007, **82**(5–14): 912–919. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.07.028.
- 5 Xie Y H, Hu C D, Jiang C C, *et al.* Development and preliminary results of radio frequency ion source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(2): 02B302. DOI: 10.1063/1.4931786.
- 6 Speth E, Falter H D, Franzen P, *et al.* Overview of the RF source development programme at IPP Garching[J]. *Nuclear Fusion*, 2006, **46**(6): 220–238. DOI: 10.1088/0029-5515/46/6/s03.
- 7 Komppula J, Tarvainen O. Plasma heating power dissipation in low temperature hydrogenplasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, **22**(10): 034017. DOI: 10.1063/1.4934229.
- 8 张华顺. 离子源和大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 358–409.
ZHANG Huashun. Ion source and high power neutral beam source[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 358–409.
- 9 Boeuf J P, Hagelaar G J M, Sarrailh P, *et al.* Model of an inductively coupled negative ion source II: application to an ITER type source[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2011, **20**(1): 015002. DOI: 10.1088/0963-0252/20/1/015002.
- 10 An Y H, Jung B K, Hwang Y S. Enhanced surface production in H-ion sources by introducing a negatively biased secondary electrode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(2): 02A702. DOI: 10.1063/1.3273059.
- 11 Freisinger J, Kraus W, Lensing J, *et al.* The RF-ion source RIG for neutral injection[J]. *Fusion Technology*, 1983: 1317–1320. DOI: 10.1016/b978-1-4832-8374-6.50195-7.
- 12 Feist J H, Kraus W, Speth E, *et al.* Test of an RF-ion source with a large scale extraction system[M]. *Fusion Technology*, 1986. DOI: 10.1016/b978-1-4832-8376-0.50152-2.
- 13 Kraus W, Feist J H, Speth E, *et al.* A high Power RF Plasma Source for ASDEX Upgrade Neutral Beam Injection[C]. Karlsruhe, Germany: Proceedings of the 18th Symposium on Fusion Technology, 1994: 473–476. DOI: 10.1016/b978-0-444-82220-8.50086-8.
- 14 Divergilio W F, Goede H, Fosnight V V. Development of radio frequency induction plasma generators for neutral beams[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, **57**(7): 1254–1260. DOI: 10.1063/1.1138638.
- 15 Goede H, Divergilio W F, Fosnight V V. Radio frequency induction plasma generator 80-kv test stand operation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, **57**(7): 1261–1265. DOI: 10.1063/1.1138639.
- 16 Yang W, Li H, Gao F, *et al.* Hybrid simulations of solenoidal radio-frequency inductively coupled hydrogen discharges at low pressures[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, **23**(12): 123517. DOI: 10.1063/1.4971807.
- 17 Li H, Liu Y, Zhang Y R, *et al.* Nonlocal electron kinetics and spatial transport in radio-frequency two-chamber inductively coupled plasmas with argon discharges[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(23): 6538. DOI: 10.1063/1.4986495.
- 18 Gao F, Zhang Y R, Li H, *et al.* Spatial distributions of plasma parameters in inductively coupled hydrogen discharges with an expansion region[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, **24**(7): 621. DOI: 10.1063/1.4989704.