

多峰场负氢离子源磁体布局对等离子体特性影响的数值模拟研究

杨超 印茂伟 尚丽萍 王卫 刘毅 夏连胜 邓建军

Numerical simulation research of plasma characteristics in a multi-cusp proton source based on magnets layout

Yang Chao Yin Mao-Wei Shang Li-Ping Wang Wei Liu Yi Xia Lian-Sheng Deng Jian-Jun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 085203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.085203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.085203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere 多峰负氢离子源全三维数值诊断](#)

[A full three-dimensional numerical diagnosis of Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere multi-cusp negative hydrogen ion source](#)

物理学报.2013, 62(21): 215202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.215202>

[潘宁源放电的全三维电磁粒子模拟/蒙特卡罗碰撞数值算法研究](#)

[The full three-dimensional electromagnetic PIC/MCC numerical algorithm research of Penning ion source discharge](#)

物理学报.2013, 62(20): 205207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205207>

[表面产生负氢离子引出 MCC 算法设计](#)

[The MCC numerical algorithm of the extraction of the surface-produced negative hydrogen ions](#)

物理学报.2013, 62(2): 025206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025206>

[基于舰船尾流激光雷达的 Monte Carlo 模型及方差消减方法研究](#)

[Monte Carlo model and variance reduction method based on lidar of ship wake](#)

物理学报.2013, 62(1): 015205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.015205>

[Ta 及 Nanbu 库仑碰撞模型数值对比研究](#)

[Numerical comparison between Ta and Nanbu models of Coulomb collisions](#)

物理学报.2013, 62(1): 015206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.015206>

多峰场负氢离子源磁体布局对等离子体特性影响的数值模拟研究*

杨超^{1)†} 印茂伟¹⁾ 尚丽萍¹⁾ 王卫²⁾ 刘毅²⁾ 夏连胜²⁾ 邓建军²⁾

1)(西南科技大学国防科技学院, 绵阳 621010)

2)(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2014年9月25日收到; 2014年11月20日收到修改稿)

负氢离子源的研究对于响应国家散裂中子源建设和国际热核聚变实验堆计划的开展都具有十分重要的意义. 由于离子源本身的物理特性导致数值模拟成为不可或缺的研究手段, 基于此, 首先对自主研发的全三维粒子模拟/蒙特卡罗碰撞算法进行阐述, 然后对负氢离子体积过程进行描述, 并在此基础上对中国原子能研究中心的多峰质子源进行了系统仿真, 在引出磁体极性相同和相反两种情形下, 分别对多峰质子源放电特性进行了讨论和分析. 结果显示: 在相反极性下, 两引出磁体附近的磁漂移方向相同且数值较大, 即磁漂移剧烈, 导致电子总数较大且高能电子在特定区域活跃, 进而负氢离子体积产率较高, 即负氢离子在空间呈现Y漂移; 反之, 在相同极性下, 电子约束效果相对较差且负氢离子体积产率较低, 但其空间分布均匀.

关键词: 多峰质子源, 磁漂移, 体积产生

PACS: 52.65.Pp, 52.50.Dg

DOI: 10.7498/aps.64.085203

1 引言

迄今为止, 散裂中子源是中国在“十一五”期间启动建设的国内规模最大的科学装置, 为众多学科前沿领域的研究提供了一种先进的、不可替代的研究工具^[1,2]. 负氢离子源作为中国散裂中子源(CSNS)加速器部分的起点, 是CSNS加速器最重要的组成部分之一, 其性能的好坏直接决定CSNS工程的成败. 再者, 在全球国际热核聚变实验堆(ITER)计划的推动下, 强流中性束注入等离子体热核聚变实验成为当今世界的热门话题^[3-5], 负氢离子(H⁻)由于其中性化效率高, 受到了国外热核科学家们的推崇. 因此, 负氢离子源的研究对于响应国家CSNS建设和ITER计划的开展都具有十分重要的意义.

近年来, 国内外开展离子源相关工作较多, 例如日本的原子能研究中心开发了JAEA 10A和J-PARC多峰离子源^[4], 并实验发现了H⁻束的空间非均匀性; 中国工程物理研究院流体物理研究所研发了对阴极放电潘宁源^[6], 并实验分析了放电电压与H⁻流之间的关系; 中国科学院原子能研究中心开发了圆柱体多峰离子源^[2], 并分析了不同磁体布局对H⁻束引出效率的影响. 通常离子源的设计围绕着如下3个中心^[7]: 如何提高负氢离子源引出H⁻束流流强、如何减小引出H⁻束的发射度以及如何延长负氢离子源的寿命. 要实现和达到这些目标需要不断调试, 假如仅靠盲目的放电实验, 势必造成资源浪费, 而且离子源放电过程中各物理过程变化很快, 实验难以获取各稳态的信息量, 数值模拟就显得不可或缺.

综上所述, 本文采用自主研发的全三维粒子模

* 国家自然科学基金(批准号: 11176032, 11035004)、中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(批准号: CAEP THZ201209)、西南科技大学实验技术项目(批准号: 14syjs51, 14gjzx15)、西南科技大学博士基金(批准号: 13zx7106)、浙江省科技计划(批准号: 2013C33073)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2013A0402018)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ychao1983@126.com

拟/蒙特卡罗碰撞 (PIC/MCC) 算法对中国科学院原子能研究中心的圆柱体多峰离子源进行数值分析, 分析两种不同多峰磁体布局对负氢离子体积产生和放电特性的影响, 以揭示其放电机制, 为同类离子源的研发指明方向.

2 全三维 PIC/MCC 算法描述

在负氢离子源的模拟过程中, 影响粒子运动状态的因素包括: 粒子之间的碰撞和电磁场对其洛伦兹力的推动作用. 在模拟时间步长较小的情况下能将两者分别处理. 采用 PIC 处理粒子的发射、存储以及洛伦兹力作用, 采用 MCC 处理粒子碰撞. PIC/MCC 算法具体时间流程描述如图 1 所示 [7-9]: 首先采用文献 [7] 所述的永磁体计算模块, 在 Yee 网格模型下, 数值计算多峰磁场, 即前处理

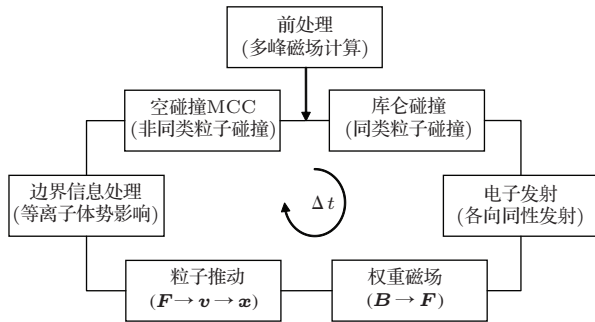
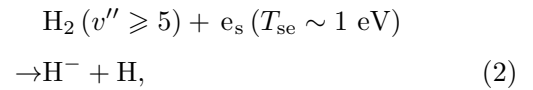
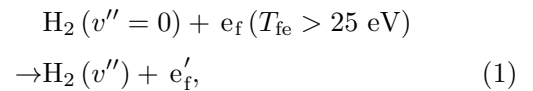


图 1 电子能量沉积全三维 PIC/MCC 算法流程
Fig. 1. The full 3D PIC/MCC algorithm process based on electron energy deposition.

模块. 进入 PIC/MCC 主程序后调用发射模块发射粒子, 再将网格点上磁场插值到粒子当前所在位置并模拟粒子的洛伦兹力推动作用, 待粒子经洛伦兹力推动作用后, 进入粒子边界处理, 根据边界势垒来判定粒子存活情况, 然后进入粒子的碰撞处理, 包括: 电子与其他类别粒子间的空碰撞模块, 电子之间的库仑碰撞模块. 通过周而复始的循环, 即可得到电子的能量和空间沉积特性.

3 体积产生机理阐述

等离子体体源中 H^- 的产生机理如图 2 所示. 磁过滤场将等离子体放电室分成两个区域: 一个是高温等离子体区; 另一个是低温等离子体区. 在高温等离子体区中, 高能电子 ($T > 25$ eV) 轰击氢分子, 将氢分子变成振动激发态 H_2^* , 其中电子与氢分子之间的主要碰撞参见文献 [7], 激发态分子 H_2^* 自由程比较大, 穿过磁过滤场到达低温等离子区, 在低能电子的作用下产生 H^- . 其具体描述如下方程 [3]:



其中, e_f, e'_f 分别为初、次快电子; e_s 是慢电子; T_{fe}, T_{se} 分别为快、慢电子能量.

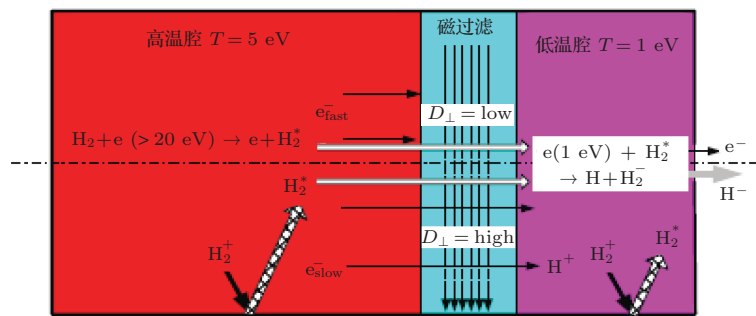


图 2 体积产生机理
Fig. 2. The mechanism of H^- volume production.

4 模型及参数介绍

图 3 为中国原子能研究中心的多峰质子源模型描述 [2], 离子源内、外半径分别为 50 和 54 mm,

圆柱体长 120 mm, 上、下壁厚 10 mm, 四周设置金属边界, 质子源通过两个热灯丝放电. 为了简化计算, 将电子看作从 (0, 0, 60) 处各向同性发射, 电子的初始能量设为 60 eV. 柱体四周被 14 个钕钴矩形永磁体包围, 各永磁体的尺寸均为

17 mm × 12 mm × 100 mm, 磁体剩磁 $B_0 = 1.1$ T, 其中, 12 个永磁体均匀分布于圆柱体柱面周围, 且磁化方向都沿 X 方向, 12 个永磁体依次呈 N, S, N, S, ... 交替排列. 此外, 另两个永磁体对称放置于圆柱体顶端, 且磁化方向都沿 Z 方向, 两个永磁体中心相距 60 mm, 模拟时分别针对两磁体同名(如两磁体都是 S 极在下)和异名(如一个磁体是 S 极在下, 另一个是 N 极在下)两种情况. 结合图 2 可知, 图 3(b) 中 12 个环绕磁体即是源区, 顶端两个磁体构成的区域即是过滤区, 通过外加电压偏置, 从图 3(a) 所示的顶端小孔引出离子. 放电过程考虑的反应截面和初始粒子密度设置同文献 [9].

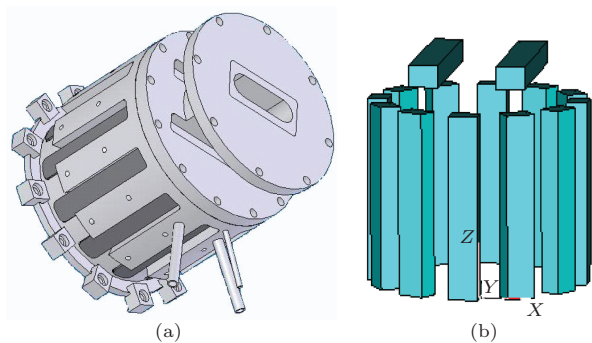


图 3 中国原子能研究中心的多峰质子源模型 (a) 源体结构; (b) 多峰磁体布局

Fig. 3. The multi-cusp proton source model of China atomic energy research center: (a) source structure; (b) layout of multi-cusp magnets.

5 模拟结果与分析

图 4 为多峰质子源在 XZ 平面的磁场分布情况和磁漂移 ($\mathbf{B} \times \nabla \mathbf{B}$) 方向描述. 由图 4 可知, 在

同名引出磁体下, 两磁体所夹区域中 X 方向磁场相消(减弱), 且磁漂移方向相反; 反之, 在异名引出磁体下, X 方向磁场叠加(增强)且磁漂移方向相同. 即相对同名引出磁体而言, 异名引出磁体的磁漂移由于方向相同和 X 方向磁场较大两个因素的共同作用, 显然引出区的磁漂移更显著.

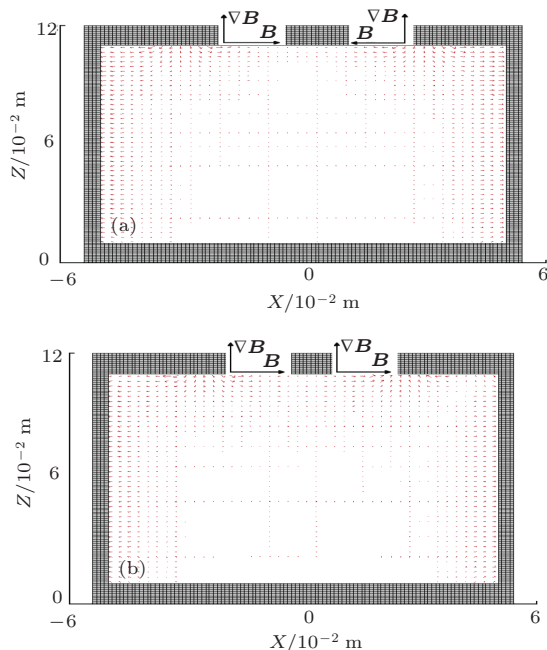


图 4 质子源 XZ 平面磁场矢量图 (a) 同名引出磁体; (b) 异名引出磁体

Fig. 4. The XZ plane magnetic field vectors of proton source: (a) extraction magnets with the same name; (b) extraction magnets with the different name.

图 5 为整个模拟区域总电子数密度随时间的演化. 从图 5 可知, 两种情形下都能到达稳态, 且异名引出磁体对电子的约束能力更强.

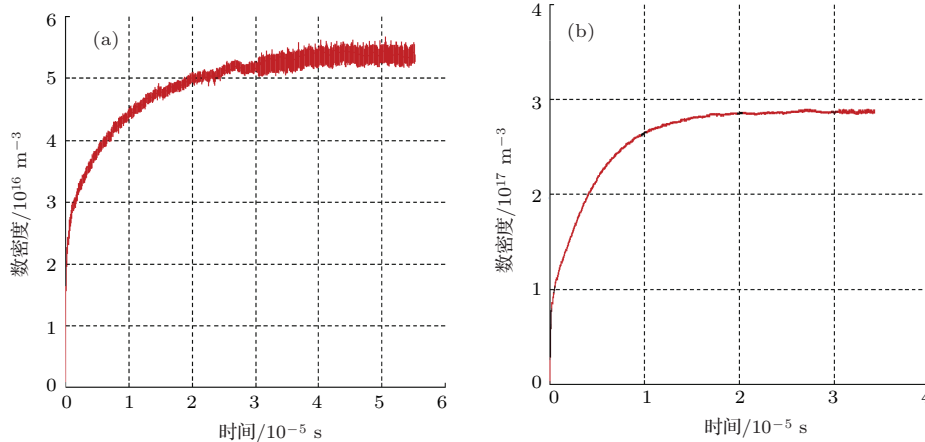


图 5 电子数密度时间演化图 (a) 同名引出磁体; (b) 异名引出磁体

Fig. 5. The time evolution figure of electron number density: (a) extraction magnets with the same name; (b) extraction magnets with the different name.

图6为XY平面内所有电子的空间分布情况. 由图6知, 电子在XY平面内呈现了多峰状, 这体现了圆柱体四周的多峰磁体组的约束效果. 对比

图6(a)和图6(b)可知, 同名引出磁体下分布对称, 异名引出磁体下呈现了明显的Y方向的磁漂移, 这与图4的磁场分布相呼应.

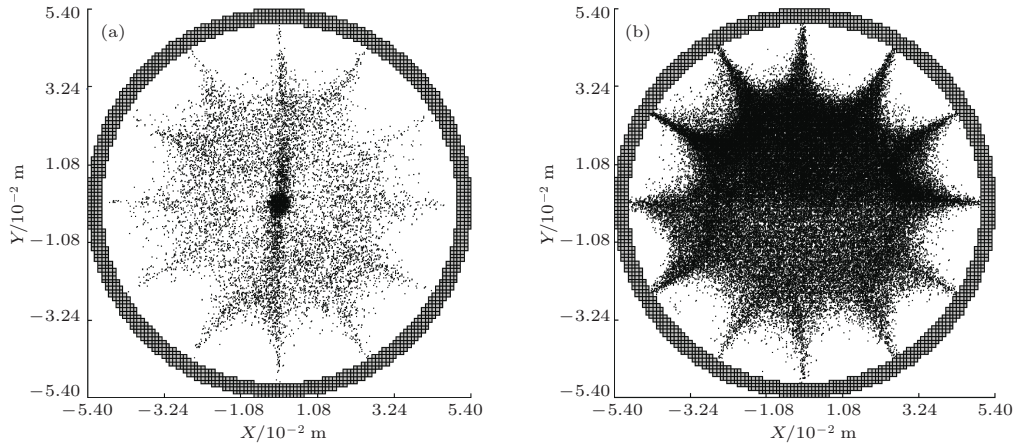


图6 所有电子在XY平面的相空间图 (a)同名引出磁体; (b)异名引出磁体

Fig. 6. The phase space of all electrons at the XZ plane: (a) extraction magnets with the same name; (b) extraction magnets with the different name.

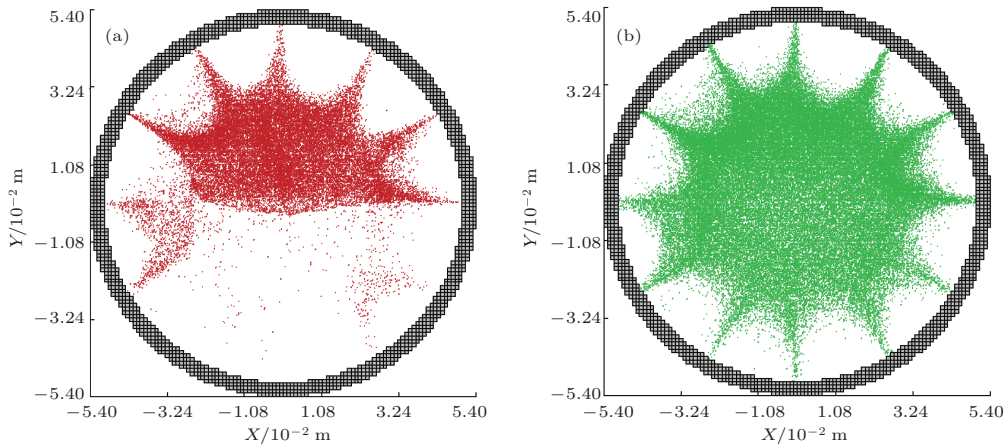


图7 异名引出磁体下电子在Y方向分布情况 (a)高能电子; (b)低能电子

Fig. 7. The electron distribution at the Y direction with the different name extraction magnets: (a) high-energy electrons; (b) low-energy electrons.

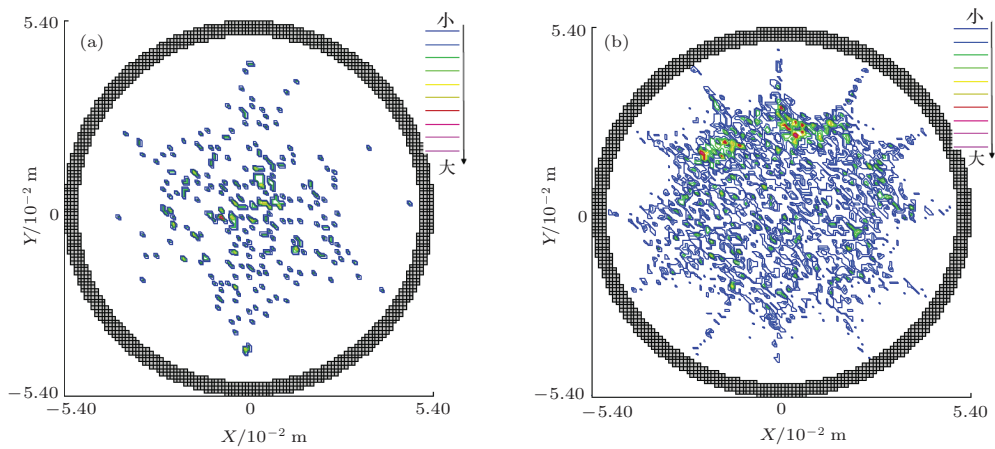


图8 (网刊彩色) Z = 90 mm 平面处电子与H₂ 振动激发碰撞统计 (a)同名引出磁体; (b)异名引出磁体

Fig. 8. (color online) The statistical of excitation collisions between electrons and H₂ at the Z = 90 cm plane: (a) extraction magnets with the same name; (b) extraction magnets with the different name.

图7为异名引出磁体下电子在Y方向能量分布情况. 由图7可知, 高能($T_e > 25$ eV)和低能($T_e \leq 25$ eV)两种情况下都呈现了Y方向漂移, 但对比图7(a)和图7(b)可知, 相对低能电子而言, 高能电子的漂移要剧烈得多.

图8为振动激发碰撞(即体积产生 H^-)在 $Z = 90$ mm平面内发生次数的统计. 由图8可知, 在同名引出磁体下, 体积产生 H^- 反应发生的次数较少且分布均匀, 反之, 在异名引出磁体下, 体积产生 H^- 反应发生的次数较多且呈现了Y漂移. 究其原因: 由图5可知, 在异名引出磁体下约束的电子数目较多, 必然导致发生振动激发碰撞总次数更多; 而且, 由图6和图7可知, 在 高能电子的漂移剧烈区域碰撞激发反应发生频率较大, 体积产生 H^- 总量较大, 由于 H^- 的荷质比较电子要小得多, 体积产生 H^- 引出时受磁场影响较小, 因此, 碰撞激发分布特性一定程度上决定了被引出 H^- 的空间分布特性.

6 结 论

本文采用全三维PIC/MCC模拟算法对中国原子能科学研究院研制的多峰质子源进行较系统的数值模拟研究. 研究表明: 在同名引出磁体下, 体积产生 H^- 的产量较低但分布均匀; 在异名引出磁体下, 体积产生 H^- 的产量较低但分布不均匀(呈

现了Y方向漂移).

参考文献

- [1] Jia X L, Zhang T J, Lü Y L, Ai C J, Chu C J, Guan F P, Xing J S 2007 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **31** 292 (in Chinese) [贾先禄, 张天爵, 吕银龙, 艾长军, 储诚节, 管锋平, 邢建升 2007 高能物理与核物理 **31** 292]
- [2] Wu X B, Huang T, Ouyang H F 2010 *Chin. Phys. C* **34** 1900
- [3] Yang C 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [杨超 2012 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [4] Terasaki R, Fujino I, Hatayama A 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 02A703
- [5] Shibata T, Terasaki R, Kashiwagi M, Inoue T, Dairaku M, Taniguchi M, Tobar H, Watanabe K, Sakamoto K, Hatayama A 2013 *Third International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources* (Finland: Jyväskylä) p177
- [6] Wang T, Yang Z, Dong P, Long J D, He X Z, Wang X, Zhang K Z, Zhang L W 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 063302
- [7] Yang C, Liu D G, Wang X M, Liu L Q, Wang X Q, Liu S G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 045204 (in Chinese) [杨超, 刘大刚, 王小敏, 刘腊群, 王学琼, 刘盛纲 2012 物理学报 **61** 045204]
- [8] Yang C, Liu D G, Chen Y, Xia M Z, Wang X Q, Wang X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135203 (in Chinese) [杨超, 刘大刚, 陈颖, 夏蒙重, 王学琼, 王小敏 2012 物理学报 **61** 135203]
- [9] Yang C, Yin M W, Shang L P, Wei A Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 095201

Numerical simulation research of plasma characteristics in a multi-cusp proton source based on magnets layout*

Yang Chao^{1)†} Yin Mao-Wei¹⁾ Shang Li-Ping¹⁾ Wang Wei²⁾ Liu Yi²⁾
Xia Lian-Sheng²⁾ Deng Jian-Jun²⁾

1) (School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

2) (Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 25 September 2014; revised manuscript received 20 November 2014)

Abstract

It is significant to study negative hydrogen ion source for the construction of Chinese national spallation neutron source (CSNS) and the implementation of the international thermonuclear experimental reactor (ITER) project. Numerical simulation is an indispensable research measure due to the physical characteristics of ion source. In view of the facts above, in this paper we first elaborate the self-developed three-dimensional particle-in-cell/Monte Carlo collisions (PIC/MCC) algorithm and then describe the mechanism of negative hydrogen ion (H^-) volume production. Based on these, the multi-cusp proton source of the Chinese atomic energy research center is systematically simulated. In the cases of the same polarities and the opposite polarities of extraction magnetic fields, multi-cusp proton source discharge characteristics are discussed and analyzed respectively. The result shows that in the case of the opposite polarities of the two extraction magnets, magnetic drift directions near the two extraction magnets are the same and have great values, namely intense magnetic drift, which causes the total number of electrons to be big, and induces the high-energy electrons to become active in a specific area. And so, the volume production rate of H^- ions is higher, that is to say, H^- ions present Y drift. On the contrary, in the case of the same polarities of the two extraction magnets, the binding effect of electron is worse and the volume production rate of H^- ions is lower, but spatial distribution of volume production H^- is uniform.

Keywords: multi-cusp source, magnetic drifting, volume production

PACS: 52.65.Pp, 52.50.Dg

DOI: 10.7498/aps.64.085203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11176032, 11035004), the CAEP THz Science and Technology Foundation (Grant No. CAEP THZ201209), the Experiment Technology Project of Southwest University of Science and Technology, China (Grant Nos. 14syjs51, 14gjzx15), the Doctor Fund of Southwest University of Science and Technology, China (Grant No. 13zx7106), the Science and Technology Project of Zhejiang Province, China (Grant No. 2013C33073), and the Science and Technology Development Foundation China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2013A0402018).

† Corresponding author. E-mail: ycho1983@126.com