

Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere 多峰负氢离子源全三维数值诊断

杨超[†] 廖方燕 谢鸿全

(西南科技大学国防学院, 绵阳 621010)

(2013年6月14日收到; 2013年6月25日收到修改稿)

本文研制了全三维粒子模拟/蒙特卡罗碰撞算法, 并采用该算法对国外研究较热的 Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere (JAEA 10A) 离子源进行了全方位的数值诊断, 探索了电子能量沉积过程中电子的横向漂移和能量分布规律, 分析了离子源放电的主要物理参数对电子沉积的影响作用. 模拟及分析结果显示: 电子横向漂移(-Y方向)来源于过滤区的磁漂移, 增加过滤磁场, 导致磁漂移增大, 横向漂移加剧, 且电子的利用率增大; 提高放电室气压, 电子的碰撞更频繁, 进而加剧横向非均匀性, 也同时提高电子的利用率.

关键词: Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere 多峰负氢离子源, 全三维粒子模拟/蒙特卡罗碰撞

PACS: 52.65.Pp, 52.50.Dg

DOI: 10.7498/aps.62.215202

类离子源的研发.

1 引言

目前, 在全球 ITER 计划推动下, 大量中性束注入热核聚变实验在世界范围开展, 负氢离子由于其高中性化效率受到国内外热核研究学者的青睐^[1-5]. 当前国内外研究较热的离子源包括^[3-6]: Camembert III、JAERI 10A、中国原子能研究中心的 15—20 mA 离子源以及潘宁离子源 (Penning ion source). 其中, 前面三种离子源是采用多峰磁场约束粒子的, 在模拟计算时可忽略电场, 其模拟相对方便, 因此, 放电过程相对容易获取和探索其放电规律, 以实现离子源的优化, 这也导致这类离子源在国内外的广泛开展. 最后, 由于离子源模拟时间迭代次数较多、粒子种类较多以及粒子数目较大, 因此有效地进行该类离子源的计算机模拟也变得必不可少. 综上所述, 本文首先研制高效的全三维粒子模拟 (PIC), 然后研制适合负氢离子源放电物理及化学变化过程的蒙特卡罗碰撞算法 (MCC), 最后让两者有机结合成粒子模拟/蒙特卡罗算法 (PIC/MCC), 并对国外 JAEA 10A 离子源^[6]进行数值模拟研究, 探索其放电机理以配合和促进国内同

2 算法及模型描述

图 1 为全三维高品质电磁 PIC/MCC 程序设计时序框图, 对于粒子和场的计算采用体积权重法^[6]; 对于多峰磁场的计算磁荷模型^[7]; 对于离子源放电中电子与其他离子间的碰撞采用空碰撞模型及相应碰撞类型的动力学处理方法^[8], 计算电子与氢分子, 氢原子与各类氢分子离子之间的反应物理情景, 跟踪原粒子以及新产生的粒子, 且仅改变粒子的速度信息不改变粒子的位置信息; 对于电子之间的碰撞采用二体库仑碰撞模型. 图 2 为 JAEA 10A 永磁体分布图^[2], 其中约束磁场磁滞 $B_0 = 0.2$ T, 过滤磁场磁滞 $B_f = 2B_0$, 其余参数同文献^[6], 考虑的反应类型同文献^[9].

3 模拟结果与分析

图 3 为电子数密度随时间变化关系, 从图 3 可知, 4×10^{-5} s 时模拟到达稳态, 图 4 为 Z 轴线上磁场分布情况, 这与文献^[8]的计算结果一致, 表明多峰磁场计算和设置正确.

* 西南科技大学博士基金 (批准号: 13zx7106) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ychao1983@126.com

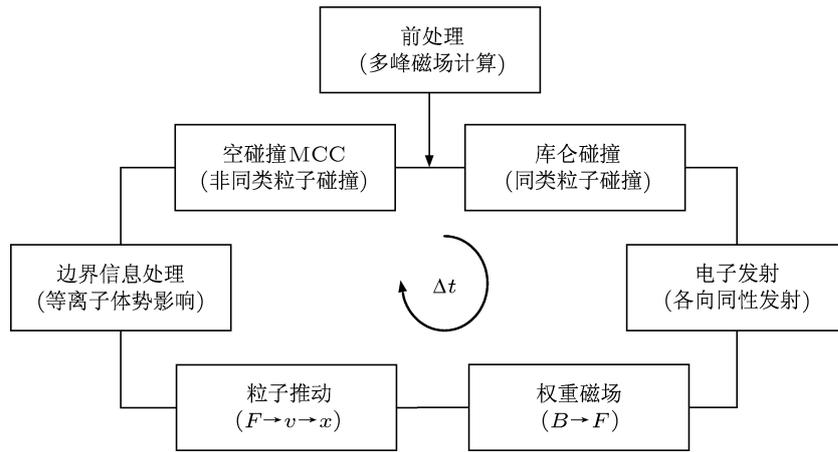


图1 电子能量沉积全三维 PIC/MCC 算法流程

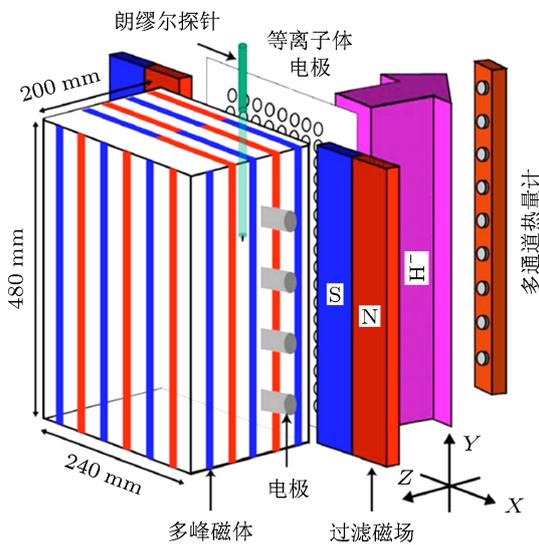


图2 离子源磁体分布图

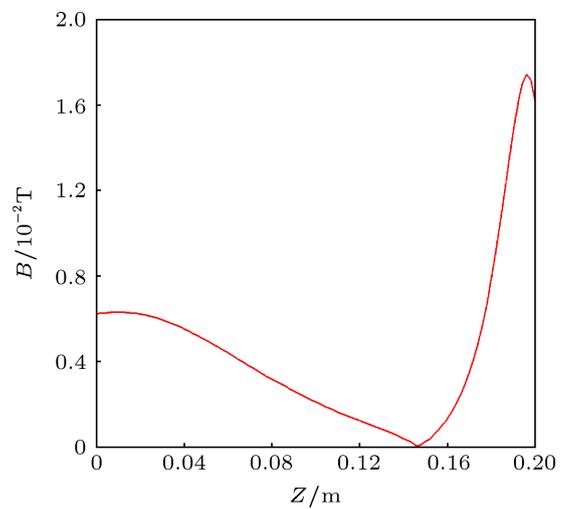


图4 Z轴上磁场分布

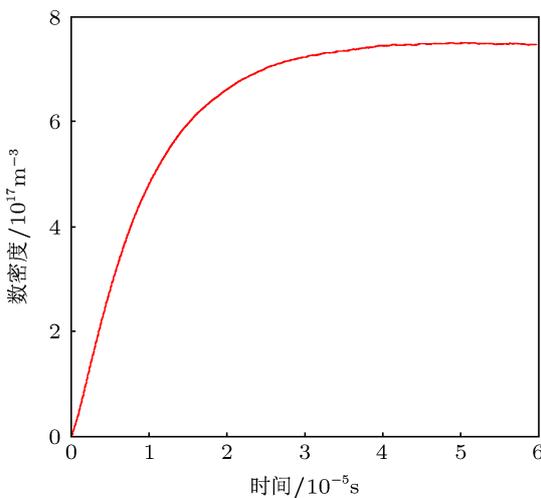


图3 电子数密度随时间变化

图5为电子空间分布情况,图5(a)和(b)分别为XZ和YZ平面分布情形,由图5(a)可知电子在

XZ平面呈现了边缘多峰值状,表明多峰磁场起到约束电子效果.从图5(b)可知电子在 $-Y$ 区域分布较多,且离子源下游(0—100 mm区域为下游,10—200 mm区域为上游)漂移剧烈.

图6为放电室气压0.4 Pa下改变过滤磁场Z方向电子数目和温度的变化情况,图6(a)和(b)分别为电子数和温度的变化情况.由图6(a)可知过滤磁场增大,下游区电子沉积逐渐增多,特别是放电位置偏下90 mm处电子沉积增幅较大.由图6(b)可知离子源中电子温度沿Z方向呈先增大后减小的趋势,这与文献[10]实验结果相符,此外,过滤磁场越大平均电子温度也越大.

图7为放电室气压0.4 Pa下改变过滤磁场Y方向电子数目和温度的变化情况,图7(a)和(b)分别为电子数和温度的变化情况.由图7(a)可知过滤磁场越大,电子在 $-Y$ 方向沉积的电子越多,即 $-Y$ 漂移越剧烈.由图7(b)可知过滤磁场越大, $-Y$ 方向

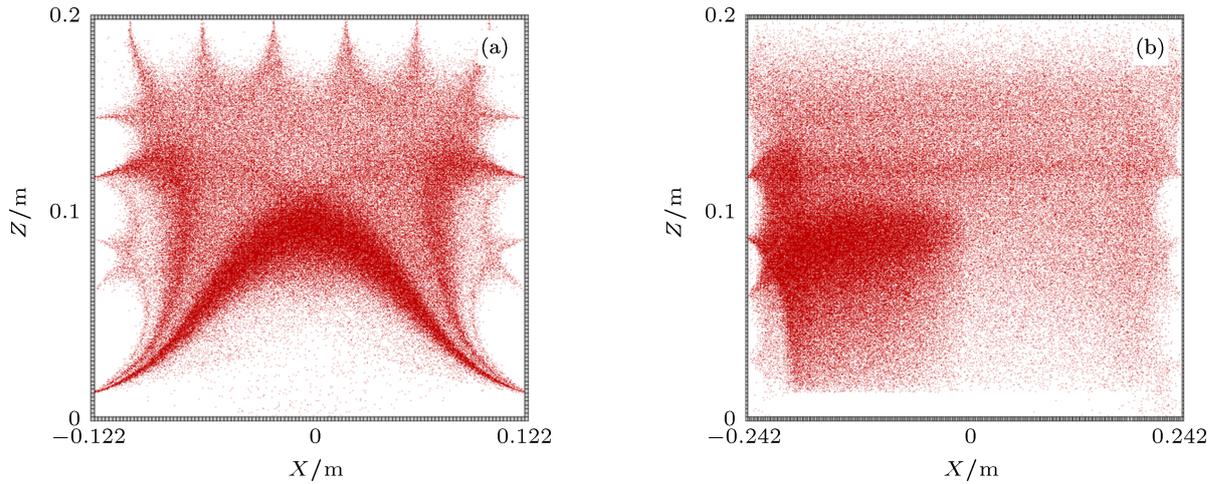


图5 电子空间分布情形 (a) XZ 平面; (b) YZ 平面

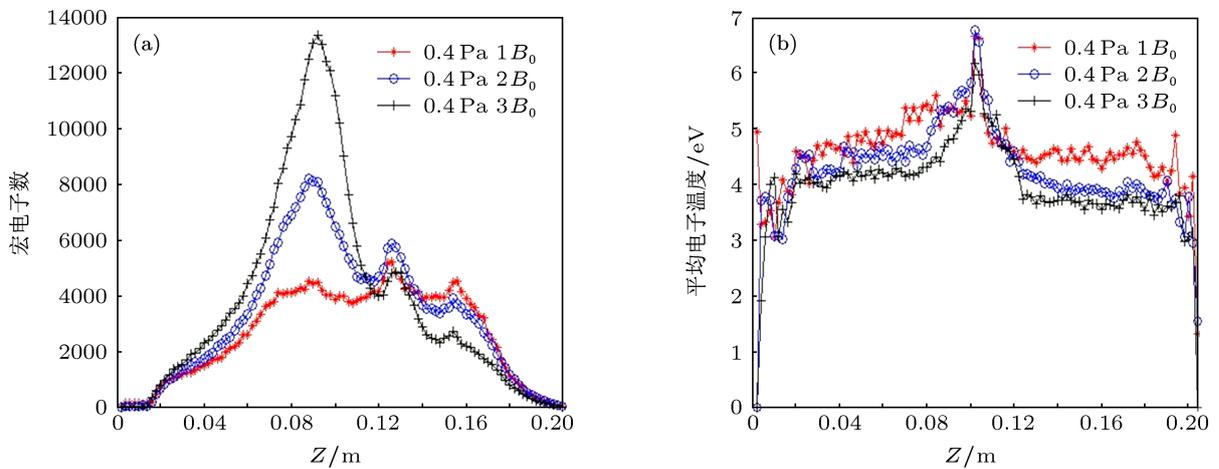


图6 放电室气压 0.4 Pa 下改变过滤磁场 Z 方向变化情况 (a) 宏电子数 (b) 平均电子温度

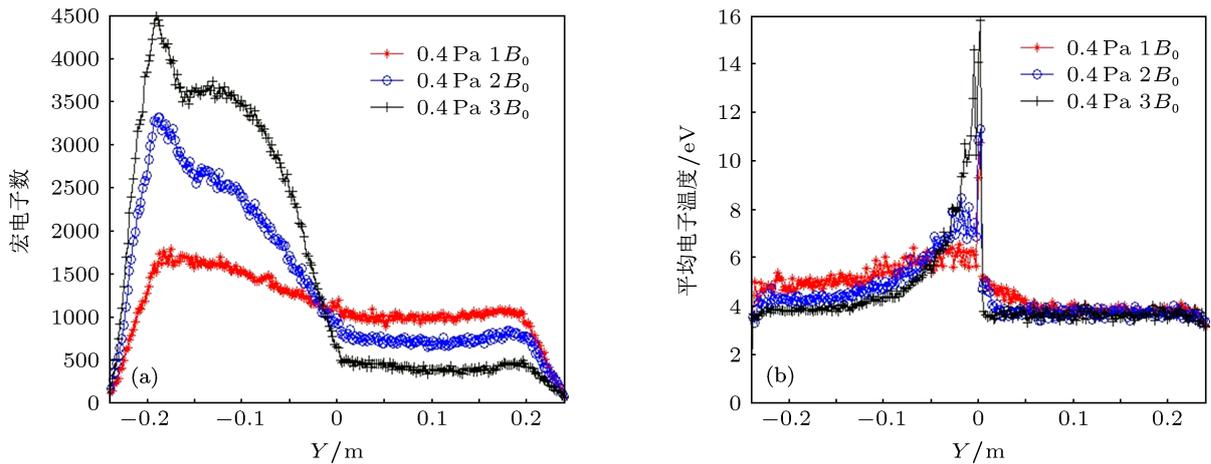


图7 放电室气压 0.4 Pa 下改变过滤磁场 Y 方向变化情况 (a) 宏电子数; (b) 平均电子温度

平均电子温度越小, 即电子的利用率越高, 负氢离子体积产生效率越高.

由文献 [9] 可知, 磁漂移来自 $\frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{B^2}$, 且其中 $\mathbf{B} \times \nabla B$ 主要表现为 X 方向磁场 (B_X) 和 Z 方向

梯度 (D_Z), 因此对 $\frac{B_X \times D_Z}{B^2}$ 进行计算, 得到了如图 8 所示的图像, 图 8 为直线 $X = 0, Y = 120 \text{ mm}$ 上磁漂移量分布情况, 图 8(a), (b) 分别为 $B_f = 2B_0$ 和 $B_f = 3B_0$ 情形下的磁漂移. 由图 8 可知, 过滤磁场

越大,下游区磁漂移较大.

原理分析: 增大过滤磁场, 即在过滤区 (0—20 mm 区为过滤磁体放置区) 得到了更大的 $B \times \nabla B$, 这就很好的解释了图 5(b) 的 $-Y$ 漂移. 另外, 由图 5(b) 知漂移主要集中在 $Z = 90$ mm 和 $Y = -200$ mm—50 mm 区域, 也即随着过滤磁场增加这一区域的漂移越剧烈, 这也很好的解释了图 6(a) 和 7(a) 的漂移规律. 再者, 因放电位置设在 $Z = 100$ mm 处, 由于电子各向同性发射后不断参与碰撞, 这将导致行径过程中能量逐渐较小, 也即解释了图 6(b) 的温度变化规律. 最后, 由于磁漂移的存在电子很好的被约束在 $Z = 90$ mm 和 $Y = -200$ mm—50 mm 区域, 因此该区域的电子碰撞更频繁, 因此体积产生反应次数也越多. 也即很好的解释了 7(b) 的温度变化规律.

图 9 为过滤磁场 $2B_0$ 下改变放电室气压 Z 方向电子数目和温度的变化情况, 图 9(a) 和 (b) 分别

为电子数和温度的变化情况. 图 10 为过滤磁场 $2B_0$ 下改变放电室气压 Y 方向电子数目和温度的变化情况, 图 9(a) 和 (b) 分别为电子数和温度的变化情况. 由图 9(a) 可知气压越大, 下游区电子沉积增多, 由图 9(b) 可知气压越大, Z 方向电子平均温度低, 即电子利用率较高, 由图 10(a) 可知气压越大 $-Y$ 方向漂移越剧烈, 这与文献 [11] 的实验结果一致, 由图 10(b) 可知气压越大, Y 方向电子平均温度低, 即电子利用率较高.

原理分析: 由于放电气压越高, 电子与氢相关分子和离子碰撞越剧烈, 结合表 1 可知电离产生的电子越多, 因此漂移区的电子数总量越大, 这很好的解释了图 9(a) 和 10(a) 的电子数沉积规律. 再者, 由于气压决定碰撞剧烈程度, 因此气压越高, 在达到各反应的阈值前提下, 反应越剧烈, 那么电子沉积的平均能量必定较低, 这也很好的解释了图 9(b) 和图 10(b) 的能量沉积规律.

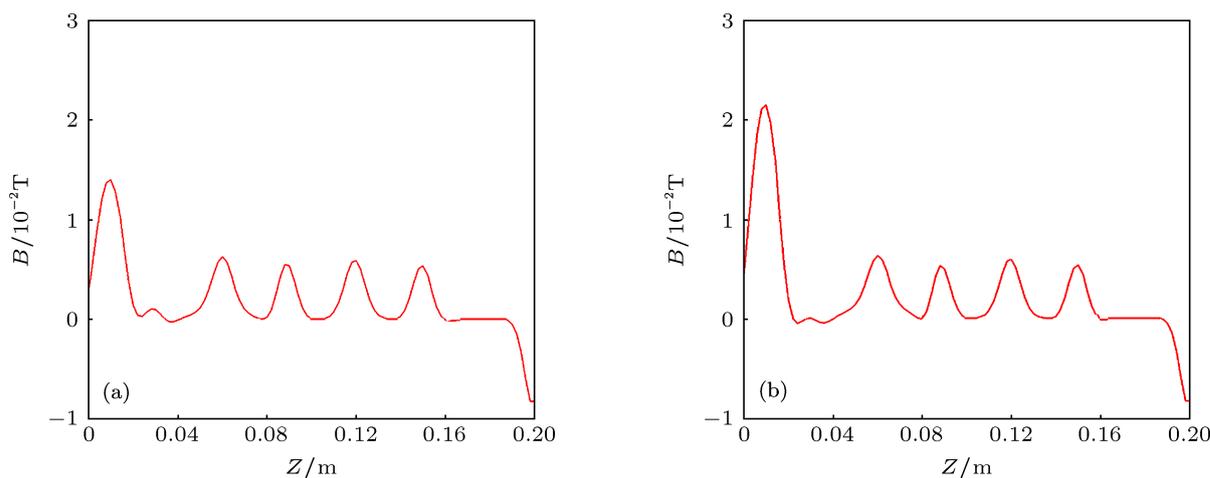


图 8 直线 $X = 0, Y = 120$ mm 上磁漂移分布 (a) $B_f = 2B_0$; (b) $B_f = 3B_0$

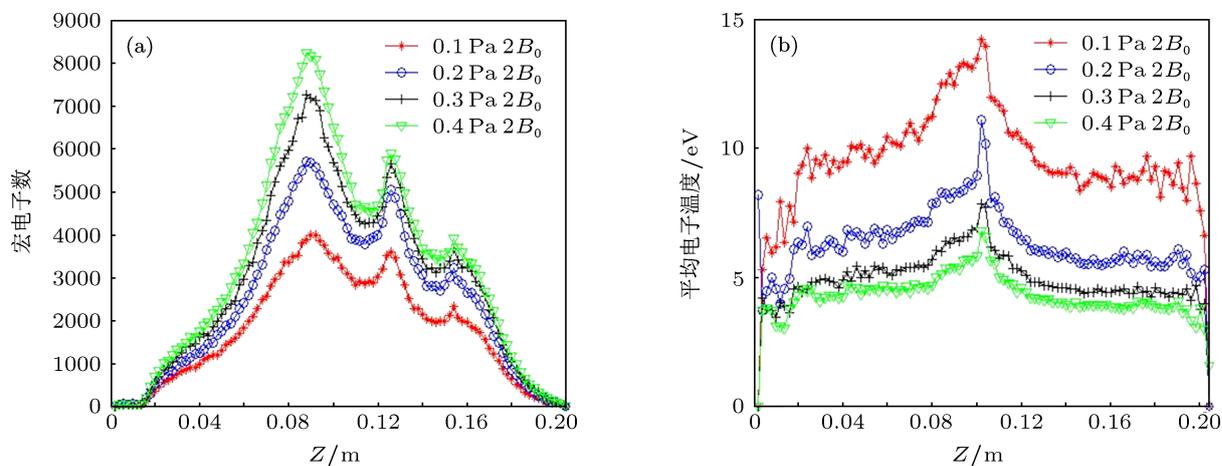


图 9 过滤磁场 $2B_0$ 下改变放电室气压 Z 方向变化情况 (a) 宏电子数; (b) 平均电子温度

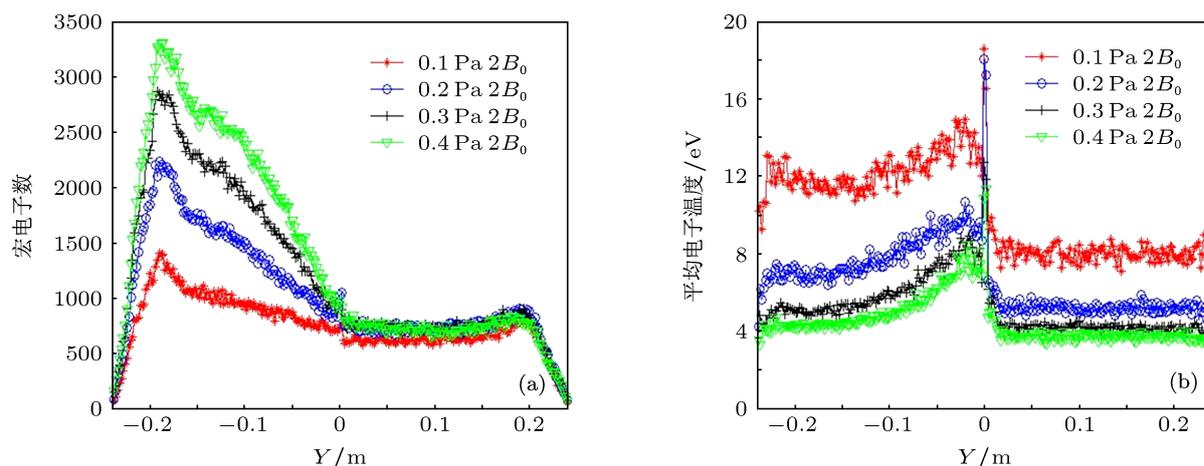


图 10 过滤磁场 $2B_0$ 下改变放电室气压 Y 方向变化情况 (a) 宏电子数; (b) 平均电子温度

4 结论

本文阐述了全三维 PIC/MCC 算法处理技术, 并运用该算法对 JAEA 10A 离子源电子能量沉积进行数值模拟研究, 并对模拟结果进行了合理的物理

解释, 研究结果表明: 随着过滤磁场的增加, 电子横向漂移加剧, 电子的利用率越高; 随着放电室气压的增加, 电子横向漂移更加剧烈, 电子的利用率也越高.

- [1] Yang C, Wu X B, Liu D G 2012 *Chin. Phys. C* **36** 1013
- [2] Terasaki R, Fujino I, Hatayama A, Mizuno T, Inoue T 2010 *Rev. Sci. Instrum* **81** 02A703
- [3] Yang C, Liu D G, Xia M Z, Wang H H, Wang X M, Liu L Q, Peng K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 185205 (in Chinese) [杨超, 刘大刚, 夏蒙重, 王辉辉, 王小敏, 刘腊群, 彭凯 2012 物理学报 **61** 185205]
- [4] Fujino I, Hatayama A, Takado N, Inoue T 2008 *Rev. Sci. Instrum* **79** 02A510
- [5] 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]
- [6] 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)]
- [7] Yang C, Wang H H, Chen Y, Xia M Z, Wang X M, Liu D G 2012 *Chinese Journal of Computational Physics* **29** 734 [杨超, 王辉辉, 陈颖, 夏蒙重, 王小敏, 刘大刚 2012 计算物理 **29** 734]
- [8] Terasaki R, Hatayama A, Shibata T, Inoue T 2011 *Second International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources* (Japan: Takayama) p22
- [9] 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
- [10] Takado N, Tobar H, Inoue T, Hanatani J, Hatayama A, Hanada M, Kashiwagi M 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 053302
- [11] Zou G Q, Zhong G W, Lei G J, Jiang S F, Lu D L, Cao J Y, Liu H 2008 *Chin. Phys. C* **32** 283

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

Yang Chao[†] Liao Fang-Yan Xie Hong-Quan

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

(Received 14 June 2013; revised manuscript received 25 June 2013)

Abstract

This paper develops a full three-dimensional PIC/MCC algorithm, and uses it to conduct a full range of numerical diagnosis of the hot JAEA 10A ion source at home and abroad, explores lateral drift and energy distribution of electrons in the electron energy deposition process, analyzes the influence of the main physical parameters on the electronic deposition. Simulation and analysis results show that electronic horizontal shift ($-Y$ direction) comes from the filtering zone of the magnetic drift. Increasing the filtering field, the magnetic drift increases, and lateral drift is aggravated, and the utilization of electronics increases; improving the discharge of chamber pressure, the electronic collision will be more frequent; thereby increasing lateral non-uniformity can improve the utilization of electronics.

Keywords: Japan Atomic Energy Agency 10 Ampere multi-cusp negative hydrogen ion source, a full three-dimensional particle-in-cell/Monte Carlo collisions

PACS: 52.65.Pp, 52.50.Dg

DOI: 10.7498/aps.62.215202

* Project supported by the Southwest University of Science and Technology Doctor Fund (Grant No. 13zx7106)

[†] Corresponding author. E-mail: ychao1983@126.com