

ATON 型 Hall 推力器缓冲区预电离问题研究*

刘 辉^{1)†} 吴勃英¹⁾ 鄂 鹏²⁾ 段 萍²⁾

1) (哈尔滨工业大学数学系, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150001)

(2009 年 11 月 10 日收到; 2009 年 12 月 30 日收到修改稿)

ATON 是 20 世纪 90 年代新提出的一种 Hall 推力器设计方案, 其中的缓冲区是 ATON 新采用的一种结构. 本文对缓冲区的作用进行分析, 在此基础上提出了采用附加电源提高缓冲区预电离率的方法. 并采用 PIC (Particle-in-cell) 粒子模拟方法对这种设计方式的等离子体分布进行数值模拟. 结果表明, 通过增加缓冲区内的附加电压, 能够有效地提高缓冲区预电离率.

关键词: Hall 推力器, 缓冲区, 粒子模拟, 预电离

PACC: 5265, 5275D

1. 引 言

Hall 推力器自 20 世纪 70 年代上天以来, 以其结构简单、比冲效率高、工作寿命长、功率密度高、在轨服役时间长等优点被广泛采用. Hall 推力器是由内外陶瓷套筒组成具有环形结构的等离子体放电通道, 如图 1 所示. 其内部通过内外电磁线圈形成径向分布的磁场, 并由阳极和阴极之间的电势降产生轴向电场. 在正交电磁场的作用下, 电子沿周向做 Hall 漂移运动. 与此同时, 工质 (通常采用 Xe 气) 从气体分配器注入推力器通道, 被做漂移运动的电子电离成为离子. 离子在轴向电场的作用下加速喷

出产生推力. 在第一代 Hall 推力器中, 气体分配器同时作为阳极使用, 工质通过气体分配器上均匀布置的小孔喷出, 如图 1(a) 所示. ATON 型 Hall 推力器是 20 世纪 90 年代初提出的新一代 Hall 推力器设计方案, 其中的缓冲区结构是 ATON 型 Hall 推力器的主要改进之一. 缓冲区位于气体分配器和阳极之间, 如图 1(b) 所示. 同第一代 Hall 推力器相比, 缓冲区结构实现了气体分配器和放电通道的分离. 实验表明, 通过在 Hall 推力器内采用缓冲区结构并重新设计磁场位形, 可以使推力器的效率从 50% 提高到约 70%, 并且使推力器的羽流发散角从 45° 左右减小到 10° 以下^[1].

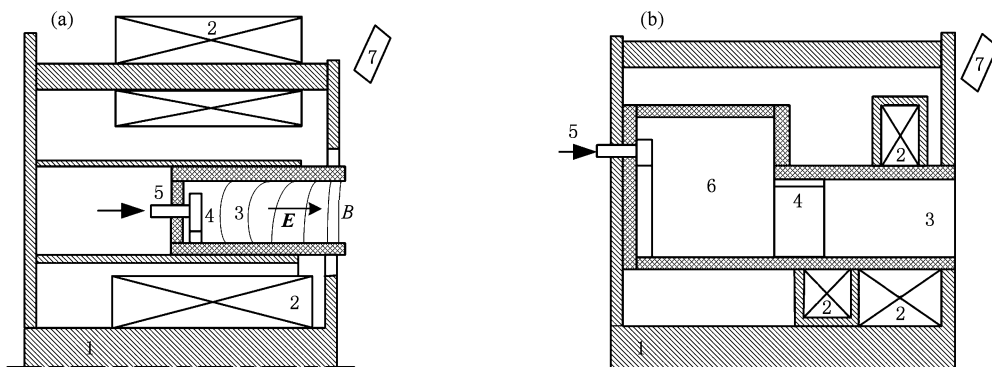


图 1 Hall 推力器的典型结构 1 为磁路, 2 为电磁线圈, 3 为放电通道, 4 为阳极, 5 为气体分配器, 6 为缓冲区, 7 为阴极. (a) 第一代 Hall 推力器, (b) ATON 型 Hall 推力器

* 国家自然科学基金 (批准号: 10975026)、辽宁省教育厅高校科研基金 (批准号: 2009A047) 和国家博士后科学基金 (批准号: 20090460918) 资助的课题.

† E-mail: thruster@126.com

目前,针对磁场位形对推力器性能的影响,各国科学家已经开展了大量的工作,形成了通道内磁场正梯度、磁透镜、近阳极区零磁场设计等磁场设计准则^[2-4].但是,还没有深入研究缓冲区结构对推力器性能的影响.在我们前期的研究工作中发现,缓冲区结构能够使由气体分配器喷出的原子得到均化,提高进入放电通道的原子均匀性^[5].同时一部分高能电子能够从放电通道内逃逸并进入缓冲区,在缓冲区内电离一部分工质.区别于放电通道内的电离,将缓冲区内工质的电离称为预电离.文献[6]的实验结果表明,缓冲区结构能够抑制低频振荡,减小低频振荡造成的效率损失以及对电源的冲击.并且随着缓冲区预电离率的提高,推力器低频振荡的幅值逐渐变小.因此,提高缓冲区预电离率对提高推力器性能有重要意义.有必要进一步提高预电离率的方式进行分析,并提出适当的设计方案.

缓冲区内预电离率的提高可以通过提高电子温度的方式来实现.而电子温度的增加主要受电场的影响.Hall 推力器内的电场通过阴极和阳极之间施加偏压得到.但是缓冲区内没有独立的电极,因此其内部的电场很小.当电子从放电通道进入缓冲区后,电子基本不能从缓冲区内获得能量,这样不利于提高缓冲区内电离率.文献[6]中,通过附加电源给气体分配器供电的方式,可以在气体分配器和阳极间形成电势降,如图2所示.这样有利于提高电子的能量,从而提高缓冲区的电离率.但是,由于实验条件的限制,并没有直接的实验数据来反映附加电源对缓冲区预电离率的影响规律,并且也缺少必要的物理分析.

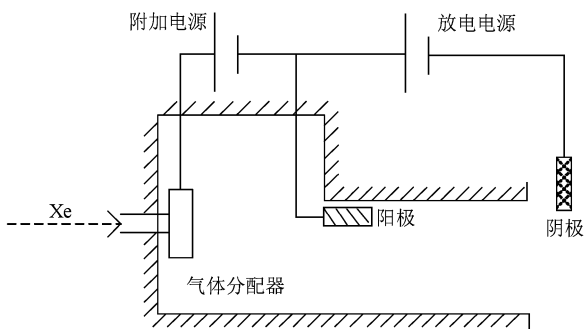


图2 附加电源示意图

本文将采用 PIC (particle-in-cell) 粒子模拟方法对缓冲区内等离子体的运动行为进行模拟,分析采用附加电源对缓冲区预电离的影响规律.

2. 计算模型

目前国内外已经建立了各种流体^[7-14]或者混合^[15-18]模型对 Hall 推力器进行模拟.通过模拟,加深了对 Hall 推力器内部等离子体分布规律的认识,并为推力器性能的优化提供了指导.由于计算量大,采用 PIC 粒子模拟方法对 Hall 推力器进行模拟发展较为缓慢.但是,随着计算速度的提高,以及 PIC 方法在模拟等离子体非平衡态以及等离子体微观运动行为方面的优势, PIC 方法已经逐渐被用于 Hall 推力器鞘层以及宏观性能的模拟^[19,20].

由于缓冲区内电离率低,内部的等离子体远没有达到热平衡,采用粒子模拟方法对这一类问题进行模拟更为合适.因此,本文采用 PIC 粒子模拟方法,通过对单个带电粒子进行跟踪,并进行宏观统计,得到等离子体的分布规律,分析附加电源对预电离的影响规律.计算时采用的方法在前期的工作中已有较为详细的描述^[21].采用的模型以及网格的划分如图3所示.忽略周向等离子体的变化,建立了轴向 Z 和径向 R 的二维轴对称模型.气体分配器属于不锈钢材料,位于模型的左侧;气体分配器的电势固定;由气体分配器上布置的小孔向缓冲区内供气;模型的右上方为缓冲区的阳极,阳极固定放电电压为 300 V;最右侧是近阳极区和加速通道的交界面.模型中没有直接考虑放电加速通道,模拟时由最右侧也就是放电加速通道向区域内喷射电子.

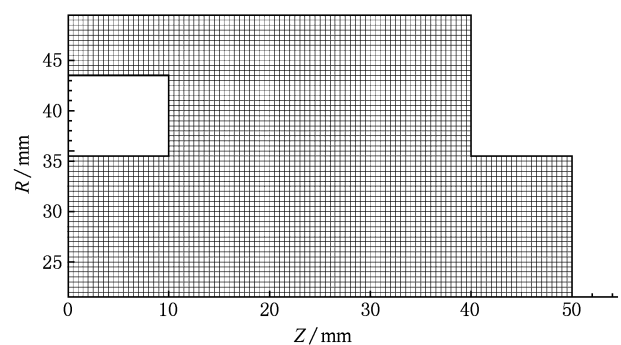


图3 计算模型

由于缓冲区内电离率很低,电离基本上不会对中性气体在缓冲区内分布产生影响,因此不考虑电离过程造成中性气体密度的减小,认为计算过程中中性气体密度时刻保持不变.在程序开始进行运算时,先由气体分配器向缓冲区内喷射原子,喷射

的原子温度为 700 K,服从半 Maxwell 分布. 喷入缓冲区的流量为 3 mg/s. 采用 DSMC (direct simulation Monte Carlo) 方法跟踪原子的运动以及原子间的碰撞. 当原子的分布达到稳态后,将原子作为背景,保持原子的密度分布不变,然后向缓冲区内喷射电子. 稳态情况下原子密度分布如图 4 所示.

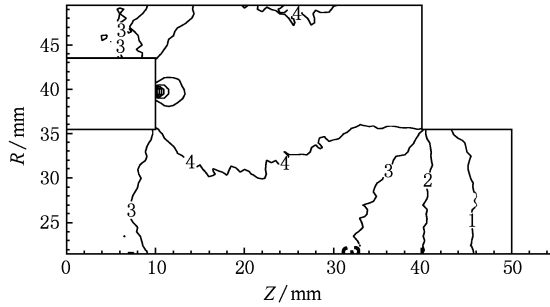


图 4 计算时采用的原子密度分布 等高线 1,2,3,4 分别代表的原子密度为 $3 \times 10^{19}, 4 \times 10^{19}, 5 \times 10^{19}, 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

从图 4 中可以看出,由于缓冲区的均化作用,进入放电通道的原子已经基本实现了均匀分布,因此缓冲区对于均化进入放电通道的原子的效果是明显的.

在模型中引用文献[22]对 ATON 型 Hall 推力器通道内的参数分布进行测量的实验结果,即喷射进入缓冲区的电子温度为 8 eV,右侧边界的电势固定为 290 V. 喷入缓冲区的放电电流固定为 3 A,计算时采用的磁场通过 Femm 软件进行模拟. 其他关于边界条件的处理,以及时间步长和空间步长的选择,和文献[21]一致.

缓冲区的预电离率 ν_{pre} 可以定义为缓冲区出口离子通量和原子通量的比值,即

$$\nu_{\text{pre}} = \frac{n_i V_i}{n_a V_a} = \frac{\sum v_i}{\sum v_a}, \quad (1)$$

式中, n_i, n_a 分别为离子密度和原子密度, V_i, V_a 分别为离子速度和原子速度. 在本文以下的內容中,将研究附加电源对等离子体分布以及预电离率 ν_{pre} 的影响.

3. 计算结果

计算时将放电电压固定为 300 V,最右侧电压为 290 V. 在这里,我们定义附加电源和放电电压的电压降为 ΔV . 在以下部分将验证附加电源不同电压降 ΔV 对等离子体参数分布以及预电离率的影响. 附加电源的布置方式如图 2 所示.



图 5 仿真粒子数随时间的演化

计算得到的仿真电子数 N_e 和离子数 N_i 的演化过程如图 5 所示. 从图中可以看出,经过大约 $2 \mu\text{s}$ 后,也就是电离产生的离子从缓冲区内喷出的时间尺度,电子、离子数基本不发生变化,此时可以认为计算达到稳定. 我们对各种物理参数进行统计,以评价气体分配器附加电压对缓冲区内等离子体参数分布的影响.

$\Delta V = 0 \text{ V}$ 以及 $\Delta V = 10 \text{ V}$ 时的等离子体密度分布分别见图 6(a) 和 6(b). 从图中可以发现,缓冲区内等离子体密度的峰值约为 $10^{17}/\text{m}^3$,比主流区内

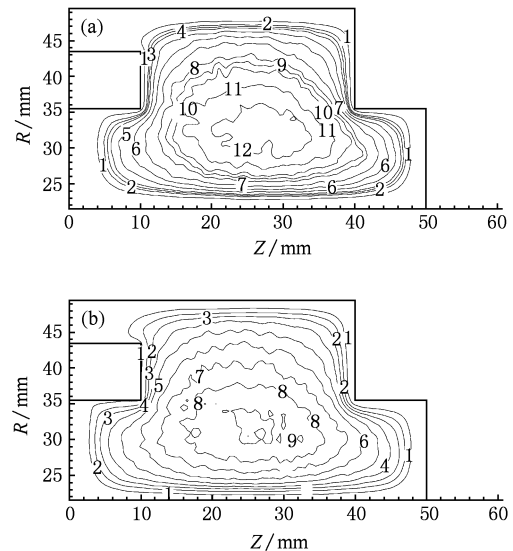


图 6 不同电压降情况下的等离子体密度分布 (a) $\Delta V = 0 \text{ V}$, 等高线 1—12 分别代表的等离子体密度为 $2 \times 10^{16}, 4 \times 10^{16}, 5 \times 10^{16}, 6 \times 10^{16}, 8 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.2 \times 10^{17}, 1.4 \times 10^{17}, 1.5 \times 10^{17}, 1.6 \times 10^{17}, 1.8 \times 10^{17}, 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$; (b) $\Delta V = 10 \text{ V}$, 等高线 1—9 分别代表的等离子体密度为 $2 \times 10^{16}, 6 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.4 \times 10^{17}, 1.6 \times 10^{17}, 2.2 \times 10^{17}, 2.6 \times 10^{17}, 3.0 \times 10^{17}, 3.4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$

的等离子体密度要小一个数量级,这一模拟结果和文献[23]中的实验测量结果一致.提高附加电源的电压,使电压降 $\Delta V=10\text{ V}$ 时,缓冲区内等离子体密度比 $\Delta V=0\text{ V}$ 时密度更高.这表明由于增加了电压降,造成电子从缓冲区内所获得的能量更多,电子电离原子的能力更强,缓冲区内等离子体密度相应地增加.

同时,我们对比了 $\Delta V=0\text{ V}$ 以及 $\Delta V=10\text{ V}$ 两种情况下缓冲区内电势分布,如图7(a)和7(b)所示.可以发现,对于这两种情况,缓冲区内均存在阳极鞘层.缓冲区内电势比阳极以及气体分配器上的电势都要高.阳极鞘层现象已经在文献[24]的实验过程中被发现.阳极鞘层的存在造成缓冲区形成指向放电通道的电场,这样有利于电离产生的离子在电场的作用下从缓冲区内进入放电通道.但是,数值计算的结果表明,当增大附加电势降 ΔV 后,缓冲区内电势要更大一些,这有利于电子从电场中获得更多的能量以及将电离后产生的离子从缓冲区输运到加速通道.

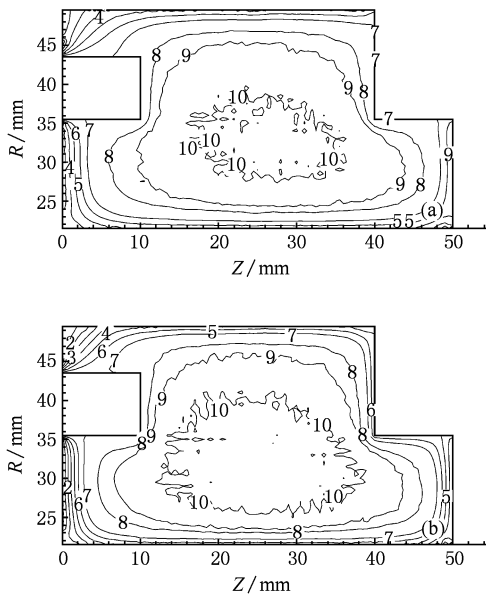


图7 不同附加电压情况下的电势分布 (a) $\Delta V=0\text{ V}$,等高线4—10分别代表的电势为285,290,295,300,305,306,307 V; (b) $\Delta V=10\text{ V}$,等高线1—10分别代表的电势为280,285,290,295,300,305,310,315,316,317 V

所对应的不同电压降下的电子温度分布如图8所示.图8(a)为 $\Delta V=0\text{ V}$ 时的电子温度分布.从图中可以发现,电子从放电通道进入缓冲区之初,在缓冲区内电场的加速下,电子温度迅速增加,最高电子温度为20 eV.但是,当电子进入缓冲区后,在和原子发生碰撞的过程中,电子会损失掉部分能

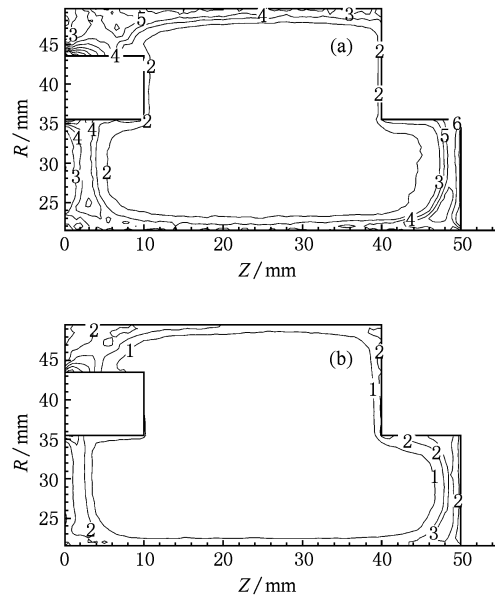


图8 不同附加电压下的电子温度分布 (a) $\Delta V=0\text{ V}$,等高线1—6分别代表的电子温度为2,4,6,8,10,12 eV; (b) $\Delta V=10\text{ V}$,等高线1—4分别代表的电子温度为5,10,15,20 eV

量,造成电子温度降低.同时,高能电子能够克服鞘层电势降和壁面发生碰撞,并发射出低能的二次电子,也会减小电子温度.缓冲区内大部分区域的电子温度降为2 eV左右.这表明,电子在缓冲区内由于电离以及与壁面的碰撞损失了大部分的能量.同时从图8(b)可以发现,当电压降 ΔV 增加到10 V后,缓冲区内最高电子温度增加到了30 eV.这表明由于附加电压的增加,造成电子从电场中所获得的能量增加;电子电离原子的能力相应地增强,造成缓冲区内等离子体密度的增加.这和图6的计算结果是一致的.

最后,根据(1)式,我们计算了不同电压降 ΔV 情况下缓冲区内预电离率 ν_{pre} 的变化,如图9所示.

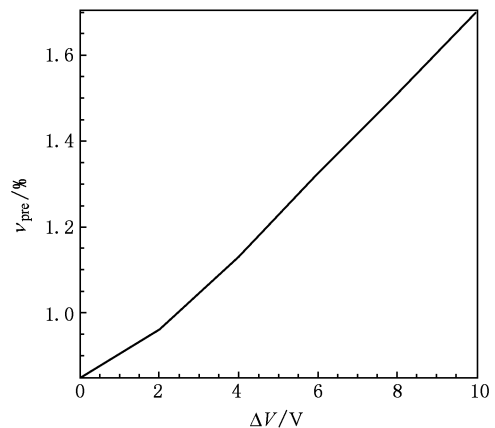


图9 预电离随电势降的变化

随着 ΔV 的增加,缓冲区内的预电离率相应地增加. 当 $\Delta V=0$ V,即不存在附加电压时,推力器内的预电离率 ν_{pre} 为 0.8%. 当 ΔV 增加到 10 V 后, ν_{pre} 增加到 1.6%. 由此可见,通过在气体分配器上采用附加电源的方式提高缓冲区的预电离率作用明显,是一种行之有效的方案.

结构进行了分析和模拟,提出了采用附加电源提高缓冲区预电离率的方法. 采用 PIC 粒子模拟方法对缓冲区内等离子体运动行为进行模拟发现,通过提高缓冲区内附加电压能够提高缓冲区内预电离率,从而减小低频振荡,提高推进器性能. 计算结果能够为 Hall 推力器的设计提供一定的理论指导.

4. 结 论

本文对 ATON 这种新型 Hall 推力器的缓冲区

-
- [1] Morozov A I 2003 *Plasma Phys. Rep.* **29** 235
 - [2] E P, Yu D R, Wu Z W, Han K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2535 (in Chinese) [鄂 鹏、于达仁、武志文、韩 轲 2009 物理学报 **58** 2535]
 - [3] Morozov A I, Bugrova A I, Desyatskov A V, Ermakov Yu A, Kozintseva M V, Lipatov A S, Pushkin A A, Khartchevnikov V K, Churbanov D V 1997 *Plasma Phys. Rep.* **23** 587
 - [4] Hofer R R 2004 *Ph. D. Dissertation* (Michigan: University of Michigan)
 - [5] Yan G J, Liu H, Wang C S, Yu D R 2007 *30th International Electric Propulsion Conference Florence Italy September 17—20, 2007 IEPC-2007-91*
 - [6] Yu D R, Wei L Q, Zhao Z Y, Han K, Yan G J 2008 *Phys. Plasmas* **15** 043502
 - [7] Keidar M, Boyd I D, Beilis I I 2001 *Phys. Plasmas* **8** 5315
 - [8] Choueiri E Y 2001 *Phys. Plasmas* **8** 5025
 - [9] Roy S, Pandey B P 2002 *Phys. Plasmas* **9** 4052
 - [10] Ahedo E, Martinez-Cerezo P 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3058
 - [11] Dorf L, Raites Y 2006 *Phys. Plasmas* **13** 057104.
 - [12] Barral S, Makowski K, Peradzynskib Z, Gascon N, Dudeck M 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4137
 - [13] Yu D R, Wu Z W, Wu X L 2005 *Plasma Sci. Technol.* **7** 2939
 - [14] Ding Y J, Yu D R, Wu Z W 2005 *Plasma Sci. Technol.* **8** 716
 - [15] Komurasaki K, Arakawa Y 1995 *J. Propul. Power* **11** 1317
 - [16] Fife J M 1999 *Ph. D. Dissertation* (Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology)
 - [17] Morozov A I, Savelév V V 2000 *Plasma Phys. Rep.* **26** 875
 - [18] Hagelaar G J M, Bareilles J, Garrigues L, Boeuf J P 2004 *Contrib. Plasma Phys.* **44** 529
 - [19] Geng S F, Tang D L, Zhao J, Qiu X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5520 (in Chinese) [耿少飞、唐德礼、赵 杰、邱孝明 2009 物理学报 **58** 5520]
 - [20] Yu D R, Zhang F K, Li H, Liu H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1844 (in Chinese) [于达仁、张凤奎、李 鸿、刘 辉 2009 物理学报 **58** 1844]
 - [21] Liu H, Yu D R, Yan G J, Liu J Y 2008 *Contrib. Plasma Phys.* **48** 603
 - [22] Bugrova A I, Lipatov A S, Morozov A I, Solomatina L V 2002 *Plasma Phys. Rep.* **28** 1032
 - [23] Bugrova A I, Desyatskov A V, Morozov A I, Khartchevnikov V K 2000 *Plasma Phys. Rep.* **26** 715
 - [24] Dorf L, Raites Y, Fisch N J 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 103309

Preionization of buffer chamber in ATON Hall thruster*

Liu Hui^{1)†} Wu Bo-Ying¹⁾ E Peng²⁾ Duan Ping²⁾

1) (*Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 10 November 2009; revised manuscript received 30 December 2009)

Abstract

ATON is a new type of Hall thruster proposed in the 1990s, while the buffer chamber is a new structure used in it. In this paper, the main functions of buffer chamber are analyzed, and the method by adopting additional electric source is proposed to increase the preionization rate. Then the particle in cell method is used to simulate the plasma behavior in it. The numerical results show that additional electric power source can increase preionization rate effectively.

Keywords: Hall thruster, buffer chamber, particle in cell, preionization

PACC: 5265, 5275D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975026), the Research Foundation of Higher Education Institution of Liaoning Education Bureau, China (Grant No. 2009A047) and National Science Foundation for Post-Doctoral Scientists of China (Grant No. 20090460918).

† E-mail: thruster@126.com