不同磁路结构 ECRIT 放电室实验研究

杨 涓，王雲民，马艳杰，王 阳，李鹏飞

（西北工业大学 航天学院，陕西 西安 710072）

摘 要：电子回旋共振离子推力器（ECRIT）属于静电型推力器，其工作原理是利用微波能和圆台型放电室内永磁体环产生的外加磁场产生高电离度的电子回旋共振（ECR）等离子体，再通过屏栅和加速栅之间的陡峭电势差加速其中的离子，从而产生推力。由于 ECRIT 采用了无阴极放电方案，因而它具有寿命长、结构简单的特点。ECRIT 放电室内恰当的放电室磁路结构对于推力器的可靠工作非常重要，一方面它要产生满足 ECR 等离子体形成需要的磁场位形；另一方面要使栅极附近的等离子体分布比较均匀，从而提高推力密度，降低离子对栅极的冲刷；再者还要求放电室能在比较高的能量利用效率下工作。在圆台型放电室内，文章采用了两种磁路结构，分别开展了真空环境下放电室内 ECR 等离子体的产生实验；认为放电室中的离子未被磁化，采用朗缪尔探针直接诊断两种磁路结构放电室内的电子温度和离子密度，分析氩等离子体场的结构。实验的结果是：靠近放电室大端面的永磁体环能够使推力器的能量利用效率提高，同时能够使栅极附近的等离子体分布更均匀，从而提高推力密度、降低离子对栅极的冲刷。

关 键 词：电子回旋共振，离子推力器，探针诊断

中图分类号：V439⁺.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-2758（2012）03-0326-07

ECRIT 是一种静电型推进装置，它利用微波能量和圆台型放电室内永磁体环产生的外加磁场产生高电离度的电子回旋共振（ECR）等离子体，其中的离子在屏栅和加速栅之间陡峭的电势差作用下被加速引出，从而产生推力。引出的离子束流再被中和器释放的电子中和。ECRIT 的特点是比冲高、无电极烧蚀、长寿命、电源系统简单，因而非常适用于长时间工作的空间飞行器。日本宇宙科学研究所 2003 年把这种推力器应用到 HYABUSA 返回式深空探测器上，2010 年 6 月 HYABUSA 成功返回地面[1]。在长达 7 年的空间飞行中，ECRIT 始终承担着重要的推进作用[2]。HYABUSA 的成功返回证明了这种推力器在深空探测中应用的可行性。国内利用实验和数值模拟相结合的方法已经研制出圆台型 ECRIT 放电室实验模型[3]，并成功引出离子束流，同时对放电室内的等离子体特征进行了诊断实验。实验结果表明在栅极附近等离子体密度过于集中在栅极轴线附近，这将导致离子流对栅极中心部位产生过分的冲刷并降低推力密度，因此现有的 ECRIT 放电室结构还需要改进。为此本文通过改进磁路构型的途径来改进放电室结构，对具有两种磁路结构的 ECRIT 放电室进行放电实验；认为放电室中的离子未被磁化，采用朗缪尔探针直接诊断两种磁路结构放电室内的电子温度和离子密度，分析氩等离子体场的结构。实验的结果是：靠近放电室大端面的永磁体环能够使推力器的能量利用效率高，同时能够使栅极附近的等离子体分布更均匀，从而提高推力密度、降低离子对栅极的冲刷，这种磁路结构是比较合理的磁路结构。

1 ECRIT 放电室结构

如图 1 所示，ECRIT 放电室是一套加有栅极组件的圆波导和喇叭波导组合体，在喇叭波导内壁粘贴两个磁极方向相反的环状钐钴永磁环，它在波导

收稿日期：2011-06-04 **基金项目**：国家自然科学基金（11075128）资助

作者简介：杨 涓（1963—），女，西北工业大学教授，主要从事空间推进技术研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

内产生一定的磁场强度以形成 ECR 等离子体。喇叭波导本体材料为软磁合金,产生汇聚磁力线并避免磁力线外泄的作用。栅极组件由相互绝缘、间距小于 1 mm 的屏栅、加速栅和减速栅组成,各栅极上开有数百个小孔。加速栅和减速栅之间形成陡峭的电势分布,对离子束流进行引出、聚焦和加速。减速栅接地或加几伏特的正电位,避免中和器释放的电子束向放电室回流。

为了研究不同磁路对放电室内等离子体的影响,设计了两种放电室磁路结构。结构一是磁环靠近喇叭波导的小端面,其中图 1 的磁环 1 距离喇叭波导小端面距离 L_1 = 15 mm、两个磁环之间距离 L_2 = 15 mm。结构二是磁环靠近喇叭波导的大端面,其中图 1 的磁环 1 距离喇叭波导小端面距离 L_1 = 20 mm、两个磁环之间距离 L_2 = 15 mm。两种结构磁路的磁场分布规律测量结果表明结构二磁路所产生的 ECR 区域范围更大,并且靠近喇叭波导的大端面。

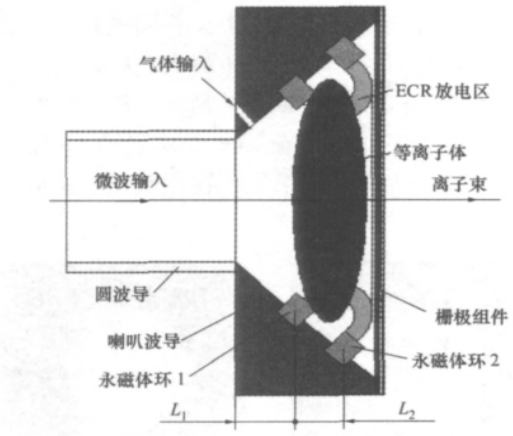


图 1　ECRIT 放电室结构示意图

2　ECRIT 放电室内朗缪尔探针诊断方法的适用性及诊断系统

把朗缪尔探针深入到等离子体中,可以测量到伏安特性曲线如图 2 所示。在无磁场条件下,电子和离子的速度都服从 Maxwell 分布,从而可得朗缪尔探针的电子和离子饱和电流分别为

$$I_{eo} = \frac{1}{4}A_p e n_e \bar{v}_e$$

$$I_{io} = \frac{1}{4}A_p e z n_i \bar{v}_i \qquad (1)$$

式中 A_p 为探针有效收集面积,e 为电子电量,z 为离子电荷数,n_e 和 n_i 分别为探针鞘层外的电子和离子数密度,$\bar{v}_e$ 和 $\bar{v}_i$ 分别为电子和离子的平均速度。

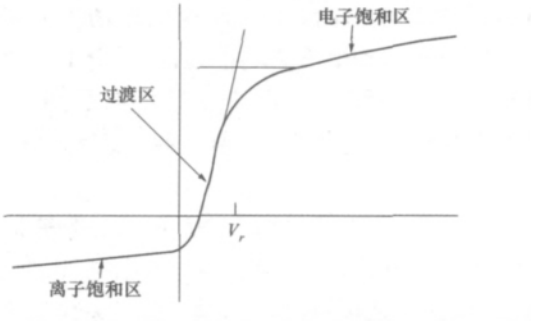


图 2　朗缪尔探针实验伏安特性曲线

从伏安特性曲线过渡区的斜率、电子及离子饱和电流可分别求出电子温度、电子与离子数密度[4]

$$kT_e = \left|\frac{\mathrm{d}(eV_p)}{\mathrm{d}[\ln(I + I_{io})]}\right| \approx \left|\frac{\mathrm{d}(eV_p)}{\mathrm{d}[\ln I]}\right| \qquad (2)$$

$$n_e = \frac{4 \times 10^{13} I_{e0}}{(A_p \sqrt{kT_e})} \qquad (3)$$

$$I_{io} = \frac{1}{4}A_p z e n_i \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi m_i}} \qquad (4)$$

式中 T_e 为电子温度,k 为波尔兹曼常数,T_i 为离子温度,m_i 为离子质量。事实上,饱和离子电流仍然与 T_e 有关,可以表示为

$$I_{io} = A_p z e n_i \sqrt{\frac{kT_e}{\in m_i}} = 8.9 \times 10^{-16} z n_i \sqrt{kT_e} A_p \qquad (5)$$

式中 $\in$ 为自然对数底数。可以得到离子密度 n_i 为

$$n_i = \frac{1.12 \times 10^{15} I_{i0}}{(zA_p \sqrt{kT_e})} \qquad (6)$$

ECRIT 的微波频率为 4.2GHz,因而在 ECR 面上,磁场感应强度应该为 0.15T。针对 ECRIT 放电室内的低气压效应,忽略碰撞,带电粒子在磁场中的回旋半径 $r = \frac{mv}{Bq}$,其中 m、v、B、q 分别为粒子质量、速度、磁感应强度和粒子电量。文献[5]曾经采用数值模拟的方法计算出 ECRIT 放电室内电子的最高温度可以达到 5.5eV。根据粒子的平均速度 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$,可以得到放电室电子的最大平均速度为 0.669×10^6 m/s,所以电子在放电室 ECR 区的回旋半径 $r_e = 0.25 \times 10^{-13}$ m。再假设 ECRIT 以氩气为工作介质,且一价氩离子具有 0.1 eV 的能量,可以计算出其平均速度为 $0.078\ 36 \times 10^{-4}$ m/s,则放电室

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ECR 区离子的回旋半径 r_i 为 21.82×10^{-4} m。而一般朗缪尔探针半径 r_a 选取为 0.075 mm。所以 $r_e < r_a \ll r_i$，故放电室内永磁体产生的磁场为中等强度磁场，对电子饱和电流影响很大，但对离子饱和电流影响不大。因而仍然可以通过朗缪尔探针的伏安特性曲线过渡区求电子温度，通过离子饱和电流求离子密度。

ECRIT 放电室等离子体诊断实验系统如图 3 所示。该系统由微波源、隔直器、放电室、二维坐标架、探针及探针连接器、探针电源、真空实验舱及真空泵机组和工质供应系统组成。对放电室等离子体的诊断首先在不考虑离子束流的加速条件下进行，因而实验采用的放电室模型只有屏栅，而且在屏栅上开有一个狭缝以通过朗缪尔探针。安装在二维坐标架上的探针伸入到放电室后可以在轴线和径向方向分别移动以测量不同位置处的等离子体伏安特性曲线。

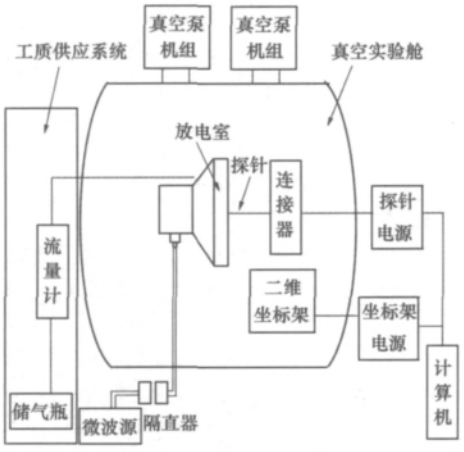


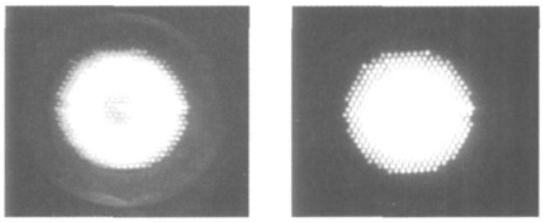
图 3　等离子体诊断实验系统

3　实验结果及分析

实验时放电室的工作条件为：微波源输出频率 4.2 GHz，输出功率在 5 ~ 50 W 范围内可调；工质气体为氩气，流量变化范围为 1 ~ 10 sccm；真空实验舱极限真空度为 5.0×10^{-4} Pa，10 sccm 氩气流量条件下的工作真空度为 1.0×10^{-2} Pa。

3.1　放电实验

放电实验不考虑离子束流的加速，采用带有狭缝的屏栅。实验中观察到的放电现象为：在给定的气体流量条件下，逐渐提高微波输出功率，气体被击穿并形成一个比较明亮的等离子体环如图 4a) 所示。随后再逐渐提高微波输出功率，可以发现等离子体环逐渐消失，最后形成大体积的明亮等离子体如图 4b) 所示。再逐渐降低微波输出功率，可以观察到等离子体环又重新出现。进一步降低微波输出功率将会使等离子体完全消失。不同磁路结构放电室等离子体启动、等离子体环消失（大体积等离子体出现）时的工作参数如表 1 所示，表中数据表明结构二磁路方案放电室在等离子体启动、大体积等离子体出现和等离子体消失都在比较低的微波功率条件下进行。



a)　低功率下的明亮等离子体环　　b)　高功率下大体积等离子体

图 4　放电室内等离子体图像

表 1　不同结构放电室等离子体启动和消失时的微波功率

磁路结构	结构一				结构二			
流量/sccm	4	6	8	10	4	6	8	10
放电功率/W（等离子体环出现）	7.06	8.7	9.3	9.8	6.58	6.58	6.51	6.55
等离子体环消失时功率/W	34.2	34.0	33.7	33.3	29.1	28.4	28.00	28.11
等离子体消失时功率/W	6.69	7.06	7.06	6.69	6.15	6.15	6.15	6.18

3.2　等离子体诊断实验

由于放电室内具有突起的磁环、朗缪尔探针含 10 mm 长的钨丝针尖和 40 mm 长的陶瓷套管、屏栅窄缝宽度有限，因而无法对放电室内的等离子体进行全场诊断，只能有选择地进行局部诊断。实验时，首先设定探针位于轴线上，并以屏栅内表面为参考

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面,探针通过屏栅窄缝伸入放电室内 40 mm,然后利用二维坐标架在沿半径和轴线方向每间隔 5 mm 移动探针,再采集探针的伏安特性曲线。

在流量为 8 sccm、功率为 10 W 和 34 W 条件下,利用朗缪尔探针分别对两种结构放电室 ABCD 区域进行电子温度和离子密度诊断,诊断结果分别在图 5 和图 6 中给出。图示说明,在给定的实验条件下,结构一放电室 *ABCD* 区域内等离子体的电子温度和离子密度分布在 1 ~ 6.8 eV 和 2×10^{16} ~ 2.8×10^{17} /m^3 范围内; 结构二放电室内等离子体的电子温度和离子密度分布在 2 ~ 17 eV 和 6×10^{16} ~ 4.8×10^{17} /m^3 范围内。两种结构放电室的诊断结果具有类似的分布规律。电子温度的分布规律为: 在明亮等离子体环出现条件下,最高电子温度区域都偏离轴线、出现在 *ABCD* 域的外侧 *A* 点附近; 在等离子体环消失的条件下,最高电子温度区域都出现向轴线的 *C* 点靠近; 在不同微波功率条件下,靠近屏栅位置处的电子温度都比较低。离子密度的分布规律为: 在明亮等离子体环出现条件下,最大离子密度区都偏离轴线、出现在 *ABCD* 域的 *AB* 侧; 在等离子体环消失条件下,最大离子密度区趋向轴线; 在不同微波功率条件下,靠近屏栅位置处的离子密度都比较低。

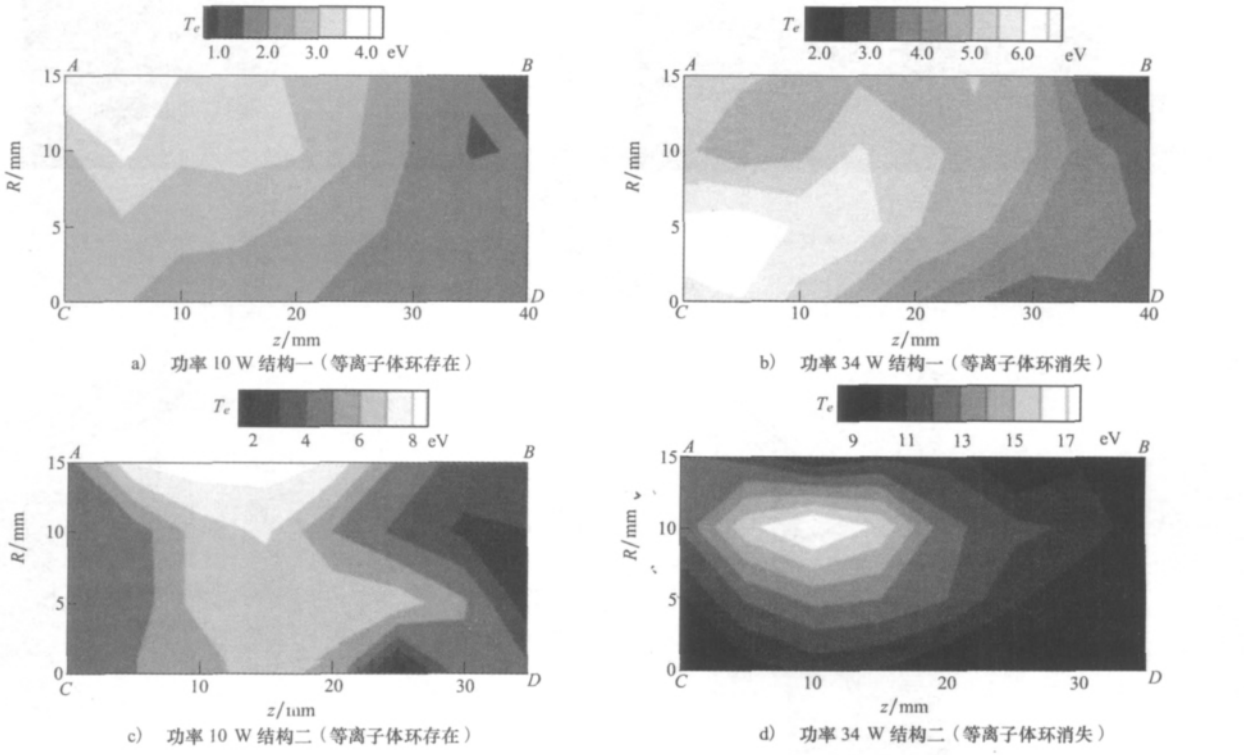
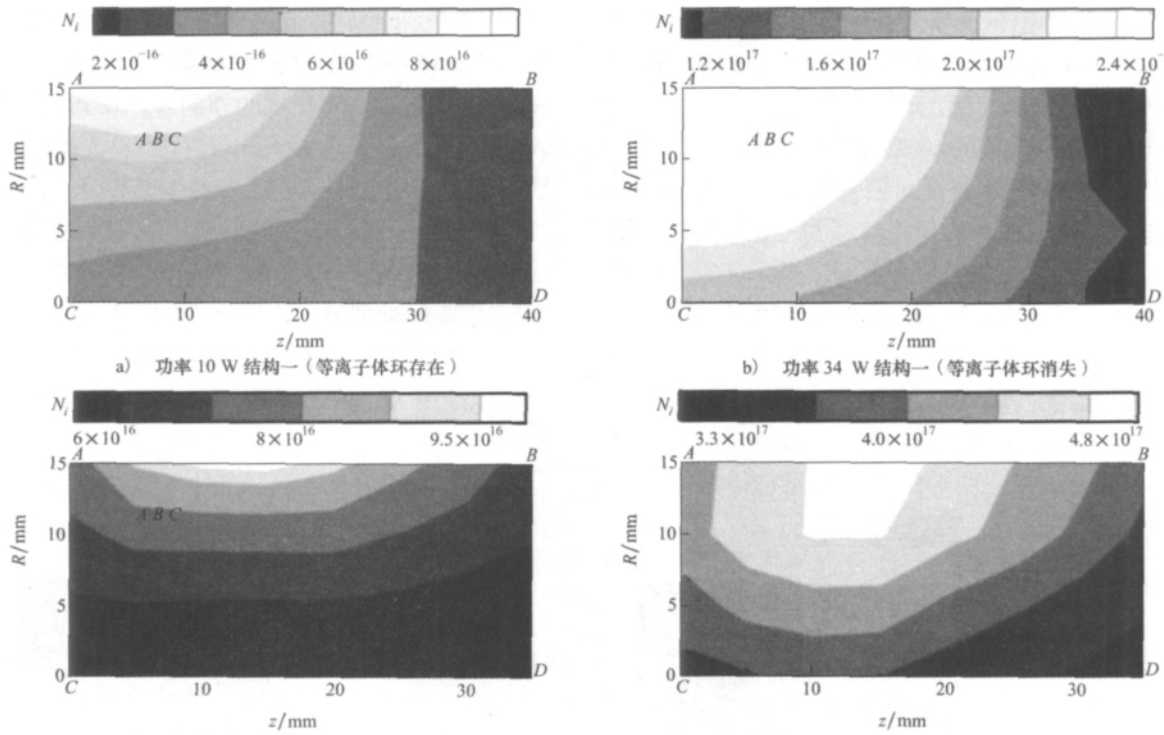


图 5　电子温度诊断结果

可以用 ECRIT 结构一放电室内的微波激励电场强度分布规律数值模拟结果和 ECR 面位置图 7[6] 对实验结果进行解释。如图 7 所示,在放电室内轴线附近 *ABCDE* 区域内,微波激励电场强度较强。在此区域之外,微波激励电场强度随半径的增加而减小,愈靠近栅极电场强度愈低。ECR 面并没有处于最强的微波激励电场强度区。在放电室内微波功率足够低时,放电室工质气体首先在轴线附件比较高的微波激励电场强度区被击穿,而此时,ECR 面上由于电子回旋运动和微波振荡发生共振,电子吸收的微波功率增加。和轴线附近由强电场强度击穿的等离子体相比,这部分增加的微波功率明显提高了电子能量和气体电离度。因而,放电室内最高电子温度区位于 ECR 面附近,这在图 5a) 和图 5c) 所示的实验诊断曲线上表现出最高电子温度区偏离于轴线。而较高的电子温度带来了较高的电离度,这使得在图 6a) 和图 6c) 上最高离子密度区也偏离于轴线而向 ECR 面靠近。因而图 5a) 、图 5c) 、图 6a) 、图 6c) 给出的诊断结果和图 4a) 所示的明亮环状等离子体区实验图像相一致。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a) 功率 10 W 结构一（等离子体环存在）

b) 功率 34 W 结构一（等离子体环消失）

c) 功率 10 W 结构二（等离子体环存在）

d) 功率 34 W 结构二（等离子体环消失）

图 6 离子密度诊断结果

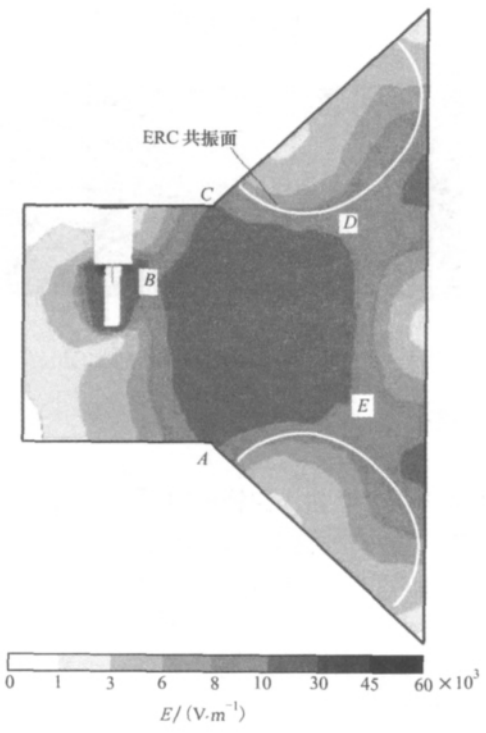


图 7 ECRIT 放电室内微波激励电场和 ECR 共振面

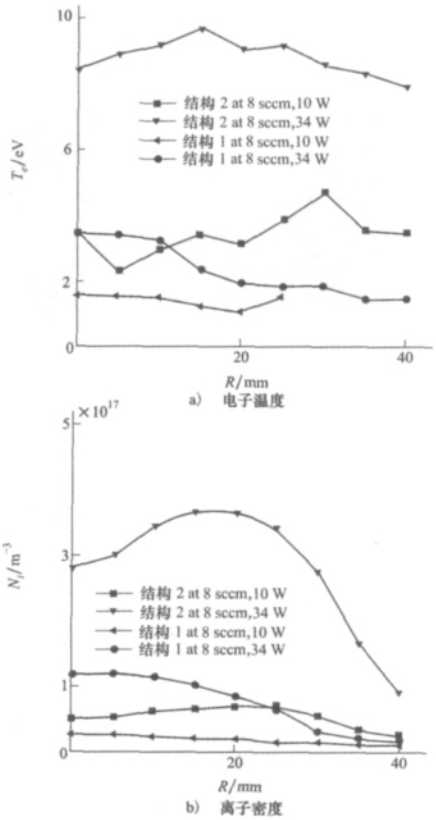


图 8 栅极缝隙径向直线上的诊断结果

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在放电室内微波功率足够高时,放电室工质气体依然首先在轴线附件比较高的微波激励电场强度区被击穿。此时情况相反,尽管 ECR 面上电子吸收的微波功率增加,但是和轴线附近等离子体相比,这部分增加的微波功率并没有明显提高电子能量和气体电离度。因而,放电室内最高电子温度区依然位于轴线附近,这在图 5b) 和图 5d) 所示的实验诊断曲线上表现出最高电子温度区位于轴线附近。虽然在图 6b) 和图 6d) 上最高离子密度区没有出现在轴线附近,但是在 AC 面上离子密度分布较均匀。因而图 5b) 、图 5d) 、图 6b) 、图 6d) 给出的诊断结果和图 4b) 所示的明亮等离子体区分布在轴线附近的实验图像相一致。

在流量为 8 sccm、功率为 10 W 和 34 W 条件下,利用朗缪尔探针分别对两种结构放电室在栅极缝隙径向直线上进行诊断,结果如图 8 所示。在给定的实验条件下,结构一放电室径向直线上等离子体的电子温度和密度分布在 1 ~ 4.5 eV 和 2×10^{16} ~ 1.4×10^{17} /m^3 范围内,结构二放电室径向直线上等离子体的电子温度和密度分布在 2.2 ~ 9 eV 和 2.5×10^{16} ~ 3.7×10^{17} /m^3 范围内。实验诊断结果显示,结构二放电室内电子温度远高于结构一放电室,因而引起比较高的气体电离度。结构一放电室最高电子温度和离子密度区基本上都集中在径向距离 15 mm 以内的轴线附近,这种结果不利于提高推力器的推力密度,而且还有可能会加重离子对栅极中心部位的轰击。结构二放电室的最高电子温度和离子密度区分布在径向距离 5 ~ 30 mm 以内,这种分布规律有利于提高推力器的推力密度,同时降低离子对栅极中心部位的轰击。

4　结　论

本文通过改进磁路构型的途径来改进放电室结构,对具有两种磁路结构的 ECRIT 放电室进行放电实验,认为放电室中的离子未被磁化,采用朗缪尔探针直接诊断两种磁路结构放电室内的电子温度和离子密度,分析氙等离子体场的结构。实验的结果是:靠近放电室大端面的永磁体环能够使推力器的能量利用效率高,同时能够使栅极附近的等离子体分布更均匀,从而提高推力密度、降低离子对栅极的冲刷,是一种比较合理的磁路结构。

参考文献:

[1] Dennis Normile. Spunky Hayabusa Heads Home with Possible Payload. Science. 2010,328(4): 1-4

[2] Kuninaka H, Nishiyama K, Funaki I, Shimizu Y, Yamada T, Kawaguchi J. Assessment of Plasma Interactions and Flight Status of the HAYABUSA Asteroid Explorer Propelled by Microwave Discharge Ion Engines. IEEE Trans on Plasma Science. 2006, 34(5): 1-8

[3] 叶　超. 低气压低温等离子体诊断原理与技术. 科学出版社, 2010, 1

[4] 杨　涓,石　峰,杨铁链,孟志强. 电子回旋共振离子推力器放电室等离子体数值模拟. 物理学报, 2010,59(12): 1-6
Yang J, Shi F, Yang T L, Meng Z Q. Numerical Simulation on the Plasma Field within Discharge Chamber of Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster. Acta Physica Sinica, 2010, 59(12): 1-6 (in Chinese)

[5] 杨铁链,杨　涓,毛根旺,夏广庆. 电子回旋共振推力器放电室内磁场与微波电磁场分析. 中国空间科学技术. 2009,2: 1-7
Yang T L, Yang J, Mao G W, Xia G Q. Magnetic and High-Frequency Electromagentic Field Analysis in Electron Cyclotron Resonance Thruster. Chinese Space Science and Technlogy, 2009, 2: 1-7 (in Chinese)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Experimental Research on Discharge Chamber of ECRIT with Two Kinds of Magnetic Circuit

Yang Juan, Wang Yunmin, Ma Yanjie, Wang Yang, Li Pengfei
(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi´an 710072, China)

Abstract: Electron cyclotron resonance ion thruster (ECRIT) runs on ECR plasma which is produced by microwave energy and magnetic field from two permanent magnetic rings inside the discharge chamber. The ions in ECR plasma are extracted by the sharp potential gap of screen and acceleration grids to produce thrust. ECRIT has the advantages of high specific impulse, electrodelessness and high durability, which make the thruster competitive in the applications of deep space probe and long life satellite. Sections 1 through 3 explain the experimental research mentioned in the title, whose core consists of: " Appropriate magnetic circuit inside the discharge chamber of ECRIT is important for the thruster reliable operation in that it must generate the magnetic field required by ECR plasma generation and drive plasma density in a uniform distribution near the surface of screen grid for high thrust density and low grid erosion by the accelerated ions, thus operating the discharge chamber with a high efficiency. Within the tapered discharge chamber, two types of magnetic circuit are used to produce argon ECR plasma, of which the electron temperature and ion density are diagnosed by Langmuir probe. " The experimental results, given in Table 1 and Figs. 6, 8 and 9, and their analysis, show preliminarily that, when the magnetic rings approach the major end surface of the discharge, the efficiency and ion density distribution near the screen grid can be improved.

Key words: electron cyclotron resonance, ion propulsion, probe diagnostics

武书连主编的《挑大学 选专业》2012 版新增的第五章是: 2012 中国大学教师水平排名、教师绩效排名、新生质量排名、毕业生质量排名

四个排名表均有 140 名 B + 等以上的排名。在 2012 版《挑大学 选专业》武书连写的前言中提到按照教师水平(学术水平) 、教师绩效(教学科研效率) 、本科毕业生质量三个排名表,他认为中国有 19 所大学进入中国一流大学。例如中国一流大学第 19 名是华东理工大学,第四章的总分排名是第 35,在第六章第 185 页介绍它的三个排名是: 教师水平第 18 名 A + ,教师绩效第 24 名 A + ,毕业生质量第 22 名 A + 。

胡沛泉
2012 年 6 月

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net