

微推力 ECR 离子推力器中和器实验研究

孟海波¹, 杨涓¹, 朱康武², 孙俊², 黄益智¹, 金逸舟¹, 刘宪闯¹

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2.上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要:微推力电子回旋共振(ECR)中和器作为 ECR 离子推力器的关键组成部分,其初始放电及电子束流引出性能对离子推力器整体性能起着重要作用。研究对象为直径 2 cm 的 ECR 离子推力器中和器,根据中和器放电室内静磁场分布,选取不同结构的天线、腔体及电子引出板,并在真空环境下进行束流引出实验。实验结果表明:在一定范围内,腔体长度越长、天线环形段略高于 ECR 区且环形段宽度越小时,中和器性能越好;对于电子引出板存在一个合理结构使得中和器性能更佳。此外,在一定的偏压及气体流量范围内,无论采用哪种结构的腔体、天线及电子引出板,中和器引出的电子束流的大小均随偏压及气体流量的增加而增加。根据实验中不同组合结构中中和器的气体初始放电以及电子束流引出性能的对比,最终得到较为合理的中和器结构。该中和器以氙气为工质,在微波功率 2.0 W、流量 0.2 mL/min 的工作条件下,引出电子束流 4 mA 所需偏压为 31.5 V。

关键词:中和器;实验;电子回旋共振;等离子体;电子束流;微波

中图分类号:V43 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2018)01-0042-07

近年来,微型航天器及其推进系统受到越来越多的关注,微推力器正在加速研究之中。这些微推力器推力只有微牛级,能够实现微型航天器的姿态控制、在超低轨道上的大气阻力补偿以及多微型航天器的编队飞行等。

离子推力器的高比冲(3 000 s)、高推进效率(50%)以及持续可控的推力可完全满足小型航天器的任务要求^[1-4]。但在离子推力器的小型化上,目前主要存在两大困难:①功率有限,小型航天器的可用功率大约为 1 W/kg,10~50 kg 级航天器最大可用功率仅为 10~50 W,而目前技术比较成熟的电子轰击式微型离子推力器总功率要求至少为 30 W;②中和器小型化十分困难,常规电子轰击式离子推力器的中和器结构已经很小,进一步小型化几乎不太可能^[5-7]。

电子回旋共振(electron cyclotron resonance, ECR)离子推力器^[8-9]有着无阴极烧蚀、结构简单、易于微型化等特点,应用前景广泛。微推力 ECR 离子推力器由 ECR 离子源和 ECR 中和器组成,两者采用相同的放电室结构,根据 ECR 等离子体放电原

理,产生等离子体并分别引出离子和电子束流,从而产生推力并中和离子束流。ECR 中和器作为微推力 ECR 离子推力器的关键组成部分,其初始放电及电子束流引出性能对离子推力器整体性能起着重要作用,因而开展微推力器 ECR 离子推力器的 ECR 中和器研究是非常重要的工作。就此本文实验研究氙工质 ECR 中和器的引出电子束流影响因素,获得中和器结构与工作参数对引出电子束流的影响规律,从而获得中和器最大引出束流、最低引出电压和最短气体放电时间条件下的合理中和器结构和工作参数。研究工作将为形成优良性能的微推力 ECR 离子推力器奠定重要的基础。

1 中和器工作原理及实验系统

1.1 中和器结构与工作原理

如图 1 所示,中和器主要由圆柱腔体、磁轭、内外环磁体、耦合天线及电子引出板组成。中和器放电室直径为 2 cm,利用 4.2 GHz 微波能量击穿气体。

耦合天线采用环形结构^[10],该结构既可增强微波等离子体中电子的 ECR 效应,又可减小等离子体在天线表面的碰撞损失^[11]。

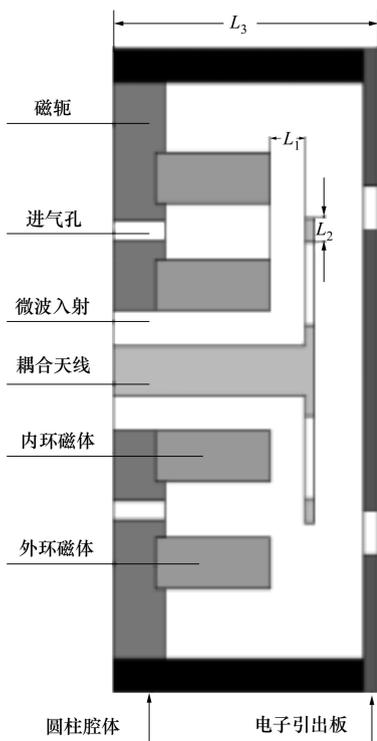


图 1 中和器结构图

中和器工作时,放电室内的少量初始电子在静磁场和微波电场的共同作用下绕磁力线做回旋运动。当电子的回旋频率与微波频率相等时^[12],电子与微波发生共振。共振条件下的电子不断吸收微波能量,形成 ECR 效应。当电子获得的能量大于气体电离能后与中性粒子碰撞,把气体击穿产生大量等离子体。电子在电子收集板和中和器之间电势差的作用下被引出,离子在中和器内壁面鞘层电势差作用下加速溅射腔体壁面,产生二次电子发射。二次电子一部分中和壁面附近被加速的离子,另一部分进入等离子体主区,以维持中和器内的电荷守恒。

1.2 实验系统

如图 2 所示,中和器电子束流引出实验系统主要由真空设备、微波产生与传输设备、气体供应设备、中和器、电子收集板和电源组成。真空设备包括真空泵机组及真空实验舱($\Phi 1.2\text{ m}\times 3\text{ m}$);微波产生与传输设备包括固态微波源、微波线缆、隔直器、环形器、衰减器和微波功率计;气体供应设备包括推进剂气瓶、减压阀、流量控制计、金属气管和气动软管。

实验中设置电子收集板与中和器间距离为 5 mm。如果两者距离过近,中和器放电室中未被电离的中性气体无法顺利流出,导致放电室中气体压强过大,不利于电子与微波的耦合;若两者距离过远,中和器与收集板间形成的电场较弱,不利于电子的引出与收集。

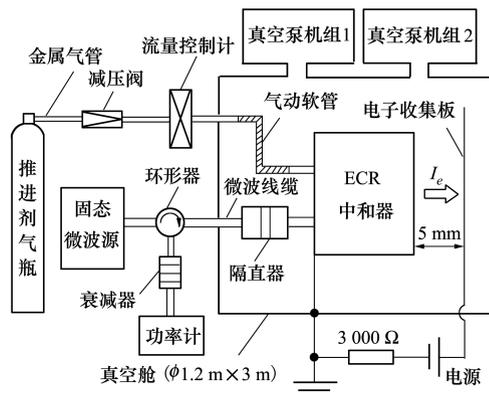


图 2 电子束流引出实验系统图

2 影响中和器性能的主要因素

影响中和器性能的主要因素有中和器吸收的微波功率、微波电场与静磁场的分布规律、电子引出板的结构。中和器吸收的微波功率越大,微波电场与静磁场的分布规律越合理,电子获能越高,则更易形成大量等离子体。电子引出板具有合理的孔径时,中和器性能更佳。中和器吸收的微波功率大小可以通过固态微波源调节,而静磁场和微波电场的合理分布则需要对天线和腔体结构进行合理设计。

天线结构影响中和器微波电场与静磁场分布关系^[13],如图 1 所示,天线距磁体上表面距离 L_1 和环形段宽度 L_2 是天线的主要结构参数。 L_1 影响天线环形段相对于 ECR 区的位置, L_2 影响等离子体在天线表面的碰撞损失大小。图 3 为中和器放电室特征区域的静磁场强度分布。根据静磁场分布,实验设置 L_1 分别为 0.10、0.20 和 0.35 (文章中所有待优化结构参数均为无量纲参数),即分别对应天线环形段在 ECR 区的左侧、正对位置及右侧。同时设置 L_2 分别为 0.4 和 0.6。

如图 1 所示,腔体长度 L_3 对微波电场分布有着重要影响。 L_3 长度越短,电场等势线就被压缩得越密,在 ECR 区的电场强度就越强,则越能够提高气

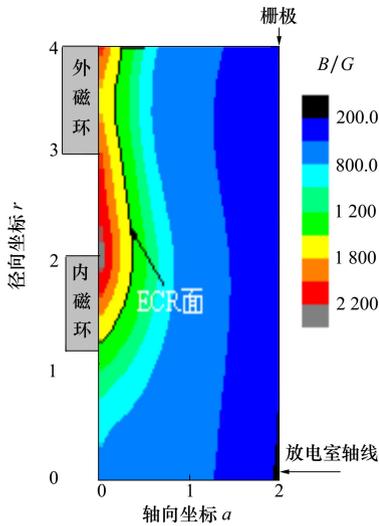


图3 静磁场分布

体放电效率,但 L_3 长度过短将会影响电子与微波的耦合程度。 L_3 过长,微波电场沿轴向衰减剧烈,使得电子引出板对微波电场几乎没有约束作用。最终设置 L_3 分别为5.25、5.75和6.25。

表1 电子引出板编号

引出板编号	D	M	R
1	0.8	6	2.0
2	0.8	6	2.5
3	1.0	6	2.5
4	0.8	4	2.0

对电子引出板而言,其孔径 D 、孔数 M 以及孔圆心分布半径 R 是影响电子束流引出的重要参数。孔径 D 决定了中和器出口处等离子体鞘层特征,当孔径与鞘层厚度相当时,电子需要克服的势垒很小,中和器内电子方能顺利引出。孔数过多,可能导致中性气体的流失;孔数过少,则不利于电子引出。最终设置如表1所示的4种电子引出板。

3 中和器电子束流引出实验及结果分析

根据上述中和器影响因素分析,在电子引出束流 I_e 为1~4 mA条件下,以氙气为工质,实验研究不同结构的天线、腔体、电子引出板以及工作参数对中和器性能的影响。工作参数为微波功率 P_i 和气

体流量 q 。根据中和器初始气体放电性能,即初始放电时间 T ,并以引出相同电子束流时最低的中和器偏压 U 为目标确定合理的天线、腔体、电子引出板结构和工作参数。实验中部分结构下的中和器未能测出引出1 mA电子束流时的偏压值,原因在于实验所用电源最低输出电压约15 V。

3.1 天线结构对中和器性能的影响对比

实验中确定 $L_3 = 6.25$ 的腔体和1号电子引出板为固定结构。表2给出了不同天线结构下中和器初始放电性能,图4给出了不同天线结构下中和器引出电子束流的变化规律。

表2 不同天线结构下中和器初始放电性能

天线类型	$q/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	P_i/W	T/min
$L_1/L_2 = 0.10/0.6$	0.5	5.5	10
$L_1/L_2 = 0.10/0.4$	0.7	5.5	8
$L_1/L_2 = 0.20/0.6$	0.5	3.6	9
$L_1/L_2 = 0.20/0.4$	0.5	3.6	5
$L_1/L_2 = 0.35/0.6$	0.5	2.3	5
$L_1/L_2 = 0.35/0.4$	0.3	2.3	3

表2表明,天线距磁体上表面 L_1 一定时,环形段宽度 L_2 越窄,中和器气体初始放电用时越短; L_2 一定时, L_1 越长,中和器气体初始放电用时越短且所需微波功率越低。因此确定天线参数 $L_1/L_2 = 0.35/0.4$ 时,中和器初始放电性能更佳。图4表明,无论哪种结构天线,中和器引出的电子束流均随着气体流量及偏压的增加而增加。分别比较图4的a)与d)、b)与e)、c)与f)可得,当 L_1 一定时, L_2 越窄,中和器引出的电子束流越大。原因在于环形段越窄,天线结构对气体流动产生的阻力低,等离子体在天线表面碰撞损失小,有利于形成更高的等离子体密度。

再分别比较图4的a)~c)与d)~f),可以发现当 L_2 一定时, L_1 越长,中和器引出的电子束流也越大,其原因要从天线环形段和ECR区的相对位置来分析。如图5a)所示,当 $L_1 = 0.10$ 时,天线在ECR区左侧。该情况下等离子体已优先在天线附近的位置形成,而后等离子体向电子引出板漂移过程中经过ECR区,此漂移期间产生的能量损失抵消了ECR区的效应,因而形成的等离子体密度低,中和器引出电子束流小。如图5b)所示,当 $L_1 = 0.20$ 时,天线正对ECR区。此时ECR区被天线环形段分割,导致

ECR 效应减弱,因此形成的等离子体密度小,中和器引出电子束流小。如图 5c) 所示,当 $L_1 = 0.35$ 时,天线在 ECR 区右侧。此时等离子体在天线附近场强的位置形成,等离子体恰好在 ECR 区附近,则 ECR 效应明显,因而形成的等离子体密度高,中和

器引出电子束流大。因此在工作参数与引出电子束流大小相同的条件下,天线参数 $L_1 = 0.35$ 的中和器需要的偏压最低。综合考虑, $L_1 = 0.35, L_2 = 0.4$ 是天线合理的结构参数。

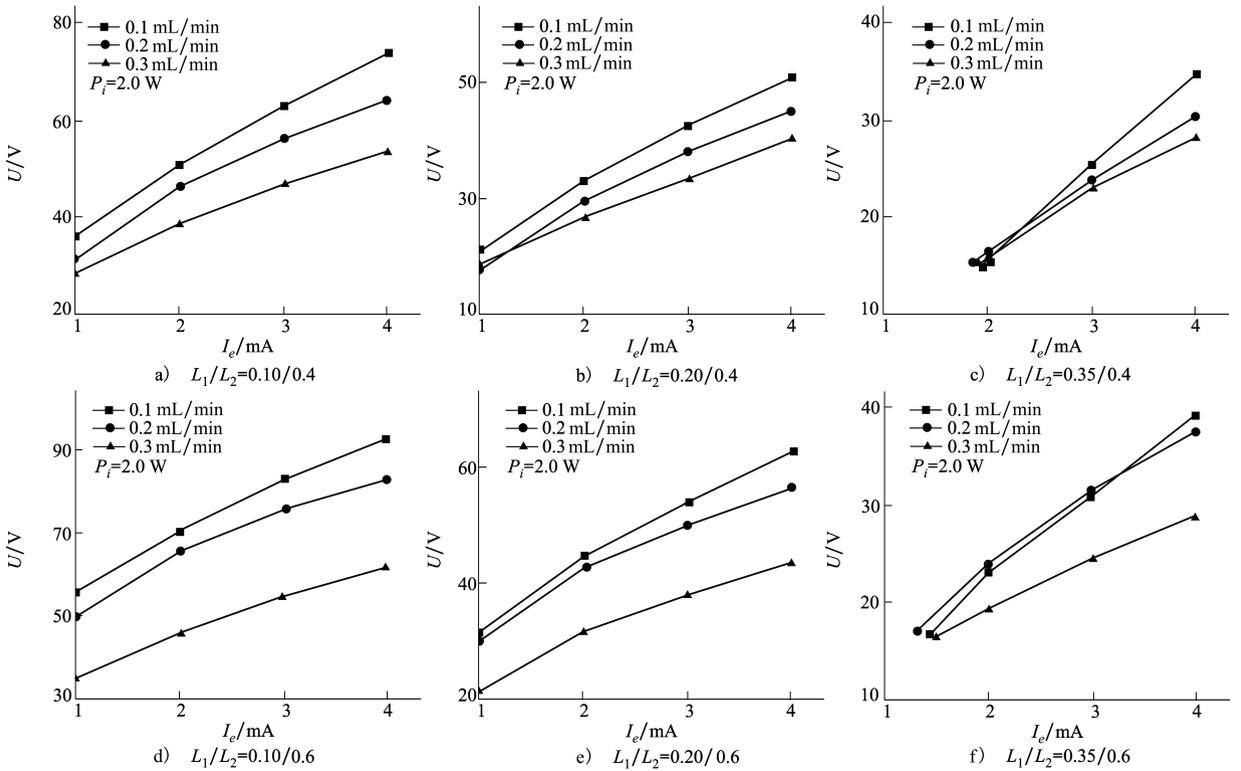


图 4 不同天线结构中中和器引出电子束流的变化规律

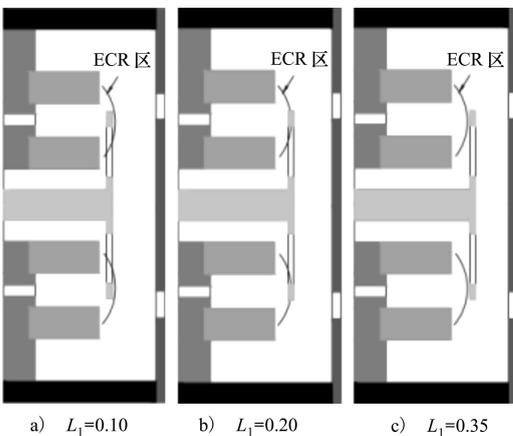


图 5 天线环形段与 ECR 区相对位置关系图

3.2 腔体结构对中和器性能的影响对比

实验确定 $L_1 = 0.35, L_2 = 0.4$ 的天线和 1 号电子

引出板为固定结构。表 3 给出了不同腔体结构下中和器初始放电性能,图 6 给出了不同腔体结构下中和器引出电子束流的变化规律。

表 3 不同腔体结构下中和器初始放电性能

腔体类型	$q/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	P_i/W	T/min
$L_3 = 5.25$	0.5	2.3	7
$L_3 = 5.75$	0.5	2.3	6
$L_3 = 6.25$	0.3	2.3	3

表 3 表明,尽管中和器气体初始放电所需微波功率一致,但腔体长度 L_3 越长,中和器气体初始放电用时越短。因此确定 $L_3 = 6.25$ 时,中和器放电性能更好。图 6 表明,无论采用哪种结构的腔体,中和器引出的电子束流均随着气体流量及偏压的增加而增加。对比图 6 的 a) ~ c) 得到,当工作参数一定

时,腔体长度 L_3 越长,中和器引出相同电子束流所需偏压越小。原因在于腔体长度短时,放电室内气体压强高,电子与原子之间碰撞频率高,电子在 ECR 区还未来得及获得足够的微波能量就发生碰撞,从而破坏了电子与微波的耦合,导致形成的等离

子体密度低。当腔体长度增加到合适值时,电子与原子的碰撞频率比较合适,电子在 ECR 区能够充分获得微波能量,从而形成密度比较高的等离子体。综合考虑, $L_3 = 6.25$ 为腔体合理结构参数。

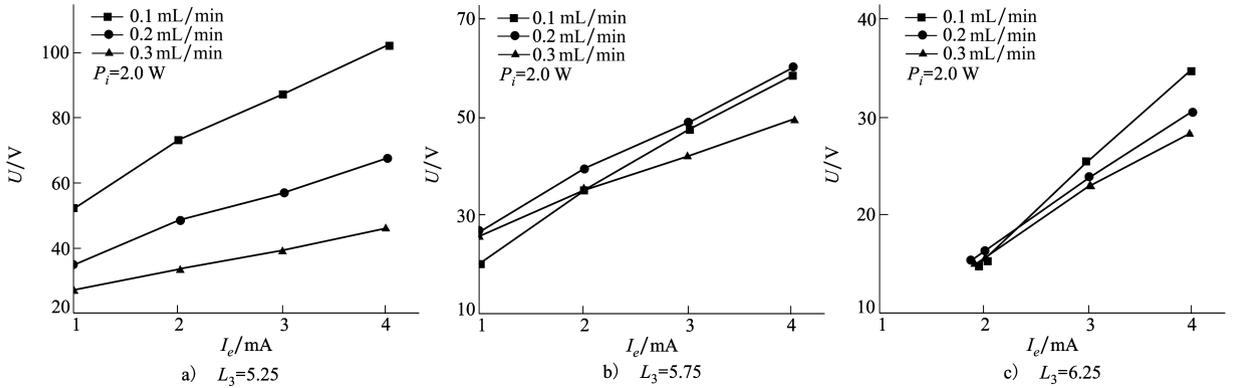


图6 不同腔体结构下中和器引出电子束流的变化规律

3.3 电子引出板结构对中和器性能的影响对比

实验中确定 $L_1 = 0.35$ 、 $L_2 = 0.4$ 的天线和 $L_3 = 6.25$ 的腔体为固定结构。表4给出了不同电子引出板结构下中和器初始放电性能,图7给出了不同电子引出板结构下中和器引出电子束流的变化规律。

表4 不同电子引出板结构下中和器初始放电性能

引出板编号	$q / (\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	P_i / W	T / min
1	0.3	2.3	3
2	0.3	3.7	5
3	0.3	2.3	3
4	0.3	3.0	5

出板的中和器气体初始放电用时相等,且均少于采用其他类型电子引出板的中和器气体初始放电用时,两者初始放电性能相当。图7表明,无论采用哪种结构的电子引出板,中和器引出的电子束流均随着偏压的增加而增加。对比图中曲线看出,采用3号电子引出板的中和器在引出相同电子束流的条件下所需偏压最低。原因在于孔数过少,孔直径过小,放电室内气体压强升高,电子与原子之间碰撞频率增加,电子在 ECR 区还未获得足够的微波能量就发生碰撞,从而破坏了电子与微波的耦合,因而导致形成的等离子体密度低。合理的孔数与孔直径使得电子与原子的碰撞频率较合适,电子在 ECR 区能够充分获得微波能量,从而形成密度较高的等离子体。综合考虑,孔数 $M=6$ 、孔直径 $D=1.0$ 、孔分布半径 $R=2.5$ 为电子引出板合理结构参数。

3.4 工作参数对中和器性能的影响实验

在确定了天线、腔体以及电子引出板的合理结构后,需要将这3种结构组合进行一次性能实验。目的在于:一方面研究工作参数对中和器性能的影响规律;另一方面为了得到中和器在合理结构下的最佳性能。合理结构下中和器引出电子束流的变化规律见图8所示。

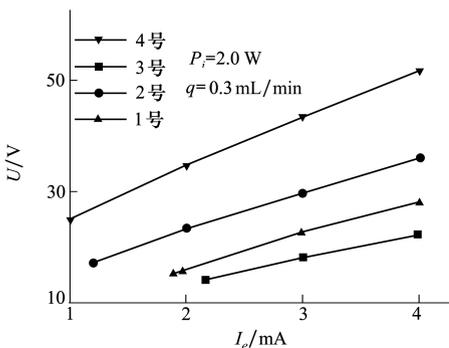


图7 不同电子引出板结构下中和器引出电子束流的变化规律

对比表4得到,采用1号电子引出板与3号电子引

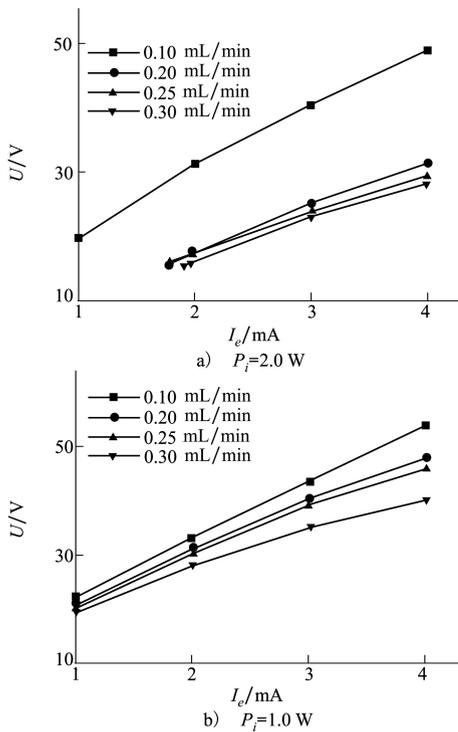


图 8 合理结构下中和器引出电子束流的变化规律

分析图 8 可得到与结构优化实验基本相一致的结论,即当中和器结构一定时,若输入微波功率一定,引出电子束流随气体流量及偏压的增加而增加。这是因为气体流量增加,中和器内形成的等离子体密度升高,从而引出的电子束流更大。当然,由于气体利用效率的限制,引出的电子束流并不会随气体流量的增加而无限增大。在微波功率及偏压一定的情况下,流量增加到一定值,气体利用效率将达到最大值,此时引出的电子束流也将达到饱和。对比图 8 的 a) 和 b) 得到,当气体流量一定时,中和器引出

电子束流随微波功率的增加而增加,且当气体流量不低于 $0.2 \text{ mL} \cdot \text{min}$ 时,微波功率的增加会显著提高中和器电子束流引出性能。原因在于微波功率增加,放电室内电子获得的能量更多,更容易与中性气体碰撞产生等离子体。综合考虑,中和器在合理结构下的最佳性能为:在微波功率 2.0 W 、氙气流量 $0.2 \text{ mL} \cdot \text{min}$ 工作条件下,中和器引出 4 mA 电子束流仅需施加约 31.5 V 的偏压。

4 结 论

根据放电室内磁力线及微波电场的分布特征,以实验手段对中和器的天线、腔体及电子引出板结构进行优化。主要结论如下:

1) 在腔体及电子引出板结构一定的情况下,存在合理天线结构使得中和器放电及束流引出性能最好,实验得到天线环形段下表面略高于 ECR 区且环形段宽度 $L_2 = 0.4$ 时,天线结构更合理。

2) 在天线和电子引出板结构一定的情况下,存在合理腔体长度使得中和器放电及束流引出性能最好,实验得到合理的腔体长度为 $L_3 = 6.25$ 。

3) 在天线及腔体结构一定的情况下,存在合理电子引出板结构使得中和器放电及束流引出性能最好,实验得到合理的电子引出板结构为孔数 $M = 6$ 、孔直径 $D = 1.0$ 、孔分布半径 $R = 2.5$ 。

4) 在一定范围内,中和器引出的电子束流大小随着气体流量、输入微波功率的增加而增加。在采用合理中和器结构条件下,中和器最佳工作和性能参数为输入微波功率 2.0 W 、气体流量 $0.2 \text{ mL}/\text{min}$ 、引出偏压 31.5 V 、引出电子束流 4 mA 。

参考文献:

- [1] Izumi T, Koizumi H, Yamagiwa Y, et al. Performance of Miniature Microwave Discharge Ion Thruster for Drag-Free Control[C] //48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2012: 4022
- [2] Nishiyama K, Kuninaka H, Nakai T. Two-Dimensional Characterization of Microwave E-Fields and Beam Profiles of the ECR Ion Thruster $\mu 20$ [C] //30th International Electric Propulsion Conference, 2007: 25
- [3] Nishiyama I, Tsukizaki R, Nishiyama K, et al. Experimental Study for Enhancement Thrust Force of the ECR Ion Thruster $\mu 10$ [C] //50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014: 3913
- [4] Nakayama Y, Funaki I, Kuninaka H. Sub-Milli-Newton Class Miniature Microwave Ion Thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2): 495-499
- [5] Funaki I, Kuninaka H, Toki K. Plasma Characterization of a 10 cm Diameter Microwave Discharge Ion Thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4): 718-727

- [6] Takao Y, Koizumi H, Kasagi Y, et al. Investigation of Electron Extraction from a Microwave Discharge Neutralizer for a Miniature Ion Propulsion System[C]//34th International Electric Propulsion Conference, 2015: 159
- [7] Koizumi H, Kuninaka H. Ion Beam Extraction and Electron Emission from the Miniature Microwave Discharge Ion Engine $\mu 1$ [C]//31st International Electric Propulsion Conference, 2009: 178
- [8] Koizumi H, Kuninaka H. Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Driven by 1 Watt Microwave Power[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(3): 601-604
- [9] Koizumi H, Kuninaka H. Performance of the Miniature and Low Power Microwave Discharge Ion Engine $\mu 1$ [C]//46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2010: 6617
- [10] 汤明杰,杨涓,冯冰冰,等. 微推力 ECR 离子推力器等离子体源电子获能计算分析[J]. 推进技术, 2015, 36(11): 1741-1747
Tang Mingjie, Yang Juan, Feng Bingbing, et al. Calculation Analysis on Electron Heating within Plasma Source Used by Micro ECR Ion Thruster[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(11): 1741-1747 (in Chinese)
- [11] 汤明杰,杨涓,金逸舟,等. 微型电子回旋共振离子推力器离子源结构优化实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 319-325
Tang Mingjie, Yang Juan, Jin Yizhou, et al. Experimental Optimization in Ion Source Configuration of a Miniature Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 319-325 (in Chinese)
- [12] 罗立涛,杨涓,金逸舟,等. ECR 中和器束流引出实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(3): 395-400
Luo Litong, Yang Juan, Jin Yizhou, et al. Experiential Study of Electron Beam Extraction from ECR Neutralizer[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(3): 395-400 (in Chinese)
- [13] 梁雪,杨涓,王云民. 电子回旋共振中和器内静磁场及微波电磁场的数值计算[J]. 推进技术, 2014, 35(2): 276-281
Liang Xue, Yang Juan, Wang Yumin. Numerical Computation of Static Magnetic and Microwave Electromagnetic Fields in Electron Cyclotron Resonance Neutralizer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(2): 276-281 (in Chinese)

Experimental Research on the Neutralizer of Micro ECR Ion Thruster

Meng Haibo¹, Yang Juan¹, Zhu Kangwu², Sun Jun², Huang Yizhi¹,

Jin Yizhou¹, Liu Xianchuang¹

(1.School of Astronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China;)
(2.Shanghai Institute of Aerospace Control Technological Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: As the key component of micro electron cyclotron resonance (ECR) ion thruster, the initial gas discharge and electron beam extraction performance of ECR neutralizer plays an important role in the whole performance of ECR ion thruster. The experiment on the neutralizer is completed to study the influence of the antenna structure, cavity length and electronic extraction board on the performance. The experimental results show that, within a certain range, as the length of the cavity is longer, the annular segment of antenna is slightly higher than ECR zone and the width of annular segment is smaller, the performance of the neutralizer is better. There is a reasonable structure for the electronic extraction board to make the performance of the neutralizer better. According to the experimental results, the optimal structure of the neutralizer is determined. For Xe gas, when the microwave power is 2.0W and the gas flow rate is 0.2sccm, the best performances of the optimal neutralizer are that extracted electron beam and coupling voltage is 4mA and 31.5V respectively.

Keywords: neutralizer; experiments; electron cyclotron resonance; plasma; electron beams; microwaves