

微波离子推力器中磁场发散区电子加热模式研究*

付瑜亮 张思远 杨谨远 孙安邦† 王亚楠

(西安交通大学, 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049)

(2024 年 1 月 3 日收到; 2024 年 2 月 4 日收到修改稿)

在微波离子推力器的磁场结构设计中, 一般认为增大磁镜区的面积能够约束更多电子, 有利于提高能量利用率; 减小发散区面积能够减少电子在壁面的损失, 有利于降低放电损耗. 随着一体化仿真研究深入, 发现利用 Child-Langmuir 鞘层的特性可约束电子, 使其在鞘层与磁镜间往复运动获能. 对此, 本文设计了适用于 1 cm 磁阵列微波离子推力器的磁场结构, 并对其初始放电和束流引出过程进行了一体化仿真, 对比阐明了电子在磁场发散区受 Child-Langmuir 鞘层、天线表面鞘层和磁镜共同约束下的获能模式. 该获能模式可提升磁场发散区的电子温度, 促进电离, 提升栅极前等离子体密度, 进而提升束流密度. 仿真结果表明, 在氙气流量 0.3 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 微波功率为 1 W, 栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300\text{ V}/-50\text{ V}$ 条件下, 磁阵列微波离子推力器的电流密度较 2 cm 微波离子推力器提升 57.9%. 本文从理论上对磁场发散区电子加热模式进行了验证, 研究结果将为微波离子推力器优化设计提供理论依据, 促进微波离子推力器性能提升.

关键词: 电子回旋共振, 离子推力器, 电子约束, 电子加热**PACS:** 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp**DOI:** 10.7498/aps.73.20240017

1 引言

微波离子推力器利用电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 加热机制形成高能电子, 从而电离中性气体产生等离子体, 栅极系统将离子加速喷出产生推力. 微波离子推力器具备无热阴极、长寿命、低启动条件的特点^[1,2], 非常符合微小卫星需求^[3-5].

在微波离子推力器小型化过程中, 受面容比增大的影响, 等离子体更容易在放电室壁面损失, 增大放电损耗^[6-10]. 对此, 国内外学者针对约束电子维持高效放电的磁场结构设计开展了仿真和实验研究^[11-15], 并逐渐达成了将放电室的磁场结构划分为磁镜区和发散区的共识^[16], 如图 1 所示. 研究认为, 增大磁镜区的面积能够约束更多电子, 有利于提高能量利用率; 而减小发散区面积能够减少电

子在壁面的损失, 有利于降低放电损耗. 据此, 东京大学^[17,18]和西北工业大学^[19]都对微波离子推力器进行了磁场结构优化, 并取得一定成效. 在气体流量 0.3 sccm (1 sccm = 1 mL/min)、微波功率 2 W 条件下, 东京大学 $\mu 1$ 型微波离子推力器推力可达 316 μN , 西北工业大学 2 cm ECR 离子推力器推力可达 368 μN .

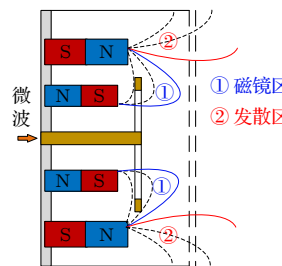


图 1 微型微波离子推力器磁场结构示意图

Fig. 1. Magnetic field diagram of miniature microwave discharge ion thruster.

* 国家自然科学基金 (批准号: 52307183)、中央高校基本科研业务费 (批准号: xtr052023003) 和电工材料电气绝缘全国重点实验室基金 (批准号: EIPe23114) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: anbang.sun@xjtu.edu.cn

随着研究深入, 文献 [20] 表明 Child-Langmuir 鞘层排斥电子的特性会使流向栅极的电子返回磁镜区加热, 促成沿 Child-Langmuir 鞘层分布的高能电子; 进一步地, 提出了利用 Child-Langmuir 鞘层约束电子, 使其在发散区往复穿越 ECR 区获能的加热模式. 基于此, 本文设计了适用于 1 cm 磁阵列微波离子推力器的磁场结构, 并采用一体化的 PIC-MCC (particle-in-cell with Monte Carlo collision) 方法将放电室、栅极系统、近场羽流区域统合为一个计算域 [21], 对该推力器的初始放电和束流引出过程进行仿真. 本文将对文献 [20] 提到的电子加热模式进行仿真验证, 为后续磁阵列微波离子推力器原理样机设计提供理论参考.

2 仿真模型

2.1 计算域和边界条件

计算域如图 2 所示. 计算域大小为 20 mm × 15 mm, 包含了放电室、栅极系统和离子束羽流区域. 考虑本文的研究对象在放电室内部, 为了减少计算量, 对羽流模型进行了简化, 没有加入中和器, 将零电势面提前来吸收离子. 在计算域中, 对放电室、栅极及其附近区域 ($r \leq 5$ mm, $z < 11.5$ mm) 进行网格加密, 网格步长为 0.025 mm. 另外, 图 2 中标注了求解泊松方程的边界条件, 其中天线电势由累积电荷自洽计算 [21].

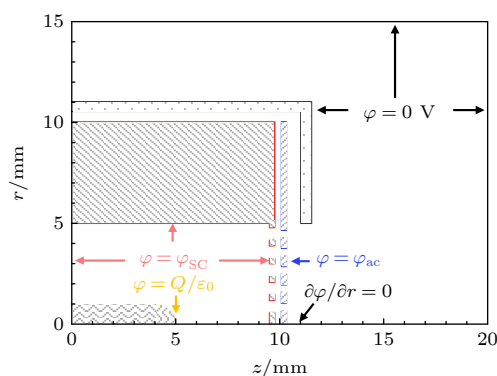


图 2 计算域和边界条件

Fig. 2. Calculation region and boundary condition setting.

2.2 碰撞类型和参数设置

碰撞模型中, 考虑电子-中性粒子的弹性、激发和电离碰撞; 离子-中性粒子的弹性和电荷交换碰撞; 中性粒子之间的弹性碰撞.

仿真参数设置如下: 微波频率为 4.2 GHz, 微

波功率为 1 W, 氙气流量为 0.3 sccm. 在初始放电仿真中, 屏栅和加速栅电压均为 0 V, 初始等离子体密度为 $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 初始宏粒子数量约为 10000 个; 在引出束流仿真中, 屏栅和加速栅电压分为两组, 300 V/-50 V 和 500 V/-100 V, 继承上一工况等离子体分布.

2.3 磁场结构

磁阵列微波离子推力器采用三段式 Halbach 磁体, 其磁场分布由 COMSOL 二维轴对称模型计算得到, 如图 3 所示. 黑色虚线连接会切点和磁阱, 向左为贴壁分布的磁镜区, 向右为紧挨栅极的发散区.

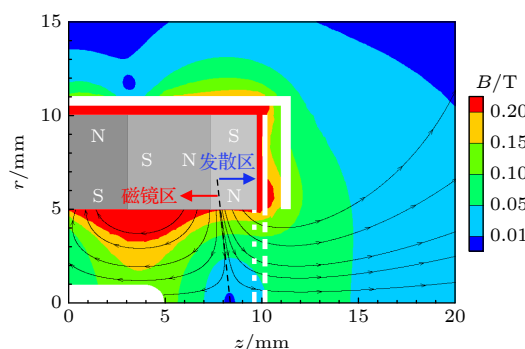


图 3 磁阵列微波离子推力器结构示意图

Fig. 3. Magnetic field diagram of magnet array microwave discharge ion thruster.

3 仿真结果与讨论

3.1 初始放电时等离子体参数分布

在无栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 0 \text{ V}/0 \text{ V}$ 条件下, 推力器初始放电时电子和离子密度分布如图 4 所示,

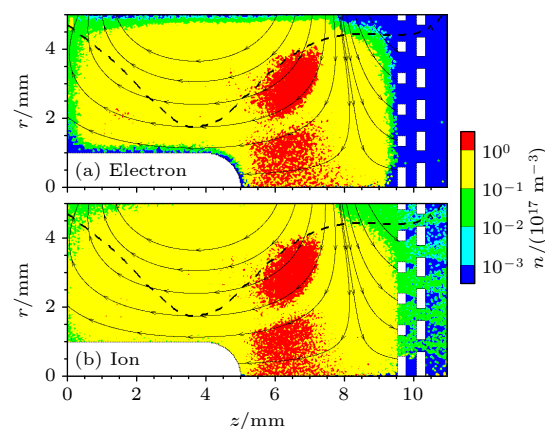


图 4 放电阶段电子和离子密度分布

Fig. 4. Electron and ion density distribution in discharge stage.

图中黑色细线为磁力线, 黑色虚线为 ECR 区 (磁场强度 0.15 T). 等离子体密度最高为 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 量级, 在放电室内该密度量级的分布明显分为上、下两个区域. 前者靠近 ECR 区, 位于磁镜包络内, 属于主要电离区; 后者位于磁阱附近, 由等离子体顺磁场梯度漂移形成, 属于等离子体聚集区. 若从传统的放电室仿真角度分析, 该磁场构型的推力器栅极前等离子体密度较低, 性能表现并不优秀. 然而, 一体化仿真在束流引出阶段给出了不同结论.

3.2 束流引出时等离子体参数分布

在栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$, 其他参数设置不变的条件下, 推力器束流引出时电子和离子密度分布如图 5 所示. 与无栅极电压情况相比, 施加栅极电压后放电室等离子体参数分布发生明显变化, 等离子体密度为 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 的区域明显扩大, 尤其是在栅极前 ($z = 8 \text{ mm}$ 处) 等离子体密度提升了 1 个数量级. 这表明在束流引出过程中放电室内等离子体电离得到了增强. 为了排除电压影响, 将栅极电压增加至 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 500 \text{ V}/-100 \text{ V}$, 仿真结果如图 6 所示, 电子和离子密度分布没有随电压发生明显变化.

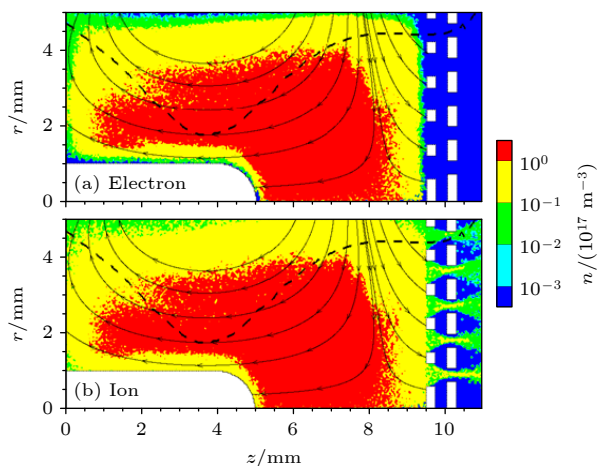


图 5 栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$ 时电子和离子密度分布

Fig. 5. Electron and ion density distribution at $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$.

3.3 发散区电子加热模式讨论

在输入功率、流量不变的条件下, 束流引出过程中放电室内等离子体密度增加, 说明电离强度提升, 与之对应的必然是电子温度分布发生变化. 图 7 所示为上述三个工况的电子温度分布. 当 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} =$

0 V/0 V 时, 电子获能区域基本位于磁镜区的包络内, 电子温度可达 16 eV 以上; 在发散区电子温度约为 4—8 eV. $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$ 和 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 500 \text{ V}/-100 \text{ V}$ 的电子温度分布几乎相同, 在磁镜区和发散区同时观测到高能电子, 发散区电子温度约为 4—12 eV. 图 8 给出了磁场发散区中电子可能的运动轨迹, 其中 Child-Langmuir 鞘层、天线表面鞘层分别由栅极电势、悬浮电势形成. 不考虑碰撞的情况下, Child-Langmuir 鞘层反射的电子首

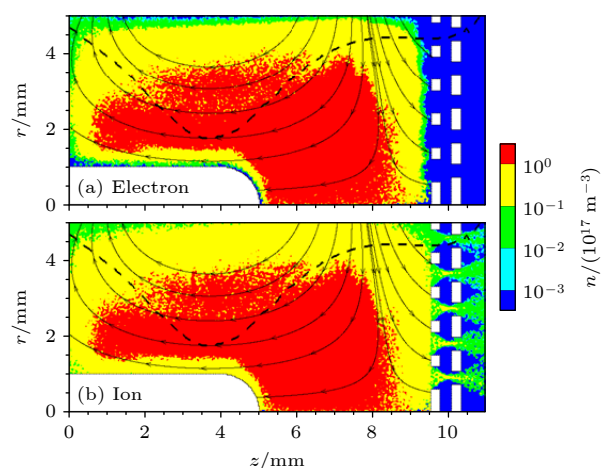


图 6 栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 500 \text{ V}/-100 \text{ V}$ 时电子和离子密度分布

Fig. 6. Electron and ion density distribution at $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 500 \text{ V}/-100 \text{ V}$.

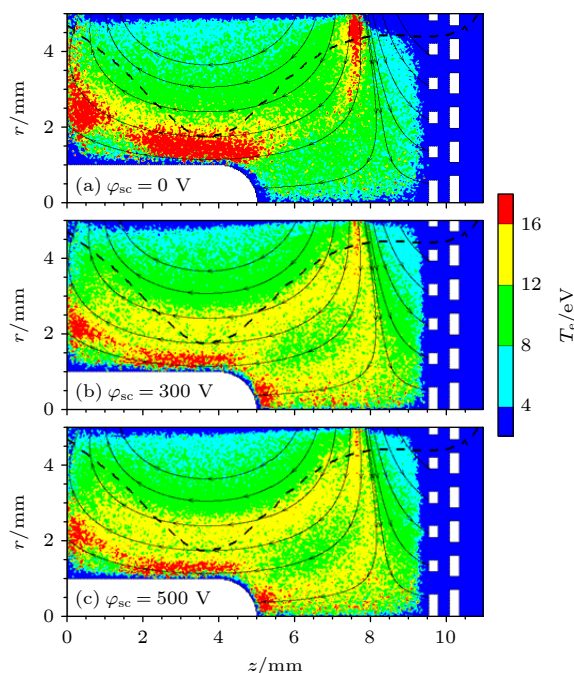


图 7 电子温度分布对比

Fig. 7. Comparison of electron temperature distributions.

先会沿磁力线返回磁镜, 然后经磁镜反射可能流向磁镜区、天线、栅极, 得到如下结果: 1) 磁镜区, 在磁镜区往复运动加热; 2) 天线, 高能电子可突破表面鞘层造成损失, 其余电子反射回到磁镜; 3) 栅极, 电子反射回磁镜. 不论哪种结果, 电子在经磁镜反射的过程中穿过两次 ECR 区, 都可能获得能量. 因此, 磁场发散区的电子受 Child-Langmuir 鞘层、天线表面鞘层和磁镜共同约束, 往复运动并从 ECR 区获能, 最终在该区域形成高能电子分布. 这充分验证了文献 [20] 提出的 Child-Langmuir 鞘层参与约束电子, 使电子在发散区加热的假设.

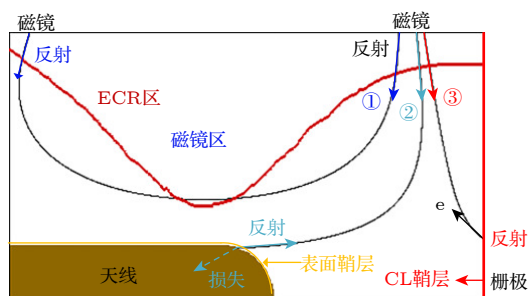


图 8 磁场发散区的电子运动示意图

Fig. 8. Electron motion diagram in magnetic field diffusion region.

在本文磁场结构下, 发散区电子加热作为微波离子推力器固有磁镜区电子加热之外的补充, 可减少电子损失数量, 提高电子利用效率; 使电子在发散区从 ECR 区获能并参与电离, 提升栅极上游的等离子体密度, 进而提升推力器电流密度. 通过统计离开加速栅下游截面的离子数, 图 9 展示了栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$ 时引出束流曲线. 施加电压约 $5 \mu\text{s}$ 后引出束流趋于稳定, 约为 0.47 mA .

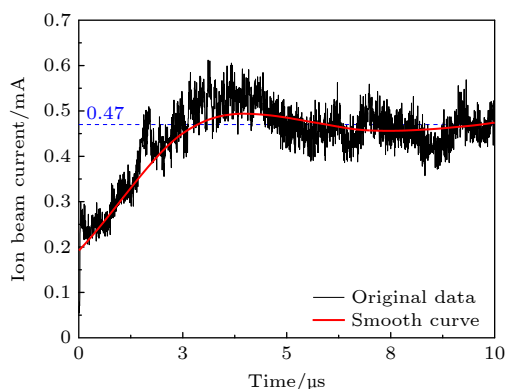


图 9 栅极电压 $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$ 时引出束流曲线

Fig. 9. Current curve of ion beam at $\varphi_{sc}/\varphi_{ac} = 300 \text{ V}/-50 \text{ V}$.

在相同工况下, 2 cm 口径的微波离子推力器的引出束流为 1.2 mA , 电流密度为 $0.38 \text{ mA}/\text{cm}^2$ [22]; 本文推力器的电流密度为 $0.60 \text{ mA}/\text{cm}^2$, 相比提升 57.9% .

4 结 论

本文对 1 cm 口径的磁阵列微波离子推力器进行仿真研究, 对比了初始放电和束流引出下的等离子体参数分布, 通过分析电子在发散区的运动路径, 揭示了电子在磁场发散区受 Child-Langmuir 鞘层、天线表面鞘层和磁镜共同约束下的获能模式. 磁场发散区的电子加热模式是微波离子推力器固有磁镜区电子加热模式的补充, 可以提高电子利用率, 使电子在磁场发散区获能并参与电离, 提高栅极前等离子体密度, 进而提升束流密度. 仿真结果表明, 在相同工况下, 磁阵列微波离子推力器的电流密度较 2 cm 微波离子推力器提升 57.9% . 磁场发散区电子加热模式的理论验证将为微波离子推力器优化设计提供依据, 促进微波离子推力器结构改进与性能提升.

参考文献

- [1] Yang J, Mou H, Geng H, Wu X M 2023 *J. Propuls. Tech.* **44** 78 (in Chinese) [杨涓, 牟浩, 耿海, 吴先明 2023 *推进技术* **44** 78]
- [2] Watanabe S, Tsuda Y, Yoshikawa M, Tanaka S, Saiki T, Nakazawa S 2017 *Space Sci. Rev.* **208** 3
- [3] Koizumi H, Kawahara H, Yaginuma K, et al. 2016 *Trans. JSASS Aerospace Tech. Jpn.* **14** 30
- [4] Han L F, Zhu K W, Huang W B, Yu X W, Zhang C Y, Lu C, Liu T, Li H, Huang J 2022 *Vacuum Cry.* **28** 98 (in Chinese) [韩罗峰, 朱康武, 黄文斌, 于学文, 张辰乙, 鲁超, 刘通, 李航, 黄静 2022 *真空与低温* **28** 98]
- [5] Yu D R, Qiao L, Jiang W J, Liu H 2020 *J. Propuls. Tech.* **41** 1 (in Chinese) [于达仁, 乔磊, 蒋文嘉, 刘辉 2020 *推进技术* **41** 1]
- [6] Tsukizaki R, Ise T, Koizumi H, Togo H, Nishiyama K, Kuninaka H 2014 *J. Propul. Power* **30** 5
- [7] Xia X, Yang J, Jin Y Z, Hang G R, Fu Y L, Hu Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 235202 (in Chinese) [夏旭, 杨涓, 金逸舟, 杭观荣, 付瑜亮, 胡展 2019 *物理学报* **68** 235202]
- [8] Fu S H, Ding Z F, Ke Y J, Tian L C 2020 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** 3
- [9] Ke Y J, Sun X F, Zhao Y, Chen X K 2018 *Prog. Electromagn. Res. Lett.* **75** 91
- [10] Dey I, Toyoda Y, Yamamoto N, Nakashima H 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 1868
- [11] Takao Y, Koizumi H, Komurasaki K, Eriguchi K, Ono K 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 064004
- [12] Tani Y, Yamashita Y, Tsukizaki R, Nishiyama K, Kuninaka H 2020 *Acta Astronaut.* **176** 77
- [13] Ataka Y, Nakagawa Y, Koizumi H, Komurasaki K 2021 *Acta Astronaut.* **187** 133

- [14] Xia X, Yang J, Jin Y Z, Hang G R, Fu Y L, Hu Z 2020 *Vacuum* **179** 109517
- [15] Mou H, Jin Y Z, Yang J, Xia X, Fu Y L 2022 *Chin. Phys. B* **31** 075202
- [16] Coral G, Tsukizaki, Nishiyama K, Kuninaka H 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 095015
- [17] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2018 *J. Propul. Power* **34** 4
- [18] Motoki T, Takasaki D, Koizumi H, Ataka Y, Komurasaki K, Takao Y 2022 *Acta Astronaut.* **196** 231
- [19] Xia X 2022 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [夏旭 2022 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [20] Fu Y L, Yang J, Xia X, Sun A B 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 175204 (in Chinese) [付瑜亮, 杨涓, 夏旭, 孙安邦 2023 物理学报 **72** 175204]
- [21] Fu Y L 2022 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [付瑜亮 2022 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [22] Fu Y L, Yang J, Mou H, Tan R W, Xia X, Gao Z Y 2022 *Comput. Phys. Commun.* **278** 8395

Electron heating mode in magnetic field diffusion region of microwave discharge ion thruster^{*}

Fu Yu-Liang Zhang Si-Yuan Yang Jin-Yuan
Sun An-Bang[†] Wang Ya-Nan

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 3 January 2024; revised manuscript received 4 February 2024)

Abstract

In magnetic field design principle of microwave discharge ion thruster, it is universally received that enlarging the magnetic mirror region can confine more electrons to acquire better energy utilization rate, while reducing the magnetic field diffusion region can prevent electrons from losing at wall to reduce the discharge loss. However, recently the integrated simulation proposes a hypothesis that electrons can also be heated in the magnetic field diffusion region when the Child-Langmuir sheath is considered as a constraint condition for electrons. Therefore, herein a magnetic field structure for the magnet array microwave discharge ion thruster is designed to verify the hypothesis, in which the magnetic field diffusion region is located near the screen grid. Then, an integrated simulation is conducted for studying the initial discharge and ion beam extraction stages of the thruster. The simulation results show that in the magnetic field diffusion region, the electron temperature is 4–8 eV when the grid system voltage is not applied, while the electron temperature is 4–12 eV when the the grid system voltage is applied. And the plasma density in the latter case has one order of magnitude higher than that in the former case. It means that electrons are obviously heated in the magnetic field diffusion region when they are confined among the Child-Langmuir sheath, the plasma sheath at antenna surface, and magnetic mirror. This electron heating mode produces more high-energy electrons outside the magnetic mirror region to generate plasma in front of the grid system, which can significantly increase the plasma density and ion beam current density. The result shows that under the conditions of 0.3 sccm (1 sccm = 1 mL/min) xenon gas flow, 1 W input microwave power, 300 V screen grid voltage and –50 V acceleration grid voltage, the ion beam current and its density are 0.47 mA and 0.60 mA/cm² for the magnet array microwave discharge ion thruster, while the ion beam current and its density are 1.2 mA and 0.38 mA/cm² for the 2-cm microwave discharge ion thruster. The ion beam current density increases by 57.9%. Through the integrated simulation, a new electron heating mode in the magnetic field diffusion region is proved theoretically, which provides a theoretical basis for the magnetic field structure optimization of microwave discharge ion thruster.

Keywords: electron cyclotron resonance, ion thruster, electron confining, electron heating

PACS: 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.73.20240017

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52307183), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. xtr052023003), and the State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, China (Grant No. EIPE23114).

[†] Corresponding author. E-mail: anbang.sun@xjtu.edu.cn

微波离子推力器中磁场发散区电子加热模式研究

付瑜亮 张思远 杨谨远 孙安邦 王亚楠

Electron heating mode in magnetic field diffusion region of microwave discharge ion thruster

Fu Yu-Liang Zhang Si-Yuan Yang Jin-Yuan Sun An-Bang Wang Ya-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 095203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240017>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁路和天线位置对2 cm电子回旋共振离子推力器性能影响的实验研究

Experimental study of magnetic circuit and antenna position influence on performance of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2019, 68(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191122>

离子推力器推力密度特性

Thrust density characteristics of ion thruster

物理学报. 2018, 67(2): 022901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171507>

多模式离子推力器输入参数设计及工作特性研究

Design of input parameters and operating characteristics for multi-mode ion thruster

物理学报. 2022, 71(7): 075203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212045>

2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667>

加速电压和阳极流率对离子推力器性能的影响

Influence of acceleration grid voltage and anode flow rate on performance of ion thruster

物理学报. 2022, 71(1): 015202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211316>

多模式离子推力器放电室和栅极设计及其性能实验研究

Design and performance test of discharge chamber and grid for multi-mode ion thrusters

物理学报. 2022, 71(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220720>