磁阵列微波放电中和器的电子引出机制*

付瑜亮 张思远 孙安邦† 马祖福 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 2 月 19 日收到; 2024 年 3 月 23 日收到修改稿)

微波放电中和器作为微波离子推力器系统的重要组成部分, 在维持航天器电位平衡、中和羽流方面发挥着重要作用, 其电子引出性能直接关系到电推力器系统的工作状态. 在磁阵列微波放电中和器的磁场结构定型实验中, 发现调转磁阵列朝向后引出电流的伏安特性曲线差异极大. 由于磁阵列微波放电中和器的放电室直径仅 10 mm, 介入式探针诊断对等离子体干扰大, 本文采用了一体化粒子模拟方法对中和器的工作过程进行仿真, 仿真结果与实验现象相符合. 通过对比不同磁场结构、工作电压下的等离子体参数分布, 发现引出孔附近的电势分布决定着中和器的电子引出能力; 并进一步揭示了离子在中和器电子引出过程中发挥的关键作用, 阐明了磁场结构对中和器电子引出能力的影响机制. 最后, 本文总结了微波放电中和器有效引出电子的两个必要条件: 1) 磁场梯度指向引出孔, 引导等离子体迁移; 2) 引出孔附近有足够的离子抬升电势, 降低或打破电势阱.

关键词: 电子回旋共振, 中和器, 电子引出

PACS: 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp **DOI:** 10.7498/aps.73.20240273

1 引 言

微波放电中和器作为微波离子推力器系统的重要组成部分, 在维持航天器电位平衡、中和羽流方面发挥着关键作用[1,2]. 微波放电中和器利用电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 加热机制形成高能电子, 进而电离中性气体产生等离子体, 在外部虚拟阳极的作用下引出电子, 与离子束流混合实现中和效果.

目前, 国内外以 μ1[3,4] 和 μ10[5,6] 为代表的 ECR 离子推力器系统中的微波放电中和器为原型开展了大量实验和仿真研究[7–16]. 其中, 针对电子引出机制的研究以 PIC-MCC (particle-in-cell with Monte Carlo collision) 仿真为主. 在对前者的研究中, 发现了静电漂移对电子引出的影响, 解释了电子跨磁力线引出的原理[17,18]. 在对后者的研究中, 将电子引出通道分为磁阱通道和双鞘层通道, 并对不同磁场结构下的中和器伏安特性曲线进行合理解释[19]; 以此为依据, 西北工业大学对 ECR 中和器进行了结构改进, 成功提升了电子束流[20].

为了突破微波离子推力器系统的小型化瓶颈, 西安交通大学开发了磁阵列微波离子推力器系统[21]. 其中, 磁阵列微波放电中和器结构如图 1 所示, 由微波接头、天线、磁阵列、内壳体、外壳体和孔板组成. 在磁场结构定型的过程中, 发现调转磁阵列朝向, 从磁场结构 A 变为磁场结构 B 后, 两种磁场结构的伏安特性曲线存在明显差异. 图 2 为两种磁场结构, 其中黑虚线为电子回旋共振区 ($B = 0.15$ T), 黑线为磁力线.

图 3 为实验测得的伏安特性曲线, 可见磁场结构 B 的中和器在输入功率小于 2 W 时几乎无法引出电子. 同时, 从整体趋势上看, 引出电子能力对微波功率不敏感. 然而, 磁阵列微波放电中和器采

* 国家自然科学基金 (批准号: 52307183) 资助的课题.

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

© 2024 中国物理学会 Chinese Physical Society

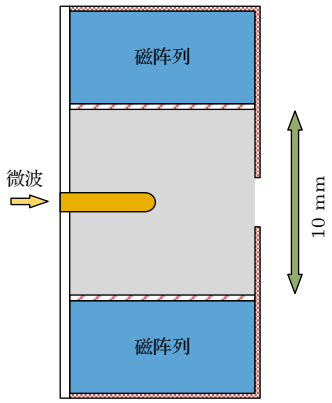

图 1 磁阵列微波放电中和器结构简图

Fig. 1. Structure diagram of magnet array microwave discharge neutralizer.

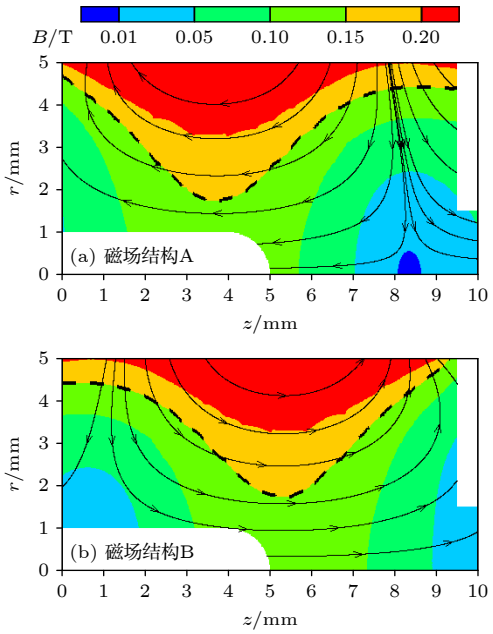

图 2 磁阵列微波放电中和器的磁场结构

Fig. 2. Magnetic field of magnet array microwave discharge neutralizer.

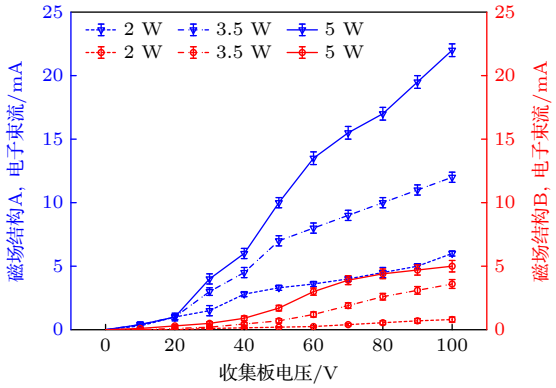

图 3 磁阵列微波放电中和器伏安特性曲线

Fig. 3. *I*-*V* curves of magnet array microwave discharge neutralizer.

用了从外部构筑内部磁场的设计思路, 与现有 ECR 中和器的结构差异较大, 无法运用既有研究成果对实验现象进行合理解释.

鉴于磁阵列微波放电中和器放电室直径仅为 10 mm, 介入式探针诊断对等离子体干扰较大, 本文将采用一体化的 PIC-MCC 方法[22] 对中和器进行仿真研究, 获得两种磁场结构下的等离子体参数分布, 进一步分析磁阵列类型中和器的电子引出机制, 为后续中和器性能优化提供理论参考.

2 仿真模型与条件设置

一体化 PIC-MCC 仿真的计算域如图 4 所示. 计算域大小为 15 mm×15 mm, 包含了中和器和近场区域, 右边界为虚拟阳极, 与中和器相距 5 mm. 计算域中, $r < 5$ mm 区域的网格步长为 0.025 mm; 5 mm $< r <$ 10 mm 区域的网格步长为 0.05 mm; $r >$ 10 mm 区域的网格步长为 0.1 mm. 同时, 图 4 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[22]. 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.

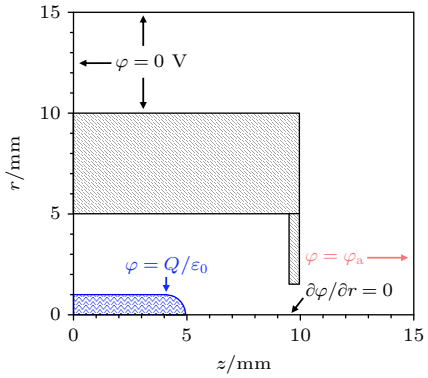

图 4 计算域和边界条件

Fig. 4. Calculation region and boundary condition setting.

仿真分为初始放电和电子引出两个阶段. 在初始放电仿真中, 所有实体边界均为 0 V, 计算 200 万步 (20 μs) 至稳态后进入电子引出阶段. 在电子引出仿真中, 继承初始放电的等离子体分布, 在右边界 (虚拟阳极 φ_a) 分别施加 40 V 和 80 V 的电压, 统计右边界收集的电子和离子电流, 相减得到实际电流. 仿真的参数设置如表 1 所示. 为了反演真实物理现象, 仿真中采用了真实的介电常数; 相应地, 降低了微波功率来减轻计算负担.

表 1 参数设置

Table 1. Simulation parameter setting.

参数	设定值
微波频率/GHz	4.2
微波功率/W	1
氙气流量/sccm	0.3
初始等离子体密度/m^{-3}	1×10^{16}
初始宏粒子数量	10000
时间步长/s	1×10^{-11}

3 仿真结果与讨论

3.1 初始放电

在 $\varphi_a = 0$ V 条件下, 由初始等离子体演化至稳态后等离子体密度分布如图 5 所示. 两种磁场结构的最高等离子体密度均可达 2×10^{17} m^{-3}, 等离子体分布形貌存在明显区别, 磁场结构 A 的主等离子体区向下游偏移, 磁场结构 B 的主等离子体区向上游偏移, 偏移方向与磁场梯度方向相同. 因偏移方向不同, 导致磁场结构 A 中有等离子体溢出孔外; 而磁场结构 B 在轴线处的等离子体较少.

3.2 电子引出

图 6 分别展示了 $\varphi_a = 40$ V 和 $\varphi_a = 80$ V 时的电子束流引出情况. 明显地, 磁场结构 A 能够看到电子束流, 而磁场结构 B 中仅能看到极少量电子. 仿真结果与实验结果均得出了磁场结构 B 难以引出电子的结论. 同时, 与初始放电的等离子体分布对比, 磁场结构 A 的等离子体形貌发生明显变化, 而磁场结构 B 的等离子体形貌几乎不变. 这表明在电子引出过程中微波放电等离子体会自洽地寻找新平衡, 最终重新获得稳定的分布, 在实验中的表现为磁场结构 A 的反射功率逐渐下降, 磁场结构 B 的反射功率几乎不变.

3.3 引出机理讨论

图 7 展示了不同工况下电子引出时的电势分布. 在磁场结构 A 中, 放电室内最高电势随 φ_a 增大而增大, 引出孔附近电势明显提升; 在磁场结构 B 中, 引出孔附近存在明显的电势阱, 且电势阱深度不随 φ_a 变化而变化. 由于微波放电中和器属于依靠阳极电势的被动引出类型, 电子需要先克服等离子

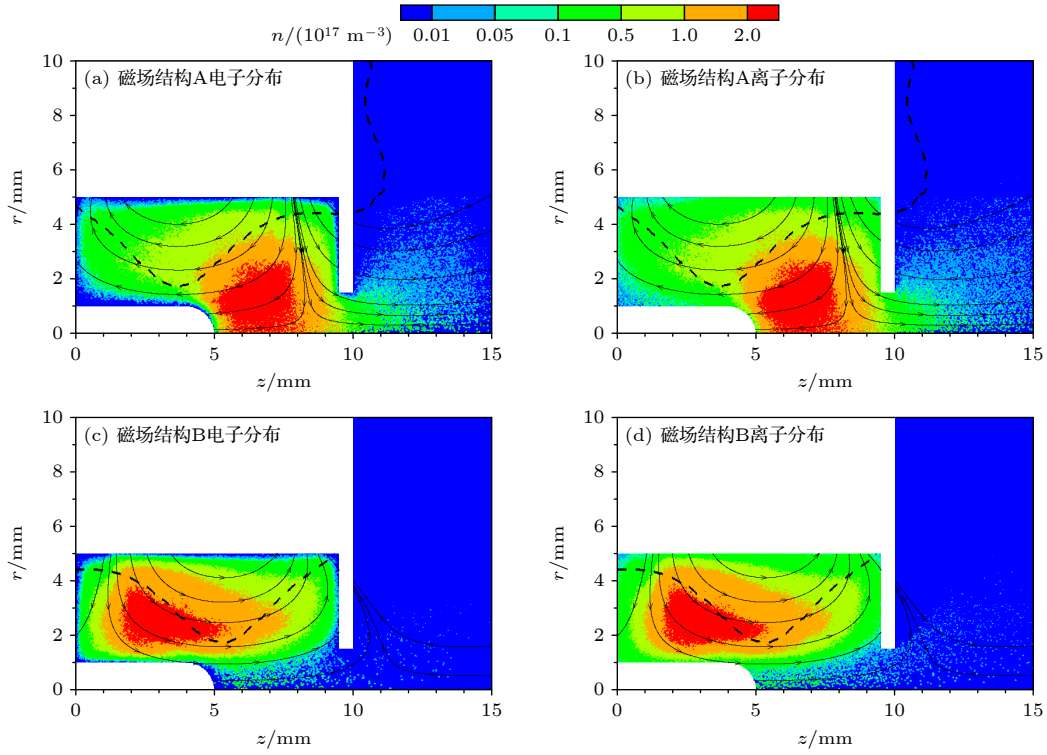

图 5 初始放电仿真结果 (a) 磁场结构 A 的电子密度分布; (b) 磁场结构 A 的离子密度分布; (c) 磁场结构 B 的电子密度分布; (d) 磁场结构 B 的离子密度分布

Fig. 5. Initial discharge simulation results: (a) Electron density distribution of magnetic field structure A; (b) the ion density distribution of magnetic field structure A; (c) the electron density distribution of magnetic field structure B; (d) the ion density distribution of magnetic field structure B.

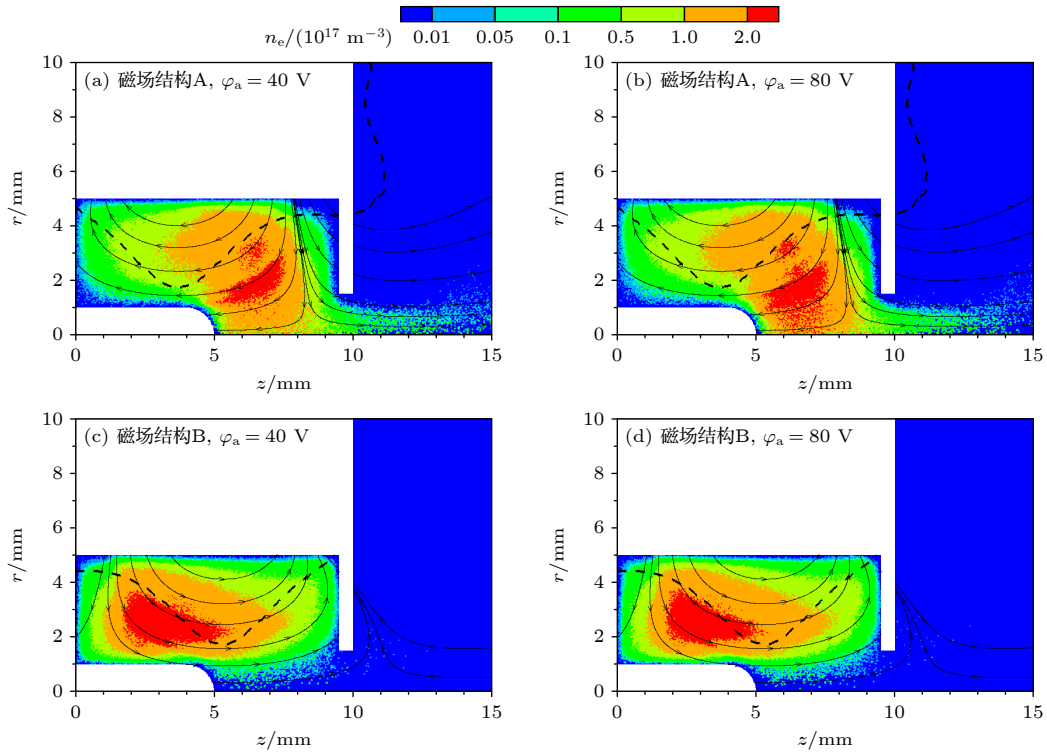

图 6 电子引出仿真结果 (a) 磁场结构 A, φ_a = 40 V; (b) 磁场结构 A, φ_a =80 V; (c) 磁场结构 B, φ_a = 40 V; (d) 磁场结构 B, φ_a = 80 V

Fig. 6. Simulation results of electron beam in extraction stage: (a) Magnetic field structure A, φ_a =40 V; (b) Magnetic field structure A, φ_a = 80 V; (c) Magnetic field structure B, φ_a = 40 V; (d) Magnetic field structure B, φ_a = 80 V.

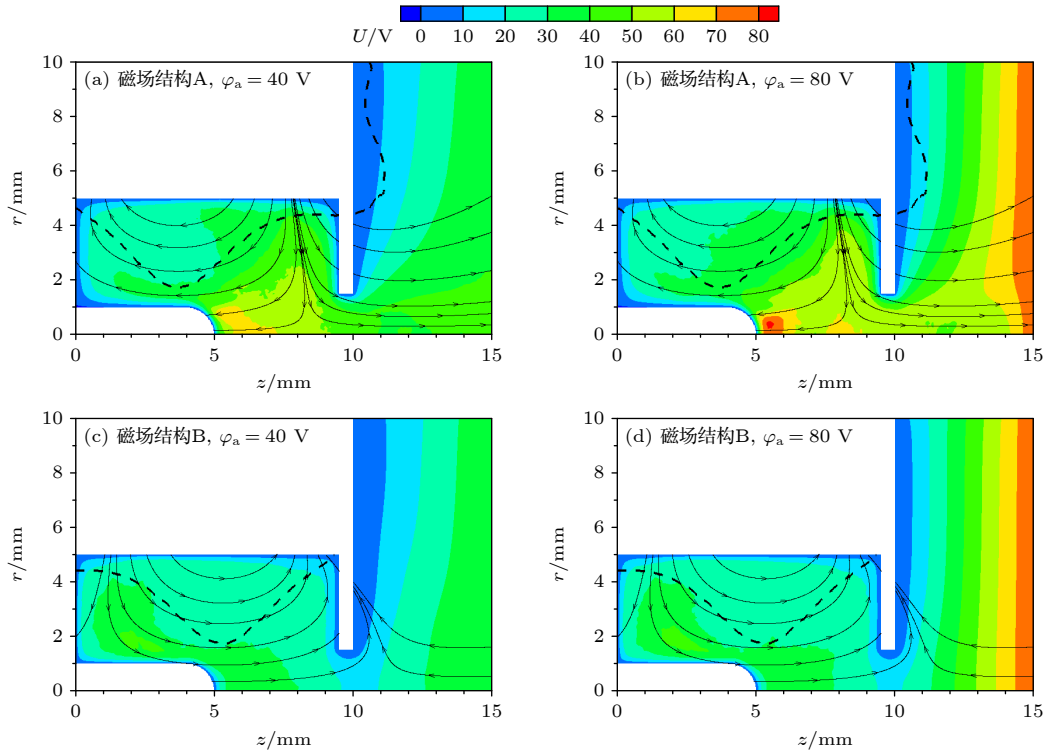

图 7 电子引出阶段电势变化 (a) 磁场结构 A, φ_a = 40 V; (b) 磁场结构 A, φ_a =80 V; (c) 磁场结构 B, φ_a = 40 V; (d) 磁场结构 B, φ_a = 80 V

Fig. 7. Potential distribution in extraction stage: (a) Magnetic field structure A, φ_a = 40 V; (b) magnetic field structure A, φ_a = 80 V; (c) magnetic field structure B, φ_a = 40 V; (d) magnetic field structure B, φ_a =80 V.

体电势离开引出孔才能被阳极电场捕获. 因此, 引出孔附近的电势分布决定了中和器的电子引出能力, 只有降低或打破电势阱才能使电子顺利引出.

从电势阱变化可做进一步推断: 中和器引出电子的过程必须有离子参与. 本文在磁场结构 A, φ_a = 80 V 条件下 (图 6(b)) 对仿真模型进行修改, 人为使离子在进入引出孔后消失, 仿真结果如图 8 所示. 在放电室和阳极板之间出现了电势阱, 无法建立电子引出通道, 电子引出电流骤降, 只有少量电子可以沿磁力线引出. 由此可知, 离子对电子引出过程具有重要影响. 结合图 3 的伏安特性曲线可以推测, 随微波功率提升, 等离子体密度增大, 一方面有更多的电子可供引出, 另一方面有更多的离子迁移至引出孔附近, 抬升电势并吸引更多电子汇聚, 最终使得电子电流增大. 另外, 磁场梯度可以引导离子顺梯度漂移, 直接决定了放电室内的等离子体分布, 这解释了两种磁场结构的伏安特性曲线差异.

综上所述, 微波放电中和器有效引出电子需要满足两个条件: 1) 磁场梯度指向引出孔, 引导等离子体迁移; 2) 引出孔附近需要有足够的离子抬升电势, 降低或打破电势阱.

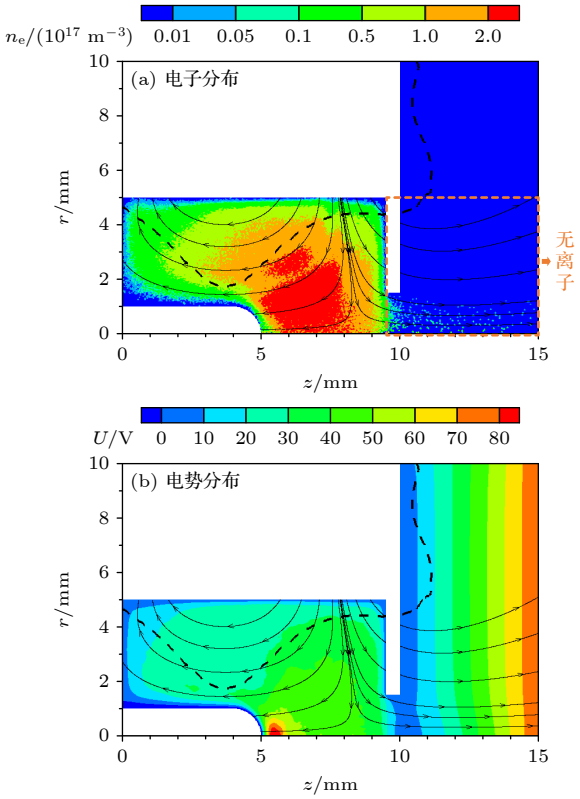

图 8 假设引出孔外无离子的仿真结果 (a) 电子分布; (b) 电势分布

Fig. 8. Electron beam (a) and potential distribution (b) assuming no ion outside orifice.

4 结 论

本文采用一体化 PIC 方法对磁阵列微波放电中和器的初始放电和电子引出过程进行了仿真, 仿真结果与实验现象相符合. 通过分析中和器工作过程中等离子体参数分布的变化, 阐明了磁场结构对中和器电子引出特性的影响机制, 总结了中和器有效引出电子的必要条件. 未来, 将在现有磁阵列微波放电中和器的基础上, 进一步优化磁阵列结构, 使整个放电室的磁场梯度指向下游, 提升中和器性能.

参考文献

[1] Nono A, Morishita T, Hosoda S, Tsukizaki R, Nishiyama K 2023 *Acta Astronaut.* **212** 130

[2] Yang J, Mou H, Geng H, Wu X M 2023 *J. Propuls. Tech.* **44** 2208095 (in Chinese) [杨涓, 牟浩, 耿海, 吴先明 2023 推进技术 **44** 2208095]

[3] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2018 *J. Propuls. Power.* **34** 960

[4] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2014 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **12** 1884

[5] Tsukizaki R, Ise T, Koizumi H, Togo H, Nishiyama K, Kuninaka H 2014 *J. Propuls. Power.* **30** 91

[6] Barquero S, Tabata K, Tsukizaki R, Merino M, Navarro-Cavallé J, Nishiyama K 2023 *Acta Astronaut.* **211** 750

[7] Sekine H, Minematsu R, Ataka Y, Ominetti P, Koizumi H, Komurasaki K 2022 *J. Appl. Phys.* **131** 093302

[8] Motoki T, Takasaki D, Koizumi H, Ataka Y, Komurasaki K, Takao Y 2022 *Acta Astronaut.* **196** 231

[9] Sato Y, Koizumi H, Nakano M, Takao Y 2020 *Phys. Plasmas.* **27** 063505

[10] Tsuru T, Kondo S, Yamamoto N, Nakashima H 2009 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **7** 163

[11] Yamamoto N, Maeda Y, Nakashima H, Watanabe H, Funaki I 2016 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **59** 100

[12] Foster J E, Patterson M J 2005 *J. Propuls. Power.* **21** 862

[13] Xia X, Yang J, Geng H, Wu X M, Fu Y L, Mou H, Tan R W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 045201 (in Chinese) [夏旭, 杨涓, 耿海, 吴先明, 付瑜亮, 牟浩, 谈人玮 2022 物理学报 **71** 045201]

[14] Masui H, Tashiro Y, Yamamoto N, Nakashima H, Funaki I 2006 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **49** 87

[15] Kubota K, Watanabe H, Yamamoto N, Nakashima H, Miyasaka T, Funaki I 2014 *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Cleveland, OH, July 28–30, 2014 pp1–12

[16] Meng H B, Yang J, Huang W B, Xia X, Fu Y L, Hu Z 2019 *J. Astronaut.* **40** 1478 (in Chinese) [孟海波, 杨涓, 黄文斌, 夏旭, 付瑜亮, 胡展 2019 宇航学报 **40** 1478]

[17] Hiramoto K, Nakagawa Y, Koizumi H, Takao Y 2017 *Phys. Plasmas* **24** 064504

[18] Sato Y, Koizumi H, Nakano M, Takao Y 2019 *J. Appl. Phys.*

126 243302
[19] Fu Y L, Yang J, Geng H, Wu X M, Hu Z, Xia X 2021 *Vacuum* **184** 109932
[20] 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)]
[21] Fu Y L, Zhang S Y, Yang J Y, Sun A B, Wang Y N 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 095203 (in Chinese) [付瑜亮, 张思远, 杨谨远, 孙安邦, 王亚楠 2024 物理学报 **73** 095203]
[22] Fu Y L, Yang J, Mou H, Tan R W, Xia X, Gao Z Y 2022 *Comput. Phys. Commun.* **278** 8395

Electron extraction mechanism of magnet array microwave discharge neutralizer*

Fu Yu-Liang Zhang Si-Yuan Sun An-Bang† Ma Zu-Fu Wang Ya-Nan

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

(Received 19 February 2024; revised manuscript received 23 March 2024)

Abstract

Microwave discharge neutralizer is an important part of microwave discharge ion thruster system, which plays a vital role in maintaining potential balance between spacecraft and neutralizing ion beam. Its electron extraction property directly affects the operation condition of ion thruster system. In order to break through the power limit of miniature microwave discharge ion thruster, a magnet array microwave discharge ion thruster system is designed and tested. In the experiment on finalizing magnetic field structure of magnet array microwave discharge neutralizer, an interesting phenomenon is found that the *I*-*V* curves of electron current, after rotating the magnetic array orientation, are very different. Defining forward direction of magnet array can normally extract electrons, then backward direction of magnet array can hardly extract electrons. Because the diameter of discharge chamber is only 10 mm, it is too small to perform Langmuir probe diagnosis. And thus, an integrative particle-in-cell method is used to simulate the neutralizer operation processes of two different magnetic field structures, and for the sake of accuracy, real vacuum permittivity is used. The simulation results show good consistence with experimental phenomenon. In the initial discharge process, it is found that the magnetic field gradient leads to different plasma distributions; in electron extraction process, it is found that the potential distribution near the orifice determines the electron extraction property of the neutralizer. Through comparing the plasma parameter distributions under different magnetic field structures and operating voltages, an assumption that the ion is an important factor in electron extraction process is proposed. Then, a simulation that ions disappear artificially outside the orifice is conducted, and the simulation results show that electrons cannot be effectively extracted without ions near the orifice. According to the simulation and experiment results, two necessary conditions are summarized for electron extraction of the neutralizer. The first condition is magnetic field structure: the magnetic field gradient should point towards the orifice to guide plasma migration towards the orifice, the second one is potential distribution: there should be enough ions to lift the potential near the orifice for reducing or breaking the potential well. These two conditions can help understand the electron extraction mechanism of microwave discharge neutralizer and provide theoretical reference for optimizing the performance of neutralizer in future.

Keywords: electron cyclotron resonance, neutralizer, electron extraction

PACS: 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp **DOI:** 10.7498/aps.73.20240273

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52307183).

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

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

磁阵列微波放电中和器的电子引出机制

付瑜亮　张思远　孙安邦　马祖福　王亚楠

Electron extraction mechanism of magnet array microwave discharge neutralizer

Fu Yu-Liang　Zhang Si-Yuan　Sun An-Bang　Ma Zu-Fu　Wang Ya-Nan

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 73, 115203 (2024)　DOI: 10.7498/aps.73.20240273
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.73.20240273
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

氮气工质10厘米ECRIT中和器实验研究
Experimental study on 10–cm ECRIT neutralizer with nitrogen gas
物理学报. 2023, 72(4): 045202　https://doi.org/10.7498/aps.72.20221951

不同磁路下微型ECR中和器电子引出的模拟研究
Numerical simulation of electron extraction from micro electron cyclotron resonance neutralizer under different magnetic circuits
物理学报. 2022, 71(4): 045201　https://doi.org/10.7498/aps.71.20211519

放电室长度对电子回旋共振离子推力器性能的影响机理
Study on the effect of discharge chamber length on the performance of electron cyclotron resonance ion thruster
物理学报. 2023, 72(17): 175204　https://doi.org/10.7498/aps.72.20230719

微波离子推力器中磁场发散区电子加热模式研究
Electron heating mode in magnetic field diffusion region of microwave discharge ion thruster
物理学报. 2024, 73(9): 095203　https://doi.org/10.7498/aps.73.20240017

微型电子回旋共振离子源的全局模型
Global model of miniature electron cyclotron resonance ion source
物理学报. 2022, 71(14): 145204　https://doi.org/10.7498/aps.71.20212250

应用于电推进的碘工质电子回旋共振等离子体源
Iodine electron cyclotron resonance plasma source for electric propulsion
物理学报. 2023, 72(22): 225202　https://doi.org/10.7498/aps.72.20230785