

# 氮气工质 10 厘米 ECRIT 中和器实验研究

谈人玮<sup>1)</sup> 杨涓<sup>1)†</sup> 耿海<sup>2)</sup> 吴先明<sup>2)</sup> 牟浩<sup>1)</sup>

1) (西北工业大学航天学院, 西安 710072)

2) (兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2022 年 10 月 12 日收到; 2022 年 11 月 25 日收到修改稿)

10 厘米电子回旋共振离子推力器 (ECRIT) 可以多类型气体工作, 应用于吸气式电推进系统具有可行性, 研究氮气工质 ECRIT 的 ECR 中和器是研究氮氧工质 ECRIT 的基础. 当传统氙气工质 10 厘米 ECRIT 的 ECR 中和器以氮气为工质工作时, 由于氮气分子量较低, 离子容易漂移出中和器, 引出电子电流减小, 已不适合以氮气为工质工作. 本文基于 10 厘米传统 ECR 中和器, 以抑制离子漂移出中和器、提升电子引出性能为目的, 实验研究适用于氮气工质工作的双极 ECR 中和器. 结果表明, 在气体质量流率 0.04 mg/s、输入功率 10 W 的条件下, 以氮气为工质工作, 引出电子电流 134 mA 时, 传统 ECR 中和器所需的阳极电压为 150 V, 而双极 ECR 中和器仅需 50 V 的阳极电压, 下降了约 67%; 阳极电压 40 V 时, 传统 ECR 中和器的功率损耗为 1204.82 W/A, 而双极 ECR 中和器的功率损耗为 95.23 W/A, 约为前者的 8.3%. 氮气工质双极 ECR 中和器的离子屏蔽效果显著, 电子引出性能得到改善.

**关键词:** 电子回旋共振, 离子推力器, 中和器, 吸气式电推进

**PACS:** 52.50.Sw, 52.59.Dk, 52.75.Di

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221951

## 1 引言

吸气式电推力器以稀薄大气为工质工作<sup>[1]</sup>, 无需储备推进剂, 可配备于低轨道 (150—300 km) 飞行器以补偿大气阻尼<sup>[2]</sup>, 降低飞行器结构质量的同时, 解决了由推进剂储备限制带来的寿命问题. 目前各国正在开展不同类型电推力器的相关研究, 如霍尔推力器<sup>[3]</sup>、射频离子推力器<sup>[4]</sup>、会切磁场等离子体推力器<sup>[5]</sup>、感应加热等离子体推进器<sup>[6]</sup>、电子回旋共振离子推力器 (electron cyclotron resonance ion thruster, ECRIT)<sup>[7,8]</sup> 等.

吸气式电推力器工作的低轨道环境大气主要由氮气分子和氧原子组成<sup>[9]</sup>, 轨道阻尼随轨道高度和太阳活动实时变化<sup>[4]</sup>. 由于 ECRIT 可以多种工质工作、无热阴极、推力连续可调等特点<sup>[10]</sup>, 具有

应用于吸气式电推进系统的可行性. 为了规避氧原子腐蚀性对推力器的影响, 先开展氮气工质电推力器的研究可以为后续研究工作奠定基础.

ECRIT 由电子回旋共振 (ECR) 离子源和中和器组成, 其中 ECR 中和器用于发射电子, 保持推进系统的电中性, 是推力器的重要组成部分. 截至目前, 有关氮气工质 10 cm ECRIT 中和器的研究几乎空缺, 而氙气工质 10 cm ECRIT 中和器已经在 2003 年和 2014 年应用于日本隼鸟号和隼鸟 2 号深空探测器<sup>[11,12]</sup>, 并开展了许多基础研究. 文献<sup>[13]</sup>通过在中和器外添加磁场屏蔽板, 使得中和器在输入功率 8 W, 氙气质量流率 0.069 mg/s, 阳极电压 37 V 的条件下, 引出电子束流由 176 mA 增至 206 mA, 功率损耗由 45.5 W/A 降至 38.8 W/A. 国内对此类型中和器也开展过研究, 文献<sup>[14, 15]</sup>分析了氙气 10 cm ECRIT 中和器的电子引出双通

† 通信作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

道现象. 文献 [16, 17] 通过优化中和器磁路、天线与电子引出板结构, 提升了中和器的电子引出性能, 使得中和器在输入功率 10 W, 氙气质量流率 0.049 mg/s, 阳极电压 100 V 条件下可以引出 219 mA 的电子束流, 功率损耗为 45.7 W/A. 尽管国内近期针对 ECRIT 中和器的研究均使用的氙气工质, 但是这些结论仍可以为氮气工质 10cm ECRIT 中和器的研究提供参考. 本文定义上述国内外研究的针对氙气工质的 10 cm ECRIT 中和器结构为传统 ECR 中和器.

本文针对传统 ECR 中和器工质由氙气转变为氮气后离子漂移出中和器的现象, 通过引入屏蔽离子的双极板, 构成适用于氮气工质的双极 ECR 中和器. 本文首先介绍传统和双极 ECR 中和器结构、原理和电子引出机制, 并通过离子密度诊断分析传统 ECR 中和器以氮气为工质工作时存在的问题; 然后介绍实验系统和静电场仿真模型, 通过计算和实验验证双极板结构屏蔽离子的有效性, 并对比传统和双极 ECR 中和器分别以氮气和氙气为工质工作时的电子引出性能.

## 2 传统 ECR 中和器与双极 ECR 中和器

### 2.1 传统 ECR 中和器及其电子引出机制

传统 ECR 中和器结构如图 1 所示, 主要由永磁体、前后磁轭、L 型天线和电子引出板组成. 其中永磁体和前后磁轭在中和器内部形成封闭的磁镜场和开放的磁场, 在中和器引出小孔下游形成磁通密度较低的磁阱 [14]. 4.2 GHz 的微波能量通过 L 型天线馈入放电室, 电子在磁镜场中做往返运动, 并沿着磁力线做回旋运动. 当电子运动到 ECR

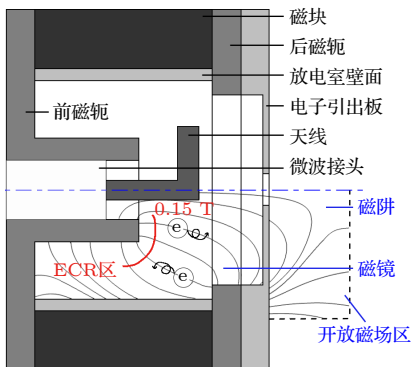


图 1 10 厘米 ECR 中和器结构  
Fig. 1. 10 cm ECR neutralizer structure.

区 ( $B = 0.15$  T) 时, 电子回旋频率与微波频率相等, 电子与微波右旋圆极化波发生等相位共振, 大量吸收微波能量, 形成高能电子并碰撞电离中性气体, 产生等离子体, 其中的电子在外界离子源离子束流或阳极板的高电势作用下被引出形成电子束流 [15].

### 2.2 氙气和氮气工质传统 ECR 中和器诊断

当传统 ECR 中和器以氮气为工质工作时, 相同工作参数下的引出电子电流将远低于以氙气为工质工作时的中和器. 从过往针对氙气工质的研究 [14,15] 来看, 中和器的引出机制和结构设计是正确可行的. 为了探究其中的原因, 在气体质量流率为 0.04 mg/s, 输入功率 10 W 的条件下, 对氮气工质传统 ECR 中和器内部用 Langmuir 探针进行诊断, 使用弯曲探针以减小磁场对诊断数据的影响 [18]. 氙气的探针诊断不再赘述, 可以参考之前的工作 [15]. 对于氮气, 由于二价电离和离解反应所需的能量高 [19], 认为在该功率下发生的可能性很小. 所以在诊断中, 将收集到的正电荷均视为  $N_2^+$ .

图 2 所示为距离传统 ECR 中和器轴线 3 mm 处诊断的离子密度分布, 其中可以观察到  $Xe^+$  密度梯度的变化, 孔口附近的  $Xe^+$  密度低于放电室内部, 而孔口附近的  $N_2^+$  密度却远高于放电室内部.

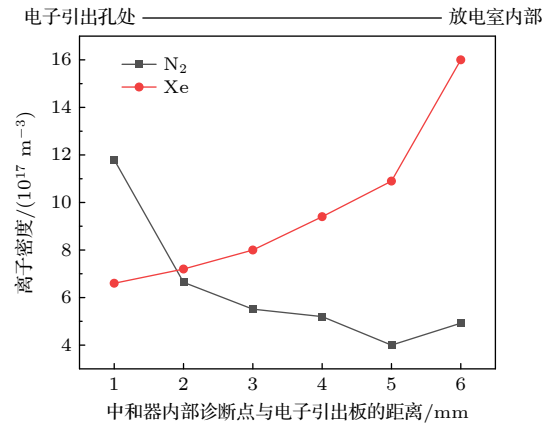


图 2 氙气和氮气工质传统 ECR 中和器离子密度分布诊断  
Fig. 2. Ion density distribution diagnosis of typical ECR neutralizer running on nitrogen and xenon gas.

在 ECR 中和器内, 电子被磁场磁化, 因此被约束在磁镜中持续获得能量, 而离子的拉莫尔运动半径大于 ECR 中和器的特征长度, 没有被磁化, 其运动主要受静电场控制. 由文献 [15] 可知离子在 ECR 中和器电子引出板小孔附近的运动受静电场影响是一个先加速后减速的过程.  $N_2^+$  的相对分

子量约为 28,  $Xe^+$  的相对分子量约为 131, 由受力方程  $v^2 = 2aS = 2(qE/m) \cdot S$  可知, 在相同的静电场作用下,  $N_2^+$  的运动速度约为  $Xe^+$  的两倍, 即  $N_2^+$  在 ECR 中和器加速段获得的最大速度约为  $Xe^+$  的两倍. 由于  $Xe^+$  速度较慢, 从而容易被减速电场限制, 不能离开中和器, 而由于  $N_2^+$  速度较快, 减速电场不再能限制其离开中和器, 导致内部等离子体密度、电子引出束流降低. 可见传统 ECR 中和器以氮气为工质工作, 性能将有所下降.

### 2.3 双极 ECR 中和器及其离子屏蔽

为了抑制 ECR 中和器氮气离子漂移出中和器, 在图 1 的电子引出板下游增加离子屏蔽板, 构成双极板结构如图 3 所示.

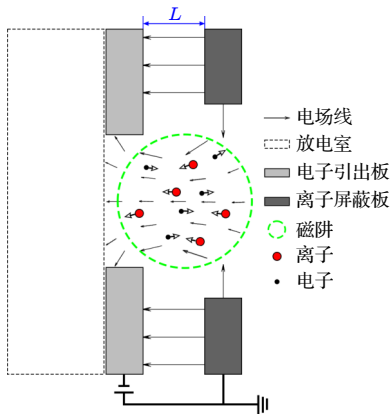


图 3 双极板结构

Fig. 3. Bipolar plate structure.

定义电子引出板和离子屏蔽板间隙为双极板间隙  $L$ , 相应的 ECR 中和器成为双极 ECR 中和器, 其磁阱空间位置与传统 ECR 中和器相同. 为节省电能消耗, 用一台电源满足双极 ECR 中和器的工作需要, 电子引出板接电源负极, 离子屏蔽板接地. 受双极板小孔处局部电场影响, 磁阱内聚集的等离子体将产生电荷分离, 离子返回中和器, 电子被加速引出. 和传统 ECR 中和器相比, 对氮气离子将产生更强的屏蔽作用以降低氮气离子逃逸率、避免氮气等离子体密度和引出电子电流的降低.

## 3 实验系统及仿真模型的建立

### 3.1 中和器电子引出实验系统

图 4 所示为传统 ECR 中和器的电子引出实验系统, 由气路、微波线路和电路组成. 气路主要

部件为气瓶、质量流率控制器. 微波线路主要部件为微波源、环形器、功率计和隔直器. 电路中中和器和真空舱壁面接地, 电子引出板和中和器壁面相互导通, 金属阳极板接电源正极, 中和器电子引出板和金属阳极板的间距为 5 mm. 设  $\dot{m}$  和  $P_i$  为气体质量流率和输入功率;  $V_A$  为阳极板与地电势差, 简称阳极电压;  $I_e$  为中和器的引出电子电流, 也为阳极板收集的电子电流, 通过串联的电流表测得.

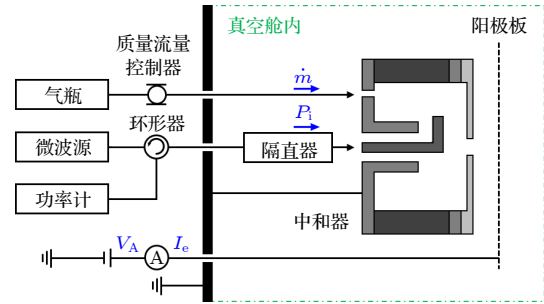


图 4 传统 ECR 中和器的电子引出实验系统

Fig. 4. Experiment system for the electron extraction of typical ECR neutralizer.

图 5 所示为双极 ECR 中和器的电子引出实验系统, 其中气路和微波线路与图 3 所示实验系统相同. 图 5 电路中, 中和器壁面和电子引出板接电源负极, 离子屏蔽板接地, 阳极板收集电子电流. 并设  $V_W$  为电子引出板与地电势差, 简称双极板电压;  $I_s$  为离子屏蔽板截获电子电流, 通过串联的电流表测量. 双极 ECR 中和器电子引出总电压  $V_t = V_A - V_W$ , 引出总电子电流  $I_t = I_e + I_s$ . 对于传统 ECR 中和器, 电子引出总电压  $V_t = V_A$ , 引出总电子电流  $I_t = I_e$ . 为了避免离子通过壁面鞘层产生的溅射现象, 设置  $V_W \geq 49$  V [20].

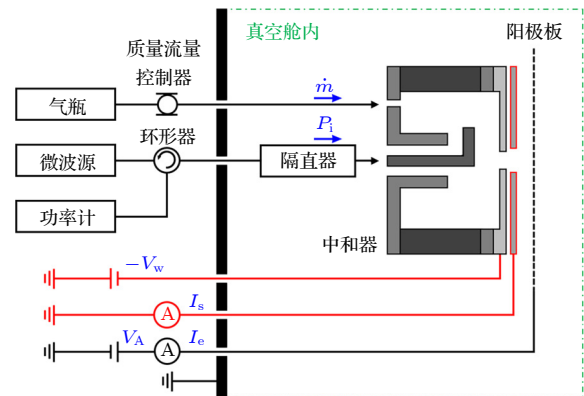


图 5 双极 ECR 中和器的电子引出实验系统

Fig. 5. Experiment system for the electron extraction of bipolar ECR neutralizer.

### 3.2 电子引出实验中双极 ECR 中和器的静电场仿真模型

通过 COMSOL 软件中的静电场模块建立电子引出实验中双极 ECR 中和器的静电场仿真模型, 如图 6 所示, 各结构的材料和相对介电常数  $\epsilon_r$  已于图中标出. 计算静电场时, 天线设置为初始电势为 0 V 的悬浮电位, 其余结构按实验需求, 设置对应的电势. 由于本研究内容主要为电子引出孔处的离子屏蔽, 仅需截取电子引出孔附近的局部电场进行分析, 分析截面已于图 6 中标出.

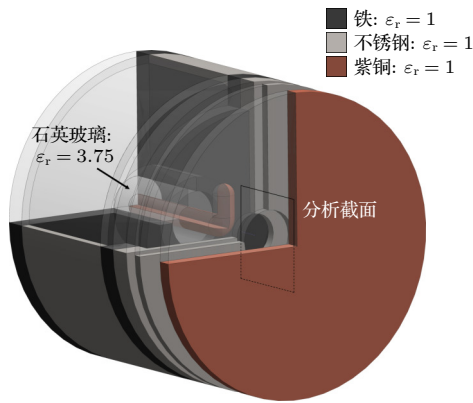


图 6 双极 ECR 中和器的静电场仿真模型

Fig. 6. Electrostatic field simulation model of bipolar ECR neutralizer.

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 氮气和氙气工质对传统 ECR 中和器电子引出性能的影响

氮气和氙气工质传统 ECR 中和器的电子引出实验结果如图 7 所示.

以氙气为工质时, 在  $\dot{m} = 0.04 \text{ mg/s}$ ,  $P_i = 10 \text{ W}$  的条件下, 引出电子电流在阳极电压  $V_A = 20 \text{ V}$  时快速增长,  $V_A = 40 \text{ V}$  时达到  $200 \text{ mA}$ ,  $V_A = 50 \text{ V}$  时趋近饱和,  $I_e = 237 \text{ mA}$ . 以氮气为工质时, 在相同质量流率和输入功率的条件下, 引出电子电流在  $V_A = 50\text{--}70 \text{ V}$  时有小幅的突增, 其余阶段均缓慢增长,  $V_A = 150 \text{ V}$  时趋近饱和,  $I_e = 134 \text{ mA}$ . 相比于氙气工质传统 ECR 中和器, 氮气工质传统 ECR 中和器的引出电子电流达到饱和电子电流时需要的阳极电压更高, 但是引出电子电流更低. 传统 ECR 中和器以氮气为工质工作时的电子引出性能较差.

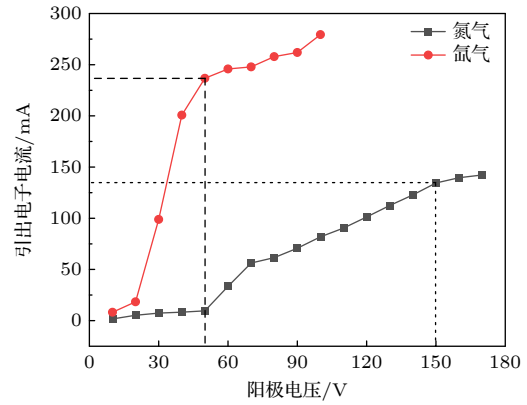


图 7 氮气和氙气工质传统 ECR 中和器的引出电子电流随阳极电压的变化曲线

Fig. 7. Extracted electron current vs. anode voltage of typical ECR neutralizer running on nitrogen and xenon gas.

### 4.2 双极板间隙和电压对氮气工质双极 ECR 中和器电子引出性能的影响

#### 4.2.1 双极板间隙对电子引出性能的影响

在  $\dot{m} = 0.04 \text{ mg/s}$ ,  $P_i = 10 \text{ W}$  的条件下, 双极板电压  $V_W = -40 \text{ V}$  时, 不同双极板间隙  $L$  的中和器总电子电流与引出和截获电子电流随阳极电压的变化曲线如图 8 所示. 当不同  $L$  的总电子电流和引出电子电流发生突变时, 阳极电压  $V_A \geq 30 \text{ V}$  故, 即为中和器正常工作时的阳极电压范围. 为了对比中和器正常工作时的性能, 默认  $V_A \geq 30 \text{ V}$ . 由图 8(a) 可知, 3 条总电子电流曲线在相同阳极电压下的大小关系为  $I_t, L=1 \text{ mm} \geq I_t, L=1.5 \text{ mm} \geq I_t, L=0.5 \text{ mm}$ . 由图 8(b) 可知, 3 条引出电子电流曲线在相同阳极电压下的大小关系为  $I_e, L=1 \text{ mm} \geq I_e, L=1.5 \text{ mm} \geq I_e, L=0.5 \text{ mm}$ , 且当  $L = 1 \text{ mm}$  时, 引出电子电流曲线有明显的饱和段; 截获电子电流在相同的阳极电压下随着  $L$  的增大而增大.

针对  $V_A = 40 \text{ V}$ ,  $V_W = -40 \text{ V}$  的情况, 计算了不同  $L$  的双极 ECR 中和器电子引出孔附近的电场强度, 如图 9 所示. 随着  $L$  的增大, 电子引出板与离子屏蔽板间的电场强度逐渐减小, 而离子屏蔽板与阳极板间的电场强度逐渐增大, 两区域的离子屏蔽效果随  $L$  的变化规律相反, 需通过实验确定最优的  $L$  值, 由引出电子电流的变化曲线可知  $L = 1 \text{ mm}$  为此最优值. 由图 9 中的电场线方向反应的受力方向可知, 随着  $L$  的增大, 离子屏蔽板逐渐呈现出切割电场线的趋势, 使得电子更容易被离子屏蔽板截获, 造成截获电子电流的增大, 这与实验中的现象一致. 根据总电子电流的变化曲线,

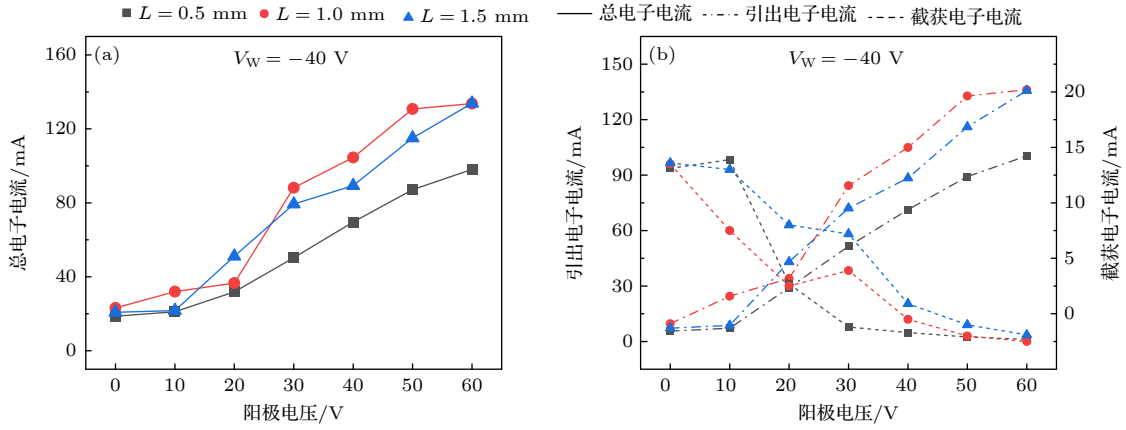


图 8 不同双极板间隙的双极 ECR 中和器电流随阳极电压的变化曲线 (a) 总电子电流; (b) 引出与截获电子电流

Fig. 8. Current vs. anode voltage at different bipolar plate gaps of bipolar ECR neutralizer: (a) Total electron current; (b) extracted and intercepted electron current.

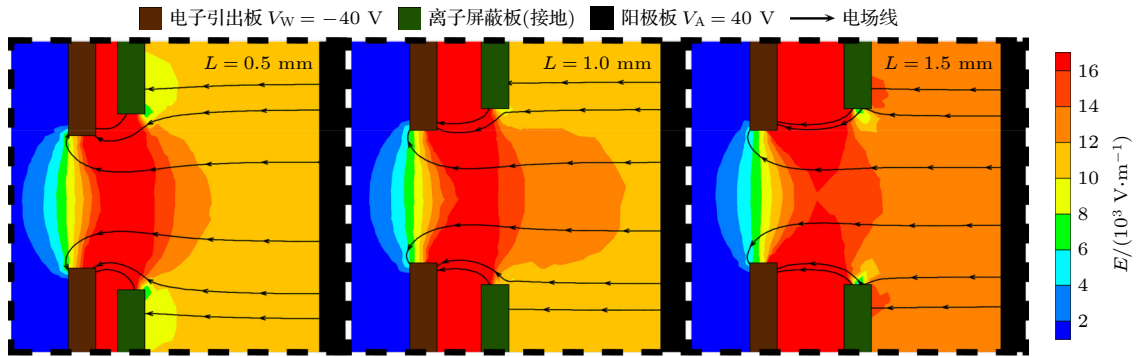


图 9 不同双极板间隙的双极 ECR 中和器电子引出孔附近的电场强度分布

Fig. 9. Electric field intensity distribution near electron extraction hole of bipolar ECR neutralizer with different bipolar plate gaps.

本文认为  $L = 1$  mm 时, 双极板的离子屏蔽效果最佳, 中和器的电子引出性能最好.

#### 4.2.2 双极板电压对电子引出性能的影响

在  $\dot{m} = 0.04$  mg/s,  $P_i = 10$  W 的条件下, 双极板间隙  $L = 1$  mm 时, 不同双极板电压  $V_W$  的中和器总电子电流与引出和截获电子电流随阳极电压的变化曲线如图 10 所示. 当不同  $V_W$  的总电子电流和引出电子电流发生突变时, 阳极电压  $V_A \geq 30$  V, 即为中和器正常工作时的阳极电压范围. 为了对比中和器正常工作时的性能, 本小节分析默认  $V_A \geq 30$  V. 由图 10(a) 可知, 总电子电流在相同阳极电压下随着  $V_W$  的减小而增大. 由图 10(b) 可知, 引出电子电流在相同阳极电压下随着  $V_W$  的减小而增大, 且当  $V_W = -40$  V 时, 引出电子电流曲线有明显的饱和段. 截获电子电流在相同阳极电压下无明显变化规律, 但是在  $V_W = -20$  V,  $V_W = -40$  V 时, 截获电子电流相对较大.

针对  $V_A = 40$  V,  $L = 1$  mm 的情况, 计算了不同  $V_W$  的双极 ECR 中和器电子引出孔附近的电场强度, 如图 11 所示. 随着  $V_W$  的减小, 电子引出孔附近的电场强度增大, 双极板的离子屏蔽效果增强, 使得  $V_W = -40$  V 时的总电子电流和引出电子电流最大. 这与上述实验现象一致. 由图 11 中的电场线方向反应的受力方向可知, 随着  $V_W$  的增大, 离子屏蔽板逐渐呈现出切割电场线的趋势, 使得电子更容易被离子屏蔽板截获, 造成截获电子电流的增大, 这也验证了实验中  $V_W = -20$  V 时截获电子电流偏大的现象, 但是由于  $V_W = -40$  V 时, 电子引出板和离子屏蔽板间的电势差较大, 电子向离子屏蔽板运动的趋势更强, 也有可能造成截获电子电流的增大, 这也是实验中  $V_W = -40$  V 时截获电子电流偏大的原因. 综上所述, 本文认为  $V_W = -40$  V 时, 双极板的离子屏蔽效果最佳, 中和器的电子引出性能最好.

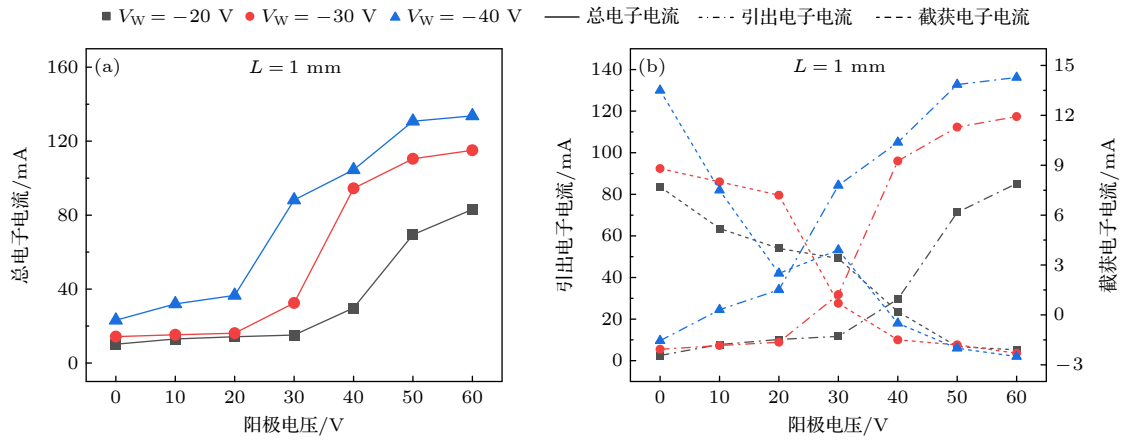


图 10 不同双极板电压的双极 ECR 中和器电流随阳极电压的变化曲线 (a) 总电子电流; (b) 引出与截获电子电流

Fig. 10. Current vs. anode voltage at different bipolar plate potentials of bipolar ECR neutralizer: (a) Total electron current; (b) extracted and intercepted electron current.

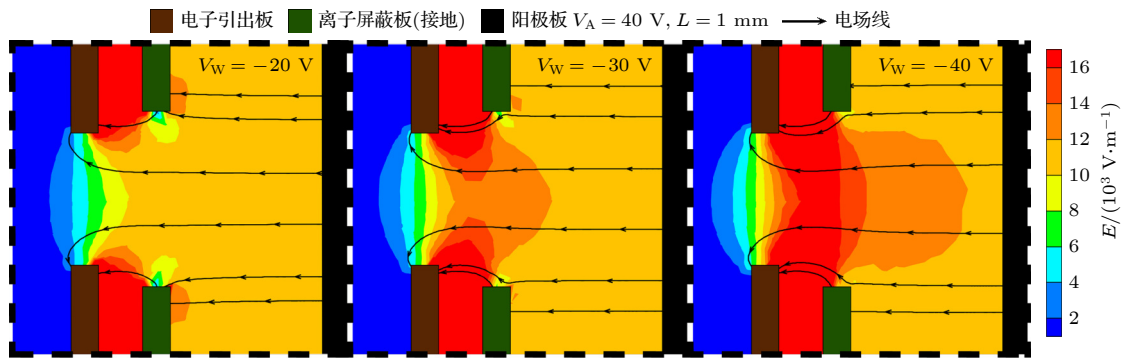


图 11 不同双极板电压的双极 ECR 中和器电子引出孔附近的电场强度分布

Fig. 11. Electric field intensity distribution near electron extraction hole of bipolar ECR neutralizer with different bipolar plate potentials.

### 4.3 氮气和氙气工质传统和双极 ECR 中和器的电子引出性能对比

为了对比传统和双极 ECR 中和器的电子引出性能, 将传统 ECR 中和器和 4.2 节实验中离子屏蔽效果最佳的双极 ECR 中和器分别以氮气和氙气为工质工作, 其中双极板参数为双极板间隙  $L = 1$  mm、双极板电压  $V_W = -40$  V. 在  $\dot{m} = 0.04$  mg/s,  $P_1 = 10$  W 的条件下, 氮气和氙气工质传统和双极 ECR 中和器的引出电子电流特性如图 12 所示.

传统 ECR 中和器在阳极电压  $V_A = 150$  V 时, 引出电子电流趋近饱和  $I_e = 134$  mA. 双极 ECR 中和器在阳极电压  $V_A = 50$  V 时, 引出电子电流趋近饱和  $I_e = 133$  mA. 两者电流仅相差 1 mA, 但是相对传统中和器, 双极 ECR 中和器达到该电流时的阳极电压下降了 67%, 总电压下降了 40%. 双极板结构的离子屏蔽效果显著, 提升了中和器的电子引出性能.

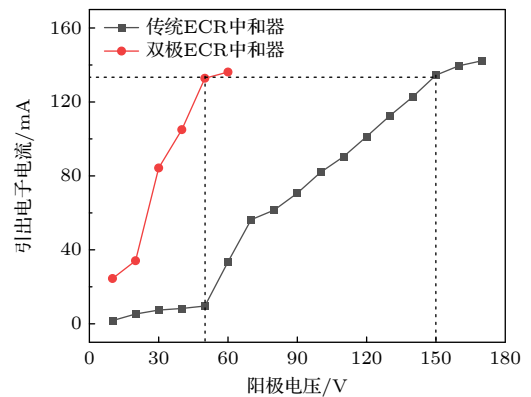


图 12 传统和双极 ECR 中和器以氮气为工质时的引出电子电流特性

Fig. 12. Characteristic of the extracted electron current of typical and bipolar ECR neutralizer running on nitrogen gas.

在  $\dot{m} = 0.04$  mg/s,  $P_1 = 10$  W 的条件下, 氙气工质传统和双极 ECR 中和器的引出电子电流特性如图 13 所示.

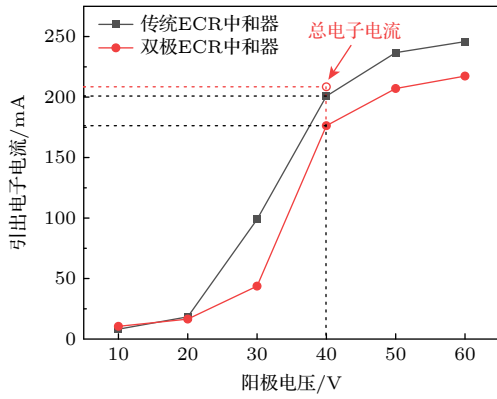


图 13 传统和双极 ECR 中和器以氙气为工质时的引出电子电流特性

Fig. 13. Characteristic of the extracted electron current of typical and bipolar ECR neutralizer running on xenon gas.

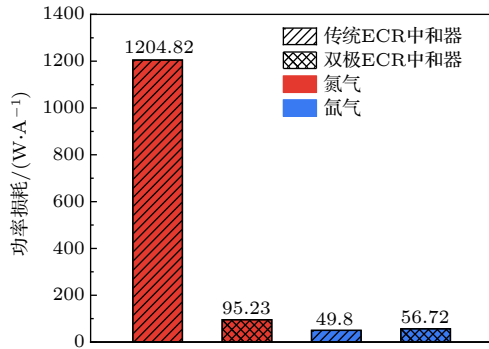


图 14 氮气和氙气工质双极 ECR 中和器的功率损耗

Fig. 14. Power loss of bipolar ECR neutralizer running on nitrogen and xenon gas.

传统 ECR 中和器在阳极电压  $V_A = 40 \text{ V}$  时, 引出电子电流发生突变,  $I_e = 200.8 \text{ mA}$ . 双极 ECR 中和器在阳极电压  $V_A = 40 \text{ V}$  时, 引出电子电流发生突变,  $I_e = 176.3 \text{ mA}$ , 此时的截获电子电流  $I_s = 32.6 \text{ mA}$ , 总电子电流  $I_t = 208.9 \text{ mA}$ . 可见, 双极板屏蔽离子并加速电子引出的作用是存在的, 但是由图 2 可知电子引出孔处  $\text{Xe}^+$  的密度较小, 双极板屏蔽的离子不能明显提高中和器的性能. 相反, 离子屏蔽板截获的大量电子电流直接导致中和器引出电子电流的降低. 可见, 氙气工质暂不适用于双极 ECR 中和器.

中和器的性能可以通过产生单位引出电子电流需要的功耗来评估 [21], 即  $\varepsilon_e = P_i / I_e$ . 氮气工质双极 ECR 中和器正常工作时的阳极电压  $V_A \geq 30 \text{ V}$ , 氙气工质传统和双极 ECR 中和器正常工作时的阳极电压  $V_A \geq 40 \text{ V}$ . 在  $\dot{m} = 0.04 \text{ mg/s}$ ,  $P_i = 10 \text{ W}$  的条件下, 对比上述中和器以氮气和氙气为工质正常

工作 ( $V_A = 40 \text{ V}$ ) 时的功率损耗如图 14 所示. 以氮气为工质工作时, 双极 ECR 中和器的功率损耗仅为传统 ECR 中和器的 8.3%, 性能提升明显. 虽然氙气工质双极 ECR 中和器的功率损耗高于氙气工质传统 ECR 中和器, 但是其仍然低于氮气工质双极 ECR 中和器. 由于氮气为双原子分子, 其电离过程远比氙气复杂, 因此需要的功耗更高.

## 5 结 论

本文在 10 厘米传统 ECR 中和器的基础上, 利用双极板结构构成适用于氮气工作的双极 ECR 中和器, 产生了良好的电子引出性能. 通过实验研究, 得到结论如下:

1) 由于氮气的相对分子量远低于氙气, 传统 ECR 中和器以氮气为工质工作时, 氮气离子容易漂移出中和器, 造成电子引出性能的降低.

2) 双极 ECR 中和器可以通过双极板在电子引出板小孔附近产生的局部静电场抑制离子漂移出中和器, 提高中和器的电子引出性能. 实验得出离子屏蔽效果最佳的双极板参数为: 双极板间隙 1 mm 和双极板电压  $-40 \text{ V}$ , 双极板电压的降低可以进一步提升双极板的离子屏蔽效果, 但是需要注意双极板电压的绝对值不能大于中和器壁面材料的溅射阈值. 分别使用传统和离子屏蔽效果最佳的双极 ECR 中和器以氮气为工质、在  $\dot{m} = 0.04 \text{ mg/s}$ ,  $P_i = 10 \text{ W}$  的条件下工作, 引出等量电子电流 134 mA 时, 双极 ECR 中和器所需的阳极电压仅为传统 ECR 中和器的 33.3%; 阳极电压 40 V 时, 双极 ECR 中和器的功率损耗为 95.23 W/A, 仅为传统 ECR 中和器的 8.3%.

3) 根据目前的实验情况, 双极 ECR 中和器的电子引出性能优化仅针对氮气工质, 其以氙气为工质工作时, 虽然总电子电流相较于传统 ECR 中和器小幅增大, 但是由于大量电子损失在离子屏蔽板上, 导致同工况下的引出电子电流低于传统 ECR 中和器. 后续若想将双极 ECR 中和器应用于氙气工质, 仍需对其结构进行优化, 增加其电子束流的聚焦效果, 以减少电子在离子屏蔽板上的损失.

## 参考文献

[1] Wu X M, Geng H, Jia L J, Pu Y X, He Y Q, Wang S M, Li Y W 2022 *Vacuum Cryog.* 28 26 (in Chinese) [吴先明, 耿海,

- 贾连军, 蒲彦旭, 贺亚强, 王尚民, 李艳武 2022 *真空与低温* **28** 26]
- [2] Yuan C Z, Zhang Q, Fu D Y, Zhao Z M, Zhang Y Q, Zhang Y H, Lu W G, Yao Y, Li Y B 2021 *Spacecr. Eng.* **30** 89 (in Chinese) [袁春柱, 张强, 傅丹膺, 赵志明, 张永强, 张永贺, 陆文高, 姚远, 李瀛搏 2021 *航天器工程* **30** 89]
- [3] Marchioni F, Cappelli M A 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 053306
- [4] Shabshelowitz A 2013 *Ph. D. Dissertation* (America: University of Michigan)
- [5] Hu P, Shen Y, Yao Z, Mao W, Hu Y, Liu X 2021 *Vacuum* **190** 110275
- [6] Schönherr T, Komurasaki K, Romano F, Massuti-Ballester B, Herdrich G 2014 *IEEE T. Plasma Sci.* **43** 287
- [7] Yukai M, Daiki K, Kazutaka N 2020 *Proceedings of Space Transportation Symposium FY2019* (Sagamihara, Kanagawa Japan: Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS) (JAXA)) p002
- [8] Yukai M, Kazutaka N *Space Transportation Symposium FY2020* (Zoom, Japan: Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS) (JAXA)) p050
- [9] Jackson S W, Marshall R 2017 *J. Spacecr. Rockets* **55** 632
- [10] Hu Z 2021 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [胡展 2021 硕士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [11] Nishiyama K, Hosoda S, Tsukizaki R, Kuminaka H 2020 *Acta Astronaut.* **166** 69
- [12] Kuminaka H, Nishiyama K, Funaki I, Yamada T, Shimizu Y, Kawaguchi J 2006 *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (Sacramento, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics) p4318
- [13] Morishita T, Tsukizaki R, Morita S, Koda D, Nishiyama K, Kuminaka H 2019 *Acta Astronaut.* **165** 25
- [14] Fu Y, Yang J, Jin Y, Xia X, Meng H 2019 *Acta Astronaut.* **164** 387
- [15] Fu Y, Yang J, Geng H, Wu X, Hu Z, Xia X 2021 *Vacuum* **184** 109932
- [16] Luo L T, Yang J, Jin Y Z, Feng B B, Tang M J 2015 *J. Northwest. Polytech. Univ.* **33** 395 (in Chinese) [罗立涛, 杨涓, 金逸舟, 冯冰冰, 汤明杰 2015 *西北工业大学学报* **33** 395]
- [17] Meng H B, Yang J, Huang W B, Xia X, Fu Y L, Hu Z 2019 *J. Astronaut.* **12** 1478 (in Chinese) [孟海波, 杨涓, 黄文斌, 夏旭, 付瑜亮, 胡展 2019 *宇航学报* **12** 1478]
- [18] Yang J, Fu Y, Liu X, Meng H, Jin Y 2018 *Plasma Sci. Technol.* **20** 085402
- [19] Itikawa Y 2006 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **35** 31
- [20] Funaki I F I, Kuminaka H K H 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 2495
- [21] Ren L, Wang Y, Ding W, Sun A, Karadag B, Deng Z, Geng J 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 034501

# Experimental study on 10-cm ECRIT neutralizer with nitrogen gas

Tan Ren-Wei<sup>1)</sup> Yang Juan<sup>1)†</sup> Geng Hai<sup>2)</sup> Wu Xian-Ming<sup>2)</sup> Mou Hao<sup>1)</sup>

1) (*School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China*)

( Received 12 October 2022; revised manuscript received 25 November 2022 )

## Abstract

Electron cyclotron resonance ion thruster (ECRIT) with a diameter of 10 cm can be operated in multiple types of gases and it is feasible to be applied to air-breathing electric propulsion systems. The study on the neutralizer of the ECRIT running in nitrogen gas is the basis for the study on the ECRIT running in nitrogen-oxygen mixed gas. When the ECR neutralizer of typical 10-cm ECRIT running in xenon gas runs in nitrogen gas, the extracted electron current is reduced, because ions tend to drift out of the neutralizer, due to the lower molecular weight of nitrogen. The typical neutralizer is no longer suitable for running in nitrogen gas. In this work, based on the 10-cm typical ECR neutralizer, in order to inhibit ions drifting out of the neutralizer and improve the performance of electron extraction, a bipolar ECR neutralizer suitable for running in nitrogen gas is experimentally studied. The results show that under the conditions of gas mass flow rate of 0.04 mg/s and input power of 10 W, the anode voltage required by the typical ECR neutralizer running in nitrogen gas is 150 V when the extracted electron current is 134 mA. However, the bipolar ECR neutralizer requires only 50-V anode voltage, which decreases by about 67%. When the anode voltage is 40V, the power loss of the typical ECR neutralizer is 1204.82 W/A, while the power loss of the bipolar ECR neutralizer is 95.23 W/A, which is about 8.3% of the former. The ion shielding effect of the bipolar ECR neutralizer running on nitrogen gas is remarkable and the electron extraction performance is improved.

**Keywords:** electron cyclotron resonance, ion thruster, neutralizer, air-breathing electric propulsion

**PACS:** 52.50.Sw, 52.59.Dk, 52.75.Di

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221951

---

† Corresponding author. E-mail: [yangjuan@nwpu.edu.cn](mailto:yangjuan@nwpu.edu.cn)



## 氮气工质10厘米ECRIT中和器实验研究

谈人玮 杨涓 耿海 吴先明 牟浩

### Experimental study on 10-cm ECRIT neutralizer with nitrogen gas

Tan Ren-Wei Yang Juan Geng Hai Wu Xian-Ming Mou Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 045202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221951

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221951>

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

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>

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>

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>

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>

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>