

# 磁场对电子回旋共振中和器等离子体与电子引出影响的数值模拟

罗凌峰<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)

(2024 年 5 月 2 日收到; 2024 年 6 月 26 日收到修改稿)

10 cm 电子回旋共振离子推力器 (ECRIT) 的 ECR 中和器是关键部件, 其内部磁场是影响中和器性能的重要因素. 磁场的均匀性和磁阱位置是磁场特征的重要表现, 制约等离子体与电势的分布规律、电子引出过程及中和器性能. 本文分别建立磁场均匀性低、磁阱位于电子引出孔上游和磁场均匀性高、磁阱位于电子引出孔下游的 ECR 中和器 PIC/MCC 模型, 在给定参数条件下, 开展等离子体和电势分布规律及电子引出过程的数值模拟研究并分析其对中和器性能的影响. 结果表明, 磁场均匀性高、磁阱位于电子引出孔下游时, 中和器内整体电势分布较均匀, 电子容易朝磁阱区迁移, 低引出电势引出高电子束流, 其性能高于磁场均匀性低、磁阱内置的中和器. 研究工作将为发展高性能的 ECR 中和器奠定重要基础.

**关键词:** 电子回旋共振中和器, PIC/MCC 模拟, 电子引出

**PACS:** 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.-y, 52.65.Pp

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240612

## 1 引言

电子回旋共振离子推力器 (electron cyclotron resonance ion thruster, ECRIT) 由 ECR 离子源和 ECR 中和器组成, 因其高比冲、长寿命、无需热阴极工作以及多类型工质等特点<sup>[1-4]</sup>, 受研究者青睐. 2003 年和 2014 年, 直径 10 cm 的氙气工质 ECRIT 成功应用于深空探测飞行器<sup>[5-7]</sup>, 累计工作时间均超过  $3 \times 10^4$  h.

ECR 中和器发射电子, 中和 ECR 离子源羽流区的离子, 维持推力器羽流区的电中性, 同时 ECR 中和器的电子束流引出性能影响整体推力器的性能<sup>[8,9]</sup>, 因而中和器是保障 ECRIT 工作与推力性能的重要部件, 其研究具有重要价值. 为此国内外针对 ECR 中和器, 在实验和数值模拟两方面开展了许多研究. 2016 年, 罗立涛等<sup>[10,11]</sup>率先开展直径 10 cm ECRIT 的 ECR 中和器研究, 建立了磁场均

匀性低、磁阱内置的 ECR 中和器实验模型, 实验探究了影响 ECR 中和器束流引出性能的因素. 研究发现, 选取轴向间隙放电天线、后磁轭内径与引出板台阶内径一致时, 有利于电子引出<sup>[12]</sup>. Masui 等<sup>[13]</sup>通过 PIC 和 FDTD 方法模拟了 ECR 中和器不同磁场结构和天线位置对放电室内等离子体和束流引出的影响, 发现天线靠近 ECR 区时, 有利于等离子体的产生. 基于上述研究, 后期国内针对文献<sup>[12]</sup>的磁场均匀性低、磁阱内置中和器实验模型, 进行了数值模拟研究, 分析了放电室内两类电子引出路径, 阐明了磁阱区在放电室内, ECR 中和器束流引出的特征, 明晰了早期中和器设计存在的问题<sup>[14]</sup>. 但是由于当时计算机条件限制, 仅针对微波功率 8 W, 氙气流量 1 sccm 的低电子引出工况条件的中和器进行了数值模拟, 没有揭示此中和器高电子引出电流条件下的等离子体分布与电子引出过程. 需要进一步结合实验, 进行数值模拟, 研究较高性能下的磁阱内置 ECR 中和器, 再揭示其内部等离

† 通信作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

子体分布规律和电子引出过程. 在文献 [12] 实验模型和文献 [14] 数值模拟的基础上, 确立了 ECR 中和器磁场改进的主要思路, 即保证磁场合理分布的同时, 将磁阱设计在引出口下游. 文献 [15] 通过减小 ECR 中和器后磁轭内径和增大磁块高度的方法优化磁场位型, 研制出磁场均匀性高、磁阱位于电子引出孔下游的中和器. 为匹配新的磁路结构, 优选了天线和电子引出板. 在微波功率 10 W, 氙气流量 0.5 mL/min (标准状况), 阳极电势 40 V 的条件下引出 206 mA 电子, 如图 1 所示, 其性能远高于相同工况下文献 [12] 的磁场均匀性低、磁阱内置中和器. 在 60 V 以下的引出电势条件下, 其性能高于国外已应用的同类型 ECR 中和器 [15,16]. 中和器工作后, 会给电子收集板施加正电势, 在电势提高的过程中, 可以明显测量到电子收集板上收集到的电子束流有一段突增, 把此时电子收集板所施加的电势称为突变电势, 收集到的电流称为突变电流. ECR 中和器的研究目的就是在尽可能低的正电势下引出更多的电子, 故这个突变点的电势越小、引出的电子越多, 代表中和器的性能越好, 因此在突变电势下 ECR 中和器的对应引出电流可以作为描述中和器性能的指标. 如图 1 所示, 国内磁场均匀性高、磁阱外置和磁场均匀性低、磁阱内置中和器的电流突变点参数分别为 40 V, 206 mA 和 50 V, 127 mA.

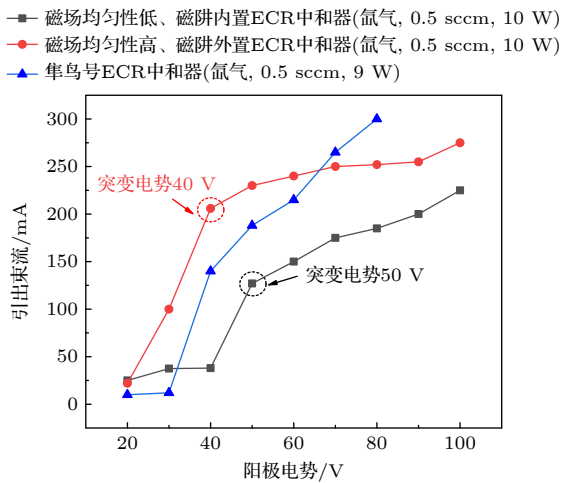


图 1 国内外 ECR 中和器束流引出实验伏安特性曲线  
Fig. 1. Characteristic curve of current beam extracted from ECR neutralizer.

由此可见中和器磁场分布的均匀性和磁阱位置对电子引出性能具有重要的影响, 但仅通过实验揭示其内部的机理还有局限性, 需要对 ECR 中和

器开展全粒子 PIC 数值模拟研究. 为此, 针对文献 [12, 15] 磁场均匀性低、磁阱内置以及磁场均匀性高、磁阱外置的两类中和器模型, 采用 PIC/MCC (particle-in-cell with Monte Carlo collision) 方法对这两类中和器的等离子体分布和电子引出进行数值模拟研究, 分析磁场均匀性和磁阱位置对 ECR 中和器等离子体特征、电子引出过程的影响. 本文首先介绍 ECR 中和器组成和工作原理, 建立上述两类 ECR 中和器的数值模型, 开展中和器等离子体数值模拟, 研究分析磁场均匀性和磁阱位置对等离子体分布规律和电子束流引出的影响. 最后总结全文.

## 2 ECR 中和器组成、工作原理

磁场均匀性低、磁阱内置和磁场均匀性高、磁阱外置的 ECR 中和器以氙气为工质, 结构如图 2 所示, 由前后磁轭、磁块、L 型天线、微波接头和电子引出板组成. 放电室静磁场由前后磁轭和磁块形成, 包括封闭磁镜区及下游开放磁场区. 从后磁轭到引出孔下游区域, 磁力线分叉, 并在两类中和器引出孔上下游分别形成内置和外置磁阱区 [17]. 4.2 GHz 微波能量通过 L 型天线馈入放电室, 气体通过头部进气孔注入放电室. 电子引出板限制离子

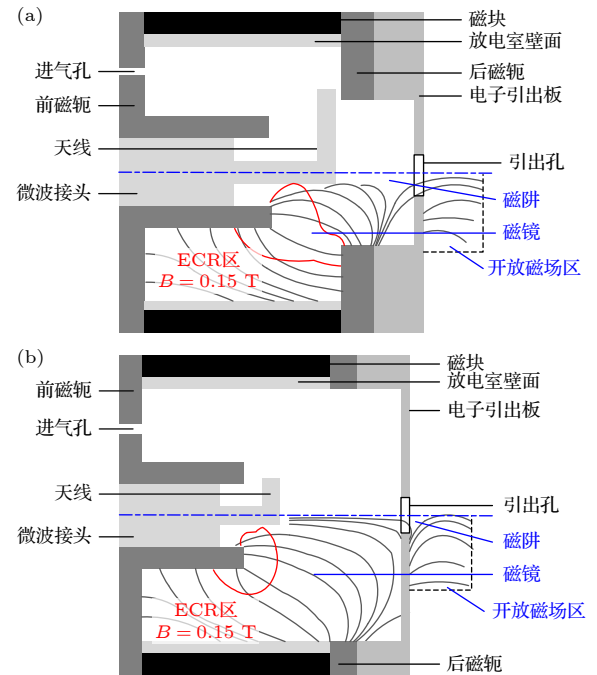


图 2 ECR 中和器结构 (a) 磁阱内置; (b) 磁阱外置

Fig. 2. ECR neutralizer structures: (a) Internal magnetic trap; (b) external magnetic trap.

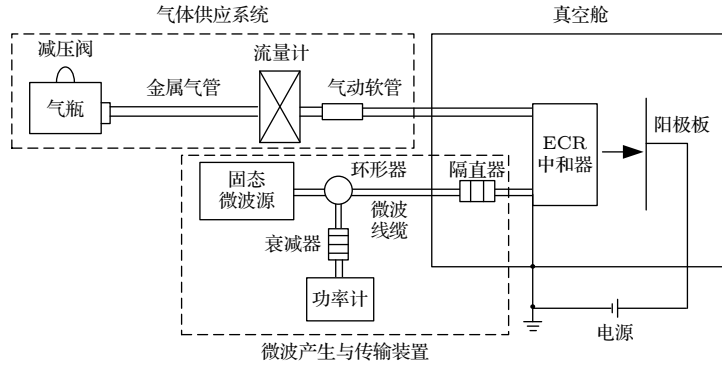


图3 ECR中和器电子束引出实验系统

Fig. 3. ECR neutralizer electron beam extraction experiment system.

和中性气体逸出,维持放电室电离度和气压.在微波能量作用下,中和器内少量氙气原子被击穿,产生的电子绕磁力线做回旋运动.电子运动到ECR区( $B = 0.15\text{ T}$ ),其回旋频率与微波频率相等,电子与微波共振,最大限度吸收微波能量并击穿气体,产生ECR等离子体,在引出孔下游阳极电势作用下,内部电子被引出形成引出电子电流.

### 3 ECR中和器数值模型区域和模拟流程

#### 3.1 ECR中和器数值模型区域

为了明确ECR中和器数值模型区域,给出图3所示ECR中和器实验系统.系统包括真空舱、微波产生与传输装置、气体供应系统、阳极板、ECR中和器.实验时,在中和器下游5 mm处放置正电势阳极板以吸引电子,改变阳极板电势并记录其收集电流,得到中和器引出电子电流随阳极电势变化的曲线.图3中和器内部区域、电子引出板和阳极之间区域都涉及等离子体迁移过程,构成数值模型区域.由于ECR中和器放电室内等离子体分布周向均匀<sup>[17]</sup>,根据文献<sup>[18]</sup>二维模型合理性评估以及等效天线的修正方法,建立二维轴对称模型如图4所示.将模型区域沿 $X$ 轴依次划分为左边界、放电室、羽流区和阳极板(右边界),求解泊松方程所需边界条件如图4所示.其中磁阱内置中和器环形天线以及磁阱外置中和器圆盘天线等效替代L型天线.

#### 3.2 模拟流程

数值模拟以氙气为工质气体,计算参数为气体流量 $0.5\text{ mL/min}$ (标准状况)、微波功率与频率分

别为 $10\text{ W}$ 和 $4.2\text{ GHz}$ .电子引出孔板到阳极板距离 $5\text{ mm}$ ,通过将真空介电常数放大100倍,来减小计算量和模拟时间,网格大小低于德拜长度<sup>[19]</sup>,取 $0.05\text{ mm}$ ,网格数量约 $8 \times 10^4$ 个.为模拟ECR机制,需要令电子运动时间步长小于微波周期. $4.2\text{ GHz}$ 的微波周期为 $2.38 \times 10^{-10}\text{ s}$ ,将其等分为20份,为方便时间统计取整,取电子运动时间步长为 $1 \times 10^{-11}\text{ s}$ .当 $B = 0.15\text{ T}$ 时,离子的回旋频率为 $1.1 \times 10^5\text{ rad/s}$ .微波频率相对于离子回旋频率为高频,时间平均的微波电场几乎对离子没有影响,且由于离子荷质比远大于电子,其运动速度比电子小.为减小计算量,将离子运动时间步长设为

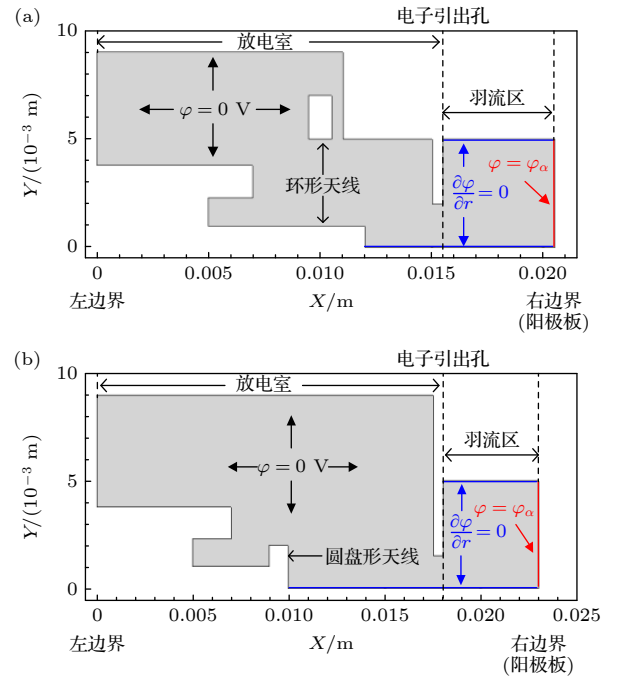


图4 数值模拟计算域和边界条件 (a) 磁阱内置; (b) 磁阱外置

Fig. 4. Numerical simulation calculation domain and boundary: (a) Internal magnetic trap; (b) external magnetic trap.

电子的 10 倍, 取  $1 \times 10^{-10}$  s. 考虑到 ECR 中和器内等离子体密度可达  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  量级, 故将初始等离子体密度设为  $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ . 将中性气体作为背景粒子均布在放电室中, 中性粒子密度<sup>[20]</sup>取  $2.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , 气体温度取 300 K. 碰撞模型考虑电子-中性粒子弹性、激发和电离碰撞, 通过 DSMC 方法处理库仑碰撞<sup>[20]</sup>. ECR 中和器电子引出电流在突变前后变化规律差异最明显, 最能反映中和器内等离子体特征变化情况<sup>[21]</sup>. 因此结合图 1 实验曲线特征, 在磁阱内置 ECR 中和器阳极板电势 20 V, 50 V 和磁阱外置 ECR 中和器阳极板电势 20 V, 40 V 条件下, 分别数值模拟电子引出电流突变点前后的内部等离子体特征.

数值模拟流程如图 5 所示. 模拟开始, 通过静电场、微波电场和静磁场推动粒子运动, 静磁场和微波电场的求解都是通过 COMSOL 计算得到的, 求解完成后, 将计算结果按格点导出, 作为程序的外置数据库, 运行时自动读取. 计算过程中并未考虑微波磁场的影响, 是因为微波磁场的磁通密度小于 1 G, 远小于静磁场. 设置功率监视器比较电子和离子的动能随输入功率的变化<sup>[22]</sup>, 根据对比结果重新缩放微波电场的幅值, 以管理等离子体吸收的功率, 使微波吸收功率等于设定吸收功率. 当放电室内等离子体参数分布达到动态平衡, 且引出电子电流稳定后, 根据计算单位时间到达阳极板上的电子数, 统计电流大小, 模拟结束.

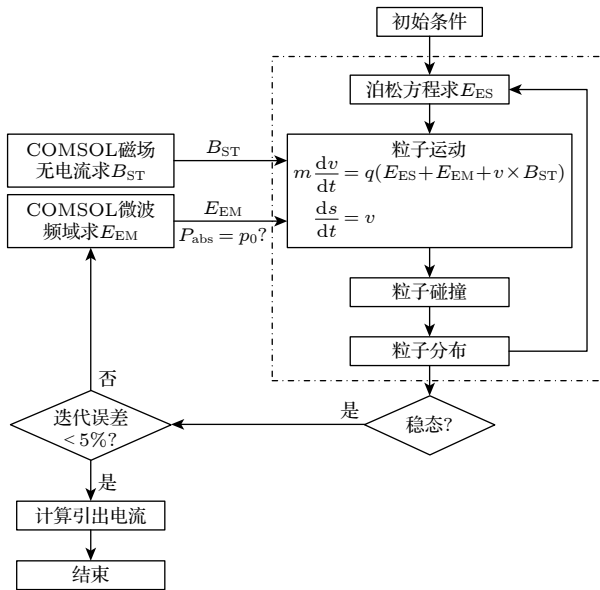


图 5 数值模拟流程

Fig. 5. Numerical simulation procedure.

## 4 数值模拟结果及其分析

### 4.1 中和器等离子体参数分布规律

图 6 和图 7 为磁阱内置、引出电流突变前后 20 V 与 50 V 阳极电势和磁阱外置、引出电流突变前后 20 V 与 40 V ECR 中和器电子、离子密度数值模拟结果. 需要特别说明的是, 由于离子的运动速度比电子慢, 所以在瞬态的等离子体分布中, 看似引出孔外离子密度更高, 实则电子通量比离子通量大. 从中统计计算得到电子引出束流与前述图 1 实验结果基本吻合. 图 6 和图 7 中红色实线为 ECR 区, 虚线围成的区域为磁阱区, 黑色实线为磁力线. 两类中和器引出电子电流突变前后, 最高离子与电子密度均分布在 ECR 区下游靠近天线的位置, 磁阱内置中和器最高离子与电子密度均大于磁阱外置中和器, 且在磁阱处形成了另一个高密度等离子体区.

### 4.2 磁场背景下中和器电势与等离子体分布规律分析

图 8 为两类中和器磁场背景<sup>[15]</sup>, 都存在磁镜与磁阱区. 均匀性低、磁阱内置中和器磁镜和磁阱区间距短, 都存于内部, 而且磁场梯度高. 均匀性高、磁阱外置中和器磁镜和磁阱区间距大, 分别存在于中和器内部和外部, 而且磁场梯度低. 根据等离子体理论<sup>[23]</sup>, 这些特征将影响磁场中离子体的迁移过程与电势分布. 图 9(a) 为磁阱内置中和器电势分布规律的数值模拟结果, 蓝色虚线 I 是中和器电子通过磁阱的引出路径, 蓝色虚线 II 是电子在开放磁场区、顺发散磁力线的引出路径. 如图 9(b) 所示, 磁阱外置时中和器内部几乎只出现封闭磁阱场的磁力线, 发散磁力线几乎都位于中和器之外, 因此仅考虑电子通过磁阱引出的路径 I. 分析图 8 与图 9, 磁场背景下的电场和阳极电势密切相关并受磁场制约, 同时又与图 6 和图 7 所示的等离子体密度场相互关联. 因而电场、等离子体密度场以及阳极电势密切相关并受磁场制约.

根据图 6(a), (c), 磁阱内置中和器上下游 ECR 区贯通前后磁轭, 电子在 ECR 区绕磁力线回转频率与微波电场回旋频率相同, 获得微波电场能并通过碰撞产生 ECR 等离子体. 天线圆环与后磁轭壁面间狭窄的间隙引起微波电场集中, 同时由于天线



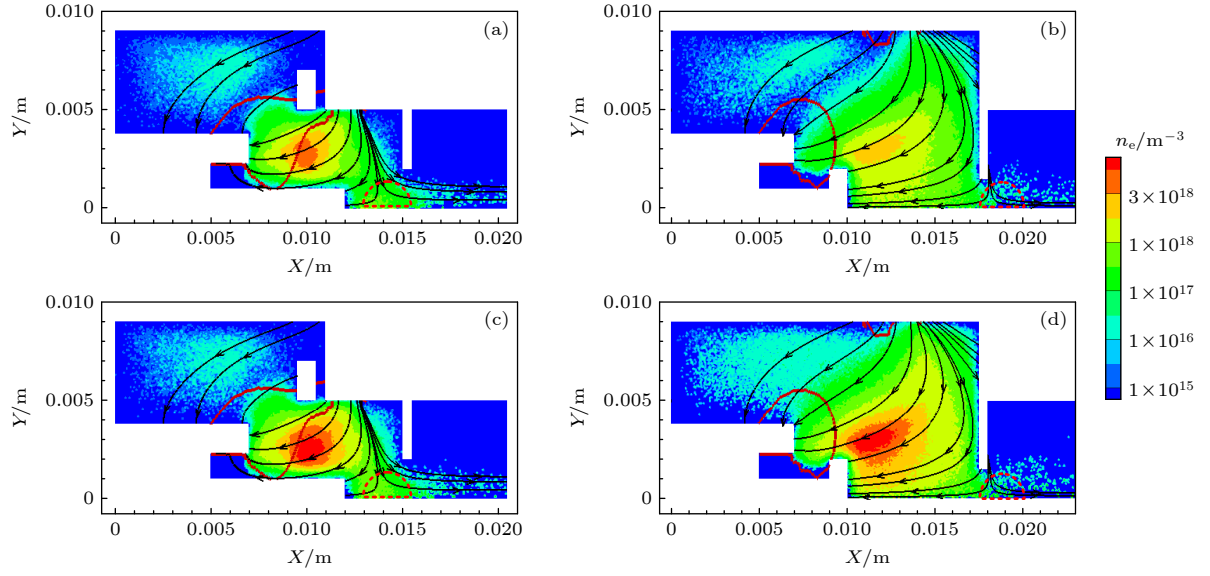


图 6 不同阳极电势中和器电子密度分布 (a) 磁阱内置  $\varphi_a = 20$  V; (b) 磁阱外置  $\varphi_a = 20$  V; (c) 磁阱内置  $\varphi_a = 50$  V; (d) 磁阱外置  $\varphi_a = 40$  V

Fig. 6. Electron density distribution inside of neutralizer at different anode potential: (a) Internal magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (b) external magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (c) internal magnetic trap at  $\varphi_a = 50$  V; (d) external magnetic trap at  $\varphi_a = 40$  V.

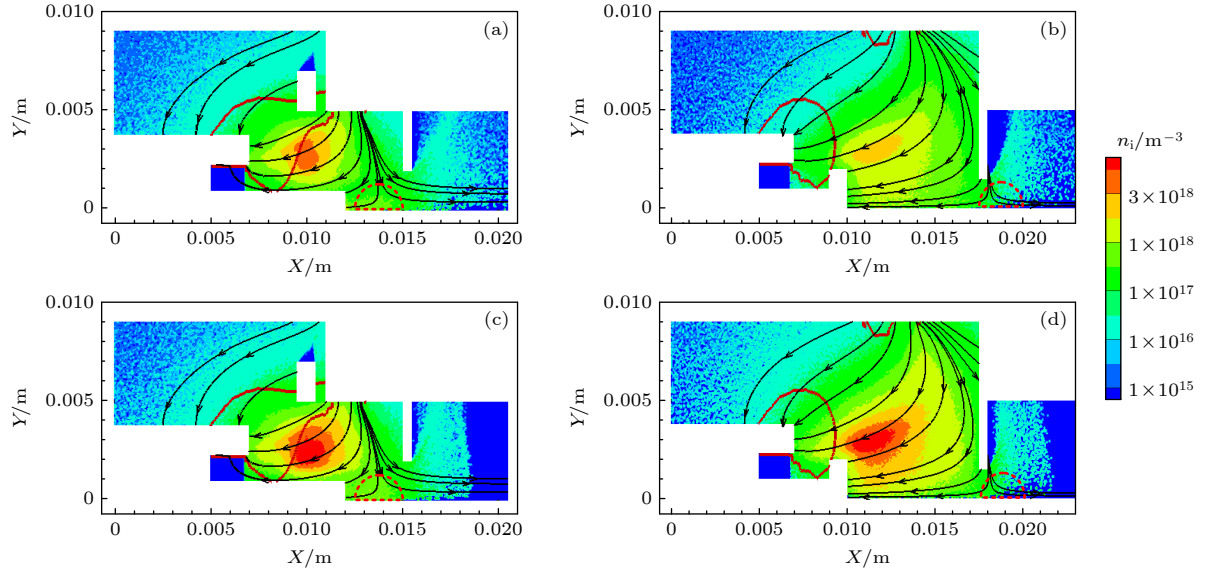


图 7 不同阳极电势中和器离子密度分布 (a) 磁阱内置  $\varphi_a = 20$  V; (b) 磁阱外置  $\varphi_a = 20$  V; (c) 磁阱内置  $\varphi_a = 50$  V; (d) 磁阱外置  $\varphi_a = 40$  V

Fig. 7. Ion density distribution inside of neutralizer at different anode potential: (a) Internal magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (b) external magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (c) internal magnetic trap at  $\varphi_a = 50$  V; (d) external magnetic trap at  $\varphi_a = 40$  V.

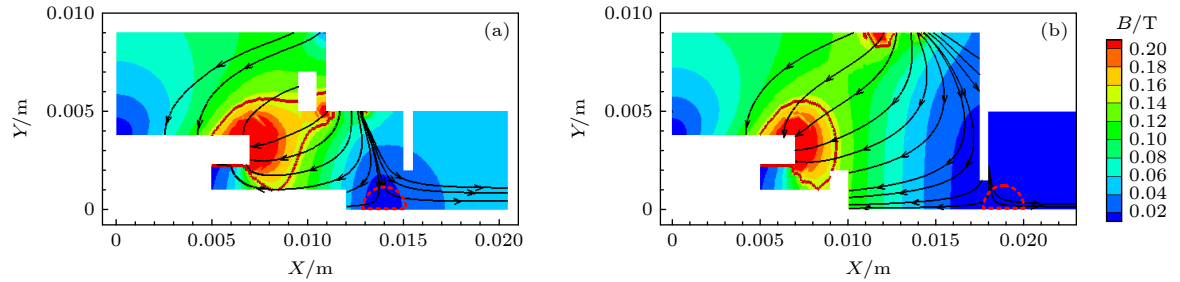


图 8 ECR 中和器磁场分布 (a) 磁阱内置; (b) 磁阱外置

Fig. 8. ECR neutralizer magnetic field distribution: (a) Internal magnetic trap; (b) external magnetic trap.

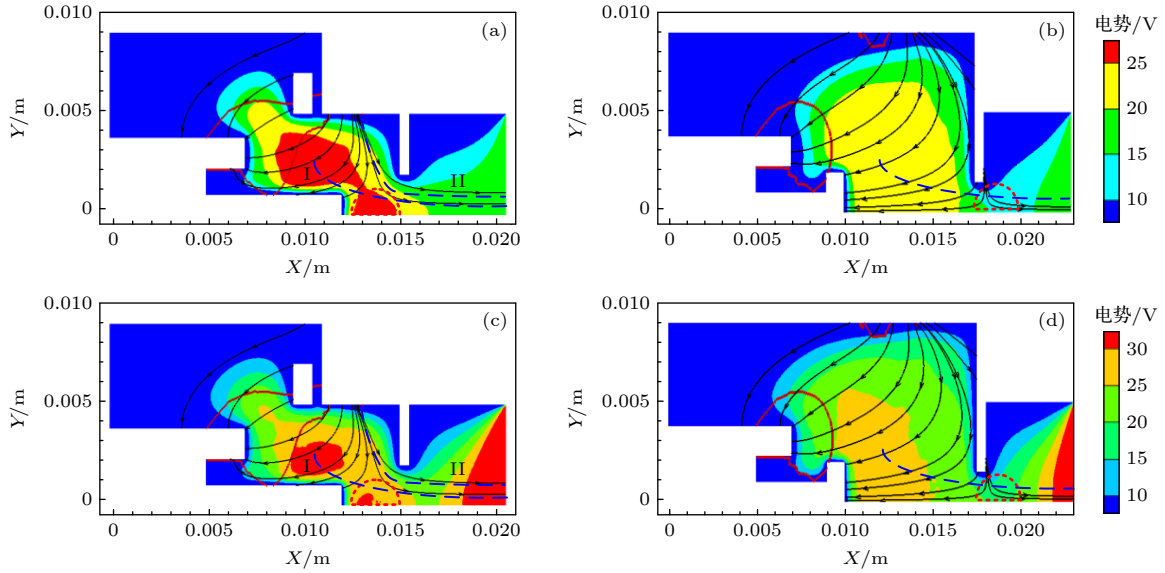


图9 不同阳极板电势下中和器电势分布 (a) 磁阱内置  $\varphi_a = 20$  V; (b) 磁阱外置  $\varphi_a = 20$  V; (c) 磁阱内置  $\varphi_a = 50$  V; (d) 磁阱外置  $\varphi_a = 40$  V

Fig. 9. Potential distribution inside of neutralizer at different anode potential: (a) Internal magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (b) external magnetic trap at  $\varphi_a = 20$  V; (c) internal magnetic trap at  $\varphi_a = 50$  V; (d) external magnetic trap at  $\varphi_a = 40$  V.

对上游 ECR 面的切割作用, 使下游 ECR 区等离子体密度高于上游 ECR 区. 结合图 6(a), (c) 以及图 7(a), (c) 的磁阱内置中和器等离子体参数模拟结果, 离子跨越磁力线速度大于电子, 磁镜中的等离子体不断产生, 首先在下游 ECR 区不远处形成最高密度、动态平衡的第一等离子体区. 动态平衡的第一等离子体区内, 部分电子和离子受下游高电势阳极作用, 又跨越磁力线向下游磁阱迁移. 到达磁阱附近后, 根据磁矩守恒定理<sup>[22]</sup>, 带电粒子从磁阱向引出孔迁移时, 磁场强度由弱变强, 平行于磁力线的速度  $V_{\parallel}$  减小, 垂直于磁力线的速度  $V_{\perp}$  增大, 引起等离子体聚集, 因此会在磁阱处形成较高密度的第二等离子体区. 从图 9(a), (b) 所示的磁阱引出路径 I 引出的电子将受到阻力, 降低路径 I 的电子引出电流. 然而图 9(a), (b) 所示的发散磁力线路径 II 将遇到稍微抬高的电势区域, 对此路径的电子引出产生贡献. 此路径的电子来自于封闭磁镜场逃逸的高能电子, 与跨越上游磁场梯度并被开放磁场磁力线捕获的电子, 因而对引出电子电流有贡献.

因此磁场均匀性差, 导致磁场梯度高、等离子体受到的磁压大、磁阱区离第一最高等离子体密度区距离近, 使引出口位于磁阱区下游, 并拉开了两者之间距离, 形成外界电势低于磁阱的现象, 影响路径 I 电子的引出. 路径 II 电子经历电势抬高过

程, 对电子引出电流有贡献. 但是电子的来源与迁移过程复杂, 有封闭磁镜场高能电子的逃逸, 又有沿上游磁场梯度跨越后被发散磁力线捕获的电子. 这些复杂的迁移过程将消耗更多能量, 抬升电子引出电势.

与图 6(a), (c) 相比, 图 6(b), (d) 所示的磁阱外置中和器放电室空间大, 且磁场分布均匀性高, 上下游各存在一个 ECR 区. 由于天线与前磁轭之间的间隙引起电场集中, 电子在上游 ECR 区获得微波电场能被最大化, 并在附近位置产生 ECR 等离子体. 如同图 6(a), (c) 以及图 7(a), (c) 的分析, 首先, 同样会在上半部 ECR 区不远处形成最高密度等离子体区, 且此区域范围大于磁阱内置中和器. 由于磁阱位于引出孔外界, 因此从最高密度等离子体区到磁阱处, 磁场强度由强变弱, 平行于磁力线的速度  $V_{\parallel}$  增大, 垂直于磁力线的速度  $V_{\perp}$  减小, 电子更容易沿磁力线从内部扩散到羽流区, 最高等离子体区内的部分离子、电子跨越磁力线向外界磁阱区聚集. 阳极板的存在导致引出孔外界电势提升, 离子有被屏蔽于中和器之内趋势, 使得磁阱区电势得到抬升, 助力电子从引出口向外界磁阱区迁移, 增加引出电子电流.

由此可见磁场均匀度高, 导致磁场梯度低、等离子体受到的磁压强低、使磁阱区远离最高密度等离子体区, 形成了外界电势高于磁阱的现象, 增加

了电子引出能力.

图 10 是两类 ECR 中和器引出电流的实验和模拟统计结果, 其中磁阱内置中和器总电子电流为路径 I 和 II 电流之和. 可以看出, 基于数值模拟的磁阱内置和外置中和器阳极吸收的电子电流统计计算结果与实验几乎接近.

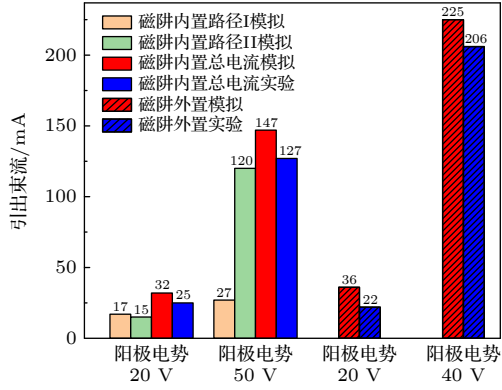


图 10 两类 ECR 中和器束流引出实验和模拟统计结果  
Fig. 10. Experiment and calculation results of electron current from different neutralizer.

### 4.3 中和器电子引出机制分析

图 11(a) 为磁阱内置中和器电子引出路径 I 和 II 的电势随轴向位置的变化规律. 针对路径 I, 最高密度等离子体区电势在中和器放电室内最高. 此区等离子体向磁阱区迁移后, 在 20 V 和 50 V 的阳极电势条件下, 都未使磁阱电势低于引出孔电势, 致使电子引出受阻. 阳极电势提高时, 磁阱处电势有所抬升, 趋向引出孔电势, 但是依然不能使磁阱电势高于引出孔. 根据图 8(a) 所示, 电子从磁阱向引出孔迁移过程中受到磁场的阻力. 电场和磁场阻力共同导致路径 I 的电子电流低. 可以推测非常高的阳极电势有可能消平磁阱和引出孔电势差, 突破电势对路径 I 电子引出带来的阻力, 但是消除不了磁场的阻力, 并且高阳极电势将带来高能需求. 路径 II 起始点为封闭磁镜区和开放磁镜区的交汇点, 此处高能电子从封闭磁镜区跨越到开放磁镜区, 进入路径 II. 同时, 磁镜区电子沿磁场梯度向开放磁镜区迁移并进入路径 II. 电子在 20 V 和 50 V 阳极电势作用下, 路径 II 电子向引出口迁移过程, 电势从低到高、再从高到低变化, 依然存在引出口低电势对电子引出的制约. 但是存在一个有利条件为路径 II 电子沿磁力线迁移受到的阻力低于磁镜场跨越磁力线向磁阱区的迁移<sup>[23]</sup>, 这是路径 II 电子对总电流贡献的条件.

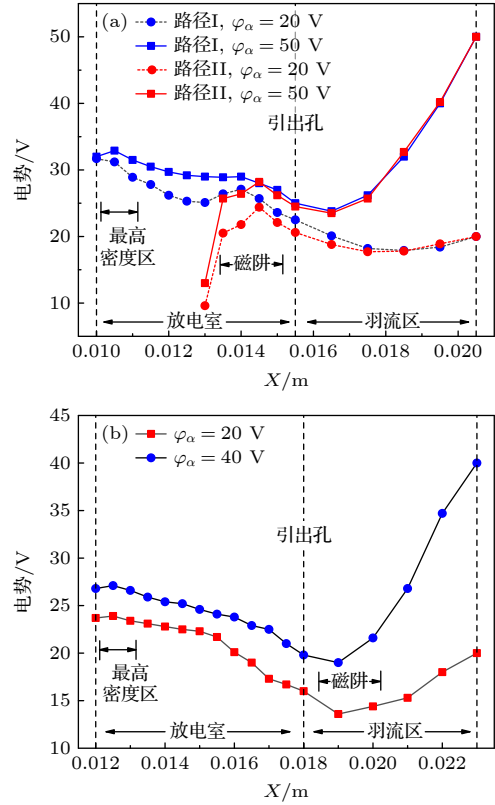


图 11 不同阳极电势下电子引出路径电势分布 (a) 磁阱内置; (b) 磁阱外置

Fig. 11. Potential distribution on electron extraction path at different anode potential: (a) Internal magnetic trap; (b) external magnetic trap.

图 11(b) 为磁阱外置中和器电子引出路径上电势随轴向位置的变化规律, 最高密度等离子体区电势在中和器放电室内最高. 等离子体从最高密度区向磁阱区迁移过程中, 电势都在下降. 但是此过程电子迁移机制主要来源于磁场梯度的作用, 而且与图 8(a) 相比, 图 8(b) 轴线附近有更多的磁力线与轴线接近平行, 使更多的电子直接沿磁力线通过引出孔迁移到磁阱区. 图 11(b) 表明, 电势沿磁阱到阳极不断上升, 使迁移到磁阱区的电子在阳极电势作用下加速迁移, 增加引出电子电流. 图 8(b) 表明, 在引出口外界, 磁场强度最弱且几乎均匀化, 几乎失去了对电子的制约. 由此得出, 中和器内的磁场均匀性、磁阱外置和引出口下游的电势抬升以及均匀化的外界弱磁场决定了电子引出电流的最大化.

## 5 结 论

本文构建了磁场均匀性低、磁阱内置和磁场均匀性高、磁阱外置两类 ECR 中和器二维轴对称

PIC/MCC 模型, 数值模拟了不同阳极引出电势下中和器等离子体分布和束流引出过程, 分析磁场均匀性和磁阱位置对中和器束流引出性能的影响, 得到结论如下.

1) 两类中和器引出电子电流突变前后, 放电室内最高等离子体密度均分布在 ECR 区下游靠近天线的位置, 磁阱内置中和器最高等离子体密度均大于磁阱外置中和器, 且在磁阱处形成了另一个高密度等离子体区.

2) 中和器的磁场均匀性差, 则磁场梯度大, 中和器内部出现两个高密度等离子体区, 拉开了上游磁阱区和下游引出口之间距离, 产生外界电势低于磁阱和引出口的现象, 同时电子从磁阱向引出口迁移过程又受磁场制约. 虽然电子顺磁力线从中和器引出能改善引出电子性能, 但是电子复杂迁移过程需要更高的电势能.

3) 中和器的磁场均匀度高, 则磁场梯度低、使汇聚等离子体的磁阱区位于引出口之外. 在阳极电势作用下, 产生外界电势高于磁阱的现象. 同时中和器外界均匀性高的弱磁场几乎失去对电子的约束, 由此电子引出能力大幅提高.

## 参考文献

- [1] Yang J, Mou H, Gen 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] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2018 *J. Propuls. Power* **34** 960
- [3] Tan R W, Yang J, Gen H, Wu X M, Mou H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 045202 (in Chinese) [谈人玮, 杨涓, 耿海, 吴先明, 牟浩 2023 *物理学报* **72** 045202]
- [4] Tsuru T, Kondo S, Yamamoto N, Nakashima H 2009 *T. Jpn. Soc. Aeronaut. S.* **7** 163
- [5] Kuninaka H, Nishiyama K, Funaki I, Yamada T, Shimizu Y, Kawaguchi J 2007 *J. Propuls. Power* **23** 544
- [6] Tsuda Y, Nakazawa S, Yoshikawa M, Saiki T, Terui F, Arakawa M, Abe M, Kitazato K, Sugita S, Tachibana S, Namiki N, Tanaka S, Okada T, Ikeda H, Watanabe S i, Hirabayashi M, Tsuda Y 2022 *Hayabusa2 Asteroid Sample Return Mission* (Elsevier) pp5–23
- [7] Kawaguchi J i, Fujiwara A, Uesugi T 2008 *Acta Astronaut.* **62** 639
- [8] Mou H, Jin Y Z, Yang J, Xia X, Fu Y L 2022 *Chin. Phys. B* **31** 075202
- [9] Zheng P, Wu J, Zhang Y, Che B, Li J 2021 *Acta Astronaut.* **187** 236
- [10] Luo L T, Yang J, Jin Y Z, Sun J, Han F 2016 *Chin. Space Sci. Tech.* **36** 35 (in Chinese) [罗立涛, 杨涓, 金逸舟, 孙俊, 韩飞 2016 *中国空间科学技术* **36** 35]
- [11] Luo L T, Yang J, Jin Y Z, Feng B B, Tang J M 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]
- [12] 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]
- [13] Masui H, Tashiro Y, Yamamoto N, Nakashima H, Funaki I 2006 *T. Jpn. Soc. Aeronaut. S.* **49** 87
- [14] Fu Y L, Yang J, Geng H, Wu X, Hu Z, Xia X 2021 *Vacuum* **184** 109932
- [15] Gao Z Y 2022 *M. S. Thesis* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [高振业 2022 硕士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [16] Nishiyama K, Kuninaka H 2008 *Surf. Coat. Tech.* **202** 5262
- [17] Fu Y L, Yang J, Jin Y, Xia X, Meng H B 2019 *Acta Astronaut.* **164** 387
- [18] Fu Y L 2022 *Ph. D. Dissertationn* (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)]
- [19] Yang J, Shi F, Yang T L, Meng Z Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8701 (in Chinese) [杨涓, 石峰, 杨铁链, 孟志强 2010 *物理学报* **59** 8701]
- [20] Jin Y Z 2018 *Ph. D. Dissertationn* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [金逸舟 2018 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [21] Ikkoh Funaki I F, Hitoshi Kuninaka H K 2001 *Japanese Journal of Applied Physics* **40** 2495
- [22] Xia X, Yang J, Gen 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]
- [23] Chen F F 1974 *Introduction to Plasma Physics* (New York: Springer Science Business Media) pp139–180



# Numerical simulation of magnetic field influence on plasma and electron extraction of electron cyclotron resonance neutralizer

Luo Ling-Feng<sup>1)</sup> Yang Juan<sup>1)†</sup> Geng Hai<sup>2)</sup> Wu Xian-Ming<sup>2)</sup> Mou Hao<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

<sup>2)</sup> (Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

( Received 2 May 2024; revised manuscript received 26 June 2024 )

## Abstract

Electron cyclotron resonance (ECR) neutralizer is a key component of electron cyclotron resonance ion thruster (ECRIT) with a diameter of 10 cm, which plays an important role in maintaining the spacecraft potential balance and neutralizing the ions in the plume region. Optimizing magnetic field distribution is an important way to improve the performance of neutralizer. At the same time, the uniformity of the magnetic field and the position of the magnetic trap can affect the magnetic field characteristics, plasma performance, electron extraction process, and beam current. Previous experimental researches showed that the beam current extraction performances of the two ECR neutralizers with different magnetic field uniformity and different magnetic trap locations are significantly different. However, it is difficult to reveal the physical phenomena and causes only through experiments, so numerical simulation is needed. Therefore PIC/MCC codes for the ECR neutralizers with different uniformity of magnetic field and different positions of magnetic trap are established. Under the given electron extraction potential, numerical simulations are accomplished to study electron extraction procedure and analyze its influence on the performance of the neutralizer. The simulation results show that when the magnetic field uniformity is low and the magnetic trap is located upstream of extraction orifice, the migration of electrons from the magnetic trap to the outlet is limited by the magnetic field and the electric field, thus a higher potential energy is needed to extract the electrons. Otherwise, when the magnetic field uniformity is high and the magnetic trap is located at the downstream of extraction orifice, electrons will be more likely to migrate towards the magnet trap. After the electrons reach the magnetic trap, under the action of the anode potential, the external potential is higher, and the external weak magnetic field almost fails to hold these electrons. Therefore a large number of electrons can be extracted at low extraction potential. This research will lay an important foundation for the development of high-performance ECR neutralizer.

**Keywords:** electron cyclotron resonance neutralizer, PIC/MCC simulation, electron extraction

**PACS:** 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.-y, 52.65.Pp

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240612](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240612)

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

## 磁场对电子回旋共振中和器等离子体与电子引出影响的数值模拟

罗凌峰 杨涓 耿海 吴先明 牟浩

### Numerical simulation of magnetic field influence on plasma and electron extraction of electron cyclotron resonance neutralizer

Luo Ling-Feng Yang Juan Geng Hai Wu Xian-Ming Mou Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 165203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240612

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240612>

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

#### 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>

#### 磁阵列微波放电中和器的电子引出机制

Electron extraction mechanism of magnet array microwave discharge neutralizer

物理学报. 2024, 73(11): 115203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240273>

#### 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>

#### 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>

#### 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>

#### 2 cm电子回旋共振离子源猝灭现象模拟

Numerical study on abnormal flameout of 2-cm electron cyclotron resonance ion source

物理学报. 2022, 71(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212151>