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

2 cm电子回旋共振离子源猝灭现象模拟

付瑜亮 杨涓 王彬 胡展 夏旭 牟浩

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

Fu Yu-Liang Yang Juan Wang Bin Hu Zhan Xia Xu Mu Hao

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 085203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212151
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20212151
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

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

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

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

二次电子倍增对射频平板腔建场过程的影响
Influence of multipactor discharge on field-buildup process in radio-frequency plate cavity
物理学报. 2018, 67(17): 177902 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180656

激光在大气中驱动的强太赫兹辐射的理论和实验研究
Theoretical and experimental studies on terahertz radiation from laser-driven air plasma
物理学报. 2018, 67(12): 124202 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180564

低气压感性耦合等离子体源模拟研究进展
Numerical investigation of low pressure inductively coupled plasma sources: A review
物理学报. 2021, 70(9): 095206 https://doi.org/10.7498/aps.70.20202247

2 cm 电子回旋共振离子源猝灭现象模拟*

付瑜亮[1)] 杨涓[1)†] 王彬[2)] 胡展[2)] 夏旭[1)] 牟浩[1)]

1) (西北工业大学航天学院, 西安 710072)

2) (中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203)

(2021 年 11 月 23 日收到; 2021 年 12 月 31 日收到修改稿)

2 cm 电子回旋共振离子推力器具有高比冲、长寿命的特点, 其应用于引力波探测的可行性已经过初步探索. 然而, 在探究离子源推力下限的过程中发现, 在极低功率 (0.5 W) 和极低流量 (0.1 sccm, 1 sccm = 1 L/min) 的极限工作状态下, 过度施加栅极电压可能引发离子源猝灭. 采用实验手段对猝灭现象进行观测的难度很大, 一方面因为猝灭现象具有随机性和瞬时性; 另一方面, 介入式诊断对弱放电水平的等离子体干扰很大, 而光学诊断又有栅极系统阻挡. 为此本文采用全粒子数值模型对离子源进行了一体化模拟, 复现了猝灭现象. 模拟结果表明, 天线和放电室之间的双极扩散是导致离子源猝灭的最根本原因. 明晰了猝灭机理后, 本文提出了相应的改进措施, 并用一体化模拟进行了理论验证. 对猝灭机理的研究将为离子源的设计和应用提供理论依据, 保障离子源安全稳定工作, 满足引力波探测任务的推力需求.

关键词: 电子回旋共振离子源, 粒子模拟, 猝灭

PACS: 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp **DOI:** 10.7498/aps.71.20212151

1 引 言

引力波探测任务需要在超静超稳的卫星平台上进行, 受太阳光压、大气阻尼、宇宙射线等外部环境扰动, 卫星需要低推力、低噪声、高灵敏度的微型电推力器来维持长期的静稳状态. 这些需求极大的推动了微推进系统的发展, 例如: 冷气推力器[1,2]、微牛级霍尔推力器[3,4]、微牛级射频推力器[5,6]、离子液体推力器[7,8]. 2 cm 电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 离子推力器先天具有高比冲、长寿命的特点[9,10], 且经实验初步探索[11], 认为 ECR 离子推力器同样具备执行引力波探测任务的可能性.

然而, 当离子源处于极低功率 (0.5 W) 和极低流量 (0.1 sccm, 1 sccm = 1 L/min) 的极限工作状态时, 其内部气体放电及等离子体密度均处于低水平, 要实现宽范围的栅极电压调节是对推力器性能的考验. 因为在极限工作状态下, 两种调节推力的方案都可能引发离子源猝灭: 一是多次小幅度改变栅极电压来缓慢调节推力; 二是单次大幅度改变栅极电压来快速调节推力[12]. 需要特别说明的是, 离子源在较高的等离子体密度水平可以正常工作, 不存在猝灭现象. 由于猝灭现象具有随机性和瞬时性, 常常被归结为实验操作失误. 采用实验手段对猝灭现象进行观测的难度很大, 因为一方面猝灭现象具有随机性和瞬时性; 另一方面, 介入式诊断[13,14]对弱放电水平的等离子体干扰很大, 而光学诊断又有栅极系统阻挡. 鉴于引起猝灭的具体原因尚未见报道, 本文将采 PIC-MCC(particle-in-cell with Monte Carlo collision) 方法[15–17]对离子源进行一体化模拟, 探究猝灭机理. 一体化模拟将放电室、栅极系统和羽流整合到一个计算域里, 可以时空连续的模拟等离子体放电和离子加速引出

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2201000) 和国家自然科学基金 (批准号: 11875222) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

的过程, 非常适合观测改变栅极电压后, 等离子体系统的演化过程. 通过模拟复现离子源在极限工况下的猝灭现象, 分析猝灭机理, 并提出改进措施, 可以为 2 cm ECR 离子源的设计和应用提供理论依据.

2 实验系统

ECR 离子源实验系统如图 1 所示, 主要由真空设备、气体供应系统、微波系统、电路系统和 ECR 离子源 5 部分组成. 真空设备由真空泵机组和真空舱 (Φ1.2 m × 3 m) 组成, 实验中真空舱内的真空度小于等于 5×10^{-3} Pa. 气体供应系统主要包括氩气储气瓶, 流量控制器. 微波系统主要部件为微波源、环形器, 隔直器和功率计. 4.2 GHz 的微波由同轴线输入到离子源内, 反射的微波经环形器导入功率计以实时测量反射功率. 电路系统主要包括屏栅和加速栅电源和保护电阻.

ECR 离子源在不同工况下的放电图像如图 2 所示. 可以看到, 随着流量和微波功率的降低, 离子源内等离子体电离强度逐渐减弱. 0.1 sccm 和 0.5 W 是实验系统所能给予的最低流量和微波功率. 在这个工况下, 离子源处于极限工作状态, 在调节栅极电压时可能出现猝灭现象. 已知多次小幅度和单次大幅度地调节栅极电压的方式都可能引起猝灭. 后者相对于前者, 离子源猝灭的栅极电压较低. 需要特别说明的是, 猝灭仅出现在极限工作状态.

3 一体化全粒子 PIC-MCC 模型

全粒子 PIC-MCC 模型中的电磁场模块和粒子模块可参考文献 [15]. 本文主要介绍针对离子源猝灭现象的一体化建模.

3.1 计算域

如图 3 所示, 二维轴对称的计算域包含了离子源、中和器和羽流区域. 整体计算域大小约为 60 mm × 60 mm, 其中离子源大小约为 10 mm × 10 mm, 位于左下角; 中和器和离子源相距约 10 mm, 剩余空间均为羽流区域.

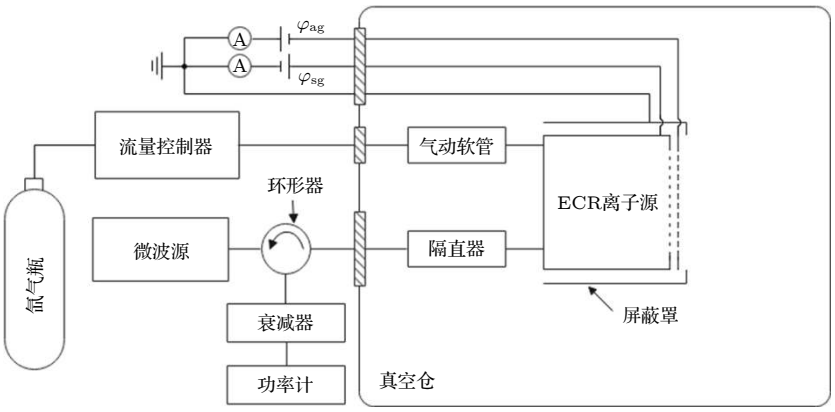

图 1 离子源实验系统

Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

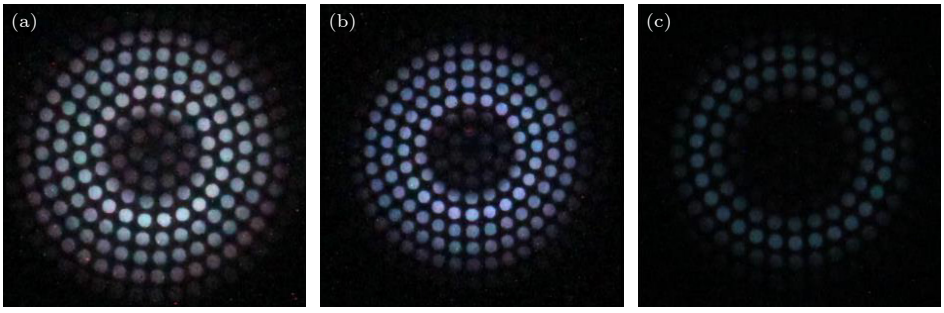

图 2 2 cm ECR 离子源放电图像 (a) 0.3 sccm, 2 W; (b) 0.1 sccm, 2 W; (c) 0.1 sccm, 0.5 W

Fig. 2. Discharge images of 2 cm ECR ion source: (a) 0.3 sccm, 2 W; (b) 0.1 sccm, 2 W; (c) 0.1 sccm, 0.5 W.

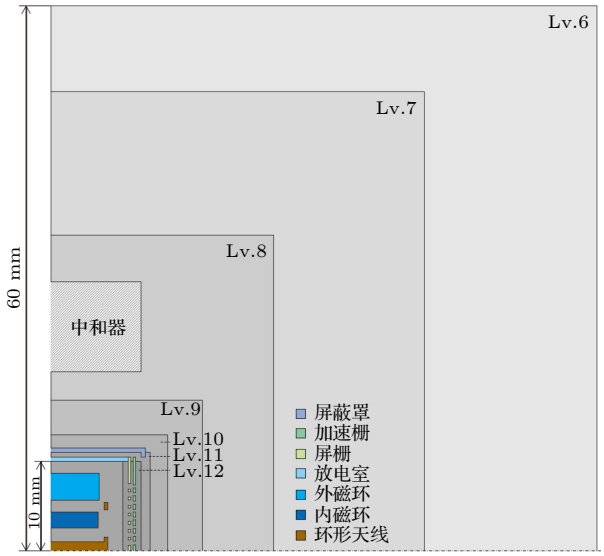

图 3 计算域

Fig. 3. Simulation region.

ECR 离子源主要部件有内外磁环、天线、栅极系统和屏蔽罩. 内外磁环形成磁镜, 电子在磁镜间来回反射并在 ECR 区与微波共振获得能量. 栅极系统用于离子加速. 屏蔽罩隔离内部高电压, 保护离子源. 中和器不作为模拟对象, 仅提供电子来中和羽流.

由于计算域内不同区域的等离子体密度差异较大, 各区域的网格步长均根据当地的等离子体密度来设置. 这样可以在确保准确性的情况下减小计算负担. 本文采用了四叉树的数据结构来构建网格[18,19]. 表 1 为依据不同区域需求来划分的叶网格层级, 各层级有对应的网格长度. 放电室的网格长度根据德拜长度需求取 0.05 mm, 栅极系统加密 1 级 (0.025 mm). 综合考虑电势梯度, 等离子体密度和计算量, 从栅极区域向羽流区域, 每过 20 个网格层级减 1, 直到最低层级 6. 在图 3 中, 用灰度的变化表示了各区域的层级变化.

表 1 不同区域的网格层级和长度

Table 1. Mesh level and length in different regions.

区域	网格层级	网格步长/mm
栅极系统	12	0.025
放电室	11	0.05
近场羽流	10	0.10
羽流1	9	0.20
羽流2	8	0.40
羽流3	7	0.80
羽流4	6	1.60

3.2 天 线

天线与等离子体接触, 但在电路上与放电室绝缘, 是电路孤岛. 由于电子的运动速度比离子快, 电子通量 $n_{\rm e}u_{\rm e}$ 和离子通量 $n_{\rm i}u_{\rm i}$ 之间的差异会使天线表面累积电荷, 其中 $n_{\rm e}, n_{\rm i}, u_{\rm e}, u_{\rm i}$ 分别为电子和离子的密度及平均速度. 当 $n_{\rm e}u_{\rm e} = n_{\rm i}u_{\rm i}$ 时, 天线在等离子体中处于悬浮电压. 在一般的放电室模拟中, 将天线电压设为 0 并不会明显改变等离子体分布; 而在一体化模拟中会施加栅极电压, 天线电压将不再是固定值, 而是根据其累积的电荷计算. 根据高斯定理, 天线电压为 $\varphi = \oint_S E\cdot {\rm d}A = Q/\epsilon_0$, 其中 Q 为累积的净电荷数, ϵ_0 为真空介电常数.

3.3 栅极二维模型

如图 2 所示, 本文使用的栅极是特制的, 栅极孔分布在 8 个圆周上 (8 层). 相邻两圆的半径之差为 $3r_{\rm sg}$, $r_{\rm sg}$ 为屏栅孔半径. 在二维轴对称模型中, 将孔与环的面积之比作为透过率, 即

$$\gamma_{\rm sg} = \frac{S_{\rm a}}{S_{\rm ring}} = \frac{N\cdot\pi r^2}{\pi[(3n+1)r]^2 - \pi[(3n-1)r]^2} = \frac{N}{12n},$$

$(n = 1, 2, 3, \cdots, 8)$. 其中, n 为层数. 可以看到, 透过率与孔半径无关. 于是, 取 $r_{\rm sg} = 0.3$ mm, $r_{\rm ag} = 0.175$ mm, $\gamma_{\rm sg} = 0.5$, 则 $\gamma_{\rm ag} = 0.29$. 带电粒子从放电室向羽流运动时, 在屏栅孔处需经透过率判断是否通过, 而在加速栅孔处受栅极系统的电场聚焦作用不必再次判断.

虽然采用透过模型后, 满足了几何等效, 但是仍需注意栅极二维模型与三维模型之间的电场差别. 图 4 简述了二维和三维模型下栅极孔的电场分布. 不难发现, 在二维模型中, 带电粒子的速度分量 v_θ 没有受到电场力作用; 而在三维模型中, v_θ 受电场影响. 因此, 本文根据带电粒子与理想聚焦点

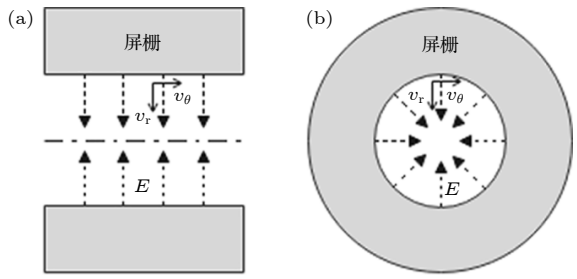

图 4 带电粒子受力分析 (a) 二维模型; (b) 实际情况

Fig. 4. Force analysis of charged particles in aperture: (a)Two-dimensional model; (b)real situation.

的距离, 按比例减小 v_θ, 使带电粒子到达加速栅上表面时有 $v_\theta = 0$, 即完成聚焦. 此时, 三维速度矢量坍塌为二维, 带电粒子在加速栅内的受力与三维模型完全相同.

3.4 计算条件与模拟流程

模拟的气体流量和微波功率均与实验条件相同, 分别为 0.1 sccm 和 0.5 W. 对猝灭现象的复现将在稳态放电 (不施加栅极电压) 的基础上进行, 初始离子和电子密度分布如图 5 所示, 此时没有施加栅极电压. 可以看到, 离子和电子的密度分布都大致相同, 最高密度约为 1×10^{17} m^{-3}. 因为等离子体自身电场的作用, 栅极处弥漫了离子, 几乎没有电子.

对猝灭现象的模拟将仿照实验操作, 按两种方式施加栅极电压. 第一种为连续的电压变化, 用于模拟多次小幅度增大栅极电压的过程中出现的猝灭, 屏栅与加速栅电压组合 $\varphi_{sg}/\varphi_{ag}$ 依次为 0/0 V→300/–50 V → 500/–100 V → 700/–150 V → 1000/–200 V. 第二种为单点的电压变化, 用于模拟单次大幅度增大栅极电压时出现的猝灭, 屏栅与加速栅电压组合 $\varphi_{sg}/\varphi_{ag}$ 分别为 0/0 V→300/–50 V; 0/0 V→500/–100 V; 0/0 V→700/–150 V; 0/0 V→1000/–200 V.

4 模拟结果与讨论

4.1 猝灭机理分析

通过记录放电室内电子宏粒子的数量变化, 可以直观的判断离子源是否发生猝灭, 如图 6 所示. 在正常工作状态下, 增大栅极电压后, 电子和离子受电场作用分别向放电室壁面和天线运动, 它们的数量都会减少. 随后, 在等离子体系统向新平衡过渡的过程中, 电子数量逐步回升. 具体宏观表现为

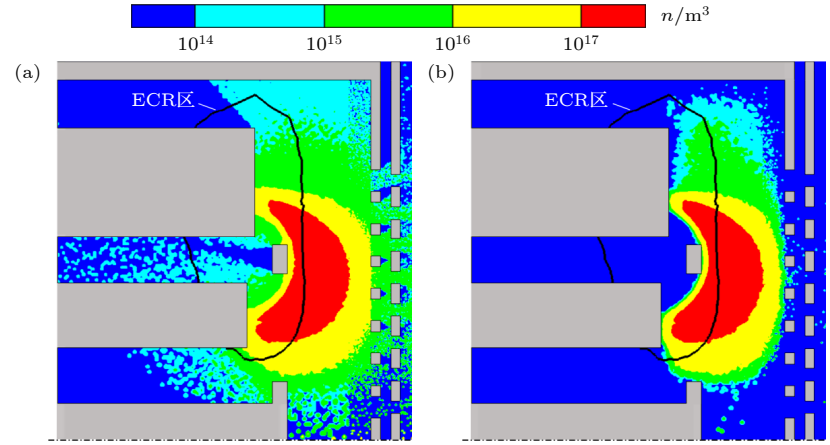

图 5 初始等离子体密度分布 (a) 离子密度分布; (b) 电子密度分布

Fig. 5. Initial plasma density distribution: (a) Ion density distribution; (b) electron density distribution.

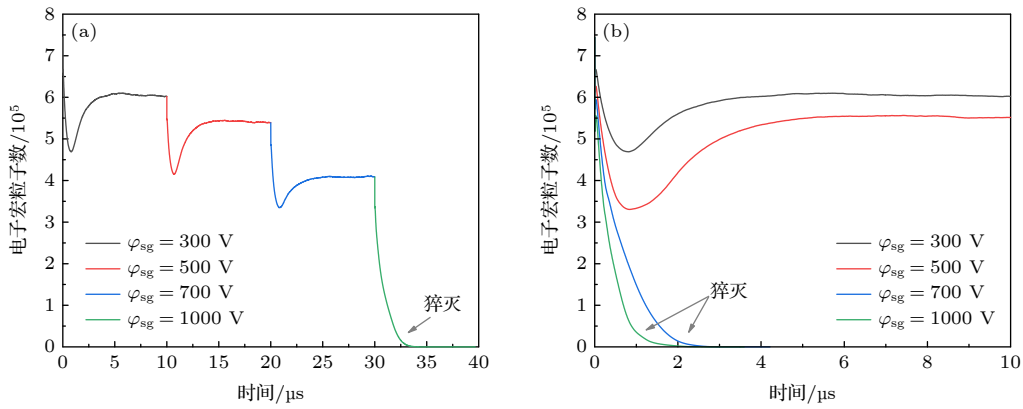

图 6 电子宏粒子数变化曲线 (a) 栅极电压连续变化; (b) 栅极电压单点变化

Fig. 6. Number curves of macroparticle of electron: (a)Voltages of grid system increase continuously; (b)voltages of grid system increase individually.

屏栅电流出现一个电流峰, 随后电流逐步趋于稳定. 在发生猝灭时, 电子和离子数量将持续减少, 直到耗尽. 在栅极电压连续变化的模拟中, 离子源在屏栅电压连续增大到 1000 V 时发生了猝灭; 而在栅极电压单点变化的模拟中, 离子源在屏栅电压为 700 V 和 1000 V 时均发生了猝灭. 栅极电压单点变化时, 离子源发生猝灭的电压较低, 这与实验现象是一致的.

在电路上, 天线是一个孤岛, 它与各部件绝缘, 但又与等离子体直接接触, 这使得它表面会逐渐累积电荷. 当天线不再累积电荷后, 天线在等离子体中处于悬浮电压 $\varphi_{\rm f}$. 增大栅极电压后, 由于 $\varphi_{\rm f} < \varphi_{\rm sg}$, 放电室和天线之间将形成电场, 引起双极扩散, 电子和离子分别向放电室壁面和天线运动. 这使得天线表面迅速的累积电荷并到达新的悬浮电压, 如图 7 所示. 等离子体电势是基于放电室壁面的鞘层建立的, 当屏栅电压变化时, 等离子体电势也会随之变化, 而天线悬浮于主等离子体中, 最终使得 $\varphi_{\rm f} > \varphi_{\rm sg}$. 从图 7 可以看到, 当离子源正常工作时,

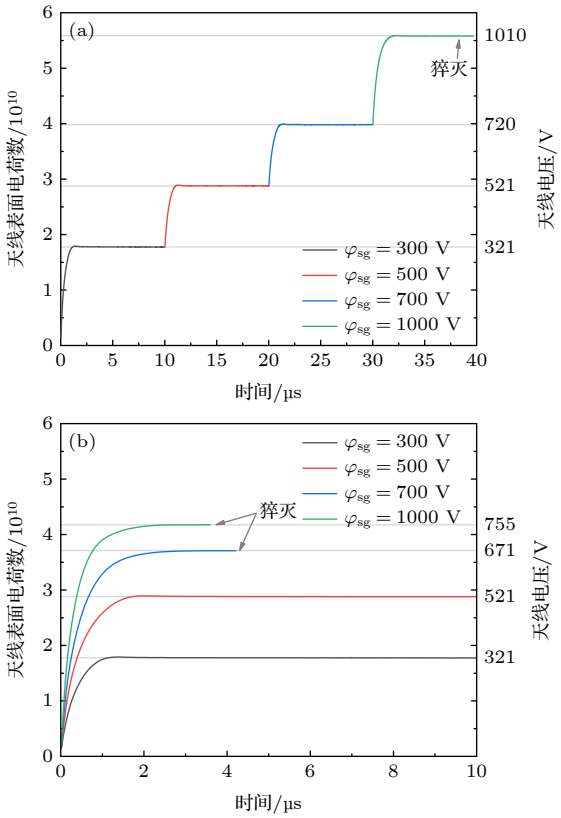

图 7 天线表面累积电荷数 (a) 栅极电压连续变化; (b) 栅极电压单点变化

Fig. 7. Charges accumulating on antenna: (a)Voltages of grid system increase continuously; (b) voltages of grid system increase individually.

无论哪种施加栅极电压的方式, 都有 $\varphi_{\rm f} - \varphi_{\rm sg} \geqslant 20$ V. 通过 PIC 方法, 可以量化天线达到悬浮电位所需要的电荷数. 例如 $\varphi_{\rm sg} = 700$ V 时, 天线达到悬浮电压需要累积正电荷数约为 4×10^{10}, 换算宏粒子数约为 8×10^5. 当栅极电压从 $\varphi_{\rm sg} = 0$ V 到 $\varphi_{\rm sg} = 700$ V 单点变化时, 初始宏粒子数量约为 7.5×10^5, 因此天线无法在双极扩散的过程中到达悬浮电压, 等离子体也随之消亡. 由此可知, 单点增大栅极电压时, 若天线达到悬浮电压需要累积的电荷数大于初始电荷数, 等离子体将在双极扩散中消亡, 离子源猝灭.

与单点增大栅极电压不同, 连续增大栅极电压时, 天线分段累积电荷, 给予了等离子体足够的调整时间. 然而, 离子源还是在 $\varphi_{\rm sg} = 1000$ V 时发生了猝灭, 但值得注意的是, 此时天线电压大于屏栅电压. 这说明有其他因素引起了离子源猝灭. 图 8 描述了栅极电压连续变化至 $\varphi_{\rm sg} = 1000$ V 时, Child-Langmuir 鞘层 [20] 随时间的演化过程. 其中, 粗黑线表示 ECR 区, 磁力线表示磁瓶, 彩色线表示 Child-Langmuir 鞘层边界. 图 7(a) 中, 天线电压到达 1010 V 的时间约为 2 μs. 此时, Child-Langmuir 鞘层在双极扩散过程中已经入侵了磁瓶, 压缩了电子的运动空间, 降低了电子获能效率. 随后, 等离子体密度降低, Child-Langmuir 鞘层继续扩张, 形成恶性循环, 最终等离子体消亡, 离子源猝灭. 由此可知, 连续增大栅极电压时, 双极扩散引起的 Child-Langmuir 鞘层扩张降低了等离子体生成率,

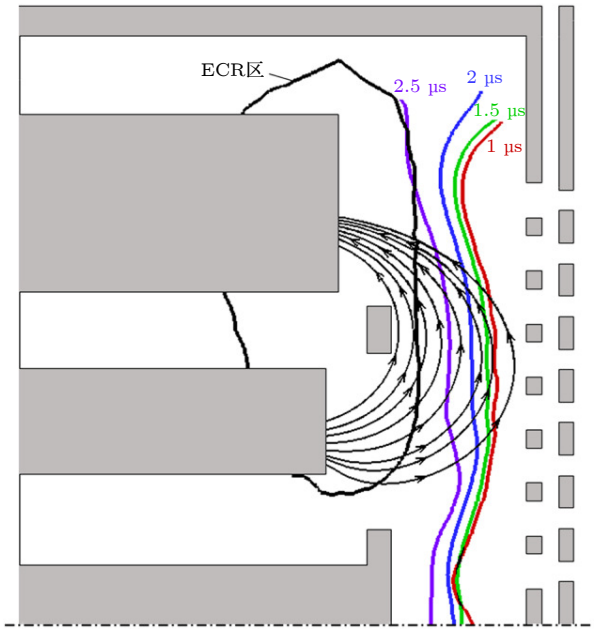

图 8 Child-Langmuir 鞘层边界变化

Fig. 8. Boundary movement of Child-Langmuir sheath.

使放电室内等离子体密度降低, 直到不再能维持放电而猝灭.

另外, 不论离子源是否发生猝灭, Child-Langmuir 鞘层在扩张的过程中会主动吸纳离子, 使得大量的离子涌入栅极系统, 影响了栅极系统的正常聚焦. 具体的宏观表现为加速栅电流瞬时增大.

4.2 改善措施

虽然增大等离子体密度或者规避相应工况后, ECR 离子源不会出现猝灭现象, 但是为了使离子源能在极端状态下满足任务需求, 需要从根本上杜绝猝灭现象. 从 4.2 节的分析中可以发现, 无论哪种调节栅极电压的方式, 放电室和天线之间的双极扩散都是引起猝灭的最根本原因. 因此, 抑制双极扩散将可能改善离子源的猝灭现象. 而最直接的抑制双极扩散的方式就是令天线和放电室等电势[21]. 将天线电压设为栅极电压, 再次模拟 $\varphi_{sg}=700$ V 的单点栅极电压调节. 模拟结果如图 9 所示, 离子源在原本出现猝灭的工况下仍正常工作. 因为抑制了双极扩散后, 等离子体可以平缓的过渡到新平衡. 同理, 连续的栅极电压调节也适用, 减小对主等离子体的干扰可以有效抑制 Child-Langmuir 鞘层扩张. 虽然理论上可行, 但是将来仍需要通过实验验证这一改善措施的可行性.

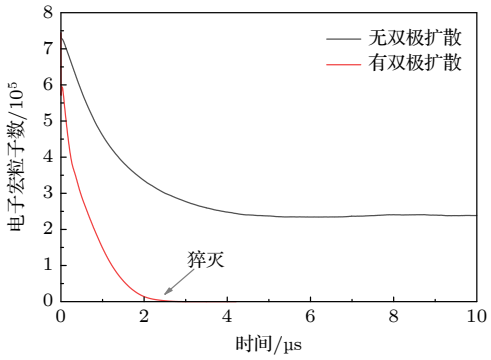

图 9 $\varphi_{sg}=700$ V 时, 离子源内有无双极扩散的模拟结果

Fig. 9. Simulation results with or without ambipolar diffusion in ion source at $\varphi_{sg}=700$ V.

5 结 论

本文对 2 cm ECR 离子源进行了全粒子的一体化模拟, 复现了 2 cm 离子源在极限工况 (0.1 sccm, 0.5 W) 下的猝灭现象. 模拟结果表明, 天线和放电室之间的双极扩散是导致离子源猝灭的根本原因. 单次大幅度增大栅极电压时, 若天线达到新的悬浮电压需要累积的电荷数大于初始电荷数, 等离子体将在双极扩散中消亡, 离子源猝灭. 多次小幅度增大栅极电压时, 双极扩散引起的 Child-Langmuir 鞘层扩张降低了等离子体生成率, 使放电室内等离子体密度降低, 直到离子源无法维持放电而猝灭. 明晰猝灭机理后, 本文提出了天线和屏栅等电势的改进措施, 并通过一体化模拟论证了可行性, 为 2 cm ECR 离子源的设计和应用提供理论依据.

参考文献

[1] Lemmer K 2017 *Acta Astronaut.* **134** 231
[2] Blanco A, Roy S 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 455201
[3] Xu S Y, Xu L X, Cong L X, Li Y G, Qiao C F 2021 *Int. J. Mod. Phys. A* **36** 2140013
[4] Boeuf J P 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 011101
[5] He J W, Duan L, Kang Q 2021 *Int. J. Mod. Phys. A* **36** 2140014
[6] Ma L F, He J W, Yang C, Duan L, Kang Q 2021 *J. Propuls. Tech.* **42** 474 (in Chinese) [马隆飞, 贺建武, 杨超, 段俐, 康琦 2021 推进技术 **42** 474]
[7] Chen C, Chen M L, Zhou H H 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 094009
[8] Jia H W, Chen M L, Liu X H, Chen C, Zhou H H, Zhou H, Han Z C 2021 *Plasma Sci. Technol.* **23** 104003
[9] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2018 *J. Propuls. Power.* **34** 4
[10] Koizumi H, Komurasaki K, Aoyama J, Yamaguchi K 2014 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **12** Tb_19
[11] Hu Z, Yang J, Chen M L, Yu D R, Zhu X M 2020 *J. NorthWest Polytechnical Univ.* **38** 733 (in Chinese) [胡展, 杨涓, 陈茂林, 于达仁, 朱悉铭 2020 西北工业大学学报 **38** 733]
[12] 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)]
[13] Yang J, Fu Y L, Liu X C, Meng H B, Jin Y Z 2018 *Plasma Sci. Technol.* **20** 085402
[14] Xia X, Yang J, Jin Y Z, Hang G R, Fu Y L, Hu Z 2020 *Vacuum* **179** 109517
[15] Xia X, Yang J, Fu Y L, Wu X M, Geng H, Hu Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 075204 (in Chinese) [夏旭, 杨涓, 付瑜亮, 吴先明, 耿海, 胡展 2021 物理学报 **70** 075204]
[16] Fu Y L, Yang J, Jin Y Z, Xia X, Meng H B 2019 *Acta Astronaut.* **164** 387
[17] Fu Y L, Yang J, Geng H, Wu X M, Hu Z 2021 *Vacuum* **184** 109932
[18] Greaves D 2004 *J. Comput. Phys.* **194** 35
[19] Min C, Gibou F, Ceniceros H 2006 *J. Comput. Phys.* **218** 123
[20] Lieberman M A, Lichtenberg A J (translated by Pu Y K) 2007 *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Beijing: Science Press) pp131–132 (in Chinese) [迈克尔 A·力伯曼, 阿伦 J·里登伯格 著 (蒲以康 译) 2007 等离子体放电原理与材料处理 (北京: 科学出版社) 第131—132页]
[21] Ataka Y, Nakagawa Y, Koizumi H, Komurasaki K 2021 *Acta Astronaut.* **187** 133

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

Fu Yu-Liang [1)] Yang Juan [1)†] Wang Bin [2)]
Hu Zhan [2)] Xia Xu [1)] Mu Hao [1)]

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

2) (*Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201203, *China*)

(Received 23 November 2021; revised manuscript received 31 December 2021)

Abstract

A 2-cm electron cyclotron resonance ion source has the advantages of long life and high specific impulse, which can meet the requirements for space gravitational waves detection. In the experiment on finding the lower limit of thrust, it is found that when the ion source operates under the extreme condition of 0.5-W microwave power and 0.1-sccm gas flow rate, increasing the voltages of grid system excessively may cause flameout. The plasma discharge level is controlled by the gas supply, microwave, and power supply system, and their small disturbances will make experimental results different, thus the flameout of the ion source appears randomly and transiently. Besides, it is difficult to observe the flameout phenomenon experimentally, because the probe diagnosis has big interference to low-density plasma, and the optical diagnosis is blocked by the grid system. Therefore, the integrative simulation with the full particle-in-cell method is used to simulate the operating process of the ion source, whose calculation range includes the discharge chamber, grid system, and plume. Through simulating the processes of plasma discharge and ion beam extraction continuously in space and time, the flameout phenomenon can be reproduced artificially after increasing the voltages of grid system. The simulation results show that the ambipolar diffusion between the antenna and discharge chamber is the fundamental reason for the flameout of the ion source. In the circuit, the antenna does not touch the discharge chamber but for bulk plasma, which makes its surface gradually accumulate charges until it reaches the floating potential. Because the increase of the voltage of antenna lags behind that of grid system, a strong electric field will appear between the antenna and chamber. Then, electrons and ions respectively move toward the chamber and antenna, the ambipolar diffusion helps the antenna reach the floating potential rapidly. When the plasma density inside the chamber is low, the ambipolar diffusion will cause flameout. In order to avoid the flameout of the ion source in such an extreme situation, an improvement measure that the voltage of antenna equals the voltage of chamber is proposed, which is verified by the integrative simulation. The study on the flameout phenomenon will provide a theoretical basis for the design and application of the ion source, which can help the ion source operate safely to meet the requirements for space gravitational wave detection.

Keywords: electron cyclotron resonance ion source, particle-in-cell simulation, flameout phenomenon

PACS: 52.50.Sw, 52.65.Rr, 52.65.Pp **DOI:** 10.7498/aps.71.20212151

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2020YFC2201000) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875222).

† Corresponding author. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn