

应用于电推进的碘工质电子回旋共振等离子体源*

李鑫 曾明 刘辉[†] 宁中喜 于达仁

(哈尔滨工业大学, 航天等离子体推进实验室工信部重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2023年5月15日收到; 2023年8月15日收到修改稿)

电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 源具有无需内电极、低气压电离、等离子体密度较高和结构紧凑等优点, 适用于小功率电推进. 因此, 研究小功率碘工质 ECR 等离子体源具有重要意义. 本文首先设计了一套耐腐蚀且可以均衡稳定输出碘蒸汽的储供系统; 然后完成了耐碘腐蚀 ECR 推力器设计, 利用耐腐蚀的同轴谐振腔结构将微波馈送到推力器, 并将通道磁场变为会切型磁场以产生更多 ECR 层; 最终联合点火实验成功, 成为国际上首个可以用于电推进的 ECR 电离碘工质等离子体源. 分析实验和静磁场、微波电场分布发现, 小功率、低流量下的不稳定等离子体羽流闪烁由寻常波电子等离子体共振加热和非寻常波 ECR 加热模式之间的转化引起. 高流量下电离率下降是由电子损失、壁面损失和碘工质电负性导致. 并依据此原理提出了改进方案. 放电后等离子体源没有明显损伤, 说明具备长寿命潜力. 此项工作初步证实了小功率碘工质 ECR 电推进方案可行.

关键词: 电推进, 碘工质, 贮供系统, 电子回旋共振等离子体源**PACS:** 52.75.Di, 52.50.Dg, 52.50.Sw**DOI:** 10.7498/aps.72.20230785

1 引言

近几年, 全世界范围内卫星行业都发生了深刻的变革. 2005 年以来, 随着微纳卫星技术逐渐成熟, 国际上出现大量微纳卫星^[1]. 推广微纳卫星技术的关键因素之一是发展推进系统, 它可以使日益复杂的姿态控制和轨道控制任务成为可能^[2,3]. 电推进比冲比冷气和化学推进的比冲大, 满足小卫星轨道定位和维护的任务需求. 但是电推进使用的传统工质氙气存在一些不足, 主要表现为两个方面: 一个是价格昂贵; 另一个是储存在超临界状态的加压储罐中^[4]. 因此, 研究氙气的替代工质具有重要意义, 替代工质需要满足方便存储、易电离、无毒和价格低廉等要求. 固体碘易于实现高密度存储、价格低廉、易升华. 碘蒸汽以分子形式存在, 解离能非常低, 电离能和原子质量与氙原子大致接

近. 国际上研究发现两种工质放电特性接近^[5-9]. 因此, 碘工质是氙气的优良替代工质, 具有极大的研究价值.

由于碘工质电推进具有一系列优点, 欧美国家纷纷提出了在轨验证计划. 2020 年末, 法国 ThrustMe 公司首次实现碘工质电推进系统在轨实验验证, NPT-30 在 34—66 W 的功率下产生了 0.25—1.25 mN 推力, 并将在轨数据发表在 *Nature* 杂志上^[10]. 意大利商业航天公司研制了 REGULUS 碘工质电推进系统, 采用磁增强等离子体推进器在 50 W 功率下产生了 0.6 mN 推力. REGULUS 集成在 UniSat-7 上, 并于 2021 年 3 月在联盟-2 运载火箭上发射^[11-13]. 美国 NASA, Busek 公司和美国空军研究室实施了用于 12 U 小卫星的 ISAT 项目, 采用 BHT-200 碘霍尔推力器提供 10 mN 左右的推力^[14,15]. Busek 公司研制出碘工质 BIT-3 射频离子推进系统, 在 56—80 W 输入功率下, 产生

* 国家自然科学基金 (批准号: 52376023) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: luiliu@hit.edu.cn

0.66—1.24 mN 推力. 该系统应用在 6 U 立方体卫星项目, 搭载于 NASA SLS EM-1, 并于 2022 年 11 月发射上天^[16]. 中国纳飞公司研制的碘工质射频离子电推进系统在 2022 年 2 月成功入轨, 实现了 0.3—12 mN 推力范围覆盖^[17]. 当前研究的推力器推力主要在 mN 量级, 缺少微纳卫星需要的 μN 级推力器. 基于碘工质微牛级电推力器日益迫切的需求, 需要针对性开展工作, 设计合理的碘工质等离子体放电装置, 验证方案可行性, 解决当前缺少小功率低成本微纳卫星推进系统的问题. 现有可以产生碘等离子体的装置主要有激光诱导碘等离子体源、碘辉光放电灯、碘射频感性耦合等离子体源、碘埃文森微波谐振腔等^[18-21]. 电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 等离子体源以其无需内电极、低气压电离、等离子体密度较高和结构紧凑等优点广泛应用于电推进装置中^[22-24]. 因此, ECR 放电技术适用于 μN 级推进, 但未见小功率碘工质 ECR 等离子体源报道.

ECR 等离子体源种类有很多, 主要以氙气、氩气、氨气和水等作为工质, 因此很多结构不耐碘腐蚀. 4 种典型结构如图 1 所示, 图 1(a) 的变

压、闭腔碘微波放电灯是一种埃文森微波谐振腔^[25]; 图 1(b) 中, 大气压微波等离子体炬是圆柱形和同轴谐振腔的组合^[26]; 图 1(c) 中 μI 型 ECR 放电腔为内径 20 mm 的圆柱形. 推力器底部装有两个环形永磁体, 产生 4.20 GHz ECR 所需的 0.15 T 磁场区域, 并形成抑制电子损失的磁镜. 推力器工作时将微波功率注入腔室产生等离子体, 等离子体阻抗与设计的微波传输网路阻抗接近, 不需另外安装匹配器^[27].

图 1(d) 是 ONERA 开发的一种磁喷嘴 ECR 推力器 (electron cyclotron resonance thruster developed at ONERA, ECRA). 2.45 GHz 微波通过同轴线注入, 同轴线终点是一个开放的同轴腔. 推进剂被注入到这个腔中, 并被微波功率电离. 所需磁场由位于腔体后部的环形永磁体产生, 2.45 GHz ECR 层位于腔内^[28]. 综合来看, 谐振腔结构导致碘只与耐腐蚀材料接触, 增强等离子体源耐腐蚀性. 会切型磁场可以控制等离子体空间分布, 减少结构材料溅射并形成 ECR 层以促进电离. 因此, 应用于电推进的碘工质 ECR 等离子体源需要在谐振腔结构和会切型磁场基础上开展设计.

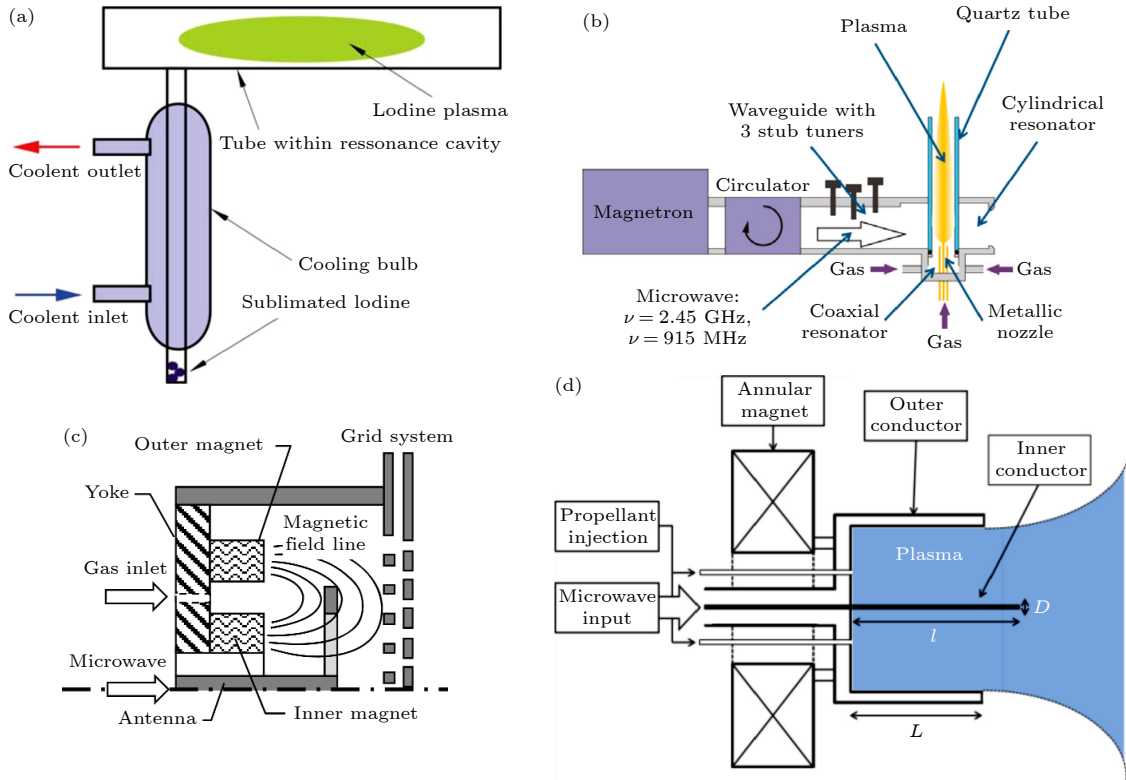


图 1 微波等离子体源原理图^[25-28]: (a) 埃文森微波谐振腔; (b) 常压微波等离子体炬; (c) μI 微型离子束源; (d) ECRA 推进器
 Fig. 1. Schematic diagram of the microwave plasma source^[25-28]: (a) Evanson microwave resonant cavity; (b) atmospheric pressure microwave plasma torches; (c) μI miniature ion beam source; (d) ECRA thruster.

等离子体源的设计基于当前技术相对成熟的 ECRA 推力器, 采用会切型磁场和有利于低功率击穿的谐振腔结构以适应小功率工况. 储供系统采用多孔碳化硅材料提高碘块的导热性, 实现更均匀的温度分布和更快的启动时间, 并且改进流量标定方法, 提升流量数据精度. 实验结果表明, 碘工质储供系统具备均衡稳定的输出特定流量碘蒸汽的能力, 在国际上首次实现应用于电推进的碘工质 ECR 等离子体源放电, 并得到低流量和高流量下放电不稳定原因. 另外, 谐振腔结构提高了等离子体源耐腐蚀性, 延长了寿命. 第 2 节介绍碘工质等离子体源及储供系统的设计; 第 3 节介绍真空罐和探针等实验装置; 第 4 节介绍结果并讨论; 第 5 节是结论.

2 电推进系统

小功率碘工质谐振腔 ECR 等离子体源由去掉阳极的低功率会切场推力器和同轴谐振器组成, 同轴谐振器与推力器底部的放电通道连接, 如图 2 所示. 低功率会切场推力器通道直径为 6 mm, 长度为 15 mm. 会切型磁场由两块磁铁产生, 一块为内径、外径和高分别为 8, 16 和 4 mm 的空心圆柱. 另一块是外径和高分别为 16 mm 和 8 mm 的变内径空心圆柱. 内芯斜面一端内径为 8 mm, 另一端

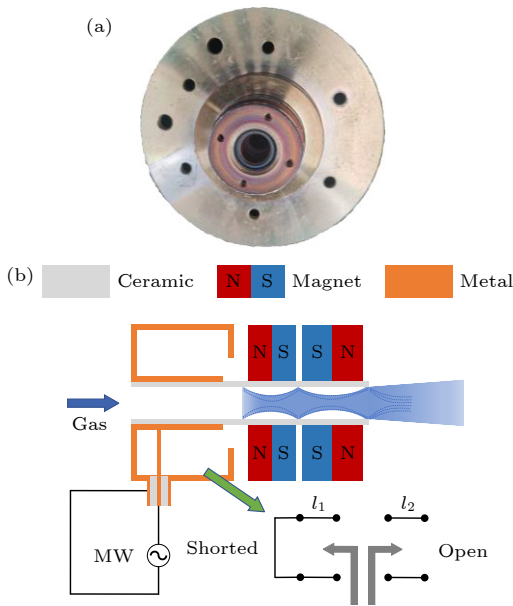


图 2 ECR 等离子体源实物图 (a) 及原理图 (b)

Fig. 2. Photo of microwave plasma source (a) and schematic diagram (b).

为 11 mm. 采用居里温度为 250 °C 的 SmCo 磁体, 保证放电稳定性. 由 FEMM 计算得到的磁感应强度分布及拓扑如图 3 所示. 会切磁场的横向磁场具有降低带电粒子运输的约束作用, 减少了等离子体壁损失. 在通道中心附近和通道进出口两端出现多个磁感应强度为 0.0875 T 的区域, 形成 ECR 层以促进小功率工况放电. 同时, 在通道出口外形成典型的磁喷嘴, 陶瓷通道有一定倾角以匹配磁喷嘴. 选用微波频率 2.45 GHz 的同轴谐振器, 并使用了 SMA 连接器来接收来自同轴传输线的微波. 谐振腔一端短路, 另一端开路, 空腔的长度是 1/4 波长的奇数 (本文中 $\lambda/4$). 1/4 波长谐振腔内部空间为中空梯形圆柱, 下底直径为 20 mm, 上底直径为 13.1 mm, 中空内芯直径为 7.2 mm, 高为 26.8 mm. 谐振器的输入阻抗 Z_{in} 取决于输入端口的的位置, 由短路传输线和开路传输线的并联阻抗:

$$Z_{in} = Z_1 \parallel Z_2 = Z_0 \left[\frac{1}{\tanh(jkl_1)} + \tanh(jkl_2) \right]^{-1} \approx Z_0 \left\{ \left(\frac{\alpha l_1}{\sin^2(\beta l_1)} + \frac{\alpha l_2}{\cos^2(\beta l_2)} \right) + j[-\cot(\beta l_1) + \tan(\beta l_2)] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

其中, Z_0 为同轴传输线的特性阻抗, j 为虚数, l_1 为供给点到短路端口的距离, l_2 为从供给点到开口处的距离, α 为衰减常数, $\beta = 2\pi/\lambda$ 是同轴线的相位常数, $k = \beta - j\alpha$ 为复传播常数或波数. 本文中, l_1 , l_2 分别为 6.8 mm 和 20 mm.

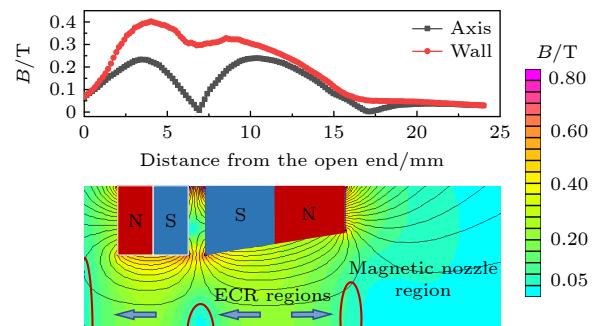


图 3 等离子体源磁感应强度分布

Fig. 3. Magnetic induction intensity distribution of plasma source.

当微波功率为 16 W、频率为 2.45 GHz 时, 由 COMSOL 计算的放电腔微波电场和磁感应强度分布如图 4 所示. 由图 4 中 ECR 层处微波电场垂直分量 (E_{\perp}) 分布结果可知, 强电场区域刚好与会切

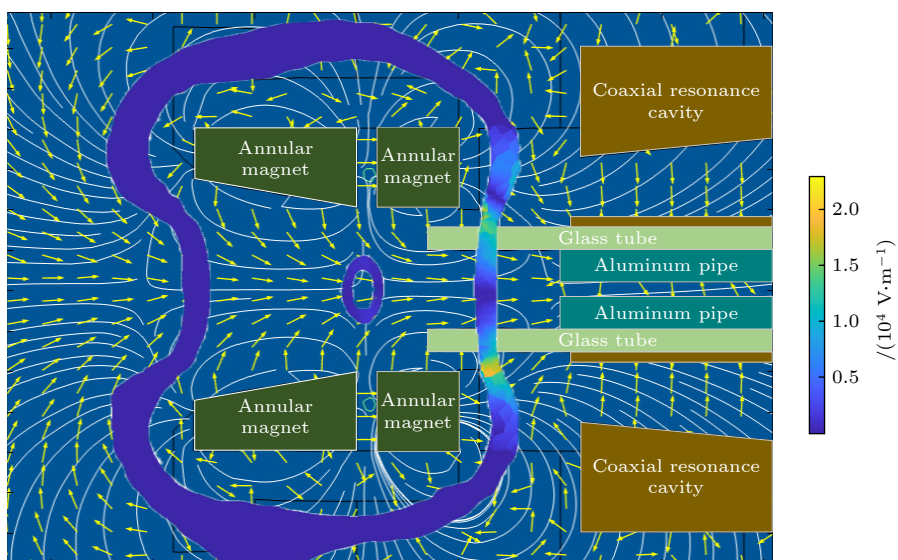


图 4 ECR 层中微波电场垂直分量 (E_{\perp}) 的分布图. 图中白线表示磁场线, 黄色箭头表示微波电场线

Fig. 4. Distribution diagram of microwave electric field vertical component (E_{\perp}) in ECR layer. The white lines represent magnetic field lines and the yellow arrows represent microwave electric field lines.

场通道入口端 0.0875 T 磁场强度区域相交, 通道中存在约 15000 V/m 的微波电场垂直分量, 因此是击穿、低功率放电的电子加热区. 微波电场与磁场方向夹角为锐角, 存在寻常波 (ordinary wave, O 波) 和非寻常波 (extraordinary wave, X 波), 从而会导致放电模式转变^[29]. 本文也将在第 4 节结合实验结果针对此问题进行分析. 调整腔体的几何设计实现在所有工况下反射微波功率在 1.5 W 以内, 传输线的微波功率传输效率约为 67.8%^[30]. 在采用共振腔结构时, 天线不与碘接触, 由此解决了腐蚀问题.

碘工质 ECR 等离子体源无法单独工作, 需要配备一个可以稳定输出特定流量的碘工质贮供系统. 因此, 碘工质等离子体源系统由小功率碘工质谐振腔 ECR 等离子体源和碘工质贮供系统两部分组成, 如图 5 所示. 碘工质贮供系统的主要作用是提供均衡稳定的高精度碘蒸气流量, 如图 6 所示. 工作原理是通过控制碘罐以及节流装置温度控制碘单质的升华, 从而实现流量控制. 1U 碘罐具有单独加热器实现精确独立温控, 同时配备 3 个测温点实时监控碘罐温度分布, 便于后续优化设计. 碘罐内部导热材料选用耐碘腐蚀、导热性高、孔隙率大并且强度适中的 95% 孔隙率多孔碳化硅材料. 碘罐上面的压力传感器测量碘罐内压力, 通过温度以及压力明确碘蒸气状态, 从而作为流量控制的反馈型号去调节流量. 电磁阀主要用于紧急开闭以及

防止碘工质泄露, 过滤器清除杂质, 流量监测部分检测流量. 由于这 3 个部件对流量影响不大, 不需要精确温控, 只需温度高于碘罐 10 °C 左右以避免碘冷凝沉积. 节流装置单独温控, 通过控制气体黏度实现流量精细控制. 压力测量装置、电磁阀、过滤装置均采用耐腐蚀材料. 加热器件选用聚酰亚胺加热膜, 测温器件采用热电偶, 温度控制采用 PID 控制器.

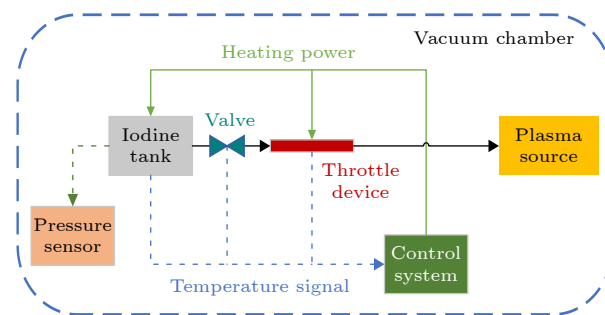


图 5 碘等离子体源系统示意图

Fig. 5. Diagram of iodine plasma source system.

3 实验装置

考虑到碘工质具有常温易沉积和腐蚀性强的特性, 针对这两点开展真空系统设计. 真空罐内径 400 mm, 长度 800 mm, 侧面采用耐腐蚀的石英玻璃. 抽气系统为扩散泵和机械泵组合抽气, 真空度可以达到 10^{-3} Pa, 如图 7 所示.

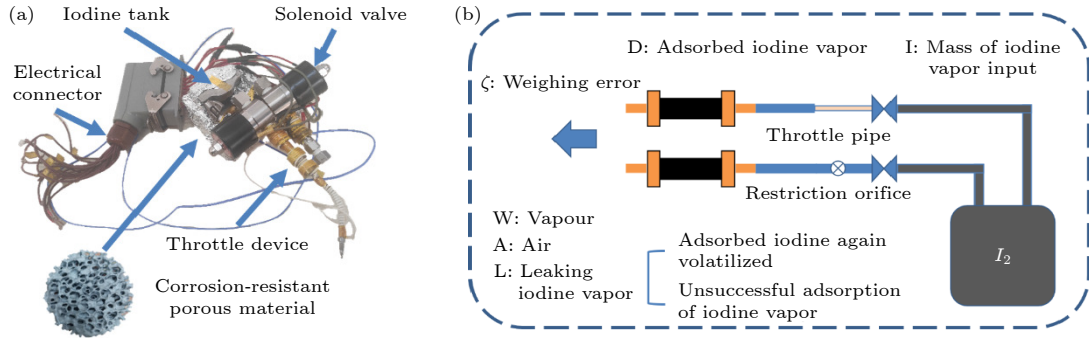


图 6 碘工质贮供系统实物图 (a) 和流量标定示意图 (b)

Fig. 6. Physical picture of iodine feed system (a) and schematic diagram of flow calibration (b).

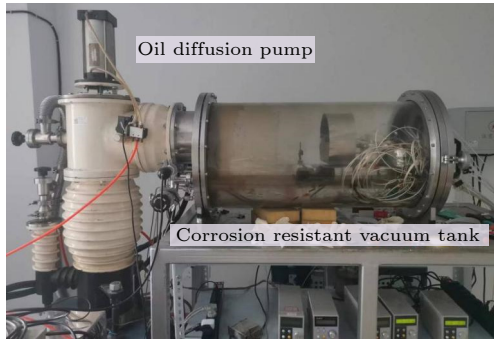


图 7 耐碘腐蚀真空试验平台

Fig. 7. Iodine corrosion resistance vacuum test platform.

碘蒸气具有强腐蚀和易沉积的特点. 因此常用的分子泵不适合, 碘会沉积在管道以及叶片上, 脱落的碘粉末颗粒会对叶片造成很大的损伤, 甚至无法工作. 扩散泵具有特殊的抽气原理, 碘可以溶于扩散泵油, 腐蚀和沉积的特性不会对性能产生巨大的影响. 综合分析成本、性能和安全性发现油扩散泵是目前最佳选择. 根据真空罐尺寸以及真空度要求, 扩散泵选择了 KT 盘铜管泵, 型号 K-200T.

一些电气参数, 包括探针收集到的离子电流, 储供各部位加热电流, 加热电压, 温度参数等, 由 YOKOGAWA DL350 scope corder 录波仪和温度记录仪 (GRAPHTEC midi logger GL840) 测量. 供电系统由一个 2.45 GHz 微波电源提供微波, 3 个 50 V/10 A Rainworm DC power supply 提供偏置电压, 一个 Kingrang KR-1000-01 1000 V/0.1 A 可编程线性直流电源. LDC-0000/3000-025-NM-V30 负载负责吸收反射功率, 搭配环绕器保证反射功率都流入负载而不是电源. Guan ge communication QOH-30-2.45/4.25-N 耦合器的耦合度是 30 dB. 100 mW 量程的 Ys11801 功率计接在耦合器的耦合端口上, 读取功率计示数再乘以 1000 可

以得到耦合器输出端口的功率.

采用法拉第探针和阻滞电势分析器 (RPA) 探针对于羽流进行了测量. 法拉第探针的屏蔽外壳与离子接收端面齐平, 二者间隙小于此处等离子体的德拜长度. 由于具有相同的负偏置电压, 屏蔽外壳能够有效屏蔽接收极侧面的离子电流. 因此探针对于离子电流的有效接收面积为探针内芯离子接收端面的面积. 为了得到足够大的接收极电流, 在外电路中接入 198 k Ω 的电阻, 通过测量采样电阻两端电压信号计算电流. 法拉第探针可以在羽流区沿预定轨迹运动, 得到羽流区的离子电流密度分布. RPA 探针包含 4 层栅网: 第 1 层栅网处于悬浮状态, 其作用是降低等离子体振荡, 保持探针对离子电流的稳定接收; 第 2 层栅网处于负偏置状态, 它能够阻挡电子通过栅极, 只允许离子进入探针接收通道; 第 3 层栅网为离子阻滞栅, 偏置电压设置为从 0 V 线性增大到 1.3 倍阳极电压, 作用是滤除低于栅极电势对应能量的离子; 第 4 层栅网与第 2 层栅网处于同一负偏置状态, 其作用是消除二次电子给收集电流带来的干扰. 通过接收极的伏安特性曲线可得到离子能量分布的信息. 它们安装在 15 cm 长的摆臂上, 都有直径为 5 mm 的收集器. 两个探头的偏置电压为 -30 V. 图 8 为探头诊断电路和探头位置示意图. 等离子体源的工质利用率为

$$\eta_m = M_i I_i / (e \dot{m}_a), \quad (2)$$

其中, M_i 是离子质量, e 是电子电荷, \dot{m}_a 是质量流率. I_i 是总离子电流:

$$I_i = \pi R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j(\theta) |\sin(\theta)| d\theta, \quad (3)$$

其中, R 是摆臂长度, θ 是与推力器轴的角度, $j(\theta)$ 是离子电流密度分布函数, 这是用法拉第探头测量的等离子体参数.

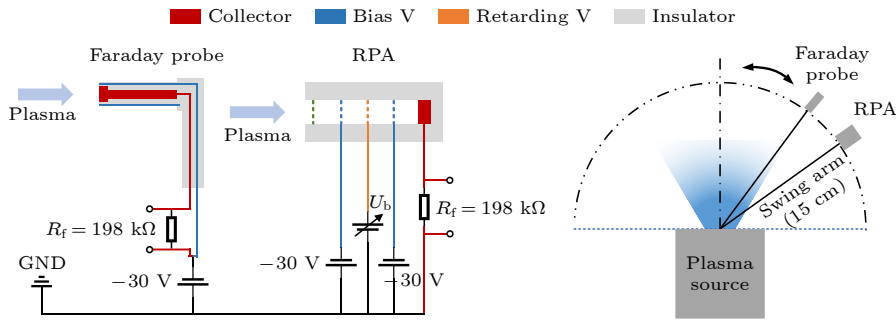


图 8 探针诊断电路和探针位置示意图, 其中包括法拉第探针和 RPA

Fig. 8. Probe diagnostic circuits and schematic view of the probe positions, including a Faraday probe and RPA.

4 结果与讨论

推力器成功点火的前提是具备可以输出特定稳定流量的贮供系统. 首先对贮供系统的传热特性进行实验研究, 然后开展流量标定实验, 分析误差来源. 通过逐步迭代, 最终得到符合实验需求的流量参数范围. 在加热实验时加热片温度在 100—200 °C 范围内波动, 但碘罐各关键部位能快速达到设定温度. 加热 45 min 各关键部位均达到设定 100 °C, 达到常用的 60 °C 仅需 20 min, 并且温度达到平衡后控温点温度波动小于 0.3 °C, 其余部位温度波动均在 2 °C 以内. 实验验证发现, 这些局部温度差异导致的流量变化可以忽略不计. 标定方案优化后, 质量流量误差控制在 5% 以内. 图 9 给出了依据实验数据拟合出来的碘罐温度与质量流量关系拟合曲线.

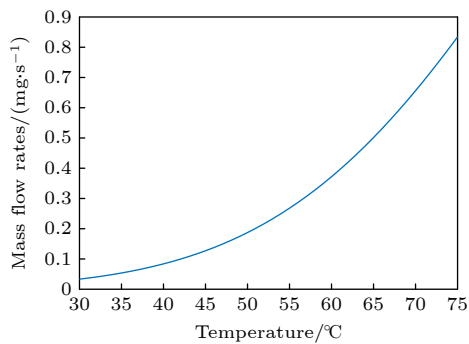


图 9 碘罐温度与质量流量关系拟合曲线

Fig. 9. Iodine tank temperature and mass flow fitting curve.

运用研制好的碘工质贮供系统与碘 ECR 等离子体源开展耦合放电实验. 等离子体源成功点火, 在国际上首次实现了应用于电推进的碘工质 ECR 等离子体源放电, 验证了碘工质 ECR 电推进的可行性, 推力器放电照片如图 10 所示. 在此基础上,

探究了推力器的点火范围, 并对等离子体源的电离加速特性进行研究.

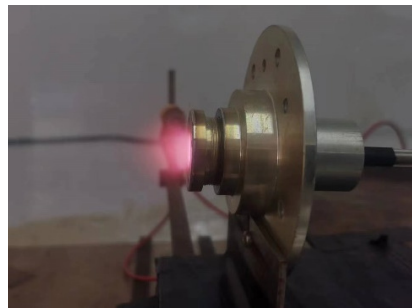


图 10 碘工质 ECR 等离子体源放电图像

Fig. 10. Image of iodine propellant microwave plasma source discharge.

在碘工质放电实验探究中, 可变参数主要是质量流量和微波功率. 在变流量实验中发现, 碘罐温度低于 65 °C (对应 0.52 mg/s) 时羽流闪烁, 即放电不稳定. 而碘罐温度高于 75 °C (对应 0.82 mg/s) 时推力器性能急剧下降. 在变功率实验中发现, 微波功率低于 6 W 会导致放电不稳定甚至熄火, 高于 10 W 微波导线和推力器过热. 因此, 选择的实验研究参数区间为碘质量流量 0.52—0.82 mg/s、微波功率 6—10 W. 从图 4 磁场线 (白线) 和微波电场线 (黄色箭头) 分布可以看出, 大部分区域微波电场与磁场方向夹角为锐角, 因此同时存在 O 波电子等离子体共振加热和 X 波 ECR 加热两种模式^[29]. 在低流量、低功率下, 通道中心部位微波电场与外磁场平行的分量较大, 等离子体主要由 O 波激发. 当等离子体密度到达 O 波截止密度时, 会产生 O 波电子等离子体共振层. 电子加热及微波功率吸收在电子等离子体共振层中均获得局部增强, 因此微波电场在该共振层中快速衰减, X 波对应电离占比下降. 局部增强的电子加热和微

波功率吸收也导致共振层气体工质温度上升, 中性粒子密度降低, 等离子体密度降低. 当等离子体密度低于 O 波截止密度时, X 波对应电离占比再次提升, 等离子体密度增加, 羽流变亮. 振荡过程中微波电源增益不变, 气体温度、等离子体密度和等离子体阻抗变化, 微波功率变化. 法拉第探针与等离子体源轴线夹角为 0° 时, 收集到的离子电流密度振荡频率为 50 Hz, 如图 11(a) 所示. 羽流闪烁过程的图像如图 11(b) 所示, 羽流大小和明亮程度都在周期性变化. 在高流量下, 闪烁消失是因为流量增大, 气压升高, 电子-中性粒子碰撞频率增大, O 波吸收增加, 但 X 波吸收减弱, 放电由 O 波放电主导, 放电由此稳定.

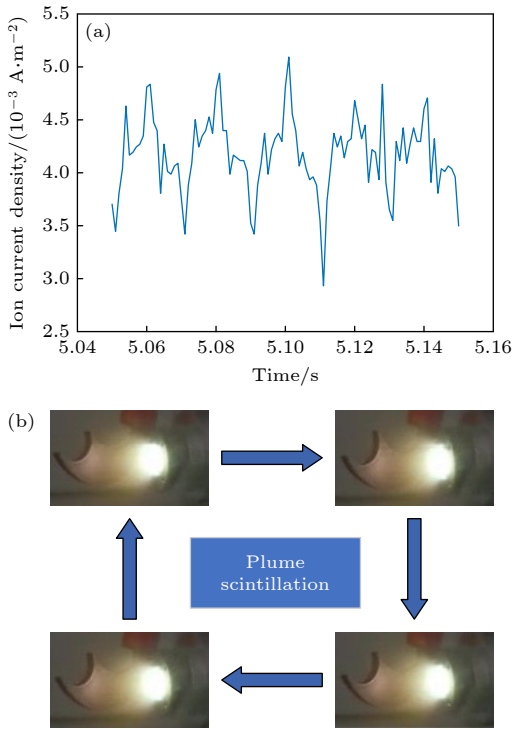


图 11 在低流量低功率下, 等离子体源羽流闪烁过程 (a) 离子电流密度随时间变化; (b) 羽流闪烁过程的图像
Fig. 11. Plasma source plume scintillation process at low flow and low power: (a) Change of ion current density with time; (b) image of plume scintillation process.

为探究等离子体源的电离特性, 选择在微波功率 10 W 下开展变流量实验. 观察图 12 离子电流密度分布数据发现, 随着流量增加, 离子电流密度峰值越来越小, 各个角度下的离子电流密度也变小. 因此, 随着流量增大, 离子电流密度分布更加均匀的同时各角度数值也变小. 由图 13 流量与工质利用率关系可知, 随着流量从 0.52 mg/s 增加到

0.82 mg/s, 工质利用率从 5.2% 降到了 0.8%. 两组数据均说明随着流量增大, 碘工质电离率越来越低, 其原因主要有以下 3 点. 1) 随着流量的增大, 电子密度升高, 电子加热区靠近壁面. 从而电子损失增大, 等离子体产生效率降低. 2) 流量过大时, 电子与内壁面的碰撞损失会显著增加. 在强碰撞条件下, 带电粒子横越磁场的输运系数增大, 造成了高壁损失. 壁面损失的能量并未用来电离中性气体, 最终导致电离率下降. 3) 碘是双原子分子并存在电负性, 因此大流量下气压增大, 电子温度降低, 电子附着反应速率增高, 并且电离和加速过程中碘易发生离解和复合影响电离加速过程.

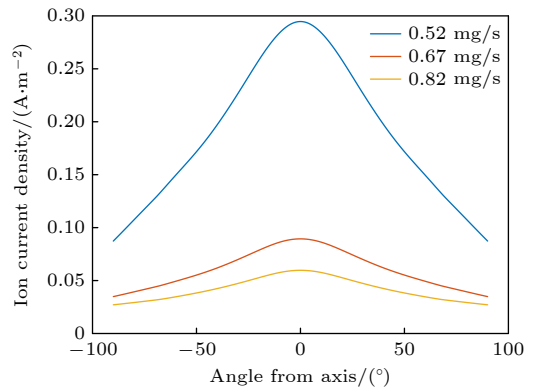


图 12 离子电流密度分布

Fig. 12. Ion current density distribution.

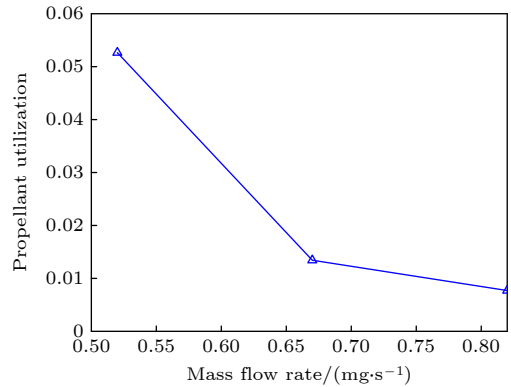


图 13 工质利用率

Fig. 13. Utilization rate of propellant.

为探究等离子体源加速特性, 选择在微波功率 10 W 下开展变流量对比实验. RPA 置于等离子体源轴线上测量, 得到离子能量分布 (图 14), 并且在流量 0.52 mg/s 下开展变微波功率实验, 得到离子能量分布 (图 15). 分析数据发现, 改变流量和微波功率对离子能量分布影响不大, 离子能量分布

峰值在 18—24 eV 之间. 对比发现, 碘离子能量峰值远低于 ONERA 的 ECRA 的离子加速结果. 原因是高气压下会切场入口端的 O 波截止层吸收微波, 减少从谐振腔传播到会切型磁场 ECR 区域的微波, 从而导致会切场区域 ECR 层电离很弱, O 波电子等离子体共振加热占据主导地位. 后续研究将重新设计结构, 减少 O 波截止层对放电的影响, 导致放电主要由 ECR 维持.

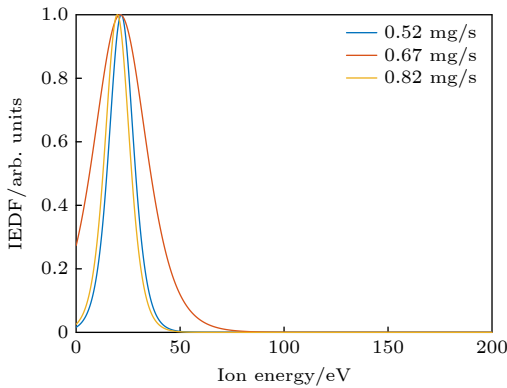


图 14 不同流量下的离子能量分布
Fig. 14. Ion energy distribution at different flow rates.

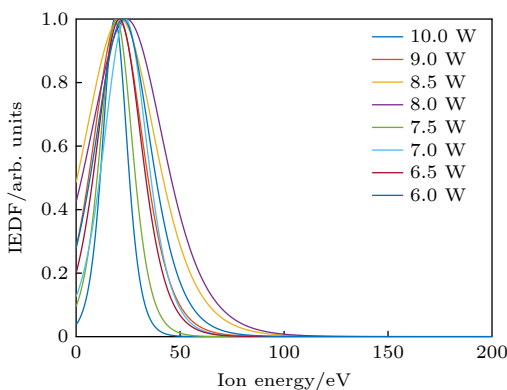


图 15 不同功率下的离子能量分布
Fig. 15. Ion energy distribution at different power levels.

为获得全面的离子能量分布特性, 对 RPA 探针与推力器出口夹角 0° — 90° 范围内开展间隔 5° 的测量. 在微波功率为 10 W、流量为 0.52 mg/s 的情况下, 得到 0° — 90° 内的时间平均离子能量角分布如图 16 所示. 分析实验数据发现, 离子能量分布峰值在 25 eV 左右. 这种现象是由磁喷嘴在通道出口处加速离子产生的. 原理是当上游产生的等离子体在下游磁性喷嘴区域膨胀时, 会形成双极性电场, 确保正离子和电子的等量电流离开推力器, 这些电场加速离子产生推力. 另外, 观察数据发现羽

流区很大的角度范围内均存在高能离子, 并且实际放电图像显示等离子体源在碘工质条件下的羽流是个椭球形. 因此磁喷嘴在碘工质下的聚焦效果不好, 将来需要提升束流效果以满足电推进设计需求.

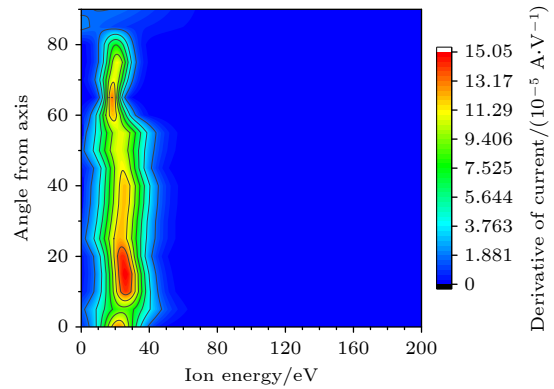


图 16 在微波功率为 10 W、质量流量为 0.52 mg/s 的条件下, 0° — 90° 内的时间平均离子能量角分布
Fig. 16. Contour maps of the time-averaged ion energy angle distribution from 0 to 90° with a 10 W MW power, and 0.52 mg/s mass flow rate.

谐振腔和会切型磁场的搭配设计导致碘与天线等易被腐蚀部件隔绝, 并且减少了等离子体与推力器壁面之间的碰撞, 从而大大延长了推力器的寿命. 经过累计 20 h 的放电实验后, 发现推力器没有明显损伤. 因此碘工质等离子体源具有很大的研究价值, 将来有望研制出适用于微纳卫星的小功率碘工质 ECR 电推进系统.

5 结 论

本文首次实现电推进等离子体源利用 ECR 电离碘工质, 证实了小功率碘工质 ECR 电推进系统的可行性. 微波通过同轴谐振腔引入通道, 促进了碘工质点火的同时也提高了耐腐蚀性. 会切型磁场扩大了 ECR 区域, 导致微波被更加充分地吸收. 储供系统采用多孔碳化硅促进碘块导热, 并优化了标定方法提升了流量精度. 进行了储供系统的传热和标定实验, 并对等离子体源的羽流进行了诊断, 得出了以下结论.

1) 碘罐内填充碳化硅多孔材料后, 不添加碘工质的情况下 20 min 就可以达到 60°C , 并且各部位温度分布相对均匀. 标定方案优化后, 质量流量误差控制在 5% 以内.

2) 放电区间探究实验发现, 碘质量流量 0.52—

0.82 mg/s、微波功率 6—10 W 的范围内等离子体源可以稳定放电. 小功率低流量下羽流闪烁是由寻常波电子等离子体共振加热和非寻常波 ECR 加热模式之间的转化引起. 高流量下性能变差是由电子损失、壁面损失和碘工质电负性引起. 后续研究应着重于减少 O 波截止层对放电的影响, 使放电主要由 ECR 维持.

3) 同轴谐振腔和会切型磁场搭配的设计, 导致碘蒸气全程只与石英玻璃管和陶瓷通道接触, 从而能保护铜制天线、永磁铁和不锈钢等易被腐蚀材料. 经过累计 20 h 的放电实验后, 发现推力器没有明显损伤.

综上所述, 小功率碘工质 ECR 电推进方案是可行的. 为了改善电离加速特性以及寿命, 我们将在未来的工作中对磁拓扑结构、几何参数和谐振腔结构进行优化.

参考文献

- [1] Heidt H, Puig-Suari J, Moore A S, Nakasuka S, Twigg R J 2000 *Proceedings of the 14th Annual/USU Conference on Small Satellites* Logan, August 21–24, 2000 SSC00-V-5
- [2] Xu L L, Cai M H, Yang T, Han J W 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 165203 (in Chinese) [许亮亮, 蔡明辉, 杨涛, 韩建伟 2020 物理学报 **69** 165203]
- [3] Poghosyan A, Golkar A 2017 *Prog. Aero. Sci.* **88** 59
- [4] Tsay M, Model J, Barcroft C, Frongillo J, Zwahlen J, Feng C 2017 *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference* Atlanta, USA, October 8–12, 2017 IEPC-2017-264
- [5] Hillier A, Branam R, Huffinan R, Szabo J, Paintal S 2011 *Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* Orlando, Florida, January 4–7, 2011 AIAA-2011-524
- [6] Dankanich J W, Calvert D, Kamhawi H, Hickman T, Szabo J, Byrne L 2015 *Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference* Kobe-Hyogo, July 4–10, 2015 IEPC-2015-303
- [7] Polzin K A, Seixal J F, Mauro S L, Burt A O, Martinez A, Martin A K 2017 *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference* Atlanta, Georgia, October 8–12, 2017 IEPC-2017-11
- [8] Szabo J, Robin M, Paintal S, Pote B, Hraby V, Freeman C 2013 *Proceedings of the 33th International Electric Propulsion Conference* Washington, D. C., October 6–10, 2013 IEPC-2013-311
- [9] Tsay M, Frongillo J, Hohman K 2015 *Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference* Hyogo-Kobe, July 4–10, 2015 IEPC-2015-273
- [10] Rafalskiy D, Martínez J M, Habl L, Rossi E Z, Proynov P, Boré A, Baret T, Poyet A, Lafleur T, Dudin S, Aanesland A 2021 *Nature* **599** 411
- [11] Manente M, Trezzolani F, Mantellato R, Scalzi D, Schiavon A, Souhair N, Duzzi M, Barato F, Cappellini L, Barbato A, Paulon D, Selmo A, Bellomo N, Gloder A, Toson E, Minute M, Magarotto M, Pavarin D 2019 *Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference* Vienna, September 15–20, 2019 IEPC-2019-417
- [12] Manente M, Trezzolani F, Mantellato R, Scalzi D, Schiavon A, Cappellini L, Barato F, Bellomo N, Gloder A, Toson E, Minute M, Vallisari D, Magarotto M, Pavarin D 2019 *Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference* Vienna, September 15–20, 2019 IEPC-2019-419
- [13] Bellomo N, Magarotto M, Manente M, Trezzolani F, Mantellato R, Cappellini L, Paulon D, Selmo A, Scalzi D, Minute M, Duzzi M, Barbato A, Schiavon A, Fede S D, Souhair N, Carlo P D, Barato F, Milza F, Toson E, Pavarin D 2022 *CEAS Space J.* **14** 79
- [14] Szabo J, Pote B, Paintal S, Robin M, Hillier A, Branam R D, Huffinan R E 2012 *J. Propul. Power* **28** 848
- [15] Dankanich J W, Szabo J, Pote B, Oleson S, Kamhawi H 2014 *Proceedings of the 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Cleveland, July 28–30, 2014 AIAA-2014-3905
- [16] Tsay M, Frongillo J, Hohman K, Malphrus B K 2015 *Proceedings of the 29th AIAA/USU Conference on Small Satellites* Logan, August 9, 2015 SSC15-XI-1
- [17] Yang J H, Jia S X, Zhang Z H, Zhang X H, Jin T, Li L, Cai Y, Cai J 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 094006
- [18] Shen Y J 2010 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [申英杰 2010 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [19] Shuaibov A K, Grabovaya I A, Gomoki Z T, Kalyuzhnaya A G, Shchedrin A I 2009 *Tech. Phys.* **54** 1819
- [20] Matsutani A, Ohtsuki H, Koyama F 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** L576
- [21] Fehsenfeld F C, Evanson K M, Broida H P 1965 *Rev. Sci. Instrum.* **36** 294
- [22] Hawley M C, Asmussen J, Filpus J W, Whitehair S, Hoekstra C, Morin T J, Chapman R 1989 *J. Propul. Power* **5** 703
- [23] Agnihotri A N, Kelkar A H, Kasthurirangan S, Thulasiram K V, Desai C A, Fernandez W A, Tribedi L C 2011 *Phys. Scr.* **T144** 014038
- [24] Biri S, Rácz R, Pálincás J 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 02A341
- [25] Hargus W A, Lubkeman J S, Remy K E, Gonzales A E 2012 *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* Atlanta, Georgia, July 30–August 1, 2012 AIAA-2012-4316
- [26] Leins M, Kopecki J, Gaiser S, Schulz A, Walker M, Schumacher U, Stroth U, Hirth T 2014 *Contrib. Plasma Phys.* **54** 14
- [27] Koizumi H, Kuninaka H 2011 *Proceedings of the 32nd International Electric Propulsion Conference* Wiesbaden, September 11–15, 2011 IEPC-2011-297
- [28] Désangles V, Packan D, Jarrige J, Peterschmitt S, Dietz P, Scharmann S, Holste K, Klar P 2022 *Proceedings of the 37th International Electric Propulsion Conference* Cambridge, June 19–23, 2022 IEPC-2022-513
- [29] Fu S H, Ding Z F 2021 *Phys. Plasmas* **28** 033510
- [30] Zeng M, Liu H, Chen Z Q, Huang H Y, Yu D R 2021 *Vacuum* **192** 110486

Iodine electron cyclotron resonance plasma source for electric propulsion*

Li Xin Zeng Ming Liu Hui[†] Ning Zhong-Xi Yu Da-Ren

(*Key Laboratory of Aerospace Plasma Propulsion, Ministry of Industry and Information Technology,*

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 15 May 2023; revised manuscript received 15 August 2023)

Abstract

With the rapid development of commercial space in recent years, the low-power and low-cost propulsion systems are needed more and more urgently. Compared with conventional chemical propulsion, electric propulsion has a higher specific impulse. Compared with the conventional xenon propellant, iodine propellant that does not require high pressure storage, is cheap and close to the relative atomic mass and ionization energy of xenon. Electron cyclotron resonance source has the advantages of no internal electrode, low pressure ionization, high plasma density and compact structure, which is suitable for low power electric propulsion. Therefore, the study of low power iodine propellant electron cyclotron resonance plasma source is of great significance. In this study, a set of corrosion-resistant feed system with balanced and stable output of iodine vapor is designed. Then the iodine-corrosion-resistant electron cyclotron resonance thruster is designed completely. A corrosion-resistant coaxial cavity structure is used to feed the microwave to the thruster, and the channel magnetic field is changed into a cusped field to generate more electron cyclotron resonance (ECR) layers. Finally, the combined ignition experiment is successfully conducted, showing the first plasma source using electron cyclotron resonance to ionize iodine propellant that can be used for electric propulsion in the world. The analyses of experiments, static magnetic field, microwave electric field distribution show that the unstable plasma plume scintillation at low power and low flow is caused by the conversion between ordinary wave electron plasmon resonance heating mode and extraordinary wave electron cyclotron resonance heating mode. The decrease of ionization rate at a high flow rate is caused by electron loss, wall loss and electronegativity of iodine propellant. Based on this principle, an improvement scheme is proposed. The plasma source has no obvious damage after discharge, which indicates that it has the potential of long life. This work preliminarily proves that the low power electron cyclotron resonance electric propulsion scheme of low power iodine propellant is feasible.

Keywords: electric propulsion, iodine propellant, feed system, electron cyclotron resonance plasma source

PACS: 52.75.Di, 52.50.Dg, 52.50.Sw

DOI: [10.7498/aps.72.20230785](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230785)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52376023).

[†] Corresponding author. E-mail: huihui@hit.edu.cn



应用于电推进的碘工质电子回旋共振等离子体源

李鑫 曾明 刘辉 宁中喜 于达仁

Iodine electron cyclotron resonance plasma source for electric propulsion

Li Xin Zeng Ming Liu Hui Ning Zhong-Xi Yu Da-Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 225202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230785

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230785>

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>

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>

一种耦合外部电路的脉冲感应推力器磁流体力学数值仿真模型

A magnetohydrodynamic numerical model with external circuit coupled for pulsed inductive thrusters

物理学报. 2018, 67(1): 015201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171225>

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>

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>

电四极跃迁对电子束离子阱等离子体中离子能级布居的影响

Effects of electric quadrupole transitions on ion energy-level populations of in electron beam ion trap plasma

物理学报. 2022, 71(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220489>