

不同磁路电子回旋共振离子源引出实验

金逸舟 杨涓 冯冰冰 罗立涛 汤明杰

Ion extraction experiment for electron cyclotron resonance ion source with different magnetic topology

Jin Yi-Zhou Yang Juan Feng Bing-Bing Luo Li-Tao Tang Ming-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 045201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.045201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.045201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微型电子回旋共振离子推力器离子源结构优化实验研究

Experimental optimization in ion source configuration of a miniature electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报.2015, 64(21): 215202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.215202>

脉冲等离子体推力器羽流沉积薄膜的结构与光学性质研究

Structural and optical characterization of film deposited by pulsed plasma thruster plume

物理学报.2013, 62(2): 025207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025207>

霍尔漂移对阳极层霍尔等离子体加速器电离效率的影响

The influence of Hall drift to the ionization efficiency of anode layer Hall plasma accelerator

物理学报.2012, 61(7): 075210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075210>

霍尔效应推力器放电双稳态机理研究

Study on the mechanism of Hall effect thruster discharge with bistable state

物理学报.2012, 61(7): 075209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075209>

不同磁路电子回旋共振离子源引出实验*

金逸舟 杨涓[†] 冯冰冰 罗立涛 汤明杰

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2015年9月9日收到; 2015年10月26日收到修改稿)

空间推进所用的电子回旋共振离子源 (ECRIS) 应具有体积小、效率高的特点. 本文研究的 ECRIS 使用永磁体环产生磁场, 有效减小了体积, 该离子源利用微波在磁场中加热电子, 电子与中性气体发生电离碰撞产生等离子体. 磁场在微波加热电子的过程中起关键作用, 同时影响离子源内等离子体的约束和输运. 通过比较四种磁路结构离子源的离子电流引出特性来研究磁场对 10 cm ECRIS 性能的影响. 实验发现: 在使用氙气的条件下, 特定结构的离子源可引出 160 mA 的离子电流, 最高推进剂利用率达 60%, 最小放电损耗为 $120 \text{ W}\cdot\text{A}^{-1}$; 所有离子源均存在多个工作状态, 工作状态在微波功率、气体流量、引出电压变化时会发生突变. 离子源发生状态突变时的微波功率、气体流量的大小与离子源内磁体的位置有关. 通过比较不同离子源的引出离子束流、放电损耗、气体利用率、工作稳定性的差异, 归纳了磁场结构对此种 ECRIS 引出特性的影响规律, 分析了其中的机理. 实验结果表明: 保持输入微波功率、气体流量、引出电压不变时, 增大共振区的范围、减小共振区到栅极的距离, 离子源能引出更大的离子电流; 减小共振区到微波功率入口、气体入口的距离能降低维持离子源高状态所需的最小微波功率和最小气体流量, 提高气体利用率, 但会导致放电损耗增大. 研究结果有助于深化对此类离子源工作过程的认识, 为其设计和性能优化提供参考.

关键词: 电子回旋共振离子源, 磁场结构, 离子束流引出

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

DOI: 10.7498/aps.65.045201

1 引言

电子回旋共振离子源 (ECRIS) 寿命长、可靠性高, 在原子物理研究^[1,2]、粒子加速器研制^[3]、半导体工业等领域广泛应用^[4]. 由于 ECRIS 具有无阴极放电的特性, 在等离子体推进装置的研制过程中, ECRIS 受到广泛关注. 无阴极放电特性使得 ECRIS 具有许多优点, 如离子源寿命不再受限于阴极寿命, 离子源的电源系统得以简化. 将 ECRIS 应用于空间推进的尝试始于 20 世纪 60 年代^[5], 美国和日本的研究者先后对不同结构的 ECRIS 开展了理论研究和实验探索^[6-10]. 日本宇宙航空研究开发机构在其小行星探测器隼鸟 1 号、隼鸟 2 号上使用了 10 cm ECRIS, 标志 ECRIS 在空间推进中的实际应用. 两艘探测器分别于 2003 年、2014 年

发射, 1 号探测器于 2010 年返回地球. 文献^[11]公布了推进系统组成及工作概况, 文献^[12]简要回顾了整个探测任务. 两次探测任务之间, 为提高离子源性能, 日本研究人员进一步分析了 10 cm 离子源内的等离子体特征, 并以此为基础, 尝试改进该 ECRIS, 改进方式包括改变微波输入方式、气体供给方式, 在离子源内增加介质板、偏压极板等, 部分改进改善了离子源性能^[13]. 西北工业大学针对空间推进所用的 10 cm ECRIS 进行了放电、引出实验和离子源内等离子体参数诊断、离子源数值模拟等研究工作^[14-19].

作为地面装置使用时, ECRIS 的功耗和气体消耗量通常不是限制其应用领域的主要因素; 而用于空间推进时, 离子源的功耗和气体消耗量受到严格限制, 这对 ECRIS 的性能提出了新要求, 即在保证引出离子束流的强度和稳定性的前提下, 空间推

* 国家自然科学基金 (批准号: 11475137) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

进所用的 ECRIS 应具有较低的功耗和气体消耗量。在 ECRIS 中, 磁场是微波能量向等离子体内能转换的枢纽, 磁场的约束能减缓等离子体在离子源内壁的损失, 改进磁场结构是提高 ECRIS 性能的重要手段。合理的磁场结构应当加强微波与等离子体的相互作用, 促进电子与中性气体的电离碰撞, 增强离子源对等离子体的约束, 改善离子向栅极的输运, 同时有利于微波向共振区传输。然而, 微波的吸收、气体的电离、等离子体的约束和输运等过程彼此关联, 相互影响。例如, 微波向共振区的传输过程会影响等离子体的密度分布, 而等离子体密度分布的变化对介电常数、磁导率产生的影响会反馈到微波的传输过程中; 此外, 这些过程对磁场的要求也存在相互制约。ECRIS 内上述物理过程的耦合导致离子源性能与磁场结构的关系十分复杂, 因此, 通过离子束流引出实验, 分析磁场结构对空间推进所用的 ECRIS 的影响规律十分必要。

本文研究磁场结构对 10 cm ECRIS 的离子引出特性的影响。通过改变离子源内磁体的位置实现对离子源磁场结构的调节, 在一定范围的微波功率、推进剂流量和引出电压下进行离子束流引出实验。通过离子源的引出束流、放电损耗、气体利用率和微波反射率来表征离子源的引出特性, 分析磁场结构对离子源性能的影响规律与影响机理。研究结果有助于深入理解此类 ECRIS 的工作过程, 为提高其性能提供参考。

2 实验装置与实验方法

2.1 离子源结构与实验系统

实验中使用的离子源结构如图 1 所示, 电离过程主要发生在装有磁体环的喇叭波导中。调整磁体环的位置和内外磁体环的间距可以调节离子源的内部磁场, 以内磁体环到喇叭波导小端面的距离 a 和内外磁体环间距 b 描述磁体位置。研究中使用了四种磁场结构的离子源进行离子束流引出实验, 磁体环位置参数在表 1 中列出, 引出栅极系统的结构参数在表 2 中列出。

引出实验在真空舱中进行, 使用扩散泵抽气, 抽速 40000 L/s, 舱压维持在 5×10^{-3} Pa 以下, 通过复合真空计测量舱内气压。引出实验装置如图 2 所示, 包括: 真空舱、抽气机组、离子源、栅极与栅极电源、气体供应装置、微波源与微波传输线路。微波源频率为 4.2 GHz, 相应的共振磁感应

强度为 0.15 T, 称磁感应强度为 0.15 T 的区域为电子回旋共振 (ECR) 区。微波源输出功率的范围是 0—30 W, 通过环形器、同轴电缆、电压隔离波导将微波引入离子源, 环形器的反射波出口处接有功率计, 用于测量从离子源中反射出来的微波功率, 微波传输线路最多可将 20 W 功率输入离子源。离子源使用双栅极 (屏栅、加速栅), 两栅极分别由独立电源供电, 可独立显示栅极电流, 电路中有保护电阻, 阻值均为 3 k Ω , 屏栅电源负极、加速栅电源正极接真空舱金属壁。氦气通过内径 2 mm 细管通入离子源, 初始压力 0.3 MPa, 利用质量流量控制器节流并控制流量, 部分管路使用绝缘材料来保证离子源与外界绝缘。

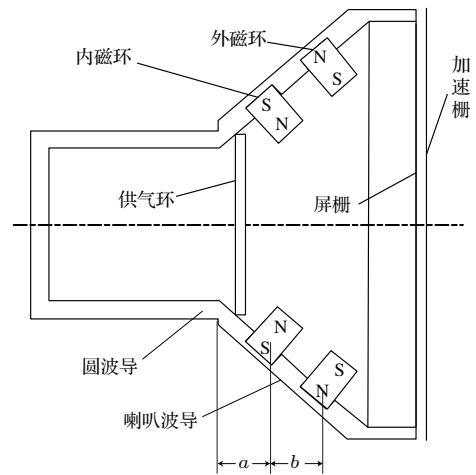


图 1 离子源结构图

Fig. 1. Schematic diagram of ion source.

表 1 磁体位置参数

Table 1. Structural parameters of the magnet rings.

	a/mm	b/mm
1 号离子源	15	15
2 号离子源	20	15
3 号离子源	18	20
4 号离子源	15	20

表 2 栅极参数

Table 2. Structural parameters of the grids.

	屏栅	加速栅
引出区直径/mm	100	100
孔径/mm	3	1.8
厚度/mm	0.8	0.5
开孔率	0.79	0.28
栅间距/mm	1	

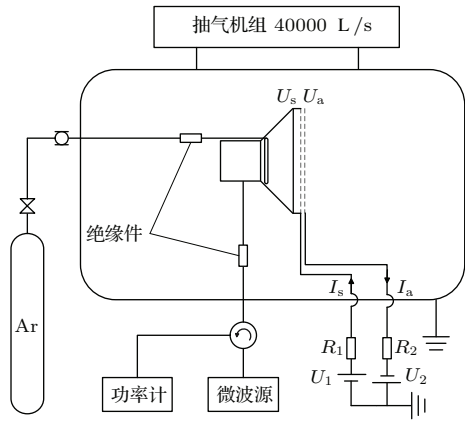


图2 离子束引出系统图

Fig. 2. Schematic diagram of extraction set up.

2.2 离子源内磁场的分布特点

电离过程主要发生在喇叭波导段, 故主要分析该段的磁场特征. 离子源为回转对称结构, 选择通过离子源轴线的平面, 在该平面上分析磁体位置变化时磁场的变化特点. 以栅极内表面圆心为原点, 离子源轴线为 x 轴, 栅极半径为 r 轴; x 轴正方向由喇叭波导小端面指向大端面, r 轴正方向由栅极圆心指向边缘. 图3给出了通过有限元方法计算得到的静磁场分布, 可以看出, 内外磁体环的间距增大,

ECR区的轴向分布范围扩大; 内磁体环到喇叭波导小端面的距离减小, ECR区向小端面移动, 同时ECR区到轴线的距离减小, 轴线附近区域的磁感应强度增强.

2.3 实验流程

实验时, 将真空舱气压降至 5×10^{-3} Pa 以下, 通入氩气, 打开微波源, 电离气体, 保持气体流量和输入微波功率稳定, 升高栅极电压, 待舱压、反射微波功率、栅极电源的电流与电压稳定后, 记录屏栅电源的电压与电流、加速栅电源的电压与电流、输入微波功率与反射微波功率、真空舱压力和气体流量 (气体流量单位为 sccm, $1 \text{ sccm} = 1 \text{ mL/min}$, 1 sccm Ar 流量为 $3.0 \times 10^{-5} \text{ g/s}$). 在引出状态下, 加速栅电势约为 -200 V , 能有效屏蔽下游羽流中的电子. 由于使用了保护电阻, 电源输出电压与栅极电压不一致, 由 (1)–(3) 式可确定屏栅电压 U_s 、加速栅电压 U_a (负值)、引出电压 U_T ,

$$U_s = U_1 - I_s R_s, \quad (1)$$

$$U_a = U_2 + I_a R_a, \quad (2)$$

$$U_T = U_s + |U_a|, \quad (3)$$

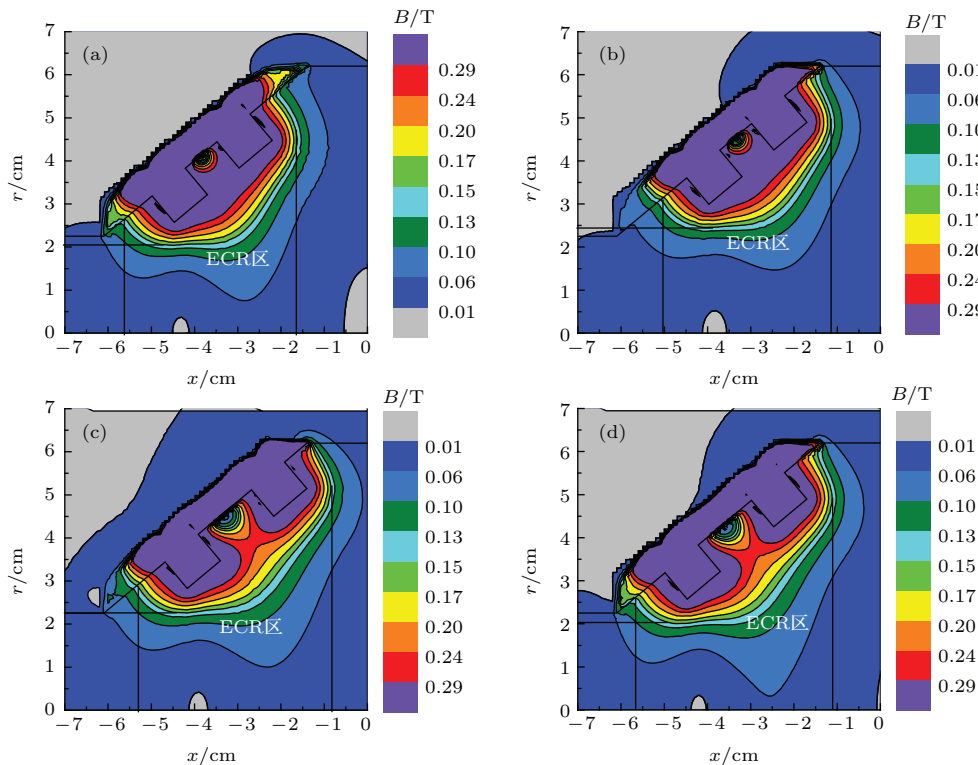


图3 (网刊彩色) 离子源内磁场分布 (a) 1号源; (b) 2号源; (c) 3号源; (d) 4号源

Fig. 3. (color online) Magnetic flux density inside the ion source: (a) Ion source 1; (b) ion source 2; (c) ion source 3; (d) ion source 4.

(1)—(3) 式中 U_1 为屏栅电源输出电压, U_2 为加速栅电源输出电压 (负值), I_s 为屏栅电流, I_a 为加速栅电流, I_b 为离子束电流, R_s 为屏栅电源保护电阻, R_a 为加速栅电源保护电阻, 保护电阻阻值均为 $3\text{ k}\Omega$. 正常引出条件下, 屏栅电流远大于加速栅电流, 加速栅电源保护电阻上分压可忽略, 屏栅电源保护电阻分压较大. 需要说明的是, 由于保护电阻上存在分压, 栅极电源的输出电压大于栅极上的实际电压. 离子源处于良好聚焦状态时, 加速栅电流远小于屏栅电流 (3% 以下), 可以认为保护电阻分压主要集中在屏栅保护电阻上, 加速栅电流与引出束流近似相等, 则保护电阻分压可通过 $I_b \times R_1$ 估算.

$$I_b = I_s - I_a, \quad (4)$$

$$\eta_R = P_r/P_i. \quad (5)$$

由 (4) 式计算离子束流, (5) 式计算微波反射率, (5) 式中, P_i 为入射微波功率, P_r 为反射微波功率, η_R 为微波反射率.

3 实验现象与分析

3.1 离子源的状态转变与转变机理分析

实验过程中发现, 离子源有不同的工作状态, 可以根据引出离子束流的大小和微波反射率高低划分工作状态. 状态转变前后, 引出束流大小、微波反射率、离子源亮度会发生明显变化. 1, 2, 4 号源存在高束流、低束流两个工作状态, 3 号源存在高束流、中束流、低束流三个工作状态.

图 4 给出了 1—3 号离子源高束流、低束流状态下的放电形貌. 图 5 给出了流量变化过程中, 1—4 号源引出离子束流和微波反射率的变化. 高束流状态下, 离子源功耗、气体消耗量略大于低束流状态下的值, 而引出离子束流明显大于低束流状态下的值, 是理想的工作状态.

状态转变时, 离子源的引出束流和微波反射率发生突变, 结合文献 [16] 对该类离子源内等离子体密度分布的诊断和文献 [20] 对 ECRIS 中功率传输的分析可以推断, 状态转变是离子源内等离子体状态和微波传输过程相互影响的结果. 在高束流状态下, 离子源内等离子体密度较高, 当流量或功率降低时, 离子源内等离子体密度下降, 影响到微波的传输与吸收, 导致 ECR 区电子的加热效果减弱, 进一步减少等离子体产生, 形成正反馈, 当等离子体

密度低于某一临界值后, 微波的传输和吸收状态发生突变, 导致离子源状态突变, 引出束流剧降, 微波反射率陡增.

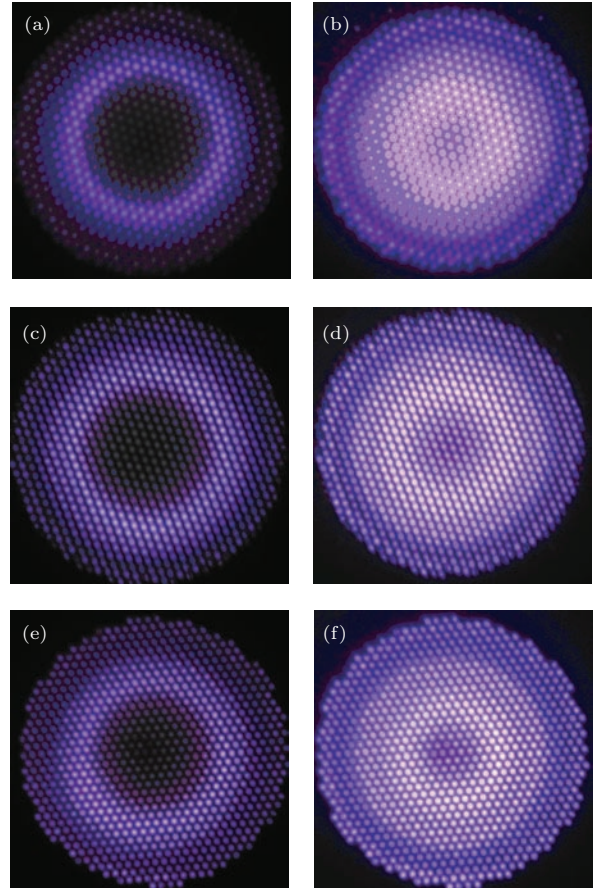


图 4 (网刊彩色) 不同状态离子源放电形貌 (a) 1 号源, 11.4 W , 4.1 sccm ; (b) 1 号源, 20 W , 7 sccm ; (c) 2 号源, 13.6 W , 4.7 sccm ; (d) 2 号源, 20 W , 7 sccm ; (e) 3 号源, 11.4 W , 5 sccm ; (f) 3 号源, 20 W , 7 sccm

Fig. 4. (color online) Photographs of discharge status at low current state and high current state: (a) Ion source 1, low current state, 11.4 W , 4.1 sccm ; (b) ion source 1, high current state, 20 W , 7 sccm ; (c) ion source 2, low current state, 13.6 W , 4.7 sccm ; (d) ion source 2, high current state, 20 W , 7 sccm ; (e) ion source 3, low current state, 11.4 W , 5 sccm ; (f) ion source 3, high current state, 20 W , 7 sccm .

3.2 不同磁路离子源的束流引出特性

图 6 给出了各离子源在不同微波功率和引出电压下, 引出束流对气体流量的变化. 图 7 给出了离子源引出束流随微波功率和引出电压的变化. 高状态下, 随气体流量或微波功率的增加, 引出束流趋于饱和. 引出束流对电压的曲线上存在转折点, 转折点后, 引出电流随引出电压增加近似线性增加.

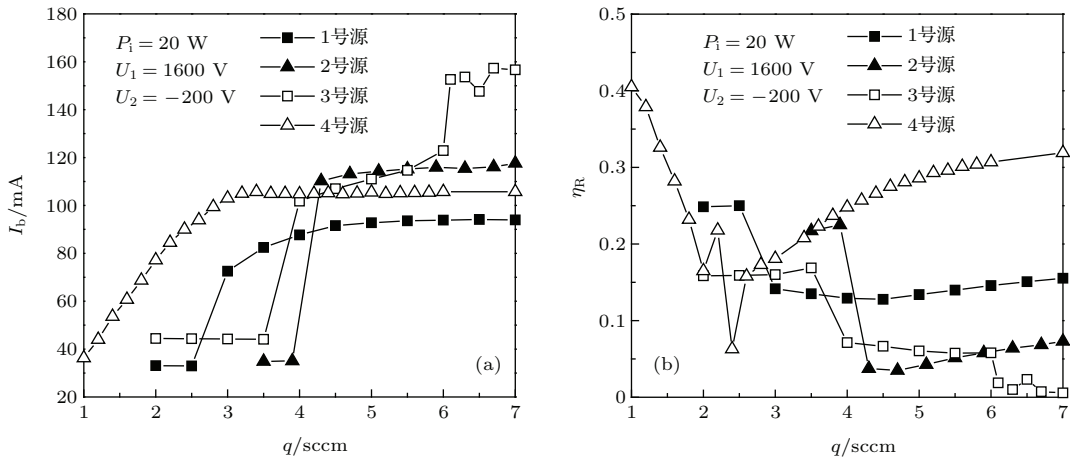


图5 (a)束流和(b)微波反射率随流量的变化

Fig. 5. (a) Ion beam current and (b) microwave reflection ratio versus gas flow rate.

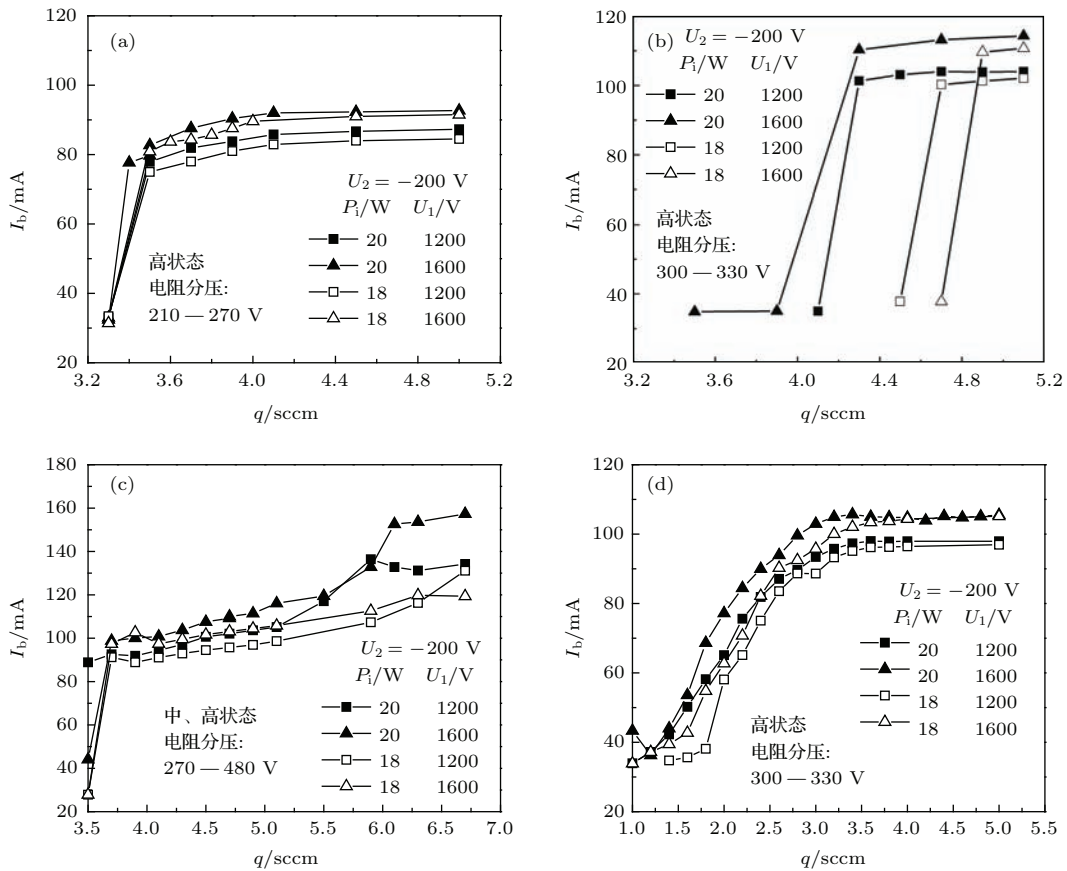


图6 不同微波功率、引出电压下离子源的引出特性 (a) 1号离子源; (b) 2号离子源; (c) 3号离子源; (d) 4号离子源

Fig. 6. Characteristic of extraction beam current from ion sources under different microwave power and extraction voltage: (a) Ion source 1; (b) ion source 2; (c) ion source 3; (d) ion source 4.

1, 2号源内外磁体环间距相等, 2号源磁体环整体靠近喇叭波导大端面; 3, 4号源内外磁体环间距相等, 3号源磁体环整体靠近喇叭波导大端面. 相同微波功率和气体流量下, 2号源引出束流大于1号源引出束流, 3号源引出束流大于4号源引出束流, 这表明, 磁体环整体接近喇叭波导大端面时, 离

子源能引出较大的束流. 1, 4号离子源对比表明, 保持内磁体环位置不变, 增加内外磁体环间距可增大引出束流.

定义流量下降过程中, 使离子源状态改变的最高流量为转变流量; 功率下降过程中, 使离子源状态改变的最高功率为转变功率. 不同离子源的转变

流量和转变功率有差异,微波功率和栅极电源输出电压一定,2,3,1,4号离子源的转变流量依次降低;气体流量和栅极电源输出电压一定,2,3,1,4号离子源的转变功率依次降低.可见,内磁体环接近喇叭波导小端面、磁体间距大的离子源具有较低的转变流量和转变功率.

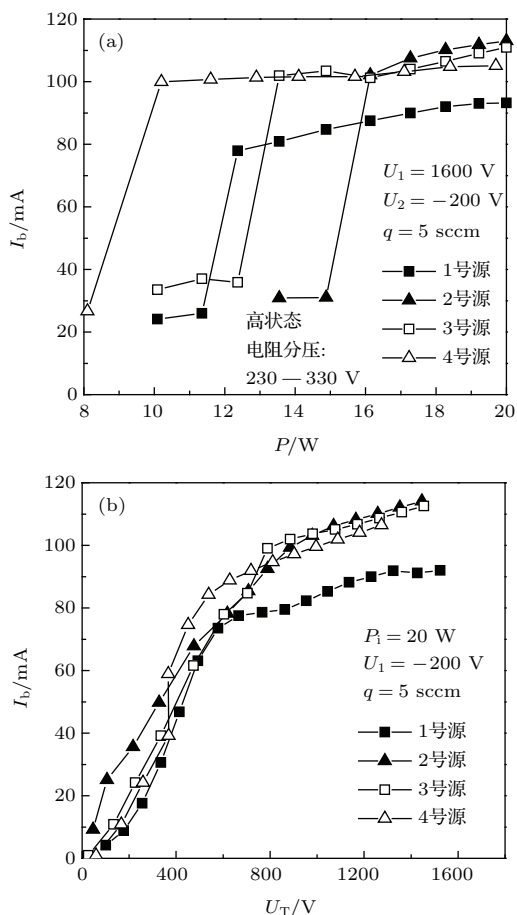


图7 (a) 引出束流随微波功率的变化; (b) 引出束流随引出电压的变化
Fig. 7. Characteristic of extraction beam with (a) Input microwave power and (b) extracting voltage.

磁体位置对转变参数的影响与离子源内的功率密度、气体密度的不均匀性有关,引出实验使用的离子源中,微波和气体均从喇叭波导小端面输入到ECR区,小端面附近的微波功率密度和气体密度高.对于内磁体环位置接近喇叭波导小端面的结构,在微波功率和气体流量降低时,内磁体环附近的ECR区仍可产生较高密度的等离子体,维持高状态.而增大磁体间距增加了ECR区的范围,加强了电子获能,亦有利于产生较高密度的等离子体.因此,内磁体环靠近小端面、磁体环间距大的离子源能够在较低的微波功率和气体流量下维持高状态.

引出时,3号源高束流状态需要在大功率和大流量条件下才能出现,这与其较大的磁体间距和整体靠近喇叭波导大端面的ECR区位置有关.前者使3号离子源ECR区范围大,能在较大区域内产生高能电子,后者使ECR区附近气体密度较低.流量较小时,3号离子源内的电子与中性原子碰撞不足,限制了其内部的等离子体产生和微波与等离子体的耦合,因而它的引出束流和反射率接近ECR区较小的2号离子源.当流量高于6 sccm时,电子与中性原子的电离碰撞足够频繁,等离子体密度提高,新的微波传输和吸收模式建立,导致3号离子源引出束流进一步提高,反射率进一步下降.

3.3 离子源效率比较

认为引出离子均为1价电离,按(6)和(7)式计算气体流量下降过程中的放电损耗与气体利用率,以此比较离子源效率.

$$\varepsilon = \frac{P_i}{I_b}, \quad (6)$$

$$\eta_P = \frac{I_b}{e} \frac{1}{m_p/M}, \quad (7)$$

(6)和(7)式中M为Ar原子质量, e为电子电量绝对值, m_p为Ar质量流量.图8给出了输入微波功率为20 W,屏栅电源输出1600 V,加速栅电源输出-200 V时,各离子源放电损耗随气体利用率的变化关系.

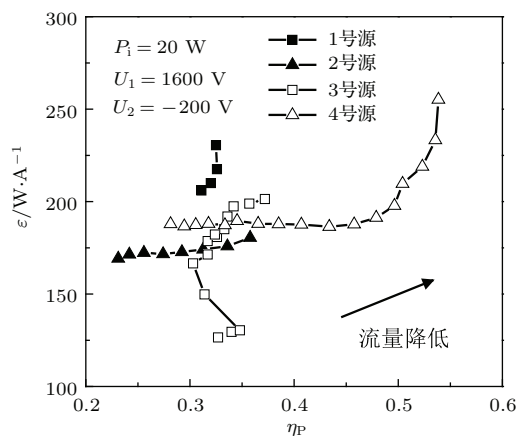


图8 离子源放电损耗-气体利用率曲线
Fig. 8. Discharge loss versus gas utilization of ion sources.

各离子源放电损耗-气体利用率曲线表明:1号源放电损耗大而利用率偏低;2号源放电损耗低且能够达到较高的利用率,但3.2节表明,2号源维持高状态所需要的微波功率和气体流量偏高,即2

号源可工作的微波功率范围和气体流量范围较小; 3号源能达到最低的放电损耗, 但放电损耗变化范围大, 同一气体利用率值对应多个放电损耗值, 这是气体流量下降过程中3号源会由高状态向中状态转变的特性导致的; 4号源能达到最高的气体利用率, 但气体利用率高时, 放电损耗很大. 结合离子源的磁体位置特点可以发现, 减小磁体与栅极的间距可以提高气体利用率, 这种情况下, 放电损耗较小; 增大内外磁体环间距或减小磁体到喇叭波导小端面的距离也能提高气体利用率, 此时, 利用率的提高是通过降低最低工作流量实现的, 这种情况下, 放电损耗较大.

3.4 磁场对离子源引出特性的影响规律

ECRIS中的共振区范围可以通过调节磁场发生改变; 电子温度升高后, 多普勒效应将导致共振磁场的磁感应强度由点值变为区间; 等离子体频率高于微波频率后, 波与离子间的非线性作用增强, 会影响电离区的分布; 中性气体的密度分布会影响电离反应的分布进而影响等离子体的分布状况. 这些因素都可用于调节离子源内等离子体的分布特性, 改变离子源工作特性, 而改进磁场则是提高离子源性能最直接的方式之一.

对本实验中的ECRIS而言, 增大磁场中ECR区范围, 微波对等离子体加热效果好, 能在输入功率不增加的情况下, 产生较高密度的等离子体, 降低放电损耗; ECR区到栅极距离较小时, 等离子体生成区到栅极的距离相应减小, 离子向栅极输运过程中的损失减小, 使得气体利用率高. 以上两种效应的共同作用下, 等离子体生成加强而损失减少, 离子源可以在气体流量、输入微波功率不变的情况下提高最大引出束流.

磁场对离子源性能的影响和磁场中的共振区与气体入口、微波功率入口的位置关系也有关联. 离子源内的气压和功率密度在空间上具有一定的不均匀性, 磁场中ECR区适当接近气压和功率密度相对较高的区域时, 离子源能够在输入的总微波功率和总气体流量相对较低的情况下产生较高密度的等离子体, 触发离子源过渡到高状态的正反馈, 使气体达到较高的电离率. 因此, 维持此种磁场结构的离子源的高状态所需要的最低功率和最低气体流量较低, 离子源的最高气体利用率较高且能够在较大的微波功率和气体流量范围内维持高状态.

4 结 论

磁场的改变会明显改变离子源的最大引出束流、可工作的微波功率和气体流量范围、气体利用率和放电损耗. 增大ECR区或者减小ECR区与栅极的间距均能提高引出束流的大小; ECR区接近喇叭波导小端面的结构可以使离子源在较低的微波功率和流量下工作, 能够达到较高的推进剂利用率, 但放电损耗大; 减小ECR区与栅极的间距可以在提高气体利用率的同时降低放电损耗, 但会减小离子源可工作的微波功率和气体流量范围.

在实验使用的4个离子源中, 3, 4号源引出束流较大、气体利用率高、放电损耗较小, 能够在较大的微波功率和气体流量范围内工作, 性能较好, 可在此基础上进一步改进.

此类离子源磁场设计应综合考虑气体、微波功率输入方式和栅极位置, 以实现引出束流大小、放电损耗、气体利用率的平衡, 提高离子源的综合性能.

参考文献

- [1] Geller R 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1302
- [2] Peng S X, Zhang A L, Ren H T, Zhang T, Xu Y, Zhang J F, Gong J H, Guo Z Y, Chen J E 2015 *Chin. Phys. B* **24** 075203
- [3] Gammino S, Celona L, Ciavola G 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 02B313
- [4] Matsuoka M, Ono K 1991 *J. Vac. Sci. Technol. A* **9** 691
- [5] Miller D B 1966 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **16** 162
- [6] Hank G 1987 *J. Spacecr. Rockets* **24** 437
- [7] Sercel J C 1988 *24th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Boston, USA, July 11–13, 1988 AIAA-88-2916
- [8] Kuninaka H 2002 *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Indianapolis, Indiana, July 7–10, 2002 AIAA-2002-3563
- [9] Foster J E, Patterson M J 2003 *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Huntsville, Alabama, July 20–23, 2003 AIAA-2003-5012
- [10] Jarrige J, Elias P, Cannat F, Packan D 2013 *44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference* San Diego, USA, June 24–27, 2013 AIAA-2013-2628
- [11] Kuninaka H, Nishiyama K, Funaki I, Shimizu Y, Yamada T, Kawaguchi J 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2125
- [12] Normile D 2010 *Science* **328** 565

- [13] Tsukizaki R, Togo H, Ise T, Koizumi H, Togo H, Nishiyama K, Kuninaka H 2014 *J. Propul. Power* **30** 1383
- [14] Meng Z Q, Yang J, Xu Y Q, Li P F 2011 *J. Propul. Tech.* **32** 421 (in Chinese) [孟志强, 杨涓, 许映乔, 李鹏飞 2011 推进技术 **32** 421]
- [15] Yang J, Shi F, Yang T L, Meng Z Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8071 (in Chinese) [杨涓, 石峰, 杨铁链, 孟志强 2010 物理学报 **59** 8071]
- [16] Yang J, Wang Y, Meng Z Q, Li P F 2013 *Mech. Sci. Tech. Aerosp. Eng.* **32** 203 (in Chinese) [杨涓, 王阳, 孟志强, 李鹏飞 2013 机械科学与技术 **32** 203]
- [17] Yang T L 2009 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [杨铁链 2009 硕士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [18] Chen M L, Xia G Q, Mao G W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 182901 (in Chinese) [陈茂林, 夏广庆, 毛根旺 2014 物理学报 **63** 182901]
- [19] Chen M L, Xia G Q, Xu Z Q, Mao G W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094104 (in Chinese) [陈茂林, 夏广庆, 徐宗琦, 毛根旺 2015 物理学报 **64** 094104]
- [20] Veerasingam R, Campbell R, Klevans E, McGrath R 1994 *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 142

Ion extraction experiment for electron cyclotron resonance ion source with different magnetic topology*

Jin Yi-Zhou Yang Juan[†] Feng Bing-Bing Luo Li-Tao Tang Ming-Jie

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

(Received 9 September 2015; revised manuscript received 26 October 2015)

Abstract

Electron cyclotron resonance ion source (ECRIS) for space propulsion requires to be compact and efficient. In this work, ECRIS, which generates magnetic field through permanent magnets, is compact and heats electrons by microwave in magnetic field to induce ionization collision and produce plasma. In ECRIS, magnetic field is crucial in gas discharge, plasma confinement and transport. Due to the complex interaction among the processes, including plasma generation, wave transmission and ion extraction, the effects of magnetic field on the performance of ECRIS are complex. In this paper, the effects of magnetic field topology on the performance of the ECRIS are studied experimentally. Argon is discharged by microwaves in four types of ion sources, different in the magnet positions and the ion beam extracted. The gas flow rate varies from 30 to 210 $\mu\text{g/s}$, the microwave power from 10 to 20 W and the extracting voltage from 500 to 1500 V. The properties of the ion sources are analyzed by comparing their extracted ion beams, propellant utilization efficiency, discharge loss and stability. Results show that the maximum ion beam, the highest gas utilization efficiency and the minimum discharge loss are respectively 160 mA, 60%, and $120 \text{ W}\cdot\text{A}^{-1}$. Each ion source presents more than one mode, determined by the microwave power and the gas flow rate, and affected by the extracting voltage. The microwave power and the gas flow rate at which the ion source mode changes relative to the position of the magnets. Finally, the influences of magnetic topology on the performance of the ion source are summarized and analyzed. It is concluded that inside this kind of ECRIS, the magnetic field featured by a wide electron cyclotron resonance (ECR) zone, and the narrow gap between the ECR zone and the screen grid will increase the extracted ion beam at the same level of the input power and the gas supply. But it is difficult to achieve high gas utilization efficiency in the ion source with such a structure. By keeping the ECR zone close to the power entrance, the gas inlet will significantly decrease the threshold for the power and gas consumption to sustain the high current mode. But the discharge loss in the ion source of such a structure is huge. Elaborate considerations should be taken to balance the magnitude of the extracted ion beam and the efficiency. These results may improve the understanding of the working process of this type of ECRIS and help the design processes.

Keywords: electron cyclotron resonance ion source, magnetic topology, ion beam extraction

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

DOI: 10.7498/aps.65.045201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11475137).

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