

2.45 GHz 单电荷态电子回旋共振离子源

丁俊章 赵玉彬 刘占稳 赵红卫 袁 平 曹 云 雷海亮

张子民 张雪珍 张 汶 郭晓虹 王 辉 冯玉成

李锦玉 马保华 高级元 宋 沛 李锡霞

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 描述了一台 2.45 GHz 单电荷态电子回旋共振 (ECR) 离子源的原理、结构与应用。介绍了其微波系统与磁场结构。在微波输入功率约 600 W, 引出高压 22 kV, 引出孔径为 $\phi 6$ mm 时, 该离子源的总束流 $I(\text{H}_1^+ + \text{H}_2^+ + \text{H}_3^+)$ 可达 90 mA。

关键词 ECR 离子源, 微波, 等离子体频率, 永磁体

中图分类号 TL503.3

电子回旋共振 (ECR) 离子源是一种无阴极源。它具有电离度高, 形成的等离子体密度高, 束流强度大, 性能稳定可靠等优点。对 2.45 GHz 全永磁单电荷态 ECR 源, 所用微波频率在工业通用频率段, 无需强的共振磁场, 采用永磁体减小了源体的体积。这些特点不仅降低了离子源造价, 而且能长期提供稳定的高品质离子束。在离子注入、离子刻蚀、薄膜技术、辐照育种、材料表面改性、离子束沉积等工农业、医学与科研领域得到广泛的应用。

1 离子源的结构及原理

离子源的结构如图 1 所示。等离子体弧腔采用双层结构, 用去离子水循环冷却, 内径为 7 cm, 长 7 cm。引出采用加速 - 减速电极系统, 加速和减速间隙分别为 6 mm 和 3 mm。产生的单电荷态离子先经过 $\phi 6$ mm 单孔等离子体电极, 再通过吸极引出。吸极加负电位, 它与地极之间的电场可阻止束流路径中的电子被反向加速至离子源内。工作气体通过微波窗旁两个进气孔进入腔体。

在离子源腔体内, 轴向磁场由永磁铁与三个辅助线包产生, 当馈入微波频率与电子在磁场中的拉摩回旋频率相等时会产生共振, 电子获得能量, 从而使腔体内的工作气体电离形成等离子体。共振应满足

$$f_{ce} = 28 B_0 \quad (1)$$

式中, f_{ce} 为电子回旋共振频率 (GHz); B_0 为静磁场磁感应强度 (T)。当 f_{ce} 为 2.45 GHz 时, 按 (1) 式, B 应为 8.75×10^{-2} T。实际在等离子体腔内, 由于受到等离子体密度和回旋电子的去磁作用等因素的影响, 电子会在 B_0 为 8.75×10^{-2} T 附近形成共振并吸热。等离子体加热与其密度及静磁场之间的关系即 CMA 图见文献 [1]。这是经典加热理论得出的结果, 但对于低温等离子体的加热来说, 所显示的许多趋势仍是正确的。当电磁场沿磁场降低的方向向电子回旋共振区域传播时, 非寻常波 (X 波) 被反射, 只有右旋极化波 (R 波) 在这种条件下能到达电子回旋共振区域产生共振。

第一作者: 丁俊章, 男, 1975 年出生, 2000 年 7 月从中国科学院近代物理研究所核技术及应用专业硕士生毕业
收稿日期: 1999 - 08 - 16, 修回日期: 2000 - 04 - 30

对 2.45 GHz ECR 离子源来说,为了获得流强足够高的质子束,腔体中形成的是密度很高的非共振等离子体,约为 $10^{18} \sim 10^{20}/\text{m}^3$ 。其等离子体密度远大于该频率下的

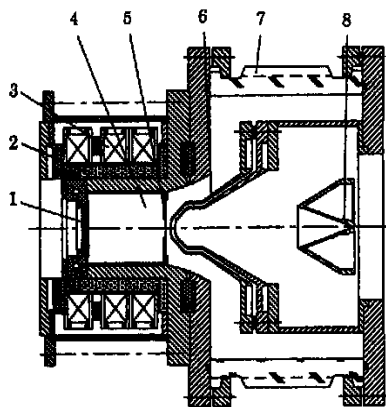


图 1 离子源结构

1. 微波窗, 2. 永磁铁, 3. 线包, 4. 腔体, 5. 等离子体电极, 6. 加减速电极, 7. 陶瓷, 8. 法拉第筒

Fig. 1 The structure of ion source

1. Microwave window, 2. Permanent magnets, 3. Solenoids, 4. Plasma chamber, 5. Plasma electrode, 6. Accel - decel electrodes, 7. Ceramics, 8. Faraday cup

经典的等离子体截止密度。

在该离子源中,腔体中的静磁场的磁感应强度大于 B_{ECR} 。在这种高磁场、高密度的等离子体区域中,电磁波以 θ 角入射时,电子可以发生共振加速。共振应满足的条件是

$$\omega_{\text{RF}}^2(\omega_{\text{RF}}^2 - \omega_{\text{UH}}^2) + \omega_{\text{ce}}^2 \omega_{\text{pe}}^2 \cos^2 \theta = 0 \quad (2)$$

式中, ω_{RF} 为馈入微波频率; ω_{UH} 为高混杂频率; ω_{ce} 为电子回旋共振频率; ω_{pe} 为等离子体频率; θ 为波矢量 K 与静磁场 B 的夹角, 对非寻常波(X波), $\theta = \pi/2$; 对右旋极化波(R波), $\theta = 0$ 。从(2)式中可以看出, R波可以被共振吸收。当粒子的运动轨道受到大量的随机碰撞影响时, 它的旋转相位会落后于微波的电矢量相位, 为了补回损失的相位与延搁的时间, 电子的运动速度应稍大。此时静磁场满足 $1 \pm B/B_{\text{ECR}} \pm 1.5$, 此区域中共振加热可以实现。

Sakudo 曾提出^[2], 当 $1 \pm B/B_{\text{ECR}} \leq 1.3$ 时, 离子源吸收微波能量的状态最好。在这种情况下, 电子温度较低 ($T_e \leq 10\text{eV}$), 但是引出的束流强度较大。

2 微波系统与磁场

2.1 微波系统

微波采用轴向馈入方式。微波在磁控管中产生, 经波导、过渡波导, 由微波窗耦合到腔体内加热等离子体(图 2)。把磁控管直接接在波导上, 由阳极电源及灯丝电源供电。磁控管允许有较大的反射功率, 因此当反射功率在一较大的范围内时, 磁控管仍可正常工作。

实验之初, 我们把波导与磁控管放在地电位上, 在波导与过渡波导之间添加绝缘片, 由于该结构改变了微波传输阻抗, 因而在很大程度上降低了微波对等离子体的加热效率。后来, 我们把波导与磁控管直接放在高电压上, 并使用绝缘变压器使之与地隔离, 束流强度大幅度增加。

微波窗在微波输入与作为其负载的等离子体之间起着重要的阻抗匹配作用。通常使用三层窗结构, 材料为石英、氧化铝陶瓷和氮化硼。我们采用双层窗结构, 使用的主要材料为氮化铝、氧化铝陶瓷, 成功地解决了微波的传输与耦合问题。氧化铝陶瓷和氮化铝的介电常数分别为 8.7 和 8.1。热传导系数分别为 40 和 180,

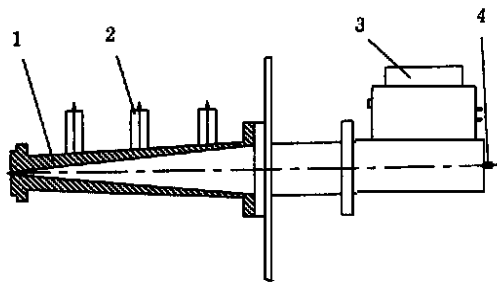


图 2 微波系统

1. 过渡波导, 2. 三销钉调节器, 3. 磁控管, 4. 调节器

Fig. 2 The microwave system

1. Transition wave guide, 2. Three - stub tuner, 3. Magnetron, 4. Tuner

最高工作温度分别为 1800 °C和 1300 °C。

过渡波导(图 2 所示)上装有 3 个螺钉调节器,可以有效地调节微波的反射、传输与耦合。在离子源正常工作时,微波反射功率约在 10 %左右。当磁场场型在图 3 中曲线 a 所示的情况下,微波馈入功率与引出总束流关系如图 4 所示。

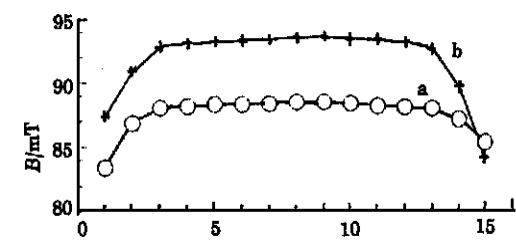


图 3 轴线磁场场形
Fig. 3 The configuration of axial magnet

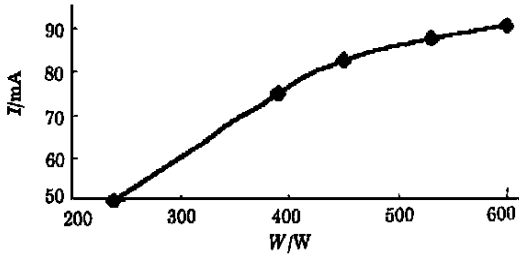


图 4 功率 - 总束流
Fig. 4 Power - total ion beam

2.2 磁场

轴向磁场主要由永磁体提供,永磁体选用钕铁硼材料。同时利用三辅助线包在一定范围内细调磁场,便于在实验中寻找最好的工作点。离子源正常工作时,三个辅助线包电流约在 0—5A,总的磁场调节范围约在 0—3×10⁻³T。在实验中,我们找到了两种工作状态较好的场的模式(图 3)。当离子源工作在这两种场模式时,状态较为稳定,引出的束流强度较高。曲线 a 所描述的磁场场形中,注入端、引出端以及腔体中各处的中心轴上的场强都约为 8.75×10⁻²T,实验证明此时离子源的工作状态最为稳定,引出的束流强度最高。在曲线 b 所描述的磁场场形中,注入端、引出端与腔体中各处的中心轴上的场强都约为 9.3×10⁻²T,此时引出束流对工作点的变化较为敏感。

3 结果与讨论

(1) 束流强度: H₂ 为工作气体,微波功率约 600W,工作时真空为 3.1×10⁻³Pa,耗气量为 2—4cm³/min,引出高压为 22kV,吸极为 -5kV,引出孔径为 φ6mm,总束流 I(H₁⁺+H₂⁺+H₃⁺)为 90mA,束流密度为 318mA cm⁻²。与国内外同类离子源比较见表 1。

表 1 同类离子源的主要参数

	Table 1 The parameters of the ion source and other similan sources			
	LANL USA ^[3]	Chalk River Lab Canada ^[4]	CEA France ^[5]	IMP China
引出高压 Extraction voltage/ kV	75	50	95	22
束流强度 Ion beam intensity/ mA	130	95	108	90
束流密度 Ion beam density/ mA cm ⁻²	224	475	215	318

- (2) 我们在提高总束流的同时,准备对束流成分进行分析,增加质子比,提高束流品质。
- (3) 为提高引出束流的能量,需要进一步提高引出电压。在以前的实验中,我们曾把引出电压最高加至 30kV,离子源仍能正常稳定地工作。等新的高压电源供电之后,我们将要进一步提高引出高压。

4 应用

离子源选用 2.45 GHz 的微波频段,使用国产磁控管,配以该磁控管的阳极灯丝电源,构成所需的微波功率源,微波系统中不用隔离器与环流器,使系统大为减化。采用永磁体技术,减小了源体体积,基本上免去了对线包及线包电源的要求,又进一步降低了离子源的造价。采用微波放电加热等离子体,离子源使用寿命较长,可以长期供应高品质、高强流的离子束。

这种强流型 ECR 离子源有着较为广泛的应用。它可以用来进行医学研究与疾病治疗。也可以用在材料改性、非金属表面沉积与镀膜、半导体的掺杂与蚀刻、辐照育种等方面。

致谢 在这台源的准备与调试过程中,得到我所工程处、条件室等同志的大力帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 Geller R. Electron cyclotron resonance ion source and ECR plasmas, London: Institute of Physics Publishing, 1996. 156
- 2 Saukdo N. The physics and technology of ion source, New York: Wile Interscience, 1989. 229
- 3 Joseph Sherman, Andrew Arvin, Lash Hansborough, *et al.* Rev Sci Instr, 1998, **69**:1003—1008
- 4 Terence Taylor, Jozef F. Mouris. Nucl Instr Meth, 1993, **A336**:1—5
- 5 Gobin R, France A, Beauvais P Y, *et al.* Rev Sci Instr, 1998, **69**:1009—1011

A 2.45 GHz single charge state ECR ion source with permanent magnet

DING Junzhang ZHAO Yubin LIU Zhanweng ZHAO Haowei
YUAN Ping CAO Yun LEI Hailiang ZHANG Zimin ZHANG Xuezhen
ZHANG Wen GUO Xiaohong WANG Hui FENG Yucheng LI Jinyu
MA Baohua GAO Jiyuan SONG Pei LI Xixia

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

A 2.45 GHz single charge state ECR ion source with permanent magnet has been developed at IMP. The physical principle and structure are presented, and the microwave system and magnetic configuration are introduced in this paper. A mixed ion ($H_1^+ + H_2^+ + H_3^+$) beam current of 90mA can be delivered from a single aperture of $\phi 6$ mm with microwave power of 600W at extraction voltage of 22kV.

Key words ECR ion source, Microwave, Plasma frequency, Permanent magnet

CLC TL503.3