

# 用于质子直线加速器的 强流电子回旋共振离子源

崔保群, 李立强, 包轶文, 蒋渭生, 王荣文

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**研制了一台用于加速器驱动次临界系统(ADS)的强流电子回旋共振离子源。在 30 keV 能量下, 引出的氢离子最大束流达到 100 mA, 质子比好于 85%, 引出束流密度最高可达 340 mA/cm<sup>2</sup>。初步测定的发射度约为 0.11 mm·mrad。已通过了 100 h 的连续运行考验。

**关键词:**电子回旋共振离子源; 加速器驱动次临界系统; 质子比; 发射度

**中图分类号:** TL503.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2002)06-0486-04

## An Intense ECR Ion Source for Proton Linac

CUI Bao-qun, LI Li-qiang, BAO Yi-wen, JIANG Wei-sheng, WANG Rong-wen

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-27, Beijing 102413, China)

**Abstract:** An intense electron cyclotron resonance ion source for proton linac has been developed. At 30 keV, 100 mA hydrogen beam is extracted from the source, proton ratio is greater than 85% and the beam density of 340 mA/cm<sup>2</sup> is achieved, the rms emittance of the beam is around 0.11 mm·mrad. The source has passed 100 h reliability test.

**Key words:** electron cyclotron resonance ion source; accelerator driven subcritical system; proton ratio; emittance

中国原子能科学研究院正在进行加速器驱动次临界系统(accelerator driven subcritical system, ADS)方面的研究。其质子直线加速器的一重要部件就是强流离子源。为了与 RFQ 加速段匹配,要求的质子能量为 75 keV,连续束流强大于 50 mA,质子比高于 85%,归一化均方根发射度  $\epsilon_{n, rms} < 0.2$  mm·mrad,能长时间连续稳定运行。这些要求对离子源研究工作是一个很大的挑战。微波激励的电子回旋共振

(ECR)离子源无灯丝阴极,寿命可大大延长。另外,它的效率高,束流品质好,因此,国际上许多实验室都选用这种离子源<sup>[1-4]</sup>。本工作拟研制用于质子直线加速器的强流 ECR 离子源。

### 1 实验装置

ECR 离子源是将微波功率以适当方式馈入一放电腔,腔内有一与微波电场相垂直的恒定磁场,当磁场强度达到电子回旋共振条件时,

收稿日期:2001-10-16;修回日期:2002-04-15

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(19835070);国家重点基础研究(973)计划资助项目(G1999022605)

作者简介:崔保群(1966—),男,河南辉县人,高级工程师,离子束技术专业

腔中电子从微波获得能量并与周围气体碰撞产生电离,形成等离子体,用高压电场从放电腔的一引出孔将离子引出而形成离子束。

本工作中研制了两种不同结构的 ECR 离子源,它们均用 2.45 GHz 的微波来产生放电等离子体。

图 1 为一台紧凑型 ECR 离子源的结构示意图。它的微波系统由磁控管、三螺钉调谐器、反射功率监测器组成。

磁控管及波导为标准产品,三螺钉调谐器用来调整微波的传输,减少反射。一段脊波导用来匹配波导和放电室的阻抗。真空密封由位于脊波导与螺钉调谐器之间的  $Al_2O_3$  陶瓷窗完成。微波功率通过脊波导馈送到一石英放电管中。石英管由一厚 3 mm 的 BN 薄片微波窗与脊波导相隔,管的另一端与离子源的出口板相连,它们一起构成了放电室。一根细石英管将气体送进放电室。ECR 离子源放电所需的共振磁场由图中所示的电磁铁产生。两块磁铁沿脊波导形成一磁极,软铁制成的出口板构成另一磁极。一个水冷励磁线圈可方便地产生和调节放电室中的磁场,使得引出的离子束流强最大。离子束被一加速、减速电极系统引出,目前,加速电压为 30 kV。束流由一带磁场抑制的水冷法拉第筒测量,并已经热量法校正,排除了二次电子的影响。引出束经过一台 60° 分析

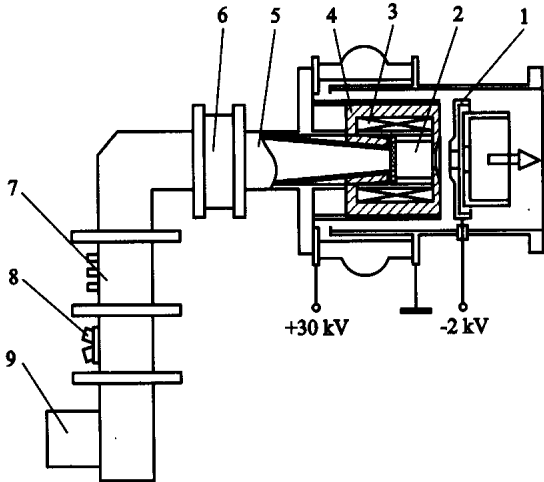


图 1 ECR 离子源结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ECR ion source

- 1——引出电极;2——放电室;3——励磁线圈;
- 4——软铁;5——脊波导;6——微波窗;
- 7——调谐器;8——检测段;9——磁控管

磁铁测定其质谱。离子束进入磁铁前有一段漂移空间,可放置发射度测量装置。

## 2 实验结果

紧凑型离子源用了一直径仅为 30 mm 的石英放电室,配以改进的脊波导,源的引出孔径为 5 mm,获得了很好的结果。引出束流与磁场的关系曲线示于图 2,最佳磁通密度约为 102 mT,比离子回旋共振磁场 87.5 mT 大。这是由于在此磁场下,等离子体从更为复杂的过程中进一步获取能量而大大提高了浓度<sup>[5]</sup>。

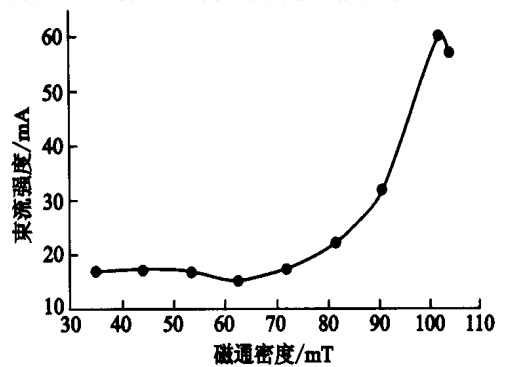


图 2 磁场与束流强度的关系

Fig. 2 Beam current vs magnetic field

引出束流与进气量的关系示于图 3。可看出,进气量达到一定值后,对引出束流影响很小。

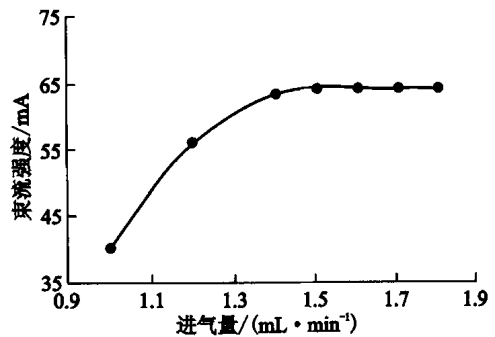


图 3 进气量与束流强度的关系

Fig. 3 Beam current vs gas flow rate

测得的质子比示于图 4。在较大的微波功率下质子比可高达 92% 以上。引出的氢离子流最大可达 68 mA,相应的束流密度达到 340 mA/cm<sup>2</sup>。

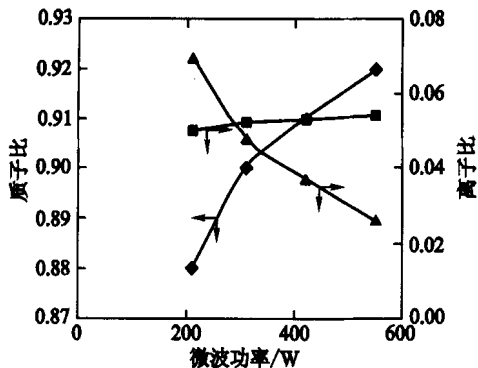


图4 质子比与微波功率的关系

Fig. 4 Proton ratio vs microwave power

—H<sup>+</sup>; —H<sub>2</sub><sup>+</sup>; —H<sub>3</sub><sup>+</sup>

为提高离子束流强,还研制了另一种结构的 ECR 离子源,其结构示于图 5。它的两个励磁线圈在真空室之外,可分别调节其位置和电流,使之在放电室中产生最佳的磁通密度及分布。放电室直径为 100 mm,长 100 mm,出口孔径为 7.3 mm。微波系统与前述一台相同。实验显示,该源的效率很高,在进气量为 1.5 mL/min 时,离子源最大束流可达 100 mA (图 6),它的质子比达到了 85% 以上。

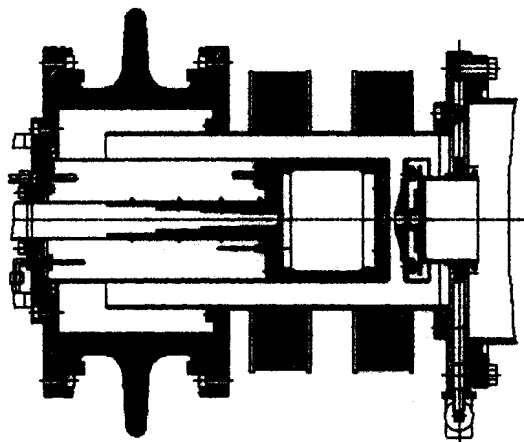


图5 强流 ECR 离子源结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of ECR ion source

用“缝-板”法初步测量了源的发射度。离子束穿过一排狭缝并漂移相当距离后,在一块铝板上打出清晰的束斑印痕。据此作出的相图示于图 7。它的实验室发射度值为 216 mm·mrad,相应的归一化均方根发射度约为  $\epsilon_{n-rms} = 0.11 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

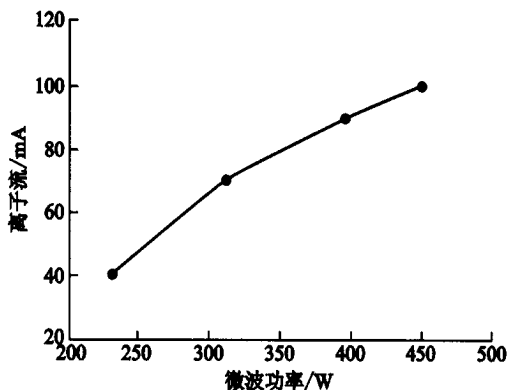


图6 束流强度与微波功率的关系

Fig. 6 Extracted current vs microwave power

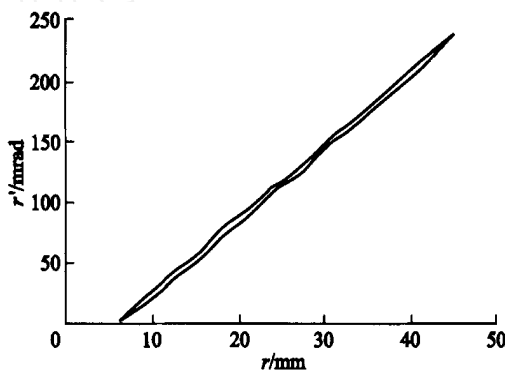


图7 离子束的发射度

Fig. 7 Emittance of the beam

### 3 离子源的可靠性试验

对于本工作所研制的离子源,欲保持长时间稳定运行,首先必须解决高电压打火问题。由于引出孔附近气压较高,又存在很强的电场与磁场,很容易引起高压击穿打火。试验和排除了各种因素后证实,在现在实验装置条件下,扩散泵油蒸气的污染是引起打火的重要原因。油蒸气在放电室中形成碳膜,又会影离子源寿命。在增加了冷阱之后,打火现象大为减少。

影响离子源寿命的另一主要因素是放电室的微波窗损坏。引出区气体被轰击电离,产生的电子受电场加速穿过引出孔返流打到放电室底部的微波窗上,这些电子轰击的能量很大而且集中,微波窗的散热条件又差,工作一段时间后,微波窗即被烧蚀出孔或开裂。本工作设计了一种独特的微波馈入方式,使反轰的电子束

不能打到窗板上,从而避免出现这一严重问题。

在上述基础上,对离子源作连续运行 100 h 的考验。这次运行,除在启动后的两小时内进行高电压锻炼时因打火中断一次外,以后的 100 h 内未出现束流中断。在这 100 h 中,束流的可利用率几乎为 100 %。

#### 4 结论与今后的工作

所研制的两种结构的离子源在加速电压为 30 kV 时,氢离子束流均超过了 50 mA,最大可达 100 mA,质子比为 85 % ~ 92 %。初步测定的均方根发射度约为 0.11 mm·mrad,并通过了 100 h 的运行考验。这些都达到了预定的指标。为了将加速电压提高到 75 kV 以上,一台新离子源和一台 100 kV、110 mA 的高压电源即将投入试验。真空系统将改用分子泵抽气。为了准确地测定束流发射度,一台强流发射度测量仪正在调试中。为了保持束流的稳定,一台稳定的磁控管电源也即将完成。进一步的试验正在进行中。

丁大钊院士与关遐龄教授对本工作给予了

许多有益的指导,北京大学重离子物理研究所研制了发射度仪,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Wills JSC, Lewis RA, Diserens J, et al. A Compact High Current Microwave Driven Ion Source [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(1):65~68.
- [2] Sherman J, Arvin A, Hansborough L, et al. Status Report on DC 130 mA, 75 keV Proton Injector [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(2):1 003 ~ 1 008.
- [3] Hwang Y, Hong I, Kim H. Development of a High Current Microwave Ion Source for Korean Multipurposed Accelerator [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(2):1 015 ~ 1 020.
- [4] Celona L, Ciavola G, Gammino S. TRIPS: The High Intensity Proton Source for the TRASCO Project [J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2):771 ~ 773.
- [5] Popov A. Effects of Magnetic Field and Microwave Power on Electron Cyclotron Resonance Type Plasma Characteristics [J]. J Vac Sci Technol, 1991, A9(3):711 ~ 716.