

CNIC-01638/12

CNNC-0003

用于质子直线加速器的强流 ECR 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 北京, 102413

摘要: 介绍了正在研制的一台强流 ECR 离子源。它的目标是用于加速器驱动的次临界系统 (ADS)。两种结构的离子源均获得了较好的结果。在 30 keV 能量下, 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/cm²。初步测定的发射度约为 0.11 π mm · mrad。已通过了 100 h 的连续运行考验。

关键词: ECR ADS 质子比 发射度

引言

中国原子能科学研究院正在进行加速器驱动的次临界系统 (Accelerator Driven Sub-critical System) 的研究。其质子直线加速器的第一个重要部件就是强流离子源。为了与 RFQ 加速段匹配, 质子能量需 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 $\varepsilon_{n,rms} \leq 0.2 \pi$ mm · mrad, 能上千小时地连续稳定运行。这些要求对离子源研究工作是一个重大挑战。微波激励的电子回旋共振型 (ECR 型) 离子源由于没有灯丝阴极, 寿命可以大大延长。另外, 它的效率高, 束流品质好, 故国际上许多实验室都选用这种离子源^[1~4]。

我们从 1999 年开始了 ECR 离子源的研制, 经过多次改进, 已经达到了第一阶段目标, 即在 30 keV 能量下, 引出束流大于 50 mA, 并通过了 100 h 连续运行的考验。

1 实验装置

ECR 离子源是将微波功率以适当的方式馈入一个放电腔, 腔内有一个

* 本项目得到国家自然科学基金重点基金及国家重点基础研究(973)计划的资助。

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的条件时，腔中的电子将从微波获得能量并与周围的气体碰撞产生电离，形成等离子体。用高压电场从放电腔的一个引出孔将离子引出而形成离子束。我们研制了两种不同结构的 ECR 离子源，它们都用 2.45 GHz 的微波来产生放电等离子体。图 1 是一台紧凑型的 ECR 离子源。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个石英的放电管中，由一个厚 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。一个细石英管将气体送进放电室内。ECR 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个磁极，软铁制成的出口板构成另一个磁极。一个水冷励磁线圈可方便地产生和调节放电室中的磁场，使得引出流强最大。离子束被一个加速、减速电极系统引出，目前加速电压为 30 kV。束流由一个带磁场抑制的水冷法拉第筒测量，并经过了热量法的校正，排除了二次电子的影响。引出束经过一台 60° 分析磁铁测定其质谱。束进入磁铁前有一段漂移空间，可以放置发射度测量装置。

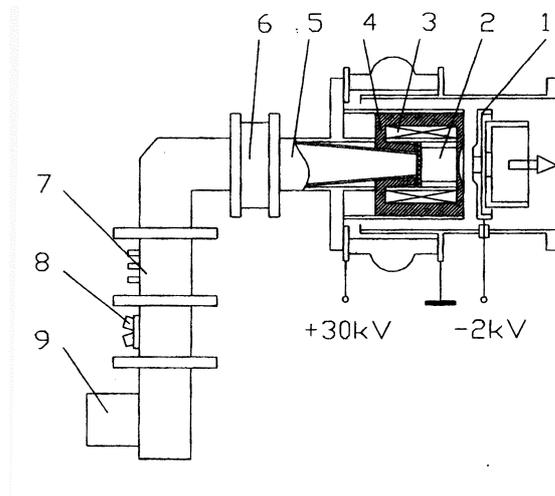


图 1 微波离子源结构示意图

- 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——调谐段；8——检测段；9——磁控管

2 实验结果

紧凑型离子源用了一个直径仅 30 mm 的石英放电室，配以改进的脊波导，获得了很好的结果。源的引出孔径为 5 mm。其引出束流与磁场的关系见于图 2，最佳磁场强度约为 1020 Gs，比标准的共振场 875 Gs 为大。这是由于在此磁场下，等离子体从一个更为复杂的过程中进一步获取能量而大大提高了浓度^[9]。引出束流与气压的关系见图 3。图中的气压是真空系统的压力，故是一个相对值。可以看出，气压过高并无好处。图 4 是测得的质子比。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/cm²。我们还研制成功另一种结构的 ECR 离子源，其结构见图 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场强度及分布。放电室直径 100 mm，长 100 mm，出口孔径 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 (见图 6)。它的质子比也达到了 85% 以上。

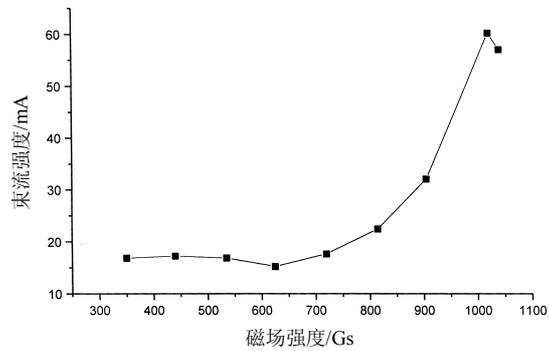


图 2 磁场强度与束流强度的关系

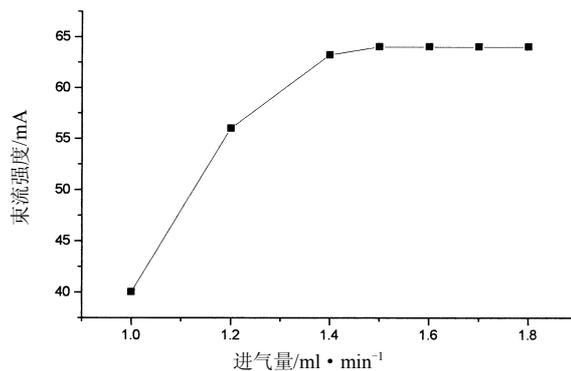


图 3 进气量与束流强度的关系

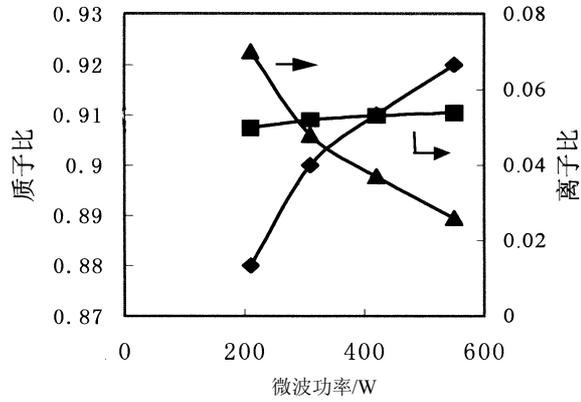


图4 质子比与微波功率的关系

(◆ H⁺ ■ H₂⁺ ▲ H₃⁺)

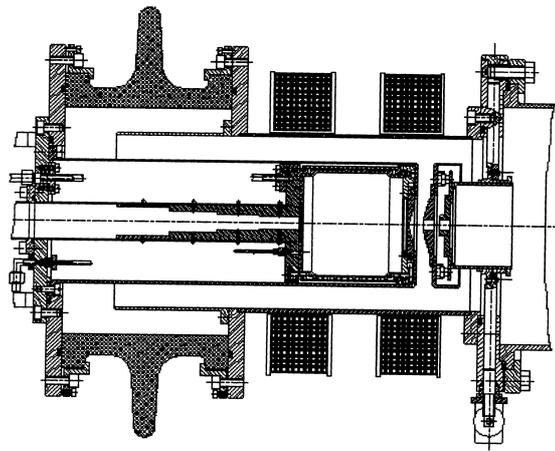


图5 强流 ECR 离子源结构图

我们用“缝—板”法初步测量了源的的发射度。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。据此我们作出的相图见图 7。它的实验室发射度值为 $216 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。若束流密度是均匀分布，则相应的归一化均方根发射度约为 $\epsilon_{n,rms} = 0.11 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

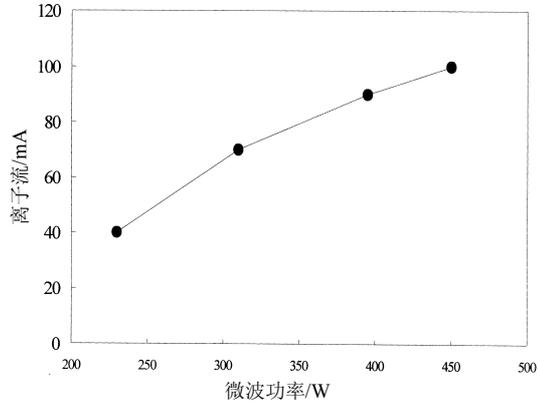


图6 束流强度与微波功率的关系

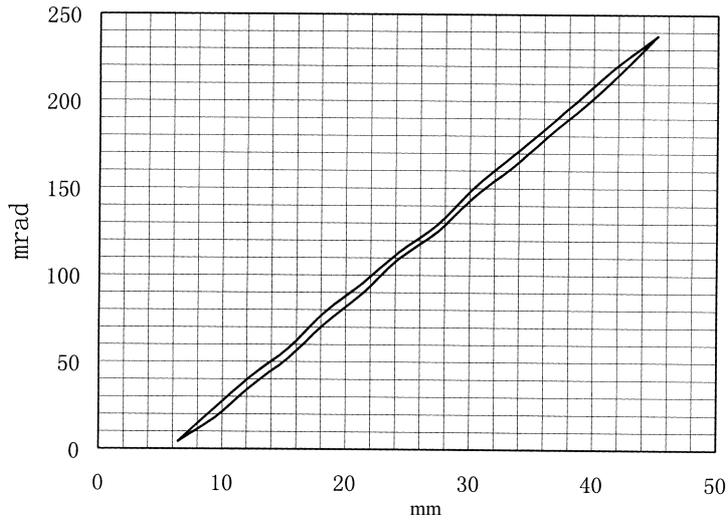


图7 离子束发射度 (30 keV, 62 mA)

3 源的运行试验

要离子源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，证明在我们的条件下，扩散泵油蒸汽的污染是引起打火的重要原因。在增加了冷阱之后，打火大为减少。油蒸汽在

放电室中形成碳膜，也会影响离子源的寿命。

另一个影响离子源寿命的主要因素是放电室的微波窗损坏。由于束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。由于轰击的能量很大而且集中，微波窗的散热条件又差，所以在工作一段时间后，微波窗即被烧蚀出一个孔，或者开裂。我们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，从而彻底避免了这个问题。

在上述基础上，我们对离子源作连续运行 100 小时的考验。其结果见图 8。这次运行，只是在启动的两小时内进行高电压锻炼时有一次因打火中断外，以后的 100 小时内没有再出现束流中断。图中束流随时间有些变动，有的是电源不够稳定造成的，有的是人为地调节参数造成的，但总的都保持在 70 mA 左右。在这 100 小时中，束流的可利用率几乎是 100%。

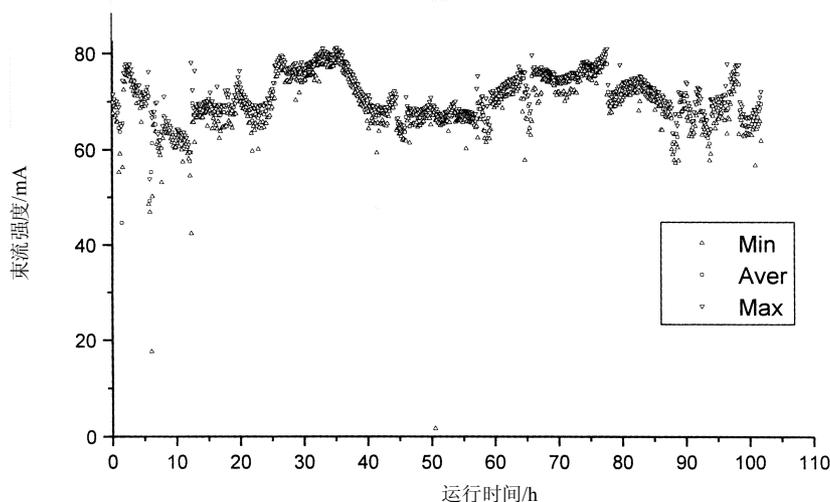


图 8 离子源运行情况图（引出电压 30 kV）

4 结论与今后的工作

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 85%~92%。初步测定的均方根发射度约为 $0.11 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，并通过了 100 小时的运行考验。这些都达到了我们预定的 2002 年指标。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，兄弟单位已在为我们研制一台强流发射测量仪。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。

感谢

丁大钊院士与关遐令教授对我们工作给予了許多有益的指导，北大重离子所为我们研制发射度仪，在此表示深切的感谢。

参考文献

- 1 Wills J S C, Lewis R A, Diserens J, et al. Rev. Sci. Instrum, 1998, 69(1): 1227
- 2 Joseph Sherman, Andrew Arvin, Lash Hansborough, et al. Rev. Sci. Instrum, 1998, 69(2): 1003
- 3 Farchi A, Delaunay M, Melin G. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67(3): 1240
- 4 Celona L, Ciavola G, Gammino S, et al. Rev. Sci. Instrum, 2000, 71(2): 771
- 5 Musil J, Zaclk F. Experimental Study of Intense Electromagnetic Waves in Magnetomotive Plasmas (Academia, Prague, 1975)

ECR ion source for High Current Linac

CUI Baoqun LI Liqiang BAO Yiwen JIANG Weisheng
WANG Rongwen

China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413

Abstract: An intense ECR ion source for ADS (accelerator driven sub-critical system) is described. Two configurations of the source has been developed and tested. 100 mA hydrogen beam has been extracted from the ion source at 30 keV, the proton ratio is greater than 85%, estimated emittance is $0.11 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, the maximum extracted beam density is 340 mA/cm^2 . A 100 hours reliability test of the source is also described.

Key words: ECR, ADS, Emittance, Proton ratio