

# 高性能全永磁 ECR 离子源 LAPECR2 的研制

孙良亭 赵红卫 张子民 王 辉 马保骅 李锡霞 张雪珍 马新文

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 研制了一台体积和重量都较大、设计性能较高的全永磁电子回旋共振 (Electron cyclotron resonance, ECR) 离子源 LAPECR2 (Lanzhou all permanent magnetic ECR ion source No.2)。该离子源将用于中国科学院近代物理研究所 320 kV 高压平台, 为其提供强流高电荷态离子束流。LAPECR2 的研制采用全新的全永磁磁体结构设计, 通过采用高性能的 NdFeB 永磁材料、优化的磁结构设计以及精确的计算, 实测源体的磁场参数能达到高性能 ECR 离子源的设计要求。离子源采用较高频率的 14.5 GHz 微波馈入加热等离子体, 波导直接馈入离子源以增强馈入微波的稳定性与效率。此外, 还大量采用了一些有利于提高离子源高电荷态离子产额的关键技术, 如铝内衬等离子体弧腔、负偏压盘、铝制等离子体电极、三电极引出系统、辅助掺气等。

**关键词** 电子回旋共振离子源, 永磁, 高电荷态

**中图分类号** TL503.3

电子回旋共振 (Electron cyclotron resonance, ECR) 离子源在中国科学院近代物理研究所已经有 17 年的研究历史, 我们自行研制的高性能 ECR 离子源以其优良的性能为兰州重离子加速器装置 (Heavy ion research facility in lanzhou, HIRFL) 运行效率的提高作出了卓越的贡献。这几年, 随着 ECR 离子源与相关加速器技术的发展, 原子物理、材料物理、生物技术在中国科学院近代物理研究所取得了迅速的发展, 原有的实验平台已无法满足实

验研究进一步发展的要求, 为此中国科学院近代物理研究所正在建设一个 320 kV 的高压平台, 一台高电荷态的 ECR 离子源将作为其预注入器, 图 1 为 320 kV 高压平台及其实验终端的分布图。考虑到全永磁 ECR 离子源与电磁型 ECR 离子源相比具有结构简单、易操作、无需大功率电流激励、无需大量高压水冷、运行费用低等优点, 该高压平台采用全永磁 ECR 离子源产生多电荷态离子束流。

图 1 320 kV 高压平台设计平面图  
Fig.1 Layout plot of IMP 320 kV HV platform

中国科学院近代物理研究所 ECR 离子源研究室已有多年的永磁磁体加工经验, 具有较强的永磁离子源研制能力。早在 1997 年, 我们就研制成功了一台高性能强流全永磁质子源<sup>[1]</sup>。2002 年我们还研制成功了一台 14.5 GHz 便携式全永磁 ECR 离子源 LAPECR1, 该离子源主要用来产生诸如  $\text{Ar}^{8+}$ 、 $\text{O}^{6+}$ 、 $\text{C}^{4+}$  等中、低电荷态离子束流, 图 2 是该离子源的实物图。320 kV 高压平台的五个实验终端分别用于不

同的实验研究, 它们分别是原子物理研究、材料物理研究以及生物研究。原子物理研究需要高电荷态离子束流, 材料物理研究需要强流中、低电荷态离子束流, 而生物研究一般采用强流中等电荷态离子束流 (如几十微安的  $\text{C}^{4+}$  等)。因此, 研制的全永磁 ECR 离子源要能够产生强流中、低电荷态离子束流, 同时还能产生高电荷态离子束流以及部分金属离子束流, 如  $\text{Ar}^{14+}$ 、 $\text{Kr}^{20+}$ 、 $\text{Xe}^{27+}$ 、 $\text{Ca}^{14+}$ 、 $\text{Pb}^{27+}$  等,

以满足多种实验研究的要求。对于强流中、低电荷态离子束流的产生,其难度并不大,可以通过增大等离子体体积、提高等离子体密度、增强馈入微波功率以及提高离子束流引出效率来实现。但对于高电荷态离子束流,由广为接受的 ECR 离子源的定标定律<sup>[2]</sup>可知,高频率、高磁场与大磁镜比是产生高电荷态离子的必要条件。因此,该全永磁 ECR 离子源的设计要求是:大体积弧腔、高 RF 频率、高磁场强度、高磁镜比与磁场梯度、较大的 ECR 共振区长度等。据此,我们设计研制了一台 14.5 GHz 的大型全永磁 ECR 离子源 LAPECR2。

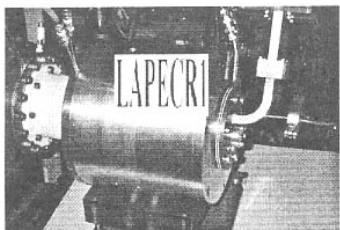


图 2 LAPECR1 实物图  
Fig.2 Photograph of LAPECR1

## 1 ECR 离子源工作原理与全永磁 ECR 离子源

ECR 离子源是利用微波馈入离子源工作区,当馈入的微波频率与电子在磁场中的回旋频率相等,即满足下式:

$$\omega_{\text{ECR}} = \omega_{\text{RF}} = eB/m_e, \quad (1)$$

式中,  $\omega_{\text{ECR}}$  是电子在磁场中的回旋频率,  $\omega_{\text{RF}}$  为馈入微波的频率,  $B$  为所需的离子源的共振磁场,  $m_e$

与  $e$  分别为电子的质量与电量,此时电子将通过共振吸收馈入微波的能量,使电子得以加热,产生高能电子。高能电子与中性粒子(原子或分子)碰撞,通过多次电离碰撞过程产生多电荷态离子。其中部分多电荷态离子将向束流引出区漂移,通过引出电场的加速,引出多电荷态离子混合束流,通过分析磁铁的分析可以得到所需电荷态的离子束流。

ECR 离子源的工作原理如图 3 所示。ECR 离子源的工作磁场被称为“极小  $B$ ”场型,它由轴向磁场与径向多极磁场叠加而成。常用的多极磁场为六极磁场,由六极永磁体产生。传统的 ECR 离子源采用铜制螺线管产生轴向磁场,这样的螺线管需要大功率电流激励,并需要大量辅助铁轭以产生强磁场。近期为了能够达到更高的工作磁场,很多 ECR 离子源的设计采用超导螺线管产生高达 4T 的磁场,以 Catania 的 SERSE 离子源<sup>[3]</sup>为例,它就是以超导螺线管产生轴向磁场,甚至还采用六组超导线圈产生径向磁场。全永磁 ECR 离子源的磁场均由永磁磁体产生,与电磁型 ECR 离子源相比,在运行费用与易操作性方面具有不可替代的优势,因此自 20 世纪 80 年代中期开始就广泛地为国外很多相关实验室所采用。特别是随着 NdFeB 永磁材料技术的发展,全永磁 ECR 离子源的特有优势越来越明显,而其磁场较低的缺点也得到了相应的弥补。我国稀土材料含量丰富, NdFeB 材料价格低廉,因此我们在研制全永磁 ECR 离子源方面有一定的优势。

图 3 ECR 离子源工作原理图  
Fig.3 Operation principle of an ECR ion source

2 LAPECR2 离子源的设计

LAPECR2 离子源的设计简图如图 4 所示。它采用全新的磁场结构设计，轴向磁场由 7 个外径为 520 mm 的大永磁环产生，其中注入端两个大磁环组合成注入主磁环，它与注入辅助磁环组合产生注入磁镜场，磁镜峰值为 1.4 T；引出端两个大磁环组合成为引出主磁环，它与引出辅助磁环组合产生引出磁镜场，磁镜峰值为 1.1 T；中央的调节磁环可有效垫补最小磁镜场场值大小，可将  $B_{min}$  增大至 0.43T。轴向磁镜场的分布曲线如图 5 所示。轴向磁环采用的材料为 N45M 型 NdFeB 材料，其典型磁特性参数为剩磁  $B_r=1.35\text{ T}$ ，矫顽力  $H_{cb}=-1010.6\text{ kA/m}$ 。

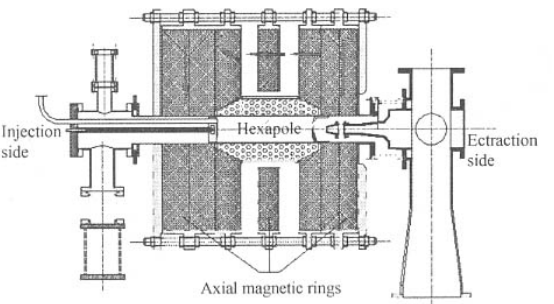


图 4 LAPECR2 设计简图  
Fig.4 Schematic plot of LAPECR2

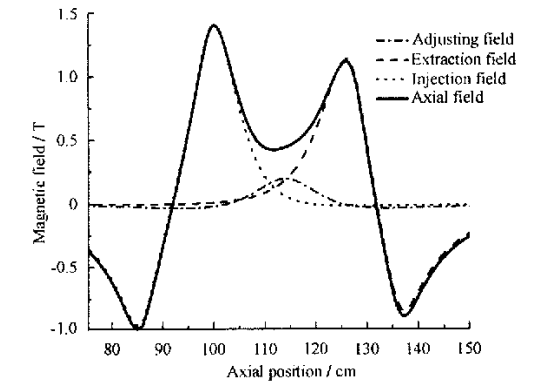


图 5 轴向磁场分布的计算结果  
Fig.5 Calculated result of axial magnetic field

径向磁场采用六极磁场场型，它由六极永磁体产生，在此采用了 Halbach 结构的设计方案<sup>[4]</sup>。六极永磁体沿径向由 36 块不同充磁方向的磁扇块粘结而成，磁体的内径为 74 mm，外径为 160 mm。磁体主要采用的磁性材料为 N45M 型 NdFeB 材料。为了解决磁体部分危险扇块的退磁问题<sup>[4]</sup>，这些扇块采用了 N42SH 材料，其基本磁特性参数为  $B_r=1.29\text{ T}$ ， $H_{cb}=-955\text{ kA/m}$ ，极化矫顽力  $H_{cj}=-1671\text{ kA/m}$ 。六极磁体两端设计成锥形是该离子源磁体设计的一个特点，其目的是一方面增大轴向辅助磁环

的内径，以增强轴向磁场的强度，另一方面尽量保证径向磁场的约束范围，以增强整个工作区的有效径向约束。

离子源设计采用 14.5 GHz 微波加热，最大馈入功率为 1.5 kW。微波功率通过插入等离子体弧腔的矩形波导直接馈入，并加热 ECR 等离子体，预期可有效提高微波的馈入效率与稳定性。双层水冷结构的等离子体弧腔采用不锈钢材料，以增强弧腔的刚性。弧腔内壁衬有铝筒，以增加二次电子的产额，弧腔的外径为 74 mm，内径为 67 mm，弧腔的有效长度为 260 mm。离子源还采用了优良的真空系统设计、负偏压盘、铝制等离子体电极、三电极引出系统等先进的 ECR 离子源技术，以提高高电荷态离子的产额与引出效率。

3 LAPECR2 的研制与结果

LAPECR2 离子源是体积和重量都较大、设计性能较高的一台全永磁 ECR 离子源。该离子源在解决设计难题之后，就要解决磁体的制造与装配问题。磁体各部分磁环的磁化方向多样化、组成磁环的磁块的数量繁多、磁环间的作用力极强(最大可达 9t)、磁体自重很大(达 0.9t)、安装所要求的精度较高等，这些 LAPECR 离子源的特点都会给磁体的安装带来极大的难度。目前这些关键难题均已得到解决，离子源的源体正在进行组装。

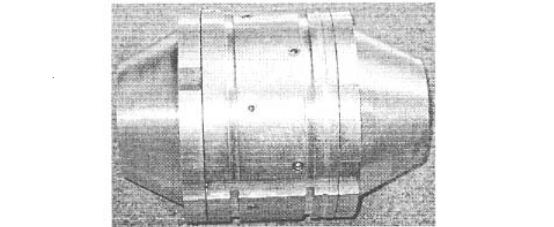


图 6 LAPECR2 六极永磁体实物图  
Fig.6 Photograph of the hexapole of LAPECR2

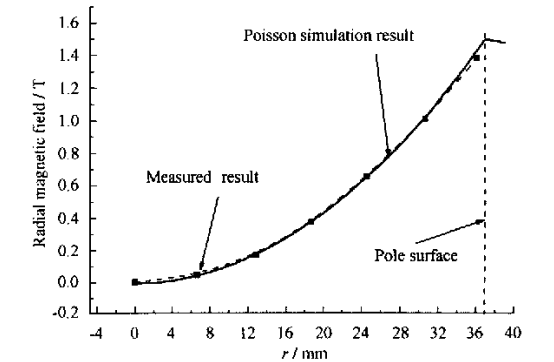


图 7 径向磁场分布的计算与测量结果  
Fig.7 Calculated and measured results of the radial magnetic field

我们已经成功地研制了六极永磁体部分，其实物图如图 6 所示。经过磁特性参数测量，其基本磁特性参量与计算的结果一致。图 7 所示为径向磁场沿径向的分布曲线，可以看出测量得到的曲线与计算结果基本一致，在弧腔内壁（ $r=33.5\text{ mm}$  处）产生的最大径向磁场可达  $1.21\text{ T}$ 。沿六极永磁体内壁

的周向测量了磁场的均匀度，磁极面最大磁场的非均匀性小于  $4\%$ 。

表 1 为 LAPECR2 和 LECR2<sup>[5]</sup> 的主要设计参数，通过比较不难发现两者的主要设计参数相近，可以预测 LAPECR2 的运行性能将与 LECR2 的一些主要性能相接近。

表 1 LAPECR2 与 LECR2 主要设计参数的对比

Table 1 Comparison of main parameters of LAPECR2 and LECR2

| 参数 Parameters                       | LAPECR2                       | LECR2                        |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 轴向磁镜峰 Injection peak / T            | 1.4, 1.1                      | 1.5, 1.1                     |
| 轴向最小磁场 Minimum B / T                | 0.43                          | 0.39                         |
| 弧腔内壁磁场 Radial field / T             | 1.2                           | 1.0                          |
| 工作频率 Frequency /GHz                 | 14.5                          | 14.5                         |
| 微波馈入模式 RF feeding mode              | 波导直接馈入 Off-axis feeding       | 同轴馈入 Coaxial feeding         |
| 磁镜长度 Mirror length /mm              | 260                           | 300                          |
| 共振区长度 ECR length /mm                | 92                            | 86                           |
| 等离子体弧腔内径 Chamber inner diameter /mm | 67                            | 70                           |
| 弧腔材料 Chamber material               | 316L 不锈钢 316L stainless steel | 316 不锈钢 316L stainless steel |
| 引出高压 Extraction high voltage /kV    | 25—30                         | 25                           |

4 小结

设计、制造了一台高性能  $14.5\text{ GHz}$  全永磁 ECR 离子源——LAPECR2，该离子源为当前世界上体积和重量都较大、设计性能较高的全永磁 ECR 离子源。该离子源主要用于产生多电荷态离子束流，特别是高电荷态离子，为中国科学院近代物理研究所的  $320\text{ kV}$  高压平台提供良好的初始离子束流注入。该离子源采用了多种有利于提高高电荷态离子产额的关键技术，以提高离子源的性能。LAPECR2 的另一设计特色就是离子源的磁体部分相对于等离子体弧腔是可移动的，以增强产生高电荷态的能力<sup>[6]</sup>。该离子源自 2003 年初开始研制，已于 2005 年 6 月开始在线调试。

参考文献

1 丁俊章, 赵玉彬, 刘占稳, 等. 核技术, 2001, 24(1): 43—46

DING Junzhang, ZHAO Yubin, LIU Zhanwen, *et al.* Nucl Tech, 2001, 24(1): 43—46

2 Geller R. Proceedings of 15th int. workshop on ECR ion sources, Jyväskylä, Finland, 2002. 1—12

3 Ludwig P, Briand P, Broug F, *et al.* Proceedings of 13th int. workshop on ECR ion sources, Texas USA, 1997. 119—122

4 孙良亭, Hitz D, 赵红卫. 高能物理与核物理, 2004, 28(6): 644—649

SUN Liangting, Hitz D, ZHAO Hongwei. High Energy Phys Nucl Phys, 2004, 28(6): 644—649

5 赵红卫, 刘占稳, 张雪珍, 等. 高能物理与核物理, 1999, 23(7): 717—722

ZHAO Hongwei, LIU Zhanwen, ZHANG Xuezhen, *et al.* High Energy Phys Nucl Phys, 1999, 23(7): 717—722

6 SUN Liangting, ZHAO Hongwei, ZHANG Zimin, *et al.* Rev Sci Instr, 2004, 75(5): 1514—1516

## Development of a high performance all-permanent magnetic ECR ion source

SUN Liangting ZHAO Hongwei ZHANG Zimin WANG Hui

MA Baohua LI Xixia ZHANG Xuezheng MA Xinwen

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

**Abstract** An all-permanent magnetic electron cyclotron resonance (ECR) ion source LAPECR2 (Lanzhou all-permanent ECR ion source No.2) is being developed in Lanzhou. This ion source is believed to be a larger and heavier all-permanent magnetic ECR ion source in the world, which provides very high magnetic field inside the working volume. This ion source will work on the IMP (Institute of Modern Physics) 320kV high voltage platform and provide intense high charge state ion beams for the successive experimental terminals. Many innovative methods have been adopted in the magnet design of LAPECR2. Due to the adoption of high remanence NdFeB material, optimum design and accurate calculation, the measured magnetic parameters are well up to the requirements of a high performance 14.5GHz ECR ion source. An off-axis rectangular wave-guide is used to feed 14.5GHz microwave inside the plasma chamber to heat the plasma. The adoption of off-axis RF feeding method will make the plasma more stable and the RF power feeding more efficient. Additionally, many tricky techniques such as the aluminum liner inside the plasma chamber, the biased-disc, the aluminum plasma electrode, the triode extraction system, the addition of auxiliary gas, etc, are employed to increase the production efficiency of high charge state ions.

**Key words** ECR ion source, Permanent magnet, High charge state

CLC TL503.3