

一台 14.5GHz 新型高磁场高电荷态 ECR 离子源*

赵红卫 刘占稳 张雪珍 郭晓虹 高级元 张子民
袁平 张汶 雷海亮 曹云 冯玉成 李锦钰
王辉 马保华 王义芳 魏宝文

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 自行研制成功一台 14.5GHz 新型高磁场高电荷态电子回旋共振 (ECR) 离子源. 描述了该离子源结构特点、参数优化及其磁场分布, 并给出了调试测量结果. 该离子源轴向磁镜场在轴线上的最高磁场可达 1.5T, 六极永磁体在弧腔内表面磁场可达 1.0T. 经初步调试, 可得到 $O^{7+} 140\mu A$, $Ar^{11+} 185\mu A$, $Xe^{26+} 50\mu A$. 所得结果与 1998 年国际上最好的 ECR 离子源进行了比较.

关键词 ECR 离子源 高电荷态 高磁场 微波 束流强度

1 引言

ECR 离子源是产生强流高电荷态离子束最有效的装置. 近几年高电荷态 ECR 离子源的研究和研制在国际上非常活跃, 不断有新的结果和新的 ECR 离子源出现. 目前高电荷态 ECR 离子源主要的发展趋势是向高微波频率、高磁场方向发展, 以提高电荷态和高电荷态离子产额.

在兰州重离子研究装置 (HIRFL) 上, 我们利用 ECR 离子源作为注入器 (扇聚焦回旋加速器) 的外注入离子源, 以提供强流高电荷态离子束. 中国科学院近代物理研究所 (IMP) 现有两台 10GHz 高电荷态 ECR 源正在运行^[1], 主要提供中等电荷态离子束, 例如 O^{6+} , Ar^{8+} 等. 为进一步满足兰州重离子加速器和已立项的冷却储存环的要求, 需要 ECR 离子源能够提供更高电荷态的强流离子束, 为此我们又研制了一台 14.5GHz 新型高磁场高电荷态 ECR 离子源. 该离子源的主要目标是产生强流高电荷态离子束, 特别是较重的离子. 本文重点描述了该离子源的结构特点、参数的优化设计及其磁场分布, 并将调试测量结果和国际上最好的 ECR 离子源作了比较.

1998-10-5 收稿

* 中国科学院设备改造经费和中国科学院留学回国人员择优支持基金资助

2 离子源的设计、结构及磁场分布

ECR 离子源是利用电子在磁场中的拉摩回旋频率等于馈入的微波频率时发生共振现象, 电子被横向微波电场加速成高能电子, 然后与原子碰撞电离而产生 ECR 等离子体. ECR 等离子体又受到由轴向磁镜场和径向多极场构成的三维“最小 B_{\min} ”磁场构形的稳定约束. 经约束的 ECR 等离子体再受到高能电子的逐级游离而产生高电荷态离子, 高电荷态离子由热电子形成的空间电荷场(势阱)约束, 逃离约束的高电荷态离子最终经引出系统引出.

为了提高高电荷态离子的产额, 该离子源在设计上采用了目前对 ECR 离子源的最新理解和经验. 主要考虑了以下几个方面:

- (1) 尽可能地提高轴向磁镜场, 以得到较高的磁镜比, 从而可加强磁约束, 获得较高的等离子体密度;
- (2) 在条件允许的情况下, 提高六极永磁体在弧腔内表面的磁场强度, 并使相同半径上的六极场在轴向的分布尽可能地均匀;
- (3) 设法增大等离子体的体积, 采用大弧腔;
- (4) 特别注重共振区和引出区磁场分布;
- (5) 重视各参数的优化设计. 在轴向磁镜场、六极永磁体、弧腔的体积、线圈电功率、微波的馈入和离子的引出之间做优化选择.

研制的高电荷态 ECR 离子源结构示意图如图 1 所示. 轴向磁镜场是由二组线包和周围的软铁磁轭共同产生. 每一组线包由六饼双层线圈构成, 线包常用电流 1 000A, 二组线包电功率消耗约为 80kW, 由两台 1 200A 高稳定度直流电源供电. 磁镜场在轴线上的最

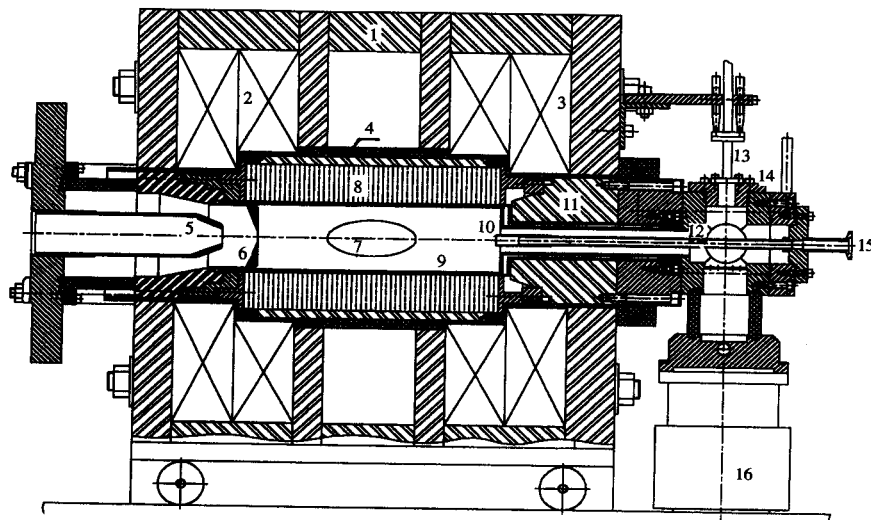


图 1 14.5GHz ECR 离子源

1. 铁轭, 2. 引出轴向线圈, 3. 注入轴向线圈, 4. 绝缘环, 5. 引出电极, 6. 等离子体电极,
7. 等离子体, 8. 六极永磁体, 9. 等离子体弧腔, 10. 石英管, 11. 注入锥环, 12. 同轴内管, 13. 波导管, 14. 微波窗, 15. 进气口, 16. 涡轮分子泵.

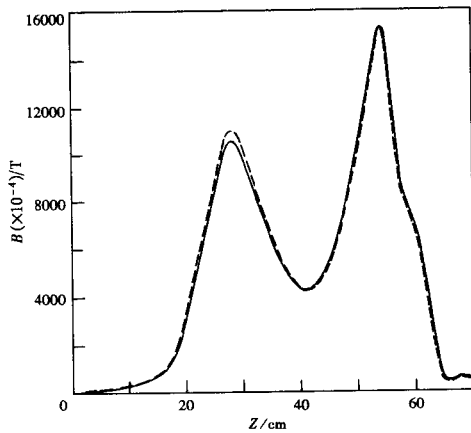


图2 磁镜场在轴线上的分布

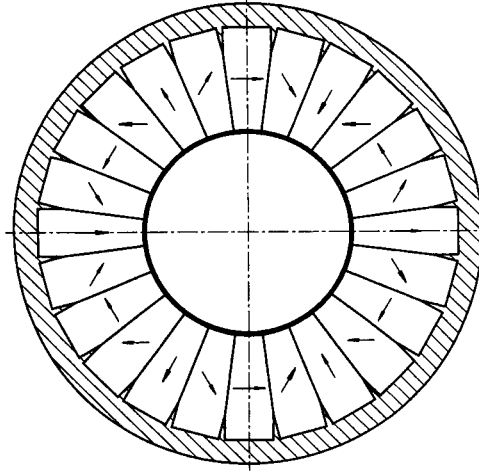


图3 六极永磁体截面图

高磁场可达 1.5T, 其分布由 POISSON 程序计算得到, 计算和实际测量的磁镜场在轴线上的分布如图 2 所示, 图中实线为计算结果, 虚线为测量结果, 注入端线圈电流为 1050A, 引出端线圈电流为 950A, 可看出计算和实测符合得比较好. 六极永磁体是由 24 块梯形 NdFeB 永磁铁粘结装配而成. 其截面如图 3 所示, 每相邻两块的磁化方向相差 60° , 六极场在极面上的磁场约为 1.25T. 等离子体弧腔是一个微波多模谐振腔, 传统的 CAPRICE 型 ECR 离子源弧腔内径为 65mm, 长为 160mm, 为了提高高电荷态离子产额, 改进了多模谐振腔的尺寸, 有意识地增加了弧腔的体积, 其内径为 70mm, 长为 300mm, 弧腔本身是由 316L 不锈钢管做成双层, 中间通冷却水以冷却永磁体. 微波功率是由一台 14.5GHz 2.5kW 的微波机产生, 微波经陶瓷微波窗由同轴线馈入弧腔内.

3 离子源的调试及结果

该离子源整体装配好后, 即开始了初步调试. 在整个调试过程中, 重点优化的束流是 O^{7+} , Ar^{11+} 和 Xe^{26+} , 这些高电荷态束流也是 HIRFL 加速器所急需的.

为提高高电荷态离子束流强度, 在该离子源上用冷阴极电子枪代替了 ECR 源第一级. 在调试中发现, 引出电极和引出端铁环之间的潘宁放电现象较严重, 致使负载电流较大, 真空持续变坏, 束流不稳, 且微波功率难以加高. 在引出电极和引出端铁环之间增加了一层绝缘隔离后, 即解决了此问题. 此后, 当微波功率升至 600—800W 时, 可得到 $100\mu A$ 的 O^{7+} 束.

为了进一步提高高电荷态离子产额, 在等离子体弧腔体中放入了一个薄铝筒, 并将等离子体电极大幅度向中心推进, 即利用我们新发现的 ECR 源的一种新工作模式^[1], Ar^{11+} 束流强度增加了 25%. 在 600—800W 微波功率下, 可达 $185\mu A$. 在新工作模式下, 离子源引出端真空约为 $4 \times 10^{-5} Pa$, 和传统模式相比, 进气明显减小.

在优化 O^{7+} 和 Ar^{11+} 束时, 曾用氦气和氧气作为离子源支撑气体, 通过掺气效应试图提高高电荷态离子产额, 但效果不甚明显. 对于 Ar^{11+} , Ar^{12+} 束, 虽没有明显的掺气效应,

但在调试和优化 Ar^{11+} , Ar^{12+} 之前,若先用氧等离子体烘烤离子源数小时,再调试 Ar^{11+} 或 Ar^{12+} 束时,会发现其束流强度有明显的增大. 主要原因是铝筒子表面经氧化后产生的氧化铝具有较高的二次电子发射系数,会产生更多的二次电子;另一方面,弧腔内残余的少量氧原子使掺气效应亦起了作用. 在优化 Ar^{11+} 束时,所得到的多电荷态谱如图 4 所示.

在优化 Xe^{26+} 时,用丰度为 99% 的 ^{129}Xe . 调氙束时,用氧气作为支撑气体,掺气效应非常明显. 经优化可得到 $\text{Xe}^{26+} 50\mu\text{A}$, $\text{Xe}^{27+} 25\mu\text{A}$, $\text{Xe}^{28+} 12\mu\text{A}$. 优化 Xe^{26+} 时所得到的多电荷态谱如图 5 所示.

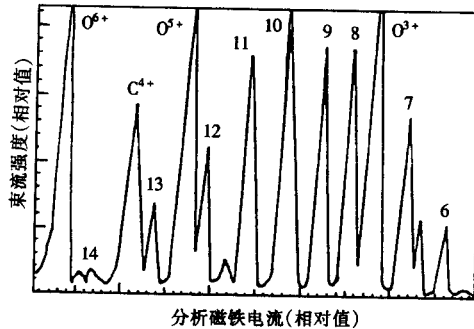


图4 优化 Ar^{11+} 时的多电荷态谱

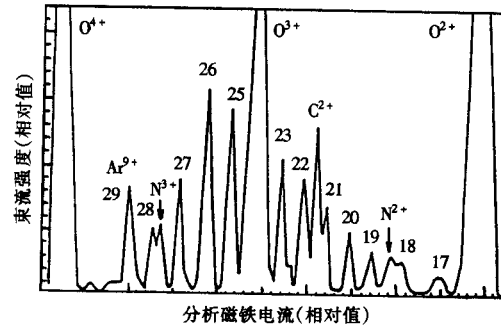


图5 优化 Xe^{26+} 时的多电荷态谱

以上调试结果是离子源在下列条件下得到的. 引出高压 15—18kV, 等离子体电极孔径 9mm, 分析磁铁后的限制狭缝水平和垂直方向的变化范围为 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 到 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$. 法拉第筒加负偏压 100V 抑制二次电子.

4 与国际上著名的高电荷态 ECR 离子源结果比较及分析

表 1 给出了我们这台 14.5GHz 新 ECR 源 (IMP ECR3) 与 1998 年国际上公认的最好的高电荷态 ECR 源典型离子束流强度比较, 其中法国 Grenoble 1.4T CAPRICE^[2], 法国 GANIL ECR4M, 日本 RIKEN 18GHz ECR 源^[3] 与我们这台离子源在结构等方面较相近, 属结构紧凑型 (即同类型) ECR 源. 美国 LBL 的 AECR-U 是利用双频微波加热等离子体^[4], 从径向抽真空, 属结构、体积较庞大的另一类 ECR 源. 意大利 CATANIA 的 SERSE 是利用超导线圈^[5] 的体积非常庞大的 ECR 源.

表1 ECR源典型离子束流强度比较(μA)

ECR源	LBL AECRU	CATANIA SERSE	Grenoble CAPRICE	GANIL ECR4M	RIKEN ECRIS	IMP ECR3
RF/ GHz	14+10	14.5	14.5	14.5	18	14.5
O^{7+}	306	225	180	142	130	140
Ar^{11+}	270	257	190	200	300	185
Kr^{19+}	79		40		50	50
Xe^{26+}		70	35	12	45	50
Xe^{28+}	21	30	10	3		12

从表 1 中可看出,我们这台 ECR 源在较重元素的高电荷态方面,结果较好,有些离子的束流强度已达到同类型 ECR 源的最好水平,但对较轻的离子象 O^{7+} , Ar^{11+} 等还有一定的差距,主要原因如下:

(1) 该台离子源设计时,主要的目标是提高较重元素的高电荷态离子产额;

(2) 从多电荷态谱可看出,离子源中碳的成份过高,抑制了掺气效应. 而掺气效应可大幅度提高高电荷态离子产额;

(3) 和国外 ECR 源试验台相比,我们的传输效率只有 50%, 而国外大部分的传输效率都在 80% 左右.

从以上分析可看出,我们需进一步提高系统真空,降低碳的含量,并需改进试验台,提高多电荷态离子束的传输效率. 另外,在超高电荷态离子产额方面, 我们的离子源与国外最好的相比,还有一定的差距,须进一步改进提高. 利用双频微波加热等离子体是其中一个有效的方法. 这台 ECR 离子源采用双频微波加热及金属离子的产生正在试验之中.

本工作得到中国科学院近代物理研究所科技处领导的大力支持,同时也得到条件室、磁场室、真空室、VAX 计算机室、技条处和教外处等部门的大力协作和帮助,在此作者表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Liu Zhanwen, Zhang Wen, Zhao Hongwei et al. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2): 685—687
- 2 Hitz D. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67(2):1280—1283
- 3 Nakagawa T, Arje J, Miyazawa Y et al. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2):637—639
- 4 Xie Z Q. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2):625—629
- 5 Ludwig P, Bourg F, Briand P et al. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2):653—655

A 14.5GHz New ECR Ion Source With High Charge State and High Magnetic Field*

Zhao Hongwei Liu Zhanwen Zhang Xuezhen Guo Xiaohong Gao Jiyuan
Zhang Zimin Yuan Ping Zhang Wen Lei Hailiang Cao Yun Feng Yucheng
Li Jinyu Wang Hui Ma Baohua Wang Yifang Wei Baowen

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

Abstract A 14.5 GHz ECR (Electron Cyclotron Resonance) ion source with high charge state and high magnetic field was designed and built. The structure characteristics, optimization design of parameters and magnetic field distribution are described, and the commissioning results are given. The maximum axial magnetic field on the axis is 1.5 Tesla. The hexapole field on the chamber surface is 1.0 Tesla. After initial commissioning, the ion source can produce typically O^{7+} 140 μA , Ar^{11+} 185 μA and Xe^{26+} 50 μA . The results from this new ion source are compared with the best ECR ion sources over the world in 1998.

Key words ECR ion source, high charge state, high magnetic field, microwave, beam intensity

Received 5 October 1998

* Supported by Equipment Upgrading Foundation of Chinese Academy of Sciences