

高电荷态 ECR 离子源——LECR3*

张子民¹⁾ 赵红卫 张雪珍 郭晓虹 李锡霞 李锦玉 冯玉成
王辉 马保华 高级元 曹云 孙良亭 马雷

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 研制成功了一台新的高电荷态 ECR 离子源,该离子源主要为原子物理实验提供各种高电荷态离子束流,是基于中国科学院近代物理研究所 14.5GHz 高电荷态 ECR 离子源设计建成的,同时在该离子源中应用多种有利于提高束流强度的技术,设计时考虑到采用双频加热,试图通过试验双频加热模式来提高高电荷态离子的产额,并设计建造了一套束流聚焦分析系统,以提高电荷态分辨率和束流传输效率.

关键词 双频加热 电子回旋共振 束流强度 束流传输效率

1 引言

电子回旋共振(ECR)离子源被认为是能提供高电荷态离子束的最有效装置. 1989 年,兰州重离子加速器国家实验室从法国引进了一台 10GHz 高电荷态 ECR 离子源,从而开始了 ECR 离子源的研究. 经过多年的努力,在 1995 年研制成功了我国第一台高电荷态 ECR 离子源,微波频率为 10GHz,我们称它为 LECR1(兰州第一台 ECR 离子源)^[1]. 1997 年又研制成功一台 14.5GHz 高电荷态 ECR 离子源^[2],被命名为 LECR2(兰州第二台 ECR 离子源). 近年来,随着加速器技术的进步和核物理研究的不断深入,对离子源性能的要求也越来越高,特别是原子物理实验研究的全面展开,需要建造新的性能更好的 ECR 离子源. 我们根据现有的水平,结合国际上 ECR 离子源的发展趋势,以 LECR2 为原型,设计建造了一台新的高电荷态离子源——LECR3(兰州第三台 ECR 离子源),该离子源采用两种频率(10 + 14.5GHz)的微波加热,并为之设计了一套新的束流聚焦分析系统. 在建成后,各项束流指标均超过 14.5GHz 离子源,得到了 235euA 的 O^{7+} , 240euA 的 Ar^{11+} 和 90euA 的 Xe^{26+} , 在近半年的时间里为原子物理实验提供了几十种

不同种类、不同能量的高电荷态离子束流,累计供束时间近 1000h.

2 ECR 离子源工作原理和多频加热机制^[3,4]

ECR 离子源利用微波加热等离子体,电子从微波中获得能量而形成高能电子,高能电子游离原子生成 ECR 等离子体,等离子体又受到最小磁场 B_{min} 的约束,被约束的等离子体再继续经受高能电子的逐级游离而生成高电荷态离子,离子经高压引出形成离子束. 微波功率经波导或同轴线传输到等离子体区,当微波频率等于电子的回旋运动频率时,即

$$\omega_{ECR} = \omega_{RF} = eB/m_0, \quad (1)$$

其中 ω_{ECR} 是电子在磁场中的回旋频率, ω_{RF} 是入射的微波频率, B 是离子源共振磁感应强度, m_0 和 e 分别是电子的质量和电量,部分电子将发生对微波功率的共振吸收,从而获得高温等离子体. 对于固定的 ω_{RF} , B 也确定. 由轴向磁场与径向磁多极场(常采用六极场)形成的最小 B_{min} 场型为电子回旋共振加热提供了若干封闭的 ECR 加热面. 用在

2002-12-13 收稿

* 兰州重离子加速器国家实验室资助

1) E-mail: zzm@impcas.ac.cn

ECR 离子源上的微波频率主要有 2.45, 10, 14.5 和 18GHz 等, 频率越高, 效果越显著. 目前 ECR 离子源已由单一频率加热向双频甚至是更多种频率加热模式转变. 当用单频微波注入时, 在离子源等离子体内产生了一个椭球壳状的 ECR 加热面, 电子在磁镜场间反射, 每往返一个来回被共振加热 4 次. 如果有 n 种频率的微波馈入到等离子体中, 则会形成 n 个 ECR 加热面, 电子每往返一次会被加热 $4n$ 次, 显然多频加热大大提高了电子的加热效率. 图 1 给出了有 4 个 ECR 加热面的多频 ECR 离子源工作原理示意图, 每个加热面对应一种微波频率, 且有

$$\omega_{RF1} < \omega_{RF2} < \omega_{RF3} < \omega_{RF4} \quad (2)$$

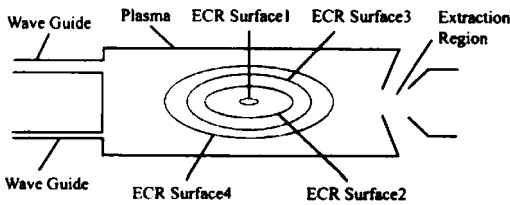


图 1 形成 4 个 ECR 加热面的多频 ECR 源示意图

3 LECR3 离子源的设计

图 2 是我们设计的双频加热 ECR 离子源的结构简图, 它的设计以 LECR2 为基础, 部分参照 AECR-U^[4]. 轴向磁场由两组线包与它们周围的软铁磁轭产生, 每个线包组包括 6 个双层的有两种内径的扁平线圈, 这两组线包所消耗的电功率约为 90kW, 由两台 1300A/80V 的直流稳流电源供电. 轴向磁场峰值分别为 1.7 和 1.1T, 轴向磁场的分布情况如图 3 所示. 径向六极场由 36 块安装在铁筒内的梯形钕铁硼永磁块提供, 在弧腔内壁上的六极场最大可达 1.0T. 等离子体弧腔是铝制的, 并采用双层结构, 夹层内通冷却水以带走弧腔内微波产生的热量, 弧腔内壁直径为 76mm, 有效长度 300mm. 该离子源采用 10 + 14.5GHz 双频加热模式, 微波功率用矩形

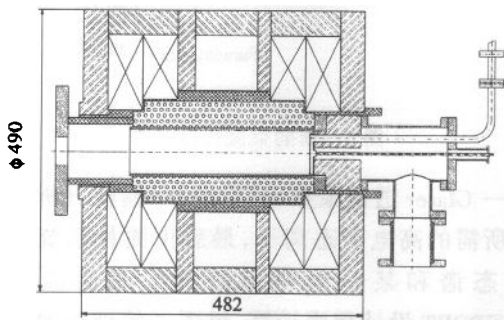


图 2 LECR3 结构简图

波导管经由注入端馈入等离子体, 设计引出高压上限为 30kV, 工作范围在 10 ~ 25kV.

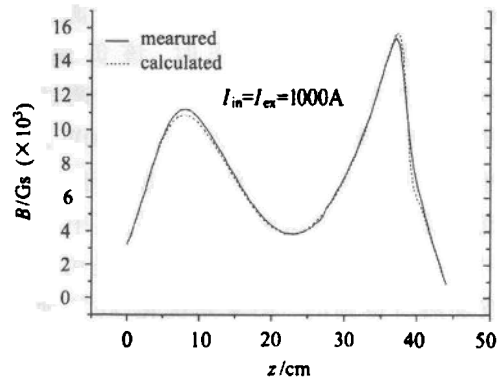


图 3 LECR3 轴向磁场在中心线上的分布

虽然 LECR3 的整体设计与 LECR2 很接近, 但两者之间却有许多明显的不同, 表 1 中列出了两者设计参数之间的对比. 由于设计了较高的轴向磁场, LECR3 的等离子体约束能力比 LECR2 的要好得多, LECR3 在保证其弧腔内壁的最大六极磁场强度不变的情况下, 相比 LECR2 增大了弧腔内径, 这样能有力地证明大体积弧腔对高电荷态离子的产生是否有益. 在微波馈入方式上, LECR3 采用了轴向波导直接馈入方式来代替 LECR2 的同轴馈入方式, 这样做是为了对两种馈入系统进行对比. 弧腔的材料用铝代替了 LECR2 中的 316L 型不锈钢材料, 以充分利用 Al_2O_3 二次电子发射能力强这一特点. 在注入端磁镜场峰值位置放置了一个负偏压铝盘, 工作时相对于腔体加一负偏压 (-50 至 -200V), 也就是通常所说的冷阴极电子枪^[5], 向等离子体内部注入二次电子. 通过以上的技术措施, 希望能很有效地提高该离子源各项束流指标.

表 1 LECR3 与 LECR2 各项设计参数的对比

参 数	LECR3	LECR2
轴向磁场峰值/T	1.7, 1.1	1.5, 1.0
弧腔内表面磁场/T	1.0	1.0
六极永磁材料	N45M 钕铁硼	N42 钕铁硼
微波频率/GHz	14.5 + 10	14.5
微波馈入方式	波导直接插入	同轴馈入
弧腔有效长度/mm	300	300
弧腔内径/mm	76	70
弧腔材料	铝	316L 不锈钢

4 离子源调试

在 LECR3 调试之初, 我们用单一频率 (14.5GHz)

微波来加热等离子体,微波发射机的最大输出功率为 2.2kW,调试了氧、氩、氙等元素,并用氮或氧作为相应的支撑气体.在实验过程中,离子源负偏压的作用非常重要,正常工作时,该负偏压值为 -50 到 -100V 左右.经过一个多月的调试共调出 12 种离子,所用微波功率在 800W ~ 1500W 之间.从表 2 可以看出该离子源的结果明显好于 LECR2,部分束流结果已经接近国际最高水平,其中 SERSE 是意大利的一台超导离子源,它的结果是由两种频率的微波加热所得到的.图 4 是优化 Xe²⁶⁺ 所得到的电荷态谱图.

表 2 LECR3 和 LECR2 以及国际上最好的几台 ECR 离子源的结果 (eμA)

离子种类	LECR3 14.5GHz	LECR2 14.5GHz	RIKEN 18GHz	LNS SERSE 18 + 14.5GHz
O ⁶⁺	780	610		
O ⁷⁺	2235	140		
Ar ¹¹⁺	240	180		
Ar ¹²⁺	140	105	180	200
Ar ¹⁴⁺	30	12		
Xe ²⁰⁺	160		200	200
Xe ²⁶⁺	90	50	50	78
Xe ²⁸⁺	33	12		
Xe ³⁰⁺	6			

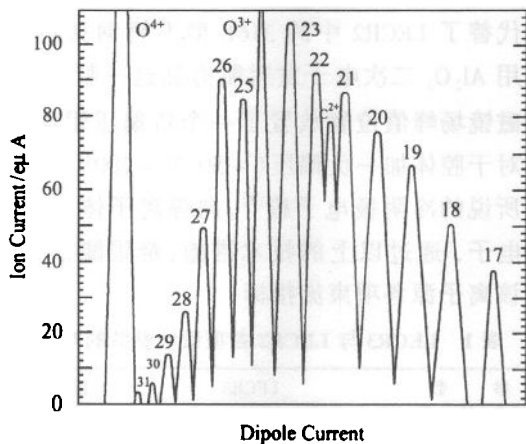


图 4 优化 Xe²⁶⁺ 时的电荷态谱图

由表 2 可知,LECR3 的性能明显好于 LECR2.分析原因,可总结为:

1) 轴向磁场的提高增强了对等离子体的约束,有利于高密度等离子体的形成.

2) 在调试的过程中,我们发现当微波功率低于 800W 时,两个离子源的状态没有明显的差异,但当功率超过 1000W 时,LECR3 的状态要明显好于 LECR2,这说明用波导直接插入的方式更有利于离

子源在高功率状态工作,而用同轴方式馈入微波的 LECR2 在功率超过 900W 后显得很不稳定,再增加微波功率时束流反而变小;另外,从表 1 可知 LECR3 的弧腔体积大于 LECR2 的,两离子源的六极径向磁场在弧腔内表面处相等,这也证明了增大弧腔体积有利于高微波功率的馈入.

3) LECR3 的弧腔是用铝做的,LECR2 的弧腔是用不锈钢做的,内层加了一个薄铝筒;另外,LECR3 上的负偏压电极是一个面积很大的铝盘,而 LECR2 的负偏压电极是一个细长的紫铜管,在 LECR3 上的所有改进都有利于提高离子源的性能.

4) 在束流引出上也作了一些改进,与 LECR2 相比,LECR3 的引出区少了一个铁环,这样既增大了引出区径向尺寸,有效地减弱了这里的潘宁放电,也缩短了吸极的长度,从而提高了引出效率.

在调试过单一频率后,我们试着用双频来加热,但是没有达到预期的效果,最好的结果与单频加热几乎一样,也就是说多馈入的 10GHz 的微波功率并没有起什么作用.在调试过程中我们发现磁场的位形是至关重要的,该离子源的磁场分布不能同时满足两种频率的微波加热的要求,所以应该作相应的改进.目前该离子的双频加热磁场场形正在计算和优化的过程之中.

5 聚焦和分析系统

由于 LECR3 设计引出的总束流强度将达到 5mA,所以我们为 LECR3 设计了一套新的束流传输系统,如图 5 所示,多电荷态混合离子束引出后,首

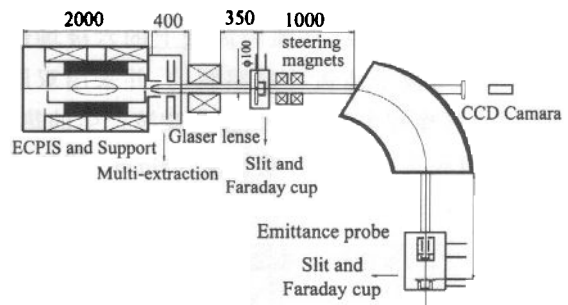


图 5 新的束流传输系统

先由一 Glaser 透镜聚焦,然后经 90°偏转分析磁铁分析出所需的高电荷态离子,最后由测量系统得到多电荷态谱和某一电荷态的离子束流强度.经 TRANSPORT 设计程序计算,得到了较理想的束流包络,如图 6 所示,Glaser 透镜尽量靠近离子源,以便

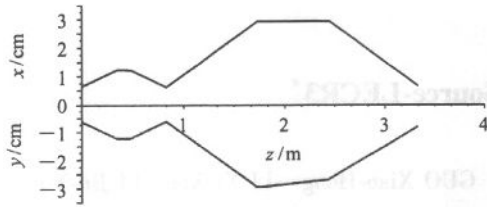


图 6 水平和垂直方向束流包络

使离子束刚引出即被聚焦,在焦点处形成较小的双腰,然后以此为物点,按点到点成像原理,在 90° 偏转分析磁铁的焦点处形成另一双腰. 为提高电荷态分辨率,在分析磁铁的物点和像点分别放置水平和垂直方向宽度可调的限制狭缝,该传输线的设计电荷态分辨率为 $1/70$. 在调试离子源的过程中我们也测试了这套系统的束流传输效率

$$\eta = \frac{\sum I_n}{I_0} \times 100\%, \quad (3)$$

其中 η 表示束流传输效率, I_n 表示法拉第筒测到的每一种离子的束流强度, I_0 表示从离子源中引出的总束流,在计算时用离子源引出高压电源的放电电流减去漏电流来表示 I_0 . 在实验中以氧、氩、氙为工作气体,分别测试了总束流为 2mA 和 4mA 时的束流传输效率. 从表 3 给出的测试结果可知,离子质量越大、引出的总束流越强,则束流传输效率越低,这

是由空间电荷效应引起的,所以研究并降低 ECR 离子源束流传输中的空间电荷效应是必要的.

表 3 束流传输效率测试结果

Element	I_0 /mA	$\sum I_n$ /mA	η (%)
O(O^{7+})	2	1.84	92
O(O^{6+})	4	2.7	68
Ar(Ar^{13+})	2	1.4	70
Ar(Ar^{11+})	4	2.2	55
Xe(Xe^{29+})	2	1.1	55
Xe(Xe^{26+})	4	1.9	48.5

6 小结

设计建造了一台全新的高电荷态 ECR 离子源——LECR3,该离子源的目标是产生强流高电荷态离子,设计上应用了多种提高高电荷态离子产额的关键技术:采用了高磁场模式;在保证弧腔内壁处径向磁场的前提下尽量增大弧腔的内径;使用铝制等离子弧腔;应用负偏压技术;新的微波馈入方式;设计了一套高传输效率、高分辨率的束流传输线. 经过调试和优化,其结果达到了国际同类离子源最好水平,部分束流指标达到国际最好水平. 目前该离子源已经投入原子物理实验平台供束近两年.

参考文献 (References)

- LIU Zhan-Wen et al. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8 (2):310 (in Chinese)
(刘占稳等. 强激光与粒子束, 1996, 8(2):310)
- ZHAO Hong-Wei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23 (7):717 (in Chinese)
(赵红卫等. 高能物理与核物理, 1999, 23(7):717)
- Geller R, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1976 NS-23(2):904
- XIE Z Q, LYNEIS. CM, "Performance of the Upgraded LBNL AECR Ion Source", Proc. of the 13th Inter. Workshop on ECRIS, Texas A & M University, USA, 1997, 16
- LIU Zhan-Wen et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1996, 20 (10):957 (in Chinese)
(刘占稳等. 高能物理与核物理, 1996, 20(10):957)

High Charge State ECR Ion Source-LECR3*

ZHANG Zi-Min¹⁾ ZHAO Hong-Wei ZHANG Xue-Zhen GUO Xiao-Hong LI Xi-Xia LI Jin-Yu
FENG Yu-Cheng WANG Hui MA Bao-Hua GAO Ji-Yuan CAO Yun SUN Liang-Ting MA Lei

(Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract A new Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source, which was named LECR3 (Lanzhou Electron Cyclotron Resonance ion source no.3) and expected to provide highly charged ion beams for atomic physics research, has been constructed and under commissioning. The design of this ion source is based on the IMP 14.5GHz ECR ion source, which was named LECR2 (Lanzhou Electron Cyclotron Resonance ion source no.2). In the new source it was desired with double RF heating by inserting waveguide directly and aluminum chamber. Furthermore, the volume of the plasma chamber is larger than that of LECR2 so as to increase the RF power and increase beam intensity for highly charged ions. But the hexapole field on the chamber wall is kept the same value in order to compare with the performance of LECR2 ion source. The results of this ion source are obviously better than LECR2. We obtained 780 e μ A of O⁶⁺, 235e μ A of O⁷⁺ and 240e μ A of Ar¹¹⁺ at 1100 watts of 14.5GHz RF power singly. Furthermore, in order to transmit the ion beams efficiently a new beam focusing and analyzing system was designed and constructed at the same time.

Key words double-RF heating, electron cyclotron resonance, beam intensity, beam transmission efficiency

Received 13 December 2002

* Supported by National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou

1) E-mail: zzm@impcas.ac.cn