

# Afterglow 工作模式下 ECR 离子源 脉冲束的产生\*

宋 沛 郭晓虹 赵红卫 张子民 冯玉成 李锦钰 张雪珍

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 为满足国家大科学工程兰州重离子冷却储存环的要求,在 14.5GHz ECR 离子源上进行 afterglow 工作模式的实验,首次产生了高电荷态脉冲束流  $\text{Ar}^{11+}$  和  $\text{Ar}^{12+}$ ,给出了初步实验结果,并对结果进行了分析和解释.

**关键词** ECR 离子源 afterglow 工作模式 峰值电流 高电荷态

## 1 引言

电子回旋共振(ECR)离子源是产生强流高电荷态离子束最有效的装置. 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,电子被横向微波电场加速,即电子从微波中吸收能量而形成高能电子,高能电子与原子碰撞电离产生 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  $B_{\text{min}}$ ”磁场结构的稳定和约束,被约束的 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即势阱约束,逃离约束的高电荷态离子最终经引出系统被引出<sup>[1]</sup>.

高电荷态 ECR 离子源作为兰州重离子加速器的外注入离子源,为加速器提供了长期稳定的高电荷态重离子连续束. 目前,兰州近代物理所(IMP)正在建造重离子冷却储存环,需要脉冲束流注入. 为此,我们利用 14.5GHz ECR 离子源进行了 afterglow 模式产生脉冲束的实验研究.

## 2 14.5GHz ECR 离子源

实验是在 IMP 14.5GHz ECR 离子源上进行的,其结构如图 1 所示. 源体右端为注入端,左端为引出端. 轴向磁镜场是由两组线包和周围的软铁磁轭形成,在轴向约束离子源腔体中的等离子体. 腔体外面有六极永磁铁,它提供腔体等离子体的径向约束. 轴

2000-11-14 收稿

\* 中国科学院九五基础研究青年科学基金(ZD981305),国家大科学冷却储存环项目资助

向磁镜场和径向六极场叠加,在腔体中央形成一个具有三维磁场最小值的场型——“最小  $B_{\min}$ ”磁场结构,以保证等离子体的稳定和约束. 等离子体腔体是一个多模式微波腔,频率为 14.5GHz 的微波功率由微波机产生,通过微波波导、微波窗和波导同轴转换器等馈入源体内. ECR 等离子体的产生和约束主要在等离子体腔体中央部分,这里有良好的等离子体约束条件,即三维“最小  $B_{\min}$ ”磁场结构,较低的工作气压,还有空间闭合的椭球状的 ECR 共振面,从而保证了等离子体中离子进一步游离到高电荷态,然后经腔体末端的等离子体电极被引出. 该离子源轴向磁镜场在中心线的最高磁场为 1.5T,六极永磁体在等离子体弧腔表面磁场约 1.0T<sup>[2]</sup>

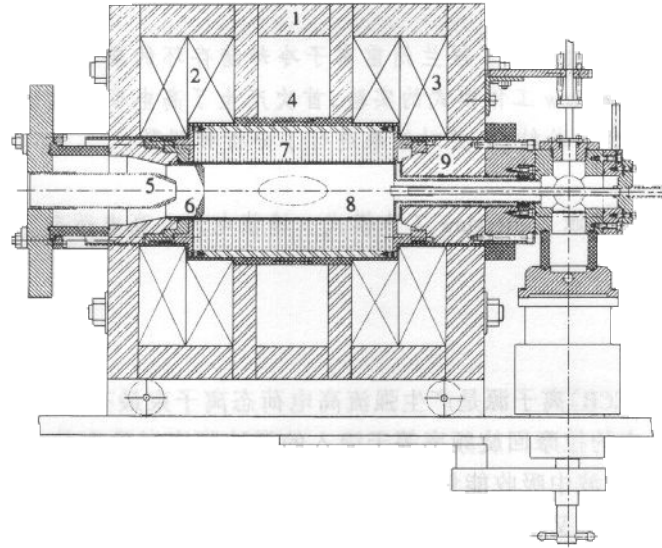


图 1 14.5GHz ECR 离子源结构简图

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 六极永磁体, 8 等离子体弧腔, 9 注入锥环.

向 ECR 源等离子体中供应额外的低能电子,可提高离子源的高电荷态离子输出<sup>[3]</sup>. 我们根据 14.5GHz ECR 离子源的自身特点,成功地采用了一种结构简单的冷阴极电子枪,并在实验中获得了良好的效果. 具体做法是将离子源注入端的同轴管与离子源源体高压绝缘,并在该同轴管上施加 50—500V 的负偏压. 该负偏压将同轴线附近的稀薄等离子体中的低能电子推进 ECR 等离子体内,同时吸引稀薄等离子体中的离子溅射同轴线,产生额外的二次电子,这些二次电子可进入 ECR 主约束级,增加 ECR 等离子体中的电子密度,有利于高电荷态离子的产生<sup>[1]</sup>.

### 3 afterglow 工作模式实验

ECR 离子源是利用微波机连续输出的微波功率馈入等离子体区,加热等离子体,产生连续输出的高电荷态离子束(或称直流束). 当微波功率是脉冲式时,在微波功率脉冲下

降沿即微波功率突然下降为零时,引出束流在很短的时间内急剧增加,随后呈指数衰减,这种现象被称为 afterglow 现象. 在 1988 年,法国的 Grenoble 实验室首先观测到 afterglow 效应. 从此,人们竭力想利用它发展一种工作模式,产生脉冲束,应用于加速器中<sup>[4]</sup>.

14.5GHz ECR 离子源产生的多电荷态混合离子束经等离子体电极和吸极引出后,首先通过一 Glaser 透镜聚焦,然后经分析磁铁选择,最终通过狭缝并被束线尾部的法拉第筒接收测量. 实验装置结构如图 2 所示.

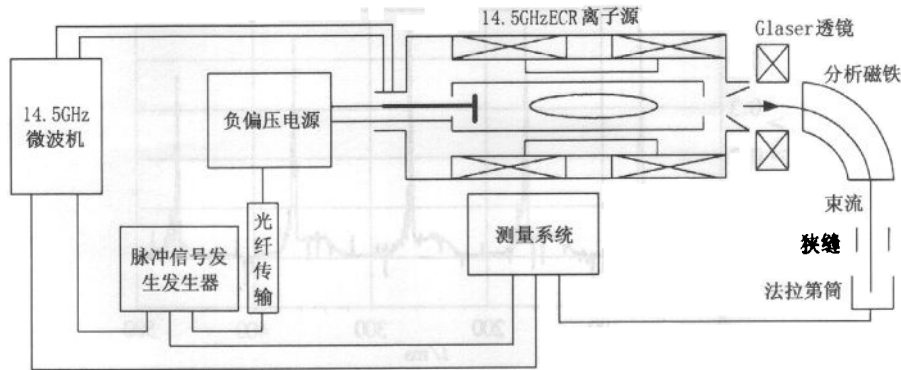


图 2 afterglow 实验装置总示意图

微波机由微波振荡源、PIN 衰减器、推动级固态功率放大器、末级速调管高功率放大器、控保单元、冷却单元和电源系统等组成,其核心是大功率速调管. 振荡源产生 10mW 的微波信号,经过 PIN 衰减器、功率稳定环路,再经推动级固态放大器,使微波功率放大到 500mW,此后送入速调管放大器,然后经一系列微波器件产生 2kW 的微波功率. 脉冲微波功率是通过在 PIN 上施加一个幅度和占空比可调的脉冲信号来获得的(如图 2 所示).

## 4 实验结果

### 4.1 afterglow 现象的观测

当 14.5GHz 微波机输出脉冲功率的重复频率为 5.23Hz 时,在每个脉冲周期里,供应微波功率的时间为 127ms,功率为 100W,输出脉冲为矩形波. 法拉第筒测量的束流为  $Ar^{11+}$ ,其束流脉冲波形如图 3 所示. 从图 3 中,可以清楚地看到 Afterglow 尖脉冲均发生在微波脉冲功率下降沿,束流强度在很短的时间内急剧增加. afterglow 尖峰脉冲  $I_{afterglow}$  比连续束流强度  $I_{cw}$  大 1—2 倍,连续工作模式下束流  $I_{cw} = 8.8\mu A$ ,而 afterglow 工作模式下  $I_{afterglow}$  可达  $26.4\mu A$ .

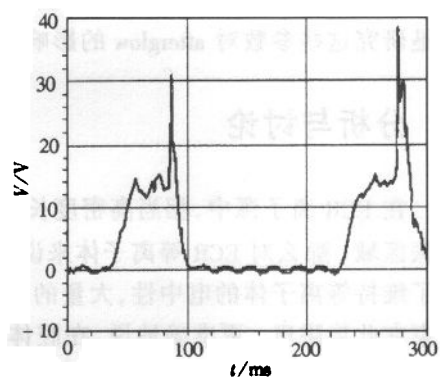


图 3 afterglow 尖峰脉冲

优化 ECR 离子源的工作状态,使 14.5GHz 微波机输出脉冲功率的重复频率为 10Hz,在每个脉冲周期里,供应微波功率的时间为 48ms,功率为 120W,测量得到的  $\text{Ar}^{12+}$  的束流脉冲波形如图 4 所示. 比较图 3 和图 4,可以看出图 4 中束流强度在很短的时间内增至连续工作模式时的 7—8 倍,甚至一个数量级. 此现象是我们首次观测到的 afterglow 的一种新模式. 此模式与 ECR 离子源的工作状态密切相关,进一步研究这种新 afterglow 工作模式并找到其稳定工作条件,对核物理实验很有意义.

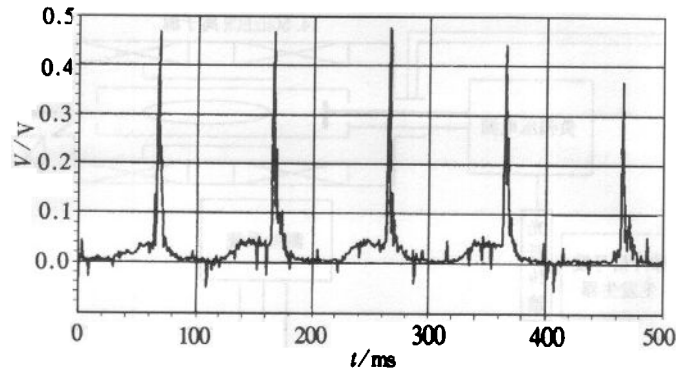


图 4 优化的 afterglow 尖峰束流

#### 4.2 在 afterglow 工作模式下的 ECR 离子源,进行加负偏压和不加负偏压的对比实验

在连续工作状态下,不加偏压,微波功率为 50W,引出束流经分析磁铁得到  $\text{Ar}^{12+}$ ,束流强度为  $3\mu\text{A}$ . 然后使微波机输出脉冲功率,供给 ECR 离子源. 微波脉冲重复频率为 5Hz,脉冲宽度为 48ms,测得 afterglow 束流峰值为  $5.76\mu\text{A}$ . 在不改变上述条件的情况下,给冷阴极电子枪加 50V 的负偏压,测量得到 afterglow 束流峰值为  $10.26\mu\text{A}$ . 由此可见,ECR 离子源工作在 afterglow 工作模式下,其他条件不变时,施加负偏压 50V 要比无负偏压时,afterglow 尖峰束流提高了将近 1 倍. 从实验上证明了冷阴极电子枪无论在连续工作模式下,还是 afterglow 工作模式下,都有利于高电荷态离子的产生.

此外,我们还进行了分别改变微波机工作参数的 afterglow 实验,这些参数包括微波脉冲功率的重复频率、微波脉冲功率及在每个微波脉冲周期中供应微波功率的时间,实验目的是研究这些参数对 afterglow 的影响. 这些实验的数据处理工作正在进行中.

## 5 分析与讨论

在 ECR 离子源中,相当高密度长寿命的热电子和温电子主要被  $B_{\text{min}}$  磁场约束在中心共振区域. 那么对 ECR 等离子体来说,在中心共振区域就存在着一个小的负电势阱,因此为了维持等离子体的电中性,大量的离子就被热电子和温电子的空间电荷电场所俘获并约束在此势阱里. 更准确地说,在腔体中,热等离子体和金属壁之间有一层电子云,这层电子云形成的鞘层将二者隔离开来. 这是由于电子扩散的速度大于离子的速度而形成的. 由此,中心等离子体处于相对腔壁为  $\Phi_0$  的正电位,如图 5 所示<sup>[1]</sup>. 同时,大量热电子

集中在中心线附近,从而形成一个小的负电势阱  $\Delta\Phi$ . 为了维持等离子体的电中性,大量的离子就被俘获并约束在此势阱里. 高电荷态离子在势阱  $\Delta\Phi$  中被约束的寿命  $\tau_i \propto \exp\left(\frac{Z\Delta\Phi}{T_i}\right)$ , 其中  $T_i$  是电荷态为  $Z$  的离子的温度. 当微波功率突然降为零时,高能电子短时间内大量减少,约束高电荷态离子的势阱迅速变小或消失,被约束的高电荷态离子被释放出来. 因此,当微波功率突然降为零时,引出束流在很短的时间内急剧增加.

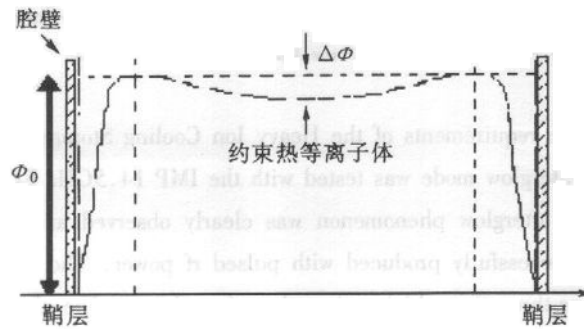


图 5 ECR 离子源中心等离子体势阱示意图

在 ECR 离子源中,高电荷态离子主要是由电子持续的碰撞而由中性原子逐级游离到高电荷态的,而各电荷态离子的损失主要是电荷交换损失和扩散损失,最终离子的产生和损失要达到动态平衡. 高电荷态离子的 Afterglow 束流峰值非常明显,低电荷态离子的 afterglow 效应不明显,可能是因为高电荷态离子约束时间长所致. 因此,人们在研究这一现象时,较多地使用  $\text{Pb}^{28+}$ ,  $\text{Ar}^{11+}$  和  $\text{Ar}^{12+}$  这样的高电荷态重离子.

我们只对 ECR 离子源在 afterglow 模式下工作的运行机制进行了一些初步研究. 在下一步实验中,一方面要提高测量仪器的准确性和直观性;另一方面,分别改变微波脉冲功率的重复频率、微波脉冲功率及在每个微波脉冲周期中供应微波功率的时间,观测这些参数与 afterglow 脉冲束之间的关系,更细致地研究稳定的 afterglow 工作模式,找到其工作规律,尽可能提高束流脉冲峰值.

#### 参考文献 (References)

- 1 ZHAO Hong-Wei et al. Atomic Energy Science and Technology, 2000, 34(3):282—288(in Chinese)  
(赵红卫等. 原子能科学技术, 2000, 34(3):282—288)
- 2 ZHAO H W, WEI B W, LIU Z W. Rev. Sci. Instrum, 2000, 71(2):646—651
- 3 Hill C E, Wenander F. Experiments on the Pulsed Afterglow Operation of an ECR Ion Source. In: Proceedings of 14th International Workshop on ECR Ion Sources. Geneva, Switzerland: CERN, 1999. 187—190
- 4 Sortais P. Rev. Sci. Instrum., 1992, 63(4):2801—2805

## Production of Pulsed Ion Beams by ECR Ion Source Afterglow Mode

SONG Pei GUO Xiao-Hong ZHAO Hong-Wei ZHANG Zi-Min  
FENG Yu-Cheng LI Jing-Yu ZHANG Xue-Zhen

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

**Abstract** To satisfy the requirements of the Heavy Ion Cooling Storage Ring which is under construction at Lanzhou, afterglow mode was tested with the IMP 14.5GHz ECR ion source to produce pulsed ion beams. The afterglow phenomenon was clearly observed and the pulsed ion beams of  $\text{Ar}^{11+}$  and  $\text{Ar}^{12+}$  were successfully produced with pulsed rf power. The peak current of the pulsed beam is typically two or three times higher than that of cw beam. The afterglow peak current could increase by a factor of six after further optimization during the experiment. The mechanism of the afterglow mode was studied and discussed on basis of the test results and physical model of ECR ion source.

**Key words** ECR ion source, afterglow mode, peak current, high charge state

---

Received 14 November 2000

\* Supported by 95 Research Foundation for Young Scientists of The Chinese Academy of Sciences (ZD981305) and National Mega Sciences Project CSR