

永磁强流 ECR 离子源

宋执中, 明建川, 于金祥, 王忠义, 郭之虞

(北京大学 重离子物理研究所 重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 文章介绍一台 2.45 GHz 永磁强流 ECR 离子源, 其直径为 10 cm, 长 10 cm, 重量不足 5 kg, 可工作在直流模式和脉冲模式。脉冲模式引出的氢离子束峰值流强大于 100 mA, 束流密度达到 500 mA/cm^2 ; 直流模式引出束流达到 60 mA, 束流密度为 300 mA/cm^2 。两种模式的质子比均达到 80%。

关键词: ECR 离子源; 永磁; 强流

中图分类号: TL503.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)S0-0050-04

A Permanent Magnet High-current ECR Ion Source

SONG Zhi-zhong, MING Jian-chuan, YU Jin-xiang, WANG Zhong-yi, GUO Zhi-yu

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University and Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871, China*)

Abstract: A 2.45 GHz high-current ECR ion source with permanent magnet was developed. Its outline dimension is about 10 cm for diameter and 10 cm for length, and its weight is less than 5 kg. It can operate in both pulsed mode and DC mode. In pulsed mode more than 100 mA peak current of hydrogen ion beam is extracted, which corresponds a beam density of 500 mA/cm^2 . In DC mode the hydrogen ion current can reach 60 mA, and the beam density is 300 mA/cm^2 . The proton ratios are about 80% in both modes.

Key words: ECR ion source; permanent magnet; high-current

早期的电子回旋共振 (ECR) 离子源多用于产生多电荷重离子。1990 年以来, 随着高功率质子加速器 (HPPA) 成为研究热点, 产生强流质子束的 ECR 离子源在国际上得到迅速发展。加拿大、美国、法国、意大利等先后研制出性能优良的强流 ECR 离子源^[1~5]。中国原子能科学研究院近年来也研制了强流 ECR 离子源^[6]。然而现有的这类离子源大多采用螺线管线圈产生 ECR 磁场, 源体积大、功耗高、造价贵。为

此, 本实验室自上世纪 90 年代开始研制用永磁体产生磁场的紧凑型 ECR 离子源, 并在 1995 年的国际离子源会议上报道了将其用于 O^+ 的实验结果^[7]。在 1998 年, 加拿大 Chalk River 实验室报道了一种采用永磁体的紧凑型强流 ECR 离子源, 该离子源可引出 60 mA 氢离子束流, 质子比为 80%^[8]。其后, 中国科学院近代物理研究所研制了永磁强流 ECR 离子源, 并得到较强的氢离子束。实际上, 上述几台永磁

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-05-08

作者简介: 宋执中 (1932—), 男, 山东胶州人, 教授级高级工程师, 核技术及应用专业

ECR 离子源均采用辅助线圈进行磁场的调节。本工作旨在介绍磁场完全由永磁体产生,无需辅助线圈进行磁场调节的强流 ECR 离子源。

1 离子源系统

2.45 GHz 微波传输系统采用标准 WR340 (BJ-26) 矩形波导元件,由输出功率 800 W 的磁控管(2M271)、环流器和三销钉调谐器组成。微波通过介质窗进入放电室,阻抗匹配通过三销钉调谐器调节。磁控管的电源在脉冲模式采用单相半波倍压整流电路,脉冲宽度为 4~5 ms,频率一般为 50 Hz,负载因子为 20%~25%。直流模式采用三相全波桥式整流电路。

离子源由放电室、微波窗、永磁体等组成(图 1)。放电室直径 50 mm,长 50 mm。微波窗为氧化铝和氮化硼的双层介质窗,在波导端氧化铝柱的侧面作了金属化处理,以保持良好的真空密封和电接触。该微波窗同时作为一段介质波导实现微波传输和阻抗匹配。永磁体由多个同轴 NdFeB 环组成。磁场的位形和场强通过改变磁环数量、大小及其间距来进行优化组合。图 2 为一典型的轴向磁场分布,放电室两端的磁场强度约为 95 mT,整个放电区域内的磁场强度为 90~100 mT。该磁场不一定是最佳条件,但可满足使用要求。离子源的引出电极采用三电极系统,等离子体电极的引出孔径为 5 mm,与抑制电极间隔 4.5~5.5 mm。引出电压为 40~50 kV,抑制电压为 -2 kV。整个离子源的直径为 10 cm,长度 10 cm,重量不足 5 kg。

2 实验结果

离子源实验台采用 1 500 L/s 涡轮分子泵,系统的静态真空为 $(2\sim 4)\times 10^{-4}$ Pa。放电时,在气体流量为 2~3 mL/min 时,系统真空度为 $(1\sim 4)\times 10^{-3}$ Pa。在两种工作模式下测量了不同引出电压、微波功率、进气量及磁场分布下的总束流强度和离子比。

2.1 脉冲模式

图 3 为在脉冲模式下引出的束流强度(脉冲峰值流强)随输入功率和引出电压的变化。由图 3a 可看出:总的束流强度随着微波功率大体上成正比变化。在输入功率为 500 W 时,束

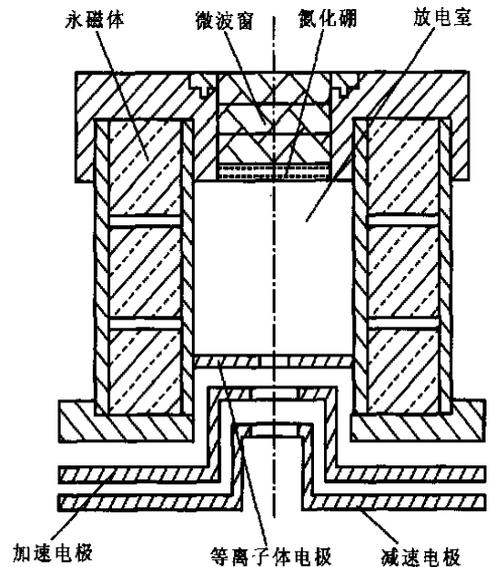


图 1 永磁 ECR 离子源示意图
Fig. 1 Schematic diagram
of the permanent magnet ECR ion source

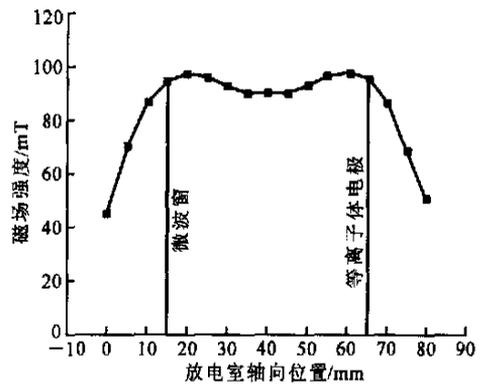


图 2 永磁 ECR 离子源轴向磁场分布
Fig. 2 Axial magnetic field profile
of the permanent magnet ECR ion source

流强度达到 100 mA,即峰值束流密度达到 500 mA/cm^2 ;当微波功率超过 500 W 时,引出束流应超过 100 mA,但由于引出电源(80 kV/100 mA)的限制,实验中不能引出更强的束流。在进气量 2.5 mL/min、微波功率 500 W 条件下,引出束流和引出电压的关系示于图 3b。显然,在 45 kV 引出电压下引出束流尚未达到饱和,若进一步提高引出电压,束流强度还可更大。

进气量的大小直接影响放电稳定性和引出流强,实验中一般控制在 2~3 mL/min 范围内较好。从不同磁场下进行的一系列实验结果可

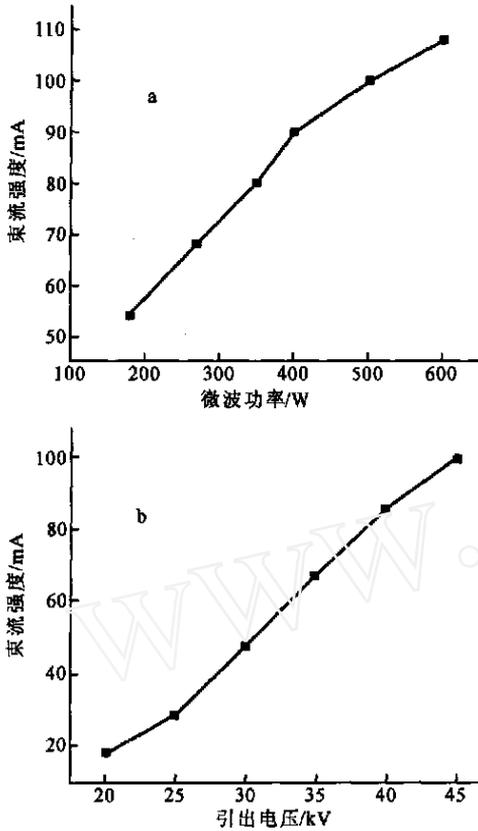


图3 脉冲模式下峰值流强与微波输入功率(a)和引出电压(b)的关系

Fig. 3 Peak hydrogen ion current vs microwave power (a) and extraction voltage (b) in pulsed mode

a: 引出电压 45 kV, 气流量 2.5 mL/min;
b: 微波功率 500 W, 气流量 2.5 mL/min

知,当磁场为图2所示时,离子源的放电效率、气耗量、束流强度和稳定性都比较好。在不同的输入功率和进气量下测量的束流离子比的结果表明:进气量为 1.5 ~ 3.5 mL/min 时,质子比达到最佳,且质子比随输入功率的增大而增加,一般为 75% ~ 80%。

2.2 直流模式

本离子源是为北京大学的 RFQ 加速器设计的,该 RFQ 加速器将在脉冲模式下工作,典型情况下的宏脉冲宽度为 1 ms,负载因子为 10%。故本离子源将主要在脉冲模式下运行,实验的重点也在脉冲模式。对本离子源在直流模式下的性能也做了实验研究。直流模式下引出束流随微波输入功率和引出电压的变化示于图4。由图4可知:在直流模式下,当引出电压为 40 kV、微波输入功率为 700 W、进气量为

4 mL/min 时可引出 60 mA 的束流,相应的束流密度为 300 mA/cm²。直流模式下的质子比约为 80%。对 O₂、N₂、He 等也进行了初步实验,他们的束流分别达到 26、28 和 32 mA。

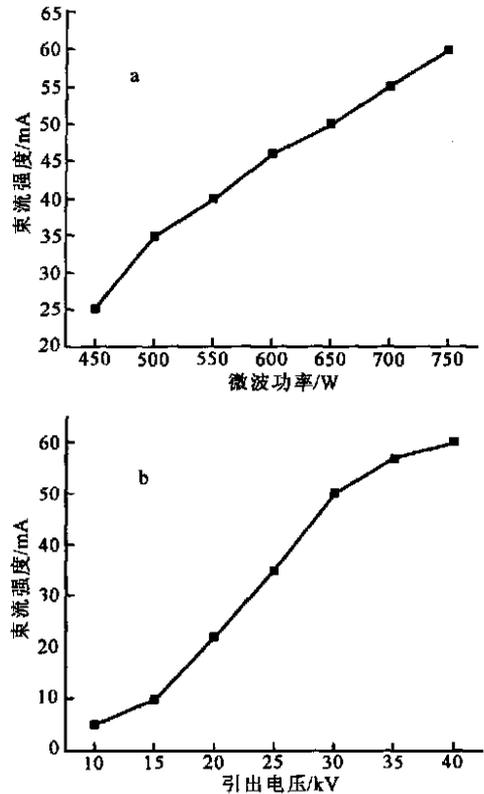


图4 直流模式下束流强度与微波输入功率(a)及引出电压(b)的关系

Fig. 4 Hydrogen ion current vs microwave power (a) and extraction voltage (b) in DC mode

a: 引出电压 35 kV, 气流量 4 mL/min;
b: 微波功率 700 W, 气流量 4 mL/min

3 结束语

在合适磁场分布下,永磁体微波离子源也可获得强流离子束。本工作所研制的永磁微波离子源,可工作在脉冲和直流两种模式,并可产生多种离子束。其中,氢离子束流强度在脉冲模式下峰值流强超过 100 mA,直流模式下大于 60 mA。两种模式下,质子比均达到 80%,此性能已基本满足北京大学强流质子 RFQ 加速器的要求。下一步将测量该离子源的发射度,并进行寿命和稳定性实验。

参考文献:

- [1] Taylor T, Wills JSC. A High Current Low Emittance DC ECR Proton Source [J]. Nucl Instrum Methods, 1991, A 309: 37~42.
- [2] Taylor T, Mouris JF. An Advanced High-current Low-emittance DC Microwave Proton Source [J]. Nucl Instrum Methods, 1993, A 336: 1~5.
- [3] Sherman J, Arvin A, Hansborough L, et al. Status Report on a DC 130 mA, 75 keV Proton Injector [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(2): 1 003~1 008.
- [4] Lagniel JM, Beauvais PY, Bogard D, et al. Status and New Developments of the High Intensity Electron Cyclotron Resonance Source Light Ion Continuous Wave and Pulsed Mode [J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2): 830~835.
- [5] Celona L, Ciavola G, Gammino S, et al. TRIPS: The High Intensity Proton Source for the TRASCO Project [J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2): 771~773.
- [6] 崔保群, 李立强, 蒋渭生, 等. 用于质子直线加速器的强流 ECR 离子源 [J]. 原子能科学技术, 2002, 36(6): 486~489.
- [7] Song ZZ, Jiang D, Yu J. Small Microwave Ion Source for an Ion Implanter [J]. Rev Sci Instrum, 1996, 67: 1 003~1 005.
- [8] Wills JSC, Lewis RA, Diserens J, et al. A Compact High-current Microwave-driven Ion Source [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(1): 65~68.

(上接第 49 页, From p. 49)

表 4 不同 ^{235}U 置换量的 k_{eff} 值计算结果

Table 4 Calculated results of k_{eff} for different changing ^{235}U

^{235}U 置换量 / kg	k_{eff}
20.561	1.008 22 \pm 0.000 20
21.641	1.008 40 \pm 0.000 21
22.725	1.008 58 \pm 0.000 21
25.143	1.009 06 \pm 0.000 21
26.757	1.009 32 \pm 0.000 21
28.284	1.009 56 \pm 0.000 22

由表 4 可求出每 kg^{235}U 引起的 k_{eff} 变化值 k_{eff} , 即 ^{235}U 的反应性当量为 $1.696 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$ 。比较 ^{235}U 与 MA 核素的反应性当量可知, 从对

反应堆 k_{eff} 值的贡献而言, 1 kg MA 相当于 0.6 kg^{235}U 。

2 结束语

模拟计算结果表明, 在快中子反应堆中, 核废料核素 MA 不仅对反应性有正的贡献, 而且与铀资源相比较, 就对链式裂变反应的贡献而言, 1 kg MA 核素大体相当于 0.6 kg^{235}U 。因此, 核废料核素 MA 是不容忽视的裂变资源。

参考文献:

- [1] 罗璋琳. 核废料核素价值研究 [J]. 原子能科学技术, 2004, 38(3, 4, 5): 283~288, 334~338, 476~480.