

重离子整体分离环型 RFQ 加速器的研究

李纬国 陆元荣 李德山 袁敬琳 潘欧嘉 方家驹
(北京大学技术物理系 北京 100871)

于全祥 郭菊芳 陈佳洱
(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 简单介绍了北京大学在高频四极场(RFQ)加速器方面的研究情况和取得的成果,包括束流动力学研究、RFQ 腔的高频特性及工艺加工可行性等. 现已研制成功一台 26MHz 整体分离环型 RFQ 加速器,其极间电压达 82kV,把 N^+ 离子从 20keV 加速到 300keV. 证实了这种加速器的优点和可行性.

关键词 高频四极场(RFQ) 整体分离环

1 引言

RFQ 加速器是 1970 年卡帕钦斯基首先提出的^[1]. 1980 年,美国洛斯阿拉莫斯实验室建成了第一台四翼型 RFQ 加速器,证实了这种加速器的优良特性:体积小,使用方便、束流强度高,束流品质好、束流传输效率大于 90%. 十多年来,这种加速器得到了迅速发展并成为当前低能加速器发展的热点之一. 轻离子 RFQ 加速器已被广泛地用作大加速的注入器和强流中子源. 随着重离子物理研究和技术应用的发展,近年来重离子的 RFQ 加速器,特别是 MeV 级重离子 RFQ 加速器,又得到迅速的发展^[2,3]. 它将在半导体器件的研究与生产、材料改性、惯性压缩核聚变等方面起重要的作用. 北京大学 1984 年首次提出整体分离环型高频四极场(RFQ)加速结构的设想^[4],1987 年以来在国家自然科学基金委的资助下,对这种加速器结构进行了系统的研究. 建成了这种加速器的结构样机,开始了 MeV 级强流 RFQ 加速器的研制.

2 束流动力学研究与微扇电极

把国际上 RFQ 加速器动力学研究的 PARMTEQ 程序移植到微机上,增加了人机对话和动态显示功能,在屏幕上可显示出粒子束在每单元的包络、相位、能散和相图,可给出各个单元上粒子丢失情况. 此外,编写了 RFQ 加速器优化参数程序 OPTIMUM,从而

形成了一套完整的 RFQ 束流动力学研究和电极极面参数设计的理论工具. 对四杆型和二维微扇型两种电极进行了大量的理论计算,包括多极场的影响. 结果表明,它们的粒子动力学特性非常接近^[5]. 特别是二维微扇电极具有强度高、水冷容易且可拆换,具有四翼型和四杆型电极的优点.

3 RFQ 加速结构的高频特性

在长期耦合分离环型漂浮管加速腔研究的基础上,把左旋臂和右旋臂分别联成一个整体、以两对电极取代漂浮管,就形成了提出的整体分离环型 RFQ 加速结构^[6]. 它具有机械强度高、模式间隔大和工作稳定等优点. 图 1 为该腔的结构图.

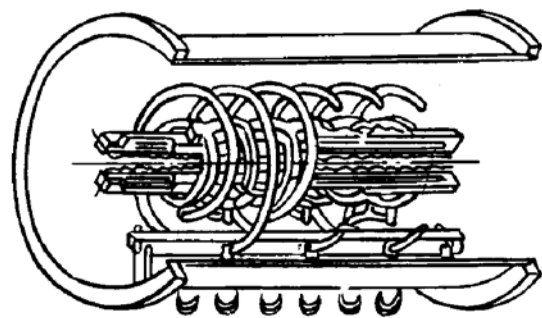


图 1 整体分离环 RFQ 结构示意图

先后分别在 1:2 和 1:1 模型腔内进行了一系列研究,分别研究了弯臂数目 N ,弯臂长度 S 和电极孔径 a 等不同几何参数下高频特性的变化,表 1 给出其中一组测量数据,与等效电路理论基本相符.

表 1 RFQ 特性测量结果

No	N	S (cm)	a (mm)	f_r (MHz)	Q	ρ (k $\Omega \cdot m$)
1	8	44.2	5	41.30	1639	91
2	6	44.2	5	37.88	1612	95
3	4	44.2	5	33.15	1517	110
4	6	116.0	7.5	24.01	1086	169
5	6	116.0	6.5	23.03	1028	180
6	6	116.0	5	21.54	1016	197
7	4	179.0	7.5	16.27	1261	244
8	4	179.0	6.5	15.54	1233	236
9	4	179.0	5	14.67	1202	190

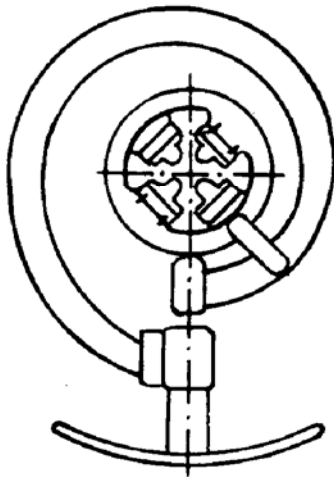


图 2 频率变化结构图

本结构影响谐振频率的两个主要参数为 a 和 S , 孔径 a 由束流动力学确定, 故谐振频率调整主要由改变弯臂长度 S 完成. 在大量试验研究基础上, 总结出如下半经验公式

$$f \times S = 1820 + 4.7s(\text{MHz} \cdot \text{cm})$$

根据同样的原理, 在弯臂和电极固定环间加上滑动短路片装置(见图 2), 通过等效改变弯臂长度改变腔频率, 从而达到改变加速粒子能量的目的, 满足了离子注入技术中改变埋层深度的要求. 这种变频装置可使腔工作频率从 24.7MHz 连续改变到 40.8MHz.

此外, 还进行了较多的工艺研究, 提出了组合式水冷可拆换微扇电极. 目前正在研究电极加工和安装精度对束流传输效率的影响, 希望能提出对电极加工的合理容差要求.

4 高功率和初步束流的试验

设计的加速腔基本参数如下:

谐振频率 (MHz)	26	离子荷质比	1/14
注入能量 (keV/u)	1.5	末能量 (keV/u)	21.4
腔直径 (cm)	50	腔长 (cm)	90
极间电压 (kV)	75	比分路电阻 (k $\Omega \cdot m$)	204
Q	1300		

在整个高功率试验中, 腔运行稳定, 驻波比约 1.3, 证明馈送结构匹配良好, 极间电压是通过电极间二次电子的韧致辐射谱测量方法测量的. 它的精度高, 结果可靠. 表 2 给出一组测量结果. 从表中可看出, 频漂和温升均较小, 说明结构机械强度好, 电极冷却效率高, 这是腔稳定运行的基础. 图 3 为极间电压

表 2 高功率试验数据

功率 (kW)	电压 (kV)	频率 (MHz)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	ρ (k $\Omega \cdot m$)
19.66	62.3	25.739	16.5	168
24.62	66.9	25.737	18.0	155
29.70	71.6	25.733	19.0	147
39.57	78.5	25.732	22.0	132
44.36	81.7	25.728	23.0	128

* 初始水温 11.0 $^{\circ}\text{C}$

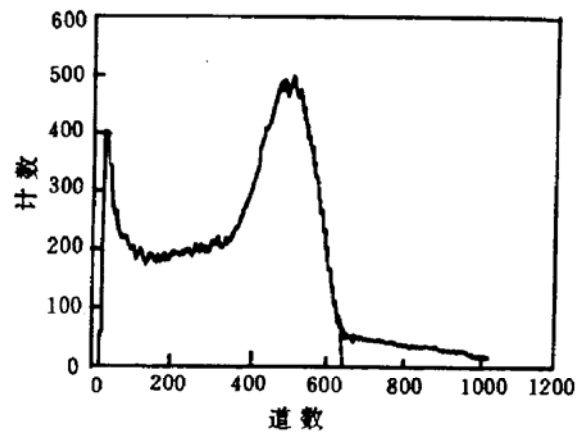


图 3 韧致辐射谱

测量的韧致辐射谱^[5].

在束流试验中,束流经分析后分别由法拉第杯和同轴快靶测量束流的平均流强和时间结构.当进腔功率大于25kW时, N^+ 离子从20keV被加速到300keV,与理论计算结果基本符合^[7].图4为束流的时间结构波形.

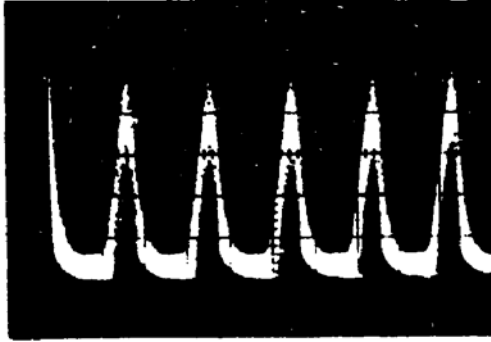


图4 束流的时间结构波形

5 结束语

一系列的理论和试验研究证明,提出的整体分离环型RFQ加速器具有一系列优点,它运行频率范围广,100MHz以下可加速重离子,100MHz以上可加速轻离子.结构强度高,工作稳定.水冷、可拆换组合式微扇电极使用方便灵活.变频装置在束流试验中证明完全

可靠可行.频率改变范围大,高功率运行负载因子高达 $1/6 \sim 1/4$,极间电压达82kV.加速的 N^+ 离子已达设计的300keV水平,下阶段将进一步研究离子源与腔间束流匹配,电极加工和安装偏差对束流的影响,以提高束流的传输效率,为MeV级重离子RFQ加速器的研制打下基础.

参 考 文 献

- 1 Kapchinskij I M, Tepiyakov V A. *Prib. Tech. Eksp.*, 1970,4:19
- 2 Klein H. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983,NS-30:3313
- 3 Schempp A. *LINAC 88. CEBAF REP 89-001 460*
- 4 Xie Jialin. *Proc. of 1984 Linear Accelerator Conf.*, Gesellschaft fuer Schwerionenforschung mbH, Seeheim, Germany, 1984, 14
- 5 Chen Jiaerh, Fang Jiaxun, Li Weiguo, et al. *Proc. of 1992 European Particle Accelerator Conf. Editions Frontiers*, Berlin, 1992, 1328
- 6 Fang Jiaxun, Chen Chiaerh. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1985 NS-32:2981
- 7 李伟国,方家驯等. 26MHz ISR RFQ加速器高功率及束流试验. 中国粒子加速器学会加速器物理学术讨论会论文集, 1994

Study of ISR RFQ Accelerator

Li Weiguo Lu Yuanrong Li Deshan Yuan Jinglin Pan Oujia Fang Jiaxun

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Yu Jinxiang Guo Jufang Chen Jiaer

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The advances and achievements of studies on an integral split ring (ISR) RFQ accelerator for heavy ions at Peking University are presented in this paper. These include beam dynamics of RFQ accelerator, RF characteristics of RFQ cavity and studies of technological design. A 26MHz Prototype ISR RFQ resonator has been built. The voltage of 82kV between the electrodes and the acceleration of N^+ beam from 20 keV to 300 keV have been achieved. These have proved the feasibility and advantage of this type of RFQ accelerator.

Key Words radio frequency quadrupole(RFQ) integral split-ring (ISR)