

# 重离子整体分离环RFQ加速器的升级改造\*

张萌 陆元荣<sup>1)</sup> 彭士香 朱昆 颜学庆 高淑丽 王智 郭之虞 赵捷 方家驹  
李纬国 郭菊芳 袁忠喜 宋执中 于金祥 于茂林 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

**摘要** 介绍了北京大学重离子整体分离环RFQ(ISR RFQ)加速器的升级改造工作, 包括升级后RFQ加速系统的组成; 强流永磁2.45GHz O<sup>+</sup> ECR离子源的台面测试结果; 真空系统的改造; 1MeV ISR RFQ加速器的高频控制系统改造; 以及强流束流加速实验的结果.

**关键词** 重离子 整体分离环 RFQ 强流束输运

## 1 引言

北京大学1MeV重离子整体分离环RFQ(ISR RFQ)加速器于1999年底建成, 成功地将C<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, O<sup>-</sup>等离子加速到每核子65keV的能量<sup>[1, 2]</sup>, 并实现了用该RFQ加速器同时加速O<sup>+</sup>, O<sup>-</sup>离子的束流实验, 理论模拟也取得了与实验一致的结果<sup>[3]</sup>. 1MeV ISR RFQ加速器的主要工作参数见表1.

表1 1MeV ISR RFQ的主要工作参数

工作参数	参数值
注入能量/(keV/u)	1.375
输出能量/(keV/u)	65.0
工作频率/MHz	26.0
腔长/cm	260.0
等效直径/cm	75.0
极间电压/kV	70.0
射频功率/kW	24.5
宏脉冲流强/ $\mu$ A	660
传输效率/(%)	86
比分路电阻/(k $\Omega$ ·m)	520

从表1中可以看出, 虽然该RFQ加速器在射频效率很高, 其比分路电阻达到了520k $\Omega$ m, 束流传输效率达到了86%, 但是所加速离子的宏脉冲输出峰值流强低于1mA. 鉴于1MeV ISR RFQ加速器将用于北京大学分离作用RFQ(SFRFQ)加速系统的注入器<sup>[4]</sup>, 因此对其提出了升级改造的要求. 一台新的2.45GHz ECR O<sup>+</sup>离子源及其低能束流输运系统(LEBT)已经设计和加工完毕, 并取得了初步的实验结果<sup>[5]</sup>, 1MeV ISR RFQ加速器的真空系统和高频系统改造已经完成, 其

载束实验也取得了初步结果.

## 2 ECR离子源和低能输运段

1MeV ISR RFQ加速器升级后的离子源及其低能输运段如图1所示. 由ECR O<sup>+</sup>离子源、真空系统、两个单透镜组成的聚焦系统、法拉第杯1、限束光阑等组成. ECR离子源工作频率2.45GHz, 采用永磁环产生900—1000Gs的轴向约束磁场, 引出电压22kV, 在引出区工作真空 $(1.0\sim 2.0)\times 10^{-4}$ Pa、微波功率1.26kW的实验条件下, 引出的总束流约6mA, 经过直径为15mm的限束光阑后由第二个法拉第杯测得的束流约4mA, 实际束线上该法拉第杯被拆除, 限束光阑直接与RFQ入口相接. 实验测得O<sup>+</sup>离子比在60%至80%之间, 该离子比对离子源供气量的依赖较大. 实际注入的RFQ的可接受O<sup>+</sup>束流宏脉冲峰值流强约为2.5mA. 两个静电透镜所用的聚焦电压分别为17kV和18.5kV. 测量表明, 注入束流的归一化发射度小于0.15 $\pi$ mm·mrad. 实验细节可参见参考文献[5].



图1 ECR离子源及其低能输运线

2008-01-07 收稿

\* 国家自然科学基金(10455001, 10605003)资助

1) E-mail: yrlyu@pku.edu.cn

### 3 真空系统

原 1MeV ISR RFQ 加速器的高真空系统由两台 450l/s 的蜗轮分子泵构成, 所能达到的最佳静态真空为  $2 \times 10^{-4}$  Pa, 这对于强流束的运输是个瓶颈. 为了减少带电离子在加速过程中的碰撞散射损失, 将其替换为两台抽速为 600l/s 的蜗轮分子泵, 系统静态真空从原来的  $2 \times 10^{-4}$  Pa 上升到  $2 \times 10^{-5}$  Pa, 即使在满功率运行时, RFQ 腔的载束真空也能好于  $4 \times 10^{-4}$  Pa, 比原来的载束真空提高了一个量级.

### 4 射频系统

射频系统是整个加速系统中最为昂贵的部分, 这次的升级改造一方面是提高发射机的输出功率, 另一方面是提高系统的工作稳定性. 1MeV ISR RFQ 的高功率馈送系统由低电平的脉冲调制系统、稳幅系统、3W 的功率放大器、20W 的功率放大器、以及 1kW 的前级放大器、30kW 的末级功率放大器以及高功率馈送电缆、馈管和射频功率磁耦合装置等构成. 由于 3W 和 20W 放大器的放大倍数有所下降, 为了提高末级的输出功率, 将脉冲调制器的输出电平从有效值 1V 提高到 5V, 利用 3W 和 20W 放大器输入回路的 20dB 电调衰减器控制整个发射机的输出功率水平.

为了避免末级电子管 FU105Z3 的阳极回路和帘栅极回路的打火放电现象(图 2), 对 FU105Z3 的管座进行了清洁和绝缘处理; 更换了帘栅极与管座之间聚乙烯薄膜; 更换了去离子水; 购置了新的备用电子管.

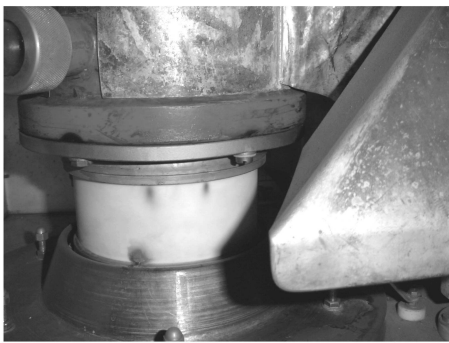


图 2 FU105Z3 阳极与帘栅极打火现象

为了有效地对整个发射机实现远程遥控, 改造了两台发射机的远程控制系统, 对发射机实现了远程开关机控制、开关高压控制、高压恢复控制, 并对高频机工作过程中的灯丝电流、阳极电压、阳极电流、帘栅极电流、射频输出功率、反射功率进行监测, 以便及时了解机器的工作状况和输出功率水平. 图 3 是一台发射机的部分远程控制面板图. 其中入射和反射

功率的监测由定向耦合器取样后经过高频检波再由 100 $\mu$ A 的电流表进行监测, 入射功率电流表满偏转对应约 60kW, 反射功率电流表满偏转对应约 0.6kW.

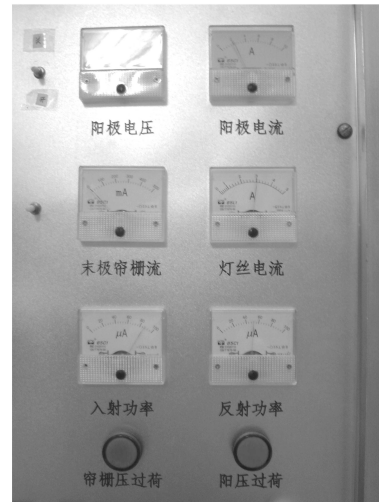


图 3 高频机部分远程控制面板

### 5 强流束加速实验

向 1MeV ISR RFQ 加速器注入本文第 2 节所述的束流, 载束真空好于  $4 \times 10^{-4}$  Pa, 脉冲功率 45kW, 宏脉冲重复频率 166Hz, 脉冲宽度 1ms, 加速腔稳定输出了 2mA 的 O<sup>+</sup> 宏脉冲峰值流强, 束流传输效率好于 80%. 图 4 记录了实验时输出的 O<sup>+</sup> 离子宏脉冲波形. 腔内水温升从 19.5 $^{\circ}$ C 上升到 27.7 $^{\circ}$ C, 整体腔的频率漂移小于 5kHz.

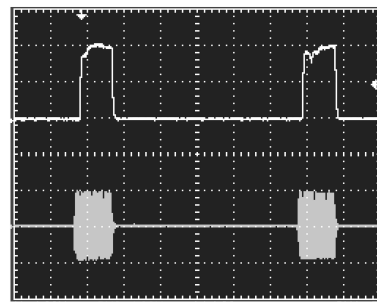


图 4 加速后的 2mA O<sup>+</sup> 输出束流脉冲波形(上)和射频信号波形(下)

### 6 结论

1MeV ISR RFQ 加速器的升级改造实验成功地将 O<sup>+</sup> 离子加速到 65keV/u 能量, 输出流强达到 2mA, 束流的传输效率达到 80% 以上. 束流实验表明, ECR 离子源及 LEPT, 1MeV ISR RFQ 加速腔、高频控制系统、水冷却系统设计合理、运行可靠, 为 SFRFQ 加速器的束流实验打下了基础.

## 参考文献(References)

- 1 CHEN C E et al. Proceedings of EPAC2000, Vienna, 2000. 1850—1852
- 2 LU Y R et al. Nucl. Instrum. and Methods, 2003, **A515**: 394—401
- 3 YAN X Q et al. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2006, **9**: 020101
- 4 CHEN Jia-Er et al. Chin. Phys. C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 231 (in Chinese)  
(陈佳洱等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 231)
- 5 ZHANG Meng et al. Chin. Phys. C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 220 (in Chinese)  
(张萌等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 220)

## Upgrading of a Heavy Ion 1MeV ISR RFQ Accelerator \*

ZHANG Meng LU Yuan-Rong<sup>1)</sup> PENG Shi-Xiang ZHU Kun YAN Xue-Qing GAO Shu-Li

WANG Zhi GUO Zhi-Yu ZHAO Jie FANG Jia-Xun LI Wei-Guo GUO Ju-Fang

YUAN Zhong-Xi SONG Zhi-Zhong YU Jin-Xiang YU Mao-Lin CHEN Jia-Er

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** This paper presents new beam test results for  $O^+$  beam on a high current Integral Split Ring Radio Frequency Quadruple (ISR RFQ) accelerator. After the upgrading, a new designed 2.45GHz  $O^+$  ECR Ion Source can provide a beam with macro-pulse peak current of 4mA at the injection point behind a 15mm diaphragm, whose  $O^+$  factor is 60%—80% varied with gas flow rate and the normalized rms emittance is less than 0.157mm-mrad. The accelerated  $O^+$  beam current goes up to 2mA with the transmission of about 80% at 45kW RF power with duty factor 1/6 (pulse duration of 1ms and repetition frequency of 166Hz). The upgraded RF power system includes low level RF pulse modulation amplifier, AGC, 3W and 20W preamplifiers, 1kW driver and 30kW final amplifier, which can output nearly 50kW in pulsed mode. The vacuum has been improved, too. The upgraded 1MeV ISR RFQ can be used as the beam injector of a new designed SFRFQ accelerating system, which is under the construction at Peking University.

**Key words** integral split ring, RFQ, upgrade, RF power system

---

Received 7 January 2008

\* Supported by NSFC (10455001, 10605003)

1) E-mail: yrлу@pku.edu.cn