

RFQ 加速器同时加速同荷质比正负离子的实验研究*

任晓堂 陆元荣 于金祥 王忠义 李纬国
郭菊芳 宋执中 李雨松 方家驹 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 阐述了利用北京大学 26MHz 300keV 整体分离环高频四极场(ISR RFQ) 加速器同时加速同荷质比正负离子的研究结果. 分别用 O^+ 和 O^- 离子的连续束以及脉冲束同时注入, 均实现了 RFQ 加速器对同荷质比正负离子的同时加速. 用快靶测得的经 RFQ 腔同时加速后形成的 O^+ 及 O^- 离子微脉冲束与预想的正负氧离子微脉冲束相位关系完全一致. 证实了同时加速时得到的氧离子束总和明显高于单加速一种离子时得到的氧离子束. 在国际上首次实现了用 RFQ 加速器同时加速同荷质比的正负离子

关键词 RFQ 加速器 同时加速 同荷质比 正负离子

1 引言

由于 RFQ 加速器具有体积小、束流传输效率高、可加速强束流等优点^[1,2]. 所以, 近年来这种加速器的应用日益广泛, 如正在拟议中的洁净核能源计划以及质子治癌计划, 性能优越的 RFQ 加速器是重点选取的强流加速器之一. 但是, 自 RFQ 加速器问世以来, 无论是研究领域还是应用领域, 都只利用了馈入 RFQ 加速腔高频加速电场的正半周或负半周, 仅加速了正或负单一一种类的离子, 使得馈入加速腔的高频加速电场未得到充分利用. 有鉴于此, 我们于 1993 年提出, “用同一 RFQ 加速器同时加速同荷质比的正负离子”的设想^[3], 并为此进行了理论和实验准备^[4]. 1995 年开始了对 RFQ 加速器同时加速同荷质比正负离子的实验研究, 在国际上首次实现了 RFQ 加速器对 O^+ 和 O^- 这一同荷质比正负离子的同时加速.

1999-03-11 收稿

* 国家自然科学基金资助

2 实验装置

如图1所示,整个实验装置由正负离子注入系统、RFQ加速系统和束流测试分析系统三部分组成.

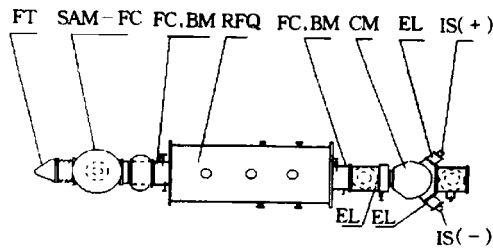


图1 RFQ加速器同时加速同荷质比正负离子的实验装置

2.1 正负离子注入系统

如图1右半部所示,正负离子注入系统由产生正负离子的离子源IS、匹配透镜EL、注入组合磁铁CM、聚焦透镜EL、测束法拉第杯FC, BM等组成.其中IS(+)为外廓尺寸约 $\varphi 200 \times 130\text{mm}$ 的永磁冷阴极边引出PIG离子源,用来提供正离子束;IS(-)为外廓尺寸 $\varphi 75 \times 75\text{mm}$ 的袖珍永磁冷阴极端引出PIG离子源,用来提供负离子束.正离子源IS(+)和负离子源IS(-)以 $\pm 45^\circ$ 对称分布在注入组合磁铁CM两侧.

2.2 RFQ加速系统

如图1中部所示,加速系统为北京大学26MHz 300keV的整体分离环高频四极场(ISR RFQ)加速器,及其高频功率馈送系统、高频控制系统等.

2.3 束流测量分析系统

如图1左半部所示,束流测量分析系统由高频加速腔出口处的法拉第杯FC, BM、小分析磁铁SAM及可横向移动的法拉第杯FC, BM和可测量微观束流脉冲信号的截击型同轴快靶FT等组成.

3 主要研究结果

3.1 RFQ加速腔注入连续束的研究

在注入束流为连续束的情况下,单注入 O^+ 或 O^- 离子,经过RFQ加速腔加速后,在腔出口处的法拉第杯上可测得周期6ms、脉冲宽度为1ms的 O^+ 或 O^- 离子宏观脉冲,这与RFQ加速器用低频脉冲调制频率166Hz、负载因子1/6的情况完全一致.5/6未加高频功率时漂移束并不影响加速后形成的宏观脉冲宽度和上升时间.但该5/6的束流会影响整个系统的真空度,从而影响到1/6束流的传输效率.用 $405\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子束单独注入,在腔出口处可得峰值流强为 $200\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子宏观脉冲束.用 $460\mu\text{A}$ 的 O^- 离子束单独注入,在腔出口处可得峰值流强为 $260\mu\text{A}$ 的 O^- 离子宏观脉冲束.由于受注入束流品质影响,此时 O^+ 和 O^- 离子束传输效率都较低.另外,传输效率的高低与高频功率及真空度也有很大关系,一般情况下,真空度越好,高频功率越接近设计值,则传输效率会越好.

同时注入正负离子连续束时,在小偏转磁铁(SAM)后用可横向移动的法拉第杯同时观测到被加速后形成的正、负离子宏观脉冲束(见图2).虽由于此处的法拉第杯口太大而使得二次电子不能完全被抑制,测得的流强值并非真正的离子束流流强大小,但它完全可

以反映同时注入 RFQ 加速器的正、负离子束确实都被加速

分别用 $320\mu\text{A}$ 的 O^+ 和 O^- 离子束注入 RFQ 加速器, 调节加速腔前的单透镜, 使得腔出口处的 O^+ 或 O^- 离子束为最大, 则出口处得到的 O^+ 或 O^- 离子宏观脉冲束峰值流强均为 $140\mu\text{A}$. 用 $320\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子束和 $320\mu\text{A}$ 的 O^- 离子束同时注入 RFQ 加速器时, 因加速腔前的单透镜不可能同时对 O^+ 和 O^- 离子束都达到最佳聚焦效果, 若保证 O^+ 聚焦最佳, 输出为 $140\mu\text{A}$, 则 O^- 输出只有 $40\mu\text{A}$, 输出总和 $180\mu\text{A}$; 调节加速腔前的单透镜使得腔出口处流强的代数和为 0 (这不是同时加速的必要条件, 而是靶上空间电荷抵消的条件), 这时分别测量 O^+ 和 O^- 离子束, 得其宏观脉冲束峰值流强均为 $110\mu\text{A}$, 可认为 O^+ 离子束和 O^- 离子束同时注入 RFQ 加速器时在腔出口处得到的氧离子宏观脉冲束峰值流强总和为 $220\mu\text{A}$, 明显高于单加速 O^+ 或 O^- 离子束时最佳输出的 $140\mu\text{A}$. 从这里可以得出 O^+ 、 O^- 离子束同时加速时其效果明显好于单加速 O^+ 或 O^- 离子束, 同时 O^+ 和 O^- 在总输出束中各自所占的比例可以任意调节.

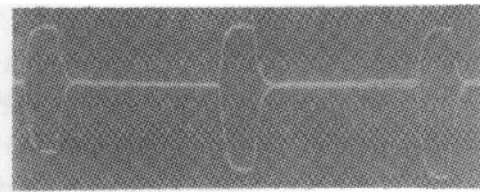


图 2 同时加速的正负氧离子在小分析磁铁后的宏脉冲

3.2 RFQ 加速腔注入脉冲束的研究

在注入束流为脉冲束的情况下, 用周期为 6ms , 脉冲宽度 1ms , 峰值流强 $730\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子脉冲束注入, 加速功率 35kW 下, 单加速时在腔出口处可得峰值流强为 $554\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子宏观脉冲束, 传输效率 75% (见图 3).

与注入 O^+ 离子脉冲束相同条件下 用峰值流强为 $778\mu\text{A}$ 的 O^- 离子脉冲束注入, 单加速时在腔出口处可得峰值流强为 $594\mu\text{A}$ 的 O^- 离子宏观脉冲束, 传输效率 76% (图 4).

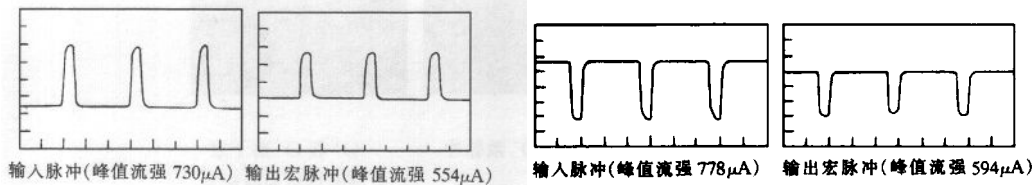


图 3 单加速时 O^+ 离子的输入输出脉冲

图 4 单加速时 O^- 离子的输入输出脉冲

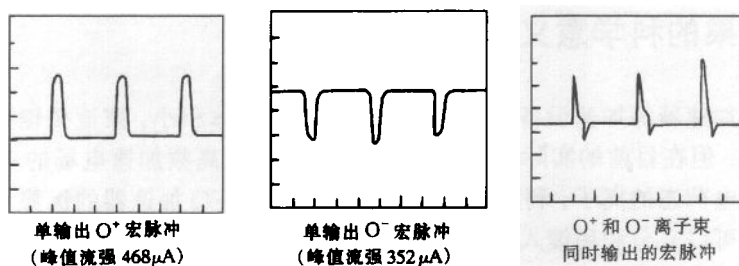


图 5 O^+ 和 O^- 离子束同时加速时单输出的宏脉冲及同时输出时的宏脉冲

在加速功率为 30kW 时(因受真空度的影响, 所加功率较低), 同连续束注入时情况一

样,分别用脉冲峰值流强为 $826\mu\text{A}$ 的 O^+ 和 $504\mu\text{A}$ 的 O^- 离子束注入 RFQ 加速器,调节加速腔前的单透镜,则出口处得到的 O^+ 或 O^- 离子宏观脉冲束最大峰值流强分别为 $530\mu\text{A}$ 和 $383\mu\text{A}$. 当用 $826\mu\text{A}$ 的 O^+ 离子束和 $530\mu\text{A}$ 的 O^- 离子束同时注入 RFQ 加速器时,根据连续束时的结果,调节加速腔前的单透镜使得腔出口处 O^+ 和 O^- 都得到较好的聚焦,此时分别测量 O^+ 和 O^- 离子束,得其宏观脉冲束峰值流强分别为 $468\mu\text{A}$ 和 $352\mu\text{A}$,可认为同时加速时在腔出口处得到的氧离子宏观脉冲束峰值流强总和为 $820\mu\text{A}$ (图 5).

3.3 测得的最高传输效率

用 $562\mu\text{A}$ 的 O^- 离子脉冲束注入,在腔出口处可得峰值流强为 $466\mu\text{A}$ 的 O^- 离子宏观脉冲束,此时,传输效率最高约为 83%,而输出束最强时的传输效率为 60%,可见,传输效率最高时,输出流强未必最强.

3.4 同时注入时输出微脉冲的研究

用快靶对 O^+ 或 O^- 离子束同时加速时形成的微观脉冲束进行了测量,因考虑到快靶所能承受的功率以及便于观测,在快靶上未加偏压或加了正偏压,使快靶工作在增益模式.这样测得的 O^+ 和 O^- 离子微观脉冲束均为正脉冲,经前置快放放大后形成负脉冲.从测量结果可以非常清楚地看到经 RFQ 加速器同时加速后形成的 O^+ 和 O^- 离子微观脉冲束的时间关系, O^+ 和 O^- 离子微观脉冲束以及 O^+ 和 O^- 离子微观脉冲束间的时间差均为 RFQ 加速电场的高频周期,而 O^+ 和 O^- 离子微观脉冲束间的时间差恰为高频周期的一半,这说明 O^+ 和 O^- 离子的加速平衡位相差 π ,与预期的结果完全相符(见图 6).

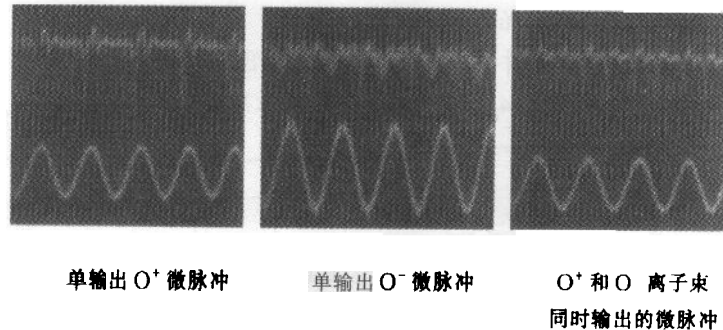


图 6 O^+ 和 O^- 离子束同时加速时单输出的微脉冲及同时输出时的微脉冲

4 研究结果的科学意义和应用前景

相比静电加速器等加速设备而言,RFQ 加速器具有体积小,束流传输效率高,可加速强流等优点.但在目前的实际应用中,只利用了其馈入高频加速电场的正半周或负半周来加速单一电荷态的离子,利用率低,未能充分发挥 RFQ 加速器的优势.上述研究结果不但揭示了可以充分利用馈入 RFQ 加速器高频加速电场的正负两个半周期来同时加速同荷质比的正负离子,提高了 RFQ 加速器加速流强及高频加速电场的利用率.而且可以带动 RFQ 加速器加速技术的理论研究及相关技术研究,开展同荷质比,不同核素离子同时加速的研究.并使得 RFQ 加速器的应用领域更为广阔.例如,在高剂量氧离子埋层注入研究中,利用 RFQ 加速器同时加速的正负氧离子注入靶片,既提高了氧离子的注入

剂量率,降低了对离子源流强的过高要求,又由于正、负离子在注入靶片上的电荷中和效应,有利于提高靶片的质量和防止靶片上电荷积累造成的击穿,同时,还可以注入荷质比相近而元素不同的两种离子,这两种离子的比例可以任意调节,实现比例可变的两种元素离子的同时注入.另外,RFQ 加速器中正负离子的同时加速也有可能在国际上正在研究的洁净核能源系统和正在拟议的质子治癌计划中得到应用,降低系统费用,提高设备利用效率.

参考文献(References)

- 1 CHEN C E, LI W G, YU J X et al. Study of ISR Heavy Ion RFQ Accelerator at Peking University. 6th China-Japan Symp. on Accelerators. 1996. 58
- 2 LU Y R, GUO J F et al. Nucl. Instrum. And Meth., 1999, A420:1—5
- 3 YU JinXiang, CHEN JiaEr et al. Trends in Nuclear Physics, 1996, 13(2):34
(于金祥, 陈佳洱等. 核物理动态, 1996, 13(2):34)
- 4 CHEN C E, FANG J X et al. Experiment Studies on the Acceleration of Positive & Negative Ions With a Heavy Ion ISR RFQ. 5th EPAC 96. 2702

Experimental Research on Simultaneous Acceleration of Positive and Negative Ions with Equal q/m in an ISR RFQ*

REN XiaoTang LU YuanRong YU JinXiang WANG ZhongYi LI WeiGuo
GUO JuFang SONG ZhiZhong LI YuSong FANG JiaXun CHEN JiaEr

Institute of Heavy Ion Physics, Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Experimental studies on simultaneous acceleration of O^+ and O^- beams have been carried out in a 26MHz Integrated Split Ring (ISR) RFQ at Peking University. Both O^+ and O^- beams can be accelerated to more than 300keV. Output macro-pulse of O^+ and O^- was gotten simultaneously at the exit of RFQ when O^+ and O^- beams were inputted into the RFQ cavity at the same time. The output micro-pulse beams of O^+ and O^- were measured with a fast target after O^+ and O^- beams were accelerated simultaneously in the RFQ. The frequency of micro-pulse is as same as the RF frequency applied to RFQ. The phase difference of O^+ and O^- micro-pulse is π that coincides with the anticipated results. The beam current gotten from simultaneous acceleration of O^+ and O^- beams are much stronger than that gotten from acceleration of O^+ or O^- only.

Key words RFQ accelerator, simultaneous acceleration, equal q/m , positive and negative ions

Received 11 March 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China