

# RFQ 加速器同时加速同 $q/M$ 正负离子的设想\*

于金祥 陈佳洱 李纬国 任晓堂 方家驹

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

**摘要** 提出了用 RFQ 加速器同时加速同荷质比正负离子的设想,阐述了原理可行性与将进行的实验验证.

**关键词** RFQ 加速器 同时加速 正负离子

## 1 引言

自 RFQ 型加速器问世以来,以其体积小、束流传输率高、可加速脉冲束流强等优点,日益获得了广泛的应用.为满足干净核能源计划和大剂量氧离子埋层注入对高达数百毫安加速流强的需要,鉴于 RFQ 加速器目前只利用了馈入高频功率的正或负半周的现状,提出了 RFQ 加速器同时加速同荷质比正负离子(尤其是同一元素的正负离子)的设想,原则上可使 RFQ 加速器的极限载束能力约提高一倍,因而可作为上述问题的一种解决办法.在高剂量氧离子埋层注入应用研究中,正负氧离子同时注入,可避免硅片上由于电荷积累造成的局部击穿,从而可提高埋层硅片的质量和设备的可靠性.

## 2 RFQ 加速器同时加速同 $q/M$ 正负离子原理与可行性

### 2.1 原理

RFQ 加速器同时加速同一荷质比的正负离子原理,主要基于荷质比相同的正或负离子经过电位差值相等的电场时,所获速度相等,即

$$v = (2qV/Am_0)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $q/A$  为荷质比,  $m_0$  为质子的静止质量,  $V$  为电压(单位 MV). 当初速度相等的同一荷质比离子,如:  $H^+$ 、 $H^-$ 、 $O^+$ 、 $O^-$  等,进入 RFQ 加速器后,如正负离子间的相互作用小,可以忽略,则在高频电场作用下,在聚束段分

别各自聚拢成移向  $\Phi_0$ 、 $\pi + \Phi_0$  平衡位相的束团,并在各自的平衡位相下进一步边加速、边聚焦,直至加速到所需能量.有关同一荷质比的正负离子在 RFQ 加速器中的动力学过程,可用本所编制的模拟计算程序(NPRFQ)描述.图 1 和图 2 给出了在 RFQ 加速器中,同一荷质比正负离子通过不同加速单元  $N$  时的聚束、加速过程的相图和密度分布.

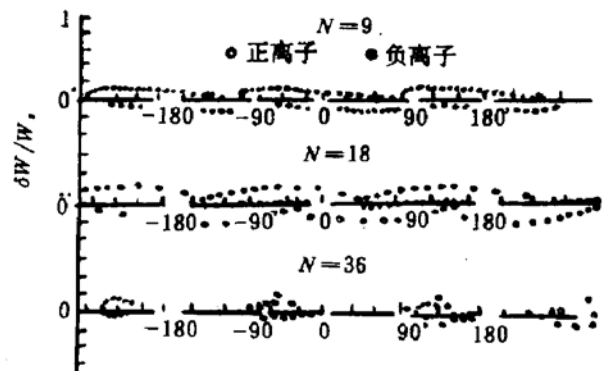


图 1 同荷质比正负离子束通过不同加速单元  $N$  时的相图

### 2.2 可行性

早在 80 年代初,美国洛斯阿拉莫斯国立实验室(LANL)就已用同一台 RFQ 加速器分别加速  $p$  和  $H^-$  离子,并获得良好结果.通常,可将初速度相等的同荷质比的正负离子同时注入 RFQ 加速器加速过程视为初速度相等的同荷质比正负离子分别注入 RFQ 加速过程的迭加,其差别仅在于正负离子束在注入 RFQ 前后直至分成正负束团过程中的空间电荷效应不同及存在正负离子碰撞造成的束流损失.这两者都是影响 RFQ 加速器

\* 本工作是两次国家自然科学基金资助课题的继续.

极限流强大小的因素。

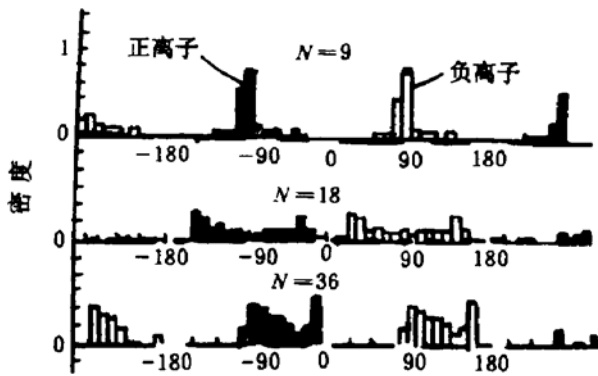


图 2 同荷质比正负离子束通过不同加速单元  $N$  时的密度分布

### 2.2.1 空间电荷效应

强流低能束的空间电荷效应,主要表现为在空间电荷排斥力的作用下,离子束将逐渐发散.引起束流发散的电场力为

$$F_r = qE_r = qI/2\pi r\epsilon_0(2q/Am_0V)^{1/2} \quad (2)$$

与离子束流强成正比.对于同时注入的正负离子束,离子束流强应为两者的代数和,即

$$I = I_+ + I_- \quad (3)$$

显然,在理想情况下,当注入同荷质比、初始速度与密度分布相同及流强相等的正负离子束,合轴后总流强  $I$  为零,无空间电荷力.实际过程中,由于正负束流来自不同的离子源,这一点在相当长的运输路程中是难于实现的,但当 RFQ 加速器注入等速等流强同一荷质比的正负离子束时,可近似于空间电荷的完全中和,即使注入束不完全相等,也可显著降低空间电荷效应,从而可提高 RFQ 加速器的极限流强.当然,正负离子束团分开后,它们之间的库仑力将影响束团与纵向分布.

### 2.2.2 正负离子束互碰撞的电荷交换损失

同向等荷质比和注入能量相等的正负离子束,由于存在能量歧离  $\pm\Delta E$  及密度分布不均匀,在合轴和群聚过程中会有部分正负离子相互碰撞复合,导致束流损失.这一过程可视为正离子束流处在负离子束流气氛中(反之亦可),以与能散相应的相对速度运动,其过程和性质与带电离子束和残余气体碰撞类

似,在较低的束流能量下,可采用同一电荷交换截面  $\sigma_0$ .初始值为  $I_0$  的正或负束流经过长度  $L(\text{cm})$  后,其流强为

$$I = I_0 \exp^{-(n+N)\sigma L} \quad (4)$$

式中,  $\sigma$  为电荷交换截面( $\text{cm}^2$ )、束流能量低于  $50\text{keV}$  时,  $\sigma$  约为  $10^{-16}\text{cm}^2$ ,  $n$  为与负或正束流相应的离子流密度,  $N$  为残余气体密度,分别为

$$n = 4.52 \times 10^6 J(A/V)^{1/2} \quad (5)$$

$$N = 4.6 \times 10^{18} T_0 P/T \quad (6)$$

两式中,  $A$  为原子质量单位、 $V$  为加速电压( $\text{MV}$ ),  $J$  为电流密度( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ),  $T_0 = 273^\circ$ ,  $K$ 、 $T$  为环境温度(绝对温标)、 $P$  为系统真空度( $\text{Pa}$ ).通常对于 RFQ,如注入束流密度为  $100\text{mA}/\text{cm}^2$ ,能量为  $20 \sim 50\text{keV}$  的 H、N、O 离子束,则  $n$  值在  $10^9$  范围内.与束流输运线中,真空为  $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$  时的残余气体密度相比小两个量级.因此,正负束相互碰撞引起的束流损失和它们与系统内残余气体相碰撞引起的束流损失相比,可以忽略.

此外,正负束流同时注入 RFQ 腔后的群聚过程中的平均等效束流,约为注入的正或负束流的  $1/2$ ,因此在聚束段束流与腔的相互作用,较正或负束单独注入时为小,这一点对强流束(数十  $\text{mA}$  以上)的加速是有益的.

综上所述,用 RFQ 同时加速同荷质比正负离子,并不存在机理性障碍.如果适当选配正负离子源并解决好注入系统与 RFQ 的匹配,这一思想应是可行的.

## 3 实验装置与目的

实验装置拟由正负双束注入器和一台现有的  $300\text{kV}$ 、可加速 C、N、O 的 RFQ 加速器及分析测量等装置组成,并将在今后的实验中逐步完善.通过对 O 的正负离子分别和同时注入与加速的实验研究,将了解和验证如下问题:(1) 在不同位置测量束流的发射度与流强变化,比较单双束注入时空间电荷效应的变化与影响;(2) 注入段正负离子的复合损

失大小与聚束段正负束相互作用引起束流纵向束流品质的变化;(3)RFQ腔的束流负载效应以及正负束同时加速的迭加原理模型等,并最终给出有价值的可行性报告,有关详尽实验结果可望一两年后给出.

如果实验验证无误,用RFQ加速器同时加速同荷质比的正负离子,对前面提到的一

些实际应用是非常有益的.

### 参 考 文 献

- 1 Kapchinskij M, et al. Prib. Tech. Eksp., 1970,4:19
- 2 Chen Chiaerh, Fang Jiaxun, Li Weiguo, et al., Proc. of 1994 EPAC, London, England
- 3 李纬国, 于金祥, 陆元荣等. 第八届三束学术年会论文集, 宜昌, 1995,21

## Investigation on Negative and Positive Ions With Equal $q/m$ in a RFQ Accelerator at the Same Time

Yu Jinxiang Chen Jiuer Li Weiguo Ren Xiaotang Fang Jiaxun  
(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

**Abstract** A tentative plan of accelerating negative and positive ions with equal  $q/m$  in a RFQ accelerator at the same time is introduced, its feasibility in principle and draft tests are also given.

**Key Words** RFQ accelerator accelerate together negative and positive ions

(上接第 53 页)

## Insitu Ion Beam Analysis of H and He Impurity Behaviour

Liu Hongtao Xia Zonghuang Shen Dingyu  
(*Department of Technical Physics, Insitute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Gou Chengling Wang Peixuan

(*Department of Material Physics, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083*)

**Abstract** The progress and some recent studies on H and He impurity behaviour in the materials at 5SDH-2 Pelletron are briefly described.

**Key Words** insitu H and He ion beam analysis