

文章编号: 1007-4627(2005)01-0081-03

## RFQ 冷却聚束器\*

黄文学, 王 玥, 徐珊珊, 孙志宇, 肖国青, 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 简要介绍了 RFQ 冷却聚束器的基本原理, 并对设计中的 RFQ 冷却聚束器的特点和利用 SIMION 程序进行模拟的初步结果进行了讨论.

**关键词:** 放射性束流; 射频四极透镜; 冷却; 聚束

**中图分类号:** O571.5      **文献标识码:** A

### 1 引言

随着国际核物理研究人员对整个核素图上各个核素的核结构和核衰变性质进行全面而精细研究的愿望越来越迫切, 放射性束流, 特别是高品质的放射性束成为人们所追逐的目标. 绝大多数放射性核素都是通过核反应产生的, 形成的放射性束流具有能量分散大、发射度大和束流斑点大的缺点, 不利于对感兴趣的稀有奇异核的探测和精细研究, 也不利于对放射性束流的再次加速, 因此把束流从低品质转化为高品质的技术成为当今核物理研究的一个任务. 这种转换技术不仅要求效率高、速度快(因为奇异核的半衰期非常短, 绝大多数短于 1 s), 而且还要对核素图中所有的核素都有效. 粒子冷却技术有很多, 文献[1]对此作了非常好的评述, 但是满足上述条件的且最好的却是缓冲气体冷却技术. 在 19 世纪末期, 人们就开始了这方面的研究, 但是被气体冷却后的离子与气体分子的碰撞时没有约束, 最后离子全都因碰撞到管壁上而损失掉. 直到 20 世纪 50 年代末期, Paul 和他的合作者<sup>[2]</sup>使用射频四极透镜(RFQ)技术, 才成功地把冷却后的离子约束起来. 1974 年, Teloy 和 Gerlich 成功地把 RFQ 运用于在有缓冲气体冷却的离子束流上<sup>[3]</sup>. RFQ 冷却聚束器的主要目的就是减小束流的能量和动量分散, 从而减少束流的发射度和束斑, 并且实现束流的脉冲化. 这将非常有利于后续的探测和操作, 诸如次级加速、激光谱学和高分辨粒子谱学等.

### 2 RFQ 冷却聚束器原理简介

图 1 是 RFQ 冷却聚束器的结构示意图, 主要由 5 部分组成, 即: (1)入射离子的减速; (2)RFQ 约束; (3)缓冲气体冷却; (4)Paul 离子阱聚束; (5)冷束流提取. RFQ 内充满了对离子进行冷却的缓冲气体. 由于氦原子的第一电离能(24.6 eV)非常高, 离子将不会因为中性化而损失, 因此 RFQ 内通常使用氦气作为缓冲气体.

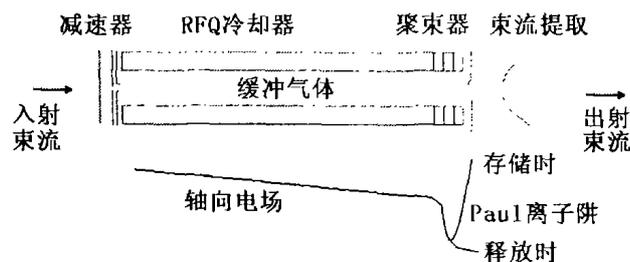


图 1 RFQ 冷却聚束器结构示意图

核反应产生的反应产物都具有很高的能量, 而能够被 RFQ 冷却聚束器接收的束流能量较低, 且能量范围有限, 因此, 进入 RFQ 的初始束流必须被减速. 根据产生方式不同, 所使用的方法也不同. 对于通过在线同位素分离器产生的束流, 一般通过静电减速的办法. 此方法的效率很高. 而对于用炮弹碎裂方法产生的束流, 流行的办法是使产物停止于充满惰性气体的气体室中, 然后使用电场把离子提取出来, 再注入 RFQ 冷却聚束器中. 国际上许

收稿日期: 2004 - 08 - 31

\* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目; 科技部重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCB01200); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KJ951-A1-01-02, No7)

作者简介: 黄文学(1969-), 男(汉族), 重庆忠县人, 副研究员, 从事原子核物理研究; E-mail: huangwx@impcas.ac.cn

多实验室都在研究这项技术<sup>[4-6]</sup>,这也是下一代放射性束流装置所需要的.但是迄今为止,这项技术的总效率还相对较低.另外通过液氮停阻束流的方法也正在探索中<sup>[7,8]</sup>.

图 2(a)所示的是 RFQ 的工作原理示意图.它由四根表面为双曲线的电极构成,其 4 个双曲线电极的顶点位于同一个内切圆上.此内切圆的半径  $r_0$  被称为 RFQ 的特征半径.4 个电极上加上幅度相同的电压,相对的两电极上所加电压的相位相同,而相邻两电极上的相位相反,即相差  $180^\circ$ ,因此在 RFQ 中将产生图 2(b)所示的电场分布.RFQ 约束的基本原理就是离子在电场中的振动将产生非耗散力,并被空间中不断变化的力所驱动,从而在整个振动周期中产生了一个同电场梯度方向相反的净余的力.越远离 RFQ 中心,电场梯度就越大,离子所受到的与其运动方向相反的阻力就越强,从而离子运动速度减慢,以至于停止.在平均力的作用下,离子向 RFQ 中心运动.周而复始,离子被约束于 RFQ 中.由于作为缓冲气体的氮气的减速作用,最后达到与氮原子的热运动平衡,离子也被聚集到 RFQ 的中心.为了加快离子在 RFQ 内的传输时间,我们通过电极分段的方法给 RFQ 加上轴向电场.图 1 也显示了轴向电场的结构.离子运动到 RFQ 的末端时将被 Paul 阱存储起来.经过一段时间后,通过降低 RFQ 末端电极的电压,Paul 阱消失,离子被释放出来,从而实现了束流的脉冲化.

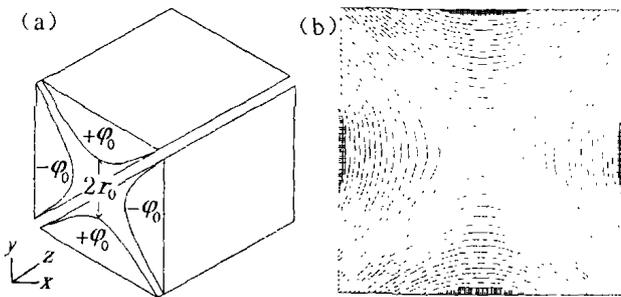


图 2 RFQ 原理示意图

### 3 SIMION 模拟

为了改善 RIBLL<sup>[9]</sup>的次级束流质量以及运用于设计中的超重核研究谱仪,设计中的 RFQ 冷却聚束器与国际上同类设备相比至少具有 3 个显著的特征:(1)特征半径  $r_0$  大.设计中的 RFQ 冷却聚束器的特征半径为 60 mm,是国际上已有和设计中的同类设备( $r_0 \leq 20$  mm)中半径最大的一个;(2)进入 RFQ 的入射束流的允许能量最高.我们的设计值在 1—10 MeV 之间,而其他设备的允许值仅为 100—200 eV;(3)RFQ 中的缓冲气体——氮气气压最高.我们的设计值为 5—10 mbar,而其他设备的工作气压均小于 0.1 mbar.因此,炮弹碎裂反应产生的束流经降能片降能后将直接进入 RFQ 中,从而减少了离子经惰性气体阻止后再在电场的引导下而进入 RFQ 的环节.理论上讲,这种设计将大大地提高整个系统的效率.但同时也导致了许多技术上的问题,给我们的工作提出诸多挑战,比如设备的加工问题、离子的传输时间问题和氮气的纯度问题等.我们正在对每一个细节进行细致的分析,并逐个提出相应的解决方案.

图 3 显示的是离子在设计中的 RFQ 冷却聚束器中的运动轨迹.所使用的程序为 SIMION<sup>[10]</sup>.此模拟中仅考虑了 RFQ 约束和缓冲气体氮气冷却两个部分.表 1 罗列了此模拟的条件设置和部分结果.模拟结果显示:经过 RFQ 冷却聚束器后,发散的束流确实被聚集到很小的范围,束流斑点由原来的  $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  减小为  $\phi 3 \text{ mm}$ .束流的能量也降

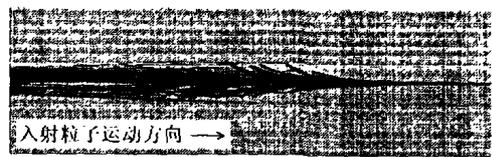


图 3 利用 SIMION 模拟的离子在 RFQ 冷却聚束器中的运动轨迹

表 1 SIMION 模拟的条件设置和部分结果

RFQ		入射束流		出射束流	
特征半径/mm	60	质量	238	斑点直径/mm	3
长度/mm	1 400	电荷	1+	能量/eV	$0.4 \pm 0.1$
q 值	0.45	能量/MeV	$2 \times (1 \pm 60\%)$	效率/(%)	95
RF 频率/kHz	150	发射度/(°)	$\pm 3$	传输时间/ms	$2.2 \pm 0.4$
轴向电场/( $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	0.2	斑点大小/mm	$80 \times 40$		
氮气气压/mbar	8				

为  $(0.4 \pm 0.1)$  eV. 在不考虑离子在 RFQ 中由于氦气中的杂质导致的电荷中和而引起损失的情况下, 其传输效率为 95%. 通过此系统的传输时间也仅为 2.2 ms.

#### 4 小结

利用 SIMION 程序对设计中的 RFQ 冷却聚束器的初步模拟表明: 此 RFQ 冷却聚束器确实能够以很高的效率冷却束流, 极大地减小束流斑点, 为

高分辨的粒子谱学和精细的激光实验提供高品质的实验基础. 但是由于我们的研究正在进行中, 还有许多因素没有经过仔细考虑, 模拟的结果还比较粗糙. 在接下来的工作中, 我们将主要集中在以下方面: (1) 在模拟中加入对束流的存储和释放以及对冷束流的提取过程, 以便全面模拟离子在 RFQ 冷却聚束器的物理过程; (2) 考虑氦气中杂质对整个系统的影响; (3) 根据模拟结果和国际上已有系统的设计经验, 开始机械设计, 并建立原型机.

#### 参 考 文 献:

- [1] Itano W M, Bergquist J C, Bollinger J J, *et al.* *Physica Scripta*, 1995, **T59**: 106.
- [2] Paul W, Reinhard H P, Zahn U V Z. *Physik*, 1958, **152**: 143.
- [3] Telyo E, Gerlich D. *Chemical Physics*, 1974, **4**: 417.
- [4] Savard G, Clark J, Boudreau C, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2003, **204**: 582.
- [5] Wada M, Ishida Y, Nakamura T, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2003, **204**: 570.
- [6] Sikler G, Ackermann D, Attallah, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2003, **204**: 482.
- [7] Huang W X, Dendooven P, Gloos K, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2003, **204**: 592.
- [8] Huang W X, Dendooven P, Gloos K, *et al.* *Europhys Lett*, 2003, **63**(5): 687.
- [9] Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2003, **A503**: 496.
- [10] Dahl D A, Delmore J E, Appelhans A D, *Review of Scientific Instruments*, 1990, **61**: 607.

## RFQ Cooler and Buncher\*

HUANG Wen-xue, WANG Yue, XU Hu-shan, SUN Zhi-yu, XIAO Guo-qing, ZHAN Wen-long  
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The principle of RFQ (Radiofrequency Quadrupole) cooler and buncher is briefly introduced. The characteristics of the being designed RFQ cooler and buncher and the preliminary results simulated by using the SIMION code are discussed.

**Key words:** radioactive ion beam; radiofrequency quadrupole; cooling; bunch

\* **Foundation item:** One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001CCB01200); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No4)