

用于放射性束流的RFQ冷却聚束器*

黄文学¹⁾ 王玥 徐瑚珊 孙志宇 肖国青 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 简要概述RFQ冷却聚束器的基本原理,并给出了利用SIMION程序模拟的部分结果.设计中的RFQ冷却聚束器与国际上其它同类设备相比,具有特征半径大、入射粒子的允许能量上限值高和氦气气压高的特点,因此本文最后对需要克服的困难作了一个简要的阐述.

关键词 放射性束流 射频四极透镜 缓冲气体 冷却 聚束

1 RFQ冷却聚束器的原理简介

越来越多的对远离 β 稳定线奇异核的核结构和核衰变性质的精细研究,诸如精细的粒子谱学、角关联测量和激光谱学等等,以及对超重核乃至超重元素的探索都迫切需要低能量、高品质的放射性束流.然而,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,因此这就需要对核反应产生的高能量、低品质的次级束流进行进一步的操纵,包括对粒子的冷却和聚束等等.虽然有诸多的实验技术可供使用^[1],但是RFQ(Radiofrequency Quadrupole)冷却聚束器是适合这项任务的最佳选择.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.

图1是RFQ冷却聚束器的结构示意图,按功能划分,主要由五部分组成,即:(1)入射离子的减速,

(2)RFQ约束,(3)缓冲气体冷却,(4)Paul阱聚束,(5)冷束流提取.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.

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,比如使用固体降能片.因为反应产物的能量存在一定的差异,所以使用某种设定的减速方法不可能把所有的反应产物完全阻止,那么剩余的能量最后将在缓冲气体——氦气中被耗散掉.在不断变化的RF电场中,粒子将受到一个同电场梯度方向相反的净余力.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,离子又开始向RFQ中心运动,从而周而复始,离子被约束于RFQ中.并且,由于作为缓冲气体的氦气的减速作用,离子的动能将逐渐降低,最后达到与氦原子的热运动平衡,离子也被聚集到RFQ的中心.在没有轴向电场的情况下,离子在轴向将做无规则运动.为了加快离子在RFQ内的传输,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.

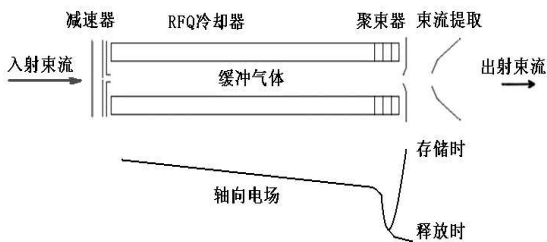


图 1 RFQ冷却聚束器结构示意图

* 中国科学院百人计划项目,科技部重大项目前期研究专项基金项目(2001CCB01200)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(CKJCX2-SW-N04)资助

1) E-mail: huangwx@impcas.ac.cn

2 SIMION模拟

我们对离子在RFQ冷却聚束器内的整个运动轨迹进行了模拟。所使用的程序为SIMION^[2]。模拟中包括了粒子运动的全过程。但是由于整个过程比较复杂，且受篇幅的限制，我们在此就不进行详细的讨论了，仅仅给出一部分模拟结果。

图2显示的是离子在设计中的RFQ冷却聚束器中的运动轨迹。此模拟中仅考虑了RFQ约束和缓冲气体氦气冷却两个部分。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，束流斑点大小由原来的80mm×40mm减小为直径3mm。束流

的能量也降为 0.4 ± 0.1 eV。若不考虑离子在RFQ中由于氦气中的杂质导致的电荷中和而引起的损失，其传输效率为95%。通过此系统的传输时间也仅为2.2ms。对RFQ冷却聚束器末端的Paul阱的模拟也表明这套设备可以实现对放射性粒子的聚束和释放，从而实现束流的脉冲化。但是，值得注意的是：所有这些结果都是理论计算得出的，还必须克服实验技术上的诸多困难。

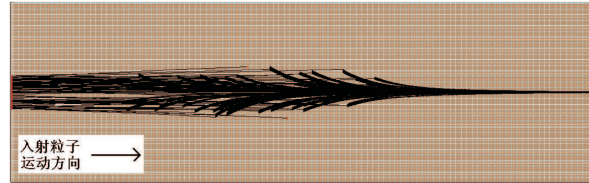


图2 离子在RFQ冷却聚束器中的运动轨迹

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	$\Phi 3$
长度/mm	1400	电荷	1^+	能量/eV	0.4 ± 0.1
Mathieu q值	0.45	能量/MeV	$2 \times (1 \pm 60\%)$	效率(%)	95
RF频率/kHz	150	发射度	$\pm 3^\circ$	传输时间/ms	2.2 ± 0.4
轴向电场/V/cm	0.2	斑点/mm	80×40		
氦气气压/mbar	8				

3 特点和难点

为了改善RIBLL^[3]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^[4-6]相比至少具有三个最显著的特征：(1)特征半径 r_0 大。设计中的RFQ冷却聚束器的特征半径为60mm，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—10MeV之间，而其他设备的允许值仅为100—200eV；(3)RFQ中的缓冲气体——氦气气压最高。我们的设计值为5—10mbar，而其他设备的工作气压均小于0.1mbar。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。

但是，正是由于设计中的RFQ冷却聚束器具有以上的特点，我们不得不克服在其他同类设备上不需要仔细考虑的，或者可以忽略的技术上的难题。为了提高RFQ冷却聚束器的工作状态和工作效率，我们至少要克服以下三个互相关联的困难：

(1)高压击穿相关的电压问题。RFQ冷却聚束器中充满了mbar量级的氦气，真空度非常低。而此时正是

最容易发生气体放电的区域，从而电极间电压不可能加得非常高。气体放电问题是我们必需对待的严重问题。

(2)氦气纯度问题。设计中的RFQ冷却聚束器约为1.6米，充满了几个mbar的氦气，并且在末端还需要把离子存储起来，因此离子在冷却聚束器内的传输时间非常长。而离子一旦俘获电子中性化，离子将被丢失，从而降低了冷却聚束器的传输效率，因此冷却聚束器内的氦气纯度需要非常高，达到0.1ppm，甚至更高。我们对RFQ冷却聚束器的设计采用了超高真空设计的方法，并且对购买的高纯度氦气将作进一步的纯化。

(3)部件的加工和设备的装配问题。出于超高真空的要求，此RFQ冷却聚束器的各个部件将基本上只采用不锈钢制造。整个RFQ冷却聚束器部件的数量很大，因此部件的加工精度要求很高，并且总重量将达到600kg，对整个设备的装配也是我们必须面对的难点。

4 小结

总之，利用SIMION程序对设计中的RFQ冷却聚束器的模拟表明：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等提供高品质的实验基础。

但是因为设计中的RFQ冷却聚束器具有的独特特点,我们将面临诸如高压击穿、氦气纯度、精密部件的加工和设备的装配等困难. 现在我们已经进入机械设计

阶段, 在不久的将来就可以建立一套完整的原型机, 从而开始细致测试文中提到的技术难点和我们的解决方案.

参考文献(References)

- 1 Itano W M, Bergquist J C, Bollinger J J et al. *Physica Scripta.*, 1995, **T59**: 106
- 2 Dahl D A, Delmore J E and Appelhans A D. *Review of Scientific Instruments*, 1990, **61**: 607
- 3 SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y et al. *Nucl. Instr. Meth.*, 2003, **A503**: 496
- 4 Nieminen A, Huikari J, Jokinen A et al. *Nucl. Instr. Meth.*, 2001, **A469**: 244
- 5 Herfurth F, Dilling J, Kellerbauer A et al. *Nucl. Instr. Meth.*, 2001, **A469**: 254
- 6 LIU Y, LIANG J F, Alton G D et al. *Nucl. Instr. Meth.*, 2002, **B187**: 117

RFQ Cooler and Buncher for Radioactive Ion Beam*

HUANG Wen-Xue¹⁾ 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 and some results of simulation by using the SIMION code are given. Compared to the other similar devices around the world, the being designed RFQ cooler and buncher has the following characteristics: much larger characteristic radius, much higher kinetic energy to be allowed to inject in and much higher helium buffer gas, so the difficulties to be overcome are listed.

Key words radioactive ion beams, radiofrequency quadrupole, buffer gas, cooling, bunch

* Supported by 100 Talents Programme of Chinese Academy of Sciences, National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology(2001CCB01200) and Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N04)

1) E-mail: huangwx@impcas.ac.cn