

混合离子加速技术在单粒子效应试验中的应用

张庆祥¹, 侯明东², 王立¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 基于电子回旋共振 (ECR) 离子源的混合离子加速 (CBA) 技术, 使回旋加速器可以快速地更换所加速离子的种类和能量, 从而在单粒子效应敏感度评估以及探测器标定等方面发挥更大的作用。文章比较详细地阐述了混合离子加速技术原理及其在单粒子效应试验研究中的应用, 并指出荷质比 (q/A) 的分辨率是精确引出所需离子的关键; 增加引出圈数, 可以提高不同离子间的相位差; 改进 ECR 的注入措施, 可以缩短更换离子种类的时间。

关键词: 混合离子加速; 回旋加速器; 单粒子效应

中图分类号: V416.8

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2008)02-0106-04

1 引言

空间辐射环境对航天器微电子系统有着严重的危害, 是诱发航天器异常和故障的主要原因。宇宙线中的单个重离子射入半导体器件, 在其敏感区中沉积足够的能量, 引起器件发生逻辑状态改变、锁定、甚至烧毁等现象, 称为单粒子效应。单粒子效应对航天器的正常工作构成严重的威胁, 因此国际上对单粒子效应进行了大量的地面模拟试验研究, 主要的模拟手段是各种类型的重离子加速器, 常用的有串列静电加速器、回旋加速器。在单粒子效应模拟试验中, 两个重要的离子参数是射程和 LET (线性能量转移)。首先离子必须具有足够的射程, 以便穿透器件的敏感区, 而且穿敏感区前后离子的能量不发生显著的变化, 这样就可以方便地用 LET 来表示离子在敏感区中沉积的能量。根据事件发生的截面确定的临界 LET 值是衡量器件单粒子效应敏感度的主要指标之一。与串列静电加速器相比, 回旋加速器加速的离子能量相对较高, 在硅中具有较大的射程, 这对单粒子效应模拟非常有利, 尤其适合具有聚酰亚胺膜保护或灵敏区比较深的器件; 另外, 回旋加速器还可以通过改变离子入射角度来增加有效 LET 或研究单粒子效应与入射角度的关系。但是回旋加速器调整和优化运行参数需要较长的时间, 在试验过程中改变离子种类和能量将大大降低束流时间的使用效率, 使得试验

成本增加。因此回旋加速器的单粒子效应试验一般只使用一种离子, 这在一定程度上限制了回旋加速器在单粒子效应试验中的应用。

地面加速器模拟试验的一个重要目的是评价器件的单粒子效应敏感度, 对于重离子而言, 就是获得器件的单粒子事件截面与离子 LET 的关系, 即 σ -LET 曲线。在获得 σ -LET 曲线基础上, 考虑离子与器件敏感区相互作用的机制, 并结合特定轨道的空间辐射环境就可以预示器件在轨道发生单粒子事件的频度, 这对于航天器电子系统的抗辐射加固具有重要的参考价值。获得 σ -LET 曲线要求离子的 LET 范围从 1 到大约几十 $\text{MeV}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 之间。虽然通过放置降能片和改变离子入射角度的办法可以在一定程度调整离子的 LET 值, 但毕竟范围有限。在以往单粒子效应的地面模拟中, 串列静电加速器由于其改变离子种类和能量相对方便, 因此多用于器件敏感度的评价工作, 如美国 Brookhaven 国家实验室 (BNL) 的单粒子翻转测试装置 (SEUTF)、国内原子能科学研究所的 HI-13 串列静电加速器等; 至于回旋加速器, 如美国 Lawrence Berkeley 实验室 (LBL) 的 88 inch 回旋加速器、国内的兰州重离子加速器 (HIRFL), 则多用于单粒子效应的机理研究。随着航天部门对高性能的追求, 越来越多的高集成度、高性能的新型器件在空间环境中得到应用。这些器件大多对单粒

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2007-11-21

作者简介: 张庆祥 (1971-), 男, 博士学位, 从事卫星抗辐射加固技术与空间辐射效应研究。联系电话: (010) 68747304。

子效应非常敏感, 在应用之前必须对其单粒子效应敏感度进行评价, 因此近年来单粒子效应地面模拟试验研究的主要内容就是器件敏感度的评价。高性能商用器件采用特殊的封装, 甚至是塑封, 顶盖难以去除, 低能离子的射程不足以穿透其灵敏区; 另外要将高速器件和复杂器件从管座引出也非常困难, 在很多情况下需要在大气环境下进行辐照试验。以上这些都对试验所用离子的射程提出了更高的要求, 迫切要求回旋加速器在器件单粒子效应敏感度评估中发挥更大的作用。

美国 Lawrence Berkeley 实验室的 M. A. McMahan 于 1986 年提出了基于 ECR 源和回旋加速器组合的混合离子加速 (Cocktail Beam Acceleration, CBA) 技术^[1]。CBA 技术极大地缩短了回旋加速器更换离子种类和能量所需要的时间, 对于单粒子效应、探测器标定、材料以及生命科学的辐照效应等研究的开展具有重要的应用价值。本文首先介绍 CBA 技术的原理以及国外的应用情况, 最后将结合我们以往开展的工作, 讨论 CBA 技术在单粒子效应试验研究中的应用。

2 混合离子加速 (CBA) 技术的基本原理

CBA 技术的基本原理是具有相同荷质比的不同元素可以用同一个等时磁场和加速频率来加速, ECR 离子源和回旋加速器组合是该技术实现的前提条件。ECR 离子源能够产生高电荷态离子, 尤其对于较重的离子。采用合适的源注入措施, ECR 离子源可以同时产生具有相同荷质比的不同元素。注入到回旋加速器中的混合元素在磁场作用下受洛伦兹力而作回旋运动, 高频腔体使离子在回旋过程中得到加速。回旋加速器加速的离子的能量取决于加速器的参数, 如回旋半径、磁场参数、高频参数等, 加速能力可以用常数 K 来描述, 如式(1)。

$$E/A=K(q/A)^2, \quad (1)$$

式中: E 是引出离子的总能量; A 和 q 分别为所加速离子的相对原子质量和电荷数; K 为能量常数。从式(1)可以看出回旋加速器可以将具有相同荷质比的元素加速到相同的速度。

在等时加速状态下, 被完全加速的离子满足式(2)的关系。

$$2\pi \frac{f_{RF}}{h} = \frac{q}{A} \frac{B_0}{m_0 c^2}, \quad (2)$$

式中: f_{RF} 是 RF 频率; h 是谐波数; B_0 是磁感应强度; m_0 是归一化的原子质量单位。

由于质量亏损, 名义上荷质比相同的不同离子的荷质比还是具有细小的差别, 这些差别引起的相位 ϕ 的漂移如式(3)^[2]。

$$\Delta \sin \phi = 2\pi h N \frac{\Delta(A/q)}{A/q}, \quad (3)$$

其中 N 是引出圈数。 $\Delta B/B$ 和 $\Delta f_{RF}/f_{RF}$ 与 $\Delta(A/q)/(A/q)$ 成正比, 因此通过微调磁感应强度和 RF 频率就可以引出不同的离子。而改变磁场和 RF 频率可以在很短的时间内完成, 不影响束流时间的使用效率。

混合束中包含的离子种类取决于 ECR 源能够产生高电荷态元素的能力; 而要精确地引出所需要的离子, 避免引出束受不同离子的污染, A/q 分辨率是一个关键指标。增加引出圈数可以提高不同离子之间的相位差, 合理地选择离子种类; 改进 ECR 源的注入措施也可缩短更换离子种类的时间。

3 国外 CBA 技术的实现

3.1 美国 Lawrence Berkeley 实验室 (LBL)

LBL 的 88 inch 回旋加速器^[3]是 NASA 以及其他相关机构进行宇航器件单粒子效应试验研究的主要装置之一。上世纪 90 年代初期采用轻、重两组混合束, 前者能量最高的是 ^{36}Ar , 后者能量为 4.5 MeV/u; LET 的范围从 3~60 MeV/(mg·cm⁻²), 在 Si 中的射程从 43~69 μm ; 加入 Bi 后, LET 值可以达到 100 MeV/(mg·cm⁻²)。为了满足当前单粒子效应试验对长射程的要求, 在采用先进 ECR 源以及改进真空系统的基础上, 加速了一组能量为 10 MeV/u 的离子, LET 的范围为 0.8~53 MeV/(mg·cm⁻²), 射程范围 115~330 μm , 其主要成分见表 1。目前在 LBL 进行的辐照效应试验中大约一半采用混合离子加速技术。混合束流不但可以覆盖一个较宽的 LET 范围, 而且其中包含不同能量和不同电荷态的离子。从表 1 也可以看出, 混合离子的能量在 100~1 500 MeV 之间, 非常适合中能重离子探测器的标

定。除了单粒子效应试验，该加速器还用于探测器标定和校准。M. A. McMahan等人利用 q/A 为1/4、 E/A 为8~30 MeV/u的从 ${}^4\text{He}^{1+}$ 到 ${}^{84}\text{Kr}^{21+}$ 的17种离子在2 h时间内研究了塑料闪烁探测器对中能重离子的响应特性。

表1 LBL回旋加速器10 MeV/u混合束的主要成分
Table 1 Main elements of LBL 10 MeV/u cocktail beam

离子种类	能量/MeV	LET/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	在Si中的射程/ μm
${}^{11}\text{B}^{3+}$	108.2	0.89	323
${}^{18}\text{O}^{5+}$	183.5	2.19	228
${}^{22}\text{Ne}^{6+}$	216.3	3.44	179
${}^{40}\text{Ar}^{11+}$	400.0	9.88	323
${}^{51}\text{V}^{14+}$	508.3	14.8	116
${}^{65}\text{Cu}^{18+}$	659.2	21.6	108
${}^{86}\text{Kr}^{21+}$	886.0	30.0	111
${}^{136}\text{Xe}^{38+}$	1403.4	53.6	110

3.2 比利时鲁汶天主教大学 (Universite Catholique de Louvain)

比利时鲁汶天主教大学的回旋加速器CYCLONE^[4]的 K 值为110，可以加速质子（能量最高为85 MeV）， α 粒子以及重离子，离子源是一个单级ECR源（6.5 MHz）。经过评估和认定，欧洲航天局（ESA）在CYCLONE建立了一条专用的重离子单粒子效应辐照装置（HF）。其 A/q 约为1/5的一组混合束的成分见表2。该装置自1996年11月正式开放以来，ESA等机构已经成功地利用该装置进行了包括场效应管（FFT）、数字信号处理器（DSP）、静态存储器（SRAM）以及动态存储器等多种器件单粒子效应敏感度的评估，并与美国的BNL（Brookhaven National Lab）的串列静电加速器得到的试验数据进行了对比，希望CYCLONE能够在器件单粒子效应敏感度评估方面达到BNL的水平，成为欧洲版的BNL。

表2 CYCLONE回旋加速器 ($q/A \approx 1/5$) 混合束的主要成分
Table 2 Main elements of CYCLONE cocktail beam ($q/A \approx 1/5$)

A/q	离子种类	能量/MeV	LET/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	在Si中的射程/ μm
4.94	${}^{84}\text{Kr}^{17+}$	316	34	43
5	${}^{40}\text{Ar}^{8+}$	150	14.1	42
5	${}^{20}\text{Ne}^{4+}$	78	5.85	45
5	${}^{15}\text{N}^{3+}$	62	2.97	64
5	${}^{10}\text{B}^{2+}$	41	1.7	80
5.07	${}^{132}\text{Xe}^{26+}$	459	55.9	43

3.3 日本原子能研究中心 (JAERI)

JAERI的AVF回旋加速器^[2,5,6]建成于1989年，可以从P到Xe的离子加速到10到几百MeV，主要用于材料科学以及生命科学的研究。该回旋加速器提供的典型混合束的主要成分及其相关参数见表3。从表中可以看出离子 f_{RF} 之间的差别很小，为了避免引出离子的互相干扰，例如将 ${}^{12}\text{C}^{3+}$ 和 ${}^{20}\text{Ne}^{5+}$ 与 ${}^{16}\text{O}^{4+}$ 分开，除了采用多圈引出，还对ECR源OCTOPUS的注入系统进行了改进，见图1^[6]。对每一种离子分别采用不同的气体源，气瓶的容量尽可能小，采用氮气（其 q/A 远离1/4）作为共用的支持气体以节省吹洗管道的的时间。上述措施的应用使不同离子的切换可以在10 min以内完成。

表3 AVF回旋加速器 ($q/A \approx 1/4$) 混合束的主要成分
Table 3 Main elements of AVF cocktail beam ($q/A \approx 1/4$)

离子种类	能量/MeV	A/q	f_{RF} /MHz
${}^4\text{He}^{1+}$	25	4.00210	11.9073
${}^{12}\text{C}^{3+}$	75	3.99947	11.9152
${}^{16}\text{O}^{4+}$	100	3.99818	11.9190
${}^{20}\text{Ne}^{5+}$	125	3.99794	11.9197
${}^{40}\text{Ar}^{10+}$	250	3.99569	11.9264
${}^{84}\text{Kr}^{21+}$	525	3.99524	11.9278

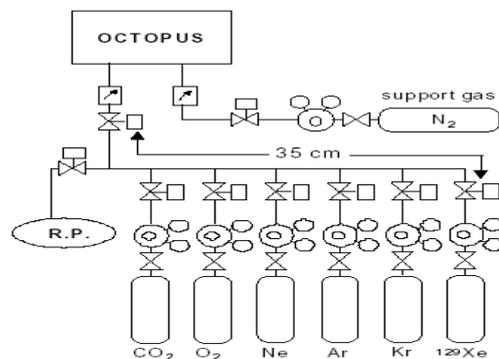


图1 改进的OCTOPUS气体注入系统示意图

Fig.1 A sketch of modified OCTOPUS gas injection system

4 CBA技术在单粒子效应试验研究中的应用

兰州重离子加速器(HIRFL)属于回旋加速器，采用ECR离子源，是国内能量最高的重离子加速器。自1992年以来，利用HIRFL加速的重离子开展了多项单粒子效应试验研究，例如“风云一号”卫星故障的地面复验试验，“实践”系列卫星搭载单粒子效应飞行试验仪器的地面验证等。2000年专门用于单粒子效应试验研究的模拟试验装置投入运行，使HIRFL的单粒子效应试验条件从根本

上得到了改善; 120 MeV高能质子加速装置的即将建成, 更使HIRFL在单粒子效应试验研究方面具有很大的优势。近年来, 我们就如何利用HIRFL开展宇航器件单粒子效应敏感度评价开展了一系列工作^[7-11]。例如图 2^[11]给出我们利用HIRFL获得的静态存储器IDT71256 单粒子翻转的 σ -LET曲线, 这一试验数据可以直接为航天器电子系统的抗辐射加固设计提供依据。IDT71256 芯片表面覆盖了一层聚酰亚胺膜, 因此其单粒子效应试验对离子射程的要求很高, σ -LET曲线的获得充分体现了HIRFL加速的离子能量高的优势。但从中也可以看出, 即使采用两种离子, 先后进行了两次试验, 并采用倾角入射改变离子的LET, 但在曲线的上升区仍然缺乏试验数据, 必须通过拟合来获得完整曲线。Weibull和Lognormal分别拟合的结果存在不小的差别, 给器件轨道翻转率的预示带来很大的误差。因此改变离子种类和能量耗费时间较长的缺点限制了HIRFL在宇航器件单粒子效应敏感度评价方面的应用, 而前面介绍的CBA技术无疑将能够极大地推动HIRFL在这方面的应用。而且, CBA技术还可以用于对离子射程要求高的单粒子锁定以及单粒子烧毁等破坏性单粒子效应的敏感度评价, 因此具有非常重要的工程应用价值。

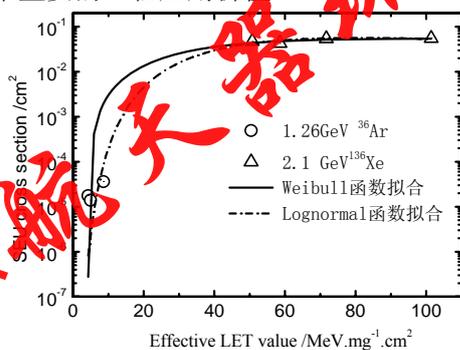


图 2 用 HIRFL 加速的重离子获得的 IDT71256 的 σ -LET 曲线

Fig.2 σ -LET curve obtained with heavy ions accelerated by HIRFL

事实上除了研究单粒子效应, 回旋加速器快速提供的不同能量、不同电荷态的离子对于中能重离子探测器的标定也具有重要的应用价值。对于快重离子在材料和生物中产生的辐射效应而言, 离子的 LET 是一个关键的参数; 方便地改变离子的 LET 值, 也将极大促进材料和生物的快速重离子辐照效应研究。日本 JAERI 的 AVF 回旋加速器采用 CBA

技术更多是为了材料和生物辐照效应的研究。

5 结束语

通过采用 CBA 技术可以大大缩短更换离子种类/能量所需要的时间, 使回旋加速器在与 LET 有关的辐射效应的研究中发挥更大的作用。CBA 技术在美国、欧洲以及日本已经应用于单粒子效应试验、探测器标定以及材料和生物辐射研究工作。兰州重离子加速器 (HIRFL) 采用 ECR 源加回旋加速器的组合, 如果实现 CBA 技术, 将极大推动 HIRFL 在宇航器件单粒子效应敏感度评价和高能粒子探测器标定方面的应用。

参考文献 (References)

- [1] McMahan M A, Wozniak G J, Lynce C M, et al. Using a cyclotron plus ECR source for detector evaluation and calibration[J]. Nucl Instr & Meth, 1986(A253): 1
- [2] Fukuda M, Arakawa K, Okumura S, et al. Acceleration of cocktail ions at the JAERI AVF cyclotron[C]// Proceeding of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York, 1999: 2559
- [3] Leitner-Wutter D, Argento D, Gimble T, et al. Heavy ion cocktail beams at the 88 inch cyclotron[C]// 15th International Workshop on ECR Ion Sources. Finland: University of Jyväskylä, 2002-06
- [4] Berger G, Ryckewaert G, Harboe-Sorensen R, et al. CYCLONE—a multipurpose heavy ion, proton and neutron SEE test site[C]// RADECS'97. Cannes, France, 1997-09
- [5] Fukuda M, et al. Development of cocktail beam acceleration for a fast ion species and energy change [G]// JAERI Review 96-017(229), 1997
- [6] Yokota W, Saitoh Y, Nara T, et al. Status of ECR ion sources at JAERI[C]// 14th International Workshop on ECR Ion Sources. Geneva, Switzerland: CERN, 1999-05
- [7] 张庆祥, 侯明东, 刘杰, 等. 利用¹²C离子模拟质子引起的单粒子效应[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(3):169
- [8] 张庆祥, 侯明东, 刘杰, 等. 利用 HIRFL 开展单粒子效应试验研究的几点考虑[C]// 甘肃省核学会 2001 年学术交流会. 兰州, 2001
- [9] Hou Mingdong, Zhang Qingxiang, Liu Jie, et al. Single event effects induced by 15.14 MeV/u ¹³⁶Xe ions [J]. 高能物理与核物理, 2002, 26(9)
- [10] 张庆祥. 利用 HIRFL 评估半导体器件单粒子效应敏感度的研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2002
- [11] Zhang Qingxiang, Hou Mingdong, Liu Jie, et al. σ -LET curve obtained with heavy ions accelerated by HIRFL[J]. Chinese Science Bulletin, 2002(47): 17