

# 从单粒子效应的地面模拟评价 兰州重离子加速器

侯明东 刘杰 马峰 程松

(中国科学院近代物理研究所, 兰州, 730000)

宇航器件的单粒子效应是威胁航天器安全的重要因素之一, 利用加速器的地面模拟是研究单粒子效应的主要手段。从单粒子效应模拟研究对加速器的基本要求出发, 论证了兰州重离子加速器在单粒子效应研究中的重要地位。

关键词 单粒子效应 重离子加速器 重离子模拟

单粒子效应是威胁航天器安全的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。随着航天器体积的增大, 在空间工作时间的增长, 单粒子效应的发生几率随之增加。此外集成电路的包装密度增大, 使得单粒子现象出现的阈值降低。惨痛的教训和沉重的代价, 使人们认识到单粒子效应研究的重要性和迫切性。我国在单粒子效应方面已开展了广泛的研究工作, 并取得了一定的成果。中国原子能科学研究院的串列加速器和兰州重离子加速器是我国可以开展单粒子效应研究的主要设备。本文将从单粒子效应模拟研究对加速器的基本要求出发, 进一步论证兰州重离子加速器在单粒子效应研究中所起的重要作用。

## 1 单粒子效应模拟研究及所用加速器概况

高能质子、 $\alpha$ 粒子和重离子均能引起单粒子效应, 但重离子引起单粒子效应是最基本的过程<sup>[4]</sup>。根据所使用的射线来源的不同, 单粒子效应的实验研究可以采取空间研究和地面模拟 2 种途径。

1) 利用天然宇宙射线 宇宙射线含有大量的高能质子和重离子, 用它研究单粒子效应, 环境真实结果可信。但必须把所研究的器件送到一定高度, 即采用卫星搭载的方法, 因此实验费用高、周期长、实验参数不易控制。

2) 利用地面重离子源 地面的重离子源主要有 2 种: 自发裂变源(典型的是  $^{252}\text{Cf}$  源)和由加速器产生的重离子。

在单粒子效应研究中,  $^{252}\text{Cf}$  源已被广泛地使用, 特别是在没有加速器的地方。它具有使用方便、经济快速等优点, 但有许多不可克服的弱点: 即它的质量和能量都不是单一的, 有一个双峰分布, 因而粒子的线性能量转移 LET 值也是一个平均量; 它的射程有限, 轻、重碎片在 Si 中

的平均射程分别为 17.5 和 13.6  $\mu\text{m}$ , 极大地限制了<sup>252</sup>Cf 源的使用。而加速器所产生的重离子种类和能量可以人为地选择, 从而能获得所需要的 LET 值; 辐照剂量和辐照条件可以人为地控制和设置, 有利于机理研究和器件的筛选; 实验周期短、费用低、允许反复多次测试。因此, 重离子加速器在单粒子效应研究中占有重要的位置, 成为不可替代的地面模拟手段<sup>[5]</sup>。

常用的加速器有 2 种类型: 串列静电加速器和回旋加速器。回旋加速器的基本原理是磁场通过劳伦兹力使加速的离子作回旋运动, 而通过高频腔体使离子在回旋的过程中得到加速, 所能加速的离子种类取决于离子源。所能获得的离子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。表1给出了世界上开展单粒子效应研究的回旋加速器的概况。表1中  $K$  为加速器能量常数。

表1 世界上开展单粒子效应研究的回旋加速器概况

Table 1 Cyclotrons in the world employed to perform single event effect tests

国别与单位	$K$	离子源	国别与单位	$K$	离子源
美国 伯克利 88in	70- 160	ECR	日本 RIKEN (Saitawa)	540	ECR
法国 GAN L (Caen)	300	ECR	JAERI (Takasaki)	100	ECR
ISN (Grenoble)	90	ECR	前苏联 JNR (Dubna)	145	Arc
ISN (Grenoble)	160	ECR	JNR (Dubna)	540	PIG
IPN (Orsay)	75	PIG	JNR (Dubna)	625	Arc
德国 HMI (Berlin)	130	静电 PIG	中国 SFC (Lanzhou)	69	ECR
KFA (Jülich)	180	ECR	SSC (Lanzhou)	450	ECR

兰州重离子加速器装置(HIRFL)是我国唯一 1 台能将 C 到 Ta 的多种离子加速到 10-100 MeV/u 的大型重离子加速器, 它由注入器 SFC、主器 SSC、前、后束运线以及 8 个物理终端组成。注入器 SFC 是 1 台直径为 1.7 m 的扇聚焦回旋加速器, 其能量常数  $K = 69$ , 主加速器 SSC 是 1 台能量常数为 450 的分离扇回旋加速器, 它由 4 台扇形电磁铁、2 台高频加速腔和一个真空室组成。SFC 及 SSC 的主要参数参见文献[6]。表2给出了 HIRFL 1996 年拟提供的离子种类和能量的最新数据以及这些离子在 Si 中的射程和 LET 值。

表2 HIRFL 1996 年拟提供的离子能量及在 Si 中的射程和 LET 值

Table 2 The energies and the values of range and LET in Si for the ions accelerated by HIRFL in 1996

被加速的离子	SFC			SSC			
	离子能量/ MeV	Si 中射程/ $\mu\text{m}$	Si 表面 LET/ $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$	离子能量/ MeV	Si 中射程/ $\mu\text{m}$	Si 表面 LET/ $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$	垂直入射 60° 入射
<sup>12</sup> C	54.4	73.2	2.2	600	4049	0.36	0.7
<sup>14</sup> N	63.4	66.8	2.9	700	3468	0.48	1.0
<sup>16</sup> O	72.5	62.5	3.7	800	3059	0.64	1.3
<sup>20</sup> Ne	48.0	25.4	5.5	500	736.7	1.7	3.4
<sup>32</sup> S	89.3	25.8	14.0	960	667.7	3.7	7.4
<sup>40</sup> Ar	111.6	28.0	14.1	1200	689.3	4.7	9.4
<sup>84</sup> Kr	129.4	19.8	37.6	1361	189.2	23.6	47.2
<sup>129</sup> Xe	99.3	14.4	48.5	1032	83.4	54.5	109

## 2 单粒子效应的地面模拟对加速器的要求

单粒子效应模拟对加速器的基本要求是: 有大的 LET 可变范围、足够的射程、小的能量展宽、均匀的束流面密度和能获得弱的束流。兰州重离子加速器在这5个方面具有良好的性能, 可以成为单粒子效应地面模拟的一个有效工具。

### 1) 关于 LET 的要求

在硅中产生一个载流子对需要 3.6 eV, 欲在灵敏区收集到临界电荷  $Q_c$  ( $10^{12}$  C), 所需的最小沉积能量  $E_{min}$  (MeV) 为:

$$E_{min} = 22.5 Q_c / f$$

其中  $f$  为收集效率。这个能量需由入射离子的能量损失来提供:

$$E_{min} = (dE/dX) \cdot \tau$$

其中:  $\tau$  为灵敏区厚度。对于给定的器件, 灵敏区的线度  $\tau$  和临界电荷  $Q_c$  是无法人为改变的, 必须  $dE/dX$  大于某一数值才能引起单粒子事件, 这也就限定了离子的种类和能量的选择范围。

兰州重离子加速器可以加速从 C 至 Ta 的多种离子, 为 LET 的选择提供了广阔的范围。表2给出的典型离子的 LET 值是指入射表面的 LET 值, 除 Xe 以外的其它离子在表面以下 LET 将有极大值。由表 2 可见, 采用倾角入射时, 有效的 LET 值得到进一步的扩展, 可以达到  $100 \text{ MeV}/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$  以上, 能较好地满足获得翻转截面 LET 谱的需求。

### 2) 关于能量的要求

器件表面至灵敏区有一定的距离, 离子必须在材料中有足够的射程, 才能到达灵敏区并在其中沉积足够的能量。对于顶层较厚的 CMOS 器件, 倾角入射的辐照方法和 LET 较大的重离子, 这一问题变得更为突出, 能否到达灵敏区是个需要考虑的关键问题。对于高 LET, 能损失大, 尤其需要离子有高的能量。

一般串列加速器由于端电压的限制难以将重离子加速到很高的能量, 但它易于更换离子种类, 较适合于用低 LET 的离子做翻转阈值的工作, 而回旋加速器的高能离子允许做倾角入射, 较为适合于做高 LET 的翻转截面研究。两种类型的加速器可以相互配合和补充。

此外, 不同的单粒子现象涉及的灵敏区深度不同, 深表效应的研究具有重要的意义, 它发生在表面以下 25- 60  $\mu\text{m}$  的层次, 因此较高的能量、较大的射程可以揭示更多的现象。

兰州重离子加速器加速的离子在 Si 中的射程也列于表 2 中。对于 Ar 离子有将近 700  $\mu\text{m}$  的射程, 对于较重的 Xe 离子也有 83.4  $\mu\text{m}$  的射程。长的射程为倾角入射提供了先决条件, 可以在更大的范围改变 LET。

由于兰州重离子加速器有高的能量, 对带有聚酰亚胺保护膜的器件仍然可以进行单粒子现象的检测, 而且允许通过箔窗将束流引到空气中, 可在空气中进行单粒子现象的检测, 这对于整机测试及器件的更换无疑带来许多方便。“实践4号”科学探测卫星中“单粒子事件监测器”的试验芯片就是将兰州重离子加速器的 Ar 束引到空气中检测的。

同时需要指出的是: 回旋加速器给出的离子能量高, 常处在  $dE/dX$ -E 曲线峰值的高能一侧, 它将在芯片的某一深度上达到  $dE/dX$  的最大值。而串列加速器的离子具有较低的能量, 常处在  $dE/dX$ -E 的曲线峰值的低能一侧, 这样的离子入射到芯片上, 随深度增加,  $dE/dX$  呈单调下降, 也就是说最大的  $dE/dX$  在表面。这对于采用双金属工艺的 CMOS 器件在顶层中将损失可观的能量, 到达灵敏区时  $dE/dX$  已有较大的降低。

表3给出了兰州重离子加速器提供的 1361 MeV 的 Kr 离子和 1032 MeV 的 Xe 离子在芯

片不同深度层次中沉积的能量, 为了比较也列出了低能 300 MeV Kr 和 300 MeV Xe 离子在相应层次中沉积的能量。表3说明在顶层中低能离子要比高能离子损失较多的能量, 特别是在倾角入射时, 对于越重的离子这种情况就越严重。所以对于重的离子和倾角入射, 高的离子能量是必须的。

表3 Kr 和 Xe 离子在器件不同层次沉积的能量

Table 3 Deposition energy in different depth of devices for Kr and Xe ions

层次深度/ $\mu\text{m}$	$E_{\text{Kr}}=300\text{ MeV}$		$E_{\text{Kr}}=1361\text{ MeV}$		$E_{\text{Xe}}=300\text{ MeV}$		$E_{\text{Xe}}=1032\text{ MeV}$	
	垂直入射	60°入射	垂直入射	60°入射	垂直入射	60°入射	垂直入射	60°入射
顶层 <sup>1)</sup>	32.8	65.9	22.1	44.9	50.4	102.0	45.9	90.1
0-5	45.7	92.1	30.9	63.1	69.6	119.8	65.9	136.8
5-15	93.5	140.5	62.2	128.0	115.8	78.2 <sup>2)</sup>	134.2	275.1
15-25	86.0	1.5 <sup>2)</sup>	64.0	129.0	62.2		136.2	277.9
25-35	42.0 <sup>2)</sup>		65.8	131.2	2.0 <sup>2)</sup>		139.0	228.0
35-45			60.0	139.8			142.1	24.1 <sup>2)</sup>

注: 1) 顶层厚度为 3.6  $\mu\text{m}$

2) 未完全穿透该层离子的剩余能量

### 3) 关于其它要求

对于能量单色性的要求是出于精确给出 LET 值的需要, 一般应好于 1%。兰州重离子加速器的能散度小于  $5 \times 10^{-3}$ , 完全能满足这一要求。

单粒子效应模拟需要束流有良好的均匀度, 以便给出准确的翻转截面。兰州重离子加速器具有束流磁扫描的均匀化系统, 可以调节扫描电流而改变扫描面积, 扫描电流的线性好于 1%, 保证了束流面密度的均匀度。

单粒子实验需要弱的电流, 通常束流强度应在  $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的范围之内, 兰州重离子加速器通过多级降流、散焦和扫描等手段, 可使束流面密度在 6 个数量级内变化。对于弱束流的测量在技术上有相当的难度, 测量的精度直接影响翻转截面的误差。在兰州重离子加速器上采用气体探测器进行非拦截式测量, 根据核径迹探测器的校准, 表明此法有较好的精度。

以上可以看出, 兰州重离子加速器具有较好的性能, 适合于开展单粒子效应的研究, 并将为我国航天事业发挥应有的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Price WE, Coss JR. Single Event Phenomena: A Summary. Nucl Instrum Methods, 1989, B40/41: 1306
- 2 Pickel JC, Blandford JT. CMOS RAM Cosmic-Ray-Induced-Error-Rate-Analysis. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1981, NS-28(6): 3962
- 3 Pickel JC, Blandford JT. Cosmic-Ray-Induced Error in MOS Device. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1980, NS-27(2): 1006
- 4 Petersen E. Soft Errors due to Protons in the Radiation Belt. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1981, NS-28(6): 3981
- 5 Velazco R, Provost-Grellier A, Chapuis T, et al. Comparison Between Californium and Cyclotron SEU Tests. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, NS-36(6): 2383
- 6 魏宝文. 兰州重离子研究装置进展报告(第8卷). 北京: 科学出版社, 1989

## HIRFL AND SIMULATION RESEARCH OF SINGLE EVENT PHENOMENA

Hou Mingdong Liu Jie Ma Feng Cheng Song

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou, 730000)

### ABSTRACT

Cosmic ray induced single event phenomena in VLSI circuits imperil seriously the safety of space flight. Accelerator simulation plays an important role in various test methods. In the paper, the main parameters and characteristics of HIRFL (Heavy Ion Research Facility of Lanzhou) are presented and it is shown that HIRFL is an effective tool to perform single event phenomena test from the standpoint of the requirements of simulation.

**Key words** Single event effects Heavy ion research facility of Lanzhou (HIRFL) Heavy ion simulation

### 可剥离放射性去污膜通过部级鉴定

中国原子能科学研究院放射化学研究所研制的可剥离放射性去污膜1997年2月20日通过了中核总科技局组织的专家鉴定。可剥离放射性去污膜可剥离性和强度均优于国内同类产品,而且去污效果好,对于污染水平较高的污染面,70%以上去污系数大于两个数量级,经一次去污,表面活度降至 $0.1 \text{ Bq/cm}^2$ ,经2—3次去污,表面活度达到民用水平。对化学法不能去除的“固定污染”也有很好的去污效果。此产品具有工艺过程简单、效率高、成本低的特点。

摘自中国原子能科学研究院《原子能院报》