

文章编号: 2095-4980(2016)06-0985-06

倒装 SRAM 型 FPGA 单粒子效应防护设计验证

张庆祥, 李衍存, 贾晓宇, 王 颖, 郑玉展, 秦珊珊, 蔡震波

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 在倒装芯片的单粒子效应防护设计验证中, 重离子在到达器件敏感区前要经过几百微米的衬底材料, 需要计算器件敏感区中离子的线性能量传输(LET)值。采用兰州重离子加速器加速的 $55 \text{ MeV}/\mu^{58}\text{Ni}$ 离子对基于倒装的 Xilinx 公司 550 万门现场可编程门阵列(FPGA)实现的典型系统的单粒子效应防护设计进行了试验验证, 采用 SRIM、FLUKA 和 GEANT 等不同方法对试验中的 LET 值进行了分析, 同时将 SRIM 分析的典型结果与基于磁偏转飞行时间法的试验数据进行了比较, 发现与现有的重离子分析结果有一定差异。因此在防护验证中采用离子 LET 作为主要参数的情况下, 应对重离子(尤其是高能段)的 LET 的计算方法进行约定, 以规范试验过程, 增强数据的可比性。

关键词: 静态随机存储器型现场可编程门阵列; 倒装芯片; 单粒子效应; 重离子; 线性能量传输

中图分类号: TN406

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0985

Verification of single event effect mitigation for typical application on flip-chip SRAM-based FPGA by using heavy ions

ZHANG Qingxiang, LI Yancun, JIA Xiaoyu, WANG Ying, ZHENG Yuzhan, QIN Shanshan, CAI Zhenbo
(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Linear Energy Transfer(LET) of heavy ion must be calculated in verification test especially for flip-chip Static Random Access Memory(SRAM)-based Field Programmable Gate Array(FPGA), in which the heavy ions must cross through several hundred micrometer of silicon substrate before reaching the sensitive volume. Single event effect mitigation of typical application on flip-chip SRAM-based FPGA is verified by using $55 \text{ MeV}/\mu^{58}\text{Ni}$ ions accelerated by Heavy Ions Research Facility in Lanzhou(HIRFL). The LET of ^{58}Ni ions is calculated by Stopping Range Ions Matter(SRIM), FLUKA and Geometry and Tracking(GEANT) software tools and the differences are analyzed. The LET of several typical ions calculated by using SRIM also are compared with that measured by B-TOF(Magnetic Time-of-Flight) method. It is suggested that LET calculation method or software tools should be specified(especially for high energy ions), as LET is a major Figure of Merit(FOM) of single event effect sensitivity.

Keywords: Stopping Range Ions Matter-based Field Programmable Gate Array; flip-chip; single event effect; heavy ions; Linear Energy Transfer

现代的静态随机存储器(SRAM)型现场可编程门阵列(FPGA)采用最先进的半导体工艺, 内部资源丰富, 功能复杂, 可以多次编程。在具有强大功能的同时, SRAM 型 FPGA 是可重构计算、系统芯片(System on Chip, SoC)系统的硬件载体, 可支持在轨修改设计错误、算法和软件的变化和更新等。Xilinx 公司 FPGA 通过采用外延工艺使得其对单粒子锁定阈值达到 $120 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, 通过工艺控制使抗总剂量能力达到 $100 \text{ krad}(\text{Si})$ 以上, 但由于 SRAM 型 FPGA 的功能由内部配置区来定义, 因此用户配置区单粒子翻转造成的系统功能的失效成为 SRAM 型 FPGA 辐射效应突出的特点, 因此对于 Xilinx 公司 FPGA, 单粒子翻转、单粒子瞬时脉冲是其空间应用主要考虑的因素。SRAM 型 FPGA 内部结构复杂, 单粒子效应的危害出现多种表现形式, 并且严重依赖于使用状态, 需

收稿日期: 2015-07-08; 修回日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675013)

要对特定应用的防护效果进行验证,其中重离子加速器试验是主要方法之一^[1-2]。

550 万门 Xilinx SRAM 型 FPGA 采用倒装的封装形式,对其进行单粒子效应试验,对重离子的射程要求高,需要确定器件穿透衬底材料的 LET 值,在工程实践中通常采用 LET 值作为器件单粒子效应敏感度的衡量,同时 LET 值也是防护效果验证中重要的离子参数^[3],因此需要对倒装芯片试验中的 LET 值存在的不确定度进行分析。针对倒装的 Xilinx 公司 550 万门 FPGA,采用兰州重离子加速器提供的 ^{58}Ni 离子对其实现的典型系统进行了试验验证,结合试验的具体布局,采用 SRIM, FLUKA 和 GEANT4 等不同方法对试验中的 LET 值进行分析,同时将 SRIM 分析的典型结果与欧空局(European Space Agency, ESA)的试验数据进行了比较,在此基础上对后续倒装芯片的防护效果验证提出了建议。

1 试验采用的离子

结合 550 万门 Xilinx SRAM 型 FPGA 的封装,根据样品制备情况,提出了对验证试验所用重离子的要求:即射程大于 $100\ \mu\text{m}$ 。兰州重离子加速器提供的大多数离子和北京串列静电加速器提供的 C、O 和 N 等离子可以满足要求,但如果同时要求 LET 值较大(例如 $10\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$),只能采用兰州重离子加速器的高能重离子,因此本次试验为 $4.06\ \text{GeV}$ 的 ^{58}Ni 的离子。

这是国内首次采用 $4.06\ \text{GeV}$ 的 ^{58}Ni 离子开展单粒子效应试验,从图 1 可以看出, ^{58}Ni 在 LET 值最大约为 $31\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,在 ^{40}Ar 离子和 ^{86}Kr 离子之间,可以覆盖 $20\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}\sim 40\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 之间的范围,而这一区间也是获得器件单粒子效应特性的重要区域。 ^{58}Ni 与兰州重离子加速器常用的 ^{20}Ne 、 ^{40}Ar 、 ^{84}Kr 、 ^{129}Xe 和 ^{209}Bi 等离子配合,可以更加方便地实现对 $10\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}\sim 100\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 之间重要考核 LET 指标的覆盖,进一步拓展了兰州重离子加速器在单粒子效应试验中的应用能力^[4-5]。

2 倒装芯片的处理

对于倒装芯片,目前大多数重离子加速器的能量不足以完全穿透,或者难以保证在器件敏感区内 LET 保持不变,因此需要对器件进行处理,目前常用的样品制备方法有重新封装技术和背面减薄技术,重新封装技术是用化学方法将封装取出裸片,重新焊接到测试版上,这种方法技术复杂,成功率较低。背面减薄相对成功率较高,但需注意 2 个问题:a) 减薄可能产生应力,使得芯片变形;b) 如何才能确定减薄不会影响器件电荷收集的特性,进而影响试验的结果。

Xilinx 公司 550 万门 FPGA 的封装结构如图 2 所示,重离子模拟试验设备的射程都是有限,试验前 FPGA 样品需要进行减薄处理,以保证单粒子试验所用重离子能穿透芯片敏感区。开帽及减薄过程中,样品引出端和内部结构均不能受到损伤。开帽及减薄后样品电性能测试正常。本工作采用减薄的方法,获得的样品剩余的衬底厚度在 $80\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,减薄后的样品如图 3 所示。

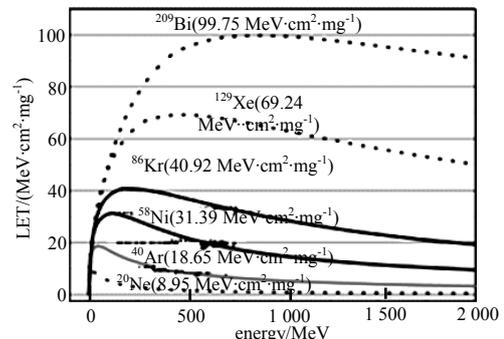


Fig.1 LET vs. energy curves for typical ions accelerated by HIRFL
图 1 兰州重离子加速器单粒子效应试验常用离子及其 LET 范围

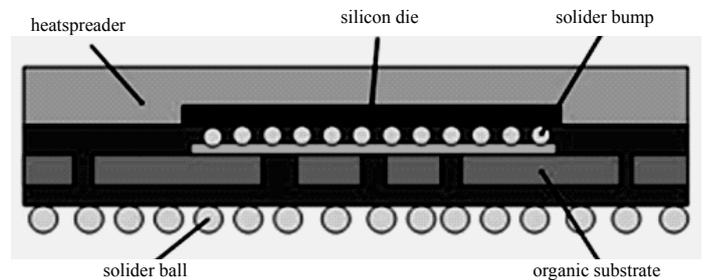


Fig.2 Package structure of typical Xilinx SRAM
图 2 Xilinx SRAM 型 FPGA 的封装结构

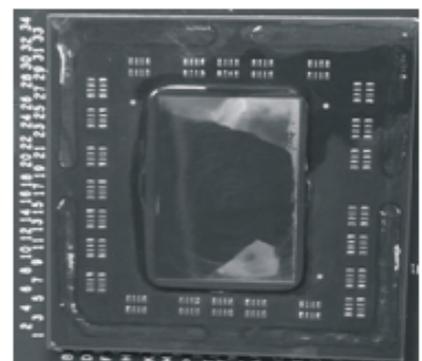


Fig.3 Thinned flip-chip Xilinx FPGA
图 3 减薄后的倒装 Xilinx FPGA

3 试验布局及试验结果

兰州重离子加速器试验在新建的辐照试验终端开展,单核能 70 MeV/μ 的 ⁵⁸Ni²⁵⁺离子在真空内经过 12.5 mm BC408 闪烁膜(H/C=1.104, D=1.032 g/cm³),通过 14.7 mm 钛窗引出到大气中,经过大概 3 cm 空气,入射到芯片表面。在钛窗和器件之间可以加不同厚度的纯铝,进一步调整入射离子的 LET 值。

试验中基于待测器件实现一个未加防护的典型应用,首先加不同厚度的 Al 降能片进行了试验,获得了产生 1 次功能中断所需的注量,见表 1。根据初步试验结果,选择加 1 350 μm 的 Al 进行试验,完成了防护后的防护效果验证试验。

4 讨论

4.1 不同方法给出的 LET 值及其差别

离子的 LET 值是防护效果验证所需束流的一个重要参数,本次试验是在大气下针对倒装器件开展的,要确定器件敏感区中的 LET 值,需要考虑重离子在整个路径上经过了闪烁膜、镍窗、Al 降能片、空气和硅衬底引起的能量的变化。根据图 4 所示的试验布局结构和参数,采用 SRIM,FLUKA 和 GEANT4 等几种常用的粒子输运分析软件获得了加厚度为 1 350 μm 的 Al 降能片后,离子在器件敏感区中的 LET 值,并将其与近代物理所给出的数据进行了比较,见表 2。

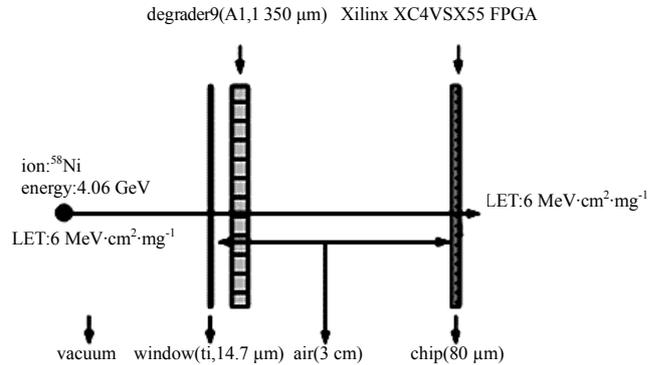


Fig.4 Experimental set-up at HIRFL
图 4 试验布局图

表 1 不同 Al 屏蔽厚度下产生一次功能中断的注量

Table1 Fluence to one single event effect at different Al foils

thickness of Al foils/μm	LET/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)
0	209
900	1 227
1 200	3 000
1 300	736
1 350	530
1 400	171
1 460	187

表 2 采用不同方法给出的 LET 值(器件衬底厚度为 80 μm)

Table2 LET calculated with different methods(the substrate thickness is 80 μm)

LET calculated method	accelerator	SRIM	FLUKA	GEANT4	
				G4ionIonisation	G4hIonisation
LET/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	17.3(10% error)	15.88	16.7	12.69	14.85

粒子在物质中的穿透能力与粒子的特性和能量、材料的特性有关。计算过程非常复杂。SRIM2000 是一个基于蒙特卡罗方法的计算机程序,可以进行粒子射程和能损的计算。SRIM2000 包括 2 个模块: a) 阻止能与射程计算模块和粒子与物质相互作用的蒙卡模拟模块。第 1 个模块可以快速给出电离机制和非电离机制的阻止本领以及粒子的射程; b) 可以计算材料不同深度粒子的能量损失,进一步可以得到沿着粒子路径上单位长度沉积电荷的密度。利用 SRIM2000 可以计算粒子穿过有限厚度材料后的平均能量损失,从而得到将粒子能量降低到一定值所需降能片的厚度。SRIM2000 是目前常用的离子 LET 值和射程计算工具^[6-7]。

GEANT4 是由超过 100 位的核物理和高能物理学家开发的模拟粒子在材料中传输的蒙特卡罗工具包,其实验数据来自 CERN(European Organization for Nuclear Research),该程序开发的初衷是用于高能物理实验,但目前其用途已扩展到核物理、航天、医学、天文物理和辐射防护等领域。目前 GEANT4 是 ESA 用于详细辐射传输分析的标准蒙卡程序,GEANT4 描述的物理过程从热中子到 PeV 量级,其功能在强子部分,类似于 HETC(High-Energy Transport Code)和 CHEISHA(Gamma Hadron Electron Interaction Showers),在电磁作用部分,类似 Penelope 模型的一部分,核反应数据尽可能采用评价数据库中的截面数据。GEANT4 强子相互作用模型可以描述强子相互作用中的弹性碰撞和非弹性碰撞,可以用于评价器件的辐射损伤和航天器内部的次级辐射环境,尤其可以给出比 SHIELDSOE 更加可靠的航天器内部的辐射环境。GEANT4 的通用粒子源(GPS)可以方便地定义空间环境初级粒子的参数,例如入射角度,能量和顶点的分布。对于几何模型可以用 GEANT4 软件包内置的 C++函数类或者 XML(eXtensible Markup Language)语言来定义。GEANT4 有 2 个物理模型计算强子的电离能: G4ionIonisation 和 G4hIonisation。其中 G4ionIonisation 用于计算电荷大于 1 的正离子的电离能, G4hIonisation 中包含了 δ 电子的产生过程。这 2 个模型都可以用来计算重离子的能量损失^[8]。

FLUKA 是现有的集成物理蒙卡软件包中最好的，它将所有的物理过程完全集成在一个程序包中，加入了类似 EGS4 的电磁作用模拟程序，拥有一个具有前平衡阶段延伸的核子间级联强子事件发生器。NASA(美国航天局)提出并资助开发一个集成的基于蒙卡的辐射传输程序，用于空间辐射环境的模拟。FLUKA 被选作基本框架之一，集成了 DPMJET(2.5 & 3)用于模拟 35 GeV/A~5 GeV/A 能量以上核子之间相互作用的内部事件发生器。用户界面采用 CERN 开发的 ROOT 软件，最终可以和 NASA 目前正在应用的 BRYNTRN(Baryon transport model)/HZETRN(heavy-ion transport model)等程序一样，可以对空间环境中的辐射屏蔽进行模拟计算。用于评价地球轨道航天器和空间站内部，月球表面，甚至火星等行星表面的辐射环境，也可用于空间仪器的设计和分析，例如国际空间站上考虑上的先进宇宙线成份实验载荷^[9]。

从表 2 可以看出，GEANT4 在传输计算中需要自行选择采用的核反应模型，如果选择了考虑 δ 电子过程的 G4hIonisation 模型，LET 值为 $14.85 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ，核反应模型中不可选择的 FLUKA 给出的 LET 值为 $16.7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ，与常用的 LET 分析软件 SRIM 程序给出的 LET 值 $15.88 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 和加速器给出的 $17.3 \text{ MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$ 有显著差别，表明采用不同方法计算的 LET 最大相差接近 30%。即使是加速器给出的 LET 值还存在 10% 的误差($15.57 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}\sim 19.03 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)，如果是用于翻转率确定的器件的阈值或作为器件加固指标，这样的 LET 计算方面的误差显然太大。

4.2 SRIM2000 分析结果与试验值的误差

一般认为 SRIM 计算的 LET 值的误差对能量大于 $2 \text{ MeV}/\mu$ 的离子为 $\pm 5\%$ ，而对 $0.2 \text{ MeV}/\mu\sim 2 \text{ MeV}/\mu$ 之间的离子误差范围为 $\pm 10\%$ (95%置信度)。Brookhaven 国家实验室用独立于加速器系统之外的束流诊断系统对 $1 \text{ MeV}/\mu\sim 10 \text{ MeV}/\mu$ 的重离子的 LET 进行了测量，发现与 SRIM 计算结果的差别范围在 $-4\%\sim 8\%$ 之间^[6]。

为了规范不同加速器获得的单粒子效应试验数据，解决单粒子效应试验中 LET 参数计算不统一的问题，欧洲辐射效应年会 2005 年(READC2005)专门召开了一个主题会议，目的是在整个欧洲的加速器辐照装置形成一套通用的方法来计算 LET 值^[10]。同时在欧空局的支持下采用 B-TOF(Magnetic Time-Of-Flight)法对芬兰 RADEF 加速器的 ^{131}Xe 和 ^{86}Kr 等离子的 LET 值进行了测量^[1,11]。用 SRIM2000 计算了 2 种离子的 LET 值并与试验值进行了比较。如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出，在低能段 SRIM 与试验值符合很好，但在高能段 2 种离子分析值与试验值的差别不同。对于 ^{131}Bi 离子，在低能段计算值总是比实验值高，但在高能段分析值总是比实验值低，但变化趋势一致，而对于 ^{86}Kr ，计算值先是比实验值低，然后比实验值高，但总体来说分析值与实验值的差距较小。从以上的比较来看，高能段 LET 值的计算方法与实验值存在较大的误差，误差的大小与离子的种类有关，误差的根本原因是缺乏基础实验数据。

4.3 试验过程中的事件率的误差

如果不计算 3 cm 空气的贡献，粗略考虑引出到大气中的 ^{58}Ni 的剩余能量为 4 010 MeV，在 Al 中的射程为 1.57 mm，为了进一步增大在器件敏感区中的 LET 值，依次增加降能片的厚度，观察典型非防护应用模块的功能中断情况，因为束流事件非常紧张，在每个降能片厚度下仅仅观察到几次功能中断，通过平均产生 1 次功能中断的注量来表征器件的敏感度。具体如表 3 所示。

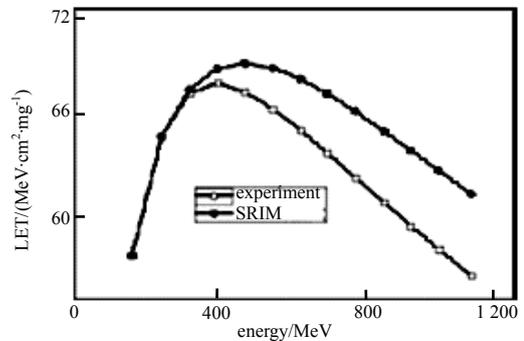


Fig.5 Comparison of Bi LET calculated by SRIM with that measured by B-TOF(Magnetic Time-Of-Flight) method
图 5 Bi 离子 SRIM 计算得到的 LET 值与实验值的比较

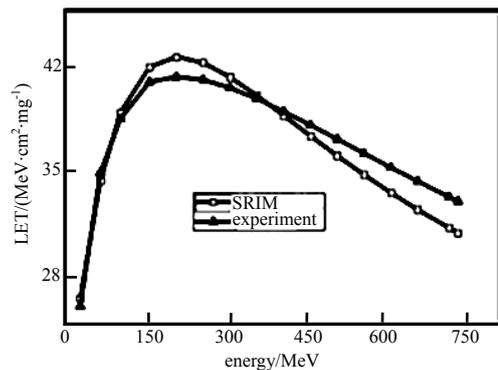


Fig.6 Comparison of ^{86}Kr LET calculated by SRIM with measured by B-TOF(Magnetic Time-Of-Flight) method
图 6 ^{86}Kr 离子 SRIM 计算得到的 LET 值与实验值的比较

表 3 不同 LET 值产生一个事件的注量

Table13 Fluence per single event effect for different LETs

thickness of Al folis/ μm	LET/($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)	fluence
0	5.99	209
900	8.63	1 227
1 200	11.83	3 000
1 300	14.25	736
1 350	15.88	530
1 400	17.21	171
1 460	25.27	187

假设功能中断是否发生与入射粒子数目满足指数分布,即每个入射粒子引起功能中断的概率相同,而且相互独立,此时置信区间估计方法如下。区间置信度为 $1-\alpha$,那么引发 1 次功能需要粒子数目的置信区间上限与下限为:

$$\frac{2\sum n_i}{\chi_{1-\alpha/2}^2(2r)} \leq \bar{N} \leq \frac{2\sum n_i}{\chi_{\alpha/2}^2(2r)} \quad (1)$$

式中: \bar{N} 是引起功能中断的平均粒子数目; r 是试验次数,这里仅有 1 次; n_i 是引发第 i 次失效的入射粒子数目。表 3 中不同 LET 值下典型应用的功能中断截面及其误差如图 7 所示。

在 $5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}\sim 25 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 之间,该 550 万门 SRAM 型 FPGA 的配置区的翻转截面增大了一个数量级,但本次试验监测到的功能中断,即使是考虑了误差以后,功能中断的截面并没有和预期一样随 LET 值显著增大,甚至在 $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 附近出现显著下降。目前由于缺乏足够的数据,尚不能对其进行详细的解释,后续考虑从以下 2 方面进行研究, a) 本文考虑的 LET 的分析误差; b) 在高能离子试验中注量监测的误差。从截面数据出现的异常数据,也进一步说明采用降能片调节能量的倒装芯片的单粒子效应试验,受到包括 LET 值计算在内的多种因素的影响,需要加强试验数据的分析和研究。

5 结论

在国内首次利用兰州重离子加速器提供的 4.06 GeV 的 ^{58}Ni 离子开展了基于倒装的 550 万门 Xilinx SRAM 型 FPGA 实现的系统单粒子效应防护效果的验证。用多种分析方法对经过铝降能片和硅衬底材料后的 LET 值进行了计算,并与国外试验结果进行了对比,结果表明 SRIM,FLUKA 和 GEANT4 等常用方法的 LET 计算值存在的差别,且高能段离子 LET 值与实验值存在较大的差异,差异与离子的种类有关。在国内采用兰州重离子加速器和北京串列静电加速器开展单粒子效应试验,且采用 LET 阈值作为器件单粒子效应敏感度表征参数的情况下,为了规范试验过程,增加数据的可比性,应统一 LET 值(尤其是高能段)的计算方法。高能重离子试验,由于是大气下开展,采用降能片,尤其是针对倒装器件,LET 和射程的计算不确定度大,且实验的布局可能对试验结果造成影响,应开展深入的分析和研究。

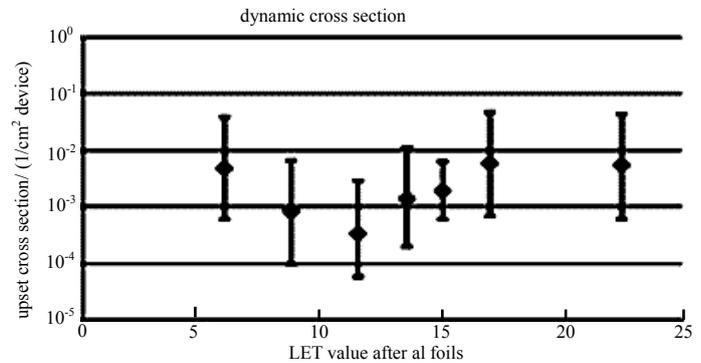


Fig.7 Single event error and cross section Al different LETs
图 7 不同 LET 值下典型应用的截面及其误差

为了规范试验过程,增加数据的可比性,应统一 LET 值(尤其是高能段)的计算方法。高能重离子试验,由于是大气下开展,采用降能片,尤其是针对倒装器件,LET 和射程的计算不确定度大,且实验的布局可能对试验结果造成影响,应开展深入的分析和研究。

致谢

感谢中科院近代物理研究所马新文所长助理、刘杰研究员、孙友梅研究员及其课题组为试验所提供的方便,感谢中国空间技术研究院西安分院周国昌所长助理、赖晓玲主任和朱启等在试验中的协助和支持。

参考文献:

- [1] JAVANAINEN T, MALKIEWICZ J, PERKOWSKI, et al. Linear Energy Transfer of heavy ions in silicon[J]. IEEE Transactions on nuclear science, 2007, 54(4): 58-1162.
- [2] ZHANG Jingjing, CHEN Jia, WAN Min. A novel SRAM test method based on embedded implementation on FPGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(2): 352-356.
- [3] New Millennium Program(NMP) Space Environments on Electronic Components Guidelines[Z]. petkov, 2003.
- [4] 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]. 北京:中国科学院近代物理研究所, 2002. (ZHANG Qingxiang. Investigation on single event effect sensitivity evaluation of space electronics by using heavy ions accelerated by HIRFL[D]. Beijing: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.)
- [5] 张庆祥. 光电器件级微电子器件空间辐射效应研究—数值模拟、试验研究和空间飞行试验[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2004. (ZHANG Qingxiang. Investigation on space environment effect on photonics and microelectronics—numerical simulation, experimental study and flight test[D]. Beijing: National Space Science Center, CAS, 2004.)

- [6] JAMES F,ZIEGLER M D,ZIEGLER,et al. SRIM—the stopping and range of ions in matter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2010,267(11):1818–1823.
- [7] KORKUT H,KORKUT T. Evaluation of 500 keV proton irradiation of bilayer graphene on SiC by the use of SRIM code, a Monte Carlo simulation method for stopping and range of ions in matter[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2014,299(1):13–17.
- [8] KRYLOV A,PARAIPANM,Sobolevsky N,et al. GEANT4, MCNPX, and SHIELD code comparison concerning relativistic heavy ion interaction with matter[J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014,11(4):549–551.
- [9] ALFREDO Ferrari,PAOLA R Sala,ALBERTO Fass,et al. Fluka:a multi-particle transport code[Z]. CERN–2005–010 INFN TC 05/11SLAC–R–773, 2005.
- [10] ARTO Javanainen,WLADYSLAW Henryk Trzaska,RENO Harboe-Sørensen,et al. Semi-empirical LET descriptions of heavy ions used in the european component irradiation facilities[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010,57(4):1946–1949.
- [11] ZAJIC V,THIEBERGER P. Heavy ions linear energy transfer measurements during single event testing of electronic devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999,46(1):59–69.

作者简介:



张庆祥(1971–),男,甘肃省通渭县人,博士,研究员,主要研究方向空间辐射效应、航天器抗辐射加固技术.email:zhangqingxiang@cast.cn.

李衍存(1983–),男,山东省泰安市人,硕士,工程师,主要研究方向为空间辐射效应、航天器抗辐射加固技术。

贾晓宇(1989–),男,山西省代县人,硕士,工程师,主要研究方向为空间辐射效应、航天器抗辐射加固技术。

王颖(1982–),女,沈阳市人,博士,高级工程师,主要研究方向为空间辐射效应、航天器抗辐射加固技术。

秦珊珊(1982–),女,沈阳市人,博士,工程师,主要研究方向为空间辐射效应、航天器抗辐射加固技术。

郑玉展(1982–),男,安徽省宿州市人,博士,主要从事空间环境及效应、抗辐射加固技术、航天器空间环境设计工作。

蔡震波(1971–),男,南宁市人,研究员,主要从事航天器空间环境及效应分析、航天器抗辐射加固研究工作。

(上接第 984 页)

- [7] 孙蓓云,周晏,郑振兴,等. “春雷号”有界波 EMP 模拟器暂态过程的计算[J]. 核电子学与探测技术, 2000,20(6):461–464. (SUN Beiyun,ZHOU Yan,ZHENG Zhenxin,et al. Transient computation for spring-thunder bounded-wave EMP simulator[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000,20(6):461–464.)

作者简介:

谢霖燊(1982–),男,福建省龙岩市人,工程师,主要从事脉冲功率技术研究.email:xielinshen@nint.ac.cn.

贾伟(1978–),男,天津市人,副研究员,研究方向为脉冲功率技术。

郭帆(1985–),男,湖北省襄阳市人,助理研究员,研究方向为脉冲功率技术。