

激光与光电子学进展

重离子单粒子效应试验标定系统

刘浩林^{1*}, 刘青¹, 张晓晖¹, 孙静², 古松², 钟征宇³

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100;

³北京圣涛平试验工程技术研究院, 北京 100089

摘要 针对国内加速器束流快速标定的需求并参考欧洲航天局的单粒子翻转监测器, 本文成功研制重离子单粒子效应标定系统, 并成功应用于国内串行重离子加速器束流的单粒子效应试验标定。试验结果表明, 11 种重离子分别在入射角度为 0°、45° 和 60° 的辐照下, 可以标定系统在“00”和“FF”数据模式下的 SEU (Single Event Upset) 截面数据。通过与国内外主要加速器的单粒子翻转试验数据结果的对比, 分析标定系统内部单粒子翻转物理分布图, 验证所设计的单粒子标定系统可以对重离子加速器中束流的准确性和均匀性进行准确监测。

关键词 超快光学; 单粒子效应; 重离子加速器; 试验标定系统

中图分类号 TL99

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1732001

Heavy Ion Single Event Effect Test Calibration System

Liu Haolin^{1*}, Liu Qing¹, Zhang Xiaohui¹, Sun Jing², Gu Song², Zhong Zhengyu³

¹*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;*

²*China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China;*

³*Beijing San-talking Testing Engineering Academy, Beijing 100089, China*

Abstract In response to the need for rapid calibration of the domestic accelerator beam and referring to the single event rollover monitor of European Space Agency, this paper successfully developed a heavy ion single event effect calibration system and successfully applied it to the domestic tandem heavy ion accelerator beam single event test calibration. The test results show that 11 kinds of heavy ions can be calibrated to the SEU (Single Event Upset) cross-section data of the system in the “00” and “FF” data modes under the irradiation angles of 0°, 45° and 60°, respectively. By comparing with the results of single-event flipping test data of major accelerators at home and abroad, the physical distribution of single-event flipping inside the calibration system is analyzed, which verifies that the designed single-particle calibration system can accurately monitor the accuracy and uniformity of the heavy ion accelerator beam.

Key words ultrafast optics; single event effect; heavy ion accelerator; test calibration system

OCIS codes 320.7110; 350.5400

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11605134)

通信作者: *821137104@qq.com

1 引言

离子单粒子效应试验的实施过程复杂,涉及粒子加速操作、束流参数测量及诊断、单粒子效应识别及实时监测和试验数据处理等多个环节,而各个关键环节都可能引入误差或错误,试验误差的测量及试验数据的质量评价均是当前亟待解决的重要问题。

国外已对单粒子效应试验误差的分析及监控技术进行了广泛且深入的研究,而且建立了随机误差定量评价的方法,该方法可为系统误差的控制及实时监测提供一种有效手段,其中最突出的手段是在试验实施的过程中引入试验标准件来监测系统的误差或不合逻辑的错误。欧洲航天局的单粒子翻转监测器(Single Event Upset Monitor, SEU Monitor)^[1-3]是一个面向用户的束流监测系统,该系统在加速器束流调试的过程中可对注量率、线性能量转移(Linear Energy Transfer, LET)系数、能量和束斑均匀性等相关参数进行对比验证。在束流状态调试完毕后并且在器件的单粒子效应试验前,使用 SEU Monitor 进行先期的单粒子效应测试,将测试的单粒子翻转截面数据和基准数据进行对比,若翻转截面数据一致且粒子均匀分布,则表明该束流参数可以准确有效进行后续的试验流程。欧洲航天局的 SEU Monitor 已广泛应用于欧洲各大辐照源加速器,而且积累了大量的试验数据并用于束流验证的基准参考,现已成为一种可以提高加速器性能和保障实验数据可靠性的简便、快捷和可靠的技术手段。我国的辐照试验机构,如西北核技术研究所和中国原子能科学研究院等也使用欧洲航天局的 SEU Monitor 对串列重离子加速器束流的标定进

行了系列的研究和验证工作^[4-5],而且与欧洲主要加速器的数据结果进行比对,从此科研人员形成了建立我国自主的单粒子效应试验标定系统的共识。

综上可知,研制一套重离子单粒子效应试验标定系统的现实意义重大,可支撑我国重离子单粒子效应试验现场的快速分析及试验误差的标定,可为束流用户提供一种新型、直观、易用、可信且不同于粒子核物理测量试验的误差辨识手段,能够帮助用户快速判断加速器离子束的质量现状,有效解决重离子单粒子效应试验系统的误差不能被实时直接检测的问题,确保单粒子效应试验有效及试验数据可信,该系统可成为传统粒子束参数测量的一种有效补充。

2 单粒子效应试验标定系统的总体设计

2.1 单粒子效应试验标定系统的功能需求分析

单粒子效应试验标定系统的设计需要充分考虑辐照现场的测试环境及标定系统的测试功能,而标定试验过程中的辐射源条件、标定系统测试板和试验标定件等需要事先规划确定。

单粒子效应试验标定系统需要满足远程监控、测试过程可实时操作控制、数据发生与数据采集以及测试数据存储与整理等一系列的功能要求。然而,重离子辐照试验的所处环境有如下几点特殊要求:实验操作人员所在的操作室与辐射测试环境相距较远,需通过远程计算机来监测操作;外界环境与辐射测试环境之间的接口连接规格与接口数量也有一定的硬性要求。单粒子效应试验标定系统的结构如图 1 所示,其中试验标件(Device Under Test, DUT)及监测系统需放入重离子辐照环境中,操作人员需通过远程计算机来监控操作测试过程^[6]。

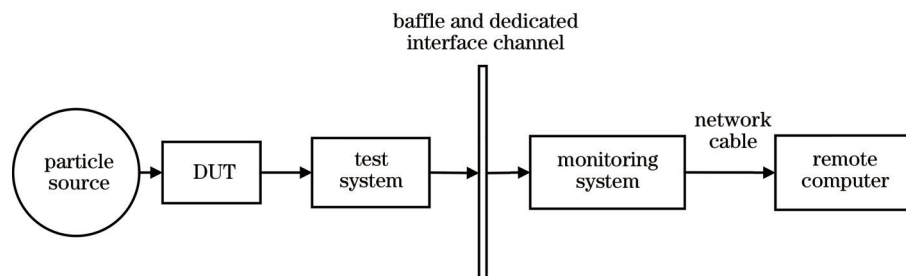


图 1 单粒子效应试验标定系统的结构

Fig. 1 Structure of single event effect test calibration system

单粒子闩锁(Single-Event-Latchup, SEL)效应是一种危害性很大的单粒子效应,发生单粒子闩锁效应后,器件的工作电流会显著增大并有可能烧毁

器件,因此单粒子效应试验标定系统也需要充分考虑 SEL 的情况。对于试验标件中单粒子闩锁效应的监测,即使用监测电流设备对工作状态下的试验

标件进行电流监测。在试验测试的过程中,当发生单粒子闩锁效应时,需要及时控制并切断试验标件的外接电源,从而保护限流芯片。

综合分析,单粒子效应试验标定系统需要满足如下必备条件及基本功能要求。

1) 试验标件应当完好开封,而且需要在稳定的条件下工作,如稳定的电压及恒定的电流偏置,需要有准确无误的数据与控制信号进行交换。

2) 多种模式下测试激励信号的产生,为试验标件(通常为静态随机存取存储器)提供种类不同的测试写入数据图形,如全1、全0和挡板等,协调控制测试过程中被测芯片与计算机部分交互的状态控制电路。

3) 计算机监控,在测试过程中可以写入数据来修改测试模式下计算机的配置,对实时测试模式下的读出数据可以进行可观测保存,可观测测试模式中的单粒子翻转及单粒子闩锁等现象。

4) 接口部分,实现测试电路与计算机控制端之间的接口交互。

5) 针对辐射效应试验的特点,测试过程中的芯片应该可以处于上电静态模式或是动态工作模式,而且芯片的工作频率应该可以调整变换。测试装置可以实时读取被测芯片单元中的响应测试数据,能够对测试芯片的工作电流进行持续动态监视。

2.2 单粒子效应试验探测标准器件的选用

试验标准件在标定系统中的角色是单粒子效应“探测器”,试验标准件作为试验中参考的标准样件应具有高可靠性、耐总剂量效应能力强、试验结果对一定范围内的温度变化不敏感以及单粒子效应特性平坦等特点。

试验标准件中的 SRAM (Static Random-Access Memory) 器件可以通过历史试验数据的对比分析进行选择确定。根据文献[7-9]并参考欧洲航天局的 SEU Monitor 的方案,选定基于 AT68166F 型微芯片(存储容量为 16 Mbit)的 SRAM 抗辐射加固存储器电路板作为试验标件并进行测试验证,该器件具有如下特点。

1) 当 SRAM 的辐照累积剂量为 1200 Gy 时,未测试到其对单粒子翻转截面的影响,因此在这个剂量以内,可以无需考虑总剂量和单粒子的协同效应。

2) 该器件的数据手册标定 SEL 的 LET 阈值大

于 $80 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,国外试验数据表明常温下重离子的 LET 值为 $106 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,此时对该芯片进行动态和静态测试均未发生 SEL 效应,说明该器件具有优良的抗单粒子锁定能力。

3) SRAM 器件对于不同的测试图形,单粒子翻转截面是一致的,并且对于 0 到 1 和 1 到 0 的翻转具有相同的单粒子翻转概率。

4) SRAM 器件具有小的单粒子翻转阈值,并且进入饱和区的时间较晚,可以在从低到高很宽的重离子 LET 范围内实现对束流参数的监测。

5) SRAM 器件内部由 4 个基于 AT60142F 型微芯片(存储容量为 4 Mbit)的 SRAM 构成多芯片模块,每个 AT60142F 型芯片又分为 8 个存储区,实现了单个字节各 1 bit 之间物理上不相邻的隔离存储,芯片尺寸可达 $19.5 \text{ mm} \times 19.5 \text{ mm}$,这种特性加以有效利用可以实现对重离子辐照源空间分布均匀性的有效测试。AT68166F 型芯片的 4 芯片存储结构如图 2 所示,AT60142F 型芯片的 8 区存储结构如图 3 所示。

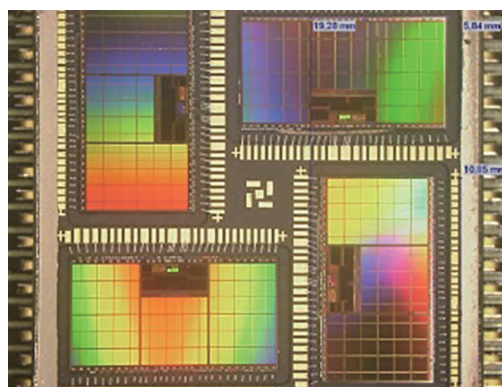


图 2 AT68166F 型芯片的 4 芯片存储结构
Fig. 2 4-chip storage structure of AT68166F chip

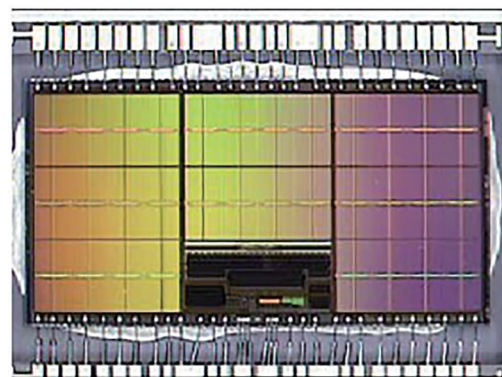


图 3 AT60142F 型芯片的 8 区存储结构
Fig. 3 8-region storage structure of AT60142F chip

2.3 系统设计

系统的总体设计架构如图 4 所示,该系统主要由中央控制模块 FPGA(Field Programmable Gata Array)、供电模块、评估板接口及通信模块 4 个部分构成,其中 JTAG 为下载调试接口, UART 为串口通讯控制器, RS232 为系统与外设串行通信的接口协议, LAN 为网络通讯控制器, RJ45 为系统与外设网络通信的接口协议, USB 为通用串行通讯控制器, USB3.0 为系统与外设的串行通信接口协议, SPI 为串行外设接口, ADC 为模数转换模块。系统中的电路板由系统板和评估板组

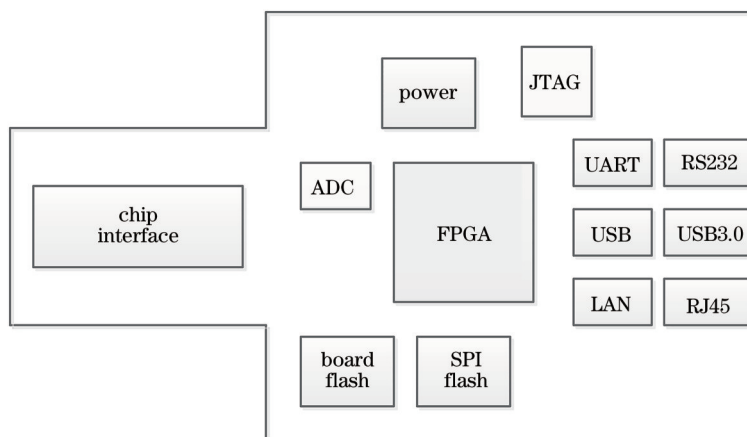


图 4 重离子单粒子标定系统的总体架构

Fig. 4 Overall structure of heavy ion single particle calibration system

通信模块支持 UART、USB 和 LAN 三种通信模式。其中 UART 符合 RS232 标准,波特率为 115200,其由九针 DB-9 接口与上位机连接;USB 支持 USB3.0 通信,可以达到高速通信的目标;LAN 是标准的以太网网络传输接口,可以实现远程和高速的数据传输,其由 RJ4 接口与上位机或路由器连接。

评估板接口可以实现对评估板的通信,其是一种可以控制信号、地址信息及双向数据信号的接口,三种接口均为并行接口,同时接口为被测目标芯片供电。

供电模块为系统中的所有装置提供电源。例如为 FPGA 提供的电压分别为 1.2, 2.5, 3.3 V, 另外为效应标准探测器件 SRAM 提供 3.3 V 和 5.0 V 两种电源模式。使用 ADC 电路来实现对效应标准探测器件 SRAM 的电压和电流的检测和采集,当电压或电流出现异常时,使用继电器来实现 SRAM 的重新上电。研制的标定系统板如图 5 所示。

系统板的控制电路集中在板的一侧,探测板插在另一侧,系统板安装在壳体内并可覆盖铝或铝板,而且在加速器实验中不会受到影响^[10-12]。

成,其中系统板用来完成 SEU 效应的监测和数据存储,评估板承载效应探测标准器件 SRAM 芯片。

从图 4 可以看到,中央控制模块的核心部件是 FPGA 芯片。为了实现对 SEU 效应的监测, FPGA 内部由一个处理 IP(Intelligent Property)软核和外围控制器核组成,芯片选用 Xilinx Spartan-6 型号的 FPGA。系统内部加入 UART、USB 和 LAN 三种通信控制器核来完成上位机的命令下达和数据传输。为了保证 FPGA 的配置工作正常进行,该系统利用 JTAG 和 SPI 闪存两种方式进行配置。

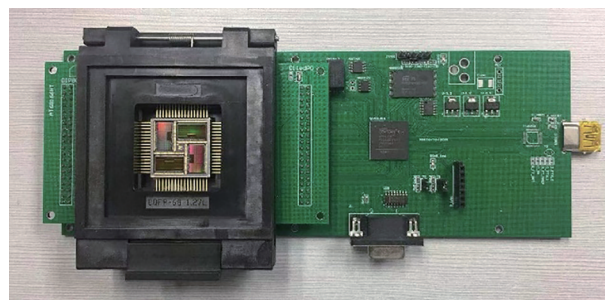


图 5 重离子单粒子标定系统板

Fig. 5 Heavy ion single particle calibration system plate

2.4 标定系统软件

上位机软件用于控制标定系统的硬件,通过处理计算可以标定辐照源是否符合约定要求,主要功能有三个,具体如下。

- 1) 通过发送指令来实现对硬件设备的读写操作。
- 2) 采集并保存硬件设备所返回的数据。
- 3) 对采集到的数据进行处理和结果显示。

软件功能的设计如表 1 所示,其中 PC 为计算机。

表 1 软件的功能设计
Table 1 Functional design of software

Module	Description
Serial control	Set serial port parameters
Serial receiving and sending	Send and receive data by serial port
Reading and writing	Write data to the disk and data stream mode read
Chart drawing	Draw curve graphs and scatter plots under XY coordinates
Error statistics	Compare with the initial vector and count the number of errors
Section calculation	Calculate the cross section
Write to vector	Send commands to the calibration system to achieve write operations to the target device
Read data	Send commands to the calibration system, the calibration system is used to read the target device data, and the PC is used to save the returned data
Current and voltage monitoring	Display the voltage and current data sent back
Input	Enter the radiation source information, including particle type, energy, etc., and save it
Transfer	Inquire, select and other operations to obtain the entered radiation source information
Calibration system reference data display	Draw the reference data curve of the calibration system
Field data annotation	Calculate the field cross-section and standardize it in the graph
Addition, deletion, and modification	Manage the calibration data of the radiation source that has been verified to be correct, including data addition, deletion, and modification
Calibration data query	Inquire or display historical calibration data

3 试验验证及分析

本文设计的标定系统在 HI-13(Heavy Ion-13) 串列静电加速器和 HIRFL(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou)回旋加速器上进行共计 5 轮单粒子翻转验证试验,试验结果与中国原子能科学研究院采用欧洲航天局 SEU Monitor 以及欧洲航天局

采用 SEU Monitor 的试验结果进行对比。

3.1 辐射源

试验所用的离子信息如表 2 所示^[7-8],其中 Ta 离子和 Kr 离子由中国科学院兰州近代物理所研制的 HIRFL 回旋加速器产生,其余离子由中国原子能科学研究院研制的 HI-13 串列静电加速器产生,FF 表示存在数据,00 表示未存在数据。

表 2 单粒子辐照试验数据的汇总^[7-8]
Table 2 Summary of single particle irradiation test data^[7-8]

Ion	Angle / (°)	LET / (MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	Data mode	Fluence rate / (cm ⁻² ·s ⁻¹)	Fluence / cm ⁻²	Experiment phenomenon	Wrong number	Cross section size per 1 bit / cm ²
C	0	1.73	00	9.50×10 ³	1.00×10 ⁶	SEU	96	6.00×10 ⁻¹²
C	0	1.73	FF	9.50×10 ³	1.00×10 ⁶	SEU	97	6.06×10 ⁻¹²
C	45	2.45	00	9.50×10 ³	5.00×10 ⁵	SEU	96	1.20×10 ⁻¹¹
C	45	2.45	FF	9.50×10 ³	5.00×10 ⁵	SEU	71	8.88×10 ⁻¹²
C	60	3.46	00	9.50×10 ³	2.50×10 ⁵	SEU	177	4.43×10 ⁻¹¹
C	60	3.46	FF	9.50×10 ³	2.50×10 ⁵	SEU	126	3.15×10 ⁻¹¹
F	0	4.70	FF	1.10×10 ⁴	1.00×10 ⁶	SEU	115689	7.23×10 ⁻⁹
F	0	4.70	00	1.10×10 ⁴	1.00×10 ⁵	SEU	13453	8.41×10 ⁻⁹
F	0	4.70	FF	4.80×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	11983	7.49×10 ⁻⁹
F	45	6.60	00	4.80×10 ³	5.00×10 ⁴	SEU	8834	1.10×10 ⁻⁸
F	45	6.60	FF	4.80×10 ³	5.00×10 ⁴	SEU	7837	9.80×10 ⁻⁹
F	60	9.40	00	4.80×10 ³	2.50×10 ⁴	SEU	5923	1.48×10 ⁻⁸
F	60	9.40	FF	4.80×10 ³	2.50×10 ⁴	SEU	5788	1.45×10 ⁻⁸

表2 (续)

Ion	Angle / (°)	LET / (MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	Data mode	Fluence rate / (cm ⁻² ·s ⁻¹)	Fluence / cm ⁻²	Experiment phenomenon	Wrong number	Cross section size per 1 bit / cm ²
I	0	65.60	00	5.00×10 ²	1.00×10 ⁴	SEU	10466	6.54×10 ⁻⁸
I	0	65.60	FF	5.00×10 ²	1.00×10 ⁴	SEU	7053	4.41×10 ⁻⁸
I	45	92.80	00	5.00×10 ²	5.00×10 ³	SEU	5077	6.35×10 ⁻⁸
I	45	92.80	FF	5.00×10 ²	5.00×10 ³	SEU	4182	5.23×10 ⁻⁸
I	60	131.20	00	5.00×10 ²	5.00×10 ³	SEU	5284	6.61×10 ⁻⁸
I	60	131.20	FF	1.00×10 ³	5.00×10 ³	SEU	4917	6.15×10 ⁻⁸
Li	0	0.44	00	2.30×10 ⁴	2.00×10 ⁶	SEU	17	5.31×10 ⁻¹³
Li	0	0.44	FF	2.30×10 ⁴	2.00×10 ⁶	SEU	16	5.00×10 ⁻¹³
Li	45	0.62	00	2.30×10 ⁴	1.00×10 ⁶	SEU	7	4.38×10 ⁻¹³
Li	45	0.62	FF	2.30×10 ⁴	1.00×10 ⁶	SEU	6	3.75×10 ⁻¹³
Li	60	0.88	00	2.30×10 ⁴	5.00×10 ⁵	SEU	3	3.75×10 ⁻¹³
Li	60	0.88	FF	2.30×10 ⁴	5.00×10 ⁵	SEU	7	8.75×10 ⁻¹³
O	0	3.10	00	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	1290	8.06×10 ⁻¹⁰
O	0	3.10	FF	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	617	3.86×10 ⁻¹⁰
O	0	3.10	FF	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	505	3.16×10 ⁻¹⁰
O	45	4.40	00	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	11811	7.38×10 ⁻⁹
O	45	4.40	FF	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	6275	3.92×10 ⁻⁹
O	60	6.20	00	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	13704	8.57×10 ⁻⁹
O	60	6.20	FF	1.30×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	11295	7.06×10 ⁻⁹
Si	0	9.00	00	3.90×10 ²	5.00×10 ⁴	SEU	22008	2.75×10 ⁻⁸
Si	0	9.00	FF	3.90×10 ²	5.00×10 ⁴	SEU	17522	2.19×10 ⁻⁸
Si	45	12.70	00	3.90×10 ²	5.00×10 ⁴	SEU	26423	3.30×10 ⁻⁸
Si	45	12.70	FF	3.90×10 ²	3.00×10 ⁴	SEU	19059	3.97×10 ⁻⁸
Si	60	18.00	00	3.90×10 ²	3.00×10 ⁴	SEU	17114	3.57×10 ⁻⁸
Si	60	18.00	FF	3.90×10 ²	3.00×10 ⁴	SEU	16832	3.51×10 ⁻⁸
Ge	0	37.30	00	2.50×10 ⁴	1.50×10 ⁶	SEU	746791	3.11×10 ⁻⁸
Ge	0	37.30	FF	1.35×10 ⁴	8.10×10 ⁵	SEU	338616	2.61×10 ⁻⁸
Ge	0	37.30	00	1.28×10 ³	7.70×10 ⁴	SEU	38440	3.12×10 ⁻⁸
Ge	0	37.30	FF	1.42×10 ³	8.50×10 ⁴	SEU	38048	2.80×10 ⁻⁸
Ti	0	21.84	00	1.90×10 ³	1.20×10 ⁵	SEU	32736	1.70×10 ⁻⁸
Ti	0	21.84	FF	1.80×10 ³	1.10×10 ⁵	SEU	29474	1.70×10 ⁻⁸
Cl	0	13.40	00	1.70×10 ³	1.00×10 ⁵	SEU	23844	1.50×10 ⁻⁸
Cl	0	13.40	FF	5.00×10 ²	3.00×10 ⁴	SEU	6816	1.42×10 ⁻⁸
Ta	0	81.35	00	1.01×10 ⁴	1.01×10 ⁶	SEU	78848	6.19×10 ⁻⁸
Kr	0	20.30	FF	2.50×10 ⁴	1.01×10 ⁶	SEU	22010	1.31×10 ⁻⁸
Kr	0	20.30	00	2.50×10 ⁴	1.01×10 ⁶	SEU	22824	1.35×10 ⁻⁸

3.2 注量及注量率

验证试验中采用的注量率范围为 $3.8 \times 10^2 \sim 2.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据被测 SRAM 器件已有的重离子试验数据,计算分析得到 SRAM(存储容量为 4 Mbit)在 ²⁸Si 离子(注量率为 $103 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的辐照下最多需要 3 s 即可累积到 100 个 SEU 错误数,因此试验中每种离子的辐照时间确定为 60 s,即可产生满足试验数据随机误差小于 5% 的错误数^[11-13]。

试验过程中,除去 LET 值极小的离子以外,其他离子所产生的错误数均达到 100 个以上,同时考虑到单个芯片的累积辐照注量应控制在 107 cm^{-2} 以内,因此单次辐照的累积注量最高不超过 $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$,对于 LET 值大的离子单次辐照,累积注量最低为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 。

3.3 辐照试验监测

试验样品在辐照过程中执行相应的功能操作

如下。

1) 辐照前,将数据“00”或“FF”写入 SRAM 中并自检成功。

2) 辐照过程中,运行重离子单粒子效应试验标定系统来标定系统的测试程序。

3) 辐照后,测试程序记录数据状态在辐照前后的改变情况,统计 SEU 错误数。

3.4 试验数据的分析方法

单粒子翻转截面的计算公式为

$$\sigma_{\text{bit}} = \frac{N}{F \times B_{\text{test}}} \times A, \quad (1)$$

式中: σ_{bit} 为器件每 1 bit 的重离子单粒子效应截面;

N 为器件监测到的错误数; B_{test} 为被监测的总位数; F 为单位面积的重离子注量; A 为加权系数,通常取 1。

3.5 试验结果及分析

5 次辐照试验使用了 11 种重离子,得到的试验数据如表 2 所示。与中国原子能科学研究院以及欧洲航天局采用 SEU monitor 的试验对比结果如表 3 所示。以 C 离子和 Kr 离子的辐照试验为例,给出单粒子翻转辐照试验中束流准确度和均匀度的标定测试结果。C 离子在数据分别为 00 和 FF 的情况下,不同入射角度的单粒子翻转分布如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看到,当辐照

表 3 单粒子翻转截面数据的对比

Table 3 Comparison of single particle flip cross section data

Ion	This paper		CIAE			ESA		
	LET / (MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	Cross section size per 1 bit / cm ^{2D}	LET / (MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	Cross section size per 1 bit / cm ²	Error / %	LET / (MeV·cm ² ·mg ⁻¹) ^②	Cross section size per 1 bit / cm ^{2D}	Error / %
Li	0.44	5.16×10 ⁻¹³	—	—	—	—	—	—
Li	0.62 ^③	4.07×10 ⁻¹³	—	—	—	—	—	—
Li	0.88 ^③	6.25×10 ⁻¹³	—	—	—	—	—	—
C	1.73	6.03×10 ⁻¹²	1.8	4.90×10 ⁻¹²	18.74	1.68 ^⑤	1.46×10 ⁻¹¹ ^⑥	142.12
C	2.45 ^③	1.04×10 ⁻¹¹	2.5 ^③	1.00×10 ⁻¹¹	3.85	2.34 ^⑤	2.68×10 ⁻¹¹ ^⑥	157.69
C	3.46 ^③	3.79×10 ⁻¹¹	3.6 ^③	4.67×10 ⁻¹¹	23.22	—	—	—
O	3.10	5.96×10 ⁻¹⁰	—	—	—	3.03 ^⑤	9.42×10 ⁻¹⁰ ^⑥	58.05
O	4.40 ^③	5.65×10 ⁻⁹	4.3	5.37×10 ⁻⁹	4.96	4.55 ^⑤	4.54×10 ⁻⁹ ^⑥	19.65
O	6.20 ^③	7.82×10 ⁻⁹	6.2 ^③	7.07×10 ⁻⁹	9.59	6.29 ^⑤	7.11×10 ⁻⁹ ^⑥	9.08
F	4.70	7.95×10 ⁻⁹	—	—	—	—	—	—
F	6.60 ^③	1.04×10 ⁻⁸	—	—	—	—	—	—
F	9.40 ^③	1.47×10 ⁻⁸	8.8 ^③	1.03×10 ⁻⁸	29.93	9.97 ^⑤	1.53×10 ⁻⁸ ^⑥	4.08
Si	9.00	2.47×10 ⁻⁸	—	—	—	—	—	—
Si	12.70 ^③	3.64×10 ⁻⁸	—	—	—	13.86 ^⑤	1.98×10 ⁻⁸ ^⑥	45.60
Si	18.00 ^③	3.54×10 ⁻⁸	—	—	—	20.34 ^⑤	2.39×10 ⁻⁸ ^⑥	32.49
Cl	13.40	1.46×10 ⁻⁸	13.8	1.93×10 ⁻⁸	—	—	—	—
Kr	20.30	1.34×10 ⁻⁸	20.9	2.30×10 ⁻⁸	71.60	—	—	—
Ti	21.84	1.70×10 ⁻⁸	20.9	2.30×10 ⁻⁸	35.30	—	—	—
Ge	37.00	2.28×10 ⁻⁸	33.5	3.14×10 ⁻⁸	37.70	—	—	—
Ge	37.30	2.91×10 ⁻⁸	33.5	3.14×10 ⁻⁸	7.90	—	—	—
Ge	52.30 ^③	3.28×10 ⁻⁸	—	—	—	—	—	—
I	65.60	5.48×10 ⁻⁸	67.4 ^③	4.99×10 ⁻⁸	8.94	64.40 ^⑤	6.79×10 ⁻⁸ ^⑥	23.91
Ta	81.35	6.19×10 ⁻⁸	—	—	—	—	—	—
Ta	92.80 ^③	5.79×10 ⁻⁸	—	—	—	—	—	—
Ta	131.20 ^③	6.38×10 ⁻⁸	—	—	—	111.92 ^⑤	1.08×10 ⁻⁷ ^⑥	69.28

Note: ① the average value of the cross-section data from “0” to “1” and from “1” to “0” obtained from the same LET value in Table 2; ② the data obtained from the LET value-cross-section relationship curve, not direct measurement data; ③ the LET value and its cross-section obtained from the incidence of ions at an angle of 45°; ④ the LET value and cross-sectional data obtained from the ion incident at an angle of 60°; ⑤ the HIF 2 (Heavy ion Irradiation Facility 2) test terminal of the University of Leuven, Belgium; ⑥ the HIF 1 (Heavy ion Irradiation Facility 1) test terminal of the University of Leuven, Belgium.

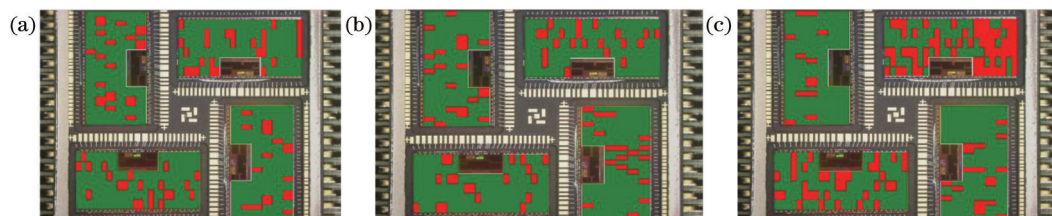


图 6 不同入射角度下 C 离子辐照翻转分布图(测试数据 00)。(a)入射角为 0°;(b)入射角为 45°;(c)入射角为 60°

Fig. 6 Flip distribution of C ion irradiation at different incident angles (test data is 00). (a) Incident angle is 0°; (b) incident angle is 45°; (c) incident angle is 60°

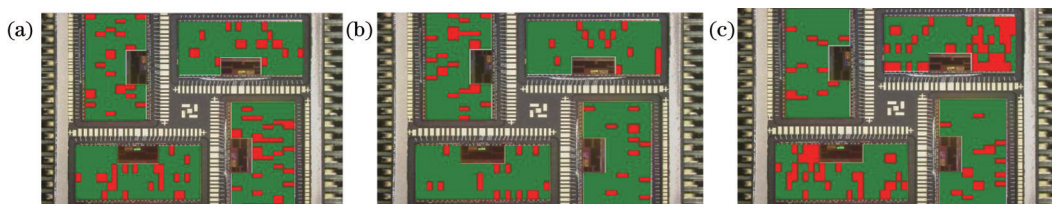


图 7 不同入射角度下 C 离子辐照翻转分布图(测试数据 FF)。(a)入射角为 0°;(b)入射角为 45°;(c)入射角为 60°

Fig. 7 Flip distribution of C ion irradiation at different incident angles (test data is FF). (a) Incident angle is 0°; (b) incident angle is 45°; (c) incident angle is 60°

角度为 0 时, 翻转位置分布较均匀, 表明此时辐照源的均匀性较好; 辐照偏转一定角度后, 由角度偏差造成不同位置处的芯片翻转位数存在较大差别。

图 8 为 Kr 离子辐照翻转分布情况。从图 8 可以看到, 翻转位置集中偏向于左下, 这表明试验过程中标定系统 SRAM 芯片有可能未对准辐照源中心, 或者辐照源出射的粒子存在分布不均匀性。

试验获得的 LET 值所对应的截面数据与中

国原子能科学研究院在相近 LET 值下获得的截面数据的误差最大值为 71.6%, 最小值仅为 3.85%。与欧洲航天局在鲁汶大学试验获得的数据相比, 当 LET 值小于 $3 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 两者截面误差大于 1 倍, 随着 LET 值的增加, 截面误差逐渐减小, 但对于 LET 值为 $131.2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的截面, 由于离子射程仅为 $15 \mu\text{m}$, 而且欧洲航天局所用的 LET 值为 $111.92 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 所以误差相对较大, 可比性不强。

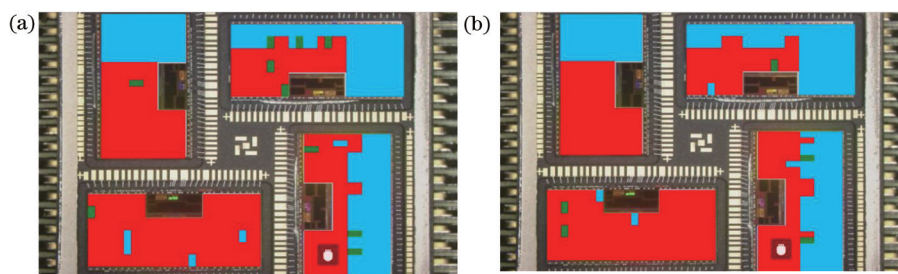


图 8 Kr 离子辐照单粒子翻转分布图。(a)入射角为 0, 测试数据为 00;(b)入射角为 0, 测试数据为 FF

Fig. 8 Single particle flip distribution of Kr ion irradiation. (a) Incident angle is 0, and test data is 00; (b) incident angle is 0, and test data is FF

4 结 论

对研制完成的重离子单粒子效应试验标定系统进行软、硬件功能的试验验证, 结果表明该系统能够实现对单粒子翻转效应的准确监测。试验获得了 11 种重离子分别在入射角度为 0° 、 45° 和 60° 的辐照下, 标定系统在“00”和“FF”数据模式下的

SEU 截面数据。此外, 标定系统具有独有的四象限单粒子翻转传感器结构, 也可以对辐照源的均匀性进行合理评价。

参 考 文 献

- [1] Harboe-Sorensen R, Guerre F X, Roseng A. Design, testing and calibration of a “reference SEU

- monitor" system[C]//2005 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, September 19-23, 2005, Cap d'Agde, France. New York: IEEE Press, 2005: 9812502.
- [2] Harboe-Sorensen R, Poivey C, Guerre F X, et al. From the reference SEU monitor to the technology demonstration module on-board PROBA-II[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(6): 3082-3087.
- [3] Harboe-Sorensen R, Poivey C, Zaden A, et al. Proba- II technology demonstration module in-flight data analysis[C]//2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, September 19-23, 2011, Seville, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 581-586.
- [4] Shen D J, Fan H, Guo G, et al. Single event effect calibration experiment with ESA single event upset monitor on Beijing HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(3): 555-560.
- [5] Luo Y H, Guo X Q, Chen W, et al. Energy and angular dependence of single event upsets in ESA SEU Monitor[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(20): 206103.
罗尹虹, 郭晓强, 陈伟, 等. 欧空局监测器单粒子翻转能量和角度相关性[J]. 物理学报, 2016, 65(20): 206103.
- [6] Hu Z L, Yang W T, Li Y H, et al. Atmospheric neutron single event effect in 65 nm microcontroller units by using CSNS-BL09[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(23): 238502.
胡志良, 杨卫涛, 李永宏, 等. 应用中国散裂中子源 9 号束线端研究 65 nm 微控制器大气中子单粒子效应[J]. 物理学报, 2019, 68(23): 238502.
- [7] Yu Y T, Chen Y B, Shui C S, et al. Test study of single event effects on large capacity radiation-hardened SRAMs[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(5): 462-467.
余永涛, 陈毓彬, 水春生, 等. 大容量抗辐射加固 SRAM 器件单粒子效应试验研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(5): 462-467.
- [8] Gao D Q, Zhou Z Z, Wu F J, et al. R & D progress of HIAF power supply system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 2048-2054.
高大庆, 周忠祖, 吴凤军, 等. 强流重离子加速器装置电源预研及进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 2048-2054.
- [9] Gao L J, Shi S T, Guo G, et al. Technique of producing high charge state heavy-ion beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(7): 1304-1308.
高丽娟, 史淑廷, 郭刚, 等. 高电荷态重离子束流产生技术的研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(7): 1304-1308.
- [10] Shen D J, Chen Q, Guo G, et al. Error analysis of irradiation dose in single particle effect experiment of heavy ion[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(21): 112-114, 116.
沈东军, 陈泉, 郭刚, 等. 重离子单粒子效应试验辐照剂量误差分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(21): 112-114, 116.
- [11] Duan Y H, Cong M Y, Jiang D Y, et al. Spectral response cutoff wavelength of ZnO ultraviolet photodetector modulated by bias voltage[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2004001.
段雨晗, 丛明煜, 蒋大勇, 等. 电压调制 ZnO 紫外探测器光响应截止波长的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2004001.
- [12] Zhou D, Cao J, Jiang Y H, et al. Speckle design method based on principal component analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201104.
周栋, 曹杰, 姜雅慧, 等. 基于主成分分析的散斑设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201104.
- [13] Zhen Z, Hao R, Xing D, et al. Nearly-ballistic optimization design of high-speed uni-traveling-carrier photodiodes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1006003.
甄政, 郝然, 邢东, 等. 高速单行载流子光电二极管的近弹道优化设计[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1006003.