

文章编号: 1007-4627(2014)02-0170-07

一种改进的 SRAM 单粒子效应检测系统

童腾^{1, 2}, 苏弘¹, 王晓辉^{1, 2}, 刘杰¹, 张战刚^{1, 2}, 刘天奇^{1, 2}, 古松^{1, 2}, 杨振雷^{1, 2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国科学院近代物理研究所材料研究中心开展了对静态随机存储器(Static Random Access Memory, SRAM)单粒子效应(Single Event Effects, SEEs)的深入研究。材料中心目前拥有的两套SRAM单粒子检测系统各自具有一定的局限性, 所以又提出了一种改进的SRAM SEE检测方法, 并研制了相关电路。该检测系统在兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的束流辐射终端上进行了多次实验, 获得了一批实验数据。其中包括¹²⁹Xe束流辐照条件下, 对65 nm SRAM单粒子翻转的研究; ¹²C束流辐照条件下, 对65, 130和150 nm商用错误纠正编码加固SRAM SEE的研究; ¹²⁹Xe束流辐照条件下, 对普通商用SRAM单粒子锁定的研究等。实验验证了该检测系统的有效性和可靠性, 为开展SRAM SEE的研究提供了重要的检测平台, 并为以后开展更复杂器件SEE的研究提供了实验经验和技术基础。

关键词: SRAM; 单粒子效应; 检测系统; 重离子

中图分类号: TN386.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.170

1 引言

单粒子效应(Single Event Effects, SEEs)是单个高能粒子入射到半导体器件内, 导致器件工作异常的重要辐射效应, 是空间电子设备故障的重要诱因之一。随着集成电路制造工艺水平的不断提高, 半导体器件耗尽层尺寸逐渐减小, 临界电荷逐渐下降, 大大降低了器件的SEE阈值, 严重限制了高性能半导体器件在太空环境中的应用^[1-2]。

兰州重离子研究装置(HIRFL)是我国大型重离子加速器, 能提供高达几个GeV能量的、从C到U的多种离子, 满足SEE地面模拟实验对重离子辐射源的基本要求, 如宽广的线性能量转移(Linear Energy Transfer, 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可调的束流强度等^[3], 并且在辐射终端上建有专用靶室和先进的束流诊断设备, 非常适合开展SEE研究。

中国科学院近代物理所材料研究中心利用HIRFL平台优势, 在之前拥有的两套SRAM SEE检测系统的基础上, 深入开展了对SRAM SEE的研究, 取得了一系列的进展和成果。但是, 由于这两套检测系统功能上各自有一些不尽完善之处, 比如: 第一套检测系统检测对象只局限于某一商业公司的小容量SRAM, 待测SRAM工艺不够先进; 另一套检测系统对象只局限于某一系列国产器件, 且仅能检测单位翻转(Single Bit Upset, SBU)。这样影响了后续研究工作的继续深入, 因此, 我们提出一种改进的SRAM SEE检测方法, 完成相关检测电路的研制, 该检测系统能够完成对8 Mb容量以内(包括8 Mb)的各种SRAM常见SEEs, 包括单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)、SBU、多位翻转(Multiple Bit Upset, MBU)及单粒子锁定(Single Event Latchup, SEL)的检测。通过多次辐照实验, 该检测系统获取了一批实验数据, 验证了检测系统的有效性和可靠

收稿日期: 2013-09-30; 修改日期: 2013-11-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ951-A1-01-01); 国家自然科学基金项目(11079045, 11005135)

作者简介: 童腾(1984-), 男, 安徽安庆人, 博士, 从事存储器单粒子效应检测与加固方向研究; E-mail: tongteng@impcas.ac.cn

通信作者: 苏弘, E-mail: suhong@impcas.ac.cn.

性, 同时为研究 SEE 机理, 甄选抗辐射器件以及进行 SRAM SEE 抗辐照加固研究, 提供了丰富的实验数据, 也为进一步开展复杂器件 SEE 检测实验积累了经验。

2 SRAM SEE 检测系统硬件电路

SRAM SEE 检测系统硬件电路采用“检测主板—承载子板”分离的结构, 在同一块通用检测主板上, 根据不同的待测器件需要, 设计不同的承载子板, 主子板通过高速板对板连接器进行连接。硬件总体结构框架如图 1 所示。

检测主板为 SRAM SEE 检测提供主要硬件支持,

具有电源管理、温度监控、电流监控、待测器件监控与上位机通信等功能。主板与子板连接的被辐照面不放置任何工作半导体器件, 保证在辐照环境下, 主板自身工作正常, 所有 SEE 全部来自待测器件。承载子板主要根据不同封装、管脚的待测器件分别设计, 为不同待测器件与同一检测主板连接提供相应的接口。

通过采用这种主子板分离的结构, 可以根据不同待测器件的检测需要, 设计不同的承载子板, 以此实现在同一块检测主板上对不同待测器件的检测, 达到检测通用性的目的。而承载子板设计简单、方案灵活多样、制作周期短、成本低, 有利于我们开展针对不同待测器件的 SEE 检测。

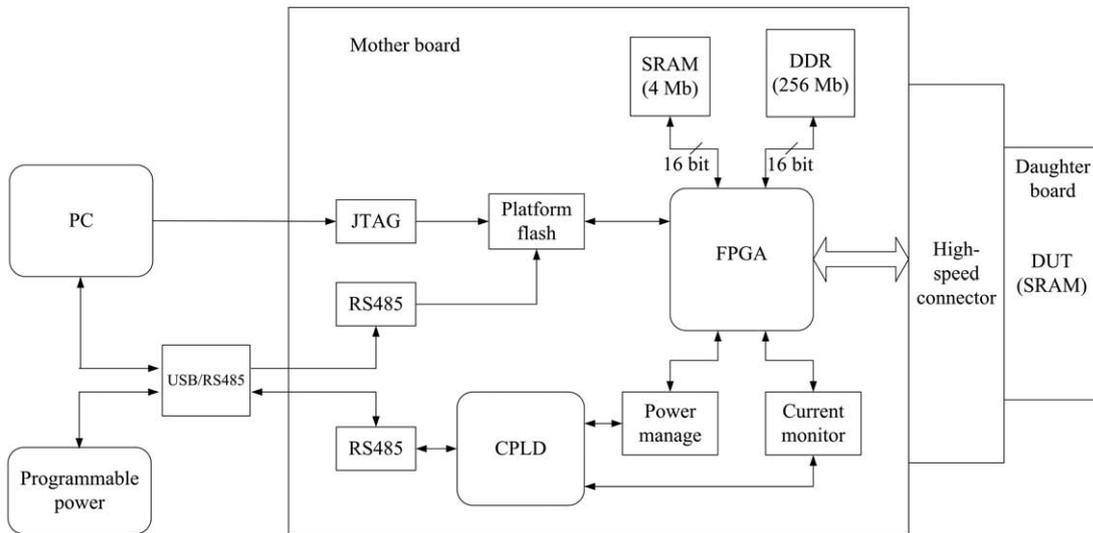


图 1 SRAM SEE 检测系统硬件总体结构框架图

3 SRAM SEE 检测系统与检测方法

3.1 SRAM 基本结构

静态随机存储器 (Static Random Access Memory, SRAM) 是一种典型的存储器件, 是航天器电子学系统的重要器件之一。正常工作状态下, SRAM 可以随时读出或写入数据, 具有读写方便、速度快等优点, 缺点是一旦掉电, 则数据丢失。在电路结构层上, SRAM 通常由存储矩阵、地址译码器和读/写控制逻辑三部分组成, 如图 2 所示。电路结构清晰, 因此 SRAM 的 SEE 检测对象和方法相对明确。半导体器件的 SEE 有多种类型, 而 SRAM SEE 主要是 SEU 和 SEL 两类, 这两种 SEE 同时也是其他半导体器件

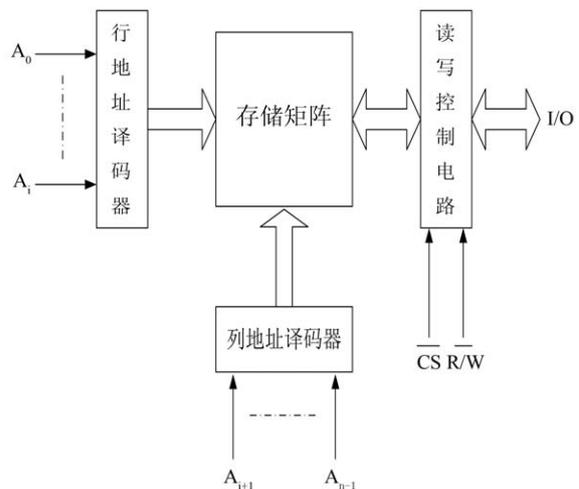


图 2 SRAM 基本结构图

SEE 的常见类型, 因此开展 SRAM SEE 的检测和研究, 是充分认识 SEE 机制和开展对其他类型器件研究的基础, 是 SEE 敏感性检测的基准, 具有重要的检测与研究意义。

3.2 检测系统主要改进与特点

不同于原有的检测系统, 该系统在硬件电路上有了较大的改进。本系统电路采用“检测主板—承载子板”分离的结构, 在同一块通用检测主板上, 根据不同的待测器件需要, 设计不同的承载子板, 增强了测试系统的通用性, 打破了原有系统仅能测试小容量 SRAM、且器件类型单一的局限, 新的系统可完成对 8 Mb 容量以内(包括 8 Mb)的各种 SRAM 常见 SEEs 的检测; 本系统主子板之间采用多针高速板对板连接器进行连接, 解决了待测器件与检测系统之间的数据传输瓶颈, 缩短了测试死时间, 提高了测试系统数据处理的实时性; 新的系统采用了高性能 Virtex 系列 FPGA 作为系统控制与处理器, 可支持复杂算法的运行, 解决了原系统检测方法相对简单, 可检测 SRAM 器件工艺不够先进的问题。基于新的系统硬件平台, 提出了改进的 SRAM SEE 检测方法, 增加了 SRAM SEE 的检测种类, 不仅可以测试 SBU, 而且还可以测试 MBU, 并且能在实验现场对实验数据进行实时显示与初步分析处理。

该系统可支持多种 SRAM 的检测, 可检测 SRAM 常见的 SEU 和 SEL, 最高工作频率 100 MHz, 数据总线 8/16/32 bits 可选, 地址总线最高 24 bits, 可任意设置写入地址范围, 具有 CS, WE, OE, BHE, BLE 等控制信号线, 可调参数广泛。同时, 具有温度和电流监控功能, 提高了系统的工作可靠性。

系统对 65 nm 深亚微米级先进工艺 SRAM 器件在内的多种 SRAM 器件的 SEE 进行了检测, 获取了一批重要实验数据, 有效验证了该系统的多个功能和工作性能。

3.3 SBU 检测方法

SBU 是半导体器件最常见的 SEEs 之一, 也是判断数字集成电路 SEE 敏感性的重要指标。对于 SBU 检测, 主要检测总体流程如图 3 所示^[4-6], 开机自检(主要是温度自检)完成之后, 以每秒 8 次的频率向上位机发送开机完成指令; 接收此指令后向下位机

配置待测器件的参数信息, 主要有工作频率、预设数据(一般为 AA, 55, FF, 00 等)、工作地址区间、检测模式(目前有 WRRR(静态)和 WRWR(动态)两种模式^[2,7-8], W 为写入, R 为读出)等, 配置完成后返回相关指令, 计时器(每隔 10 ns 自动累加的 48 bits 计数器)开始工作, 等待束流辐照; 开启束流进行辐照, 下位机对待测 SRAM 进行实时监控, 不断读回待测器件工作地址区间内的存储信息, 一旦发现与预设数据不同, 就确定为发生一次 SBU, 将发生 SBU 的时间信息(Time)、地址信息(Address)以及错误数据(Data)记录下来。

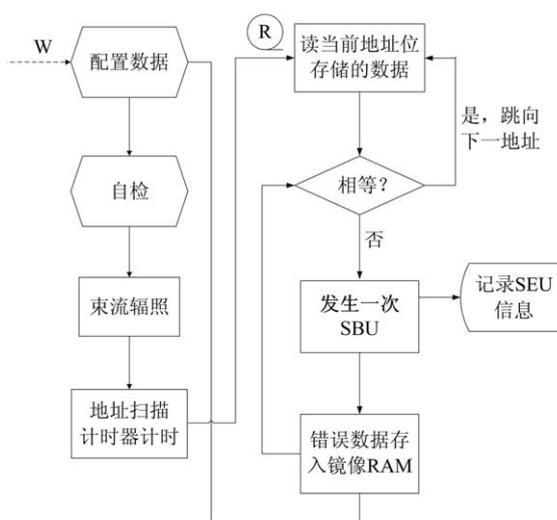


图 3 WRRR 模式下 SBU 检测总体流程图

对于发生 SBU 后的错误数据处理方法, 在配置待测器件参数时, 同时调用主板上的工作 SRAM(非待测 SRAM, 容量 4 Mb, 数据总线 16 bits, 地址总线 18 bits) 作为一个镜像, 将预设数据同时写入其相应的地址区间。待测器件处于束流辐照环境下, 镜像存储单元处于主板辐照背面安全的工作环境中, 下位机同时不断读回待测器件和镜像单元内数据, 进行比较, 如果不同, 就确定为一次 SBU 发生, 同时记录相应地址位的错误数据, 并写入镜像存储单元内, 作为下一轮该地址数据比较的参考数据, 待测器件内错误数据不做改动; 图 4 为 20 MHz 频率下 SBU 检测时序图。

下位机检测到 SBU 信息之后, 立即将其送入到一个 112 × 1024 bits 的 FIFO 中进行缓存, 然后通过串口将其发送至上位机进行数据处理。

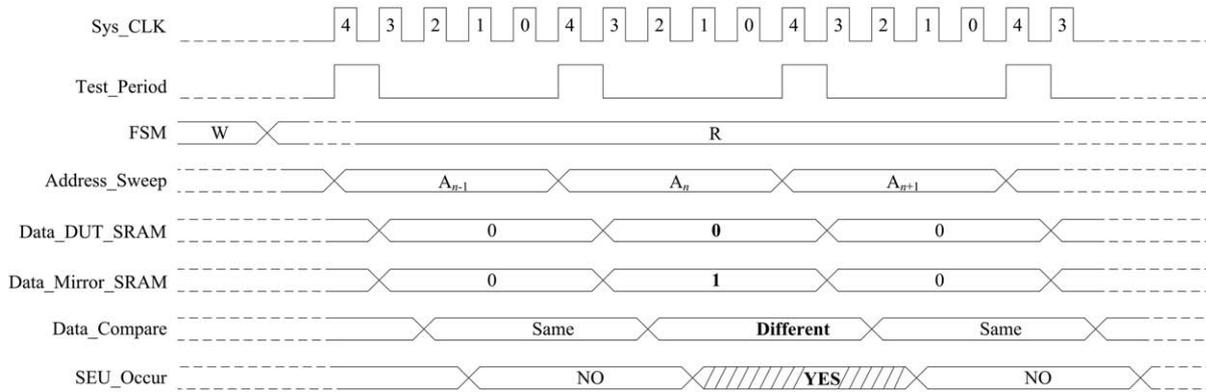


图 4 WRRR 模式下 SBU 检测时序图

3.4 MBU 的检测方法

随着制作工艺的不断改进, SRAM 的存储单元密度不断增大, 单元之间结构更加紧凑, 单元翻转时所需收集的电荷越来越少。因此, 在深亚微米级的先进工艺 SRAM 中, MBU 经常发生, 同时会使得在 SRAM 中采用错误纠正编码 (Error Correcting code, ECC) 加固等措施的失效性^[2,9-10]。所以, 对于 MBU 的检测与分析, 是目前对于 SRAM 的 SEU 研究的一个重要方向。

MBU 可以分为两种类型, 一种为单粒子导致同一个字节中多个 bits 发生翻转; 一种为单粒子导致相邻物理地址的多个存储单元存储状态同时发生变化。现在有时候, 前者会被称为 MBU, 后者被称为 MCU (Multiple Cell upset)^[11], 本文不作过多的区别, 所有的多位翻转均称为 MBU。

由于在对 SBU 的检测中, 系统会记录详细的每个 SBU 发生的时间、地址和翻转数据信息, 因此在判定 SBU 的基础上, 分析 SBU 的这些具体信息, 将物理地址相邻, 错误时间相近的 (与检测频率有关) 多个 SBU 认定为 MBU (前提是控制低注量率, 保证 SBU 发生率较低)。这样, 不但可以检测出发生在一个字节内的 MBU, 同时还可以检测出相邻地址间不同字节内的 MBU, 为开展对先进工艺 SRAM 的 SEU 的研究, 提供良好的检测和分析支持。

3.5 SEL 的检测方法

通过主板电流监控单元, 利用可编程电源的电流读取功能, 实时读回待测器件的工作电流。首先设定一个发生 SEL 的电流阈值, 辐照过程中一旦待测器件发生 SEL, 其工作电流会突然增大, 当超过设定

的 SEL 阈值时, 判定发生了一次 SEL, 上位机监控单元会自动发出警报, 同时立即切断待测器件电源, 并记录发生 SEL 的时间信息。

4 实验检测

我们利用该 SEE 检测平台, 在 HIRFL 束流辐射终端上进行了多次 SRAM SEE 检测实验, 获得了一批实验数据, 以下为部分实验数据简介。

4.1 65 nm 工艺 ISSI 公司商用 SRAM 的 ^{129}Xe 束实验

在 ^{129}Xe 束流辐照下, 我们对 ISSI 公司 65 nm 商用 SRAM (器件开封) 进行了 SEE 检测。束流垂直于器件表面入射时, 离子 LET 值为 53.3 ~ 63.8 MeV/(mg/cm²)。待测 SRAM 数据位选为 16 bits, 地址位分别为 18 bits, 容量为 4 Mb。检测时设置待测 SRAM 工作频率为 20 MHz, 全地址写入, 写入数据为 0x5555, 检测模式为 WRRR。本次实验中, 通过降能片改变了入射粒子的 LET 值。通过转动实验台, 改变了入射粒子的倾角, 待测器件的工作电压、写入数据等均为变化的实验参数。实验中, 没有发生 SEL 现象, 但是发生了 SBU 和明显的 MBU, 如图 5 所示。序号 21 错误的翻转情况, 是从 0x55(01010101) 翻转到 0x9D(10011101), 为 3 bits 的 MBU, 翻转方式为同一个字节内的多 bits 翻转。序号 22 ~ 25 错误的翻转情况, 是从 0x55(01010101) 翻转到 0x15(00010101), 它们之间的时间间隔均为一个地址扫描周期, 地址为 0x00C1F0~0x00C1F3 的连续, 是一个 4 bits 的 MBU, 翻转方式为相邻地址中不同字节内的多 bits 翻转。

1	TIME	18404006346	相对间隔时间 (ns)	相对间隔周期	ADDR	0091F4	间隔地址	DATA	4D55
2	TIME	18404006351	50	0.000	ADDR	0091F5	1	DATA	4D55
3	TIME	18549208576	1452022250	110.781	ADDR	03E132	29040445	DATA	55D5
4	TIME	18549214981	64050	0.005	ADDR	03E633	1281	DATA	55D5
5	TIME	18549225216	102350	0.008	ADDR	03E632	2047	DATA	55D5
6	TIME	18549225221	50	0.000	ADDR	03E633	1	DATA	55D5
7	TIME	18943064866	3938396450	300.476	ADDR	01A56C	78767929	DATA	6455
8	TIME	18943064871	50	0.000	ADDR	01A56D	1	DATA	6455
9	TIME	18943069986	51150	0.004	ADDR	01A96C	1023	DATA	6455
10	TIME	18943069991	50	0.000	ADDR	01A96D	1	DATA	6455
11	TIME	18943069996	50	0.000	ADDR	01A96E	1	DATA	6455
12	TIME	18943070001	50	0.000	ADDR	01A96F	1	DATA	6455
13	TIME	18951421426	83514250	6.372	ADDR	0325FC	1670285	DATA	5955
14	TIME	18951421431	50	0.000	ADDR	0325FD	1	DATA	5955
15	TIME	18951421441	100	0.000	ADDR	0325FF	2	DATA	5955
16	TIME	18951431666	102250	0.008	ADDR	032DFC	2045	DATA	5955
17	TIME	18951431671	50	0.000	ADDR	032DFD	1	DATA	5955
18	TIME	18951431681	100	0.000	ADDR	032DFF	2	DATA	5955
19	TIME	19122765061	1713333800	130.717	ADDR	020C33	34266676	DATA	4555
20	TIME	19468556656	3457915950	263.818	ADDR	015100	69158319	DATA	559D
21	TIME	19468573301	166450	0.013	ADDR	015EE3	3329	DATA	559D
22	TIME	19531286966	627136650	47.847	ADDR	00C1F0	12542733	DATA	5515
23	TIME	19531286971	50	0.000	ADDR	00C1F1	1	DATA	5515
24	TIME	19531286976	50	0.000	ADDR	00C1F2	1	DATA	5515
25	TIME	19531286981	50	0.000	ADDR	00C1F3	1	DATA	5515
26	TIME	19531297206	102250	0.008	ADDR	00C9F0	2045	DATA	5515
27	TIME	19531297211	50	0.000	ADDR	00C9F1	1	DATA	5515
28	TIME	19619082476	877852650	66.975	ADDR	00E02E	17557053	DATA	D555
29	TIME	19818237056	1991545800	151.943	ADDR	0075B2	39830916	DATA	555C
30	TIME	19856495621	382585650	29.189	ADDR	013733	7651713	DATA	5514

图 5 ^{129}Xe 束辐照下, 待测 SRAM 部分 SEU 信息示意图

4.2 65, 130 和 150 nm 工艺 ISSI 公司商用 SRAM

在 ^{12}C 束流辐照条件下, 我们对 ISSI 公司四款商用 SRAM (器件开封) 进行了 SEE 检测, 四款 SRAM 分别为 2 款 65 nm 工艺 (带 ECC 功能器件), 130 和 150 nm 工艺各一款 (不带 ECC 功能器件)。束流垂直于器件表面入射, 离子穿过器件灵敏区的 LET 值为 $1.8 \text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 。待测 SRAM 工作电压 3.3 V, 数据位选为 16 bits, 地址位分别为 17 bits 和 18 bits, 容量分别为 2 Mb 和 4 Mb。检测时设置待测 SRAM 工作频率为 20 MHz, 写入数据为全 1 (blank pattern), 全地址写入, 检测模式为 WRRR。该系列 SRAM 的 SEU 翻转截面如图 6 所示。实验中,

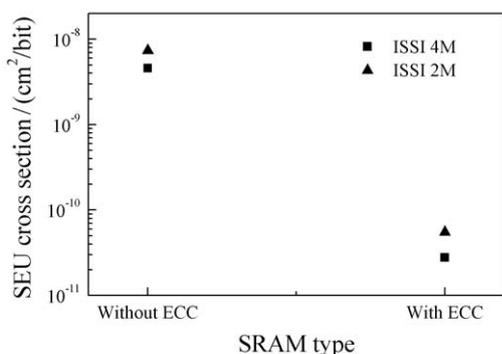


图 6 四种待测器件的 SEU 翻转截面比较图

此系列商用 SRAM 发生了 SBU, 没有发生 MBU 和 SEL。

该实验对比验证了在深亚微米级工艺中, ECC 电路的有效性, 同时观测到了 ECC 电路性的失效性, 对其失效模式的深入分析, 可参考文献[12]。

4.3 普通商用 SRAM 的 SEL 实验

当高能重离子 (^{129}Xe , ^{209}Bi 等) 辐射于普通商用 SRAM 时, SEE 主要以 SEL 为主, 频繁发生的 (一般几秒或十几秒) SEL 使得器件的 SEU 检测失去意义, 原有的检测方法可以简化为对 SEL 的单独专门测试。

在 ^{129}Xe 束流辐照条件下, 我们同样对几款普通商用 SRAM (器件开封) 进行了 SEE 检测。束流垂直于器件表面入射, 离子穿过器件灵敏区的 LET 值分别为 $51.96 \text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 和 $60.98 \text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 。待测 SRAM 工作电压 3.3 V, 检测时设置待测 SRAM 工作频率为 20 MHz, 检测模式为 WRRR。实验中, 商用 SRAM SEE 主要以 SEL 为主, 图 7 为其中一款器件部分 SEL 检测情况。实验表明, 普通商用器件对于高能重离子的 SEE 以 SEL 为主, 锁定电流远超过正常工作电流, 发生 SEL 时需立即自动切断待测器件电源, 防止对待测器件造成永久性损坏。

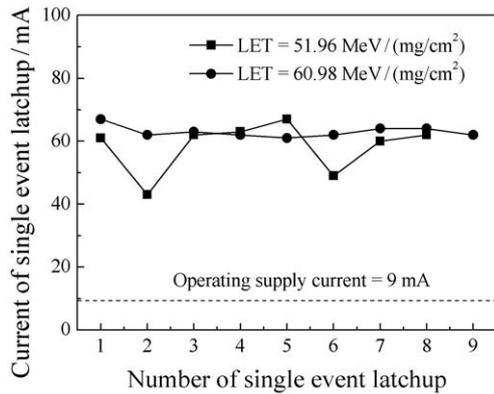


图7 某商用器件在高压重离子辐照下SEL检测情况

本SRAM SEE检测方法, 经过多次辐照实验, 获得了大量的实验数据。经过分析, 实验结果与理论预期基本相符, 验证了该SEE检测系统可用于检测工作, 性能稳定, 并为深入开展SRAM SEE研究提供支持。

5 结论与展望

通过辐照实验, 验证了该改进的SRAM SEE检测系统硬件电路工作的可靠性, 通用检测方法设计方法的科学性、可行性和应用性, 可针对不同待测SRAM, 开展SEE的研究。我们将完善和改进检测系统, 对更多类型的SRAM开展辐照实验, 并在通用SRAM的检测基础上, 深入开展对SRAM SEE加固方向的研究和验证。同时, 在此设计和实验的经验基础上, 开展对更复杂器件(如Flash、DRAM、FPGA等)的SEE检测与研究的工作。

参考文献:

- [1] HE Chaohui, LI Guozheng, LUO Jinsheng, *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2001, **21**(2): 174. (in Chinese) (贺朝会, 李国政, 罗晋生, 等. 半导体学报, 2001, **21**(2): 174.)
- [2] REED K L, ANDREW T K. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, **55**: 3367.
- [3] HOU Mingdong, LIU Jie, MA Feng, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 1997, **31**(1): 284. (in Chinese) (侯明东, 刘杰, 马峰, 等. 原子能科学技术, 1997, **31**(1): 284.)
- [4] JEDEC Standard. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices[S], 2006: 10.
- [5] EIA/JEDEC Standard. Test Procedures for the Measurement of Single-Event Effects in Semiconductor Devices from Heavy Ion Irradiation[S], 1996: 31.
- [6] JESD89A Standard. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices[S]. 2006: 10.
- [7] PALOMO F R, MORILLA Y, MOGOLLÓN J M, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2011, **269**: 2210.
- [8] DANIELE R, HELMUT P, WONG S, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2005, **52**: 2433.
- [9] DAVID F H, PAUL W M, JONATHAN A P, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2009, **56**: 3499.
- [10] JUAN A M, PEDRO R. DAC'08 Proceedings of the 45th Annual Design Automation Conference[C]. California, USA, June 8-13, 2008: 930-935.
- [11] MICHAEL N. Soft Errors in Modern Electronic Systems[M]. Germany: Springer, 2011: 20-21.
- [12] TONG Teng, WANG Xiaohui, ZHANG Zhangang, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010405.

An Improved System of Detecting Single Event Effect in SRAM

TONG Teng^{1, 2}, SU Hong¹, WANG Xiaohui^{1, 2}, LIU Jie¹, ZHANG Zhangang^{1, 2},
LIU Tianqi^{1, 2}, GU Song^{1, 2}, YANG Zhenlei^{1, 2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The material research center in Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences (IMP,CAS) have made a fruitful achievements in the research of single event effects(SEEs) occurring in static random access memory (SRAM). However, there are some drawbacks exist in the two systems of detecting SEE owning by the material research center. Therefore, an improved method of detecting SEE is proposed, and the method functionality is implemented in a circuit. Further, a sequence of experiments are carried out in the beam radiation terminal of the Heavy Ion Facility in Lanzhou (HIRFL), and a bunch of experimental data are collected. The irradiation tests were carried out using ^{129}Xe for the SEE research of 65 nm SRAMs; Using ^{12}C for the SEE research of the 65, 130 and 150 nm SRAMs with ECC module; Using ^{129}Xe for the SEL research of the common commercial SRAMs and so on. These experiments provide a statistical evidence of the effectiveness and robustness of the improved system. It is believed that the proposed system will be beneficial for detecting SEE in diverse settings, and it could be taken advantage of as a platform for future research on SEE tests in more intricate devices.

Key words: SRAM; single event effect; detecting system; heavy ion

Received date: 30 Sep. 2013; **Revised date:** 8 Nov. 2013

Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJ CX2-YW-N27); National Natural Science Foundation of China(11079045, 11005135)

Corresponding author: SU Hong, E-mail: suhong@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>