

微处理器中子单粒子效应 测试系统设计与试验研究

段丙皇¹, 杜川华¹, 朱小锋¹, 李悦², 陈泉佑^{1,*}

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 为开展微处理器的空间大气中子单粒子效应研究, 以一款 TI 公司 65 nm CMOS 工艺的微处理器为研究对象, 研制了一套微处理器中子单粒子效应测试系统。该测试系统可实现对被测微处理器的单粒子翻转、单粒子功能中断和单粒子门锁效应的实时监测。利用加速器中子源, 对该微处理器开展 14 MeV 中子辐照试验。试验结果表明, 中子注量累积达 $3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 该器件未发生单粒子锁定效应。但总线通信、模数转换等功能模块发生了多次单粒子功能中断, 其中集成总线通信接口模块为最敏感单位, 试验获得的器件中子单粒子效应截面为 $6.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ 。

关键词: 微处理器; 中子单粒子效应; 14 MeV 中子; 测试系统

中图分类号: O571.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2022)04-0734-08

doi: 10.7538/yzk.2021.youxian.0786

Design and Test of Neutron-induced Single Event Effect Monitoring System on Microprocessor

DUAN Binghuang¹, DU Chuanhua¹, ZHU Xiaofeng¹, LI Yue², CHEN Quanyou^{1,*}

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Cosmic rays interact with atmospheric atoms to generate high-energy neutron radiation, which threatens to the electronic system working in the atmospheric space environment. Neutron-induced single event effect (SEE) occurring in the key component of an electronic system (i.e. microprocessor) seriously affects the system reliability. To study neutron-induced SEE of microprocessor, a SEE monitoring system was designed for a 65 nm CMOS microprocessor from Texas Instruments (TI). The designed system has the ability to monitor SEE events that occur in tested microprocessor, and record corresponding voltage/current change in real time. To minimize the irradiation-caused disturbance in monitoring system, it consists of two modules connected with 1.2 m communication line in irradiation room. One module carrying tested microprocessor is placed

close to the neutron source. Another module acting as the master control board is placed as far away from the neutron source and is shielded against gamma ray with lead bricks. The upper order computer and 24 V direct-current (DC) power supply are placed outside of the irradiation room. As a key component of the SEE monitoring system, the master control board is composed of microcontroller unit (MCU), power management chip, operating voltage/current monitor and peripheral circuit. The master control board is able to continuously monitor the internal operating status of the tested microprocessor and the voltage/current fluctuation. The 24 V input voltage is converted into two-way power supplies. One is used for monitoring MCUs on master control board. Another one is used for the device under test (DUT). Operating voltage/current values are transferred to the upper order computer through a serial port. When the detected voltage or current values exceed set thresholds, monitoring MCU would cut off power supply through a relay. The SEE monitoring system was test using 14 MeV neutrons produced by D-T reactions. Single event functional interrupt (SEFI) was observed in inter-integrated circuit (I²C), internal flash memory, analog-to-digital converter (ADC), arithmetic and logic unit (ALU), controller area network (CAN), general-purpose input/output (GPIO) and other units, while single event latch up (SEL) is not detected. I²C is found to be the most sensitive unit. Neutron-induced SEE in I²C bus leads to a significant operating current drop. Moreover, when one of eight tested I²C buses is blocked under neutron irradiation, the following tests for rest I²C bus will turn out to be “FAIL” too, which implies the SEE might occur at the control part of I²C. The SEE cross-section of tested microprocessor is evaluated to be $6.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ with the data of neutron fluence up to $3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Key words: microprocessor; neutron-induced single event effect; 14 MeV neutron; testing system

银河系宇宙射线和太阳系宇宙射线进入大气层时,将与大气原子通过多次级联反应产生中子等多种粒子^[1-2]。航空航天中电子学系统的飞行高度纵跨非电离层(60 km 以下)和电离层(60~1 000 km 为电离层),在该飞行高度范围内运动将累计受到一定注量的中子辐射。大气中子虽然不带电,但能与半导体器件中的材料原子发生非弹性相互作用或散裂反应在电子器件内淀积电离电荷,从而诱发单粒子效应^[3]。20 世纪 90 年代末,IBM 和 Boeing 公司利用飞行试验测试了中子诱发器件的翻转率^[4]。国内外对于半导体器件中子单粒子效应的研究主要是利用中子源产生的高能中子模拟单粒子效应^[5-8]。北京大学、中国科学院物理研究所、中国科学院空间科学与应用中心等分别采用仿真方法研究了临近空间大气中子诱发电子器件的单粒子翻转(SEU)^[9-10]。微处理器是各种电子

学系统的核心器件,一旦发生错误将导致整个系统正常工作状态被破坏,可能产生严重后果。对于传统半导体器件,由于器件特征尺寸较大,引起器件节点翻转需要的电荷量较大,中子次级粒子在硅材料中的最大线性能量传输值(LET)不足以引发单粒子效应。然而,随着半导体制造技术的发展、器件特征尺寸不断缩小和电源电压的不断降低,使得器件节点发生翻转所需的临界电荷越来越小,处理器中子单粒子效应逐渐被重视^[10-14]。

本文研制一套微处理器中子单粒子效应测试系统,可全面、准确地对微处理器的电源电压、多种存储资源、内部功能和接口模块进行监测。基于 NG-11 加速器中子源设备,对被测微处理器开展 14 MeV 中子单粒子效应辐照试验,研究获得器件中的敏感模块和器件的中子单粒子效应截面。

1 单粒子效应测试系统设计

1.1 硬件设计

微处理器属于功能复杂的大规模集成电路,需研制专用的测试系统来监测其内部各单元模块是否发生单粒子效应。为使监测电路尽量不受中子辐照的影响,采用子母板的形式进行测试系统设计。图 1 为 TM4C1294NCPDT 型微处理器设计中子单粒子效应测试系统示意图,主要由上位机、直流电源、主控母板、被测子板和通信线缆组成。被测子板和主控母板均放置到辐照室内,被测子板放置在靠近中子源的位置。主控母板通过 1 m 短线与子板连接,放置在远离中子源的位置,并采取铅砖进行辐射屏蔽。上位机和直流电源放置于测试大厅,通过 60 m 的长线与主控母板连接。

主控母板是整个测试系统的控制核心,其硬件设计方案如图 2 所示,由 2 片监控微控制器(MCU)、电源转换芯片、电压/电流监视器和其他外围电路组成,其主要实现对待测器件电

源和功能的控制监测。主控母板采用电源模块将外部输入的 24 V 直流电源转换为 2 路独立电源:1 路用于为功能监控 MCU 供电、1 路用于为待测子板供电。电源监控 MCU 通过串口将电压/电流监视器采集到的输出电压/电流数据上传到上位机,当检测到采集的电压/电流数据超过设定的器件电流阈值参数,电源监控 MCU 通过控制继电器模块实现对待测器件电源的定时断电和定时上电功能。采用 1 片功能监控 MCU 通过切换多路复用器和模拟开关的不同通道,实现对被测 MCU 器件多个模拟模块、多路通用异步接收/发送装置(UART)和集成总线通信(I²C)接口的功能控制;功能监控 MCU 通过控制器局域网络总线(CAN)和通用输入/输出(GPIO)接口实现对被测器件 CAN 和 GPIO 接口的功能控制。

1.2 软件设计

测试系统软件主要包括电源监控 MCU 程序、功能监控 MCU 程序及上位机控制程序。

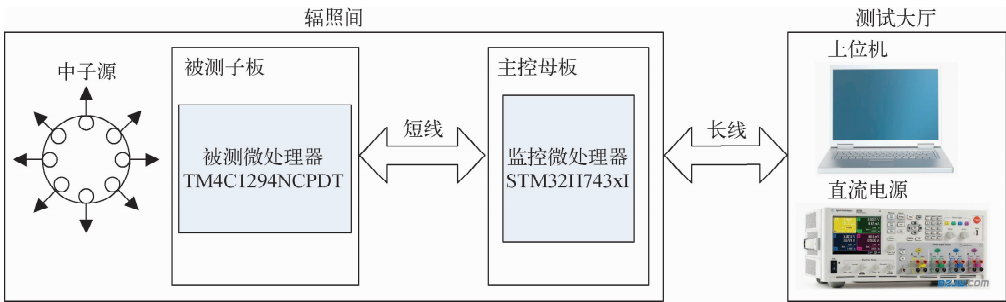


图 1 中子单粒子效应测试系统示意图

Fig. 1 Application scenario for single event effect monitoring system

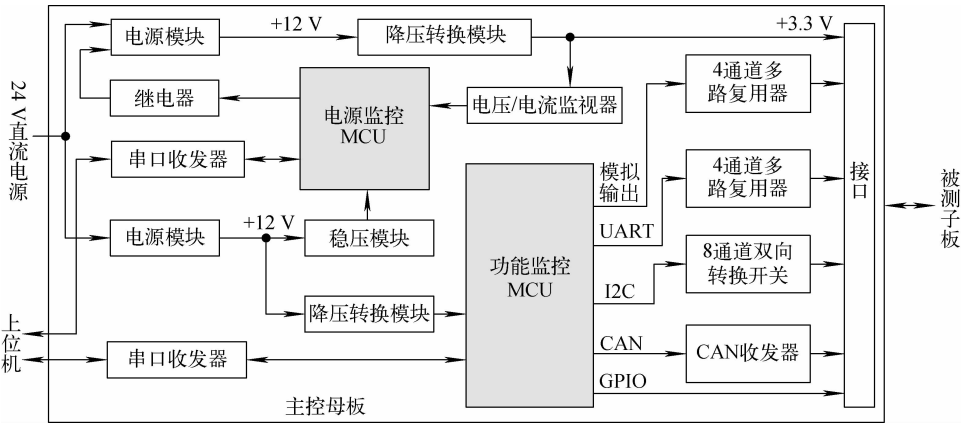


图 2 主控母板硬件设计方案

Fig. 2 Hardware design scheme of master control board

1) 电源监控 MCU 程序

电源电流检测电路由电源监控 MCU、电压/电流监视器和继电器组成。电压/电流监视器用于监视系统温度、电压和电流,其采样率为 14 kHz,电流检测范围为 0~2 A,检测精度为 0.19 mA/bit。电源监控 MCU 程序每秒读一次电压/电流监视器采集到的数据,并通过串口将采集到的数据上传到上位机。当检测到采集的电压/电流超过设定的器件阈值参数(电流阈值设定为 200 mA,约为器件正常工作电流的 3 倍),电源监控 MCU 通过控制继电器实现对待测器件电源的定时通断,防止单粒子闩锁(SEL)对器件造成物理损坏。

2) 功能监控 MCU 程序

功能检测电路由功能监控 MCU、多路复用器和模拟开关组成。被测 TM4C1294NCPDT 型微处理器的片上资源主要有:可擦编程只读存储器(EEPROM)、闪存存储器(FLASH)、模数转换器(ADC)、UART、I²C、CAN、GPIO 等单元模块,针对各单元模块的测试控制程序如下。

(1) EEPROM/FLASH 测试:由功能监控 MCU 控制被测 MCU 的 UART 接口,实现对被测 MCU 内部 EEPROM/FLASH 不同地址空间存储数据的回读操作,并与正确值(默认为 55)进行比对分析。

(2) ADC 测试:功能监控 MCU 产生 1 路模拟信号给 4 通道多路复用器,并输出到被测 MCU 的不同模拟输入通道,通过检测模数转换的结果,实现对被测 MCU 的 ADC 功能测试。

(3) UART 测试:功能监控 MCU 控制多路复用器,实现对被测 MCU 内部的 4 个 UART 模块数据收发的轮询测试。

(4) I²C 测试:功能监控 MCU 控制双向转换开关,实现对被测 MCU 内部的 8 个 I²C 模块数据收发的轮询测试。

(5) CAN 测试:由功能监控 MCU 的 CAN 接口直接调用被测 MCU 内部的 CAN 模块,实现对被测 MCU 内部的 CAN 模块数据收发功能测试。

(6) GPIO 测试:功能监控 MCU 的 GPIO 接口直接调用被测 MCU 内部的 GPIO 接口,实现对被测 MCU 内部的 GPIO 接口数据收发功能测试。

(7) 算术逻辑单元(ALU)运算功能测试:被测 MCU 循环执行加、减、乘、除运算功能,由功能监控 MCU 控制被测 MCU 的 UART 接口完成对被测 MCU 不同运算数据的输入和运算结果的输出数据监测,实现对被测 MCU ALU 运算功能的测试。

(8) 快速傅里叶变换(FFT)测试:功能监控 MCU 控制被测 MCU 的 UART 接口完成对被测 MCU 快速傅里叶变换运算结果的输出功能,实现对被测 MCU 运算功能的测试。

微处理器在执行任务过程中会同时调用运算单元、控制单元、存储单元以及输入输出等多个单元。当微处理器出现中子单粒子效应时,需要根据出错现象,结合正在执行的测试内容以及自动生成的日志等,共同判断单粒子效应发生的具体单元模块。如 ADC 模块测试时,微处理器接收到 ADC 测试指令后,依次检测每个 ADC 通道数模转换结果,并将检测结果通过 UART 接口传递给监控 MCU。当发现某个 ADC 通道数模转换结果总出错,则可判断为该 ADC 模块发生了单粒子效应;若辐照过程中 ADC 各通道数模转换结果全出错,且辐照停止后 ADC 测试正常,则单粒子效应发生在 UART 接口模块;若辐照过程中和辐照停止后,均检测到 ADC 转换结果错误,则发生单粒子效应的位置可能是微处理器内部程序存储器。

3) 上位机控制程序

上位机控制程序采用 LabVIEW 进行设计,主要实现人机交互界面、参数配置、测试初始化、测试程序管理及结果显示与保存等功能。

2 中子单粒子效应辐照试验验证

2.1 14 MeV 中子辐照试验条件

利用研制的中子单粒子效应测试系统,在中国工程物理研究院核物理与化学研究所的 NG-11 加速器中子源上进行辐照试验。该源利用氘氚核反应产生能量为 14 MeV 的中子,全空间中子注量率为 $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,辐照试验中被测子板固定于距源 16 cm 处,该位置中子注量率为 $3.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。子板中心法线指向中子源,由器件尺寸引起的辐照注量均匀性 $< 5\%$ 。中子单粒子效应辐照试验流程如图 3 所示,正常启动测试软件后,自动循环

执行微处理器测试序列,并开始中子辐照。测试过程中测试系统通过运行测试序列监测处理器状态,测试内容包括 Operator、FFT、ADC、UART、I²C、CAN、GPIO、片上 Flash 和片上 EEPROM。当测到处理器某一功能模块单元出现单粒子效应后,记录试验现象和对应的累积中子注量。

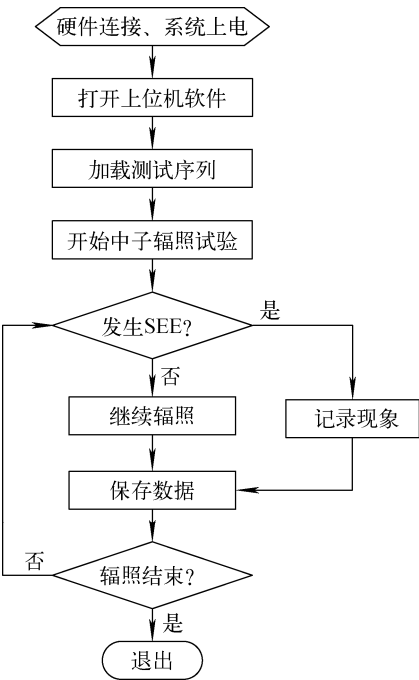


图3 中子单粒子效应辐照试验流程
Fig. 3 Experimental test flow
of neutron-induced single event effect

2.2 试验结果与分析

累积中子注量为 $3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的 14 MeV 中子辐照条件下,中子单粒子效应测试系统总共捕获到 23 次中子单粒子效应现象,发生单粒子效应的单元模块及次数列于表 1。I²C、ADC 和 FFT 等功能模块及内部 Flash 和 EEPROM 存储单元均出现中子单粒子效应,其中,I²C 出现单粒子效应的频率最高(9 次),属于中子辐射最敏感单元。

测试系统从上电后开始辐照,到出现第 1 个中子单粒子效应的最低中子注量为 $1.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。杨善潮等^[11]总结了大量中子辐照试验结果,发现西安反应堆脉冲工况下的静态随机存取存储器(SRAM)翻转效应与稳态工况

下相同,仍然是独立单粒子事件简单叠加造成的,反应堆实验条件下脉冲和稳态中子单粒子效应不存在效应机理层面的差异。因此,本试验观察到的辐射效应仍为中子单粒子效应,而不是位移损伤效应。试验结果表明,被测微处理器中 ALU 和 FFT 运算模块发生了单粒子效应后,未影响其他单元正常工作。这表示入射粒子大概率打在了被测微处理器内部逻辑运算单元中的寄存器,该寄存器数据出错只会影响单次计算的结果。

表 1 微处理器中子单粒子效应试验结果
Table 1 Detected single event
effect event in tested microprocessor

序号	出错模块	累积次数
1	I ² C	9
2	Flash	4
3	EEPROM	3
4	FFT	2
5	ADC	2
6	CAN	1
7	UART	1
8	Operator	1

图 4、5 分别为 I²C 功能模块单元出现单粒子效应的测试软件及器件工作电流变化曲线的截图。由图 4 可看出,测试系统循环执行测试序列到第 7 轮次时,前 4 路 I²C 测试结果为通过(PASS),第 5 路 I²C 测试结果为失败(FAIL),随后剩余 3 路测试测试结果也为失败。这表示第 5 路 I²C 在测试过程中发生了单粒子效应,并导致整个 I²C 模块功能失效。图 5 为软件捕获的器件发生单粒子效应时工作电流的变化,在单粒子效应发生时刻,器件工作电流从约 80 mA 下降至 65 mA 左右。由上述试验结果可知,1 路 I²C 测试序列出错,会导致后续其他路 I²C 测试出错,且会伴随有器件工作电流的局部下降现象。通过分析 TM4C1294NCPDT 型微处理器内部 I²C 的结构和工作原理可知,I²C 通过数据线(SDA)和时钟线(SCL)进行接口间、外部随机存储内存(RAM)和只读内存(ROM)等 I²C 通信器件间的双向数据传输。1 个 I²C 测试序列出错,后续其他 I²C 测试也会

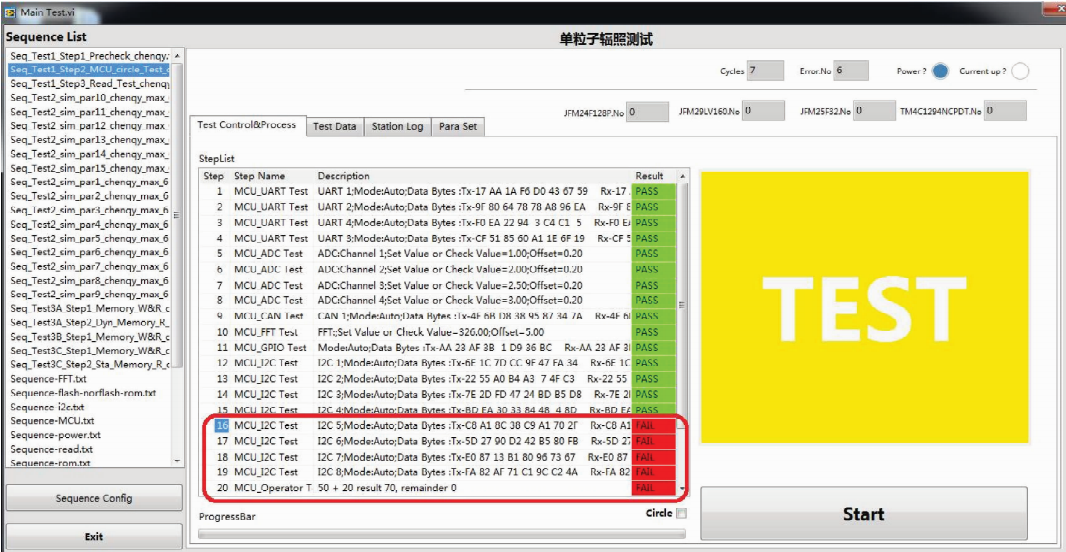


图 4 I²C 发生单粒子效应的测试软件截图

Fig. 4 Screenshot of testing software when single event effect occurs in I²C unit

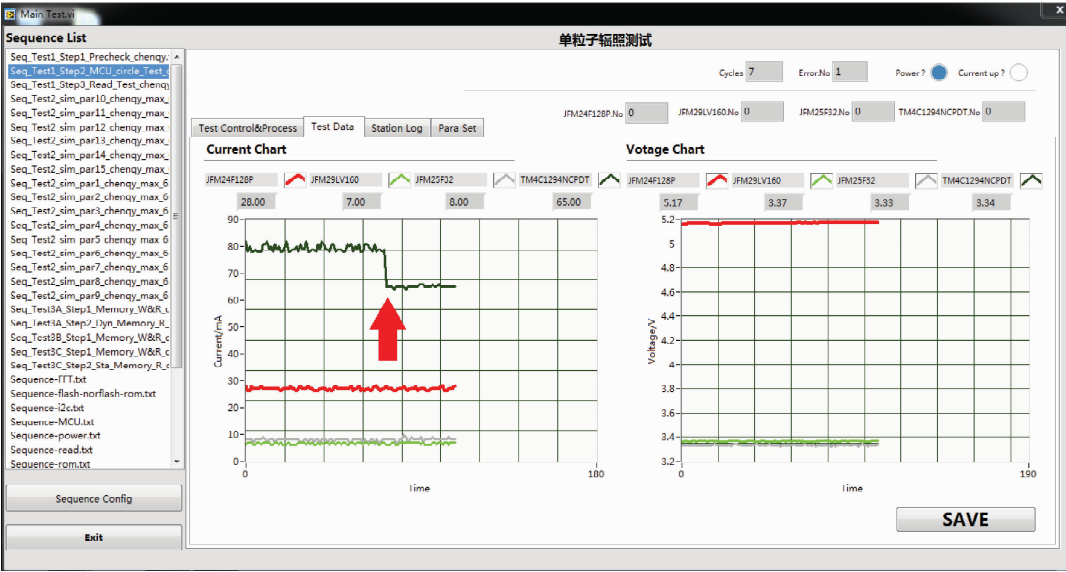


图 5 I²C 发生单粒子效应时处理器工作电流变化曲线

Fig. 5 Device working current change when single event effect occurs in I²C unit

出错,这说明发生单粒子效应的位置可能不在某一个通道上,而是 I²C 模块的功能控制单元。微处理器内部 I²C 模块包含数据缓存寄存器、状态控制寄存器和通道选择控制寄存器等,当入射粒子打在数据缓存寄存器或状态控制寄存器时,会使得 I²C 传输数据错误或功能失效,而在 I²C 功能失效的情况下,被测微处理器处于静止状态,会导致器件工作电流出现下降。

图 6 为微处理器内部 EEPROM 发生单粒

子效应时测试系统自动生成的日志,可看出,在整个存储单元内很多行与列同时发生了翻转,表现出爆发式错误的现象。这种出错模式与常规 SRAM 的单粒子表现形式不同,并没有表现出单位翻转、多位翻转或多单元翻转的特点,这与一些动态随机存取存储器(DRAM)的单粒子效应模式有点类似,说明发生单粒子效应的位置应为微处理器 EEPROM 外围的控制逻辑。

中子单粒子效应测试系统 - 数据本												
Item	Page	Address	Row No.	Data0	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Data6	Data7	Value
MCU_EEPROM	0	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	2	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86
MCU_EEPROM	2	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	4	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86
MCU_EEPROM	4	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	6	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	6	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86
MCU_EEPROM	8	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	8	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	10	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	10	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	12	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86
MCU_EEPROM	12	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	14	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	14	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	16	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	16	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	18	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	18	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86
MCU_EEPROM	20	0	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	85
MCU_EEPROM	20	4	4	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	86

图6 EEPROM发生单粒子效应时
测试系统自动生成的日志

Fig.6 Automatically generated single
event effect record for EEPROM

对于整个被测微处理器,器件的单粒子效应截面等于发生单粒子事件的次数除以总的累积中子注量。理论上,统计的单粒子事件数越多,截面计算值越准确。实际试验过程中,随着氘氚核反应对靶的消耗,加速器源提供的中子辐射场时间有限,只能进行有限轮次的测试试验。根据表1列出的试验结果,可算出微处理器单粒子效应截面 σ 为:

$$\sigma = \frac{23}{3.5 \times 10^{11}} \text{ cm}^2 = 6.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$$

根据试验结果可知,微处理器在14 MeV中子辐照条件下发生中子单粒子效应的截面约为 $6.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$,最敏感单元为F²C。需注意的是,微处理器的单粒子效应截面还与器件运行状态和程序占空比有关,程序占空比越高,越易发生单粒子效应^[15]。

3 结论

基于ARM架构的处理器设计了一款监测微处理器中子单粒子效应的测试系统。该测试系统可监测被测微处理器中Operator、FFT、ADC、UART、F²C、CAN、GPIO、片上Flash和片上EEPROM等功能单元或存储单元的工作状态是否正常,并检测器件工作电压电流随时间的变化。利用研制的单粒子效应测试系统在加速器14 MeV中子源上进行中子辐照验证试验。累积中子注量为 $3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 辐照条件下,测试系统监测检测到CMOS 65 nm工艺的TM4C1294NCPDT处理器共发生23次中子单粒子效应。F²C为敏感模块单元,共发生9次单粒子效应。通过辐照试验证明了测试系统的可靠性,

估算了TM4C1294NCPDT处理器的14 MeV中子单粒子效应截面约为 $6.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ 。

参考文献:

[1] KOMURA K, AHMED N K, EL-KAMEL A H, et al. Variation of environmental neutron flux with altitude and depth of both water and soil [J]. Nuclear Science and Techniques, 2004, 15 (4): 248-256.

[2] KOWATARI M, OHTA Y, SATOH S, et al. Evaluation of geomagnetic latitude dependence of the cosmic-ray induced environmental neutrons in Japan[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2007, 44(2): 114-120.

[3] 范辉,郭刚,沈东军,等. 14 MeV中子引发SRAM器件单粒子效应实验研究[J]. 原子能科学技术,2015,49(1):171-175.

FAN Hui, GUO Gang, SHEN Dongjun, et al. Experimental study on 14 MeV neutron induced single-event-effect in SRAMs[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(1): 171-175 (in Chinese).

[4] TABER A H, NORMAND E. Investigation and characterization of SEU effects and hardening strategies in avionics, 92-L75-020-2 [R]. [S. l.]: [s. n.], 1995.

[5] RAMOS P, VARGAS V, BAYLAC M, et al. Evaluating the SEE sensitivity of a 45 nm SOI multi-core processor due to 14 MeV neutrons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63 (4): 2 193-2 200.

[6] FLAMENT O, BAGGIO J, DHOSE C, et al. 14 MeV neutron-induced SEU in SRAM devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(5): 2 908-2 911.

[7] DODD P E, SHANEYFELT M R, HORN K M, et al. SEU-sensitive volumes in bulk and SOI SRAMs from first-principles calculations and experiments[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1 893-1 903.

[8] AZAMBUJA J R, NAZAR G, RECH P, et al. Evaluating neutron induced SEE in SRAM-based FPGA protected by hardware- and software-based fault tolerant techniques[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4 243-4 250.

[9] 张振力,张振龙,韩建伟,等. 临近空间大气中子

- 诱发电子器件单粒子翻转模拟研究[J]. 空间科学学报, 2011, 31(3): 350-354.
- ZHANG Zhenli, ZHANG Zhenlong, HAN Jianwei, et al. Simulation study on single event upset induced by near space atmospheric neutron in electronic devices[J]. Chinese Journal of Space Sciences, 2011, 31(3): 350-354(in Chinese).
- [10] 马英起. 单粒子效应的脉冲激光试验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.
- [11] 杨善潮, 齐超, 刘岩, 等. 中子单粒子效应研究现状及进展[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 110201.
- YANG Shanchao, QI Chao, LIU Yan, et al. Review of neutron induced single event effects on semiconductor devices[J]. High Power Laser and Particle beams, 2015, 27(11): 110201(in Chinese).
- [12] 张付强, 郭刚, 刘建成, 等. 中国原子能科学研究院 100 MeV 质子单粒子效应辐照装置试验能力研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(11): 2 101-2 105.
- ZHANG Fuqiang, GUO Gang, LIU Jiancheng, et al. Study on experimental ability of 100 MeV proton single event effect test facility in China Institute of Atomic Energy[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(11): 2 101-2 105 (in Chinese).
- [13] 郭红霞, 罗尹虹, 姚志斌, 等. 亚微米特征工艺尺寸静态随机存储器单粒子效应实验研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(12): 1 498-1 504.
- GUO Hongxia, LUO Yinhong, YAO Zhibin, et al. Experimental research of SEU and SEL in high density SRAMs with sub-micro feature sizes [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(12): 1 498-1 504(in Chinese).
- [14] 郑宏超, 岳素格, 董攀, 等. 微处理器高低速模式下的单粒子功能错误分析[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(7): 18-21.
- ZHENG Hongchao, YUE Suge, DONG Pan, et al. The single event function error analysis of CPU in high/low speed modes[J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(7): 18-21 (in Chinese).
- [15] 高洁, 李强. 星用微处理器在轨单粒子翻转率预估方法研究[J]. 核技术, 2012, 35(3): 201-205.
- GAO Jie, LI Qiang. An SEU rate prediction method for microprocessors of space applications [J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(3): 201-205 (in Chinese).