

一种用于评估抗辐射 DSP 单粒子翻转的试验方法

王月玲¹, 薛海卫¹, 郭 刚², 雷志军¹, 史淑廷², 刘建成²

(1 中国电子科技集团公司 第五十八研究所, 江苏 无锡 214035;

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 本文提出了评估 DSP 电路单粒子翻转效应的试验方法, 该方法包含单独静态检测 SRAM、通过 CPU 读取内部寄存器和功能检测等三种方式. 根据该方法, 设计了 DSP 电路的单粒子翻转检测软件系统和硬件检测系统, 并在 HI-13 串行重离子加速器上进行了单粒子翻转验证试验, 获得了待测 DSP 器件的地面模拟翻转率数据. 利用在轨错误率计算软件, 计算出在标准辐照注量($1.0\text{E}+7$ icons/ cm^2)下电路的 SEU 在轨软错误率约为 $1.8\text{E}-12$ 错误/位天(GEO, 等效 3 mm Al 屏蔽), 运用该方法可以较好的评估 DSP 电路的单粒子翻转性能.

关键词: 单粒子翻转; 试验方法; 抗辐射加固; DSP

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)10-0053-05

An Experimental Method for Evaluating the SEU of Radiation-Hardened DSP

WANG Yue-ling¹, XUE Hai-wei¹, GUO gang², LEI Zhi-jun¹,
SHI Shu-ting², LIU Jian-cheng²

(1 The 58th Institute of China Electronics Technology Group Corp., Wuxi 214035, China;

2 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: This paper presents a new experimental method to evaluate the SEU performance of radiation-hardened DSP. The method includes three ways of solely detecting SRAM, detecting regs by CPU and function-detecting. Software and hardware detection systems are designed by the method, and SEU experimental test was done on HI-13 heavy-ion accelerator. The results show that the error rate of DSP is about $1.8\text{E}-12$ error/bit · day(GEO) under irradiation dose of $1.0\text{E}+7$ icons/ cm^2 , which means the experimental method can be used for well evaluating the SEU performance of DSP.

Key words: SEU; experimental method; radiation-hardened; DSP

1 引言

随着科技的进步和宇航事业的发展, 航天系统的电子化、智能化、小型化水平不断提高, 进行数字信号处理与控制的通用 DSP 芯片, 作为航天电子系统的核心器件, 被广泛应用于航天飞行器的信号处理、数控系统、运动控制等领域. 飞行器在轨运行过程中, DSP 芯片不仅要稳定可靠地进行运算和控制任务, 而且要能够适应空间复杂的辐射环境. 因此研制性能优异、抗辐射能力强的 DSP 芯片是满足航天

器信号处理的关键之一.

空间中充满了来自宇宙的各种粒子: 电子、中子、质子、 α 粒子、 γ 射线、重离子等, 这些粒子会引起器件的辐射效应, 包括单粒子效应、总剂量效应及位移损伤效应. 在这些辐射效应中, 对大规模复杂 DSP 器件功能性能影响最大的是单粒子效应. 单粒子效应包括单粒子翻转、单粒子门锁、单粒子瞬态、单粒子功能中断等. 在卫星、空间站等航天器中多次发现电子器件的单粒子翻转事件, 造成数据传送中断、卫星状态异常, 影响空间飞行任务的完成, 由单

粒子翻转导致的航天器功能故障成为故障的一个主要原因。因 DSP 器件中包含大量的存储器、触发器等存储结构, DSP 器件在运行过程中要执行指令运算、与不同的外部器件执行各种通信、控制等功能, 故 DSP 器件更容易引起单粒子翻转, 严重的情况, 可以造成整个航天器系统指令执行出错、通信异常。因此研究 DSP 等核心电子器件的单粒子翻转效应及评估试验方法对保证航天器在轨正常运行具有重要的意义。

本文基于研制的一款抗辐射加固 DSP 芯片, 针对 DSP 中的单粒子翻转薄弱环节及可能引起的功能失效现象, 给出一种评估单粒子翻转效应的试验方法, 包括片内 SRAM 的评价方法、片内寄存器的评价方法和电路功能的评价方法三个方面。通过重离子加速器模拟试验, 获得该抗辐射 DSP 的单粒子翻转试验结果, 对 SEU 试验结果进行了单粒子饱和截面、阈值和在轨错误率等单粒子指标的分析。

2 单粒子翻转效应与 DSP 结构

单粒子效应是由单个高能粒子淀积到器件时所产生的辐射效应, 空间辐射环境存在大量的带电或不带电的粒子, 当空间中带有一定能量的电子、重离子、 α 粒子、质子以及中子入射到电子器件时, 会在器件的入射径迹上产生大量的电子空穴对, 如果这些电子空穴对产生在有源区, 在电场的作用下形成短暂的电流, 从而出现脉冲电流, 这些脉冲电流持续时间为几百皮秒到几纳秒, 或引起存储逻辑状态的改变, 或激发电路中寄生的双极效应, 从而使电路出现错误甚至烧毁电路, 这就是单粒子效应产生的基本过程。

单粒子翻转表现为存储单元(寄存器、SRAM 等)的逻辑翻转, 单粒子翻转的关键参数是节点的临界电荷, 根据不同的工艺尺寸和设计规则确定。器件尺寸越小, 临界电荷越少, 使硅器件翻转的临界能力越低, 器件也越容易发生单粒子翻转, 单粒子翻转产生的软错误影响器件的功能正常执行, 因此要尽量降低航天器电子元器件的在轨软错误率。

本文用于单粒子翻转率评估的待测 DSP 芯片包含 32 位内核、大容量 SRAM, 外设包含 EV、SPI、SCI、CAN、McBSP 等通信接口。该 DSP 片内采用哈佛总线结构, 8 级流水线操作, 集成度达数百万门。该电路经过抗辐射加固设计技术, 通过前端功能设计和后端物理设计实现。该电路端口电压为 3.3 V, 内核电压为 1.8 V, 采用抗辐射 0.18 μm CMOS 工

艺流片。该 DSP 电路集成度和复杂度较高, 包含复杂的运算及指令译码逻辑、大容量 SRAM 及寄存器、多种通信接口, 用于单粒子翻转评估实验具有一定的代表性。

3 单粒子翻转试验方法

目前为止, DSP 器件的单粒子翻转评估试验方法国内外没有统一的标准, 国外主要针对 DSP SMJ320C6701 器件开展了单粒子效应试验, R. Joshi 等人通过测试各个模块功能来评估 SMJ320C6701 的单粒子翻转: 在辐照过程中运行测试向量, 通过计算测试中的功能出错次数作为单粒子错误; 片内 SRAM 采用存储器内建自测试(MBIST)的方法来评估。每次运行测试程序都要对待测电路进行重新编程, 当发生单粒子错误时, 测试中断并记录此时的翻转数及总剂量。该测试方法的局限性: 不能把单粒子功能中断与单粒子翻转区分开来, BIST 算法比较适用于测试 SRAM 制作过程中的缺陷, 因 BIST 逻辑本身的翻转导致评估的 SRAM 翻转率会存在误差, 通过 BIST 的方法评估 SRAM 翻转率是不太理想。D. M. Hiemstra 等人通过测试功能模块及片内 SRAM 来评价 32 位浮点 DSP SMJ320C6701 的质子单粒子辐射效应, 与 R. Joshi 等人评估方法不同的是其片内 SRAM 采用动态、静态四种不同方法通过写入固定值来检测质子单粒子翻转效应的, 静态检测方法下 SRAM 的翻转率最高。

3.1 试验方法与流程

为全面评价抗辐射 DSP 电路的抗单粒子翻转能力, 单粒子翻转检测方法包含电路的片内可寻址寄存器检测、片内 SRAM 检测及电路功能检测三部分。待测 DSP 芯片的单粒子翻转检测流程如图 1 所示。

对于寄存器、存储器而言, 静态检测方法最能直观反映单粒子翻转率, 且是最恶劣的。待测芯片的可寻址寄存器、片内 SRAM 存储体的翻转可以通过写入固定值, 在辐照实验过程中读取比对实现。为减少 CPU 对 RAM 测试的影响, 检测系统通过直接访问 SRAM 方式单独对 SRAM 测试。

对待测芯片所有可寻址 SRAM 的单粒子翻转检测流程如下: 在辐照前, 使待测电路处于测试模式, 通过 FPGA 在待测电路端口上加地址、使能、时钟、读写信号, 直接对片内 SRAM 进行初始化, 开始离子照射时, 按地址不断循环读取片内 SRAM 数

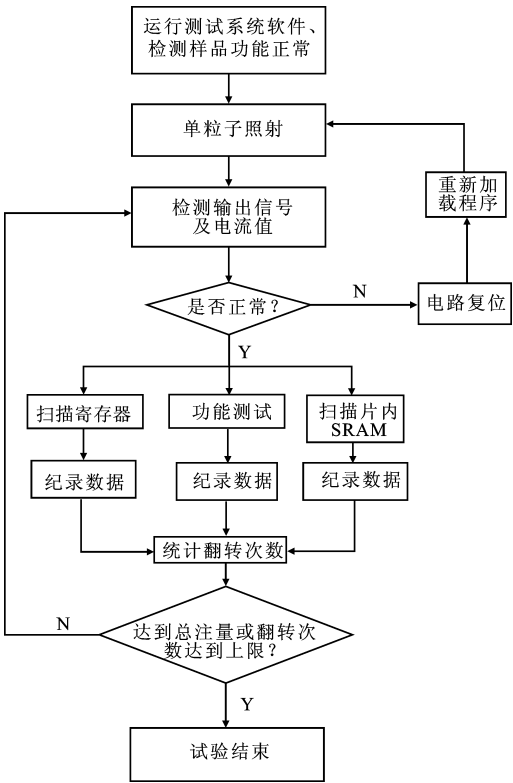


图 1 单粒子试验流程示意图

据,使 SRAM 的地址覆盖率达到 100%. 为避免由毛刺引发的误判,连续三次读取 SRAM 的值并进行判断,两次读取一致的值作为本次的读取结果. 并与保存在片外 SRAM 中的正确值比较后得出翻转位数,反馈给上位机. 当前比较结束后,用本次读取的值刷新片外 SRAM 上次保存的值,当再次读取该地址时,可以避免翻转的重复计数.

对待测芯片所有可寻址寄存器的单粒子翻转检测流程如下:对所有寄存器进行初始化配置固定值;配置结束开始循环读取,将读取的结果通过 XINTF 发送给主控 DSP;主控 DSP 开始对比数据;统计翻转位数,并将统计结果发送给上位机,片内可寻址寄存器的比较判决准则与片内 SRAM 的方法一致. DSP 内部不可寻址寄存器的单粒子翻转效应可以通过功能传递影响到可寻址的寄存器,所以该部分的翻转通过可寻址寄存器来表征. 片内 SRAM 与寄存器的检测流程如图 2 所示.

电路中不可见寄存器的单粒子翻转可以传递到可见的寄存器或者直接引起单粒子功能中断两种情况,因此检测待测 DSP 电路的功能中断也可以间接反映该 DSP 中不可见寄存器的单粒子翻转情况, DSP 的功能主要包括内核和外设功能,其中内核功能主要通过如下几个方式实现:算术逻辑运算部分

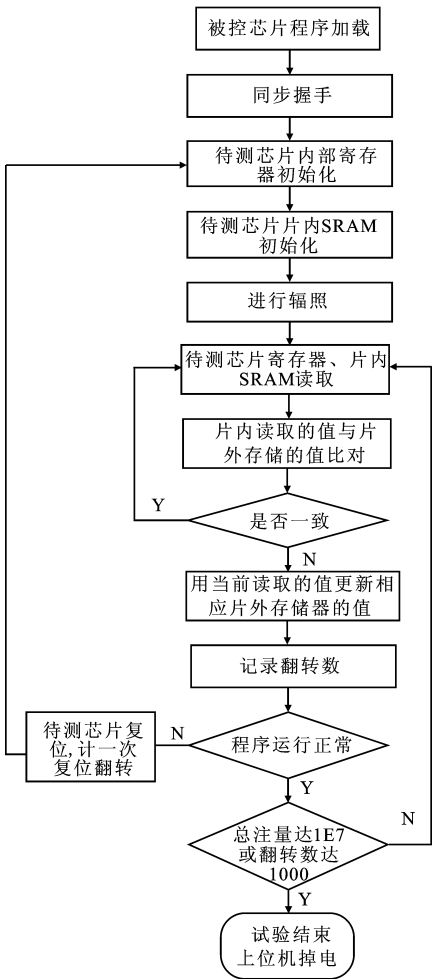


图 2 片内 SRAM、寄存器检测流程图

通过运行乘加运算、移位、逻辑与或非等运算指令,得到的结果与理想值比较从而确定翻转的位数;程序控制与状态部分通过运行监控 PC 指针、执行堆栈操作、执行 CPU 中断使能禁止、监控 ST 状态寄存器等指令方式实现.

SCI、SPI、CAN 等外设串口通过配置固定的波特率及数据,自收自发,通过发送数据和接收数据的比对,判断该外设功能是否产生单粒子翻转. 当外设的配置寄存器产生单粒子翻转时,发送接收功能会产生出错,这时可以认为该外设模块由于单粒子翻转而引起了功能中断,需要重新配置外设寄存器,以保证串口的正常收发. 当辐照情况下, DSP 运行特定的功能码跑飞时,可以认为电路的状态机因单粒子翻转产生了一次系统性的错误,电路需重新复位启动运行检测功能程序.

3.2 实验装置

单粒子翻转试验采用重离子地面模拟的方式,

翻转引起的功能中断现象.

(4)该器件在 F 离子下无翻转,在 Cl 离子下的平均翻转截面约为 $1.79\text{E-}06\text{ cm}^2/\text{器件}$,在 Ti 离子下的平均翻转截面约为 $4.68\text{E-}06\text{ cm}^2/\text{器件}$,在 Ge 离子下的平均翻转截面约为 $8.7\text{E-}06\text{ cm}^2/\text{器件}$,在 I 离子下的平均翻转截面约为 $2.84\text{E-}05\text{ cm}^2/\text{器件}$.

利用在轨错误率计算软件 Space Radiation 7.0,可以获得该 DSP 芯片的 SEU 饱和截面和单粒子在轨错误率(GEO 轨道,等效 Al 3mm 屏蔽)约为 $1.82\text{E-}12\text{ 错误/位}\cdot\text{天}$,表明基于 RHBD 设计的 DSP 具有较好的抗 SEU 性能.

4 结束语

本文论述了针对复杂 DSP 电路采用的单粒子翻转试验方法,不仅包含静态条件下单独检测 SRAM、通过 CPU 读取内部寄存器两种方式,还包含了运行功能检测的方法.与国外检测 DSP 电路翻转率的功能检测法相比,本文论述的方法具有全面、准确的特点.根据该方法,设计了 DSP 电路的单粒子翻转检测软件和硬件试验板,并在重离子加速器上进行了单粒子验证试验.结果表明,通过该方法可以较好的评估 DSP 电路的单粒子翻转性能,为评估宇航用处理器类复杂电路的单粒子翻转能力提供了一种参考的试验方法.

参考文献:

[1] Joshi R, Daniels R. Radiation hardness evaluation of a class v 32 bit floating-point digital signal processor[J].

IEEE NSREC, Seattle, WA, USA ,2005:70-78 DOI: 10.1109/REDW.2005.1532669.

[2] David M Hiemstra, Bojan Miladinovic. Single event upset characterization of the SMJ320C6701 digital signal processor using proton irradiation [J]. Radiation Effects Data Workshop, 2009(113) :133-135.

[3] 王浩. DSP 辐射效应分析及测试方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学,2013.

[4] 王良江,韩留军. 1553B 总线器件单粒子效应实验系统设计[J]. 计算机测量与控制. 2013, 21(3):753-755.

[5] 郑宏超,岳素格. 一种用于 ASIC 内部存储器单粒子翻转效应评估的方法[J]. 微电子学与计算机,2017, 34(10):22-25.

[6] 何益百. 辐射效应地面试验技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.

[7] 江桂芳,张大宇. 一种 DSP 器件单粒子翻转效应检测方法 [P]. 西安空间无线电技术研究所, CN103440185A,2013.

作者简介:

王月玲 女,(1974-),高级工程师. 研究方向为 DSP 电路设计和验证技术.

薛海卫(通讯作者) 男,(1978-),硕士,高级工程师. 研究方向为 DSP 电路设计、抗辐射加固设计和验证技术.

E-mail: xue_hw@163. com.

郭 刚 男,(1966-),博士,研究员. 研究方向为核物理、辐射物理.

雷志军 男,(1989-),硕士,工程师. 研究方向为辐照试验与验证技术.