DSP 大气中子单粒子效应试验研究

陈冬梅*，孙旭朋，钟征宇，封国强，白桦，阳辉，底桐
北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司，北京 100089

摘　要：利用 14MeV 快中子辐照源，开展了数字信号处理器（DSP）大气中子单粒子效应地面模拟试验研究。设计了地面模拟的试验方法，包括单粒子效应监测方法、试验系统布局、试验程序及其判据等。获得了 SMJ320F2812、SMJ320C6415、TMS320C6416、TMS320C6418 等多款型号 DSP 器件的中子单粒子效应的翻转错误数试验数据，分析计算得到 14MeV 中子辐照源下的敏感截面。结果显示，DSP 器件的主要敏感现象为单粒子翻转（SEU），部分器件还发生了单粒子功能中断效应（SEFI）。相同工艺的被测 DSP 器件的中子单粒子效应敏感截面具有相同的数量级，验证了本文使用的地面模拟试验方法的可行性，为航空电子设备的可靠性与安全性评估提供了大气中子单粒子效应的器件级基础数据。

关键词：数字信号处理器；大气中子；单粒子翻转；敏感截面；单粒子功能中断

中图分类号：V21　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.02.067

大气中子是银河宇宙射线与大气层中的原子核（氮 / 氧）之间的核散裂反应造成的核级联簇射而产生的一种不带电粒子。在大气层中的能量范围为 0~10GeV，其中大于 10MeV 的中子所占的比例约为 27%。在高度 12.2km、北纬 45° 位置，能量 10MeV 以上的大气中子注量可以达到 6000n/cm^{2}h[1]，中子在大气层中的具体分布受到海拔高度、纬度、太阳活动等因素的影响。

航空用电子器件（如 FPGA、SRAM[2]、DRAM[3,4]、DSP 等）在大气中子辐射环境下会发生辐射效应。已有的研究表明[1]，大气中子单粒子效应（SEE）对航空电子器件的影响最为严重，总剂量效应和位移损伤效应的影响可以忽略不计。自 20 世纪 90 年代初以来，中子已被证实是导致飞机中存储器与其他半导体微电子器件产生 SEE 的主要贡献粒子[5,6]。常见的 SEE 有：单粒子翻转（SEU）、单粒子多位翻转（MBU）、单粒子瞬态（SET）、单粒子锁定（SEL）、单粒子功能中断（SEFI）、单粒子烧毁（SEB）、单粒子栅穿（SEGR）和单粒子硬错误（SHE）等[1]。

随着高集成度电子元器件的大量应用，单粒子效应的种类和发生频次也在不断增加，可导致航空电子设备出现死机、复位、重启、数据丢失等故障，最终导致航空电子系统出现功能丧失（Loss of Function）或虚警现象（HMI），严重影响飞机安全等级[7]。因此，大气中子单粒子效应已经成为影响飞机安全性与可靠性的重要因素[8]。鉴于此，美国波音[9,10]、欧洲空客[11] 等公司在航空电子设备标准中增加了大气中子诱发航空电子设备单粒子效应率的评价要求，将试验评价要求具体纳入了工程化标准[12] 和适航认证要求[13,14]。国内针对大气中子单粒子效应已经开展了试验评价和防护设计研究[15,16]，利用反应堆中子和 14MeV 中子源开展了 SRAM 存储器单粒子效应试验研究[17,18]。

由于飞机导航系统、通信系统、雷达探测系统、数据处理系统、显示控制系统等重要航空电子系统中均大量使用 DSP 器件，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室针对得州仪器（TI）公司研制的部分型号 DSP 器件，使用散裂中子源进行了中子单粒子效应试验研究[19,20]。因此，广泛应用于航空电子设备且对大气中子单粒子效应敏感的 DSP 器件，迫切需要评估其在大气中子辐射环境下的敏感特性。

本文以 TI 公司研制的 DSP 为研究对象，采用 14MeV 中子辐照源开展 DSP 大气中子单粒子效应的地面模拟试验研究，获得多个不同型号 DSP 器件的单粒子效应敏感截面，结合典型大气中子环境，分析计算出单粒子效应发生率，获得的试验数据可为航空电子设备的可靠性和安全性评估提供基础数据。

收稿日期：2017-11-06；　退修日期：2017-12-06；　录用日期：2018-01-04
* 通信作者 . Tel.：010-58830061　E-mail：chendm@stea.cn
引用格式：Chen Dongmei, Sun Xupeng, Zhong Zhengyu, et al. Experimental investigation of DSP single event effect caused by atmospheric neutron [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018,29 (02): 67-72. 陈冬梅，孙旭朋，钟征宇，等 . DSP 大气中子单粒子效应试验研究 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (02): 67-72.

1 试验设计

1.1 试验对象

本文所选用的试验对象为 TI 公司生产的 5 款不同型号的 DSP，器件基本信息如表 1 所示。

DSP 硬件结构主要包含：CPU 内核、寄存器组、内部存储器（RAM/ROM）和片内接口电路等，部分高性能 DSP 还具有两级缓存器（Cache）。如图 1 所示为 TI 公司 TMS320C6416 型 DSP 的典型结构功能框图，该系列器件采用 COMS 90nm 加工工艺制造。其中，内部 RAM 和 Cache 缓存器是对单粒子效应最敏感的部分，也是本文重点研究与监测的区域。

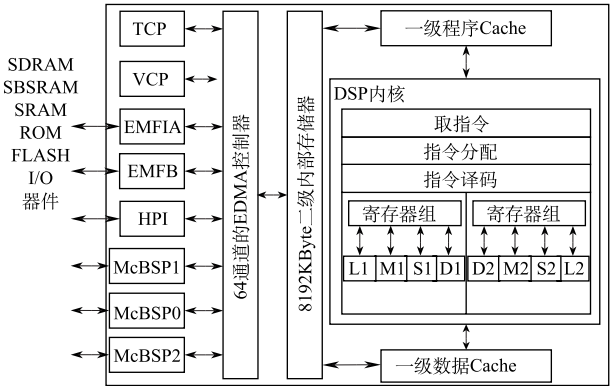

图 1 TMS320C6816 型 DSP 硬件结构

Fig.1 Hardware structure of DSP TMS320C6816

此外，不同 DSP 器件能够监测的内部存储单元容量和区域是不同的。其中，TMS320F2812 和 SMJ320F2812 内部具有 5 块 RAM 存储单元，可以分别独立读写程序和数据，其容量总和为 288Kbit。TMS320VC5410 内部具有 1Mbit 的 RAM 存储单元，包括 8 个独立的 8K×16bit 程序 / 数据存储单元。TMS320C6418 内部包括 64 个 32bit 通用寄存器、128Kbit 的 L1 程序缓存、128 Kbit 的 L1 数据缓存和 4Mbit 的 L2 缓存，通用寄存器和 L1 缓存由于在 DSP 运行时会随程序动态变化，因此测试时只能监测 L2 缓存的单粒子翻转效应。TMS320C6416 内部存储单元的组成结构与 TMS320C6418 相同，只能监测 8Mbit 的 L2 缓存。

表 1 器件参数信息

Table 1 Information of device parameters

序号	型号	工艺尺寸 /nm	内部存储位数 /Kbit	监测存储位数 /Kbit	引脚 / 内核电压 /V
1	TMS320F2812	180	288	288	3.3/1.8
2	SMJ320F2812	180	288	288	3.3/1.8
3	TMS320VC5410	130	1024	1024	3.3/1.5
4	TMS320C6418	130	4354	4096	3.3/1.4
5	TMS320C6416	90	8450	8192	3.3/1.2

1.2 试验源与条件

IEC62396-2[12] 规定可用于辐照试验的中子源有：散裂中子源、准单能中子源、单能 14MeV 中子源。其中，散裂中子源最接近于大气中子能谱，与大气中子产生机理相同，可以较好地模拟大气中子辐射环境。本文所用的 14MeV 中子辐照源是由高压倍加速器产生的高能中子，参考文献[21]和参考文献 [22] 研究表明，近年来器件在散裂中子源和单能 14MeV 中子源下产生的单粒子截面呈现出逐渐接近的趋势，完全可用于地面辐照试验。

试验在标准大气条件下开展，保持室温在 15~35℃ 范围内，相对湿度在 20%~80% 范围内。

整个 DSP 器件的中子辐照非均匀度小于 10%。为保证能获得具有统计意义的足够单粒子效应事件数，一般试验中出现的错误数大于 100 个时即终止辐照试验。考虑到单粒子效应是瞬态随机效应而不是累积效应，在不引入累积效应之前，在中子通量达到 10^9n/cm^2 时同样终止辐照试验。中子注量率不是试验严酷程度的度量，试验中注量率应调整到使得每次回读错误数不超过监测总位数的 1%，因此，本文试验中注量率设定在 10^3~10^4n/cm^2。

1.3 SEU 监测方法

监测方法的原理是通过对比被测 DSP 器件内部存储单元，在中子辐照前后的状态的变化来统计 SEU 的错误数。

单粒子效应监测有动态和静态两种方法，考虑到 JTAG 接口回读数据的非实时性，本文采用的是静态监测方法，辐照前向内部存储单元写入 0x55。在中子辐照后，回读 DSP 内部存储单元的状态，回读数据与辐照前的数据相比较并统计错误的比特位数。

1.4 试验系统布局

试验系统主要由 14MeV 中子加速器、铝屏蔽板、受试电路板、供电电源、信号及供电电缆、监测和控制设备等组成。

试验现场包括辐照间和测试间两个区域，中子加速器、铝屏蔽板和辐照电路板放置在辐照间，该区域具备隔离作用，防止中子辐射对测试设备与测试人员造成危害。供电电源、监测和控制设备放置于测试间，测试人员在测试间通过控制设备控制整个试验流程，辐照间和测试间通过电缆连接。

考虑到 14MeV 中子加速器产生中子的特性是中子从中心位置以球面的形式向外辐射，注量率随辐射距离的平方成反比。受试电路板通常有几个被测器件，由于距离中子源的

距离有差异，必然会遭受到不同的中子辐射注量率。因此，为尽量将同一电路板上不同被测器件受到的注量率控制在误差允许范围内，依据 RTCA/DO-160[23] 规范的要求进行辐照间内的布局，如图 2 所示，遵守以下规则：

（1）受试电路板所摆放平面的几何中心与中子源靶心的连线保持垂直。

（2）受试电路板的几何中心距离中子源靶心需要保持至少 80cm 的距离，保证所接受的中子注量处于较为均匀的水平。

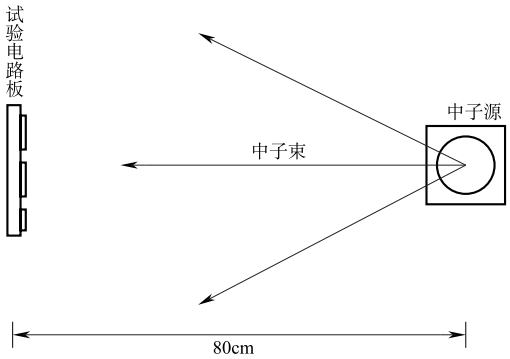

图 2　辐照间试验系统布局示意图
Fig.2　Testing architectural layout schematic in irradiation room

2 试验实施

2.1 试验程序

按照试验设计的各项条件，对试验系统开展详细的搭建工作，以及按照辐照条件对受试电路板进行实际的中子辐照等，具体实施流程如图 3 所示。

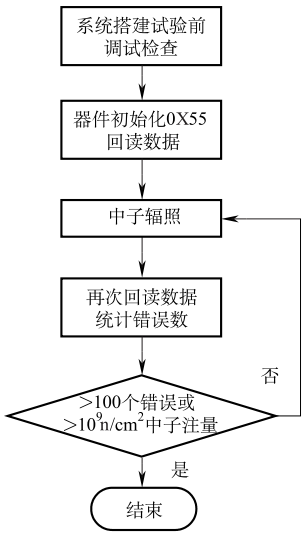

图 3　试验流程图
Fig.3　Eesting flow diagram

（1）系统搭建

按照布置规则固定受试电路板位置、连接电路板及测试设备；将电路板、中子注量监测仪固定在支架上，应保证试验装置与试验支架的移动一致性。确保入射中子辐照到被试器件的敏感表面，调整试验件与束流夹角，满足试验设计的要求。

（2）试验前调试检查

加载 DSP 测试程序、调节初始中子注量率；进行 DSP 器件初始化，写入配置文件对器件进行配置；回读并保存回读文件；记录工作电压和功耗电流。

（3）中子辐照

对调试无误的受试电路板进行中子辐照，辐照过程中通过 JTAG 接口回读 DSP 器件内部存储单元状态，进行比对统计错误数。同时，进行处理分析并记录出现的现象及中子注量。

辐照中监测被测器件的电流变化，确认是否会出现单粒子闩锁现象。

（4）辐照终止

当错误数达到 100 个时停止辐照，如果没有 100 个错误，则重复（2）、（3）步骤，直到注量达到 10^9n/cm^2 时停止辐照。

如果受试电路板出现故障现象，必要时需要及时暂停辐照，进行故障处理分析与记录；器件断电重启，重复（2）、（3）步骤，直至符合终止条件。

（5）数据处理

依据 2.2 节公式进行数据处理，计算所试 DSP 器件在 14MeV 中子源下 SEE 故障敏感截面 $\sigma_{14\mathrm{MeV}}$。

2.2 敏感截面计算方法

DSP 器件存储位的中子单粒子效应敏感截面计算公式如下所示：

$$\sigma_{14\mathrm{MeV}} = \frac{N}{F \times N_S} \tag{1}$$

式中：$\sigma_{14\mathrm{MeV}}$ 为采用 14MeV 单能中子源开展试验获得的 DSP 大气中子单粒子翻转敏感截面，单位为 cm^2/bit；N 为试验中监测记录到的 DSP 单粒子翻转数，单位为次；F 为 DSP 器件在 14MeV 单能中子源辐照下实际累计注量，单位为 n/cm^2；N_S 为试验中实际监测的 DSP 内部存储单元的比特位数，单位为 bit。

2.3 试验数据

按照 2.1 节的步骤与程序开展试验，结果显示所有的

被测 DSP 器件均发生了单粒子翻转，而 TMS320F2812 和 SMJ320F2812 型 DSP 出现了单粒子功能中断。试验中记录的实际监测的存储单元位数、中子注量、故障次数结果见表 2。按照 2.2 节敏感截面计算公式，带入记录结果可以获得实际注量条件下的敏感截面，计算结果详见表 2。

考虑到 SEL 的影响，在试验过程中还对器件的电流进行监测。在所有用例的测试过程当中均无电流增大现象发生，没有 SEL 效应发生。

表 2 中的器件 SEU 截面数据是在各个被测 DSP 位翻转数据的基础上，乘以各个 DSP 内部的存储位数得到的数据，其中 TMS320C6418 和 TMS320C6416 两款器件的存储位数与监测位数的差异见表 1。

表 2 DSP 中子试验数据

Table 2 Neutron testing results of DSP

序号	故障现象	注量 / (n/cm^2)	故障次数	截面 / (cm^2/bit)	截面 / (cm^2/device)
1	SEU	1.09×10^9	17	5.41×10^{-14}	1.56×10^{-8}
	SEFI	1.22×10^9	1	—	8.19×10^{-10}
2	SEU	1.15×10^9	14	4.24×10^{-14}	1.22×10^{-8}
	SEFI	1.12×10^9	2	—	1.78×10^{-9}
3	SEU	1.10×10^9	40	3.64×10^{-14}	3.73×10^{-8}
4	SEU	1.57×10^9	104	1.66×10^{-14}	7.23×10^{-8}
5	SEU	4.41×10^8	110	3.12×10^{-14}	2.64×10^{-7}

3 数据分析

3.1 截面数据分析

由表 2 中的试验结果可知，相同工艺器件的截面数据接近，但是对于 90nm 工艺的 DSP 由于其片上存储单元数量较大。虽然与其他器件具有一个数量级的位翻转截面，但单个器件的 SEU 截面数据要高于其他器件一个数量级。

DSP 发生 SEFI 现象与器件的 JTAG 接口有关，试验中仅有 TMS320F2812 和 SMJ320F2812 型 DSP 出现需要复位或重启动才能恢复正常的故障，其故障发生的器件截面数据在 8.19×10^{-10}~1.78×10^{-9}cm^2/device 之间。与参考文献 [20] 中 DSP 发生 SEFI 的器件截面数据接近。

通过试验 5 款 DSP 器件的 SEU 和 SEFI 的截面数据，并与参考文献中 DSP 试验数据进行比对，可以验证本文采用的 14MeV 中子辐照试验方法的可行性，获得的试验数据可以用于后续的航空任务器件和设备 SEE 率的分析计算。

3.2 器件 SEE 率分析计算

对于大气中子单粒子翻转率的计算，引用 IEC 62396-1 标准[1] 的器件 SEE 率计算公式：

$$\lambda = \sigma \times f \tag{2}$$

式中：λ 为大气中子单粒子效应引起的单个器件失效率，单位为 device^{-1}h^{-1}；σ 为器件单粒子效应截面，单位为 cm^2/device，可以为 SEU 和 SEFI 的截面。f 为任务环境下诱发航空电子设备相应 SEE 故障的大气中子注量率，单位为 n/ (cm^2·h)。

具体在应用试验数据进行 SEE 率计算时，需要考虑到散裂中子源和单能中子源的差异。其中，散裂中子源能谱与大气中子能谱接近，获得的截面 σ 涵盖了低能和高能中子的辐照数据，对应的大气中子注量率 f 应当选用某飞行高度和纬度的大气中子微分能谱的积分。而 14MeV 单能中子源获得的截面 σ 仅涵盖了高能中子的辐照数据，此时 f 的取值需要考虑被测器件在低能中子辐照下发生 SEE 的情况，避免直接选用大气中子积分能谱造成 SEE 率的高估。

本文在计算 SEE 率时参照 IEC62396-1 标准，选用飞行高度 12.2km 和北纬 45° 的大气中子环境。针对本文获得的 14MeV 单能中子截面，在计算 SEE 率时对应中子注量率 f 的取值，可参考上述标准的规定，依据不同工艺尺寸器件的中子阈值能量，对 f 进行修正，得到的数据见表 3。

表 3 被测器件 SEE 率

Table 3 SEE rate of DUT

序号	故障现象	阈值能量 / MeV	中子注量率 / (cm^{2}h)	SEE 率 (dev^{-1}h^{-1})	平均错误间隔时 /h
1	SEU	3	7700	1.20×10^{-4}	8325
	SEFI			6.31×10^{-6}	158572
2	SEU	3	7700	9.39×10^{-5}	10645
	SEFI			1.37×10^{-5}	72961
3	SEU	1	9200	3.43×10^{-4}	2914
4	SEU	1	9200	6.65×10^{-4}	1503
5	SEU	0.5	10000	2.64×10^{-3}	379

以试验获得的截面作为输入可以获得 5 款 DSP 器件的 SEE 率数值见表 3。其中，SEU 率随着制造工艺的减小而逐步增大，相同工艺的 SEU 率处于同一量级，不同工艺的差别最大可以达到 20 倍。

对于 SEFI 率，在典型大气中子环境下至少需要 10 年的时间才发生一次，实际出现的概率极低。

4 结论

本文针对 DSP 器件开展大气中子单粒子效应敏感特性

开展试验研究，获得多个型号 DSP 器件的单粒子效应敏感截面。得到的主要结论如下：

（1）在 14MeV 中子辐射源下，DSP 产生单粒子效应的主要模式为 SEU，在使用 JTAG 接口的情况下也会出现偶发的 SEFI 现象。

（2）对所试系列型号的 DSP，其内部敏感区域为缓存器和存储器。

（3）相同工艺尺寸的器件具有相同数量级的 SEU 位敏感截面，为 $1\times10^{-14}cm^2/bit$ 量级。

（4）所有被测 DSP 器件，辐照结束后电流值没有出现异常增加，均未发生单粒子闩锁效应。

本文选取典型大气中子环境，对中子试验获得的 5 款 DSP 的 SEU 和 SEFI 数据，分别进行了器件级的 SEE 率分析和计算。结果表明航空用 DSP 器件及相关设备必然会受到大气中子单粒子效应的影响，在器件选用和设备设计阶段就应该进行应用可靠性评估，而且从试验数据及分析结果可知，随着器件工艺尺寸的减小其危害正在逐步增加。因此，在航空电子设备中应用高性能 DSP 器件时，应高度重视大气中子对器件及相关设备长期工作可靠性的影响。 AST

参考文献

[1] IEC 62396-1. Process management for avionics-atmospheric radiation effects Part 1：Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment [S]. Geneva：IEC，2016.

[2] Dyer C S，Clucas S N，Sanderson C，et al. An experimental study of single-event effects induced in commercial SRAMs by neutrons and protons from thermal energies to 500MeV[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2004，51（5）：2817-2842.

[3] Normand E，Dominik L. Cross comparison guide for results of neutron SEE testing of microelectronics applicable to avionics[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop，2010.

[4] Granlund T，Olsson N. SEUs induced by thermal to high-energy neutrons in SRAMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2006，53（6）：3798-3802.

[5] Taber A，Normand E. Single event upset in avionics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1993，40（2）：120-126.

[6] Olsen J，Becher P E，Fynbo P B，et al. Neutron-induced single event upsets in static RAMs observed at 10km flight altitude[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1993，40（2）：74-77.

[7] European Defence Agency. European Military Airworthiness Certification Criteria（EMACC）handbook（1st Edition）[M]. European：European Defence Agency，2013：135-136.

[8] Nicolaidis M. Soft errors in modern electronic systems（1st Edtion）[M]. New York：Springer，2011：23-103.

[9] Normand E. Single event effects in avionics presented to C-17 program[Z]. Boeing Radiation Effects Lab，1998.

[10] Prepared for Reusable Space Systems Group. Radiation qualification of electronics in space applications experience and capabilities of Boeing radiation effects laboratory（BREL-Seattle）to support RSS programs[Z].Boeing Radiation Effects Lab，1998.

[11] Colas G，Avioniics T，Vélizy，et al. Neutrons atmosphériques en avionique（1st Editon）[M]. Frane：Thales Avionics，2002：22-26.

[12] IEC 62396-2. Process management for avionics - atmospheric radiation effects Part 2：Guidelines for single event effects testing for avionics systems [S]. Geneva：IEC，2012.

[13] RTCA/DO-297. Integrated Modular Avionics（IMA）design guidance and certification consideration[S]. Washington，D. C.：RTCA Inc.，2005：33.

[14] RTCA/DO-254. Design assurance guidance for airborne electronic hardware[S]. EuroCae：RTCA Inc.，2000：15，85，106.

[15] 薛海红，王群勇，陈冬梅，等 . 航空电子设备 NSEE 试验评价方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2015，41（10）：1894-1901. Xue Haihong，Wang Qunyong，Chen Dongmei，et al. Neutron single event effects testing and evaluation method for avionics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2015，41（10）：1894-1901.（in Chinese）

[16] 王群勇，刘燕芳，陈宇，等 . 大气中子诱发复杂航电系统 SEE 的试验评价与防护设计 [J]. 航空科学技术，2011（4）：34-37. Wang Qunyong，Liu Yanfang，Chen Yu，et al. Test evaluation and protective design of atmospheric neutron radiation effects via single event effects for complex avionics[J]. Aeronautical Science & Technology，2011（4）：34-37.（in Chinese）

[17] 郭晓强，郭红霞，王桂珍，等 . 随机静态存储器低能中子单粒子翻转效应 [J]. 强激光与粒子束，2009，21（10）：1547-1550. Guo Xiaoqiang，Guo Hongxia，Wang Guizhen，et al. Low-energy neutron-induced single-event upsets in static random

access memory[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21 (10): 1547–1550. (in Chinese)

[18] 范辉,郭刚,沈东军,等.14MeV 中子引发 SRAM 器件单粒子效应试验研究 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49 (1): 171–175. Fan Hui, Guo Gang, Shen Dongjun, et al. Experimental study on 14MeV neutron induced single-event-effect in SRAMs[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49 (1): 171–175. (in Chinese)

[19] Joshi R, Daniels R, Shoga M, et al. Radiation hardness evaluation of a class V 32-bit floating-point digital sgnal processor[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2005: 70–78.

[20] Quinn H, Manuzzato A, Fairbanks T, et al. High-performance computing for airborne applications[Z]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2010.

[21] Baggio J, Lambert D, Ferlet-Cavrois V, et al. Single event upsets induced by 1-10MeV neutrons in static-RAMs using mono-energetic neutron sources[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54 (6): 2149–2155.

[22] Baggio J, Ferlet-Cavrois V, Duarte H, et al. Analysis of proton/neutron SEU sensitivity of commercial SRAMs-application to the terrestrial environment test method[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51 (6): 3420–3426.

[23] RTCA/DO–160. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[S]. Washington D. C.: RTCA Inc., 2009.

(责任编辑 朱赫)

作者简介

陈冬梅(1969–) 女,硕士,研究员。主要研究方向:微电子集成电路辐射环境试验评价方法研究。

Tel: 010–58830061 E-mail: chendm@stea.cn

Experimental Investigation of DSP Single Event Effect Caused by Atmospheric Neutron

Chen Dongmei*, Sun Xupeng, Zhong Zhengyu, Feng Guoqiang, Bai Hua, Yang Hui, Di Tong

Beijing San-talking Testing Engineering Academy, Co. Ltd., Beijing 100089, China

Abstract: The research of the sensitive property of Digital Signal Processor (DSP) single event effect under the atmospheric neutron radiation environment was carried out based on the 14Mev neutron radiation source in this paper. An experiment scheme on ground was designed including detection, experimental setup, testing procedure and criterion of the single event effect caused by atmospheric neutron. Different types of DSP, such as SMJ320F2812, SMJ320C6415, TMS320C6416, TMS320C6418, were used in the test. The results of the Single Event Upset (SEU) were acquired and then the cross section was calculated. The results show that the main sensitive phenomenon is single event upset, Single Event Function Interrupt (SEFI) occurred in some devices. The devices with the same feature size have the same order of the cross section magnitude, validating the feasibility of the experimental method. The results provide the basic data to evaluate the reliability and security of the avionic electronic equipments.

Key Words: DSP; atmospheric neutron; sensitive cross section; SEU; SEFI

Received: 2017–11–06; **Revised:** 2017–12–06; **Accepted:** 2018–01–04

***Corresponding author.Tel.:** 010–58830061 **E-mail:** chendm@stea.cn