



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 34955—2017/IEC 62396-2:2012

---

## 大气辐射影响 航空电子系统 单粒子效应试验指南

**Atmospheric radiation effects—Guidelines for single  
event effects testing for avionics systems**

(IEC 62396-2: 2012, Process management for avionics—  
Atmospheric radiation effects—Part 2: Guidelines for  
single event effects testing for avionics systems, IDT)

2017-11-01 发布

2018-05-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

国标准出版社授权北京万方数据股份有限公司在中国境内(不含港澳台地区)推广使用

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 缩略语 .....	1
5 SEE 数据的获取 .....	3
6 SEE 已有试验数据在航空领域的有效使用 .....	5
7 SEE 试验的考虑 .....	13
8 SEE 率计算方法 .....	17
附录 A (资料性附录) 2000 年以前公布的 SEE 数据源 .....	22
参考文献 .....	23

国标准出版社授权北京万方数据股份有限公司在中国境内(不含港澳台地区)推广使用

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 62396-2:2012《航空电子过程管理 大气辐射影响 第 2 部分:航空电子系统单粒子效应试验指南》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

——GB/T 34956—2017 大气辐射影响 航空电子设备单粒子效应防护设计指南(IEC 62396-1:2016, IDT)

本标准与 IEC 62396-2:2012 相比,主要做了以下编辑性修改:

——本标准名称改为“大气辐射影响 航空电子系统单粒子效应试验指南”。

本标准由中国航空工业集团公司提出。

本标准由全国航空电子过程管理标准化技术委员会(SAC/TC 427)归口。

本标准起草单位:中国航空综合技术研究所、北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司、中航工业第一飞机设计研究院。

本标准主要起草人:李明、陈宇、薛海红、王群勇、陈冬梅、张峰、孙建勇。

## 引 言

本标准作为航空电子系统设计师、电子设备与电子组件制造商及其用户提供了确定航空电子设备大气中子单粒子效应敏感性的方法,是 GB/T 34956—2017 的补充。

本标准提供了已有单粒子效应数据使用、数据源以及所用加速辐射源的类型等方面的指导。当无法获得单粒子效应数据时,可考虑采用恰当的辐射源开展试验以获得航空电子系统单粒子效应数据。本标准还详细说明不同辐射源所获得的数据转换为航空电子设备单粒子效应率的方法。

# 大气辐射影响 航空电子系统 单粒子效应试验指南

## 1 范围

本标准给出了微电子器件测量大气中子单粒子效应敏感特性的试验方法指南。由于采用的辐射源和试验方法的不同,所以本标准也给出了如何使用试验数据评估器件和功能板在巡航高度下由大气中子导致的 SEE 率。

本标准不仅适用于航空工业领域,也适用于其他领域。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 62396-1: 2012 航空电子过程管理 大气辐射影响 第 1 部分:航空电子设备单粒子效应防护设计通用要求(Process management for avionics—Atmospheric radiation effects—Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment)

IEC 62396-3 航空电子过程管理 大气辐射影响 第 3 部分:航空电子系统大气辐射单粒子效应防控优化系统设计[Process management for avionics—Atmospheric radiation effects—Part 3: Optimising system design to accommodate the single event effects (SEE) of atmospheric radiation]

IEC 62396-4 航空电子过程管理 大气辐射影响 第 4 部分:高压航空电子设备及其潜在单粒子效应设计指南(Process management for avionics—Atmospheric radiation effects—Part 4: Guidelines for designing with high voltage aircraft electronics and potential single effects)

IEC 62396-5 航空电子过程管理 大气辐射影响 第 5 部分:热中子注量率及其在航空电子系统中的效应评估指南(Process management for avionics—Atmospheric radiation effects—Part 5: Guidelines for assessing thermal neutron fluxes and effects in avionics systems)

## 3 术语和定义

IEC 62396-1:2012 界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ANITA:厚靶产生的与大气中子谱相似的中子辐射源(TSL,瑞典)[Atmospheric-like Neutrons from thick target(TSL,Sweden)]

BL1A、BL1B、BL2C: TRIUMF 设施的束流线路代号(加拿大) Beam line designation at the TRIUMF facility(Canada)

BPSG: 硼磷硅酸盐玻璃 Borophosphosilicate glass  
CMOS: 互补金属氧化物半导体 Complementary metal oxide semiconductor  
COTS: 商用货架器件 Commercial off-the-shelf  
D-D: 氘-氘 Deuterium-deuterium  
DRAM: 动态随机存取存储器 Dynamic random access memory  
D-T: 氘-氚 Deuterium-tritium  
DUT: 受试器件 Device under test  
E: 能量 Energy  
EEPROM: 电可擦可编程只读存储器 Electrically erasable programmable read only memory  
EPROM: 可擦除可编程只读存储器 Erasable programmable read only memory  
ESA: 欧洲航空局 European Space Agency  
eV: 电子伏特 Electron Volt  
FIT: 故障率单位, 定义在  $10^9$  h 出现一次故障为 1 FIT Failures in time(failures in  $10^9$  hours)  
FPGA: 现场可编程门阵列 Field programmable gate array  
GNEIS: 加特契纳中子分光仪(俄罗斯)Gatchina Neutron Spectrometer(Russia)  
GSFC: 戈达德航天飞行中心 Goddard Space Flight Center  
IC: 集成电路 Integrated circuit  
ICE: 芯片与电子器件辐射实验室 Irradiation of Chip and Electronics  
IEEE Trans. Nucl. Sci.: IEEE 核科学学报 IEEE Transactions on Nuclear Science  
IUCF: 印第安纳大学回旋加速器设施(美国)Indiana University Cyclotron Facility(USA)  
JEDEC: JEDEC 固态工艺技术协会 JEDEC Solid State Technology Association  
JESD: JEDEC 标准 JEDEC standard  
JPL: 喷气式推进实验室(美国)Jet Propulsion Laboratory (USA)  
LANSC: 洛斯阿拉莫斯中子科学研究中心(美国)Los Alamos Neutron Science Center(USA)  
LET: 线性能量传递 Linear energy transfer  
LET<sub>th</sub>: 线性能量传递阈值 Linear energy transfer threshold  
MBU: 在同一字中的多位翻转 Multiple bit upset(in the same word)  
MeV: 兆电子伏特 Mega electron volt  
NASA: 国家航空航天局(美国)National Aeronautical and Space Administration (USA)  
PIF: 质子辐照设施(TRIUMF, 加拿大)Proton Irradiation Facility(TRIUMF, Canada)  
PNPI: 彼得堡核物理研究院(俄罗斯)Petersburg Nuclear Physics Institute(Russia)  
PSG: 磷硅酸盐玻璃 Phosphosilicate glass  
QMN: 准单能中子 Quasi-monoenergetic neutrons  
RADECS: 器件及系统的辐射影响 RADiation Effects on Components and Systems  
RAM: 随机存取存储器 Random access memory  
RCNP: 核物理研究中心(大阪, 日本)Research Center of Nuclear Physics(Osaka, Japan)  
SDRAM: 同步动态随机存取存储器 Synchronous dynamic random access memory  
SEB: 单粒子烧毁 Single event burn-out  
SEE: 单粒子效应 Single event effect  
SEFI: 单粒子功能中止 Single event functional interrupt  
SEGR: 单粒子栅穿 Single event gate rupture

SEL:单粒子锁定 Single event latchup  
 SEP:太阳高能粒子 Solar energetic particles  
 SER:软错误率 Soft error rate  
 SET:单粒子瞬态 Single event transient  
 SEU:单粒子翻转 Single event upset  
 SHE:单粒子硬错误 Single event induced hard error  
 SRAM:静态随机存储器 Static random access memory  
 TID:总剂量效应 Total ionizing dose  
 TRIUMF:三校介子设施(加拿大)Tri-University Meson Facility (Canada)  
 TSL:特奥多尔·斯韦德贝里实验室(瑞典)Theodor Svedberg Laboratory(Sweden)  
 TNF: TRIUMF 的中子设施 TRIUMF Neutron Facility  
 WNR:武器中子研究中心(洛斯阿拉莫斯,美国)Weapons Neutron Research(Los Alamos USA)

## 5 SEE 数据的获取

### 5.1 SEE 数据类型

按照 SEE 试验所用辐射源可将 SEE 数据分为:重离子 SEE 数据、质子 SEE 数据、高能中子 SEE 数据、散裂中子 SEE 数据、热中子 SEE 数据等;按照试验对象可将 SEE 数据分为:器件 SEE 数据、功能板 SEE 数据。确认是否存在可用的已有数据,若不存在可用数据则需对器件或电路板进行 SEE 试验。

### 5.2 SEE 已有数据的使用

#### 5.2.1 概述

确定航空电子设备或半导体器件中子 SEE 敏感特性最简单的方法是查找典型器件已有的可用 SEE 数据,重离子、质子、高能中子或热中子源的 SEE 数据都是可用的。重离子 SEE 已有数据来源于空间应用领域,空间应用领域重点关注初级宇宙射线中的重离子对器件产生的直接电离效应导致的 SEE,重离子 SEE 已有数据通常可用于器件筛选,参见 5.2.2。质子 SEE 已有数据通常也来源于空间应用领域,空间应用领域也关注初级宇宙射线和捕获带中的质子诱发的 SEE,且高能质子和中子在与器件材料发生核反应的机理基本相同,所以高能质子 SEE 试验数据可以直接替代高能中子试验数据,高能质子和中子 SEE 已有数据都可用于评估目标器件 SEE 率,参见 5.2.3。低能中子(热中子)也会导致某些器件发生 SEE,由于热中子是与材料中的<sup>10</sup>B 发生核反应而不是硅元素,因此这类数据仅适用于含硼的少数器件。

#### 5.2.2 重离子数据

应用于空间任务的器件中约 80%进行了重离子 SEE 试验,重离子 SEE 试验结果是航空领域用来筛选器件的一个重要数据源。工程应用中可通过不同的计算方法将重离子 SEE 数据转化为高能中子或质子的 SEE 数据,计算转换过程应需辐射效应专家来主导。在重离子 SEE 试验中是用入射离子的 LET 值来表征在受试器件中沉积的能量,LET 的定义为粒子在靶材料内单位长度单位密度上沉积的能量(单位为 MeV·cm<sup>2</sup>/mg)。中子入射材料产生次级粒子或反冲粒子,这些次级粒子或反冲粒子与重离子类似会在硅中产生能量的沉积,且中子入射材料产生次级粒子或反冲粒子在硅中的 LET 值最大为 15 MeV·cm<sup>2</sup>/mg<sup>[1,2]</sup>,因此,经重离子 SEE 试验证明器件的 LET<sub>th</sub>大于 15 MeV·cm<sup>2</sup>/mg,则该器件对中子 SEE 免疫。对 NASA-GSFC 的部分 SEE 试验结果进行总结<sup>[3]</sup>,21 个不同类型的 IC 中 8 个

(约 40%)器件的 SEE 效应  $LET_{th}$  大于  $15 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。

极少数商用 SRAM 器件易发生重离子 SEL 效应<sup>[4]</sup>,这种敏感特性是由于 IC 中掺杂了少量高原子序数的材料(例如钨插塞),高原子序数的反冲粒子具有更高的 LET 值从而更易导致 SEL。另外,质子或中子入射掺杂了高原子序数材料的器件会导致更高的 SEL 截面,这是由于质子或中子与高原子序数材料发生反应时会产生更高 LET 值和能量的反冲粒子。因此,对于含有高原子序数材料的 SRAM 器件,在使用重离子 SEL 截面推导质子/中子 SEL 截面时要小心且反复确认,判断该类器件是否免疫中子 SEL 效应, $LET_{th}$  建议采用  $40 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$  保守值<sup>[4]</sup>,但只有极少数器件掺杂高原子序数材料且可能对 SEL 采用了限制措施,该建议不适用于上述提及普通器件筛选。

重离子 SEE 数据不能被用于计算大气中子环境下的中子 SEE 截面,除非是由具有丰富专业经验的科学家和工程师来操作。除非明确说明,本标准以下内容中提到的 SEE 数据均为中子或质子源获得的数据,而不是重离子试验的结果。

### 5.2.3 中子和质子数据

使用目标器件的高能中子或质子 SEE 已有试验数据计算巡航高度下的 SEE 率需进行专门的讨论,主要关注以下两点:

- a) 中子 SEE 敏感特性表征单位:来源于面向地面应用的 IC 供应商处获得的 SEE 数据经常会使用 FIT 单位来表征受试器件对中子 SEE 的敏感特性,这种单位仅适用于地面应用而不适用于巡航高度下的应用;
- b) 工艺差异:IC 总是在不停的更新换代,经过试验的器件因为过时而被新的器件所代替,新一代器件却没有进行过 SEE 试验,新、旧器件可能是由同一家供应商制造的而且属于相同类型器件,但是这并不意味着旧器件的试验数据可以直接应用在新器件上。在设计或制造工艺上的一个小改变可能导致 IC 对 SEE 响应产生极大的影响,当然也存在另外一种情况,这种改变非常小。

### 5.2.4 热中子数据

热中子截面数据非常少见。但是,TRIUMF、TSL 和 ISIS 实验室提供的散裂中子源的高能束中均包含一定比例的热中子。使用上述中子源开展 SEE 试验,可以通过热中子过滤器及中子飞行时间测量方法来确定热中子 SEE 截面。另外,国际上也有一些专门的热中子辐射源,详见 IEC 62396-1:2012。

获取 SEE 已有数据一直存在的困难是缺乏一个包含全部的中子或质子 SEE 数据的独立数据库,需从不同渠道获得部分 SEE 数据。但这些 SEE 数据中大部分都是很老旧的器件数据,数据可追溯到 20 世纪 90 年代甚至是 80 年代,并且这些数据主要为了满足空间领域而进行的重离子 SEE 试验,而不是质子和中子 SEE 试验数据。

## 5.3 确定开展 SEE 试验

如确定 SEE 已有数据不可用,或为了以后更好的展开工作,则需针对具体器件或电路板开展 SEE 试验。试验工作包括:

- a) 明确试验对象:器件或(/和)电路板;
- b) 确定试验类型:静态或动态(适用于大多数的板级试验);
- c) 选择适宜的中子或质子源;
- d) 组建试验团队;
- e) 编制试验方案(含日程安排);

- f) 实施试验；
- g) 应对试验过程中的突发情况；
- h) 计算预期巡航高度下的 SEE 率。

## 6 SEE 已有试验数据在航空领域的有效使用

### 6.1 SEE 数据的多样性

SEE 试验实施方法不同,且试验数据应用发布的关注焦点不同,导致 SEE 已有数据的多样性,因此在航空领域中有效使用 SEE 已有数据需要仔细筛选。

### 6.2 可用的 SEE 已有数据类别

#### 6.2.1 概述

SEE 数据可以通过不同的试验来获得,为了能够对不同试验方法获得的数据进行有效的比较,需要弄清楚不同试验之间的差异。

SEE 包含多个类型,但本标准重点关注的是:单粒子翻转(SEU)、单粒子功能中止(SEFI)、单粒子锁定(SEL)。SEU 是指单个高能粒子能量沉积导致单个位逻辑状态变化的现象。对 SEU 敏感的器件主要是:随机存储器(如 RAM、SRAM、DRAM)、FPGA(尤其是 SRAM 型 FPGA)、CPU(高速缓存区和寄存器区);SEFI 指的是在复杂器件中单个位发生变化导致器件本身或所属的电路板进入非正常工作状态的现象,如在控制寄存器中发生翻转会影响器件本身,也可能传播到板上的另一个器件,最终导致电路板功能异常;SEL 指的是 CMOS 工艺器件中由于能量沉积而导致寄生 pnpn 结开通,最终会导致器件进入低阻大电流的非正常工作状态的现象。大气高能中子能诱发 SEU、SEFI、SEL。当半导体器件工作在高电压应力(200 V 或更高)条件下时,受大气中子影响也可能出现单粒子烧毁(SEB)或单粒子栅穿(SEGR)等效应。SEB 和 SEGR 在标准 IEC/TS 62396-4 中会详细说明。

本标准中 SEE 率计算过程中引入一个重要的简化假设:SEE(包括 SEU、SEFI、SEL)对高能质子(如  $E > 100$  MeV)的响应与同能量高能中子的响应是一致的。SEE 的响应程度通常用术语截面( $\text{cm}^2/\text{dev}$ )来表征,截面的计算为某类型 SEE 错误数除以器件接收的粒子注量,因此,高能质子试验获得的 SEU、SEFI、SEL 截面等同大气高能中子的截面。已开展多个不同器件的单能质子和 WNR 实验室散裂中子源 SEE 试验,通过对比两种源的试验结果表明所获截面基本一致,且 WNR 散裂中子能谱与大气中子能谱基本一致,从而证实该假设是正确的<sup>[5~9]</sup>。

在巡航高度下,器件 SEE 率计算的简化公式见式(1):

$$\text{SEERate} [n/(\text{dev} \cdot \text{h})] = 6\,000 [n/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})] \times \text{SEE cross-section} (\text{cm}^2/\text{dev}) \dots\dots\dots (1)$$

式中,6 000  $n/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 是指能量大于 10 MeV 的大气中子积分注量率,该值源于 IEC 62396-1 中高度 12.2 km、纬度 45°处认定的近似注量率,该注量率仅适用于特征尺寸大于 150 nm 的器件。从式(1)中可以看出 SEE 截面的重要性,如上所述,航空电子产品的 SEE 截面可以通过散裂中子源(如 WNR 实验室提供的中子源)、能量大于 100 MeV 的中子或质子源的 SEE 试验获得,IEC 62396-1 中也使用了式(1)简化计算方法,典型注量率仅适用特征尺寸大于 150 nm 的器件;特征尺寸小于 150 nm 的器件 SEE 阈值小于 10 MeV,大气中子注量率取值应大于 6000  $n/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。因此,在评价中应注明阈值能量(和注量率)且进行确认,详见 IEC 62396-1。

SEE 率的精确计算方法为:对 SEE 截面-能量曲线和大气中子注量微分谱进行积分而获得精确的 SEE 率值,SEE 截面-能量曲线的获得需开展多次 SEE 试验以取得以中子或质子能量为变量的 SEE 截

面函数。JESD-89A 标准<sup>[10]</sup>中详细给出这种计算方法,但是 JESD-89A 中给出的大气中子注量率是地面高度的,所计算的结果如果要应用于巡航高度则应乘一个修正因子,修正因子约为 300(详见 6.2.3)。

航空电子产品 SEE 率预计中所使用的 SEE 截面应来源于以下辐照源:

- a) 散裂中子源,如 WNR;
- b) 单能质子源;
- c) 准单能中子(QMN)源;
- d) 单能 14 MeV 中子源。

对比单能 14 MeV 中子源和 WNR 散裂中子源测得的 SEE 截面,特征尺寸小于 0.5  $\mu\text{m}$  的较近代器件,散裂中子源获得的截面值大约是单能 14 MeV 中子源获得截面的 1.5 倍~2 倍<sup>[7]</sup>;老旧器件的散裂中子源获得的截面值大约是单能 14 MeV 中子源获得截面的 4 倍<sup>[8]</sup>;最新器件的散裂中子源获得的截面与单能 14 MeV 中子源获得截面基本相同。

在全球范围内有很多散裂中子源设施可用于软错误率试验,这些设施的精度在文献<sup>[11,12]</sup>中进行了讨论。软错误率的计算结果主要取决于受试器件和所用试验设施。用于 SEE 率计算的大气中子注量率应根据器件实际的能量阈值来确定,且该阈值并非是一成不变的,而是随着器件的工艺尺寸减小而降低。“10 MeV”阈值仅适用于工艺尺寸大于 100 nm 的器件。用于确定中子注量率的能量阈值应被明确标注且应被确认适用于相关器件工艺。

## 6.2.2 试验数据源

用于航空电子设备 SEE 率计算的 SEE 截面数据主要来源于以下组织:

- a) 航天机构:仅开展单能质子源 SEE 试验;
- b) IC 供应商:使用中子源测量地面高度下的翻转率(IC 供应商更倾向于使用的软错误率(SER)术语,而不是单粒子翻转(SEU)率,两者术语意义相同);
- c) 航电设备供应商:使用中子源测量巡航高度下的翻转率。

政府机构发布的 SEE 数据包含了绝大部分的可用信息,包括受试器件标识、截面及其物理含义明确的单位。NASA-GSFC 和 JPL 会公布其开展试验的所有质子 SEE 数据,试验数据信息完整,但质子 SEE 试验数据通常是和重离子 SEE 试验数据一起被编辑整理在公开文献资料中,使用者需仔细筛选出质子 SEE 数据,例如,GSFC 发布的质子 SEE 试验结果<sup>[13~16]</sup>,JPL 发布的质子 SEE 试验数据<sup>[17~19]</sup>。其他政府机构不一定会公布其开展的所有质子试验数据。

一般,不容易从其他渠道(主要来自私有公司)获得 SEE 数据,虽然 IC 供应商也开展了大量的试验,但是这些试验结果中只有很少的一部分能够在公开文献中发布。此外,IC 供应商公布的 SEE 试验结果常被掩饰,受试器件类型和型号常被刻意修改,并且在试验结果的表达上经常使用一些含糊不清的单位或者只是给出数量级。有时,试验的结果以 FIT 作为单位,但是数据中并没有给出器件中包含多少位数。以 FIT 为单位的数据除以 13(纽约市海平面上大于 10 MeV 高能中子注量率为 13  $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ,标准 JESD-89A 给出且被广泛使用)可计算出 SEE 截面,因此, $\text{FIT} \times 10^{-9}/13$  即为 SEE 截面值,单位为  $\text{cm}^2/\text{dev}$ 。以 FIT/Mbit 为单位的软错误率可通过  $(\text{FIT}/\text{Mbit}) \times 10^{-15}/13$  获得每位的 SEE 截面,单位为  $\text{cm}^2/\text{bit}$ 。

在其他公开发表的论文中也可能使用 FIT 单位,但表征特定参数(如,电压)失效的 FIT 不能用于 SEE 截面的定量评估<sup>[6,20,21,22,23]</sup>。

大部分 SEE 数据都是通过单个器件进行 SEE 试验而获得的,通常将器件置于中子或质子束流下进行辐照,监测器件状态的变化,这种变化被记录为 SEE,典型的 SEE 试验过程是:辐照前,写入测试向量(如全 1、全 0 或 0、1 交替棋盘格)至存储区,辐照中监测每个存储位的状态变化情况。但是,有些

SEE 试验采用的是整块电路板进行辐照,辐照期间电路板的故障通常是由受辐射器件发生 SEFI 而导致的。如果中子束流经校准后每次仅辐照一个或两个器件,则该 SEE 可能是由被照器件引起的,SEE 试验是一个动态试验,被辐照器件发生的错误也可能传播至其他器件而导致电路板发生失效。

在公开的文献中也会发现一些关于板级试验的报告,但这并不常见。NASA-JSC 就曾要求在载人航天项目中对所有的电路板进行板级 SEE 试验。这类板级试验是在质子辐照下进行,且试验相关信息记录在 NASA-JSC 发布的报告中,不过这些报告并没有很广泛的适用性<sup>[24,25,26]</sup>。此外,这类试验的主要目的是考核所有器件在质子辐照下发生硬错误的潜在风险,比如 SEL,而报告中对于可恢复的错误并没有太详细的分析。其他政府机构也开展这类板级试验,试验结果经常会发布在一些文献资料中,但没有被收录在一些有组织的专业数据库中。此外,一些私有公司也会开展这类板级试验,私有公司开展这类试验主要为了航空(航电供应商开展中子试验)或航天(低轨道航天器制造商开展质子试验)的专项服务,因此试验数据极少在公开文献中报道。截止 2005 年,用户数量已经增加到 25 家以上,但是能够公开发表试验结果的组织所占比例没有太大变化。

### 6.2.3 基于不同辐射源的试验数据

#### 6.2.3.1 辐射源

SEE 试验都是基于中子或质子加速器来开展的,在同等时间内,受试器件或电路板在试验环境下接收到的粒子注量远大于在大气或空间使用环境下的注量。以前,SEE 试验通常仅使用一种辐射源进行试验,现在,一些工程实施组织已使用多种辐射源对器件进行辐射,并比较不同辐射源下器件 SEE 的响应。目前,用于航空电子设备 SEE 试验的两种主要辐射源类型是:中子和质子,中子源还可分为不同类型,这在下面内容中进行讨论。

#### 6.2.3.2 基于中子源获得 SEE 数据

SEE(特别是 SEU)可由两种完全不同能量范围的中子诱发,两种能量范围分别为高能中子(>1 MeV)和热中子(0.025 eV)。高能中子诱发 SEE 的机理是:高能中子入射器件后与材料发生核反应产生高能离子,这些离子的能量在半导体晶格中沉积导致电离,最终形成翻转。由于硅、氧及其他材料构成的器件<sup>[27~29]</sup>发生 SEE 阈值能量一般在 2 MeV~10 MeV,所以大于 10 MeV 中子最值得关注。此外,更高能量的中子具有更高效率的核反应,自然界中子能谱的最小范围在 10 MeV 左右<sup>[30~33]</sup>。低能中子(3MeV 或更低)也可能诱发 SEE<sup>[28,34]</sup>,低能中子诱发 SEE 的概率较低,小于 10 MeV 中子对工艺尺寸大于 0.2  $\mu\text{m}$  器件的 SEU 贡献率小于 10%,更低工艺尺寸的器件,这个比例会增加<sup>[28,35]</sup>。使用单能中子对 90 年代中期的器件(工艺尺寸大于 0.5  $\mu\text{m}$ )进行试验发现:大部分 SRAM 在 3 MeV 中子试验获得的 SEU 截面与 14 MeV 中子试验获得 SEU 截面相比小 100 倍<sup>[36]</sup>;更近代的器件,尤其是那些工艺尺寸小于 0.2  $\mu\text{m}$  甚至低至 45 nm 的器件,小于 10 MeV 中子的 SEU 贡献率预计会在 8%~10%<sup>[28]</sup>。

三种不同类型的高能中子源:

- a) 散裂中子源:具有较宽的中子能谱,与大气中子能谱相似;
- b) 准单能中子源(QMN):一种特殊中子能谱,约半数中子处于峰值能量,半数中子均匀分布在峰值至 1 MeV 之间;
- c) 14 MeV 中子产生器:唯一一种最接近纯单能的中子源。

WNR 散裂中子源是最适用于中子 SEE 试验的辐射源,加拿大 TRIUMF 散裂中子源也是类似的辐射源。WNR 散裂中子源在约 2000 年进行了改造升级,新名字为 ICE 实验室。图 1 给出了 ICE 实验室、TRIUMF 的 TNF<sup>[38]</sup>、TSL 的 ANITA<sup>[39]</sup>、地面高度<sup>[30,31]</sup>以及 IEC 62396-1 的中子能谱结果。

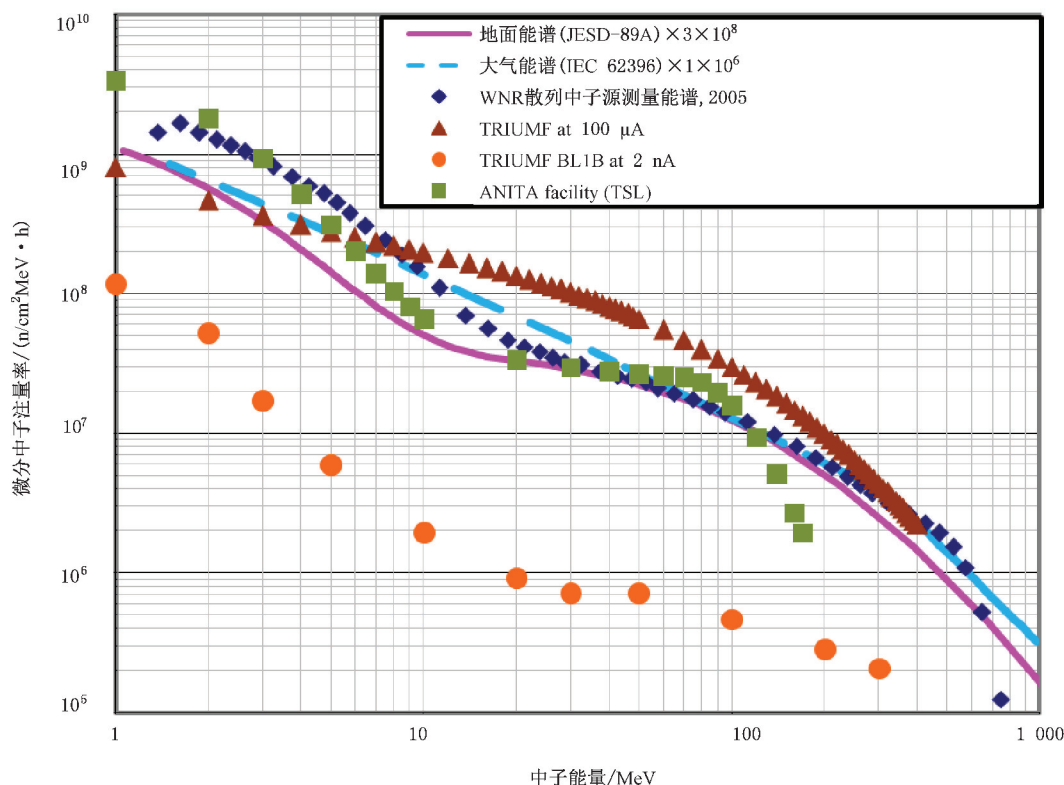


图 1 Los Alamos、TRIUMF 和 ANITA 中子能谱与地面/航空中子能谱的对比 (JESD-89A 和 IEC 62396-1)

使用 WNR 散裂中子源开展试验所获器件 SEU 数据仅少数被公开发表<sup>[6~8,40,41]</sup>,大部分试验数据不被公开或仅被组织者公开期望的内容。例如,在 2001 年使用 WNR 散裂中子源开展 8 组不同的 SEE 试验<sup>[42]</sup>,仅来自美国国家实验室和一所大学的 2 组试验结果被公布。其他 6 家 IC 制造商和航电设备供应商对试验结果都进行了保密。

加拿大 TRIUMF 中子设施(TNF)可对外提供散裂中子源。2004 年以前,TNF 的使用量有限,之后,大量 IC 器件使用 TNF 开展试验的 SEU 结果被公布<sup>[38]</sup>。

俄罗斯 PNPI 也具有散裂中子源,主要用于研究高能中子对半导体器件的影响。通过 1 000 MeV 同步加速器产生高能中子,使用 GNEIS 分光器产生与大气中子能谱形状相似的中子束流<sup>[43]</sup>。

瑞典 TSL 设施(ANITA<sup>[39]</sup>)被设计用来产生伪白光中子源。该设施建于 2007 年,通过高能质子(约 200 MeV)与钨靶相互作用产生散裂中子,可提供最高能量约为 180 MeV 的类大气能谱的中子(详见图 1)。大于 10 MeV 中子注量率约为 12 km 大气中子注量率的 10<sup>6</sup> 倍。ANITA 和 LANSCE 的 SEE 数据已经建立明确比例关系,现代器件(SRAM、微处理器、高压器件、全服务器等)在 ANITA 设施的 SEU 试验数据普遍应用这种比例关系进行修正。相较于 LANSCE 中子源,ANITA 的束流中高能中子(100 MeV 以上)的比例更小。因而,ANITA 设施在使用时应进行修正,尤其是在进行 SEL 或其他 SHE 现象时(详见 8.5)。

日本 RCNP 能提供能量高达 400 MeV 的散裂中子源以及最大能量 400 MeV 的质子源,均可用于开展器件 SEE 试验。

英国 ISIS 设施可提供能量高达 800 MeV 的高能中子。ISIS 设施有 2 个束流终端,其中终端 1 Ve-suvio<sup>[45]</sup>目前可以使用,但是高能中子部分的注量率小于大气中子谱;终端 2 ChipIR 在建设中,将能够

提供与大气中子能谱一致性很好的中子,能为器件级试验提供准直束流,能为设备试验提供宽束流<sup>[46]</sup>。

全球范围内还有一些准单能中子源,其中一些位于美国,但是直到最近他们也没有被用来进行半导体器件的 SEE 试验。在 SEE 试验中使用最多的瑞典 TSL<sup>[47]</sup>,仅有少量报告公开 TSL 束流的半导体器件中子试验数据<sup>[9,48,49]</sup>,伪峰值能量中子对应的 SEU 截面数据计算方法已被公布。另外,在日本东北大学<sup>[50]</sup>也有一台类似的设施可用于进行 SEU 测量,伪峰值能量中子对应的 SEU 截面数据计算方法与瑞典研究者的方法不同<sup>[51,52]</sup>。

TRIUMF PIF 和 TSL ANITA 能提供大束斑面积的高能中子束流,适用设备和系统级开展 SEE 加速试验。

图 2 给出了不同组织在不同设施上获得的 SEU 测量结果,将这些结果综合起来可以看出:近些年来 SRAM 器件的每 bit 高能 SEU 截面随器件工艺尺寸的变化情况,特定工艺尺寸的 SEU 截面值趋于一致,最大值和最小值相差 10 倍~30 倍,但是这种一致性规律随着工艺尺寸持续下降到 100 nm 以下就不确定。

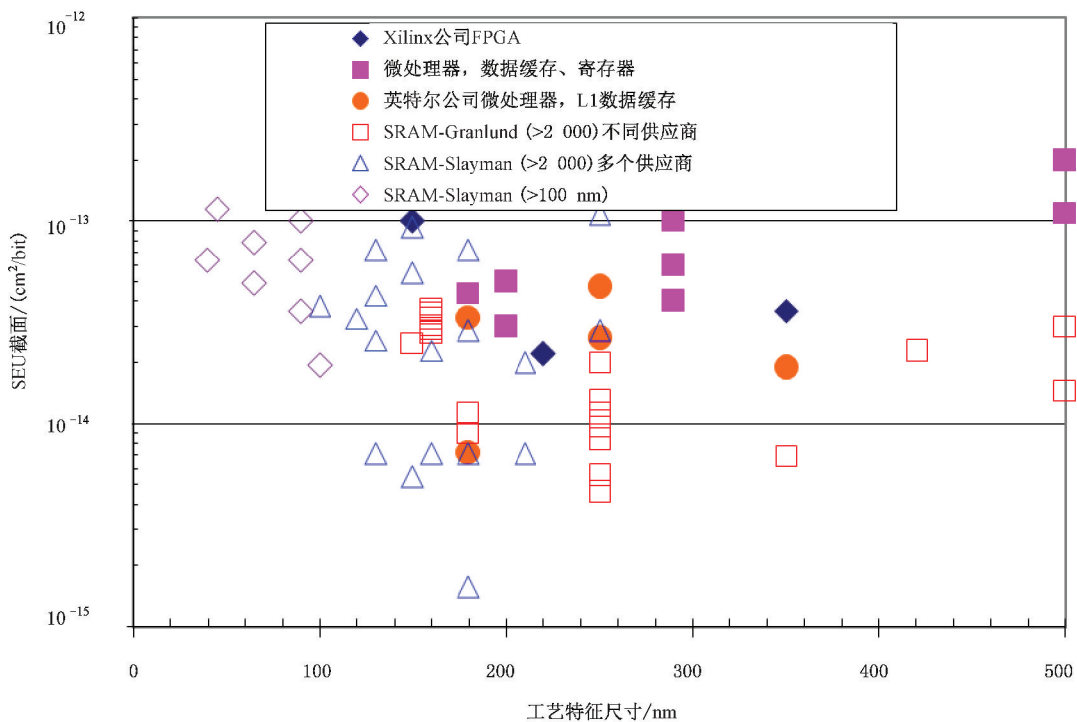


图 2 SRAM、FPGA 中的 SRAM 阵列、微处理器每比特高能 SEU 截面随工艺尺寸的变化结果

第 3 类高能中子产生设施是能够产生单能中子的设备,一般称为中子发生器,典型设备是高压倍加速器。通过 D-T 核反应产生 14.5 MeV~15.5 MeV 的单能中子,准确的单能中子能量为 14.5 MeV 加上入射粒子氘的能量。美国、中国、日本、俄罗斯等很多国家都有这样的中子发生器,中国原子能科学研究所和中国工程物理研究院均有这种设备。90 年代中期 SRAM 器件试验结果表明,散裂中子源获得的器件每 bit SEU 数据是 14 MeV 中子源的 3 倍~5 倍<sup>[8]</sup>;近现代器件试验结果表明,散裂中子源和 14 MeV 中子源的试验结果基本一致<sup>[7,9]</sup>,14 MeV 中子源能够模拟大气中子诱发现代低压器件的 SEU 现象,但不能模拟 SEL 现象<sup>[53]</sup>。

2006 年和 2007 年的试验数据表明,工艺尺寸小于 0.25  $\mu\text{m}$  的器件对低能中子(3 MeV~10 MeV)

的 SEU 敏感程度远大于旧工艺器件<sup>[28,39,54]</sup>, 详见图 3。低能中子对旧工艺器件的 SEU 率贡献非常小, 因而常被忽略掉; 低能中子对于工艺尺寸小于 90 nm 的器件 SEU 率贡献增大, 因此, 如需要对这类器件 SEU 率进行准确的评估时, 所使用的中子源应覆盖低能中子段<sup>[35,53~56]</sup>。

此外, 可对 SEE 敏感趋势曲线(如图 2)中的数据点进行外推, 但是, 对未来小工艺尺寸器件的推断, 需要按时间更新新器件的试验数据以确保 SEE 敏感特性界定的准确性。器件 SEE 敏感性随工艺尺寸减小有两个典型变化趋势, 其一, 随工艺尺寸减小器件 SEU 对 3 MeV~10 MeV 的中子越来越敏感; 其二, 随工艺尺寸减小器件 MCU 的敏感性开始提高(详见 IEC 62396-1:2012 附录 G 的图 G.4)。

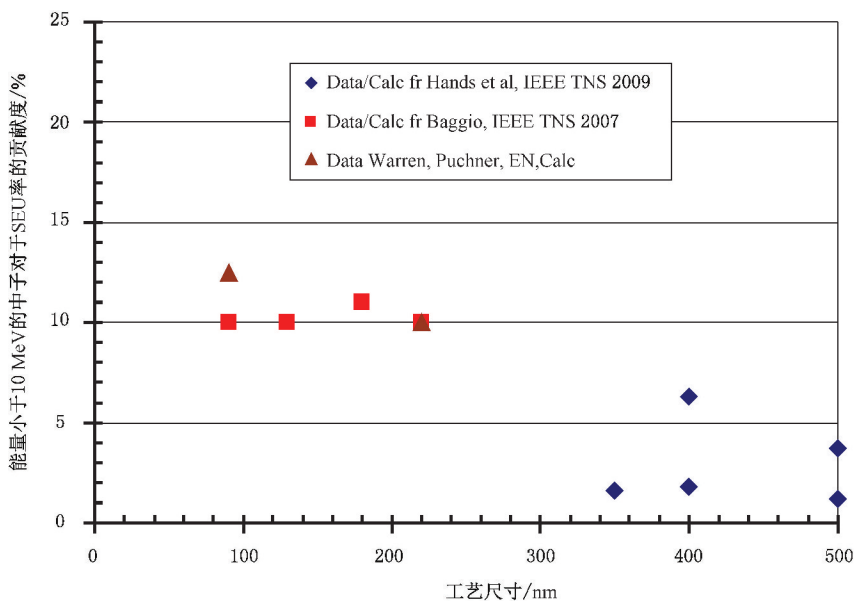


图 3 小于 10 MeV 的大气中子对 SEU 率的贡献度

用于器件 SEU 试验的第 4 类中子源是热中子。热中子主要通过同位素<sup>10</sup>B 反应产生  $\alpha$  粒子和<sup>7</sup>Li 而导致 SEU,<sup>10</sup>B 一般存在于高掺杂聚合物中, 是 IC 涂附玻璃层的主要元素, 例如 BPSG(详见 IEC/TS 62396-5), 很多器件都会使用一些不同类型的涂附玻璃, 例如 PSG, 某情况 BPSG 中的硼元素是<sup>11</sup>B 则不会引发 SEU。目前, 公开数据中热中子 SEU 截面数据非常有限<sup>[9,22,57~59]</sup>。硼元素也是半导体材料的掺杂物, 因此当器件工艺尺寸减小至 100 nm 以下, 硼掺杂导致的热中子翻转将变得十分严重。

### 6.2.3.3 基于质子源获得 SEE 数据

高能质子会导致半导体器件发生 SEU, 高能质子虽然是带电粒子但是其导致 SEU 翻转的机制与高能中子是相同的, 高能质子和中子诱发 SEU 的机理均是通过与硅材料发生核反应的方式, 而不是对硅直接电离的方式。但是小于 100 nm 工艺尺寸的器件也有迹象表明可被低能质子直接电离<sup>[61]</sup>。近年来, 大量质子 SEU 截面数据被公布, 低能质子诱发翻转的影响随 IC 的工作电压降至 5 V 以下且工艺尺寸不断减小而增加。80 年代工艺尺寸较大的 DRAM 器件的质子试验表明: 其小于 50 MeV 质子测得的 SEU 截面相比高能质子测得的截面小几个数量级<sup>[62,63]</sup>; 对于近代工艺尺寸较小器件, 其 SEU 截面通常不会随质子能量降低而减小很多, 50 MeV 质子 SEU 截面仅为 14 MeV 中子 SEU 截面的 2 倍<sup>[7]</sup>。1997 年, ESA 收集整理了 120 多个不同 SRAM 和 DRAM 器件的 SEU 截面数据, 大部分器件工作电压为 5 V, 极少部分器件工作电压为 3.3 V, 这些器件几乎不被现在使用。现在文献中的质子 SEU 数据主要来源于 NASA JPL 使用 IUCF 的 200 MeV 质子试验, 例如 Coy Kouba<sup>[65]</sup>。NASA-GSFC 每年都会

对 SEE 试验数据进行总结。

#### 6.2.4 地面高度应用与航空电子设备应用

在航空电子设备应用环境和地面高度应用方面,对器件 SEU 的考虑存在着重要不同。最重要的是,航空电子设备应用环境下的大气中子注量率远高于地面高度环境,SEU 率会按比例增高,典型比例为 300,12.2 km 高度的中子注量率为地面高度的 300 倍,12.2 km 高度的中子注量率与海平面相比,比例更接近 450 倍。JESD-89A 指出,地面高度器件发生 SEU 主要有两个诱发辐射源<sup>[66,67]</sup>,大气中子和 IC 封装材料中的微量放射性元素释放的  $\alpha$  粒子。近年来,IC 封装材料不断改进,产生  $\alpha$  粒子的放射性材料已经被替换掉,但是焊接材料中的铅成为了主要辐射源,已开始使用一些方法来避免在 IC 中使用铅,替换材料(例如,tin-silver-copper 或 tin-silver-bismuth)还有低量级  $\alpha$  粒子, $\alpha$  粒子问题并没有彻底解决,但是这种状况正在改变。

在地面高度,一些器件由 IC 封装中  $\alpha$  粒子诱发的 SEU 或 SER 与大气中子基本相同;另一些器件主要是由中子诱发 SEU。但是,在航空电子设备应用环境中,大气中子注量率是地面高度的 300 倍以上,材料  $\alpha$  粒子诱发的 SEU 所占比例非常小,因此,航空电子设备 IC 封装中的  $\alpha$  粒子可以忽略。

按照 6.2.2,地面高度应用主要使用 FIT 表征翻转率,即器件在  $10^9$  h 内发生的翻转次数。SEE 试验和分析工作主要是由 IC 供应商开展,地面应用系统集成商很少开展此类试验,但最近五年,尤其是在大众新闻机构报导宇宙射线中子会导致 SEU 的事实之后<sup>[68]</sup>,这种情况正在发生变化,2000 年 11 月《财富》杂志曾发文报导,二级缓存 SRAM 发生 SEU 导致很多设备失效,服务器发生问题,诱因就是宇宙射线或  $\alpha$  粒子。服务器公司受到大量的不利报道,并且成百上千的群众开始认识到宇宙射线导致存储器错误的真相,在这种情况下,服务器制造商开始问责 SRAM 供应商,使得这个问题进一步扩大<sup>[69]</sup>。

服务器公司已关注中子 SEU,并针对器件和系统进行试验以确定 SEU 率,据此设计错误修正机制以保护系统应对此类错误。服务器公司通常对试验数据保密,外界不可获取,试验对象包括单个器件及整块计算机板。

对于地面高度的应用,IC 供应商会比服务器供应商进行更多的中子试验,且试验对象几乎都是单个器件,但他们对 SEU 或 SER 数据保密。即使 IC 供应商发布试验数据,此时翻转数据会用 FIT 为单位来表示,受试器件的型号都被隐藏而是用器件分类来代替(如,器件 A、器件 B 等)。IC 供应商一般都是在特定的年度会议上发布他们数据,例如国际可靠性物理研讨会(IRPS)。例如,最近 IRPS 论文中收录了大气中子 SEU 的相关信息,这些数据的表征单位不能被直接使用<sup>[21,22,23,52]</sup>。另外还有一些可用的中子试验数据来源于服务器销售公司。也有一些 IC 供应商会公开他们的 SEU 试验结果。他们中有两个主要的微电子制造商,分别主要制造 SRAM 型 FPGA 和 Flash 型 FPGA<sup>[69,70,71]</sup>。

### 6.3 已有数据源

6.2.1、6.2.2 和 6.2.3 中提及的公开文献中含有中子和质子试验获得 SEU 截面的相关信息。表 1 收录了部分参考文献中有关 SEU 的信息。2000 年以前发布的试验数据参见附录 A。

表 1 SEU 数据源(2000 年后发布)

受试器件	辐射源类型及能量	数据内容	参考文献	发布年代	备注
a) SEU: 18 个 SRAM 6 个 FPGA 7 个微处理器 b) SEFI: 6 个 FPGA 2 个微处理器 c) SEL: 3 个 SRAM	WNR 中子源 14 MeV 中子源 准单能中子源 高能质子	a) SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ b) SEFI 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$ c) SEL 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[76]	2010	测试数据是从 22 个独立的参考文献中整理获得;大部分的器件可通过器件编号进行标识;包括不同辐射源(中子、质子)的器件测试截面
a) 15 个 DRAM 的 SEU、MCU 和 SEFI; b) 不同 SRAM 的 SEU ( $0.1 \mu\text{m} \sim 0.25 \mu\text{m}$ )	WNR 中子源	SEU、MCU 截面, FIT/bit SEFI 截面, FIT/dev	[77]	2007	描绘了 DRAM 的 SEU 和 SEFI(>1 000 个单元翻转)和由其他文献获得的 SRAM 的 SEU
a)14 个 SRAM 的 SEU b) 2 个 SRAM 的 SEL	中子: WNR、TRIUMF、IUCF (LENS),热中子 质子: 高能质子	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ SEL 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[78]	2006	描绘了 6 款年代较久远的 SRAM(标识清晰)和 8 款年代较近的 SRAM(未能标识清楚)的截面
14 个 SRAM 的 SEU	TRIUMF 中子源(包含热中子)	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ (大气中子能谱,热中子)	[59]	2006	器件及相应的详细信息
9 个 SRAM 的 SEU	WNR,准单能中子,高能质子	SEU 截面, FIT/Mbit	[79]	2006	器件及相应的详细信息
9 个 SRAM,1 个 flash 存储器	14 MeV 中子 250 MeV 质子	SEU 和 SEL(质子)截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[80]	2006	所有器件均发生 SEU,仅有 4 个 SRAM 发生 SEL
5 个 SRAM 的 SEL	高能质子	SEL 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[4]	2005	器件的详细信息但没有器件编号,温度的影响
FPGA 的 SEU	高能质子	配置位和 BlockRAM 的 SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ SEFI 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[81]	2004	两款不同的 Virtex II 型 FPGA
8 个 SRAM ( $0.14 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$ )	高能质子和 WNR 中子	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$	[7]	2004	器件未标识清楚;SEU 截面由 WNR 和质子数据获得
6 个 SRAM	高能质子,14 MeV 中子和热中子	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$	[9]	2004	器件未标识清楚;SEU 截面由高能质子、14 MeV 中子和热中子数据获得
6 个 SRAM ( $0.18, 0.13, 0.09 \mu\text{m}$ )	150 MeV 质子	SEU 截面	[21]	2004	测试器件供应商未标识清楚,SOI 和 bulk
10 个 SRAM	WNR,准单能中子	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ (准单能) WNR 和准单能中子的 SER 比较	[79]	2004	器件及相关详细信息,单能 SEU 截面由试验获得

表 1 (续)

受试器件	辐射源类型及能量	数据内容	参考文献	发布年代	备注
FPGA, 内部 4 块区域 单独试验	高能质子	SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ SEFI 截面, $\text{cm}^2/\text{dev}$	[74]	2004	器件及器件的各部分(配置单元, BlockRAM, 电源重启单元和外设接口)均已标识清晰
6 个 SRAM (0.25, 0.13, 0.09 $\mu\text{m}$ )	WNR 中子	SER 率, FIT/Mbit	[20]	2003	从两个供应商处获得的受试器件, SOI 和 bulk
24 个 SRAM, 6 种特征 尺寸	WNR 中子	SER, $\text{n}/(\text{bit} \cdot \text{h})$ 在 12.2 km	[41]	2003	器件由 4 个供应商提供, 但未明确标识
4 个 SRAM 的 SEL	WNR	SEL 率, FIT/Mbit	[82]	2003	器件详细信息但没有器件编号, 温度的影响
9 个 SRAM (0.14 $\mu\text{m}$ ~ 0.5 $\mu\text{m}$ )	高能质子, WNR 中子	SEU 率, FIT/Mbit	[6]	2002	器件未标识清楚; SER 率由 WNR 和质子源试验获得
SRAM, DRAM 和其他 器件	高能质子	渐进的 SEU 截面, $\text{cm}^2/\text{bit}$ 或 $\text{cm}^2/\text{dev}$	[18]	2001	器件标识清晰; SEU 截面由高能质子源试验获得

## 7 SEE 试验的考虑

### 7.1 总则

以航空电子设备应用为目的的 SEE 试验需考虑多方面因素, 这些因素包括: 受试件类型(单个器件或整块电路板)、试验类型(动态或静态)以及提供中子或质子束的设施类型。在 7.2~7.4 中详细讨论这些细节。

此外, 关于如何开展 SEE 试验及建立合适的试验程序, 目前可参照很多相关的试验标准。基于重离子源开展 SEE 试验的标准有 ASTM F1192 和 JESD57<sup>[83,84]</sup>, 尽管重离子 SEE 试验标准不完全适用于指导开展中子和质子 SEE 试验, 但是这些标准中所描述的部分程序还是适用于中子和质子 SEE 试验。有 3 个中子和质子 SEE 专用试验标准, 其中 IEC 62396-1 直接适用于航空电子; JEDEC 89A<sup>[10]</sup> 也直接适用于中子 SEE 试验, 但此标准主要针对地面级应用的试验目的, 不过也可直接适用于航空电子。JEDEC 13.4<sup>[85]</sup> 是一部正在制定的适用质子 SEE 试验的标准。

### 7.2 受试件的选择

在一段时间内, 对一种器件开展试验是较容易和直接的, 如 RAM 或微处理器。然而, 真实的航空电路板包括许多对高能中子潜在敏感的器件, 这种方法可能涉及大量试验。当针对单器件开展试验时, 试验通常是在一个特殊设计的测试板上进行, 一个测试板适用于一类器件。为了快速实现试验目标, 一些组织已经倾向于整个电路板进行试验。通过这种试验, 整个电路板或电路板中的每个潜在敏感器件暴露在中子或质子束中。

如果采取逐个器件辐照的试验方法, 允许缩小辐照范围至 RAM、微处理器及 FPGA 三类主要的 SEE 极敏感器件。

单个器件辐照试验的一个优点是能够区分不同类型的 SEE。在大多数情况下, 单粒子翻转是主要效应, 正如 6.2.1 中所描述的, 但也不总是这样, 大气中子也能诱发 SEL 和 SEFI。在辐照期间, 受试器

件(DUT)发生 SEL 或 SEFI 将会混淆翻转错误的正确计数。因此,区分各种 SEE 模式是非常重要的。整块电路板辐照试验的一个优点是能够监测到板上器件发生的 SEFI 传播至其他器件而导致整块电路板运行不正常的情况,单个器件辐照试验不能发现这种影响,相反,此类效应的截面小于上述最敏感 SEE 类型的截面。

### 7.3 试验方法的选择

测试软件的选择一般取决于受试器件类型和试验设施,受试件可能是单个器件的试验板,或者是某型号航空电子电路板。如果开展 RAM、微处理器或 FPGA 的 SEE 试验,则应采用有效的方式访问试验板以识别可能发生的不同类型的 SEE。同时为防范 SEL,还应一直监测电流,因为大多数情况下锁定会引起工作电流增大,SEL 也会导致受试件功能丧失。SRAM 器件仅发生 SEU 和 SEL,测试软件通常以 1 和 0 的交替图案字作为测试向量写入受试器件特定的存储器区域内,辐照后位变化的数量就是发生 SEU 的数量,电流一直被监控以探测可能发生的 SEL,MCU 是可能发生的,且 MCU 发生的概率随器件特征尺寸减小而增加(见 IEC 62396-1:2012,附录 G 中的图 G.4)。特征尺寸为 180 nm 的器件可以预期发生 MCU 与 SEU 的比例约为 2%~3%,特征尺寸为 100 nm 的则为 30%,特征尺寸为 25 nm 的则高达 100%。有一些方法可以通过检测测试图案字来区分 MCU 和 MBU。

DRAM、微处理器和 FPGA 之类的器件在试验期间可能会发生突发错误和 SEFI,导致试验更加困难,应设计测试程序和运行于器件或评估板中的诊断辅助软件联合使用的测试方法,以检测到单位翻转之外的错误,目的是检测 SEFI 事件或称之为“挂起”或“挂机”的事件,这些错误导致器件无法正常工作,正如一个控制寄存器发生翻转。

设计能够检测 SEFI 的试验,需要详细了解器件的操作。微处理器或 FPGA,常常会使用到评估板以便使器件运行在不同的工作模式下以区分各种错误。通过了解一些 SEFI 试验结果的报告可以更好地理解测量 SEFI 的试验设计,导致“挂起”和其他引起程序流中断的错误类型可以是重离子 SEE 试验中发生的 SEFI<sup>[86,87]</sup>,也可以是质子诱发的 SEFI<sup>[88,89]</sup>。DRAM 也会发生 SEFI<sup>[90]</sup>,SRAM 在极少数情况下也会发生 SEFI,尽管质子 SEFI 截面的上限值被计算过,但是 SRAM 的 SEFI 仅在重离子试验中被观察到。

整块电路板或子系统开展 SEE 试验是非常复杂的,因为发生 SEE 的器件与其他器件相互关联的。只有经过仔细的专业分析、理解 SEE 的综合影响机制后,方可开展整块电路板或系统级 SEE 试验。由于电路板上所有的器件在同一时间都暴露在辐射中,这种试验最接近实际情况,采用这种试验中,是将系统功能中断现象作为电路板的故障进行记录,功能中断是指整个电路板而不是指某个特定器件。这种试验是动态的,一个器件发生的错误传递至其他器件,最终导致整块电路板不能正常工作<sup>[91~93]</sup>。

### 7.4 高能粒子设施的选择

#### 7.4.1 辐射源

为了使器件或整块电路板暴露于模拟大气中子环境的高能粒子中,有两种主要辐射源可以使用,即质子和中子。在这两个大的分类中,还包含大量不同种类的辐射源,这将在下面章节中进行讨论,IEC 62396-1:2012 中的附录 C 列举了可用的主要高能粒子提供场所,试验前用户应直接与实验室核对当前的价格和可用机时。

#### 7.4.2 散裂中子源

散裂中子辐射源是高能质子束轰击大型高密度靶材料产生的次级中子,这种产生中子的机制与大气中子生成机制完全相同,散裂中子能谱与大气中子能谱的分布最为相似。目前国际上主要有 3 家实验室可提供用于器件及产品的中子 SEE 试验的散裂中子源,分别是已在 6.2.1 中描述过的 WNR、TRI-

UMF 的 TNF<sup>[10]</sup> 和瑞典 TSL 的 ANITA<sup>[39]</sup>。

WNR 已非常广泛用于 SEE 试验,在 5.2 中已论述。目前,使用 ICE 实验室非常便利,其试验加速因子可达 5~6 数量级,即器件在实验室辐照 1 h 所累积的中子注量等同于在典型飞行高度 12 200 m 飞行  $2.5 \times 10^5$  h 所累积的中子注量。如今,WNR 实验室还在不断增加新的中子束流通道和辐照设备以提高其中子试验能力。

TRIUMF 的 TNF 相对于 WNR 而言,使用较不便利,但是它可以提供与大气中子非常吻合的中子能谱分布,并且可用的中子注量率( $E > 10$  MeV)可达到 WNR 的 3 倍,即试验加速因子约为高度 11 900 m 处的  $10^6$  倍。TNF 在使用上不如 WNR 便利,但是它有一个显著地优势是其产生的中子中包含热中子。图 1 比较了 ICE、TNF 和地面大气的中子能谱。

TRIUMF 在 2004 年前较少用于 SEE 试验,之后,由于 WNR 临时关闭,TRIUMF 被更多地使用。在 TRIUMF 实验室,将试验板置于粒子辐射束中是不方便的,应通过滑轮系统住下传送至通道中。TNF 试验装置有一非常大的优点就是在中子场中包含热中子,通过对同一器件进行 2 次试验,一次进行直接辐射,另一次增加一片薄镉金属板用来屏蔽热中子,对比两次试验的结果可获得产品由高能中子( $E > 10$  MeV)导致的 SEU 截面和由热中子导致的 SEU 截面。

ANITA 中子源<sup>[39]</sup>在 6.2.3.2 中简要地描述过,其特点包括:具有与 LANSCE 相当的中子注量率、用户注量率控制、宽敞用户空间(从距辐射源前 2.5 m~15 m)、中子束光斑面积从铅笔形至直径大于 1 m 可调、热中子注量率低、粒子束中的电离剂量小、在线中子放射量测定的,在同一试验活动同一束流通道中可获得白光中子和准单能中子两类辐射源。该实验室每年可使用 9 个月,自 2007 年推出以来,SEE 试验量稳步增加。

由于 ANITA 的束流光斑尺寸(从 1 cm~120 cm)可以快速调节以及注量率 [ $E > 10$  MeV,  $5 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  至  $10^6 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ] 可调节,在 ANITA 中子设施上,同一次试验活动中可以实现单个器件和大型系统的组合试验。

#### 7.4.3 单能中子源和准单能中子源

正如 6.2.3.2 指出的,单能中子和准单能中子源已经用于试验以测量器件对中子 SEE 的响应。单能中子源有两种,均由核反应产生。一种是 D-D 中子源,产生 2.5 MeV 中子;另一种是 D-T 中子源,产生 14 MeV 中子。在现阶段,可用于中子单粒子实验的单能中子源设备主要是高压倍加器。对于 2.5 MeV 的 D-D 中子源,由于中子能量较低,针对航空电子应用,开展这类低能量中子 SEE 试验没有意义,因为 90 年代中期,航空电子器件特征尺寸普遍大于  $0.5 \mu\text{m}$ ,3 MeV 中子导致的 SEU 截面相当于 14 MeV 中子导致的 SEU 截面的 1%。但是对于越来越多的现代器件,其工艺尺寸普遍小于  $0.2 \mu\text{m}$  甚至达到 45 nm,此时低能中子的贡献已经达到了 8%~10%。正如图 2 所示的高能中子 SEU 截面会随特征尺寸而变化,随着未来特征尺寸持续缩小到  $0.1 \mu\text{m}$ ,没有试验数据将无法预计 SEU 对高能和低能中子的响应变化。

QMN 具有与单能中子源相类似的产生机制,但通常采用的是加速质子束轰击锂靶。这样产生的中子具有两部分能量分布形式。其中大约一半的中子为高能中子,在能谱分布中形成一个明显的峰或伪峰,另一半中子近似平均分布在伪峰至几个 MeV 的能量范围内。因此,准中子源有一部分能量相同的高能中子,也有一部分相当多的称之为低能尾部的中子,初始入射质子的能量越高,尾部中子数据越多,伪峰中子在全中子谱中所占比例越小。

过去,使用 QMN 的最大困难是分离出能谱峰值中特定能量的高能中子对 SEE 的贡献,以区分尾部中子对 SEE 的贡献。正如 6.2.3.2 所指出的,2 个组织正在建立数据处理程序以获得峰值中子的 SEE 截面,其中一种方法是减去尾部低能中子的贡献<sup>[48~51]</sup>。

QMN 是一种有用的中子源,但是用户应保证取得的 SEU 数据是由峰值高能中子引起的,且与收集的其他所有的峰值高能中子 SEU 数据是一致的,已发现一些准单能 SEU 数据明显高于单能质子的

SEU 数据,不清楚 SEU 数据变大的原因是否与计数程序、试验设施、每轮试验期间监测的翻转数量太少或其他因素相关。

#### 7.4.4 热中子

很多不同种类的设施可以提供热中子,最为广泛应用的核反应堆,特别是用于科研或试验的核反应堆,这类反应堆通常且有一个高的热中子区域,被称之为热柱,该区域是辐照器件进行 SEU 试验的最佳位置,IEC 62396-1:2012 附录 C 列举了一批可用的提供热中子的场所。使用热柱的一个问题是热柱中子区域中伴随伽马射线,当伽马注量率太高,器件在接收中子的同时也会因吸收伽马而产生 TID 效应,对于大多数 COTS 器件在接受少于 10 krads 的剂量不会产生任何有害影响,只有当总剂量超过 20 krads~50 krads 时,才会产生影响,应避免这种情况,除非器件 TID 试验表明可以免疫这么大的总剂量效应。当器件暴露在热柱区域的中子束中,测量到的 SEU 事件都是由于热中子产生的。

已被使用于产生热中子的第二种设施是高能中子设施,这类设施既能产生高能中子( $E > 10$  MeV),也能产生热中子。TRIUMF 就是这种设施,同时产生热中子和散裂中子。真实大气中子也是这种辐射源,为了可操作,中子注量率应增大,可以在高海拔的实验室进行试验。TRIUMF 和高海拔实验室都提供高能中子( $E > 10$  MeV)和热中子的混合中子环境,为了区分高能中子和热中子诱发的 SEU 事件数,需进行 2 组试验,其中一组试验时,采用一些热中子屏蔽材料覆盖受试器件,合适的热中子屏蔽材料包括镉和硼(硼酸化的材料),这些材料仅用薄薄的一层(0.1 mm~1 mm)就可吸收所有的热中子。

因此,实施 2 组 SEU 试验,在第 1 组试验中器件暴露于所有中子束中,在第 2 组试验中屏蔽热中子,两次试验结果相减,即为热能中子诱发的 SEU 事件数,统计高能中子( $E > 10$  MeV)和热中子各自的中子数量,可以计算热中子的截面。

产生热中子的第三种设施更专业化,通常被称之为“冷中子”设施,这类设施通常被材料学家用于检测材料内部结构,因此这种设施应用需求量很大,不易获得利用这类设施开展 SEE 试验的机时。但是,NIST(国家标准和技术研究所)有一台这种设施是可用的且可以使用。使用这类设施应注意,冷中子比热中子与<sup>10</sup>B 作用效率高更易诱发 SEU 事件,因此,冷中子诱发的 SEU 数量应调整下来,以获得真正热中子相当的 SEU 事件数量<sup>[94]</sup>。

#### 7.4.5 系统和设备试验

##### 7.4.5.1 概述

由于受到中子束尺寸的限制,以上设备通常适用于进行单个电子器件和小型模块的试验。在对单个电子器件和模块进行过辐照评估之后,在更高层级进行试验有助于评估最终的电子单元或系统的设计(详见 IEC/TS 62396-3:2008)。进行这样的试验就要求中子辐射源在大范围内(例如 0.5 m<sup>2</sup>~1 m<sup>2</sup>)能够保持基本均匀,只有这样才能使全设备均接收到辐照。通常,受试设备会采用“闭环”测试,例如受试设备从外部的计算机试验系统获得测试参数并且设备的功能是依据给定的参数在一些闭环线路中运行,最终在试验过程中监测受试设备的响应。当进行设备或系统试验时,设备的响应会非常复杂(会调用大量 SEE 敏感器件),这就要求中子束流的注量率要远远低于器件级试验,通常中子注量率为 1 000 倍~10 000 倍的典型注量率。以下将介绍几个可用于整个单元或系统试验的束流发生设施。

##### 7.4.5.2 TRIUMF 的质子辐照设施(PIF)

PIF 设施通过使用铅吸收器吸收从 BL2C(116 MeV)或 BL1B(500 MeV)中发出的高能质子并在吸收器后产生中子,最终获得大范围的中子束流<sup>[95]</sup>。该中子源的能谱与大气中子能谱相似,且中子的产生机制也相似。10 MeV 及其以上中子的最大注量率大约高于海平面注量率 10<sup>7</sup> 倍。在距离铅吸收器

200 cm 处的横切面 80 cm×80 cm 的范围内,中子束流的均匀度约为 80%。该束流是为了测试地面或飞行高度中子对大型电子系统的影响而设计的。该中子源的最大中子产生率大约小于 TRIUMF 的 TNF100 倍。通过改变质子流或试验件位置的距离,可以在高于 50 000 n/(cm<sup>2</sup>·s) 至低于 1 000 n/(cm<sup>2</sup>·s) 的范围内改变试验件接收到的中子注量率。

通过改变质子束流以及调整目标的距离,PIF 可以在较宽范围内提供中子注量率<sup>[95]</sup>,并且通过综合计算束流的中子发生率和束流尺寸,可以换算出试验件接收的中子所对应的地面和航空运行的时间<sup>[95]</sup>。中子发生率的变化需要进行必要的证明以满足试验的要求,从考核航空器件的长期使用到地面复杂网络系统中用于数据处理和传递功能的关键存储器。BL2C 产生的 116 MeV 的高能质子被 20 mm 的铅吸收器吸收用于产生中子,根据试验日程 BL2C 使用率非常频繁,因此由于该束流运行较多,需要对该束流线路的不同位置进行校准。BL1B 产生的 500 MeV 的高能质子被 23 cm 的铅吸收器吸收用于产生中子,由于其运行频率低,所以使用上更方便一些。

### 7.4.5.3 TSL 的 ANITA 设备

ANITA 中子束流设备<sup>[39]</sup>(在 6.2.3.2 和 7.4.2 有简短描述)由于具有超大的中子辐射场(直径高达 120 cm)并且中子注量率可根据用户需要在 5 n/(cm<sup>2</sup>·h)~1×10<sup>6</sup> n/(cm<sup>2</sup>·h) 范围内进行控制,因而被广泛的用于系统试验。在试验过程中的任意时刻,用户都可以选择是进行系统(单元、功能板)试验还是单器件(组件)试验,或者反过来也一样,这是由于设备可以在 2.5 m~15 m 的范围内任意调整中子源与 DUT 距离,从而灵活的调整辐射束流的尺寸。这种自由选择系统试验和器件试验的方法对于试验人员来讲非常重要,它可以帮助试验人员在系统发生故障时寻找最初的故障器件。

## 8 SEE 率计算方法

### 8.1 概述

对于航空电子设备,SEE 试验目的是基于 SEE 试验结果确定器件或电路板的 SEE 率。与其他中子源相比,使用散裂中子源试验数据进行 SEE 率计算相对容易,使用其他类型中子源试验数据则相对复杂。最后综合各器件 SEE 截面数据,确定其对设备或系统的影响。

### 8.2 使用散裂中子源

当采用散裂中子源时,记录的 SEU 都是由高能中子引起的,除非辐射源中含有热中子。事实上,热中子对翻转也是有贡献的,如 TRIUMF 中子源或现实中高海拔甚至海平面的大气辐射中子中都能存在热中子,热中子的贡献应被记录在案并被减去,剩下的就是高能中子引起的 SEU。

对于航空电子设备,有两种不同的 SEU 计算方法。第一种,计算 SEU 截面,然后使用式(1);第二种,使用束流中高能中子注量率(阈值能量  $E > 10$  MeV)与大气中子注量率[6 000 n/(cm<sup>2</sup>·h)]的比值。在航空应用中,采用两种方法获得的 SEU 率相同,如下例所示。

洛斯阿拉莫斯的 WNR 或 ICE 实验室设施可提供没有热中子的中子源,使用该辐照源开展 SEE 试验,试验 1 h 内辐照中子注量率为 4.5×10<sup>9</sup> n/cm<sup>2</sup>,共监测到 250 次 SEU,其中  $E > 10$  MeV 的中子注量率是正常飞行中子注量率 6 000 n/(cm<sup>2</sup>·h) 的 7.5×10<sup>5</sup> 倍。通常,器件或电路板被辐照的中子注量是可知的,在辐照期间事件的总数是可以被测量的,从而可以计算截面,但是下述中的 SEE 率计算方法都是可用的,并且计算结果相同。使用式(2)计算中子截面,使用式(1)可计算任意环境下的事件率。

$$\text{截面(cm}^2\text{)} = \text{总事件数} / \text{总中子注量(n/cm}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

该例中,采用式(2)计算该电路板的翻转截面为 250/4.5×10<sup>9</sup> = 5.55×10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>。采用式(1)计算大气辐射环境下的翻转率为 6 000×5.56×10<sup>-8</sup> = 3.34×10<sup>-4</sup> upset/(board·h)。

假设辐照过程中加速器束流强度始终如一, SEU 截面为  $250/(7.5 \times 10^5 \times 6\ 000) = 5.56 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{board}$ 。因此, 航空应用时 (12.2 km, 纬度  $45^\circ$ ) 该电路板的 SEU 率为  $5.56 \times 10^{-8} \times 6\ 000 = 3.34 \times 10^{-4} \text{ upset}/(\text{board} \cdot \text{h})$ 。

另一种方法, 如果辐照过程中加速器束流强度始终一致, 那么已知该电路板 1 h 内在辐照强度相当于飞行高度 12.2 km 处  $7.5 \times 10^5$  倍的中子束流中监测到了 250 次翻转, 则该电路板 1 h 的翻转率为  $250/7.5 \times 10^5 = 3.34 \times 10^{-4} \text{ upset}/(\text{board} \cdot \text{h})$ 。

### 8.3 使用翻转截面—能量曲线

如果采用不同种类的中子或质子辐射源, 例如单能质子源或准单能中子源, 可以采用几种方法计算 SEE 率。最简单的方法是用最高能粒子 (约 200 MeV) 获得的 SEU 截面作为大气中子能谱下的 SEU 截面。该方法计算结果通常较保守, 因为大气中子能谱中的低能中子会产生较低的 SEU 截面。

更复杂但相对精确的方法是使用不同粒子能量的 SEU 截面形成 SEU 截面-能量曲线, 并与大气微分中子注量率进行积分, 获得更准确的谱平均 SEU 截面。依据 IEC 62396-1, 式(3)是在 12.2 km 高度时不同能量下中子注量率计算的简单形式。

$$\frac{dN}{dE} = \begin{cases} 0.346 \times E^{-0.922} \times \exp[-0.015\ 2(\ln E)^2] & E < 300 \text{ MeV} \\ 340 \times E^{-2.2} & E > 300 \text{ MeV} \end{cases} \quad \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

谱平均截面被认为与实际的大气中子测得的 SEU 截面或散裂中子源下测得的 SEU 截面非常接近。

此法的困难在于建立精确的随能量变换的 SEU 截面曲线。首先, 若使用准单能中子束, 尾部的低能中子效应应被确定并去除, 以确保计算中 SEU 截面是仅由峰值能量区中的中子诱发的。6.2.3.2 和 7.4.3 中给出了各种不同方法用于消除低能中子的影响效应以测定峰值能量区中子引发 SEU 截面。当使用单能质子束流时就不存在这个问题, 因为每次束流只有单一能量。在低能 (如小于 50 MeV) 时, 质子和中子会产生不同的 SEU 截面, 因此好的方法是使用 14 MeV 源作为最低能量点。JESD-89A<sup>[10]</sup> 中, 建议使用 50 MeV、100 MeV、150 MeV 的质子和 14 MeV 的中子来进行试验。但是, 近期一篇报告中建议用 200 MeV 或更高能量点代替 150 MeV 能量点<sup>[7]</sup>。

在每个 SEU 截面计算中应该有一个测量错误数量的最小要求, 但是在公开文献中很少会标注错误的数量。一般要求错误数量不少于 30 个, 这是因为测量误差的简化统计方法是错误数的平方根占错误数的百分比, 当错误数为 30 个时, 测量误差为 18%。目前, 有更严格的误差统计方法被用来计算误差, 如 JESD-89A 2006 附录 C 给出的方法, 该方法是基于置信度水平的统计方法。因此, 如果在 SEU 截面曲线上标示误差线会很有用, 但是, 在公开文献和报告中此类做法很少。另外, 每个 SEU 截面的实际错误数在文献中很少会详细说明。因此, 本标准建议绘制 SEU 截面曲线的同时, 标注误差线, 并将实际的单粒子事件数量和截面在报告一起出现。

第一个质子 SEU 截面拟合模型是 Bendel 模型, 仅有一个参数。经验证, 一个参数不足以表征 SEU 截面, 因而产生了更优化的两参数 Bendel 模型。Bendel 模型及随后的模型中 SEU 截面随中子或质子能量单调递增。随后形成的其他两参数模型具有更复杂的能量函数, 能给出更好的拟合结果。更近的, 用于质子 SEU 数据拟合的四参数 Weibull 模型, 是用于描述宇宙射线引起的重离子 SEU 截面变化的 Weibull 拟合的自然延伸。一旦这种 Weibull 分布被建立起来, 对于描述重离子 SEU 截面随离子 LET 的变化非常有用, 这种优势也可很容易的体现在质子 SEU 截面的表征上, 此时, 质子 SEU 截面是随粒子能量变化。因此, Weibull 分布常用于质子和中子 SEU 截面。以质子/中子能量 E 为变量的 Weibull 分布如式(4)所示:

$$\sigma(E) = \sigma_{P/N-L} \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E - E_0}{W} \right)^S \right] \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\sigma_{P/N-L}$ ——质子/中子饱和截面(高能)

$E_0$  —— 阈值能量；

$W$  —— 尺度参数；

$S$  —— 形状参数。

确定 SEU 截面的困难之一是截面随能量的变化并不是平滑的,但是 Weibull 模型、Bendel 模型均是在截面随能量平滑增长的前提下拟合出来的。使用分段线性拟合获得的结果会与 Weibull 拟合获得的结果相差 25% 或更多。如果试验结果显示 SEU 截面是随能量是不规则变化的,那么对该 SEU 数据使用线性拟合来计算大气中子的 SEU 截面时会导致偏低的结果。如图 4 所示,给出了 3 种不同 SRAM 的 SEU 截面数据<sup>[7~9]</sup>, 3 种器件均采用 Weibull 拟合式(4)、线性拟合分别与大气中子微分注量率式(3)进行积分获得真实大气中子环境下单位时间内发生 SEU 的次数,对式(3)进行积分获得单位时间内的大气中子数量,按式(5)进行计算大气中子谱平均 SEU 截面,SEU 截面随能量增加而不平滑变化的情况,两种拟合方法得到的谱平均 SEU 截面结果相差超过 25%。

$$\text{谱平均 SEU} \sigma = \frac{\int_1^{1000} \sigma(E) \left( \frac{dN}{dE} \right) dE}{\int_1^{1000} \left( \frac{dN}{dE} \right) dE} \dots\dots\dots (5)$$

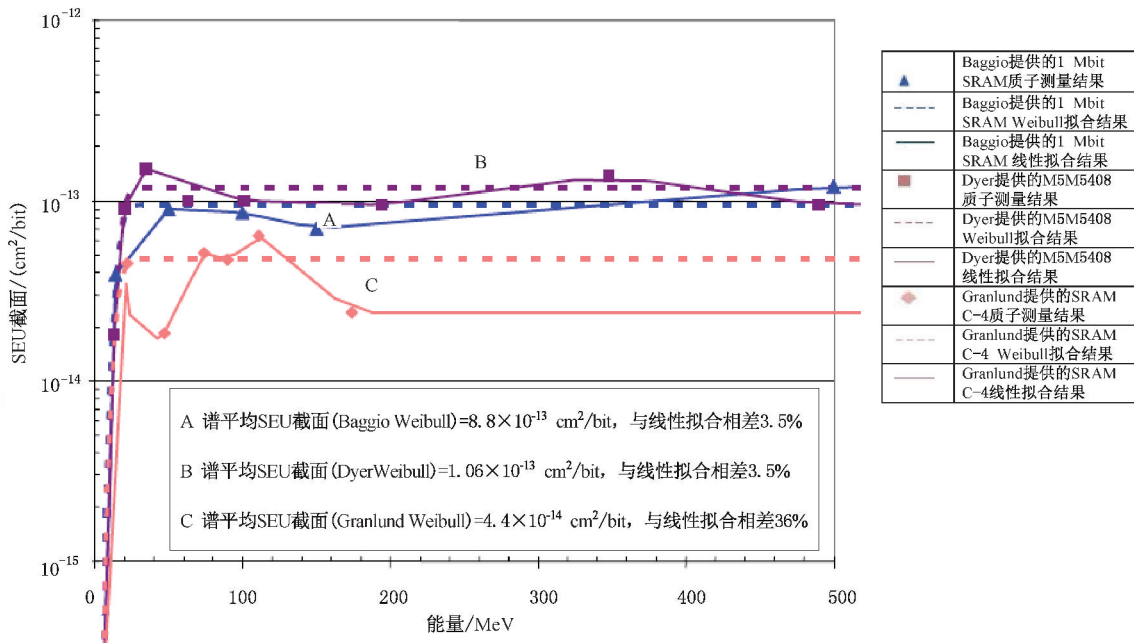


图 4 使用 Weibull 模型和分段线性模型获得的单能 SEU 截面的对比

采用 Weibull 拟合通常有如下几种理由:Weibull 拟合基于最小二乘方法,能平均出所有能量的变化;Weibull 拟合能够处理同一器件的不同样本数据,更有效的平均出不同样本数据的表现,便于表现样本数据之间的差异;Weibull 拟合的结果通常大于大气中子谱的平均 SEE 截面值。因此,从保守的观点考虑,首选 Weibull 方法。

单一 Weibull 拟合能够处理同一个器件的多个样本数据,此时,只需使用 1 次式(4)就能获得谱平均 SEU 截面。然而,使用分段线性拟合方法,第一步是使用式(5)计算每一段的谱平均 SEU 截面,第二步对每一段的谱平均 SEU 截面进行平均以获得最终的谱平均 SEU 截面。无论使用上述哪一种方法谱平均 SEU 截面均需进行一致性检验,以保证数据的准确性。若谱平均 SEU 截面的变化超过规定值,如 15%,则需要增加数据点或各数据点的错误数,以提高数据的一致性。总之,试验中在所有不同质子/中子能量获得每一个数据点的数据都需要有好的统计意义。

#### 8.4 使用不同加速器中子源测量的 SEU 率

表 2 总结了产生中子的不同加速器在 1 MeV~10 MeV、10 MeV ~100 MeV、和大于 100 MeV 三个能量范围下的特性<sup>[96]</sup>。此外,表中还加上了 TRIUMF BL1B 和 TRIUMF BL2C 这两个低注量设施。

BL1B 由于产生方法的相似性,所以其能谱的分布与 WNR 也基本相似。在能量大于 10 MeV 情况下<sup>[97]</sup>,WNR 源获得归一化的 SEE 率比 TRIUMF 源高 20%~30%。

表 2 中子能量分布谱

源	1 MeV~10 MeV	10 MeV ~100 MeV	大于 100 MeV
IEC 62396-1	35 %	35 %	29 %
JESD89A	35 %	35 %	30 %
QARM(模型)	40 %	36 %	24 %
LANSCE WNR	52 %	26 %	22 %
TRIUMF TNF	24 %	54 %	21 %
TRIUMF BL1B	52 %	29 %	19 %
TRIUMF BL2C	69 %	30 %	1 %
TSL ANITA	65 %	28 %	7 %

#### 8.5 中子源的上限能量对 SEE 率计算精度的影响——核查和修正

入射到散裂靶上的初始质子束能量是确定人造散裂中子谱产生与大气中子谱相似度的一个关键因素。在这方面,目前 LANSCE ICE 实验室<sup>[98]</sup>表现最好,其初始质子能量最高(800 MeV)。在 TRIUMF<sup>[28,95]</sup>,TNF/NIF(BL1A)和 PIF(BL1B)中子源的初始质子能量为 500 MeV,PIF(BL2C)的初始质子能量为 116 MeV。TSL ANITA<sup>[39]</sup>的初始质子源能量为 180 MeV。这些初始质子最高能量受到限制时,其产生的中子能谱与宇宙射线产生的自然大气中子谱的相似性也会降低。

针对现代器件<sup>[99]</sup>,基于低上限能量的中子谱试验数据预计 SEE 率会引入较大的误差,对过去老旧器件,这种可忽略。已建立了新的方法以修正相对低上限能量中子谱的影响,该方法中需要另一组高能粒子(中子/质子)的 SEE 试验数据。一种可取的做法是,通过应用文献中的大量截面数据,建立调整因子以减小 SEE 率(源自低上限能量中子谱)的误差。

这种调整方法是新的且还没有被正式认可,但是对于无法使用高能中子谱而只能使用具有低能谱的设施时还是很有用处的。这种多组数据来修正改善其中一组数据的概念是新颖的,但是在实践和理论上还存在局限性。该方法可适用于现代 COTS 器件的 SEU 数据结果的分析,但在某些器件中的 SEL 或 SHE 受上限中子能量影响较大,此方法应慎用。

对于某些器件中的 SEL 或 SHE 现象,中子最高能量受限的影响可能不能忽略。如果怀疑存在这种情况,需要使用初始质子束流或 QMN 源在与上限中子能量相同或接近的能量点进行试验,以确定其对上限中子能量的敏感性。结合 QMN(或质子)源的截面测量结果可补偿在散裂源中低上限中子能量

给截面测量结果带来的影响<sup>[99]</sup>。并且当 LANSCE 源无法使用或不适用时,这种方法也可以将 SEE 率折算成 LANSCE 源的结果,例如因 DUT 尺寸而无法在 LANSCE 进行试验。

Platt 等人<sup>[99]</sup>的方法对于现代器件的 SEU 非常适用。但另一方面,一旦遇到 SEL 或 SHE 现象就非常麻烦,此时该方法需要经过适当的分析并小心使用。在实际试验中这种方法还需要更广泛使用,包括确认比较不同设施 SEE 数据与实际大气能谱的 SEE 数据。

附 录 A  
(资料性附录)

2000 年以前公布的 SEE 数据源

表 A.1 2000 年以前公布的 SEE 数据源

受试器件	辐射源类型及能量	数据内容	参考文献	发布年代	备注
6 个 SRAM 2 个微处理器 2 个 FPGA	高能质子, WNR 中子 14MeV 中子	SEU 截面, cm <sup>2</sup> /bit	[8]	1998	器件标识清楚; 通过 WNR、14MeV 和质子数据获得 SEU 截面
5 个 SRAM	QMN	SEU 截面, cm <sup>2</sup> /bit	[48]	1998	器件标识清楚; 通过测试获得单能 SEU 截面
20 个 SRAM 26 个 DRAM	高能质子 WNR 中子	SEU 截面, cm <sup>2</sup> /bit	[5]	1997	器件标识不清; 中子和质子数据的最大 SEU 截面
5 个 SRAM	3 和 14MeV 中子	SEU 截面, cm <sup>2</sup> /bit	[36]	1997	器件标识清楚; 由中子数据获得 SEU 截面
87 个 SRAM 48 个 DRAM 10 个 EEPROMs 8 个 Flash EPROMs 8 个 UV EPROMs	高能质子(20、30、 50、60、100、200、 300 和 500 MeV)	SEU 截面, cm <sup>2</sup> /bit	[64]	1997	所有器件标识清楚; 器件受试时间在 1989 年~1996 年

## 参 考 文 献

- [1] HEIMSTRA D.M and BLACKMORE E.W. “LET Spectra of proton energy levels from 50 to 500 MeV and their effectiveness for Single Event Effects Characterization of Microelectronics” IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50 No. 6 December 2003
- [2] VASILYIY V. Markelov and Michael G. Tverskoy “Evaluation of LET Spectra Produced by High Energy protons in Si” RADECS 2005 Proceedings
- [3] O’BRYAN M. V. et al, “Compendium of Current Single Event Effects Results for Candidate Spacecraft Electronics for NASA,” Workshop Record, 2007 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 153
- [4] SCHWANK J. et al, “Effects of Particle Energy on Proton-Induced Single-Event Latchup,” IEEE Trans. Nucl. Sci., 52, 2622, (2005)
- [5] KERNESS and TABER. Neutron SEU Trends in Avionics. Workshop Record, 1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 1997, p. 67
- [6] DODD, P. E. et al. Neutron-induced Soft Errors, latchup and Comparison of SER test Methods for SRAM Technologies. IEDM Tech. Dig., 2002, p. 333
- [7] BAGGIO, J. et al. Analysis of Proton/Neutron SEU Sensitivity of Commercial SRAMs-Application to the Terrestrial Environment Test Method. IEEE Trans. Nucl. Sci, 2004, 51
- [8] NORMAND, E. Extensions of the Burst Generation Rate Method for Wider Application to Proton/Neutron-Induced Single Event Effects. IEEE Trans. Nucl. Sci, 1998, 45, p. 2904
- [9] DYER, C. et al. An Experimental Study of Single-Event Effects Induced in Commercial SRAMs by Neutrons and Protons from Thermal Energies to 500 MeV. IEEE Trans. Nucl. Sci, 2004, 51, p. 2817
- [10] JESD-89A, Measurement and reporting of alpha particles and terrestrial cosmic rayinduced soft errors in semiconductor devices, Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC), 2006
- [11] SLAYMAN, C., “Accuracy of Various Broad Spectrum Neutron Sources for Accelerated Soft Error Testing,” SELSE6, Stanford University, March 23, 24 (2010)
- [12] IBE, E., “Novel Features in SER Characteristics toward New Standards,” Special Session 1- Panel; SER standards; Where we are? What’s next? IOLTS2010, Corfu Island, Greece, July 5-7 (2010)
- [13] O’BRYAN, M. et al. Recent Radiation Damage and Single Event Results for Candidate Spacecraft Electronics. Workshop Record, 2001 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2001, p. 82
- [14] O’BRYAN, M. et al. Current Single Event Effects and Radiation Damage Results for Candidate Spacecraft Electronics. Workshop Record, 2002 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2002, p. 85
- [15] O’BRYAN, M. et al. Single Event Effects Results for Candidate Spacecraft Electronics, Workshop Record, 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2003, p. 65
- [16] O’BRYAN, M. et al. Current Single Event Effects Results for Candidate Spacecraft Electronics for NASA. Workshop Record, 2004 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2004, p. 10
- [17] COSS, J. et al. Device SEE Susceptibility Update: 1996-1998. Workshop Record, 1999 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 1999, p. 60
- [18] COSS, J. et al. Device SEE Susceptibility Update: 1999-2000. Workshop Record, 2001,

IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2001, p. 106

[19] COSS, J. Update of Integrated Circuit SEE Responses: 2001-2002. Workshop Record, 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2003, p. 43

[20] ROCHE, J. et al. Comparisons of Soft Error Rate for SRAMs in Commercial SOI and Bulk Below the 130-nm Technology Node. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, 50, p. 2046

[21] CANNON, E. et al. SRAM SER in 90, 130 and 180 nm Bulk and SOI Technologies. Proc. 42nd Int. Reliability Phys. Symp., 2004, p. 300

[22] KOBAYASHI, H. et al. Comparison Between Neutron-Induced System SER and Accelerated SER in SRAM. Proc. 42nd Int. Reliability Phys. Symp., 2004, p. 300

[23] SINITSKY, D. et al. SER Reliability of 1TRAM Designs. Proc. 40nd Int. Reliability Phys. Symp., 2002, p. 226

[24] NASA-JSC Test Report, JSC 28415, Radiation Test Summary Report for Elements of the EVA Display, Aug. 1998

[25] NASA-JSC Test Report, JSC 28414, Radiation Test Summary Report for the OCA Router, Aug. 1998

[26] NASA-JSC Test Report, JSC 29199, Radiation Test Report Octagon 2133 Processor Board, Liquid Crystal Display, and Ethernet Boards, Aug. 2000

[27] Los Alamos National Laboratory. ENDF/B-VII Incident-Neutron Data [online]. Available from: <http://t2.lanl.gov/data/neutron7.html>.

[28] BAGGIO, J. et al. Single Event Upsets Induced by 1-10 MeV Neutrons in State-RAMs Using Mono-Energetic Neutron Sources. 2007, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 2149 - 2155.

[29] WROBELL, F, et al. Contribution of SiO<sub>2</sub> in Neutron - Induced SEU in SRAMs. 2003, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, pp. 2055

[30] GORDON, M.S. et al. Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, 51, p. 3427

[31] GORDON, M.S. et al. Correction to “Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground”. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005, 52, p. 2703

[32] GOLDHAGEN, P, et al. Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane. 2002, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 476, pp. 42-51

[33] GOLDHAGEN, P., et al. The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude. 2004, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 110, pp. 387-392

[34] Hands, A., et al. Single Event Effects in Power MOSFETs and SRAMs Due to 3 MeV, 14 MeV and Fission Neutrons. 2011, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 58, pp. 952-959

[35] Ibe, E. (Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.), Taniguchi, H., Yahagi, Y., Shimbo, K., and Toba, T., “Impact of Scaling on Neutron-Induced Soft Error in SRAMs from a 250nm to a 22nm Design Rule,” TED, Vol.57, No.7, pp. 1527-1538 (2010)

[36] THOUVENOUT, D. et al, Neutron Single Event Effect Test Results for Various SRAM Memories. Workshop Record, 1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 61, 1997

[37] Los Alamos helps industry by simulating circuit failures from cosmic rays, Science Daily, June 11, 2004. Available from: <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/06/040610080526.htm>

- [38] BLACKMORE, E. et al. Improved Capabilities for Proton and Neutron Irradiations at TRIUMF. Workshop Record, 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 149
- [39] A. V. Prokofiev, J. Blomgren, M. Majerle, R. Nolte, S. Röttger, S. P. Platt, A. N. Smirnov, “Characterization of the ANITA Neutron Source for Accelerated SEE Testing at The Svedberg Laboratory”, 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop, Quebec, Canada, July 20-24, 2009, pp. 166-173
- [40] NORMAND, E. Single Event Upset at Ground Level. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996, 43, p. 2742
- [41] GRANLUND, T. et al. Soft Error Rate Increase for New Generations of SRAMs. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, 50, p. 2065
- [42] TAKALA, B. Single Event Effect Measurements at the LANSCE ICE House. Available from: <http://www.lansce.lanl.gov/research/ICEHouse.html>
- [43] ABROSIMOV, N.K. et al. Development and Experimental Study of the Neutron Beam at the Synchrocyclotron of the Petersburg Nuclear Physics Institute for Radiation Tests of Electronic Components. Instruments and Experimental Techniques 2010, Vol. 53, No 4 pp. 469-476
- [44] SUGIMOTO, K., Asai, H., Nashiyama, I., Fukuda, M., Iwamoto, Y., and Sakamoto, Y., “Flux Verification of High Intensity Spallation Neutron Beam for SEE Testing,” RASEDA2010, Takasaki, Japan, Oct. 27-29, 2010 (2010)
- [45] ANDREANI C, Pietropaolo A, Salsano A, Gorini G, Tardocchi M, Paccagnella A, Gerardin S, Frost CD, Ansell S, Platt SP “Facility for fast neutron irradiation tests of electronics at the ISIS spallation neutron source”, Applied Physics Letters Volume: 92 Issue: 11 Article Number: 114101 Published: 2008
- [46] FROST, C.D. Ansell, S., and Gorini, G., “A New Dedicated Neutron Facility for Accelerated SEE Testing at the ISIS Facility,” IRPS2009, Montreal, Quebec, Canada, April 28-30, No. SE6, pp. 952- 954 (2009)
- [47] PROKOFIEV, A. V. et al. The TSL Neutron Beam Facility, Rad. Prot. Dosim. v. 126, pp. 18-22 (2007); doi: 10.1093/rpd/nem006.
- [48] JOHANSSON, K. et al. Energy-Resolved Neutron SEU Measurements from 22 to 160 MeV. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, 45, p. 2519
- [49] GRANLUND, T. et al. A Comparative Study Between Two Neutron Facilities Regarding SEU. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, 51, p. 2922
- [50] NAKAMURA, T. et al. Development of p-Li Quasi-Monoenergetic Neutron Field Between 20 and 90 MeV for Cross Section and Shielding Experiments. Proceedings of the 8th International Conference on Radiation Shielding, Arlington, TX, April 1994
- [51] IBE, E. et al. A Self-consistent Integrated System for Terrestrial Neutron Induced Single Event Upset of Semiconductor Devices at the Ground. Proceedings of the International Conference on Information Technology and Applications, 2002
- [52] YAHAGI, Y. et al. Threshold Energy of Neutron-Induced Single Event Upset as a Critical Factor. Proc. 42nd Int. Reliability Phys. Symp., 2004, p. 669
- [53] NORMAND, E. Extensions of the FOM Method - Proton SEL and Atmospheric Neutron SEU. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, 51
- [54] DYER, C. et al. Neutron-Induced Single Event Effects Testing across a Wide Range of Energies and Facilities and Implications for Standards. IEEE Trans. Nucl. Sci., Dec. 2006, v. 53, p. 3596

[55] IBE, E., "Novel SER Standards: Backgrounds and Methodologies," ICICDT, Grenoble, France, June 2-4, pp. 203-207 (2010)

[56] SIERAWSKI, B.D., Pellish, J.A., Reed, R.A., Schrimpf, R.D., Warren, K.M., Weller, R.A., Mendenhall, M.H., Black, J.D., Tipton, A.D., Xapsos, M.A., Baumann, R.C., Deng, X., Campola, M.J., Friendlich, M.R., Kim, H.S., Phan, A.M., and Seidleck, C.M., "Impact of Low-Energy Proton Induced Upsets on Test Methods and Rate Predictions," TNS, Vol.56, No.6, pp. 3085-3092 (2009)

[57] AGOSTEO, S. et al. Single Event Effects Measurements on the Electronics for the CMS Muon Barrel Detector at LHC. Nucl. Instr. Meth., 2002, A 489, 357

[58] NORMAND E. et al. Quantifying the Double-Sided Neutron SEU Threat, from Low Energy (Thermal) and High Energy (>10 MeV) Neutrons. 2006, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 53, pp. 3587

[59] GRANLUND T. and N. Olsson, "A comparative study between proton and neutron induced SEUs in SRAMs," IEEE Trans. Nucl. Sci. vol 53, 1871-1875, 2006

[60] GUENZER, C. S. et al., Single Event Upset of Dynamic RAMs by Neutrons and Protons. IEEE Trans. Nucl. Soc., 1979, NS-26, p. 5048

[61] HEIDEL D.F. (IBM T. J. Watson Research Center, USA), Marshall, Paul W., Pellish, J.A., Rodbell, K.P., LaBel, K.A., Schwank, J.R., Rauch, S.E., Hakey, M.C., Berg, M.D., Castaneda, C.M., Dodd, P.E., Friendlich, M.R., Phan, A.D., Seidleck, C.M., Shaneyfelt, M.R., and Xapsos, M.A., "Single-Event Upsets and Multiple-Bit Upsets on a 45 nm SOI SRAM," TNS, Vol.56, No.6, pp. 3499-3504 (2009)

[62] HARBO-SORENSEN, R. et al. Radiation Pre-screening of 4 Mbit Dynamic Random Access Memories for Space Applications. RADECS 91, Proceedings of the First European Conference on Radiation and its Effects on Devices and Systems, Montpellier, France, Sept. 1991, p. 489

[63] STAPOR, W. J. et al., Two Parameter Bendel Model Calculations for Predicting Proton Induced Upset, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-37, 1966 (1990)

[64] HARBO-SORENSEN, R. Proton SEE Results-A Summary of ESA's Ground Test Data. Workshop Record, 1997 RADECS Conference Data Workshop, 1997, p. 89

[65] Coy Kouba, "Proton Radiation test results on COTS-Based Electronic Devices for NASA-Johnson, Space Center Spaceflight projects", NSREC Radiation Effects Data Work Shop 2006

[66] ZIEGLER, J. F. et al. IBM Experiments in Soft Fails in Computer Electronics (1979-1984). IBM J. Res. Develop., 1996, 40, p. 3

[67] LAGE, C. et al. Soft Error Rate and Stored Charge Requirements in Advanced High Density SRAMs. IEDM Tech. Digest, 1993, p. 821

[68] Sun Screen, Forbes, November 13, 2000

[69] BASTON, P. Unsafe at Any Speed? Looking under the hood at Sun's recent server engine problems. Available from: <http://www.sparcproductdirectory.com/artic-2002-jan-pb.html>

[70] IBE E., Chung, S., Wen, S., Yamaguchi, H., Yahagi, Y., Kameyama, H., Yamamoto, S., and Akioka, T., "Spreading Diversity in Multi-cell Neutron-Induced Upsets with Device Scaling," 2006 CICC, San Jose, CA., September 10 - 13, 2006, pp. 437-444 (2006).[Cisco]

[71] SCHINDLBECK G. (Infineon), and C. Slayman, "Neutron-Induced Logic Soft Errors in DRAM Technology and Their Impact on Reliable Server Memory," IEEE Workshop on Silicon Errors in Logic - System Effects 3, Austin Texas, April 3, 4, 2007[Sun]

[72] BORUCKI L., G. Schindlbeck, and C. Slayman, "Comparison of Accelerated DRAM Soft Error Rates Measured at Component and System Level," IRPS 2008, Phoenix, Arizona, April 27-May 1, 2008, No.5A.4, pp. 482-487.[Sun]

[73] FABULA, J. et al. The NSEU Response of Static Latch Based FPGAs, presentation by Xilinx Corp. May, 2004. Available from: [http://www.xilinx.com/esp/mil\\_aero/collateral/RadiationEffects/NSEU\\_response.pdf](http://www.xilinx.com/esp/mil_aero/collateral/RadiationEffects/NSEU_response.pdf)

[74] KOGA, R. et al. Comparison of Xilinx Virtex-II FPGA SEE Sensitivities to Protons and Heavy Ions. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, 51, p. 2825

[75] Radiation Results of the SER Test of Actel, Xilinx and Altera FPGA Instances, IROC Technologies report prepared for Actel Corp., March 2004. Available from: <http://www.actel.com/documents/RadResultsIROCreport.pdf>

[76] NORMAND E. and DOMINIK L. "Cross Comparison Guide for Results of Neutron SEE Testing of Microelectronics Applicable to Avionics," Workshop Record, 2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 50

[77] SCHINDLBECK G. and SLAYMAN C., "Neutron-Induced Multi-cell and Logic Soft Errors in DRAM Technology and Their Impact on Reliable Server Memory," presented at 2007 SELSE Meeting (Silicon Errors in Logic - System Effects)

[78] DYER C. et al, "Neutron-Induced Single Event Effects Testing Across a Wide Range of Energies and Facilities and Implications for Standards." IEEE Trans. Nucl. Sci. vol 53, 3596-3601, 2006

[79] GRANLUND T. and N. Olsson, "SEUs Induced by Thermal to High-Energy Neutrons in SRAMs," IEEE Trans. Nucl. Sci. vol 53, 3798-3802, 2006

[80] CHUMAKOV A. et al, "SEE in SRAM and Flash Memory under Proton and 14 MeV Neutron Irradiation," presented at RADECS 2006

[81] "Xilinx Single Event Effects 1st Consortium Report Virtex-II Static SEU Characterization," G. Swift, Ed. JPL, January, 2004

[82] DODD P. et al., "Neutron-Induced Latchup in SRAMs at Ground Level," Proceedings, 41st International Reliability Physics Symposium, April 2003, p. 51

[83] ASTM F1192-00:2000, Standard Guide for the Measurement of Single Event Phenomena (SEP) Induced by Heavy Ion Irradiation of Semiconductor Devices

[84] JESD57:1996, Test Procedures for the Measurements of Single-Event Effects in Semiconductor Devices from Heavy Ion Irradiation

[85] JEDEC 13.4, Draft Test Standard For The Measurement Of Proton Radiation Effects In Microelectronic Devices

[86] KOUBA, C. and CHOI, G. The Single Event Upset Characteristics of the 486-DX4 Microprocessor. Workshop Record, 1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 48

[87] IROM, F. et al. Single-Event Upset in Commercial Silicon-on-Insulator PowerPC Microprocessors. IEEE Trans. Nucl. Soc., 2002, 49, p. 3148

[88] LAYTON, P. et al. Radiation Testing Results of COTS-Based Space Microcircuits. Workshop Record, 1998 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 170

[89] HADDAD, N et al, SOI: Is it the Solution to Commercial Product SEU Sensitivity, paper presented at the RADECS 2003 Conference

[90] KOGA, R. et al. Permanent Single Event Functional Interrupts (SEFIs) in 128- and 256-

Megabit Synchronous Dynamic Random Access Memories (SDRAMs). Workshop Record, 2001 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 6

[91] LABEL, K. et al. SEU tests of a 80386 Based Flight-Computer/Data Handling System and of Discrete PROM and EEPROM Devices and SEL Tests of 80386, 80387, PROM, EEPROM and ASICs. Workshop Record, 1992 IEEE Radiation Effects Data Workshop, p. 1

[92] NORMAND, E. and WERT, J. L. Test and Analysis Report on the Single Event Effects Testing and Analysis of the OFM-1020 Avionics Optical Time-Domain Reflectometer. Boeing report prepared for the International Space Station Fiber Optic Team 5, Oct. 2000

[93] BELCASTRO, C., EURE K. and HESS, R. Closed-Loop Neutron Particle Effects Testing on Flight Control Computers, Paper presented at the 2004 SEE Symposium, April, 2004

[94] BAUMANN, R. C. and SMITH, E. B. Neutron-Induced Boron Fission as a Major Source of Soft Errors in Deep SRAM Devices. Proc. 38th Int. Reliability Phys. Symp., 2004, p. 152

[95] BLACKMORE E. W. Development of a large Area neutron beam, for system Testing at TRIUMF. Workshop Record, 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop, W-25 pp. 157- 160

[96] SLAYMAN C., "Theoretical correlation of broad spectrum neutron sources for accelerated soft error testing", IEEE Trans. Nucl. Sci. vol 57, 3163-3168, 2010

[97] HANDS A., C.S. Dyer and F. Lei, "SEU rates in atmospheric neutron environments: Variations due to cross section fits and environment models" IEEE Trans. Nuc l. Sci. vol 56, 2026-2034, 2009

[98] Los Alamos Neutron Science Center. About WNR Beam. [Online] [Cited: 11 March 2011.]. Available from: <http://wnr.lanl.gov/newwnr/About/Beam.shtml>

[99] PLATT S., A.V. Prokofiev, X.X. Cai, "Fidelity of energy spectra at neutron facilities for single-event effects testing", Proc. 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp. 411 - 416

国标准出版社授权北京万方数据股份有限公司在中国境内(不含港澳台地区)推广使用

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
大气辐射影响 航空电子系统  
单粒子效应试验指南

GB/T 34955—2017/IEC 62396-2:2012

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: [www.spc.org.cn](http://www.spc.org.cn)

服务热线: 400-168-0010

2017年11月第一版

\*

书号: 155066·1-57658

版权专有 侵权必究



GB/T 34955-2017

国标准出版社授权北京万方数据股份有限公司在中国境内(不含港澳台地区)推广使用