

IDT6116 单粒子敏感性评估试验技术研究

薛玉雄¹, 曹 洲¹, 杨世宇¹, 田 恺¹, 郭 刚², 刘建成²

(1. 兰州物理研究所 真空低温技术与物理国防科技重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要:为评估 IDT6116 SRAM 单粒子敏感性, 采用地面试验方法和地面试验系统, 利用脉冲激光、重离子和²⁵²Cf 源 3 种不同的地面模拟源, 对 IDT6116 SRAM 器件进行单粒子敏感性试验研究, 并对 3 种不同的模拟源的试验结果进行等效性分析比较, 同时进行总剂量效应对单粒子效应影响的试验研究。研究表明: IDT6116 SRAM 抗单粒子翻转和锁定的能力较强; 接受一定辐照剂量后的试验样品对单粒子翻转更加敏感, 且翻转阈值略有降低, 翻转截面略有增大。

关键词: IDT6116 SRAM; 单粒子翻转; 单粒子锁定; 脉冲激光; 重离子; ²⁵²Cf 源

中图分类号: TL632.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)01-0022-06

Study on IDT6116 Single-Event Effect Sensitivity Evaluation Testing Technology

XUE Yu-xiong¹, CAO Zhou¹, YANG Shi-yu¹, TIAN Kai¹, GUO Gang², LIU Jian-cheng²

(1. *National Laboratory of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics,*

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. *Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)*

Abstract: Using single-event effect (SEE) sensitivity evaluation test method and test system as well as three kinds of simulation sources (pulsed laser, heavy ion and ²⁵²Cf), the SEE sensitivity of IDT6116 SRAM was experimentally researched. A comparison of testing results' equivalent for three kinds of simulation sources was performed. In addition, the influence of total dose effects on SEE was also researched. It is seem that occurred single-event upset probability is very little and the resistance to SEE is better for IDT6116 SRAM.

Key words: IDT6116 SRAM; single-event upset; single-event latch-up; pulsed laser; heavy ion; ²⁵²Cf source

空间辐射环境的带电粒子会使航天器电子系统中的电子器件或电路发生单粒子效应, 严重影响航天器的在轨寿命和可靠性, 由单粒子

事件引起的航天器故障和异常屡见不鲜。如美国 UOSAT-2 卫星在 1988—1992 年间发生了约 9 000 次单粒子翻转 (SEU) 事件, 我国“风云

一号(B)”气象卫星因主控计算机发生 SEU 事件导致卫星姿态失控。另外,航天器各系统功能日益增强,将在更大程度上依赖复杂的微电子设备,这样一来,设备整体复杂性增加,发生单粒子事件的几率随之增大。随着航天器使用的电子器件尺寸变小和集成度提高,由单粒子事件诱发的航天器故障和异常也将大幅增加。因此,单粒子效应对在轨航天器运行构成的威胁愈加严重,成为影响航天器在轨生存能力的重要因素^[1]。故对单粒子效应研究是目前国际上的研究热点^[2]。

对单粒子效应的研究有空间飞行实验研究和地面模拟研究 2 种途径。前者是研究单粒子效应最为直接的手段,研究结果直观、针对性强,但所需费用巨大、周期长,因此,并非最佳的单粒子效应研究手段;地面模拟研究能够弥补空间飞行实验研究的不足,是研究单粒子效应的常用方法。在单粒子效应地面模拟试验和加固评估验证时,实验室采用的模拟源主要有重离子加速器、铯源裂变碎片及脉冲激光模拟源。本工作结合实验室的铯源单粒子效应模拟实验系统、激光单粒子效应模拟实验系统及中国原子能科学研究所的 HI-13 串列加速器,对 IDT6116 器件进行抗单粒子效应能力试验技术研究,探索地面评估星用器件抗单粒子效应敏感性技术。

1 试验方法

1.1 试验器件

试验器件为商用 IDT6116 SRAM,对试验器件进行揭盖处理,使其最大可能产生单粒子效应。IDT6116 为 $2k \times 8$ 位高速静态存储器,它采用 IDT 公司的高特性、高可靠 COMS 工艺制造,数据存取时间最高可达 15 ns。器件的输入/输出与 TTL 电平兼容,数据读写具有全静态同步特性,无需刷新和时钟指令操作。IDT6116 SRAM 功能块原理示于图 1。

1.2 试验原理

试验主要是对辐照环境下静态存储器数据存取正确性测试。在辐照试验开始前,给寄存器写入数据(分别选择 00H、55H、AAH 和 FFH),在小循环里,连续读并比较寄存器的内容是否一致,若不一致即发生了翻转,计数器的

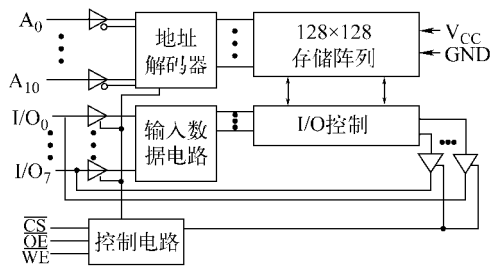


图 1 IDT6116 功能块原理图

Fig. 1 Functional block diagram of IDT6116

累积次数加 1,寄存器自动重新写一遍数据,继续进行循环读取比较。通过 A/D 转换器和电流传感器,实时监测试验样品电流输入,当被测器件的实测电流大于器件的最大功耗电流,则认为发生了闭锁,这时,控制部分将切断被测器件的电源,1 ms(可调)后重新恢复。

1.3 单粒子效应试验测试系统

试验中建立的 IDT6116 存储器单粒子效应测试系统结构示于图 2。该系统主要由被测芯片 IDT6116 SRAM 系统、监测控制 CPU (AT89C52)系统、被测器件的电流信号输入及保护控制系统和上位监控计算机系统等组成。监控 CPU 系统通过 RS422 与上位计算机实现数据通信,由硬件电路实现对被测 IDT6116 电流的监控。在整个测试过程中,测试程序操作友好、方便,应用程序界面可动态显示 IDT6116 的功耗电流曲线、复位曲线、累计锁定次数、翻转标识、累计翻转次数和发生翻转的逻辑单元地址(图 3)。

试验监测系统由 1 台稳压电源、电源线、串口线和 1 台地面监测计算机组成。稳压电源为测试系统提供 24 V 电源,监测计算机通过 RS422 标准的串口与被测系统上微处理器监控 CPU 进行数据通讯,实时记录测试结果,通讯速率为 9.6 kb/s。

2 试验过程

2.1 激光模拟试验

1) 激光模拟单粒子效应实验系统

实验室的激光模拟单粒子效应试验系统主要包括:激光器系统(纳秒级激光器,波长 $1.079 \mu\text{m}/0.540 \mu\text{m}$ 、脉宽 9~12 ns;皮秒级激光器,波长 $1.064 \mu\text{m}/0.532 \mu\text{m}$ 、脉宽 20~30 ps)、

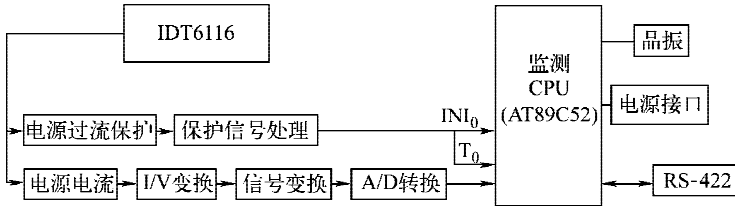


图2 IDT6116器件SEE测试系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of IDT6116 SEE testing system

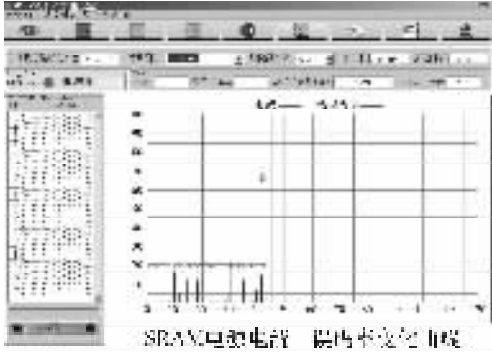


图3 测试操作程序界面

Fig. 3 Operational procedure interface

聚焦定位系统(聚焦定位平台可三维调节,最小移动步长 $1.25 \mu\text{m}$,聚焦光斑直径 $2\sim 5 \mu\text{m}$)及控制和测试系统等组成。

2) 试验过程

将准备好的样品插入试验电路板,测试和判断测试系统功能是否完善。将试验电路板固定在 X-Y 移动平台上,保证实验样品芯片表面的敏感部位垂直于入射激光束,三维调节 X-Y 移动平台,以满足激光聚焦和定位的实验要求。对 IDT6116 SRAM 试验样品进行全面扫描,确定单粒子效应敏感区域,并选取一定的激光器、波长及能量进行辐照。

3) 试验结果及其分析

选用皮秒级激光系统(波长 $1.060 \mu\text{m}$)和纳秒级激光系统(波长 $1.079 \mu\text{m}$)进行激光辐照试验,将得到的 IDT6116 SRAM 单粒子效应敏感区域、单粒子翻转和锁定试验数据(阈值能量)列于表 1。

试验观测到, IDT6116 芯片不同区域发生单粒子效应的敏感性相差甚远,有的区域极易发生 SEE 现象,有的区域根本不发生 SEE 现象。发生单粒子锁定时,整个逻辑电路输出呈现混乱状态,电路中发生锁定的局部区域电流

表 1 IDT6116 芯片 SEE 激光模拟试验结果

Table 1 Experiment data of IDT6116 laser simulation SEE

| SEU 能量阈值/nJ | SEL 能量阈值/nJ | 测试码变化规律 |
|-------------|-------------|---|
| 0.62 | 0.414 | 00H 变 10H, 55H 变 45H, AAH 变 BAH, FFH 变 EFH |

注: SEU 试验用皮秒激光器; SEL 试验用纳秒激光器

迅速上升至几百毫安或更高,同一器件不同区域发生单粒子锁定的敏感性相差甚远(图 4)。不同测试码的单粒子翻转变化规律为 $00\text{H} \rightarrow 10\text{H}$, $55\text{H} \rightarrow 45\text{H}$, $\text{AAH} \rightarrow \text{BAH}$, $\text{FFH} \rightarrow \text{EFH}$, 验证了由 $1 \rightarrow 0$ 比 $0 \rightarrow 1$ 更易发生翻转^[5], 这一结果与国内外研究结论一致。IDT6116 发生 SEU 和 SEL 的激光能量阈值分别为 0.62 nJ (等效重离子 $\text{LET} = 3.47 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[3]) 和 0.414 nJ (等效重离子 $\text{LET} = 14.9 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[3])。

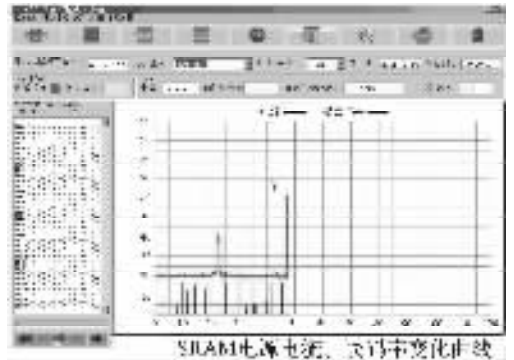


图4 IDT6116 发生单粒子效应测试图

Fig. 4 IDT6116 SRAM SEE testing picture

2.2 重离子加速器模拟试验

1) 试验过程

试验在中国原子能科学研究院核物理研究所国家级实验室 HI-13 串列静电加速器上进行。为减少剂量率效应和多次翻转的可能,首

先用金箔散射法降低重粒子束流强度,即用重粒子轰击金靶,利用散射离子来辐照样品,并在真空靶室内装有一定厚度的铝挡板,以挡住次级离子;然后准确测量束流,在挡板内侧安装探测器和法拉第筒(与试验样品一起安装在可转动的支架上),在辐照样品的同时,实时监测束流强度。试验中选取 5 种不同离子进行辐照,选取的辐照离子参数(离子种类、能量、离子在硅中射程及 LET)列于表 2。

表 2 辐照重离子参数

Table 2 Radiation heavy ion parameters

| 离子种类 | 能量/MeV | 硅中射程/ μm | LET/(MeV· $\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$) |
|------|--------|---------------------|--|
| 碳离子 | 65.42 | 93.12 | 2.00 |
| 碳离子 | 55.16 | 71.56 | 2.20 |
| 碳离子 | 45.96 | 55.55 | 2.51 |
| 碳离子 | 40.0 | 46.51 | 2.77 |
| 碳离子 | 35.96 | 41.42 | 2.94 |
| 碳离子 | 22.39 | 22.92 | 3.72 |
| 氟离子 | 80.0 | 54.35 | 5.02 |
| 氯离子 | 138.0 | 38.9 | 13.9 |
| 溴离子 | 172.0 | 25.5 | 42.0 |
| 碘离子 | 195.0 | 24.0 | 58.96 |

2) 试验结果及其分析

试验中观察到了单粒子翻转现象,其相关试验特征参数示于图 5。结果表明, IDT6116 单粒子翻转 LET 阈值为 $2.97\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 。这一翻转饱和截面为 $6.8\times 10^{-4}\text{ cm}^2$,这一试验结果与 ESA 的试验结果相符^[4](在重离子加速器上的实验翻转 LET 阈值大于

$2.8\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)。此外,试验中观察到了多位翻转现象。

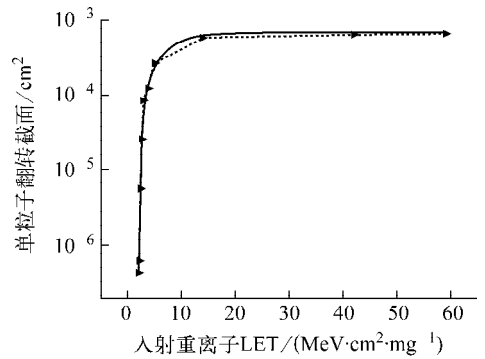


图 5 重离子单粒子翻转截面随 LET 变化曲线

Fig. 5 Curves of heavy ion SEU cross section with LET
▲——本次试验结果;实线——Weibull 模型拟合 ESA 的试验结果

对 IDT6116 SRAM 选取碘离子进行试验(LET 为 $58.96\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$),未观察到单粒子锁定现象。单粒子锁定试验数据结果列于表 3。但选取 Harris 6116 器件时,观察到了单粒子锁定现象。分析认为, IDT6116 器件在其芯片表面覆盖有一层透明的保护薄膜,试验中所选取的重离子射程不能穿透保护膜,因此,不易诱发单粒子锁定现象。

将 IDT6116 SRAM 器件分两组,一组经总剂量(以 Si 计)100 Gy 辐照;一组不经辐照,以试验观测总剂量对单粒子效应的影响(协和效应)。试验中未观察到单粒子锁定现象,但观测到了辐照剂量对单粒子翻转特征数据(LET 阈值、翻转截面)的影响(图 6)。由图 6 可看出,接受一定辐照剂量的 IDT6116 SRAM 对单粒子翻转更敏感,且其单粒子翻转能量阈值略有降低,单粒子翻转截面略有增加。

表 3 IDT6116 重离子锁定试验数据

Table 3 Experiment data of IDT6116 heavy ion SEL

| 离子种类 | LET/(MeV· $\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$) | 注量率/($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 总注量/ cm^{-2} | 发生 SEL 个数 |
|------|--|--|-----------------------|-----------|
| 氟离子 | 13.9 | 330 | 5.94×10^5 | 无 |
| 溴离子 | 42 | 360 | 6.48×10^5 | 无 |
| 碘离子 | 58.96 | 142 | 8.54×10^5 | 无 |

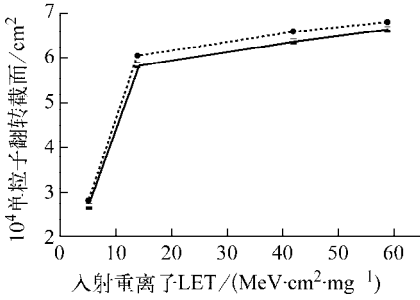


图6 不同辐照剂量下 IDT6116 单粒子翻转截面随 LET 的变化曲线

Fig. 6 Curves of SEU cross section with LET
■——不经辐照;●——经辐照

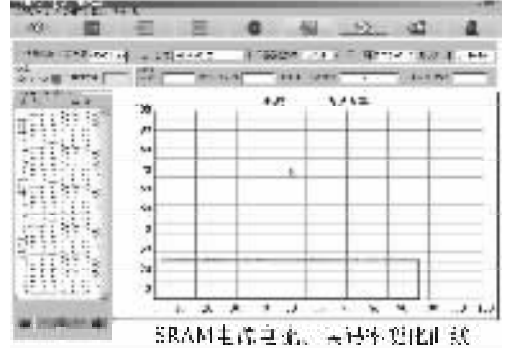


图7 IDT6116 发生单粒子效应测试图

Fig. 7 IDT6116 SRAM SEE testing picture

2.3 ^{252}Cf 源模拟试验

1) 模拟系统

实验室的 ^{252}Cf 源单粒子效应试验系统由 ^{252}Cf 源及调节定位部分、辐照真空室、真空系统和真空计组成。源强0.185 MBq,系统真空度优于 10^{-3} Pa,系统的DUT移动精度1 mm。

2) 试验结果及分析

选取了不同的入射离子注量率进行辐照试验,试验中观察到了单粒子翻转现象和多位翻转现象,但未观察到单粒子锁定现象。试验数据列于表4,单粒子效应测试示于图7。 ^{252}Cf 源裂变碎片射程太短(6~15.5 μm),IDT6116器件的芯片表面覆盖有一层透明保护薄膜,这可能是未能观测到单粒子锁定的原因。

表4 IDT6116 ^{252}Cf 源单粒子翻转和锁定截面试验数据

Table 4 Experiment data of IDT6116 ^{252}Cf SEE cross section

| 单粒子效应类别 | σ/cm^2 | LET/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹) |
|---------|-------------------------|--|
| SEU | 2.08×10^{-4} | 43.0 |
| SEL | $< 3.57 \times 10^{-3}$ | 43.0 |

3 试验结果分析

在脉冲激光、重离子和 ^{252}Cf 源辐照下均观测到了IDT6116 SRAM单粒子翻转现象和单粒子多位翻转现象。在脉冲激光模拟系统上观测到了单粒子锁定现象,而在重离子和 ^{252}Cf 源

模拟系统上均未观测到单粒子锁定现象。分析其原因主要可能是:对单粒子翻转,只要入射离子注入到器件表面敏感区域(P沟道晶体管的源区和N沟道晶体管的漏区),就可收集瞬态电荷,当收集的电荷超过产生单粒子翻转的临界电荷时,器件将产生单粒子翻转;对于单粒子锁定,只有高能离子通过P-N结的耗尽层,才有可能引起CMOS器件产生单粒子锁定现象(当离子径迹通过P阱耗尽层区时,可从耗尽层区通过电荷聚集效应和离子分流效应收集电荷,该电荷流动形成电流,使得P阱电阻 R_w 上的压降达到或超过NPN晶体管的基极-发射极结的正向压降,从而引起该晶体管导通,最终导致CMOS器件产生锁定现象)。在试验中,由于IDT6116芯片上覆盖着较厚的介质层,加速器加速的离子能量相对较低和 ^{252}Cf 源裂变碎片在硅材料中的射程相对较短,无法到达深层电路(离子相对不能穿透芯片P-N结的耗尽层),不满足诱发产生单粒子锁定的条件;而对于脉冲激光模拟源,波长1.079 μm 的激光完全可穿透介质层($\lambda = 1.079 \mu\text{m}$ 的激光在硅材料中穿透深度为1400 μm),可诱发单粒子锁定SEL现象,显然,脉冲激光模拟对深层电路的测试有一定优势。

将激光模拟试验数据与HI-3串列加速器试验结果和ESA试验结果进行比较(表5),结果表明,激光实验得出的LET阈值与重离子实验得的大体一致,从而验证了脉冲激光模拟单粒子效应实验数据的有效性和正确性。

表5 激光与重离子试验结果(阈值)比较

Table 5 Comparison of laser testing data and heavy ion testing data

| 单粒子效应 | 激光能量/nJ | 激光等效 LET/ (MeV · cm ² · mg ⁻¹) | 重离子 LET/ (MeV · cm ² · mg ⁻¹) | 重离子设备 | 试验机构 |
|-------|---------|--|---|----------|-----------|
| 单粒子翻转 | 0.62 | 3.47 | >2.8 | BNL | ESA |
| | | | 2.97 | HI-13 串列 | LIP 重点实验室 |
| 单粒子锁定 | 4.14 | 14.9 | <13 | 88in | ESA |
| | | | 未出现 | HI-13 串列 | LIP 重点实验室 |

对重离子和²⁵²Cf 模拟的单粒子效应截面(单粒子翻转截面和单粒子锁定截面)进行比较分析(表6),结果表明,²⁵²Cf 源与重离子加速器测量的单粒子翻转截面比较接近,这表明,可用²⁵²Cf 源进行单粒子效应试验研究。对于部分器件,可用²⁵²Cf 源代替重离子测量翻转饱和截面。

表6 重离子与铯源试验结果(截面)比较

Table 6 Comparison of testing data from heavy ion and ²⁵²Cf source

| 模拟源 | LET/(MeV · cm ² · mg ⁻¹) | 单粒子翻转截面 σ/cm ² | 单粒子锁定截面 σ/cm ² |
|---------------------|---|---------------------------|---------------------------|
| 重离子 | 42.0 | 6.37 × 10 ⁻⁴ | <3.57 × 10 ⁻³ |
| ²⁵² Cf 源 | 43.0 | 2.08 × 10 ⁻⁴ | <1.51 × 10 ⁻⁶ |

在总剂量对单粒子效应影响(协和效应)的试验中观测到,接受一定辐照剂量的 IDT6116 SRAM,对单粒子翻转更敏感,且单粒子翻转阈值略有降低,截面略有增大。这主要是因累积辐射剂量引起器件的阈值电压漂移,导致单粒子翻转临界电荷减小,即导致器件更易诱发单粒子翻转现象,从而降低了单粒子翻转能量阈值(或 LET 阈值),增大了单粒子翻转截面。

4 结论

IDT6116 在不同模拟源上所进行的评估试验研究结果表明,脉冲激光、重离子和²⁵²Cf 源模拟试验结果较为一致。IDT6116 器件的单粒子翻转 LET 阈值约为 3.0 MeV · cm² · mg⁻¹,该器件相对不易诱发单粒子锁定现象(因芯片表面覆盖有一层透明的保护薄膜)。试验研究表明,接受一定辐照剂量辐照的 IDT6116 器件

对单粒子翻转更加敏感,且器件的单粒子翻转阈值略有降低,单粒子翻转截面略有增大。

利用脉冲激光、重离子和²⁵²Cf 源模拟单粒子效应具有一定的等效性。对芯片表面有保护层(介质层)的半导体器件,脉冲激光与重离子模拟相比具有一定的优势。脉冲激光模拟手段将成为对加速器模拟手段的重要补充,使国内单粒子效应实验研究方法更加丰富多样。

参考文献:

- [1] 王长河. 单粒子效应研究对卫星空间运行可靠性影响[J]. 半导体情报, 1998, 35(10): 1-8. WANG Changhe. The influence with reliability of motional satellite by the single-event phenomena [J]. Semiconductor Information, 1998, 35(10): 1-8(in Chinese).
- [2] 贺朝会. 单粒子效应研究的现状和动态[DB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [3] 薛玉雄, 曹洲, 杨世宇. 激光模拟单粒子效应试验研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 98-102. XUE Yuxiong, CAO Zhou, YANG Shiyu. Laser simulation of single-event effect testing [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(2): 98-102(in Chinese).
- [4] NICHOLS D K, PICE W E. Trends in parts susceptibility to single event upsets from heavy ions[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1985, 32(6): 1 028-1 035.
- [5] 贺朝会, 李国政, 罗晋, 等. CMOS SRAM 单粒子翻转效应的解析分析[J]. 半导体学报, 2000, 21(2): 174-178. HE Chaohui, LI Guozheng, LUO Jin, et al. Analysis of single event upset in CMOS SRAMs [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(2): 174-178(in Chinese).