

SRAM FPGA 电离辐射效应试验研究

于庆奎¹, 张大宇¹, 张海明¹, 唐 民¹, 文 亮², 施 蕾²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100029; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 针对 SRAM FPGA 空间应用日益增多, 以 100 万门 SRAM FPGA 为样品, 进行了单粒子效应和电离总剂量效应辐照试验。单粒子试验结果是: 试验用粒子最小 LET 为 $1.66 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 出现 SEU (单粒子翻转); LET 为 $4.17 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 出现 SEFI (单粒子功能中断), 通过重新配置, 样品功能恢复正常; LET 在 $1.66 \sim 64.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 范围内, 未出现 SEL (单粒子锁定); 试验发现, 随 SEU 数量的累积, 样品功耗电流会随之增加, 对样品进行重新配置, 电流恢复正常。电离总剂量辐照试验结果是: 辐照总剂量 $75 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 2 只样品功能正常, 功耗电流未见明显变化。辐照到 $87 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 样品出现功能失效。试验表明 SRAM FPGA 属于 SEU 敏感的器件, 且存在 SEFI。SEU 和 SEFI 会破坏器件功能, 导致系统故障。空间应用 SRAM FPGA 必须进行抗单粒子加固设计, 推荐的加固方法是三模冗余 (TMR) 配合定时重新配置 (Scrubbing)。关键部位如控制系统慎用 SRAM FPGA。

关键词: 专用集成电路; 单粒子效应; 总剂量效应; 辐照试验; 抗辐射加固

中图分类号: TN492; O483

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)03-0229-03

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.03.007

1 引言

SRAM FPGA 具有可随时重新配置的特点, 在系统硬件开发或投入使用后, 均可进行重新配置, 改变系统设计功能, 这极大方便了复杂系统的设计开发。因此 SRAM FPGA 在空间应用得愈来愈多。在空间环境中, SRAM FPGA 主要受到两类辐射效应影响: 电离总剂量效应和单粒子效应。电离总剂量效应导致器件电参数退化或功能失效。单粒子效应包括单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU)、单粒子功能中断 (Single Event Functional Interrupt, SEFI)、单粒子锁定 (Single Event Latchup, SEL) 等。SEU 会引起器件功能不正常; SEL 是破坏性的, 若不及时切断电源, 可能烧毁器件; SEFI 会引起器件暂时失去功能或停止正常工作。近十年里, 国内外一直重视 SRAM FPGA 辐射效应研究和加固方法研究^[1,2]。

本文拟对 SRAMFPGA 进行单粒子效应和电离总剂量效应试验研究。

2 试验方法

试验方法参考了航天行业标准 QJ10005—2008《宇航用半导体器件重离子单粒子试验指南》

以及 QJ10004—2008《宇航用半导体器件电离总剂量辐照试验方法》。

2.1 辐射源

(1) 单粒子试验源

单粒子试验采用兰州中科院近代物理所回旋加速器 (HIRFL) 和中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器产生的高能离子。选择试验用离子的基本原则是: 离子的 LET 值覆盖单粒子效应阈值区和截面饱和区, 离子的射程一般大于 $30 \mu\text{m}$ 。试验用离子见表 1, 入射角度均为 0° 。

表 1 单粒子试验用的重离子
Table 1 Heavy ions used for single event effects test

离子类别	能量 /MeV	LET 值 / $(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$	在 Si 中射程 / μm	加速器
C	85	1.66	140	I
Ne	467	1.77	659.7	II
F	110	4.17	82.6	I
Cl	145	13.6	41	I
Kr	1700	21.4	249	II
Kr	900	30.3	112	II
Kr	500	37	60.7	II
I	265	64.8	28.8	I

注: I—HI-13 串列加速器; II—HIRFL 回旋加速器。

收稿日期: 2008-11-24; 修回日期: 2009-05-05

作者简介: 于庆奎 (1964-), 男, 研究员, 从事航天器用元器件质量保证工作。E-mail: Yuqingkui@263.net。

(2) 电离总剂量辐射源

采用北京师范大学 ^{60}Co γ 射线进行电离总剂量辐照试验。剂量率 $0.06 \sim 0.42 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 。

2.2 试验样品

试验样品为 100 万门 SRAM FPGA。地面单粒子试验用离子的能量有限,无法穿透管壳;因此,试验前将样品开帽,露出内部的芯片。开帽后,样品的外部引出端和内部引线均未受到损伤,样品电性能测试正常。

试验样品共 2 只,先进行单粒子试验,然后进行电离总剂量辐照试验。

本文未考虑高能重离子产生的电离总剂量贡献。

2.3 辐射效应检测装置

设计开发了 SRAM FPGA 辐射效应检测系统,实现对 FPGA 内部配置存储器测试和用户逻辑资源测试。FPGA 内部配置存储器的测试是将 FPGA 的配置位流数据进行实时的回读,并与预先生成的回读标准配置文件进行比较,从而得到 FPGA 内部配置存储器的翻转情况。用户逻辑资源测试是进行 LEON3 IP 逻辑功能测试。实时监测被测器件 3.3 V 和 2.5 V 电源电流,以便分析判断被测器件单粒子锁定情况。实时采集的电流值发送至上位机显示,并记录于数据库中。

采用相同的辐射效应检测系统进行电离总剂量辐照试验。试验中,所有非被试元器件用铅砖充分屏蔽,只有被试器件被辐照。运行检测程序,对被试器件的功能和功耗电流进行原位测试。

3 试验结果

3.1 单粒子效应试验结果

试验用离子最低 LET 值为 $1.66 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$,在此值下,配置区、逻辑区出现 SEU;LET 值为 $4.17 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时,出现 SEFI,通过重新配置,系统功能恢复正常。LET 值在 $1.66 \sim 64.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 范围内,未出现 SEL。试验发现:随 SEU 数量的累积,器件功耗电流随之增加;停止辐照,大电流状态保持;重新配置后,电流值恢复到正常。试验结果见表 2。

根据单粒子地面试验数据,获得的配置区单

粒子翻转截面与入射粒子 LET 值的关系曲线见图 1。

表 2 错误截面随 LET 值的变化
Table 2 Errors cross section versus LET value

器件编号	LET 值 $/(\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg})$	配置区 翻转截面 $/(\text{cm}^2\cdot\text{器件}^{-1})$	逻辑区 翻转截面 $/(\text{cm}^2\cdot\text{器件}^{-1})$	单粒子功能 中断截面 $/(\text{cm}^2\cdot\text{器件}^{-1})$
1	1.66	1.69×10^{-6}	0	0
	1.77	1.30×10^{-3}	4.50×10^{-3}	0
	4.17	3.38×10^{-3}	1.24×10^{-4}	1.55×10^{-4}
	21.4	1.05×10^{-2}	3.82×10^{-3}	1.27×10^{-3}
	30.3	6.30×10^{-3}	6.30×10^{-3}	1.34×10^{-3}
	37.0	6.11×10^{-3}	8.27×10^{-3}	1.27×10^{-3}
	64.8	1.92×10^{-2}	1.84×10^{-2}	2.9×10^{-3}
5	1.66	2.59×10^{-6}	0	0
	1.77	1.10×10^{-3}	4.20×10^{-3}	4.40×10^{-5}
	4.17	1.95×10^{-2}	1.42×10^{-3}	5.33×10^{-4}
	21.4	1.86×10^{-2}	1.22×10^{-2}	1.91×10^{-3}
	30.3	1.56×10^{-2}	7.05×10^{-3}	1.76×10^{-3}
	37.0	1.91×10^{-2}	1.94×10^{-2}	2.78×10^{-3}
	64.8	4.10×10^{-2}	9.55×10^{-4}	5.70×10^{-3}

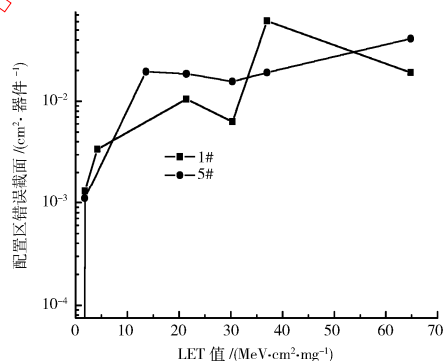


图 1 配置区单粒子翻转截面与入射粒子 LET 值关系曲线
Fig. 1 Configuration errors cross section versus LET value

根据地面试验数据得出,配置区饱和翻转截面为 $4.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{器件}$,取 10%饱和翻转截面对应的 LET 值为翻转阈值,则翻转阈值为 $1.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

3.2 电离总剂量辐照试验结果

对经过重离子单粒子试验的 2 只样品进行 ^{60}Co γ 射线电离总剂量辐照试验。在 $0.06 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 剂量率下,辐照总剂量达到 $20 \text{ krad}(\text{Si})$ 时,样品功能(包括配置功能、逻辑功能)均正常,监测 2.5 V 电源电流没有明显变化。然后在 $0.42 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 剂量率下,继续辐照到总剂量 $75 \text{ krad}(\text{Si})$,其间监测样品功能包括配置功能、逻辑功能均正常, 2.5 V 电源电流没有明显增大。继续辐照,1#样品到 $87 \text{ krad}(\text{Si})$

时功能失效,5#样品到总剂量为 102 krad(Si)时功能失效。辐照过程中,1#样品功耗电流变化情况见图 2。

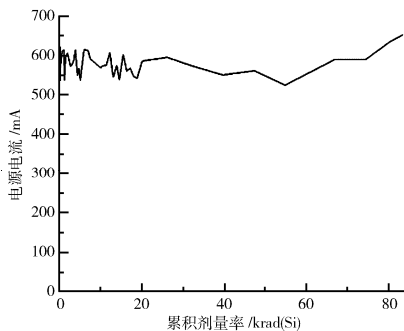


图 2 1#样品辐照过程中功耗电流变化情况

Fig. 2 Power supply current versus total dose for sample 1#

4 讨论

4.1 器件单粒子效应敏感性分析

空间环境存在大量高能质子,包括地球辐射带质子和太阳质子;高能质子射入到 Si 器件中,通过核反应产生的次级粒子的 LET 值可达到 3~12 MeV·cm²/mg,可引起单粒子翻转阈值低于 15 MeV·cm²/mg 的器件出现单粒子翻转。国外一般将单粒子效应阈值低于 15 MeV·cm²/mg 的器件定义为单粒子效应敏感器件。被试 SRAM FPGA 在试验用最低 LET 值为 1.66 MeV·cm²/mg 出现单粒子翻转,属于单粒子效应敏感器件。

根据地面辐照试验获得的配置区饱和翻转截面 4.01×10^{-2} cm²/器件和翻转阈值 1.8 MeV·cm²/mg,利用 Space Radiation 软件,计算典型轨道的银河宇宙射线重离子在 FPGA 配置区引起的单粒子翻转率。轨道分别取地球同步轨道(35 786 km, 0°)和低地球轨道(645 km, 97.9°),卫星屏蔽层取 3 mm 厚度的铝,空间辐射环境取 Adams 90%最坏情况(M=3)。结果表明:由于银河宇宙射线的影响,FPGA

在低地球轨道,配置区每天会出现 2.55 次翻转;在地球同步轨道,配置区每天会出现 7.96 次翻转。配置区出现翻转可能引起器件配置错误,从而导致器件功能错误。若器件配置发生错误,则必须重新配置。

4.2 器件抗电离总剂量能力分析

器件辐照 75 krad(Si)总剂量后功能正常,表明该器件具有一定的抗电离总剂量能力。

5 结论及建议

SRAM FPGA 在试验用最低 LET 值为 1.66 MeV·cm²/mg 时出现单粒子翻转,属于单粒子效应十分敏感的器件。因此 SRAM FPGA 在空间应用时必须进行抗单粒子加固设计。推荐的加固方法是三模冗余(Triple Modular Redundancy, TMR)结合定时擦洗(Configuration Scrubbing)^[2]。TMR 可纠正单个或少量配置位翻转;定时擦洗可防止翻转数累积。对于航天器控制系统等关键部位,应慎用 SRAM 型 FPGA。

6 致谢

北京控制工程研究所郭树玲研究员参加了研究方案讨论,中国科学院近代物理研究所侯明东研究员、刘杰研究员和中国原子能科学研究院郭刚研究员、刘建成工程师在单粒子试验中给予了协助,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 刑克飞, 杨俊, 王跃科, 等. Xilinx SRAM 型 FPGA 抗辐射设计技术研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 123-151
- [2] Phippe Adell, Greg Allen. Assessing and mitigating radiation effects in Xilinx FPGAs, JPL Publication 08-02/08[R]