

累积剂量影响静态随机存储器单粒子效应 敏感性研究*

肖尧^{1)†} 郭红霞¹⁾²⁾ 张凤祁¹⁾ 赵雯¹⁾ 王燕萍¹⁾ 丁李利¹⁾
范雪³⁾ 罗尹虹¹⁾ 张科营¹⁾

1)(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西北核技术研究所, 西安 710024)

2)(中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

3)(电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2013年8月18日收到; 2013年9月11日收到修改稿)

本文利用 ^{60}Co γ 源和兰州重离子加速器, 开展不同累积剂量下, 静态随机存储器 (static random access memory, SRAM) 单粒子效应敏感性研究, 获取不同累积剂量下 SRAM 器件单粒子效应敏感性的变化趋势, 分析其辐照损伤机理. 研究表明, 随着累积剂量的增加, SRAM 器件漏电流增大, 影响存储单元低电平保持电压、高电平下降时间等参数, 导致“反印记效应”. 研究结果为空间辐射环境中宇航器件的可靠性分析提供技术支持.

关键词: 累积剂量, 单粒子效应, 静态随机存储器, 反印记效应

PACS: 85.30.De, 61.81.Fk

DOI: 10.7498/aps.63.018501

1 引言

空间辐射环境的各种射线粒子会导致航天器电子元器件和电子学系统性能退化和失效^[1, 2], 由辐射导致的故障占总故障的45%, 对航天器电子学系统的可靠性和寿命构成严重威胁. 空间辐射环境下, CMOS工艺器件主要以总剂量效应和单粒子效应为主^[3], 器件损伤由两种效应的综合辐射作用导致. 目前我国在轨卫星向着高寿命、高可靠、高性能的趋势发展, 对于10—15年的在轨卫星, 总剂量阈值约为100 krad(Si), 在50 krad(Si)左右时潜在损伤造成的漏电已有量级的变化^[4], 这种潜在损伤可能会导致器件单粒子敏感性发生变化, 严重时可以使器件抗单粒子性能降低1—3个数量级, 成为影响卫星长寿命、高可靠的关键问题. 2008年美国Sandia国家实验室指出: “空间辐射环境中电子或质子的总剂量辐射损伤与单粒子翻转敏感性的关

联对其空间应用产生重要影响.”, 因此研究不同累积总剂量下的单粒子效应敏感性对于长寿命卫星的宇航器件可靠性有重要意义.

自20世纪80年代以来, 国外对空间辐射环境中累积剂量影响SRAM器件单粒子效应敏感性开展研究并取得了一定成果. 文献[5]利用40 MeV质子开展实验, 结果表明随着累积剂量的增加, SRAM单粒子翻转率上升; 文献[6]开展重离子微束辐照实验, 认为累积剂量造成MOS晶体管阈值电压的负漂移, 降低了NMOS单粒子翻转截面, 增加了PMOS翻转截面. 文献[7—9]表明累积剂量影响SRAM单粒子效应与器件工艺尺寸和单粒子效应测试时的测试图形有直接关系, 不同器件存储不同测试图形时单粒子敏感性随累积剂量呈现出不同的变化趋势. 对于较大尺寸器件, 研究结果表现为“印记效应”; 对于深亚微米和纳米级等小尺寸器件, 研究结果不具有-致性, 有的器件与大尺寸器件规律相同, 为“印记效应”, 有的器件与大尺寸器

* 电子薄膜与集成器件国家重点实验室(批准号: KFJJ201306)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: nint_xiaoyao@foxmail.com

件规律相反,为“反印记效应”,即单粒子实验写入与总剂量辐照相同的测试图形时,翻转截面随累积剂量增加,写入与总剂量辐照相反的测试图形时,翻转截面随累积剂量减小.文献[10]则指出纳米SRAM器件吸收的总剂量和翻转截面没有直接关系,而且在不同的剂量时,测试图形对单粒子翻转的敏感性没有影响.

归纳可得,关于空间辐射环境中的累积剂量对单粒子效应敏感性影响的研究主要集中于CMOS工艺器件上[11,12],除了工艺尺寸和测试图形,还与其他多种因素有关,例如累积剂量时的环境温度[13]、偏置电压等.目前关于累积剂量影响器件单粒子敏感性的研究还比较零散,缺乏统一认识,与器件工艺、类型的关系尚不明确,对深亚微米、纳米

级器件敏感性影响的微观机理研究还不够深入[14],而国内的研究也相对较少.

本文以0.25 μm 和0.18 μm 两款深亚微米SRAM器件,研究累积剂量对其单粒子效应敏感性影响,开展效应实验、实验结果分析并揭示效应机理,为SRAM器件空间辐射环境加固提供技术支撑.

2 实验条件

2.1 实验器件

采用RENESAS公司的R1LV0408CSP和HM62V8100LT15为实验器件.

表1 实验器件

器件型号	厂家	特征尺寸/ μm	存储器组成	偏置/V
R1LP0408CSP	Renesas	0.25	4 M (512k $\times$ 8 bit)	5.0
HM62V8100LT15	Renesas	0.18	8 M (1024 k $\times$ 8 bit)	3.3

2.2 测试系统

实验采用西北核技术研究所研制的SRAM器件单粒子效应在线测试系统对器件进行在线测试.图1为测试系统框图.

该在线测试系统针对实验所用的SRAM器件,能够实现对总剂量效应实验和单粒子效应实验中的SRAM器件的在线高速读写和错误实时监测,为实验提供了很好的硬件基础.

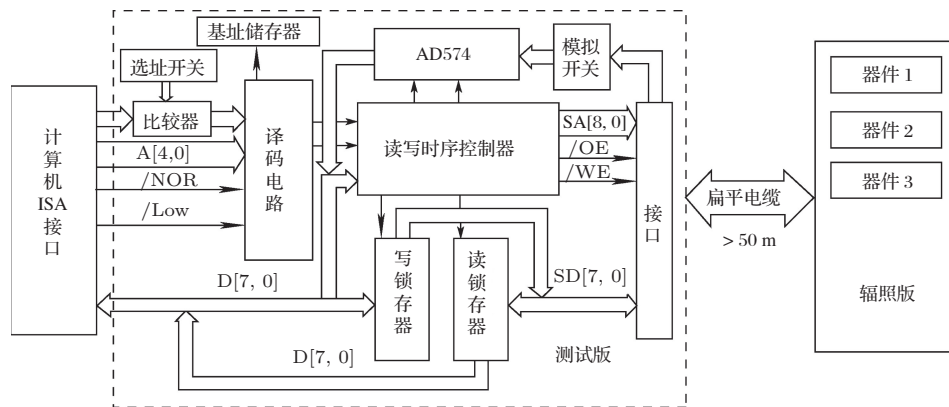


图1 SRAM器件单粒子翻转在线测试系统

3 实验结果及分析

本实验旨在研究0.18 μm 和0.25 μm SRAM器件在不同累积剂量下单粒子效应敏感性,包括器件总剂量效应实验和单粒子效应实验两大部分,且两个实验环环相扣,衔接紧凑.器件在钴源进行不同剂量的辐照,再对辐照过的器件进行单粒子效应实

验.由于总剂量效应是一种半永久性的累积损伤,在常温下会出现退火效应,影响单粒子实验结果的客观性,所以防退火措施是确保实验结果客观真实的关键.

3.1 总剂量效应实验

总剂量实验采用西北核技术研究所总剂量效应试验平台,剂量率在0.5 rad(Si)/s到50 rad(Si)/s

范围内可调. 由于实验器件为CMOS工艺, 没有低剂量率增强效应, 且根据美军标中总剂量加速实验剂量率为50—300 rad(Si)/s的实验标准, 本实验剂量率选用50 rad(Si)/s. 辐照时, SRAM中写入棋盘式数据55H(即0101)并处于加电状态, 测试系统动态监测器件的漏电流及存储数据.

当CMOS器件受到 γ 射线辐照时, 辐射沉积的能量电离出电子-空穴对, 在 SiO_2 绝缘层中产生氧化物陷阱电荷并在Si/ SiO_2 界面产生界面态陷阱电荷. 累积的陷阱电荷会改变器件的关键参数, 如阈值电压漂移, 漏电流增大等, 从而影响器件的性能.

对于STI的小尺寸NOMS单管, 由于器件栅氧层很薄, 场氧层相对较厚, 栅氧化物陷阱电荷较少, 总剂量效应基本不引起其阈值电压的漂移, 主要体现为漏电流的增加, 如图2所示, 从而引起存储单元低电平保持电压、高电平下降时间等一系列参数的变化. 同时存储单元中PMOS的损伤也逐渐凸显, 寄生电阻电容等不可忽略不计.

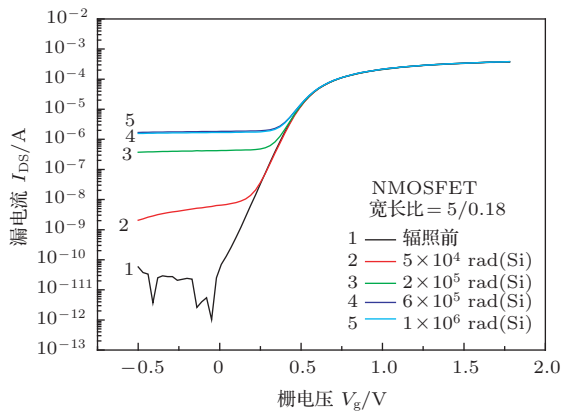


图2 STI小尺寸NMOS单管不同剂量下的V-I曲线

总剂量阈值摸底实验中两款SRAM器件漏电流随累积剂量的变化情况如图3所示.

经测试, 器件受辐照后, 0.25 μm SRAM漏电流出现增长的阈值为80 krad, 0.18 μm SRAM的阈值为95 krad; 通过功能测试, 0.25 μm SRAM功能出错的阈值为105 krad, 0.18 μm SRAM的阈值为120 krad.

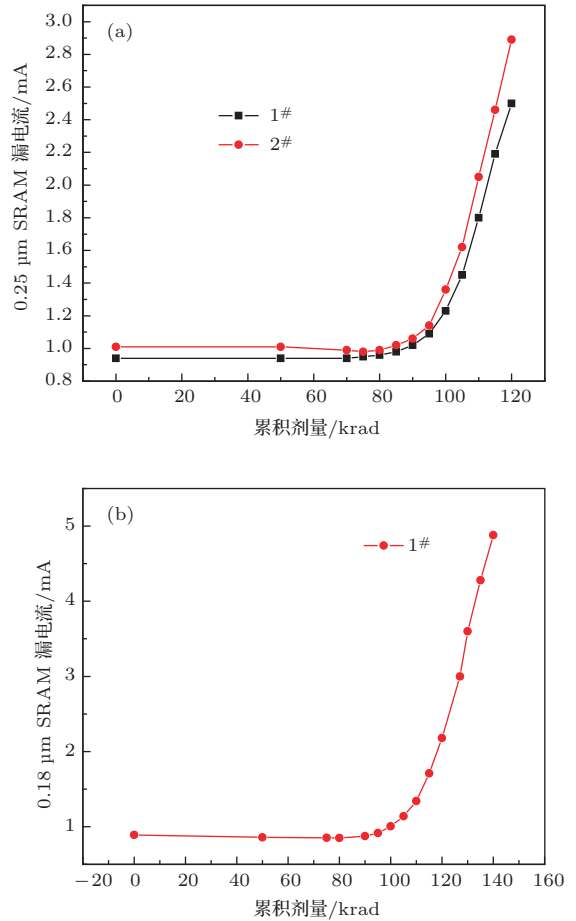


图3 SRAM器件漏电流随累积剂量的变化情况 (a) 0.25 μm SRAM; (b) 0.18 μm SRAM

根据摸底实验测出的总剂量阈值, 确定单粒子实验前SRAM器件的总剂量辐照值, 如表2所示.

表2 器件的总剂量辐照值详表

器件型号	特征尺寸/ μm	电流增长阈值/krad	功能失效阈值/krad	总剂量辐照值/krad	器件号
R1LV0408CSP	0.25	80	105	0	14#, 15#
				75	9#, 10#
				90	12#, 13#
				105	7#, 8#
				120	5#, 6#
				160	3#, 4#
HM62V8100LT15	0.18	95	120	0	14#, 15#
				70	12#, 13#
				85	8#, 9#
				100	5#, 6#
				140	4#

3.2 退火效应

SRAM 器件总剂量实验后, 常温下将出现退火效应, 即场氧化层陷阱电荷减少, 界面态陷阱电荷增加, 宏观参数上体现为阈值电压和漏电流有一定程度的回落^[15]. 由于总剂量实验和单粒子实验之间存在一定的时间差, 为确保单粒子实验前与总剂量辐照后器件状态的一致性, 须采用一定的防退火措施.

本实验采用引脚短接和低温保存的措施减缓器件退火效应. 美军标 883(MIL-STD 883 TM 1019) 中关于使用干冰运输器件的测试方法指出使用干冰冷藏可减缓器件的退火效应. 将辐照后的器件引脚全部短接, 并放入干冰箱中, 箱内温度为 -80°C 左右, 确保从辐照结束到单粒子实验开始的整个过程中器件始终处于低温和引脚短接的状态下.

3.3 单粒子效应实验

单粒子实验采用兰州近代物理研究所重离子加速器进行实验. 实验选用离子种类为 ^{129}Xe , 能量为 914 MeV, LET 值为 $64.5 \text{ MeV}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{mg})$, 在 Si 中的射程为 $67.7 \mu\text{m}$.

实验中, 重离子注量率控制在 $100\text{--}300/\text{cm}^2\cdot\text{s}$, 每只器件总注量不少于 $1 \times 10^5/\text{cm}^2$, 分别测试 55H(0101), AAH(1010), 00H(0000), FFH(1111) 四种测试图形的单粒子翻转截面.

0.25 μm SRAM 器件的单粒子翻转截面随累积剂量的变化如图 4 所示.

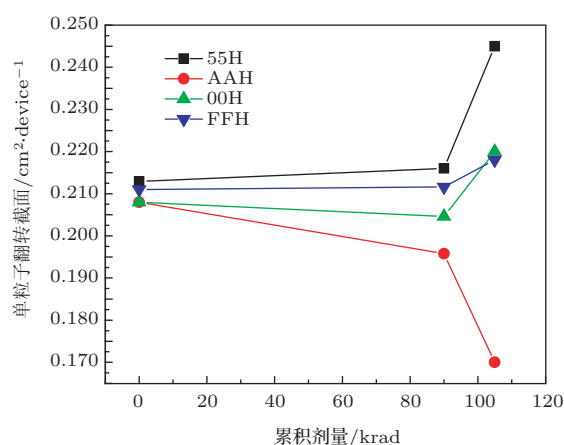


图 4 0.25 μm SRAM 器件单粒子翻转截面随累积剂量的变化

实验结果显示, 0.25 μm SRAM 器件未经过钻

源辐照时四种测试图形的单粒子翻转截面基本一致; 当累积剂量接近阈值时, 器件呈现出明显的“反印记效应”. 其中, 当单粒子实验测试图形为 55H, 即与总剂量实验测试图形一致时, 翻转截面增大; 当测试图形为 AAH, 即与总剂量实验测试图形互补时, 翻转截面减小; 当测试图形为 00H 和 FFH, 即与总剂量实验测试图形半互补时, 翻转截面基本不变.

0.18 μm SRAM 器件的单粒子翻转截面随累积剂量的变化如图 5 所示.

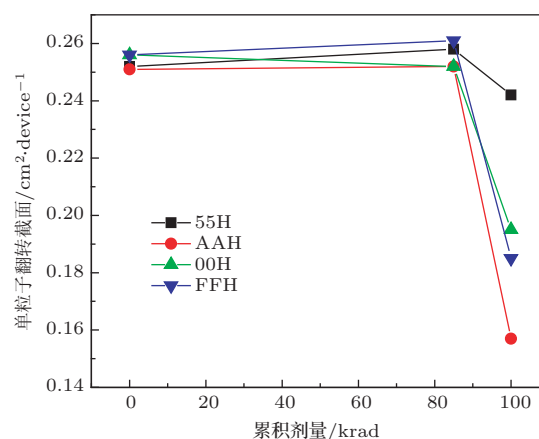


图 5 0.18 μm SRAM 器件单粒子翻转截面随累积剂量的变化

结果显示, 0.18 μm SRAM 器件在累积剂量小于 85 krad 时 4 种测试图形的单粒子翻转截面在误差范围内基本一致; 当累积剂量接近阈值时, 4 种测试图形的翻转截面整体上出现了下降的趋势, 翻转截面的相对值与“反印记效应”相同, 即测试图形一致时截面最大, 测试图形互补时截面最小, 测试图形半互补截面居中. 初步推测是外围电路如电压转换等模块的总剂量效应损伤导致器件翻转截面整体减小, 存储单元呈现“反印记效应”, 两者叠加形成最终的测试结果.

综上可得总剂量效应对 SRAM 器件单粒子翻转截面的影响与器件的特征工艺尺寸、器件结构和测试图形有很大关系. 图 6 为 SRAM 器件的一个单元结构图, 本实验 SRAM 器件均为小尺寸器件且采用 STI 隔离方式, 总剂量效应主要体现为漏电流增大而非阈值电压漂移.

当 SRAM 单元中存入数据“1”时, $Q = 1$, $Q' = 0$. 此时 P_1 , N_2 开启, P_2 , N_1 关闭. SRAM 单元以此状态进行总剂量效应实验, N_2 , P_2 由于栅极为高电平, 损伤最为严重, 随着累积剂量的增加, N_2 , P_2 的漏电流增大.

单粒子实验时, 若SRAM单元存入数据“1”, 此时 $Q = 1$, $Q' = 0$, N_1 管的漏区为单粒子效应敏感区域^[16]. 由于 N_2 管有一定的寄生电阻, 且 P_2 管受总剂量效应影响有较大的漏电流, 导致 N_2 管的漏区电平不为零, 即 Q' 略大于 0, 电平的具体值由 P_2 管的损伤程度和 N_2 管的寄生电阻共同决定. 当离子入射 N_1 管漏区时, Q 电平会出现负波动, 使 P_2 , N_2 组成的 CMOS 的输出端即 Q' 产生正波动, 当正波动与 Q' 叠加的电平值大于 P_1 , N_1 组成的 CMOS 的阈值电压且电平保持时间大于 CMOS 的下降时间时, Q 翻转至低电平, 整个 SRAM 单元存储的数据发生翻转. 由此可见 Q' 电平大于 0 会加剧存储的数据发生翻转, 即总剂量实验和单粒子实验存储的数据一致时, 翻转截面增大.

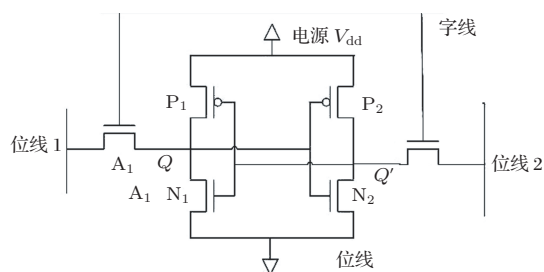


图6 SRAM单元结构图

单粒子实验时, 若SRAM单元存入数据“0”, 此时 $Q = 0$, $Q' = 1$, N_2 管的漏区为单粒子效应的敏感区域. 当离子入射 N_2 管漏区时, Q' 电平会出现负波动, 使 P_1 , N_1 组成的 CMOS 的输出端即 Q 产生正波动, 当 Q 正波动电平值大于 P_2 , N_2 组成的 CMOS 的阈值电压且电平保持时间大于 CMOS 的下降时间时, Q' 翻转至低电平, 但由于 P_2 管受总剂量效应影响有较大的漏电流, 不断给 Q' 充电, 导致 Q' 的下降时间延长, 当下降时间延长至大于 Q 正波动电平的保持时间时, Q' 则不能发生翻转. 由此可见 Q' 下降时间延长会防止存储数据发生翻转, 即总剂量实验和单粒子实验存储的数据互补时, 翻转截面减小.

4 结 论

对 $0.25\ \mu\text{m}$ 和 $0.18\ \mu\text{m}$ 两款深亚微米工艺尺寸的 SRAM 器件进行研究, 利用 ^{60}Co γ 源和兰州重离子加速器开展实验, 获取不同累积剂量不同测试图形下 SRAM 器件的单粒子翻转截面变化趋势, 实验结果表明总剂量效应对 SRAM 器件单粒子翻转

截面的影响与器件的特征工艺尺寸、器件结构和测试图形有很大关系.

总剂量效应对大尺寸 MOS 单管的影响主要体现为阈值电压漂移, 而对 STI 小尺寸 MOS 单管的影响主要体现为漏电流增大. SRAM 器件经辐照后, 当总剂量与单粒子实验测试图形一致时, 存储单元中受损伤的 NMOS 漏电流增长, 与其寄生电阻共同作用使存储单元低电平上拉, 导致器件更易翻转, 截面增大; 当总剂量与单粒子实验测试图形互补时, 存储单元中受损伤的 PMOS 漏电流增长, 漏电流充电使存储单元高电平下降时间延长, 导致器件不易翻转, 截面减小. 效应机理呈现“反印记效应”, 与实验结果相吻合, 为 SRAM 器件在空间辐射环境下的辐射效应研究提供实验支持和理论基础.

参考文献

- [1] Zhang K Y, Zhang F Q, Luo Y H, Guo H X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 028501
- [2] Liu F Y, Liu H Z, Liu B W, Liang B, Chen J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046106 (in Chinese)[刘凡宇, 刘衡竹, 刘必慰, 梁斌, 陈建军 2011 物理学报 **60** 046106]
- [3] Stassinopoulos E G, Brucker G J, Gunten O V, Kim H S 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 2330
- [4] He B P, Ding L L, Yao Z B, Xiao Z G, Huang S Y, Wang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 056105 (in Chinese)[何宝平, 丁李利, 姚志斌, 肖志刚, 黄绍燕, 王祖军 2011 物理学报 **60** 056105]
- [5] Campbell A B, Stapor W J 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 4085
- [6] Matsukawa T, Kishida A, Tanii T, Koh M, Horita K, Hara K, Shigeta B, Goto M, Matsuda S, Kuboyama S, Ohdomari I 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 2071
- [7] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Felix J A, Doss P E, Baggio J, Ferlet-Cavrois V, Paillet P, Hash G L, Flores R S, Massengill L W, Blackmore E 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 1772
- [8] Schwank J R, Dodd P E, Shaneyfelt M R, Felix J A, Hash G L, Ferlet-Cavrois V, Paillet P, Baggio J, Tangyunong P, Blackmore E 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3692
- [9] Koga R, Yu P, Crawford K, George J, Zakrzewski M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 127
- [10] Sukhaseum N, Samaras A, Du D L, Vandeveld B, Chattray N, Bezerra F 2012 *RADECS Proceedings Data Workshop*.
- [11] Dodd P E, Schwank J R, Shaneyfelt M R, Ferlet-Cavrois V, Paillet P, Baggio J, Hash G L, Felix J A, Hirose K, Saito H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 889
- [12] Buchner S, Sibley M, Eaton P, Mavis D, McMorow D 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1805

- [13] Shaneyfelt M R, Schwank J R, Dodd P E, Hash G L, Paillet P, Felix J A, Baggio J, Ferlet-Cavrois V 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3132
- [14] Giot D, Roche P, Gasiot G, Autran J L, Harboe-Sørensen R 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2048
- [15] Wang C, Quan S, Ma X H, Hao Y, Zhang J C, Mao W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7333 (in Chinese)[王冲, 全思, 马晓华, 郝跃, 张进城, 毛维 2010 物理学报 **59** 7333]
- [16] Zhang K Y, Guo H X, Luo Y H, He B P, Yao Z B, Zhang F Q, Wang Y M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8651 (in Chinese)[张科营, 郭红霞, 罗尹虹, 何宝平, 姚志斌, 张凤祁, 王园明 2009 物理学报 **58** 8651]

Synergistic effects of total ionizing dose on the single event effect sensitivity of static random access memory*

Xiao Yao^{1)†} Guo Hong-Xia¹⁾²⁾ Zhang Feng-Qi¹⁾ Zhao Wen¹⁾ Wang Yan-Ping¹⁾
Ding Li-Li¹⁾ Fan Xue³⁾ Luo Yin-Hong¹⁾ Zhang Ke-Ying¹⁾

1) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2) (Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

3) (State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, Chengdu 610054, China)

(Received 18 August 2013; revised manuscript received 11 September 2013)

Abstract

The single event effect sensitivity of static random access memory (SRAM) under different cumulative dose were carried out using ^{60}Co γ source and heavy ions. The trend of sensitivity was obtained and the radiation damage mechanism was analyzed theoretically. This investigation shows that the variation in single event upset cross section with increasing accumulated dose appears to be consistent with the radiation-induced leakage current originating in the memory cells that affects the parameters such as low-level hold voltage and high-level fall time and induces "con-imprint effect". Results obtained support the reliability analysis of the aerospace devices in space radiation environment.

Keywords: total dose, single event upset, SRAM, con-imprint effect

PACS: 85.30.De, 61.81.Fk

DOI: 10.7498/aps.63.018501

* Project supported by the Open Foundation of State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices (Grant No. KFJJ201306).

† Corresponding author. E-mail: nint_xiaoyao@foxmail.com