

# 部分耗尽绝缘层附着硅静态随机存储器总剂量辐射损伤效应的研究

李明<sup>1)2)3)</sup> 余学峰<sup>1)2)†</sup> 薛耀国<sup>1)2)</sup> 卢健<sup>1)2)3)</sup> 崔江维<sup>1)2)3)</sup> 高博<sup>1)2)3)</sup>

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011年7月4日收到; 2011年10月12日收到修改稿)

通过分析部分耗尽绝缘层附着硅互补金属氧化物半导体静态随机存储器 (SRAM) 在动态偏置条件下的电学参数和功能参数随累积剂量的变化规律, 研究了绝缘层附着硅 (SOI) 工艺 SRAM 器件在  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照后的总剂量辐射损伤效应及器件敏感参数与功能错误数之间的相关性, 为进一步深入研究大规模 SOI 集成电路的抗总剂量辐射加固及其辐射损伤评估提供了可能的途径和方法. 实验结果表明: 辐射引起的场氧和埋氧漏电是功耗电流增大的主要原因; 阈值电压漂移造成输出高电平下降、低电平微小上升和峰-峰值大幅降低, 以及传输延迟增大; 当总剂量累积到一定程度, 逻辑功能因关断功能的失效而出现突变错误; 传输延迟和输出高电平与逻辑功能错误之间存在一定相关性.

**关键词:** 部分耗尽绝缘层附着硅, 静态随机存储器, 总剂量效应, 功耗电流

**PACS:** 61.82.FK, 61.80.Ed, 85.30.Tv, 07.85.-m

## 1 引言

部分耗尽绝缘层附着硅技术 (partial-depletion-silicon-on-insulator, 简记为 PDSOI), 以其独特的材料结构有效地克服了体硅材料的不足, 如无门锁效应, 具有优良抗单粒子和瞬时辐射的能力等<sup>[1]</sup>. 随着高速低功耗集成电路的广泛应用以及核技术的发展, 静态随机存储器 (SRAM) 被广泛应用到核动力和核武器的控制系统中, 但复杂的核辐射环境会对 SRAM 器件造成辐射损伤, 尤其是绝缘层附着硅 (SOI) 工艺 SRAM 对总剂量非常敏感, 这就对应用该种器件的控制系统可靠性和安全性造成严重威胁, 甚至导致系统功能失效. 因此, 研究 SOI 工艺 SRAM 器件在核辐射环境中的辐射损伤机理具有现实意义和必要性.

自 20 世纪 70 年代, 在 SOI 器件和电路的抗辐

射加固方面, 国外已开展了大量工作, 80 至 90 年代后期主要集中于 SOI 器件抗总剂量技术方面, 工艺水平提高和集成度增长的同时, 从中小规模到大规模集成电路, 其抗辐射能力有所突破. 90 年代后, 重点集中在高能质子、中子等对 SOI 器件产生的单粒子效应及加固技术的研究<sup>[2-4]</sup>. 近年来, 针对不同类型和不同工艺的 SOI 器件, 国际上在大规模/超大规模 SOI 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 集成电路的抗辐射加固技术方面取得了大量成果<sup>[5]</sup>, 尤其在 SOI 工艺 SRAM 辐射效应和加固技术方面的研究<sup>[6-8]</sup>. 而国内对大规模 SOI 集成电路辐射效应的研究处于探索阶段<sup>[9-12]</sup>, 虽已实现并提高中小规模 SOI 集成电路的抗辐射能力, 但与军事需求还存在一定差距, 并缺乏对军用 SRAM 器件辐射损伤进行试验和评估的可靠方法和手段.

† E-mail: yuxf@ms.xjb.ac.cn

目前,关于 SRAM 总剂量辐射效应的研究,主要集中在研究器件功耗电流和功能随总剂量的变化关系,但器件功能随总剂量的变化呈现出突变过程,功能失效并不能对器件的失效起到预警作用,更不便于分析器件的总剂量辐射损伤机理. 本文通过研究器件静态和动态功耗电流、输出高低电平和波形、传输延迟和功能错误数随总剂量的变化关系以及参数之间的相关性,研究了 SOI SRAM 器件在  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐射下的总剂量辐射损伤机理效应及失效机理,并初步探讨了 SOI SRAM 的总剂量敏感参数和功能失效预警参量,这对研究 SOI SRAM 辐射损伤效应和提高器件辐射加固水平具有非常重要的意义,并为大规模 SOI 集成电路总剂量损伤评估方法和抗辐射加固提供实验依据和基础.

## 2 辐照实验及测试方法

本实验测试控制系统主要由测试系统和控制系统两部分组成,离线测试系统由美国 Altera 公司 Cyclone 系列的 EP1C6 型 FPGA 实验系统、PC 机、示波器和万用表组成,而在线读写控制系统主要采用 89C51 单片机控制系统. 首先,SOI SRAM 在 89C51 单片机系统的动态读写偏置条件下进行在线辐照,然后移位并用 FPGA 系统对 SRAM 进行测试. 在功能参数测试时,主要测试 SRAM 的数据读写功能: 首先对所有存储单元写入固定的数(十六进制 55 或 AA),然后读取数据,通过比较写入和读出数据的异同,以测试存储单元数据位是否出错,并记录发生错误的存储单元位数,同时用万用表测试器件的静态和动态功耗电流,用示波器监测数据端高低电平、波形和传输延迟.

实验样品采用  $0.8\ \mu\text{m}$  CMOS PDSOI 工艺制造的 128 Kbit SRAM,辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源上进行,辐照总剂量为 750 Gy (Si),测试剂量点分别为 100, 300, 400, 500, 650, 750 Gy (Si),剂量率为  $0.5\ \text{Gy (Si)/s}$ . 在线辐照时,用 89C51 单片机系统对 SOI SRAM 进行读写控制,以探讨动态工作偏置条件下 SOI 工艺 SRAM 的总剂量辐射损伤机理.

辐照前后测试的器件电学参数和功能参数有: 静态功耗电流 (SRAM 器件处于芯片使

能管脚  $E1B = V_L$  (表示低电平), 芯片使能管脚  $E2B = V_L$ , 读出使能管脚  $GB = X$  (表示高、低电平不定), 写入使能管脚  $WB = X$  状态时的电源电流), 动态功耗电流 (对 SRAM 存储单元进行写操作时的动态功耗电流), 存储单元错误数, 数据端输出峰峰值、高低电平和波形, 以及传输延迟时间.

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 实验结果

图 1 和图 2 为静态、动态功耗电流及功能错误数随总剂量的变化关系. 由图可知,随着总剂量的不断累积,在 400 Gy (Si) 之前,静态和动态功耗电流基本没有变化,而总剂量累积到 500 Gy (Si) 时,两种功耗电流开始出现微小增大,并增大到初始值的 2 倍,之后静态和动态功耗电流开始迅速增大. SRAM 功能在 400 Gy (Si) 左右开始出现错误,随着总剂量的继续累积,错误数迅速增大到最大位错误数 (总共 16383 bits).

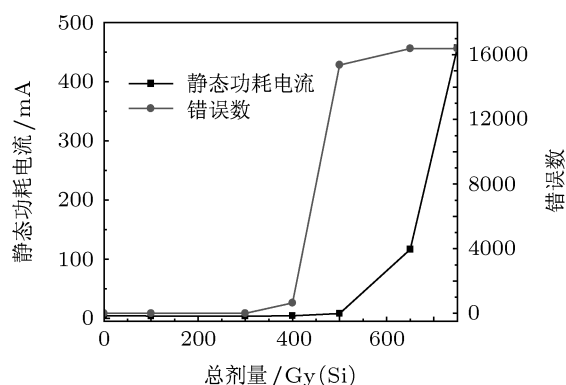


图 1 静态功耗电流及错误数随总剂量的变化关系

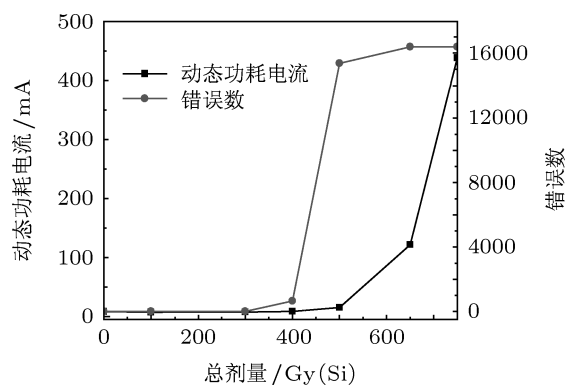


图 2 动态功耗电流及错误数随总剂量的变化关系

SRAM 数据端输出波形的峰 - 峰值及高低电平随总剂量的变化关系如图 3 所示. 在总剂量累积到 400 Gy (Si) 之前, 高、低电平值变化缓慢, 而峰 - 峰值降低了 1.5 V 左右, 之后峰 - 峰值和高电平均剧烈降低, 低电平出现微小上升但幅度较小, 器件功能开始失效, 当达到 500 Gy (Si) 时, 功能完全失效.

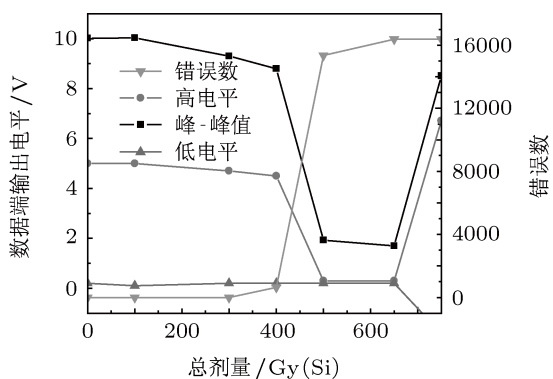


图 3 输出波形的峰 - 峰值、高低电平及错误数随总剂量的变化关系

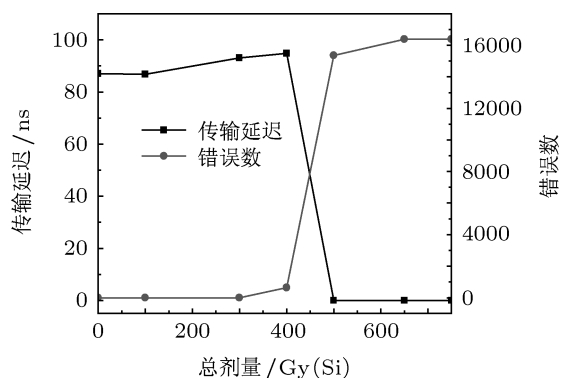


图 4 输出波形的传输延迟及错误数随总剂量的变化关系

图 4 给出了输出波形的传输延迟及错误数随总剂量的变化关系. 从图中可知, 随总剂量的累积, 在 400 Gy (Si) 时, 传输延迟比初始值增大了 7 ns, 之后器件功能开始出错, 当总剂量达到 500 Gy (Si), 已无法测量到传输延迟.

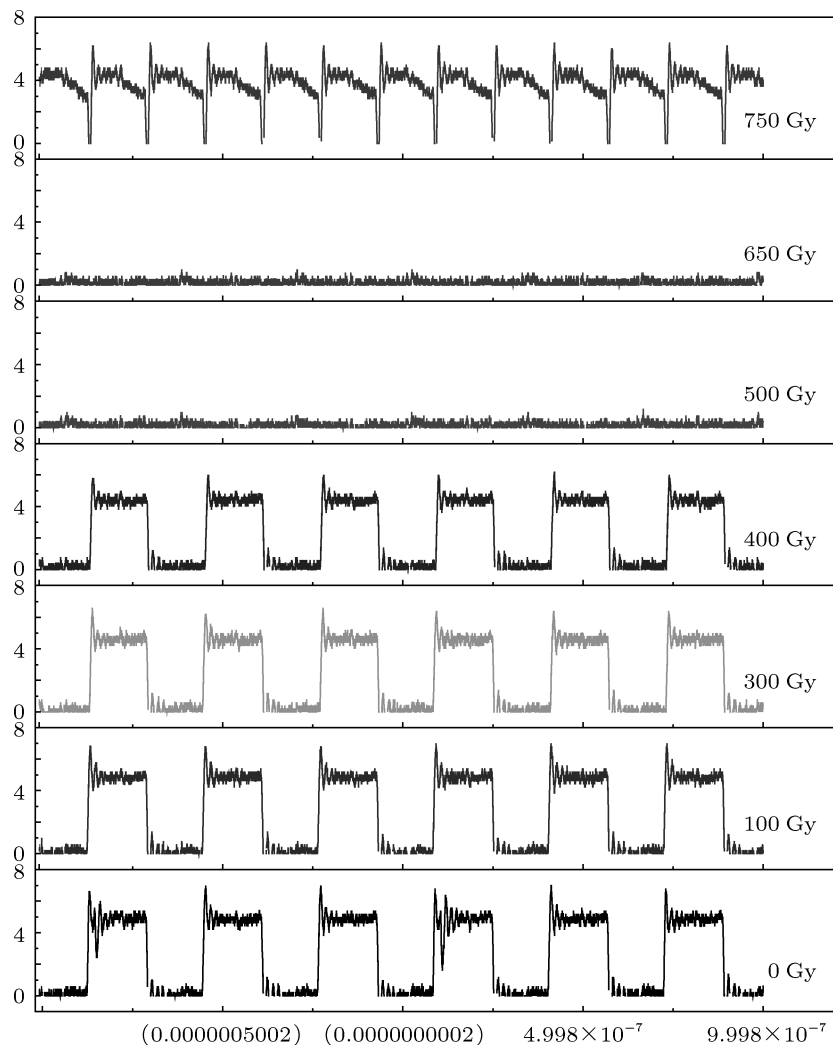


图 5 数据端输出波形随总剂量的变化关系

图 5 所示为 SOI SRAM 数据端输出波形随总剂量的变化关系. 在 400 Gy (Si) 以前, 随着总剂量的累积, SRAM 输出波形基本正常, 但波形峰 - 峰值随着总剂量的累积出现微弱减小. 当总剂量累积到一定程度, 器件功能失效, 输出波形高电平无法保持其状态, 迅速降为低电平.

### 3.2 结果讨论

由于  $\gamma$  射线的电离辐射作用, 在  $\text{SiO}_2$  绝缘层中产生氧化物陷阱电荷并在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面产生界面态陷阱电荷, 这两种陷阱电荷引起器件的阈值电压发生漂移, 进而对 PDSOI 金属 - 氧化物 - 半导体场效应器件 (MOSFETS) 及该工艺的 SRAM 集成电路性能产生显著影响, 甚至造成功能失效. 图 6 为 SRAM 的基本存储单元, 我们结合 SOI 晶体管和 CMOS 电路的电离辐射损伤机理, 对 0.8  $\mu\text{m}$ -CMOS PDSOI SRAM 的总剂量辐射效应进行了探究.

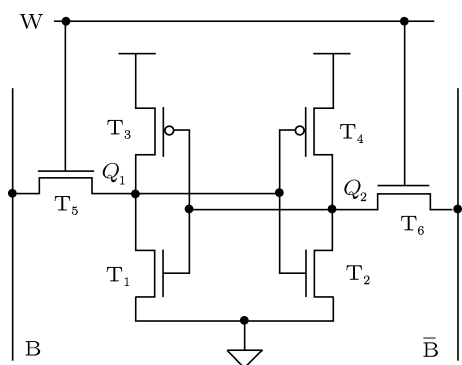


图 6 静态随机存储器的存储单元

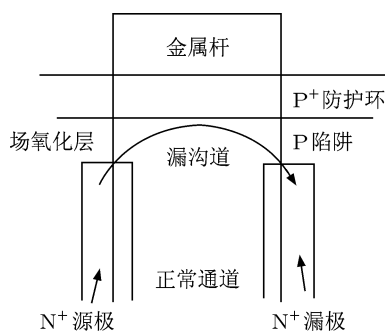


图 7 N 沟边缘场氧寄生晶体管截面示意图

CMOS SRAM 存储单元是由两个反相器构成的双稳态电路, SRAM 存储单元由基本的 CMOS 反

相器构成. SRAM 单元的存储状态决定于  $T_1$  和  $T_3$ ,  $T_2$  和  $T_4$  两个反相器的保持状态, 当反相器的输入为高电平时, PMOS 截止, 而 NMOS 导通, 输出为低电平; 输入为低电平, PMOS 导通, 而 NMOS 截止, 输出为高电平. 在 SRAM 存储单元中, 当  $T_1, T_4$  管导通,  $T_2, T_3$  管截止时,  $Q_1 = 0, Q_2 = 1$ , 表示该单元存“0”; 当  $T_1, T_4$  管截止,  $T_2, T_3$  管导通时,  $Q_1 = 1, Q_2 = 0$ , 表示该单元存“1”;  $T_5, T_6$  是写入读出控制管, 由字线 W 控制.

从图 1, 2 中看到, 静态和动态功耗电流随总剂量的累积而增大, 在 500 Gy (Si) 之后, 增大的幅度较大. 对于 PDSOI 器件, 由器件结构决定的总剂量辐射敏感区域在辐射环境中产生感生陷阱电荷, 对器件的参数产生影响. 由于正栅氧化层和埋氧化层的存在, 电离辐照在 SRAM 存储单元 N 沟管的这两个区域感生出了氧化物正电荷和界面态陷阱电荷, 在两种电荷的共同作用下, 使得正栅和背栅的阈值电压负向漂移, 特性转移, 当总剂量累积到一定程度, 栅电压失去对器件关断状态的控制, 出现正栅 N 沟道截止泄漏电流和背栅反型导通漏电流<sup>[11]</sup>. 随着辐照总剂量的不断累积, 正栅和背栅辐射感生漏电流随累积剂量的增加而增大, 造成器件功耗电流的增大. 由于器件的场氧层厚度一般较栅氧层厚很多, 且其工艺控制没有栅氧严格, 在较小的总剂量辐照下, 场氧层就感生出大量的陷阱电荷, 因此在 PDSOI NMOSFET 的源极、漏极和硅岛的侧面较易形成侧向漏电流, 如图 7 所示, 场氧漏电流随总剂量累积而增大. 而随着器件尺寸的不断缩小, 沟道长度在缩短, N 沟侧向场氧漏电流因导电沟道的缩短而更容易发生<sup>[13]</sup>.

我们知道, 辐射感生陷阱电荷的数量与氧化层厚度和质量有很大关系, 随着工艺水平的不断提高, 正栅氧化层厚度减薄, 抗辐射能力增强, 正栅辐射感生电荷的影响在减弱; 而质量较差且厚度较大的氧化层会有大量的辐射感生陷阱电荷产生, 大大增加了漏电流, 因此 SOI 器件功耗电流增大主要是由背栅氧化层和场氧层的辐射漏电流造成的. 对于场氧层, 可通过采用新型栅结构和提高注入剂量以增加阈值电压并减小漏电流; 而对于埋氧层, 减少本底的缺陷电荷对提高抗辐射能力至关重要.

从图 3 中我们可以看到, 当总剂量累积到 400 Gy (Si) 时, 数据输出状态发生明显变化,

高电平状态无法维持, 迅速翻转为低电平, 峰 - 峰值出现大幅度降低, 而低电平状态的升高幅度较小.  $\gamma$  射线在器件氧化层中感生出大量陷阱电荷, 导致晶体管的阈值电压随总剂量的累积而负向漂移, 使得原来截止的 NMOS 晶体管导通而 PMOS 管处于饱和导通状态, 这就导致 CMOS 电路的输出高电平下降. 而阈值电压的漂移使处于线性导通状态的 NMOS 晶体管导通电阻减小, 电流变大, 但电流的增大比电阻的减小幅度微小, 此时 PMOS 管处于深截止状态, 从而导致输出低电平出现小幅度的上升. 可见, 当总剂量累积到一定程度, CMOS 电路的输出状态出现低电平上升、高电平下降和峰 - 峰值下降, 电路的功能出现失效现象.

在图 4 中, 可以看到数据输出端的延迟时间随总剂量的增加而增大, 直到 500 Gy (Si) 时器件功能完全失效而无法测试. 输出延迟时间随总剂量的变化与器件的阈值电压变化有关, 阈值电压的负向漂移导致 CMOS 电路的晶体管有效导电沟道电阻增大, 对输出电容的充放电时间增加, 电路速度变慢, 延迟时间增大. 对于 PDSOI 器件, 随着现代工艺的改进, 栅氧逐渐变薄, 其对阈值电压的影响在减小, 因此, 场氧层和埋氧层中的感生电荷及电场分布成为影响器件总剂量辐射损伤特性的关键因素.

从图 1—4 中的功能错误数随总剂量变化情况可知, 当辐射总剂量超过 300 Gy (Si) 时, 开始出现逻辑错误. 晶体管阈值电压负漂使得 CMOS 电路的输出低电平上升和高电平下降, 当辐射总剂量累积到一定程度, 阈值电压的漂移引起晶体管的关断功能失效, 原来截止的 NMOS 晶体管出现导通, 而 PMOS 晶体管处于饱和导通状态, 当输出高电平的下降达到高电平最小阈值时, 出现“1”到“0”的位翻转现象, 这种状态的翻转导致器件逻辑功能出现错误. 反之则出现“0”到“1”的位翻转现象<sup>[12]</sup>. 当总剂量累积到 500 Gy (Si) 时, SRAM 存储单元的

数据几乎全部出现错误, 器件的功能失效, 这一点可从图 5 的数据输出波形中得以验证.

从以上实验结果可知, 实验所选用 SOI SRAM 器件为总剂量辐照敏感器件, 静态和动态功耗电流、输出高电平、传输延迟为器件的敏感参数, 这些参数与功能错误数随总剂量变化的对比关系可见图 1—4. 如图 1, 2 所示, 静态和动态功耗电流随总剂量的变化都滞后于错误数的突变, 因此这两种电流与功能错误数之间的相关性不大, 不适合作为器件功能失效的预警量. 而图 3, 4 中的传输延迟和输出高电平随总剂量变化与错误数的突变过程存在一定的相关性, 对器件逻辑功能出错有一定的预警性.

## 4 结论

对 0.8  $\mu\text{m}$ -PDSOI CMOS 工艺的静态随机存储器进行了  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐射下的总剂量辐照实验, 得出诸多有意义的结论, 为以后研究 PDSOI SRAM 的总剂量辐射损伤机理及抗辐射加固技术提供实验支持. 研究表明: N 沟道截止时源漏泄漏电流、寄生 N 沟管的场氧侧向漏电流以及背栅漏电流致使器件的功耗电流随总剂量的增加而增大, 随着器件栅氧层厚度不断减薄, 场氧和埋氧漏电成为辐射引起功耗电流增大的主要因素; 辐射引起的阈值电压漂移使得 CMOS 电路的输出高电平下降、低电平微小上升和峰 - 峰值大幅降低, 有效导电沟道电阻的增大, 对输出电容充放电时间增加, 造成传输延迟时间增大; 当总剂量累积到一定程度, 晶体管的关断功能因阈值电压的漂移而失效, 使得 CMOS 电路的输出高低电平发生变化, 存储单元出现位翻转现象, 进而造成器件逻辑功能出现错误; 静态和动态功耗电流与功能错误之间的相关性不大, 而传输延迟和输出高电平与逻辑功能出错存在一定相关性.

- [1] Liu X Y, Liu Y L, Sun H F, Wu D X, He Z J, Liu Z L 2002 *Chin. J. Semiconductors* **23** 213 (in Chinese) [刘新宇, 刘运龙, 孙海锋, 吴德馨, 和致经, 刘忠立 2002 半导体学报 **23** 213]
- [2] Liu S T, Golke K W, Anthony D 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2095

- [3] Liu H Y, Liu M S, Hughes H L 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3502
- [4] Baggio J, Ferlet-cavrois V, Lambert D, Paillet P, Wrobel F, Hirose K, Saito H, Blckmore E W 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2319
- [5] Han Z S 2007 *China Electronics News* **C01** (in Chinese) [韩郑生

- 2007 中国电子报 **C01**]
- [6] Liu S T, Heikkila W W, Golke K W, Anthony D, Hurst A, Kirchner G, Jenkins W C, Hughes H L, Mitra S, Ioannou D E 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2095
- [7] Brady F T, Brown R, Rockett L, Vasquez J 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2436
- [8] Fecher P S, Dougal G D, Sullwold J G 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 172
- [9] Guo T L, Zhao F Z, Liu G, Li D L, Li J, Zhao L X, Zhou X Y, Hai C H, Han Z S 2007 *Chin. J. Semiconductors* **28** 1184 (in Chinese) [郭天雷, 赵发展, 刘刚, 李多力, 李静, 赵立新, 周小茵, 海潮和, 韩郑生 2007 半导体学报 **28** 1184]
- [10] Zhao K, Liu Z L, Yu F, Gao J T, Xiao Z Q, Hong G S 2007 *Chin. J. Semiconductors* **28** 1139 (in Chinese) [赵凯, 刘忠立, 于芳, 高见头, 肖志强, 洪根深 2007 半导体学报 **28** 1139]
- [11] Guo T L, Han Z S, Hai C H, Zhou X Y, Li D L, Zhao L X 2007 *Chin. J. Electron Dev.* **30** 794 (in Chinese) [郭天雷, 韩郑生, 海潮和, 周小茵, 李多力, 赵立新 2007 电子器件 **30** 794]
- [12] Li M, Yu X F, Lu J, Gao B, Cui J W, Zhou D, Xu F Y, Xi S B, Wang F 2011 *Nucl. Tech.* **34** 452 (in Chinese) [李明, 余学峰, 卢健, 高博, 崔江维, 周东, 许发月, 席善斌, 王飞 2011 核技术 **34** 452]
- [13] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Li Y D, Cui J W, Li M S, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036106 (in Chinese) [高博, 余学峰, 任迪远, 李豫东, 崔江维, 李茂顺, 李明, 王义元 2011 物理学报 **60** 036106]

# Research on the total dose irradiation effect of partial-depletion-silicon-on insulator static random access memory

Li Ming<sup>1)2)3)</sup> Yu Xue-Feng<sup>1)2)†</sup> Xue Yao-Guo<sup>1)2)</sup> Lu Jian<sup>1)2)3)</sup>  
Cui Jiang-Wei<sup>1)2)3)</sup> Gao Bo<sup>1)2)3)</sup>

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

2) (*Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China*)

3) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 4 July 2011; revised manuscript received 12 October 2011)

## Abstract

In this paper, the changes of electrical parameters and their functional errors with the total radiation dose are studied, when the PDSOI static random access memory (SRAM) is irradiated under different total doses. After the SOI SRAM is irradiated by the  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray, the total dose radiation damage mechanism and the correlation between the changes of device parameters and function errors are discussed. For the large-scale SOI integrated circuits, this provides a possible method to further study the total dose radiation hardening and the radiation damage assessment of the devices. It is indicated that the increase of current consumption is due mainly to the radiation-induced leakage current from both field oxygen and buried oxide. The drift of threshold voltage creates the decline in output high level, the slight increase in output low level, the significant reduction in peak-peak value, and the increase of transmission delay. When the total dose accumulates and reaches a certain amount of dose, the logic mutation error emerges, resulting in the failure of shutdown function. There is a certain correlation between the transmission delay, the output high and the logic error.

**Keywords:** partial-depletion-silicon-on insulator, static random access memory, total-dose effects, power supply current

**PACS:** 61.82.FK, 61.80.Ed, 85.30.Tv, 07.85.-m

---

† E-mail: yuxf@ms.xjb.ac.cn