

# 静态存储器型现场可编程门阵列总剂量辐射损伤效应研究

高博<sup>1)2)3)</sup> 余学峰<sup>1)2)†</sup> 任迪远<sup>1)2)</sup> 李豫东<sup>1)2)</sup> 崔江维<sup>1)2)3)</sup>

李茂顺<sup>1)2)3)</sup> 李明<sup>1)2)3)</sup> 王义元<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)

(2010年4月11日收到; 2010年6月22日收到修改稿)

本文从 FPGA 器件内部最基本的 CMOS 单元出发, 分析了器件功能失效时反相器输出波形随累积剂量的变化关系, 进而研究 Altera SRAM 型 FPGA 器件<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线辐照后的总剂量辐射损伤效应. 实验结果表明: 由于场氧漏电和结构漏电的影响, 随着累积剂量的增加输出波形发生畸变, 峰峰值变为原来的十分之一左右, 但输出波形还有相对的高低电平; 同时, 输出高电平不能保持原有的状态, 迅速地向低电平转换, 并且转换速度随着累积剂量的增加而加快, 输出低电平相对初始值有一定程度抬高; 由于栅氧厚度变薄, 输出波形的上升时间、下降时间和延迟时间随累积剂量的变化很小.

**关键词:** <sup>60</sup>Co $\gamma$ , 总剂量辐射损伤效应, SRAM 型 FPGA, CMOS 单元

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

## 1. 引言

FPGA (field programmable gate array) 器件集成度高、功耗低、面积小、速度快、实现功能多, 并且可以缩短设计周期、减少设计费用、降低设计风险, 这些特点使得 FPGA 器件对于向着“更好、更快、更便宜”方向发展的航空航天领域有着十分广阔的应用前景. 但是, 随着工艺的发展, FPGA 器件相对于传统器件集成度越来越高、体积越来越小, 处于空间电离辐射环境时性能参数更易受到辐射影响; 同时, 实现的功能也越来越强大, 因此功能一旦发生退化, 将对卫星的电子系统产生巨大的影响, 进而影响卫星的可靠性, 缩短卫星的使用寿命.

国外自上世纪 90 年代就开展了有关 FPGA 器件辐射损伤效应的研究工作<sup>[1-5]</sup>, 但主要集中在 Xilinx SRAM (static random access memory) 型 FPGA 器件和 Actel 反熔丝型 FPGA 器件的工程应用及单粒子辐射效应方面, 针对 Altera SRAM 型 FPGA 器件的总剂量辐射损伤机理提及的较少. 国内对器件

辐射效应的研究近几年取得了很大的进步<sup>[6-11]</sup>, 但针对 FPGA 器件的辐射效应发展还是比较缓慢, 仍处于探索阶段, 已有的几篇报道主要集中在单粒子辐射效应和基于反熔丝工艺 FPGA 器件的总剂量辐射效应方面<sup>[12-14]</sup>, 对 SRAM 型 FPGA 器件尤其是 Altera SRAM 型 FPGA 器件的总剂量辐射损伤效应报道很少, 对总剂量辐射损伤机理探讨较浅, 并鲜有对抗辐射性能的测试方法和评估技术涉及.

目前, 国内外对 FPGA 器件的测试方法主要是通过实现特定的功能, 分析功能随累积剂量的变化, 从判断功能的好坏来评估器件的失效. 但功能随累积剂量的变化是一个突变的过程, 不能通过功能的变化来对器件的失效作出预警, 也不能分析器件的失效机理. 文中从 FPGA 器件内部最基本的 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 单元入手, 通过 CMOS 单元实现反向器功能, 测量反相器输出波形上升时间、下降时间、延迟时间和峰峰值随累积剂量的变化关系, 研究 FPGA 器件在<sup>60</sup>Co  $\gamma$  辐照下的总剂量辐射损伤效应及失效机理.

本文对 FPGA 器件进行的总剂量辐照实验及机

† 通讯联系人. E-mail: yuxf@ms.xjb.ac.cn

理分析,将对了解 FPGA 器件的总剂量辐射效应,建立 FPGA 器件抗辐射性能的测试方法及评估技术提供帮助;同时,为 FPGA 器件内部基本单元的抗辐射加固提供技术支持.

## 2. 器件选择及实验方法

### 2.1. 器件选择

FPGA 器件是由逻辑模块和电气程控互联组成的普通二维阵列,用来实现特定的硬件功能,可以根据需求改动和定制<sup>[15,16]</sup>. FPGA 器件种类繁多、性能各异,但我们并不是针对某一特定型号 FPGA 器件进行总剂量辐射损伤实验,而是为了研究 FPGA 器件总剂量辐射损伤的共性. Altera 公司 Cyclone 系列 EP1C6Q240C8 型 FPGA 器件集成度低,实验完成后易于对器件总剂量辐射损伤效应进行分析;同时它还包含 FPGA 器件的基本模块,如逻辑块、嵌入 RAM (random access memory), PLL (phase locked loop)、高级 I/O 接口等<sup>[16]</sup>. 基于这些考虑,本文选取 EP1C6Q240C8 型 FPGA 器件为研究对象.

### 2.2. 实验方法

电离辐照实验是在本所水储式  $5.37 \times 10^{15}$  Bq 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  辐照源上进行的. 实验采用累积剂量,辐照总剂量为 2.5 kGy (Si), 剂量率为  $7.13 \times 10^{-1}$  Gy (Si)/s. 实验中使用的辐照板分为母板和核心板,核心板上有 FPGA 器件、电源模块、以及配置芯片等.

辐照实验前搭建铅室,遮蔽不需要辐照的器件,这样有利于准确分析 FPGA 器件随累积剂量的变化关系. 辐照时器件处于静态(加电不工作状态)偏置,辐照过程中实时监测功耗电流,辐照到一定累积剂量时移位进行电参数和功能测试.

用 Altera 公司提供的 LPM (library of parameterized modules) 功能模块及 Verilog 语言对 FPGA 器件进行源程序编写,通过 Quartus 软件自带的 Logic-Lock 功能,在 FPGA 芯片内部限定的逻辑单元内实现反相器功能. 测试时通过信号发生器向器件输入信号,输入信号的频率是 100 kHz,幅值 5 V,示波器读取输出信号的上升时间、下降时间、延迟时间、峰峰值. 通过观察上升时间、下降时间、延迟时间和峰峰值随累积剂量的变化,研究 FPGA 器件在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  辐照下的总剂量辐射效应.

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1. 实验结果

图 1 示出了移位测试时,反相器输出波形随累积剂量的变化关系. 从图 1(a)中看到,开始辐照时反相器的输出波形状态正常,但当剂量累积达到一定程度,输出波形发生畸变. 图 1(b)是输出波形的放大图,从图中看到虽然输出波形发生畸变,但它还有相对的高低电平. 同时,输出波形的高电平不能保持其状态,快速向低电平翻转,并且翻转速度随着累积剂量的增加而加快;低电平相对于初始值有很小的抬高.

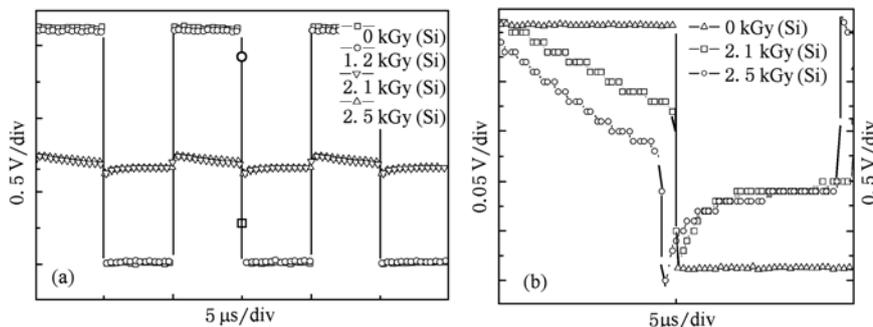


图 1 输出波形随累积剂量的变化关系 (a) 原图; (b) 局部放大图

图 2 和图 3 给出了移位测试时,输出波形的延迟时间、峰峰值及相应的功耗电流随累积剂量的变化关系. 从图中可以看到随着累积剂量的增加,延

迟时间变化很小. 当辐照累积剂量达到 2.1 kGy (Si)时,图 3 中输出波形的峰峰值变为 0.4 V 左右,只有初始值的十分之一. 功耗电流随着累积剂量的

增加而逐渐增大.

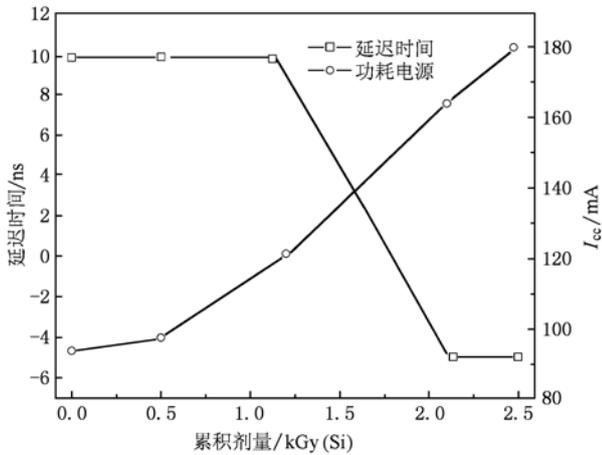


图2 输出波形的延迟时间及功耗电流随累积剂量的变化关系

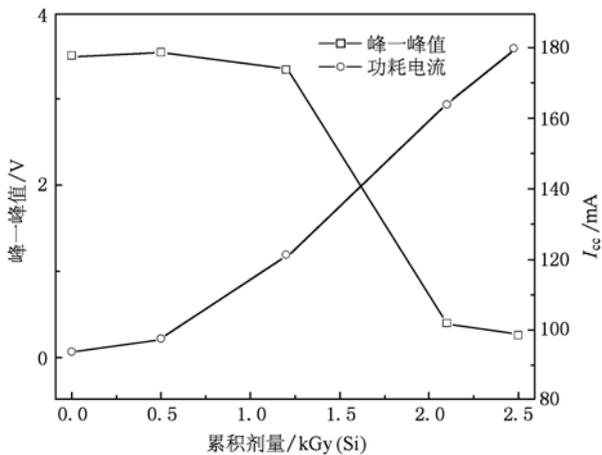


图3 输出波形的峰峰值及功耗电流随累积剂量的变化关系

图4给出了移位测试时,输出波形的上升时间、下降时间随累积剂量的变化关系.从图中看到上升时间、下降时间随着累积剂量的增加,变化很小.

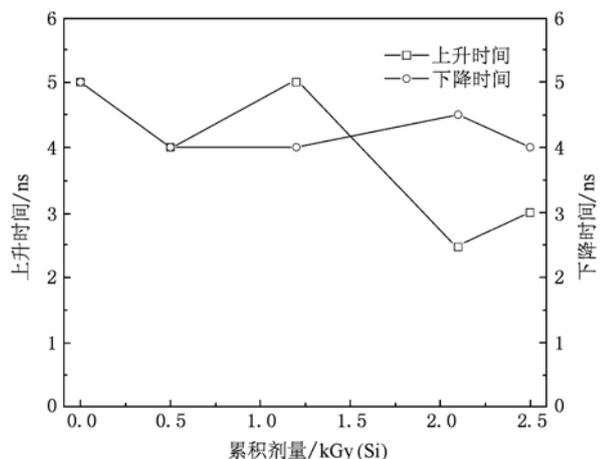


图4 输出波形的上升时间、下降时间随累积剂量的变化关系

### 3.2. 结果讨论

电离辐射效应主要是带电粒子(如低能电子、质子等), X,  $\gamma$  射线与 MOS (metal-oxide-semiconductor) 器件中栅介质作用的结果. 光子和带电粒子在电离辐射作用下,通过物体时被吸收或减速将损失的能量传递给原子,原子电离产生电子空穴对,这些电子空穴对通过复合、漂移、扩散、积累等,从而在 SiO<sub>2</sub> 绝缘层中产生氧化物陷阱电荷并在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面产生界面态陷阱电荷,导致 MOS 器件构成的集成电路性能参数显著变化,以致功能失效.

我们知道 FPGA 器件内部十分复杂,但它是由结构简单的 CMOS 单元构成的. 图5是一个基本 CMOS 反相器,当输入为高电平时,PMOSFET (p-type Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 截止, NMOSFET (n-type Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 导通,输出低电平;当输入为低电平时,PMOSFET 导通, NMOSFET 截止,输出高电平.

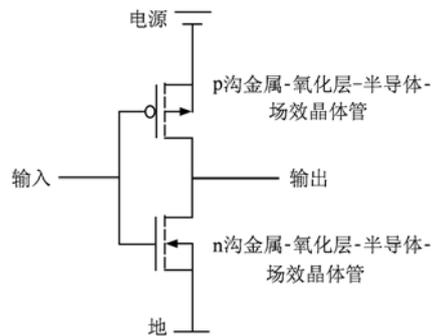


图5 CMOS 单元结构图

从图1中看到,虽然累积剂量增加到一定程度时器件的输出波形有很大变化,但是输出波形还可以区分高低电平. 我们认为波形畸变主要是 FPGA 内场氧漏电和结构漏电引起的. 场氧漏电类似在正常器件的旁边附加一个有一定阻值的电阻,场氧漏电随辐照累积剂量的增加而增大,但它并不直接影响旁边器件信号的正常输入输出,影响的仅仅是器件的功耗,即使在漏电很大的情况下, FPGA 器件的输出波形发生了很大变化,它仍然保持正常的输出状态,也就是说 FPGA 随着累积剂量的增加具有正常的逻辑功能. 因此,即使输出波形的峰峰值减小到原来十分之一左右(如图3所示),我们还可以看到有完整的输出波形. 从文献[17]中我们知道,在

总剂量达到一定程度时,利用 CMOS 单元实现的输出高低电平功能突然失效,因此它并不能反映 FPGA 器件损伤积累的渐变过程,也不能对器件的失效作出预警.但我们可以通过观察反相器输出波形随累积剂量的变化关系,判断器件发生功能突然失效的剂量点;同时对 FPGA 器件的总剂量辐射损伤的机理分析提供帮助.

从图 1 中我们还可以看到,在累积剂量达到 2.1 kGy(Si)时,输出状态为高电平时并不能保持高电平状态,而是快速向低电平翻转,我们认为这是由于 NMOSFET 边缘场氧漏电造成的. n 沟边缘场氧漏电大小与器件的集成度有很大关系,寄生 n 沟管也越多,场氧漏电越明显.随着累积剂量的增加, NMOSFET 的场氧漏电增大,使得输入为低电平时,输出高电平不能保持高电平状态,而是快速的向低电平翻转,并且翻转的速度随着累积剂量的增加而加快.同时,在相应的剂量点输出低电平有一个抬高,这主要是由于伴随着器件尺寸大幅度的缩小,沟道长度的缩短, n 沟道边缘的场氧漏电途径也相应大大缩短,在晶体管与晶体管之间也会产生大量的泄电,因此造成了输出低电平的抬高.但是,由于晶体管之间的漏电很少,低电平在一个小的抬高后保持平稳.

在图 2 中我们看到功能失效前反相器输出波形的延迟时间随累积剂量的变化很小.辐照时,输出波形的延迟时间随累积剂量的变化与器件阈值电压的变化密切相关.阈值电压随辐照累积剂量的增大而负向漂移,其漂移主要是由氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷共同作用的结果.相对与普通的电路来说,由于工艺改进和栅氧层变薄, CMOS 工艺 FPGA 器件的栅氧层对总剂量辐照并不敏感,随着辐照累积剂量的增加,阈值电压的负向漂移并不明显.影响 FPGA 器件总剂量辐射损伤特性并不是电场在栅氧层的分布,而是在 n 沟道边缘的分布状态,也就是场氧的分布,如图 6 所示.在薄栅工艺中,栅氧层十分薄,辐照主要引起场氧层漏电,影响输出波形上升时间、下降时间、延迟时间的栅氧层中氧化物陷阱电荷及界面态陷阱电荷很少,因此输出波形的上升时间、下降时间、延迟时间随累积剂量没有明显的变化,如图 2,3,4 所示.

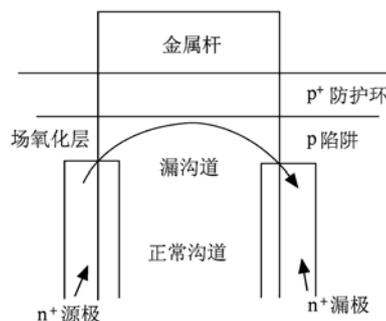


图 6 n 沟边缘场氧化层下寄生晶体管截面示意图<sup>[18]</sup>

在图 2,3 中也看到功耗电流随着累积剂量的增加而增大,并且增长的幅度较大.我们知道由于场氧层的厚度比栅氧层厚很多,生长工艺控制不如栅氧严格,使得场氧相对栅氧非常“软”,在很小的辐照剂量下,场氧层就可以积累足够多的界面电荷,使寄生 n 沟管导通,导致电路的功耗电流大大增加.并且,伴随着器件尺寸的大幅度缩小,沟道长度的缩短, n 沟道边缘的场氧漏电途径也相应大大缩短,从而使得场氧漏电更易发生.此外,场氧中感生的大量陷阱电荷,不仅会在器件的源漏区产生漏电流,还将在晶体管与晶体管之间产生泄漏电流.因此,功耗电流随累积剂量的增加大幅度的增长.

## 4. 结 论

研究表明由于场氧漏电及结构漏电的影响,在累积剂量达到一定程度时输出波形发生畸变,但还可以区分相对高低电平;同时,输出波形的高电平不能保持其状态,快速向低电平翻转,低电平相对初始值有个很小的抬高.由于工艺的改进,尤其是栅氧的变薄,使得栅氧对总剂量辐照变得不敏感,导致输出波形的上升时间、下降时间、延迟时间变化很小.在器件的源漏区产生大量漏电流,并且在晶体管与晶体管之间也产生泄漏电流,致使器件的功耗电流随累积剂量的增加而大幅度的增大.对于 Altera 公司 Cyclone 系列 FPGA 器件进行总剂量辐射损伤实验,我们得出了许多有意义的结论,为今后 SRAM 型 FPGA 器件的辐射损伤机理的研究及内部基本单元的抗辐射加固提供支持.

- [1] Farouk S, Sias M 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1343
- [2] Lum G K, May R J, Robinette L E 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 2487
- [3] Heather Quinn, Keith Morgan, Paul Graham, Jim Krone, Michael Caffrey, Kevin Lundgreen 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2037
- [4] Morgan K S, McMurtrey D L, Pratt B H, Michael J, Wirthlin 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2056
- [5] Wang J J, Samiee S, Chen H S, Huang C K, Cheung M, Borillo J, Sun S N, Cronquist B, McCollum J 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3759
- [6] He C H, Li Y H, 2007 *Chin. Phys.* **16** 2773
- [7] Chen G F, Yan W B, Chen H J, Li X H, Li Y X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 293
- [8] Zhang E X, Qian C Z, Zheng X, L Cheng L, Wang X, Wang Y M, Wang X H, Zhao G R, En Y F, Luo H W, Shi Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 792
- [9] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F, He C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展、陆 妩、任迪远、王义元、郭 旗、余学锋、何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [10] He C H, Geng B, He B P, Yao Y J, Li Y H, Peng H L, Lin D S, Zhou H, Chen Y S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 194 (in Chinese) [贺朝会、耿 斌、何宝平、姚育娟、李永宏、彭宏论、林东生、周 辉、陈雨生 2004 物理学报 **53** 194]
- [11] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉、杜 磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **56** 3400]
- [12] Zhao J C 2002 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **22** 559 (in Chinese) [赵聚朝 2002 核电子学与探测技术 **22** 559]
- [13] Yuan G H, Yang H M, Xu X, Dong X C 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 487 (in Chinese) [袁国火、杨怀民、徐 曦、董秀成 2006 强激光与粒子束 **18** 487]
- [14] Du C H, Zhan J L 2009 *Annual Meeting of Resist Radiation Electronics and Electric Magnetic Pulse in the tenth Shenyang*, July 17—19, p198 (in Chinese) [杜川华、詹俊岭 2009 第十届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会 沈阳, 7 月 17—19, 198]
- [15] <http://www.fpga.com.cn/> [2010-04-11]
- [16] <http://www.altera.com.cn/> [2010-04-11]
- [17] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Wang Y Y, Li P W, Yu Y 2009 *Atomic Energy Science and Technology* **43** 1128 (in Chinese) [高 博、余学峰、任迪远、王义元、李鹏伟、于 跃 2009 原子能科学技术 **43** 1128]
- [18] Yu X F, Ren D Y, L u W, Zhang G Q, Guo Q, Yan R L 1997 *Nuclear Techniques* **20** 24 (in Chinese) [余学锋、任迪远、陆 妩、张国强、郭 旗、严荣良 1997 核技术 **20** 24]

# Research on the total-dose irradiation damage effect for static random access memory-based field programmable gate array

Gao Bo<sup>1)2)3)</sup> Yu Xue-Feng<sup>1)2)†</sup> Ren Di-Yuan<sup>1)2)</sup> Li Yu-Dong<sup>1)2)</sup> Cui Jiang-Wei<sup>1)2)3)</sup>  
Li Mao-Shun<sup>1)2)3)</sup> Li Ming<sup>1)2)3)</sup> Wang Yi-Yuan<sup>1)2)3)</sup>

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

2) (Xinjiang Province Key Lab of Electronics Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

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

(Received 11 April 2010; revised manuscript received 22 June 2010)

## Abstract

In order to investigate the total-dose irradiation effects of Altera static random access memory (SRAM)-based FPGA (field programmable gate array), the irradiation response of basic cell of FPGA, *i. e.* the CMOS, is studied, and the relationship of the output waveform as a function of total dose has been obtained. It indicates that the output waveforms become aberrated and the peak-peak value turns to about 1/10 of the initial value as the total dose increased, resulting from the degradation of leakage current both from field oxygen and the structure; but there are relatively high and low levels left in the output waveforms. Meanwhile, the high level can't keep the already existing state and changes to the low level, and the conversion speed is accelerated with the increase of the total dose. The low level becomes larger than the initial value. As the gate-oxygen is quite thin, the rise time, fall time, and delay of the output waveforms change little with the total dose.

**Keywords:**  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ , total-dose irradiation damage effects, SRAM-based FPGA, CMOS cell

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

---

† Corresponding author. E-mail: yuxf@ms.xjb.ac.cn