

典型 FLASH 存储器 ^{60}Co γ 电离辐射效应测试与分析

宋 卫¹ 曲 狄² 吾勤之²

1 (上海航天电子技术研究所 上海 201109)

2 (上海航天技术基础研究所 上海 201109)

摘要 通过测量卫星用 FLASH 存储器的内部存储数据逻辑状态出错(WW $\neq$ 0)、电源电流、输出高低电平电压、输入漏电流以及交流参数随辐照剂量的变化情况,对 FLASH 存储器的电离辐射效应损伤规律、敏感参数进行了研究。研究表明,FLASH 存储器的电离辐射效应损伤规律主要表现为随辐照剂量增加,存储数据逻辑状态出现错误,数据读取、数据擦除以及维持模式下的电源电流逐渐增大,这些参数可以作为辐照敏感参数;动态辐照偏置下存储数据逻辑状态出错时的剂量阈值比静态辐照偏置和不加电辐照偏置条件下大一个数量级以上。

关键词 FLASH 存储器, 电离辐射效应, 辐照敏感参数, 辐照偏置条件

中图分类号 TN432, TN79

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010202

自 20 世纪 90 年代初, Intel 公司推出基于浮栅结构的新型闪速存储器 FLASH 后, FLASH 存储器开始在卫星电子系统中得到广泛使用。近年来, FLASH 存储器的单粒子效应(Single Event Effects, SEEs)是国内外卫星抗辐射加固领域的研究热点^[1-2]。由于 FLASH 存储器的结构复杂,外部管脚有限,基于中小规模 CMOS 数字电路的反相器 IV 特性曲线以及 MOS 晶体管阈值电压测量方法较难适用,而国内外目前对于 FLASH 存储器的电离辐射效应如何测试、抗辐射能力如何评价尚未形成统一的规范^[3]。因此,开展 FLASH 存储器的电离辐射效应损伤规律及敏感参数研究对于建立电离辐射效应模拟试验方法具有重要意义。

本文通过测量 ^{60}Co γ 射线辐照下典型 FLASH 存储器的内部存储数据逻辑状态出错(WW $\neq$ 0)、电源电流、输出高低电平电压、输入管脚漏电流以及交流参数随辐照剂量的变化情况,对 FLASH 存储器的电离辐射效应损伤规律进行了分析,探讨了 FLASH 存储器的辐照敏感参数。

1 试验条件

试验样品为 ATMEL 公司生产的 AT29C256 (32 K $\times$ 8 位)FLASH 存储器。采用 ^{60}Co γ 射线源对试验样品进行辐照试验。辐照剂量率选取为

0.01–0.1 Gy(Si) $\cdot$ s⁻¹。根据卫星用电子元器件的工作状态,试验过程中 FLASH 存储器内部每个存储字节先写入数据“55H”,即“0”与“1”相互间隔的状态。辐照过程中其具体偏置条件分别为:(1) 工作偏置:试验样品的电源、控制等端口施加正常的电压值,使 FLASH 存储器处于数据读取工作状态;(2) 静态偏置:样品电源端正常施加电压值,其他各输入端口经限流电阻接至电源电压或地;(3) 不加电偏置:样品所有管脚端接在一起,不施加任何信号。

辐照测试采取移位测试,测试系统为自制 FLASH 存储器测试系统,测试参数主要有 FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出错情况(WW $\neq$ 0),数据读取、数据擦除以及维持工作模式下的电源电流,输入管脚漏电流,输出高低电平电压以及数据建立时间和数据保持时间等典型交流参数。

2 试验结果

2.1 存储数据逻辑状态出错情况(WW $\neq$ 0)与辐照剂量之间的关系

图 1 是三种偏置条件下 FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出错情况(WW $\neq$ 0)与辐照剂量之间的关系。从图 1 中看出,当辐照剂量达到 FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出错的阈值后,随着

第一作者:宋卫,男,1964 年出生,1986 年毕业于上海交通大学,工程师,从事星载计算机技术研究

收稿日期:2014-01-22,修回日期:2014-03-26

辐照剂量增加, 存储数据逻辑状态出错数量将以指数形式猛增, 表明 FLASH 存储器内部存储数据的逻辑状态对辐照剂量比较敏感。此外, 从图 1 中还可以看出, 出错情况和辐照偏置条件有关, 当辐照到相同总剂量时, 工作偏置条件下的出错位数要远

超过其他两种偏置条件下的出错位数, 且静态辐照偏置和不加电辐照偏置下, 存储数据逻辑状态出错时的剂量阈值要比工作辐照偏置下存储数据逻辑状态出错时的剂量阈值大一个数量级以上。

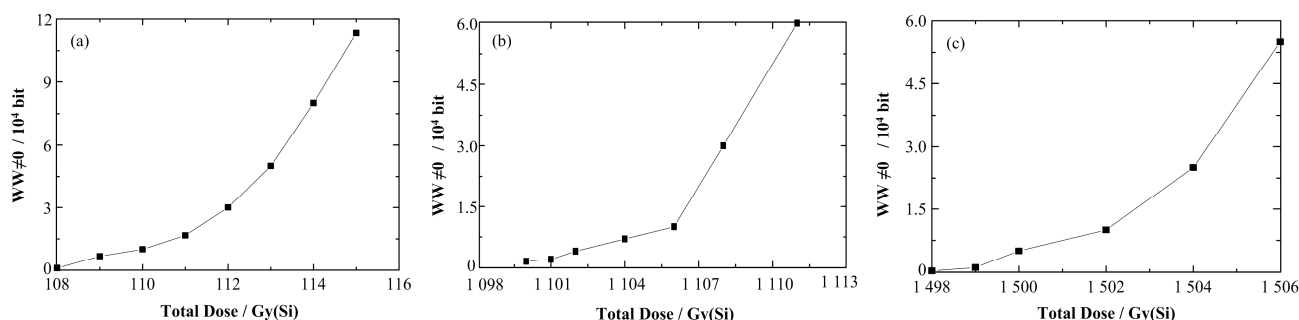


图 1 工作偏置(a)、静态偏置(b)和不加电辐照偏置条件下(c)典型 FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出错情况(WW≠0)与辐照剂量的关系

Fig.1 Relationship between logic errors of typical flash memory (WW≠0) and radiation dose under working bias (a), static bias (b) and no-power bias (c) conditions.

上述试验结果表明, 工作偏置是 FLASH 存储器的最劣辐照偏置条件, 该偏置相比于静态辐照偏置和不加电辐照偏置能够引起 FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出现更多的错误。

2.2 不同工作模式下的电源电流变化情况与辐照剂量之间的关系

及维持工作模式下典型 FLASH 存储器的电源电流变化情况与辐照剂量之间的关系。从图 2 中看出, 随着辐照剂量增加, 三种工作模式下典型 FLASH 存储器的电源电流都出现了增大现象, 表明上述三种工作模式下 FLASH 存储器的电源电流对辐照剂量都比较敏感。

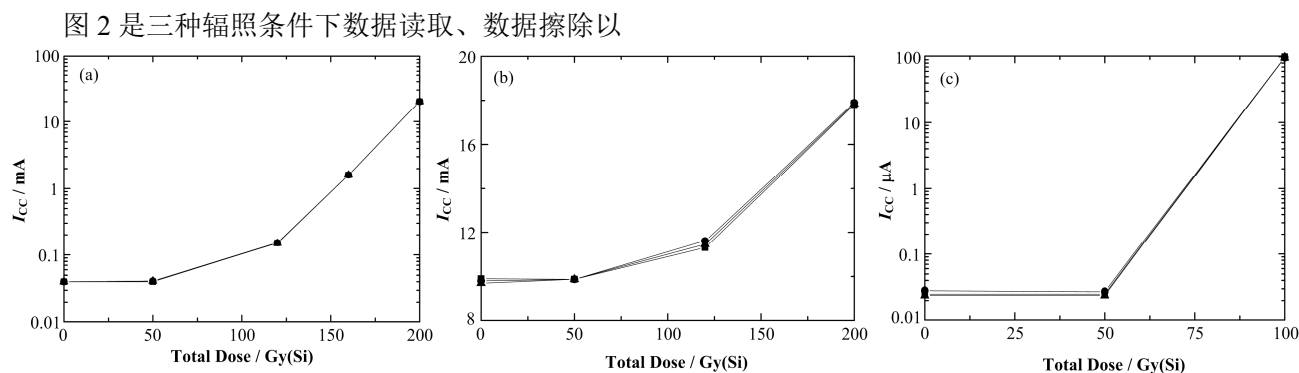


图 2 数据读取(a)、数据擦除(b)和维持模式(c)工作模式下典型 FLASH 存储器电源电流变化情况与辐照剂量的关系

Fig.2 Relationship between power current of typical flash memory and radiation dose under reading working status (a), erasing working status (b) and holding working status (c) conditions.

2.3 输入管脚漏电流变化情况与辐照剂量之间的关系

图 3 是 FLASH 存储器的输入管脚漏电流变化情况与辐照剂量之间的关系。从图 3 中可以看出, 随着辐照剂量增加, 输入管脚漏电流与辐照前的测量值相比基本没有发生变化, 表明 FLASH 存储器的输入管脚漏电流对辐照剂量不敏感。

2.4 输出高低电平电压变化情况与辐照剂量之间的关系

图 4 是典型 FLASH 存储器的输出高电平电压和输出低电平电压变化情况与辐照剂量之间的关系。从图 4 中可以看出, 随着辐照剂量增加, 典型 FLASH 存储器输出高低电平电压与辐照前的测量值相比基本未发生变化, 表明 FLASH 存储器的输出高低电平电压对辐照剂量不敏感。

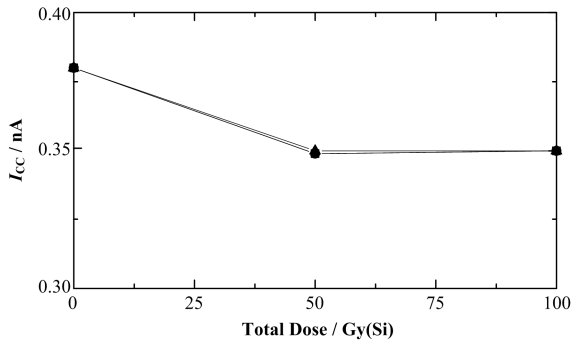
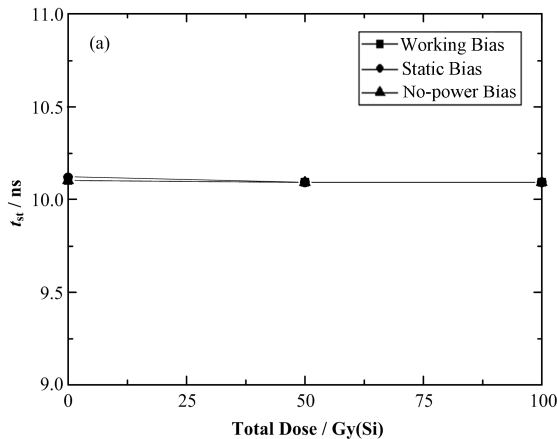


图3 典型 FLASH 存储器输入管脚漏电流变化情况与辐照剂量的关系

Fig.3 Relationship between leakage current on input pin of typical flash memory and radiation dose under reading working status.

2.5 交流参数变化情况与辐照剂量之间的关系

图5是FLASH存储器的数据建立时间、数据保持时间变化情况与辐照剂量之间的关系。从图5中可以看出,随着辐照剂量增加,典型FLASH存储器的数据建立时间和数据保持时间基本没有发生



变化,表明FLASH存储器的数据建立时间和保持时间对辐照剂量不敏感。

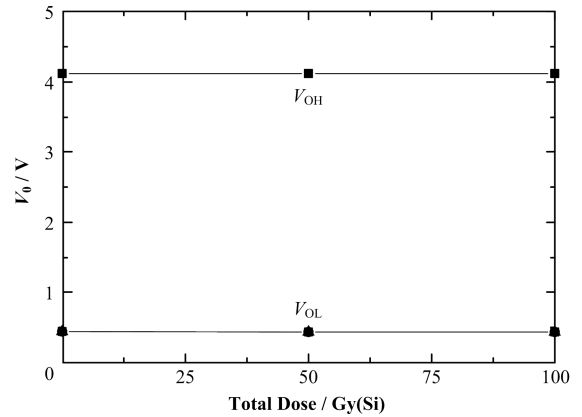


图4 典型 FLASH 存储器输出高电平电压、输出低电平电压变化情况与辐照剂量的关系

Fig.4 Relationship between output high and low voltage of typical flash memory and radiation dose.

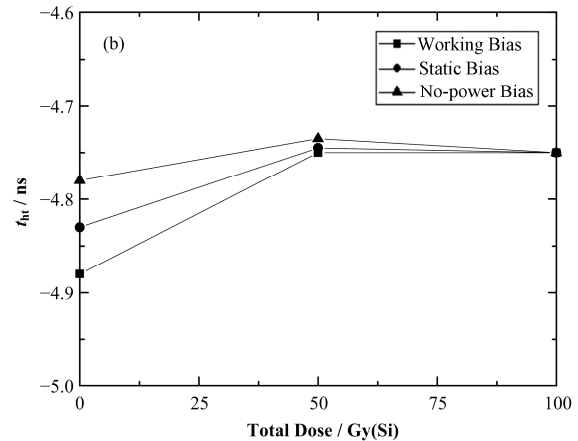


图5 典型 FLASH 存储器的数据建立时间(a)、数据保持时间(b)变化情况与辐照剂量的关系

Fig.5 Relationship between data setting time (a) and holding time (b) of typical flash memory and radiation dose.

3 分析与讨论

辐射效应测量是进行辐射效应损伤规律研究的基础,如何从众多电参数中选出既对电离辐射效应敏感,又能反映电离辐射效应损伤程度与辐照剂量之间关系的参数作为测量参数是进行FLASH存储器电离辐射效应损伤规律研究的首要前提。

以上试验研究结果表明,FLASH存储器的电离辐射效应损伤规律主要表现为:随着辐照剂量增加,存储数据的逻辑状态出现错误(WW $\neq$ 0),数据读取、数据擦除以及维持模式下的电源电流逐渐增大。因此,可以选取存储数据逻辑状态出错(WW $\neq$ 0)以及三种不同工作模式下电源电流作为FLASH存储器

的辐照敏感参数。通过测量这些辐照敏感参数变化情况与辐照剂量之间的关系,对FLASH存储器的抗辐射能力进行评估。

FLASH存储器属于典型的CMOS工艺器件,其电离辐射效应损伤机理仍是由于辐照感生氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷引起器件参数特性显著退化,可以结合辐照感生氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷的产生和运输对FLASH存储器的电离辐射效应损伤规律进行分析^[4-8]。FLASH存储器其基本结构主要由控制电路和矩阵存储单元组成,其中控制电路为典型的CMOS结构,基本单元是NMOS和PMOS晶体管组成的反相器;而存储单元则为非易失性浮栅结构。

对 FLASH 存储器控制单元, 在 ^{60}Co γ 射线辐照下, NMOS 晶体管和 PMOS 晶体管表面 SiO_2 栅氧化层及隔离氧化层中产生了大量电子-空穴对。电子和空穴在外加电场作用下, 分别向两个电极方向漂移。电子除部分与空穴复合外, 剩余的很快漂移出氧化层。空穴在漂移过程中, 一部分与电子发生复合, 一部分被氧化层中的缺陷俘获, 另一部分在正栅压下, 缓慢向 SiO_2/Si 界面移动, 在 SiO_2/Si 界面反应形成界面态。氧化层俘获电荷和界面态电荷在半导体(Si)表面感生出电荷, 使 SiO_2/Si 界面电势变化, 从而导致 MOS 晶体管的阈值电压漂移。对 NMOS 晶体管来说, 氧化物陷阱电荷使得阈值电压负漂; 对 PMOS 晶体管来讲其阈值电压正漂。当 NMOS 晶体管阈值电压漂移过零时, 将无法出现截止状态, 而 PMOS 晶体管则是无法导通, 进而使得控制电路逻辑紊乱和功能失效。一般情况下, 隔离氧化层的厚度比栅氧化层厚度大得多。根据 MOS 晶体管的剖面图可知, 栅极会有一小部分覆盖在隔离氧化层上, 而辐照在隔离氧化层中会产生大量的陷阱电荷, 因此, 栅在隔离氧化层下的阈值电压漂移较大, 使处于隔离氧化层边缘的源漏区之间产生寄生沟道, 从而导致源极与漏极之间产生严重的泄漏电流, 使得晶体管漏极电流增大^[9-11]。在集成电路中一般表现为电源电流的增大, 正如本文中试验结果所示。

FLASH 存储器的存储单元即是在普通 MOS 晶体管的结构上多了一层被 SiO_2 包围的多晶硅, 一般位于原来的栅极和沟道之间。数据的写和擦除主要是通过改变浮栅的带电状态, 浮栅带电状态改变, 对应控制栅的固定电压就会处于导通或截止状态, 即 FLASH 存储单元的状态“0/1”也在发生改变。对存储单元来讲, 其主要失效机理为: 辐射在浮栅周围的氧化层中产生电子-空穴对, 经过快速复合过程存留下来的空穴漂移到浮栅, 来复合掉浮栅上的电子, 降低浮栅晶体管的阈值电压。和控制电路相比, 由于空穴迁移率较低且浮栅面积较小, 所以空穴与浮栅上的电子复合几率小, 其过程需要的时间久, 且较大的辐射剂量才会造成存储单元的功能失效^[12-13], 所以对 FLASH 存储器, 在总剂量辐照下, 控制单元的辐射敏感性要高于存储单元的敏感性。

工作偏置是最劣偏置的原因可能是 FLASH 内部单元源栅漏各端对应的电压不同, 导致了内部电势和电场不同, 对辐射的敏感程度不同。在工作偏置时, 栅端可能是固定的电位, 电场加剧了电子与空穴的分离, 削弱了复合, 在单元内引入了更多的氧化物陷阱电荷, 造成了最大程度的辐射损伤。而

静态和不加电的偏置条件则可能使存储器内部单元处于浮空状态, 因为没有电场作用, 氧化物中的电子和空穴的复合起主要作用, 损伤较工作偏置小, 错误个数的上升幅度不明显。当总剂量增加到一定程度, 错误个数才明显上升^[14]。

4 结语

本文通过测量 ^{60}Co γ 射线辐照下典型 FLASH 存储器的存储数据逻辑状态出错情况(WW $\neq$ 0)、电源电流、输出高低电平电压、输入管脚漏电流以及时间参数随辐照剂量的变化情况, 对 FLASH 存储器的电离辐射效应损伤规律、辐照敏感参数等进行了研究。研究结果表明, 存储数据逻辑状态出错情况(WW $\neq$ 0)以及不同工作模式下的电源电流是 FLASH 存储器的辐照敏感参数, 通过测量辐照过程中这些参数变化情况与辐照剂量之间的关系可以对 FLASH 存储器的抗辐射能力进行评估; 辐照条件下, FLASH 存储器内部存储数据逻辑状态出错(WW $\neq$ 0)与偏置条件密切相关, 工作辐照偏置下逻辑状态出错时的辐照剂量阈值比静态辐照偏置和不加电辐照偏置下大一个数量级以上。

参考文献

- 1 Nguyen A B, Guertin S M, Swift G M, *et al.* Radiation effects on advanced flash memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999, **46**(6): 1744-1749
- 2 Lelis A J, Murrilln S R, Oldham T R, *et al.* Radiation response of advanced commercial SRAMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, **43**(6): 3103-3107
- 3 贺朝会, 耿斌, 何宝平, 等. 大规模集成电路总剂量效应测试方法初探[J]. 物理学报, 2004, **53**(1): 194-199
HE Chaohui, GENG Bin, HE Baoping, *et al.* Test methods of total dose effects in very large scale integrated circuits[J]. Acta Physica Sinica, 2004, **53**(1): 194-199
- 4 Devine A B. The structure of SiO_2 : its defects and radiation hardness[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(6): 452-459
- 5 Boesch H E. CMOS inverter design-hardened to the total dose effect[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, **43**(6): 3097-3101
- 6 Boesch H E. Interface-state generation in thick SiO_2 layers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, **29**(6): 1446-1451
- 7 Ma T P, Dressendorfer P V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits[M]. New York: Wiley, 1989
- 8 Lai S K. Interface trap generation in silicon dioxide when

- electrons are captured by trapped holes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(5): 2540–2546
- 9 徐导进, 刘伟鑫, 王晨, 等. 典型 CMOS 存储器电离辐射效应[J]. *上海航天*, 2011, **1**: 65–68
XU Daojin, LIU Weixin, WANG Chen, *et al.* Ionizing irradiation effect on typical CMOS memory devices[J]. *Aerospace Shanghai*, 2011, **1**: 65–68
 - 10 郭红霞. 集成电路电离辐射效应数值模拟及 X 射线剂量增强效应研究[D]. 西安电子科技大学, 2002
GUO Hongxia. Numerical simulation of ionizing radiation effects and study on the X-ray dose enhancement effects for integrated circuit[D]. Xidian University, 2002
 - 11 李明, 余学峰, 卢健, 等. PDSOI CMOS SRAM 总剂量辐射及退火效应研究[J]. *核技术*, 2011, **34**(6): 452–456
LI Ming, YU Xuefeng, LU Jian, *et al.* Research on total dose irradiation and annealing effects of PDSOI CMOS SRAM[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, **34**(6): 452–456
 - 12 李豫东, 张立国, 任建岳. 空间光学传感器中 Flash 存储器的辐射效应与加固[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(10): 1858–1863
LI Yudong, ZHANG Ligu, REN Jianyue. Radiation effect and radiation hardening of Flash memory in space optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1858–1863
 - 13 张兴尧, 郭旗, 张乐情, 等. Flash 存储器总剂量辐射损伤效应和退火特性[J]. *核技术*, 2013, **36**(8): 080201
ZHANG Xingyao, GUO Qi, ZHANG Leqing, *et al.* Flash memory ionizing radiation effects and annealing characteristics[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, **36**(8): 080201
 - 14 李茂顺, 余学峰, 任迪远, 等. 不同偏置条件下 CMOS SRAM 的总剂量辐射效应[J]. *微电子学*, 2011, **41**(1): 128–132
LI Maoshun, YU Xuefeng, REN Diyuan, *et al.* Total dose irradiation effects of CMOS SRAM under different bias conditions[J]. *Microelectronics*, 2011, **41**(1): 128–132

Testing and analysis of ^{60}Co γ ionizing radiation effects on typical flash memory

SONG Wei¹ QU Di² WU Qinzh²

¹(Shanghai Academy Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

²(Shanghai Academy Basic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract Background: Flash memory is a critical part of electrical system on satellite, its characteristics of antiradiation is of great significance for system design. **Purpose and Methods:** we need to investigate the ionizing irradiation damage and sensitive parameters through testing date logic state, power current, output voltage level, leakage current and Alternating Current parameters. **Results:** Date logic state appears some errors along with increasing of total radiation dose. Also power current on reading, erasing and holding status increase as radiation dose rising. The failure level on dynamic bias is one-order-magnitude higher than that on static and no power biases. Logic state and power current are sensitive parameters through the experiment results. **Conclusion:** Results analysis and discussion on the radiation damage phenomenon would provide a theoretical basis and method on comprehensive radiation evaluation of flash memories.

Key words Flash memory, Ionizing radiation effects, Sensitive parameters, Radiation biases

CLC TN432, TN79