

文章编号 1004-924X(2008)10-1858-06

# 空间光学遥感器中 Flash 存储器的辐射效应与加固

李豫东<sup>1,2</sup>, 张立国<sup>1</sup>, 任建岳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**从电路结构入手,分析了工作在某空间光学遥感器中的 Flash 存储器在空间环境下由电离辐射(总剂量)效应造成器件失效的机理。认为电离作用使晶体管的阈值电压漂移,引起 Flash 的控制电路与存储单元失效,且相对于浮栅结构的存储单元,控制电路对辐射更敏感;陷阱电荷的积累使器件的静态电流、动态电流增大。对器件进行了<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线总剂量辐射实验,得出器件的失效阈值在 15~20 krad(Si),并验证了上述分析结果。提出了 N 模冗余、校验码、冷备份等抗辐射加固方法。

**关键词:**空间光学遥感器;Flash 存储器;总剂量效应;<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线;辐射加固

**中图分类号:**TP73;TP333.4 **文献标识码:**A

## Radiation effect and radiation hardening of Flash memory in space optical remote sensor

LI Yu-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-guo<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** On the basis of the circuit structure of the devices, the Total Dose Effects (TDEs) and invalid mechanism of Flash devices in a space optical remote sensor in space were analyzed. The results suggest that the ionization effects can make the threshold voltage of transistors in devices drift to cause the control circuit and memory cells to lose their effectiveness. And the control circuit becomes invalidation earlier than that of memory cells. With the TDEs, the accumulation of trap charge makes the static current and dynamic current increase. According to the radiation experiment using <sup>60</sup>Co  $\gamma$  source, it is proved that the invalid thresholds of these devices are between 15 krad(Si) and 20 krad(Si). Moreover, some radiation hardening methods are put forward, such as N modular redundancy, check coding and cold backup.

**Key words:** space optical remote sensor; Flash memory; Total Dose Effect(TDE); <sup>60</sup>Co  $\gamma$  ray; radiation hardening

收稿日期:2008-04-28;修订日期:2008-07-09.

基金项目:国家 863 计划基金资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

# 1 引 言

Flash 存储器是一种新型电擦除可编程非易失性存储器。它兼顾了 EPROM 和 E2PROM 两种存储器的优点,结构简单、容量大、可以反复擦除和编程,数据掉电保存可长达 10 年。作为一种理想的数据存储介质,Flash 已开始应用于卫星遥感、航天探测等高技术、高可靠性的领域<sup>[1-4]</sup>。由于空间的辐射环境中存在着多种粒子(电子、质子与带电重粒子)与宇宙射线,对 Flash 存储器产生辐射效应,会引起数据访问速率、噪声容限、供电电流等特性参数的剧烈变化,甚至造成数据错误或功能失效,严重地威胁相关电子系统的可靠运转。因此,找出引起电路特性变化的主要原因,采取有效的加固措施提高器件的抗辐射能力,是目前该种器件应用于航天电子学的一个迫切需要研究的课题。

国外对 Flash 存储器空间辐射效应的研究,大多侧重于单粒子辐射效应,对总剂量效应进行的研究较少。国内对此领域的研究还处于探索阶段。由于 Flash 电路的集成度高、容量大、失效模式复杂,所以实验与测试方法都比较复杂。因此,对实验现象与电路内部结构进行分析,找出电路特性参数与辐射变化的相关性与失效原因,是研究的关键所在。为了实现研究目标,本文以应用于某空间光学遥感器中的 Flash 存储器作为研究对象,对其电路结构与总剂量辐射效应进行分析,并通过<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线辐射实验验证了分析结果。

## 2 Flash 的电路结构及总剂量辐射失效分析

### 2.1 Flash 的电路结构

Flash 的型号为 MMFL64002604B,采用 CMOS 混合集成工艺,电路的基本结构如图 1 所示,由控制电路(控制逻辑电路、读写逻辑电路与译码电路)与矩阵存储单元组成<sup>[1]</sup>。控制逻辑电路根据外部控制信号产生擦除、编程、读写等命令及时序。读写逻辑电路由数据锁存器与输入输出缓冲器构成,是矩阵存储单元与外部接口的数据通路。译码电路将地址转换为具体存储单元的行

列信息,对存储单元进行选通操作。

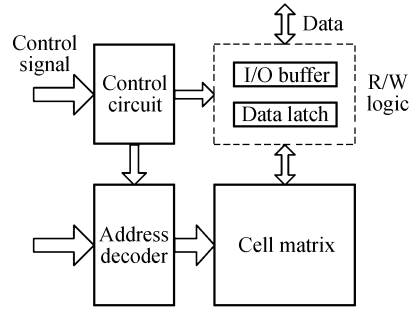


图 1 Flash 的结构

Fig. 1 Structure of Flash

控制电路为典型的 CMOS 结构,基本单元是 nMOS 晶体管与 pMOS 晶体管构成的反相器<sup>[2]</sup>。对于 nMOS 晶体管,栅极加正偏压,当偏压大于阈值电压时,晶体管开始导通;栅极电压小于阈值电压时,晶体管截止。对于 pMOS 晶体管,栅极加负偏压,情形与 nMOS 相反。

如图 2 所示,与 CMOS 结构不同,存储单元为非易失性浮栅结构,有两个栅:一个控制栅和一个位于沟道和控制栅之间的浮栅<sup>[3-4]</sup>。沟道和浮栅之间的氧化层很薄,电子可以通过 F-N 隧道效应或热电子注入机制在浮栅和源区或沟道之间传输。需要写入信息时,只需向浮栅注入电子。根据浮栅的带电状态,存储单元成为耗尽型或增强型的晶体管。在控制栅上加一定偏压,晶体管就处于截止或导通状态,对应于数据位‘1’或‘0’。

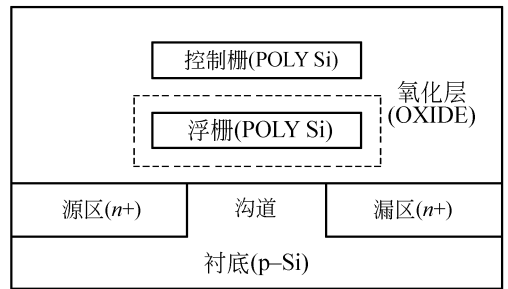


图 2 Flash 存储单元的浮栅结构

Fig. 2 Floating-gate structure of memory cells in Flash

### 2.2 总剂量辐射效应分析

总剂量辐射效应使 MOSFET 栅极和衬底间的 SiO<sub>2</sub> 介质中电离出电子空穴对,100 rad(Si)的剂量在每立方厘米 SiO<sub>2</sub> 中将产生 7.8×10<sup>14</sup> 电子空穴对。当栅上加正偏压时,迁移率较大的电子

(在干式氧化物中,电子迁移率典型值为  $20 \text{ cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ )大部分溢出至栅,一部分与空穴复合,大部分空穴(在干式氧化物中,空穴迁移率典型值为  $3 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ )在电场作用下向  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面运输<sup>[5]</sup>。由于电子与空穴迁移率的差异,在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面引入界面态,产生正空间电荷与界面态电荷,使阈值电压发生漂移。以 nMOS 为例,这种漂移可用式(1)表示:

$$\Delta V_T = -\frac{e}{C_{\text{ox}}} \Delta Q_{\text{ot}} + \frac{e}{C_{\text{ox}}} \Delta Q_{\text{it}} + \Delta V_{\text{it}}, \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta Q_{\text{ot}}$ 为电离辐射在单位面积上产生的正空间电荷; $\Delta Q_{\text{it}}$ 为电离辐射产生的界面态电荷; $\Delta V_{\text{ot}}$ 是正空间电荷对阈值电压的影响; $\Delta V_{\text{it}}$ 是界面态电荷对阈值电压的影响, $C_{\text{ox}}$ 为氧化层与界面间的等效电容<sup>[6]</sup>。产生的正空间电荷与界面态电荷的表达式如式(2)、(3):

$$\Delta Q_{\text{ot}} = eNd_{\text{ox}}F(E, \xi)F_l D, \quad (2)$$

$$\Delta Q_{\text{it}} = K e d_{\text{ox}} D^{2/3}, \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $N$ 是  $100 \text{ rad}(\text{Si})$ 的剂量在每立方厘米  $\text{SiO}_2$  中产生的电子空穴对为  $7.8 \times 10^{14}$ ;  $d_{\text{ox}}$ 为氧化层厚度; $F(E, \xi)$ 为与电场  $E$  和辐射粒子能量  $\xi$  相关的空穴产生率; $F_l$ 为经验参数; $D$ 为辐射剂量; $K$ 为比例系数。由于  $C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} \epsilon_0 / d_{\text{ox}}$ ,  $\epsilon_{\text{ox}} \epsilon_0 = 3.4 \times 10^{-13} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 结合上述 3 式可得:

$$\Delta V_T = 5.14 \times 10^{-7} \{d_{\text{ox}}\}_{\text{nm}}^2 [-7.47 \{D\}_{\text{Gy}} F(E, \xi) F_l + \{D\}_{\text{Gy}}^{2/3}], \quad (4)$$

式中: $\{d_{\text{ox}}\}_{\text{nm}}$ 是以 nm 为单位的氧化层厚度; $\{D\}_{\text{Gy}}$ 是以 Gy 为单位的辐射剂量( $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}(\text{Si})$ )。式(4)适用于总剂量低于  $100 \text{ krad}(\text{Si})$  时的情况,剂量更大时经验参数  $F_l$  趋于下降<sup>[6]</sup>。

Flash 的控制电路与存储单元由于结构上的差异,总剂量辐射失效的机理也不同。控制电路为 CMOS 结构,在总剂量累积下, nMOS、pMOS 晶体管的阈值电压均负向漂移, nMOS 阈值电压漂移量可参考式(4), pMOS 阈值电压的漂移与 nMOS 类似,其界面态电荷显负电性。随着剂量的累积,晶体管先是噪声容限降低、开关速度变慢,然后 nMOS 阈值电压漂移过零,本应截止的却导通,且无法恢复截止, pMOS 阈值电压负向漂移过大而无法导通,导致电路的逻辑功能紊乱,器件失效<sup>[7-9]</sup>。

对于存储单元的浮栅结构,总剂量辐射主要通过两种途径使电路失效:(1)在浮栅周围的氧化

层产生电子空穴对。经过快速复合过程存留下来的空穴漂移到浮栅,复合掉浮栅上的部分电子,降低了阈值电压。(2)产生的空穴在沟道氧化层中形成陷阱电荷,减小了阈值电压<sup>[9]</sup>。后一种失效机理可参考式(4),但是起主要作用的是前一种失效机理,而空穴迁移率低且浮栅的面积小,所以空穴与浮栅上的电子复合的机率很小,其过程需要较长的时间与较大的剂量,所以辐射损伤没有控制电路敏感。

总剂量辐射使界面态陷阱电荷积累(参考式(3)),导致晶体管  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面处的电荷越来越多,会使漏源电流增大<sup>[8]</sup>。当器件处于静态偏置情况时, nMOS 与 pMOS 的静态电流会有所增大。当 nMOS 晶体管的阈值电压负向漂移过零时,原来截止的晶体管变为导通,静态电流会显著增大,阈值电压过零的晶体管数目越多,静态电流增大越明显。陷阱电荷的积累还造成晶体管的开关速度不断下降,动态电流也会随之增大。

### 3 Flash 器件总剂量辐射效应实验

#### 3.1 实验过程

实验用辐射源为中科院新疆理化技术研究所的 7 万居里的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  源。剂量率测量采用 UNIDOS 标准测试仪,剂量率乘以辐射累积时间得出总剂量,标准剂量仪 UNIDOS 的测量误差  $\leq \pm 2\%$ 。辐射剂量率为  $51.7 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 。辐射现场环境温度保持在  $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。样品采用移地测试。器件受辐射时,器件偏置模仿实际应用系统中器件的工作状态。当辐射总剂量分别达到 5、10、15、20、25  $\text{krad}(\text{Si})$  时,降源取出样品在限制时间内(30 min)做一次移地测量,测试环境温度保持在  $(25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ 。

测试的项目有数据访问功能、静态电流和动态电流。数据访问功能测试方法如下:器件接受辐射前,所有地址编程写入某一固定数据,移地测试时,检验存储器中的数据是否正确,器件的电擦除与编程功能是否正常。静态电流是器件处于静态偏置时的供电电流,动态电流即器件在数据访问状态时的擦除电流与编程电流。

#### 3.2 实验结果与分析

器件的数据访问功能测试结果如表 1。

表 1 数据访问功能

Tab.1 Functions of data accessing

总剂量/krad(Si)	擦除	编程
0(初始)	正常	正常
5	正常	正常
10	正常	正常
15	正常	正常
20	出现异常	出现异常
25	完全异常	完全异常

器件的静态电流与动态电流测试结果分别如图 3 和图 4 所示。

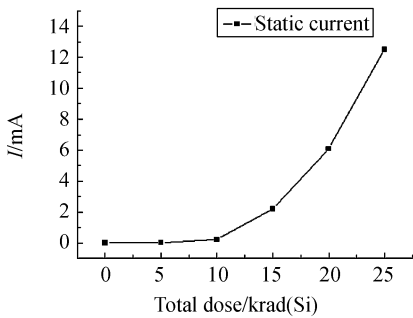


图 3 静态电流

Fig. 3 Static current

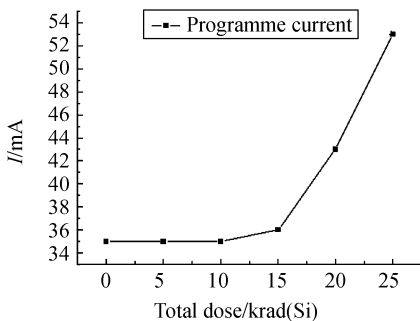
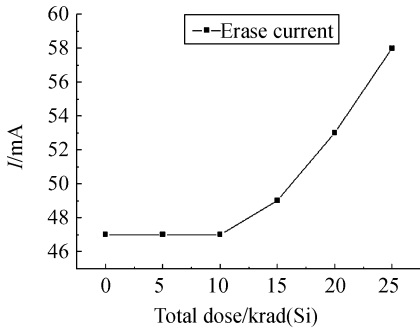


图 4 动态(擦除与编程)电流

Fig. 4 Dynamic current

在总剂量为 5、10、15 krad(Si)时,数据访问功能正常,此时控制电路与存储单元仍处于正常状态,剂量累积造成的晶体管阈值电压漂移不大,还无法形成逻辑功能错误与数据错误。20 krad(Si)时阈值电压继续漂移,使晶体管的噪声容限降低、开关速度变慢,控制电路介于失效的临界状态,使得数据访问功能出现异常,并发现了少量的数据位反转。假设数据位反转是存储单元的辐射损伤引起的,则发生错误的地址在多次操作中应该是固定不变的,实际现象是多次操作中位反转的地址不固定且随机分布,所以数据错误是控制电路的功能紊乱造成的,控制电路的失效先于存储单元。当达到 25 krad(Si)时,某些 nMOS 的阈值电压漂移过零,某些 pMOS 晶体管完全截止,造成逻辑功能严重错误,电路彻底失效。15 krad(Si)之前静态电流增大缓慢,此时晶体管阈值电压漂移还未过零。而 15 krad(Si)之后,随着界面态电荷的累积与阈值过零的晶体管数目越来越多,静态电流与动态电流都急剧增大,也是器件失效时的具体体现。

可见,根据辐射效应分析结论,实验现象得到了合理的解释。可判断出这种器件的总剂量失效阈值在 15~20 krad(Si)之间。控制电路在总剂量辐射影响下最为严重,其次是矩阵存储单元。静态电流与动态电流随着总剂量的增加都不断增大,尤其是达到失效阈值后,增大趋势更为明显。

### 4 辐射加固措施

可以从不同的角度入手,对 Flash 器件进行辐射加固。从电路的可靠性设计方面考虑,可采取以下两种措施:(1)添加电流监测电路。器件的供电电流是辐射的敏感参数,尤其在发生单粒子事件时,供电电流会立即出现异常。对 Flash 的供电电流进行实时监测,当电流出现异常时,可以采取断电重启、刷新写入、坏块隔离等措施。(2) N 模冗余(N Modular redundancy)结构设计。采用单芯片多模块器件(如 MMFL64002604B),在不同的模块中存储相同的数据,对每个模块保持

相同的操作,将器件外部的控制读写接口设计成表决电路,使数据的输入输出逻辑均由表决电路产生。这种结构可以免去对故障模块的修复过程,使逻辑反转的概率大大降低。

从数据正确率的角度考虑,可采用校验码的方法。常用的有:奇偶校验、海明码(EDAC)、Reed-Solomon 码(R-S)、CRC、卷积编码<sup>[10]</sup>。可通过软件手段实现数据校验。将校验码检错纠错算法嵌入到系统软件中,当系统 CPU 读取 Flash 数据时,即对数据进行校验。这种软件校验可节省硬件开销与系统功耗,缺点是 CPU 的运算速度要足够快,并且 CPU 的抗辐射性能必须高于 Flash 存储器。也可以硬件手段实现校验,采用反熔丝 CPLD(如 Actal 的 CPLD 产品)设计 Flash 的外部校验电路。Flash 与校验电路、CPU 串联形成数据链路,被读取和写入的数经过了校验电路处理,提高了数据的正确率。

从应用系统的电路结构考虑,冷备份是一种既简单而且效果好的辐射加固方法。当器件加偏压时,辐射的电离作用在电路内部产生电子空穴对,电子空穴对在电场作用下迁移率不同而造成器件损伤。当器件不施加任何偏压时,内部电场

的方向与强弱是随机分布的,且矢量可相互抵消,此时电子与空穴的漂移方向不固定,其中大部分电子空穴又可以重新复合。在系统设计时,要尽量使器件在空闲状态时不加偏压,并对 Flash 存储器进行冷备份。使用冷备份加固方法时,可使器件处于交替工作模式(每个周期大约数十个工作日),当其中一个器件处于工作状态时,另一个未加偏的器件处于退火状态,在一定程度上减轻了辐射损伤。

## 5 结 论

根据 Flash 的电路结构,对总剂量辐射效应进行了分析,并对总剂量辐射实验进行了描述。结论是控制电路是总剂量辐射损伤的敏感部分,静态电流与动态电流都是总剂量效应的敏感参数。总剂量效应的电离作用使晶体管阈值电压漂移,致使控制电路的逻辑功能发生异常。控制电路的 CMOS 结构比存储单元的浮栅结构损伤严重,使控制电路先于存储单元失效。对于 Flash 存储器,可采用电流监测、N 模冗余、校验码、冷备份等辐射加固方法。

## 参考文献:

- [1] SCHWARTZ H R, NICHOLS A H, JOHNSTON A H, *et al.*. Single-event upset in flash memories[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(6):2315.
- [2] NGUYEN D N, GUERTIN S M, SWIFT G M, *et al.*. Radiation effects on advanced flash memories[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1999, 46(6):1744-1746.
- [3] CLAEYS C, OHYAMA H, SIMOEN E, *et al.*. Radiation damage in flash memory cells[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2002:392-394.
- [4] AMMENDOLA G, ANCARANI V, TRIOLO V, *et al.*. Nanocrystal memories for Flash device applications[J]. *Solid-State Electron*, 2004, 48(9):1483-1488.
- [5] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社,2005.  
CHEN P X. *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [6] 赖祖武, 包宗明, 宋钦歧, 等. 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.  
LAI Z W, BAO Z M, SONG Q Q, *et al.*. *Radiation Hardening Electronics—Radiation Effects and Hardening Techniques*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [7] CESTER A, GERARDIN S, PACCAGNELLA A, *et al.*. Drain current decrease in MOSFETs after heavy ion ir-

radiation[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(6):3150-3157.

- [8] CELLERE G, *et al.*. Radiation effects on floating-gate memory cells[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2001, 48(6): 2222 - 2228.
- [9] 贺朝会,耿斌,杨海亮,等.浮栅 ROM 器件辐射效应机理分析[J].物理学报,2003,52(9):2235-2238.  
HE CH H, GENG B, YANG H L, *et al.*. Mechanism of Radiation effects in floating gate ROMs[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(9):2235-2238. (in Chinese)
- [10] SMITH G L, DE LA TORRE L. Techniques to enable FPGA based reconfigurable fault tolerant space computing [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2005, 24(5):1592-1601.

作者简介:李豫东(1982—),男,新疆伊犁人,博士研究生,主要从事嵌入式系统与图像处理方面的研究。E-mail: lydong555@126.com  
张立国(1961—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事光学仪器、辐射剂量等方面的研究。E-mail:zhanglg@ciomp.ac.cn

## ●下期预告

# 内外轴式磁性联轴器的最优化设计

王禹林,刘品宽,丁 汉

(上海交通大学 机器人研究所 机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240)

对磁性联轴器的分析与设计的国内外研究现状做了评述,建立了实用的优化设计评判指标和数学模型。改进了等效磁荷法,从求解效率和求解精度两方面,将其与改进前的等效磁荷法、片电流方法和三维有限元法进行了比较。将正交实验法引入优化过程中,提出了一种实用的磁性联轴器优化设计方案。求解结果表明:等效磁荷法的求解时间和精度较不稳定,改进的等效磁荷法的求解精度比原方法提高了约 5%,求解效率提高了约 55%。片电流法求解效率极高,但精度较低。三维有限元的求解精度较稳定,误差约为 5%,但求解效率较低,求解每组模型需花费约 9 min。通过正交实验法,仅需使用 9 组分析模型即可获得适合的初始参数值,结合标准的最优值搜索技术可方便获得多组最优参数设计值。该方案可满足磁性联轴器优化设计的稳定可靠、精度高、方便实用等要求。