

# 浮栅 ROM 与 SRAM 的辐射效应比较分析

贺朝会, 耿 斌, 杨海亮, 陈晓华, 李国政, 王燕萍

(西北核技术研究所, 西安 69 信箱 13 分箱, 陕西西安 710024)

**摘 要:** 比较了浮栅 ROM 和 SRAM 的中子、质子和 辐射效应的异同, 分析了其不同的原因. 与 SRAM 相比, 浮栅 ROM 器件出错时的 14MeV 中子注量阈值高 5 个量级; 31.9MeV 质子注量阈值高 4 个量级; 总剂量损伤阈值相差不大, 都在  $10^4 \text{ rad(Si)}$  量级左右. 这些都是由二者存储单元的结构和辐射效应机制决定的. 在空间辐射环境中, 不需经常擦写数据的情况下, 应该选用浮栅 ROM 器件.

**关键词:** FLASH ROM; EEPROM; SRAM; 单粒子效应; 总剂量效应

**中图分类号:** TN47 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1260-03

## Comparison and Analysis of Radiation Effects between Floating Gate ROMs and SRAMs

HE Chao-hui, GENG Bin, YANG Hai-liang, CHEN Xiao-hua, LI Guo-zheng, WANG Yan-ping

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** Similarities and differences of irradiation effects between floating gate ROMs (Read Only Memory) and SRAM (Static Random Access Memory) are compared. Reasons for differences are analyzed. The 14MeV neutron fluence threshold when error occurs in floating gate ROMs is higher than that in SRAM by 5 orders of magnitude, 31.9MeV proton fluence threshold by 4 orders, and total dose threshold is about  $10^4 \text{ rad(Si)}$  for both memories. All of these are attributed to the structure of memory cells and mechanism of radiation effects. Floating gate ROMs are preferable to SRAM in application in space radiation environment when data in memory are not required to erase and write frequently.

**Key words:** FLASH ROM; EEPROM; SRAM; single event effect; Total dose effect

## 1 引言

静态随机存取存储器 (SRAM) 和可擦除可编程只读存储器 (EPROM) 是航天器电子系统中的主要存储载体. 新型浮栅 ROM 器件 (主要是 FLASH ROM 和 EEPROM) 在单一的工作电压下, 就可以完成读出、擦除和写入功能, 克服了 EPROM 的不足; 而且和 SRAM 相比, 其存储的数据是非易失性的, 即使掉电, 也不会丢失数据. 因此, 浮栅 ROM 器件已开始替代 EPROM 应用于航天器的电子系统中, 其辐射效应研究为一个新热点<sup>[1~3]</sup>.

空间辐射可以引起半导体器件发生单粒子效应和总剂量效应等, 已严重影响航天器的可靠性和寿命. 国外开展了浮栅 ROM 器件的重离子单粒子效应<sup>[1~3]</sup>、总剂量和剂量率效应<sup>[2~4]</sup>实验研究, 未见关于浮栅 ROM 器件的质子和中子辐射效应方面的报道; 国内只有我们开展了这方面的研究<sup>[5]</sup>. 研究结果表明 SRAM 的质子和中子辐射效应是单粒子效应. 然而, 浮栅 ROM 器件的 14MeV 中子和 31.9MeV 质子的辐射效应不是单粒子效应, 而是一种总剂量效应. 本文试图对浮栅 ROM 器件和 SRAM 的辐射效应作一比较, 并分析其不同的原因.

## 2 浮栅 ROM 和 SRAM 辐射效应比较

### 2.1 中子辐射效应

在注量率为  $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  量级的 14MeV 中子辐照下, SRAM 立即出现数据错误, 无中子注量阈值. 不管是 4M 位还是 256K, 出现的错误数多还是少, 随着中子注量的增加, 错误数基本线性增加, 如图 1(a) 所示. 同时出现“1”“0”错误和“0”“1”错误, 二者错误数相差不大, 无不确定错误. 所有器件的出错规律都相同, 只是翻转截面有所不同. 这是典型的单粒子效应.

然而, 浮栅 ROM 器件的中子辐射效应并非如此. 错误出现不是随机的, 存在中子注量阈值. 中子注量小于阈值时, 无错误; 大于阈值时才出现错误. 图 1(b) 为动态监测的 29C256 和 28C256 的出错数随中子注量变化的关系曲线. 当中子注量为  $5.501 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, 107# 28C256 出现“0”“1”错误;  $5.747 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, 出现“1”“0”错误. 当中子注量为  $5.832 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, 105# 29C256 开始出错. 随着中子注量的增加, 错误数在增加. 中子注量积累到一定程度, 错误数雪崩似地增加.

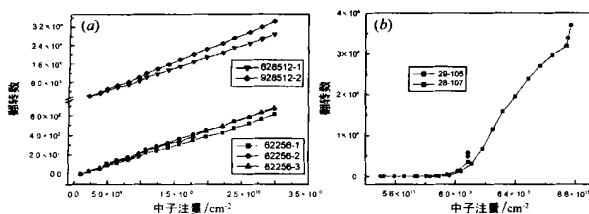


图 1 存储单元错误数随中子注量变化的关系曲线  
(a) SRAM; (b) 29C256 和 28C256

## 2.2 质子辐射效应

在注量率为  $9.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  左右的 31.9MeV 质子辐照下,所有 SRAM 立即出现数据错误,无质子注量阈值.效应规律和 14MeV 中子辐照下完全一致,如图 2(a) 所示,是典型的单粒子效应.

然而,动态监测的所有浮栅 ROM 器件的效应规律不是单粒子效应,与 14MeV 中子辐照下完全一致,如图 2(b) 所示,存在质子注量阈值.当质子注量达到  $9.275 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  时,29-1 开始出现 2 位“1”“0”错误;质子注量达到  $9.513 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  时,出现“0”“1”错误.随着质子注量的增加,错误数非线性增加.

## 2.3 辐射效应

在剂量率为  $1.8 \text{ rad(Si)/s}$  的 Co-60 源辐照下,SRAM、EEPROM 和 FLASH ROM 的出错规律是一致的,且都与图 2(b) 类似.器件出现数据错误有个累积剂量阈值,当累积剂量小于某一个值时,无数据错误.当累积剂量达到一定值时,开始出现数据错误.随着累积剂量的增加,错误数雪崩似地增加.3 只 SRAM 的总剂量损伤阈值分别为:  $(0.6777, 0.9473, 1.0335) \times 10^4 \text{ rad(Si)}$ ; 6 只 FLASH ROM 29C256 的损伤阈值比较一致,平均为  $1.0122 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$ ; 5 只 EEPROM 28C256 的损伤阈值平均为  $1.0212 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$ .浮栅 ROM 器件和 SRAM 的总剂量损伤阈值基本一致.

## 3 辐射效应机理分析

在 14MeV 中子和 31.9MeV 质子的辐射下,浮栅 ROM 器件和 SRAM 的效应规律迥然不同. SRAM 表现出的是单粒子效应,而浮栅 ROM 器件是总剂量效应.在 Co-60 辐照下,二者的出错规律完全一致,都是总剂量效应.下面分析其原因.

SRAM 存储单元是由两个反相器构成的双稳态电路.图 3 为 CMOS SRAM 存储单元.存储状态决定于  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  管.当  $T_1$ 、 $T_4$  管导通,  $T_2$ 、 $T_3$  管截止时,  $Q=0$ ,  $\bar{Q}=1$ ,表示该单元存“0”;当  $T_1$ 、 $T_4$  管截止,  $T_2$ 、 $T_3$  管导通时,  $Q=1$ ,  $\bar{Q}=0$ ,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.

对于 CMOS SRAM,截止管的漏区反偏 PN 结的空间电荷区构成器件的单粒子翻转灵敏区,一个存储单元有两

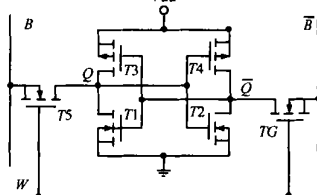


图 3 CMOS SRAM 存储单元

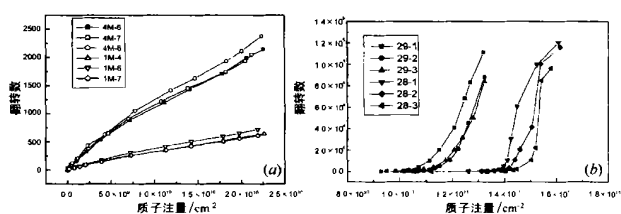


图 2 存储单元错误数随质子注量变化的关系曲线  
(a) SRAM; (b) 29C256 和 28C256

个灵敏区.单个高能中子或质子射入半导体器件,通过与半导体材料硅相互作用产生重离子(反冲核).重离子在灵敏区内沉积能量,产生电子空穴对.灵敏区的电场使电子空穴对分离,并被电极收集,形成瞬态电流.瞬态电流会使节点  $Q$  或  $\bar{Q}$  电势发生变化.当  $Q$  或  $\bar{Q}$  电势的变化超过高低电平的噪声容限时,就会使导通管截止或截止管导通,引起器件逻辑状态翻转.这是由单个粒子入射引起的,因此称为单粒子效应.射线也可以在灵敏区内电离产生电子空穴对.但与重离子相比,其产生的电子空穴对稀疏.一次电离产生的电子空穴对不足以引起器件逻辑状态翻转,因此辐射很难产生单粒子效应.然而,随着电子空穴对的复合、扩散和漂移,迁移率小的空穴,会在器件的氧化层中形成氧化物陷阱电荷或者在氧化层与半导体材料的界面处形成界面陷阱电荷,引起单个晶体管的阈值电压发生漂移.当阈值电压漂移到一定程度,使原来截止的晶体管导通或导通的晶体管截止,存储单元的状态就会发生变化,出现数据错误.由于氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的积累需要一定的剂量积累,才能引起存储单元的状态发生变化,因此,错误发生存在剂量阈值.随着累积剂量的增加,阈值电压发生漂移的晶体管数目增加,错误数增加.这就是总剂量效应.所以,SRAM 在 14MeV 中子和 31.9MeV 质子的辐射下,表现出的是单粒子效应;在 Co-60 辐照下,是总剂量效应.

浮栅 ROM 存储单元的基本结构如图 4 所示,不同于 SRAM.它有两个栅:一个控制栅和一个位于沟道和控制栅之间的浮栅.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.根据浮栅的带电状态,存储单元就成为耗尽型或增强型的晶体管.对于控制栅上的一定电压,晶体管就处于截止或导通状态,对应于存储信息“0”或“1”.一般情况下,浮栅 ROM 写入信息前,浮栅上无电子,晶体管导通,表示存“1”.写入信息的过程就是使电子注入浮栅,晶体管截止,表示存“0”.

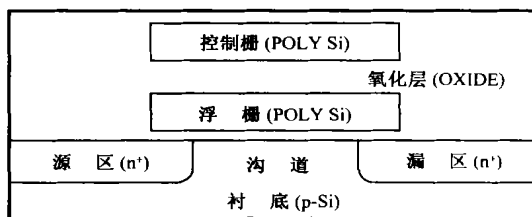


图 4 浮栅 ROM 存储单元的基本结构示意图

浮栅 ROM 器件的存储单元的状态取决于浮栅上有无电子,而浮栅很薄,面积很小,约  $0.1 \mu\text{m}^2$  量级,因此收集电荷的

灵敏区很小. 中子或质子入射, 在浮栅上沉积的电荷很难改变浮栅的带电状态, 也就很难改变浮栅 ROM 器件的存储单元的状态, 导致单粒子效应. 然而, 中子、质子和 辐射都会在浮栅周围的绝缘层内产生电子空穴对. 电子空穴在电场的作用下漂移, 电子漂移向沟道或控制栅. 迁移率小的空穴, 一部分漂移到浮栅, 减少了浮栅上的电子; 一部分在氧化层中形成氧化物陷阱电荷; 一部分在氧化层与半导体材料的界面处形成界面陷阱电荷, 三方面的因素综合起来导致晶体管的阈值电压发生漂移. 当阈值电压漂移到一定程度, 使原来截止的晶体管导通, 引起存储单元的状态发生变化, 出现数据错误, 导致总剂量效应. 因此, 在 14MeV 中子、31.9MeV 质子和 Co-60 的辐射下, 浮栅 ROM 器件表现出的是总剂量效应.

浮栅 ROM 器件的 14MeV 中子和 31.9MeV 质子辐照效应是次级带电粒子的累积剂量造成的总剂量效应. 中子注量与

剂量之间通过 Kerma 系数来转换. 14MeV 中子在硅中的 Kerma 系数为  $1.25 \times 10^{-9} \text{ rad cm}^2$ . 质子注量与剂量也有一个转换关系, 在硅中 31.9MeV 质子的注量与剂量转换系数为  $2.4 \times 10^{-7} \text{ rad cm}^2$ . 二者的转换系数相差两个量级, 因此, 31.9MeV 质子比 14MeV 中子更容易导致浮栅 ROM 器件出错, 出错注量阈值低两个量级. 实验结果证实了这一点.

表 1 比较了 EEPROM 和 FLASH ROM 器件与 SRAM 在 14MeV 中子、31.9MeV 质子和 Co-60 辐射下出现数据错误时的注量和剂量. 和 SRAM 相比, 浮栅 ROM 器件出现数据错误的中子注量阈值比 SRAM 高 5 个量级; 质子注量阈值比 SRAM 高 4 个量级. 因此, 浮栅 ROM 器件具有很好的抗中子和质子辐射的能力. 对于 辐射, 其效应机制是一样的, 因此, 它们出错的剂量阈值相差不大, 都在  $10^4 \text{ rad(Si)}$  量级左右.

表 1 器件出现数据错误时的注量和剂量

| 器件型号             | 中子注量( $\text{cm}^{-2}$ ) | 质子注量( $\text{cm}^{-2}$ )            | 剂量( $\text{rad(Si)}$ )             |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| EEPROM 28C256    | $5.501 \times 10^{13}$   | $(1.055 \sim 1.312) \times 10^{11}$ | $(0.8953 \sim 1.1422) \times 10^4$ |
| FLASH ROM 29C256 | $5.832 \times 10^{13}$   | $(0.928 \sim 1.013) \times 10^{11}$ | $(0.9806 \sim 1.0816) \times 10^4$ |
| SRAM 62256       | $\sim 2.1 \times 10^8$   | $\sim 9.5 \times 10^6$              | $(0.6777 \sim 1.0335) \times 10^4$ |

从航天器应用角度讲, 航天器的可靠性是首先考虑的问题. 根据浮栅 ROM 和 SRAM 的抗辐射性能指标, 可以预言, 浮栅 ROM 器件将在航天器的电子系统中得到广泛应用, 特别在不需经常擦写数据的情况下.

#### 4 结论

通过对浮栅 ROM 器件和 SRAM 的中子、质子和 辐射效应的异同性的比较分析, 可以得出: 浮栅 ROM 器件出错时的 14MeV 中子注量比 SRAM 高 5 个量级; 浮栅 ROM 器件出错时的 31.9MeV 质子注量比 SRAM 高 4 个量级; 二者的总剂量损伤阈值相差不大, 约在  $10^4 \text{ rad(Si)}$  量级左右. 和 SRAM 相比, 浮栅 ROM 器件具有很好的抗中子和质子辐射的能力. 这些都是由二者存储单元的结构和辐射效应机制决定的. 在空间辐射环境中, 不需经常擦写数据的情况下, 应该选用浮栅 ROM 器件.

#### 参考文献:

- [1] Cellere G, et al. Radiation effects on floating-gate memory cells [J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2001, 48(6): 2222 - 2228.
- [2] Nguyen D N, et al. Radiation effects on advanced flash memories [J].

IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1999, 46(6): 1744 - 1750.

- [3] Schwartz H R, et al. Single-event upset in flash memories [J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1997, 44(6): 2315 - 2324.
- [4] Verkasalo R, Effect of test method on the failure dose of SEBQ 28C256 EEPROM [J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1994, 41(6): 2600 - 2604.
- [5] 贺朝会, 等. 浮栅 ROM 器件的辐射效应实验研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(1): 180 - 187.

#### 作者简介:



贺朝会 男, 1966 年 11 月生于陕西武功, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事半导体器件的辐射效应研究, 已发表研究论文 30 余篇, 获军队科技进步一等奖 1 项、部级科技进步三等奖 2 项、实用新型专利 1 项.

耿 斌 男, 1974 年 3 月生于陕西泾阳, 1997 年毕业于重庆大学, 工程师, 从事半导体器件的辐射效应研究, 负责辐射效应测试系统研制.