

# 浮栅 ROM 器件 $\gamma$ 射线、X 射线和中子辐射效应实验研究

何宝平, 张凤祁, 姚志斌

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710613)

**摘要:** 本工作涉及浮栅 ROM 器件 AT29C256 的  $\gamma$  射线、X 射线和反应堆快中子辐照实验测量。测量结果表明, 浮栅 ROM 器件  $\gamma$  射线、X 射线和快中子辐照效应是典型的总剂量效应。错误发生存在剂量阈值, 开始出错时的错误数及错误地址不确定, 错误数随辐照剂量或注量的增大而增加。

**关键词:** 浮栅 ROM 器件;  $\gamma$  射线; X 射线; 中子; 总剂量效应

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)04-0489-04

## Experimental Study on Irradiation Effects of $\gamma$ , X and Neutron in Floating ROM Devices

HE Bao-ping, ZHANG Feng-qi, YAO Zhi-bin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

**Abstract:**  $\gamma$ -ray, X-ray and neutron irradiation effects of floating ROM devices were measured. The measured results show  $\gamma$ -ray, X-ray and neutron irradiation effects of floating ROM devices are total dose effects. There is a dose threshold when error occurs. At the beginning of error occurrence, the error address and data are random, and the data errors number goes up with the increase of dose or fluence.

**Key words:** floating ROM device;  $\gamma$ -ray; X-ray; neutron; total dose effect

新型浮栅 ROM 器件主要是 FLASH ROM 和 EEP ROM, 浮栅 ROM 器件已开始应用于航天器的电子系统中。 $\gamma$  射线、X 射线和中子辐照会使浮栅 ROM 器件存储的数据出错, 有可能导致灾难性事故。对于浮栅 ROM 器件的辐射效应, 已进行过质子、14 MeV 中子和  $\gamma$  射线等方面的辐射效应研究<sup>[1-3]</sup>, 对于反应堆中子和  $\gamma$  射线的混合场的辐射效应, 尚未进行过详细研究。因此, 开展浮栅 ROM 器件  $\gamma$ 、

直流 X 射线和反应堆快中子辐照效应研究具有现实意义和应用价值。

### 1 测试系统

存储器总剂量效应长线测试系统示于图 1。系统主要由微机、控制测试板、传输电缆和辐照板组成。控制测试板用于对被辐照器件写入和读出数据, 由锁存器、译码器、缓冲器、时钟、锁存控制和逻辑控制等组成。器件型号可根据需要

互换,由于存储器的引脚存在差别,利用锁存器和数据选择器进行兼容性处理,使辐照板上插座能同时兼容不同集成度的器件;采用多种抗干扰措施,如选用高速 CMOS 器件、采用多股地线和电源线、加高、低频滤波电容等方法;改进了系统软件,提高了系统的抗干扰能力。

## 2 辐照实验

实验器件为 AT29C256 和 AT28C64B,辐照前每个字节写入数据 55H,即 0 与 1 相互间隔。其中,AT29C256 在加电(+5 V)状态下辐照,用存储器辐照效应测试系统实时读取数据、监测被测器件的功能,并统计出错单元的数量。

### 2.1 反应堆快中子辐照

AT29C256 采用动态测量(实时测量),反应堆采用稳态运行方式,功率 500 kW。辐照器件所在实验点的快中子注量率  $\varphi_f$  为  $1.121\ 39 \times 10^{10}\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\gamma$  射线剂量率  $\dot{D}_\gamma$  为  $0.887\ 80 \times 10^6\ \text{mSv/h}$ 、快中子注量率与  $\gamma$  射线剂量率(以 Si 计,下同)的比值  $\varphi_f / \dot{D}_\gamma$  为  $4.547\ 20 \times 10^6\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$ 。

### 2.2 $\gamma$ 射线辐照

$\gamma$  射线辐照实验在西北核技术研究所的  $1.48 \times 10^{14}\ \text{Bq}$   $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  源上进行,辐照温度为室温,利用 UNIDOS 剂量仪标定器件辐照处的剂量率为  $0.169\ 6\ \text{Gy/s}$ ,采用动态加电辐照。

### 2.3 X 射线辐照

X 射线辐照实验在西北核技术研究所直流 X 光机(电压为 70 kV、电流为 10 mA)上进行,辐照温度为室温,利用 UNIDOS 剂量仪标定器件辐照处的剂量率(器件 AT29C256)为  $0.04\ \text{Gy/s}$ ,采用动态加电辐照。

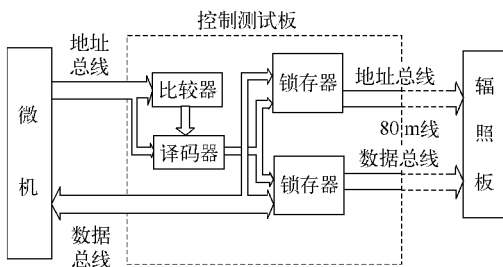


图 1 存储器辐照效应测试系统

Fig. 1 Measurement system of irradiation effect for memorizer

## 3 实验结果

### 3.1 $\gamma$ 射线辐照

图 2a 是动态监测的 1#、2#、3# AT29C256 器件出错数与  $\gamma$  累积剂量的关系曲线。图 2b 是 1# 器件 0→1 错误、1→0 错误随累积剂量变化的比较曲线。

从图 2a 可看出,1#、2#、3# AT29C256 器件错误出现存在累积剂量阈值,这个剂量阈值约为  $1.4 \times 10^2\ \text{Gy}$ ,且错误数随辐照剂量的增加而增多。这是因为, $\gamma$  辐射在浮栅及其周围的绝缘层内电离产生电子空穴对,电子空穴在电场的作用下漂移,在界面处形成界面陷阱电荷,使晶体管的阈值电压向负方向漂移。当界面陷阱电荷积累到一定程度,使原来截止的晶体管导通,存储单元的状态发生变化,出现数据错误。由于界面陷阱电荷的积累需一定的剂量积累,因此,错误发生存在累积剂量阈值。随着  $\gamma$  累积剂量的增加,阈值电压漂移的晶体管数目增加,错误数增加。刚开始出错时的错误单元的错误数及错误地址都不确定,在某一时刻错误多,而在另一时刻,错误少;某一单元在这一时刻出错,下一时刻不出错,错误出现不确定。这是由于阈值电压漂移量不大时,晶体管处于截止和导通的临界状态,没有使存储单元由一种状态彻底变为相反状态。在存储单元状态彻底改变前的一段时间内,其状态不确定。从图 2b 可看出,1# 器件在整个辐照过程中未出现 1→0 的错误,出现 0→1 错误的剂量阈值约为  $1.4 \times 10^2\ \text{Gy}$ ,说明在辐照过程中 0→1 错误比 1→0 错误更易于发生。

浮栅 ROM 器件的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  辐射效应是典型的总剂量效应。

### 3.2 反应堆稳态运行时的快中子辐照

反应堆是中子和  $\gamma$  射线的混合场,根据反应堆快中子注量率  $\varphi_f$  和快中子注量率与  $\gamma$  射线剂量率的比值  $\varphi_f / \dot{D}_\gamma$ ,可计算出器件开始出现翻转错误时  $\gamma$  射线辐照的总剂量约为 62 Gy。根据  $\gamma$  射线的辐照实验结果可知,AT29C256 器件出现翻转错误的  $\gamma$  剂量阈值为 100~200 Gy, $\gamma$  射线累积剂量还不足以引起器件出现翻转错误。因此,AT29C256 在反应堆中子、 $\gamma$  混合场中出现的翻转错误主要由快中子辐照引起。

图 3a 是动态监测的 4 #、5 #、6 #、7 # AT29C256 器件出错数与快中子积分注量的关系曲线,器件出现翻转错误存在快中子注量阈值。从图 3a 可看出,器件出现错误的阈值约为  $2.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。实验中还观测到,器件刚出现数据错误时,错误数及错误地址均不确定。出现错误的时间和单元是随机的。但随着时间延长和快中子注量增加,错误数增多。

另外,还动态监测了 4 # 器件 0→1 错误、1→0 错误随快中子积分注量增加的翻转情况(图 3b)。从图 3b 可看出,4 # 器件的 0→1 错误比 1→0 错误易于出现。当快中子注量为  $2.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,出现 0→1 错误,  $4.36 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,出现 1→0 错误,且出错数均随快中子积分注量的增加而增多。

以上实验现象与  $\gamma$  射线总剂量辐照效应非

常相似。可认为,AT29C256 器件反应堆快中子辐照效应也是总剂量效应,这与文献[1]中的规律基本相同,可认为是总剂量效应引起的器件损伤。

根据总剂量效应,可解释为快中子产生的次级带电粒子在浮栅和周围的绝缘层内电离产生电子空穴对。电子空穴在电场的作用下漂移,在界面处形成界面陷阱电荷,使晶体管的阈值电压向负方向漂移。界面陷阱电荷积累到一定程度,经使原来截止的晶体管导通,存储单元状态发生变化,出现数据错误。由于界面陷阱电荷的积累需一定的剂量积累,因此,错误发生存在快中子注量阈值。存储单元由一种状态彻底变为相反状态前的一段时间内,其状态是不确定的,这是因快中子辐照后,晶体管的阈值电压发生漂移、晶体管处于截止和导通的临界状态。

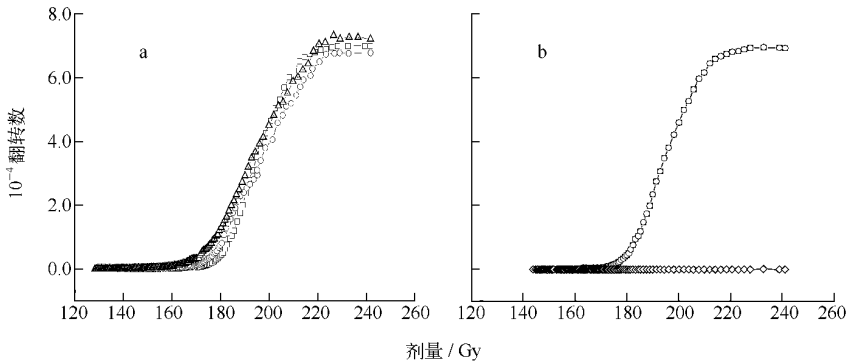


图 2 AT29C256 器件出错数与辐射剂量的关系

Fig. 2 Error number of AT29C256 versus radiation dose rates

a: □——1# 器件,○——2# 器件,△——3# 器件;b, 1# 器件: □——总的翻转数,○——0→1 翻转,◇——1→0 翻转

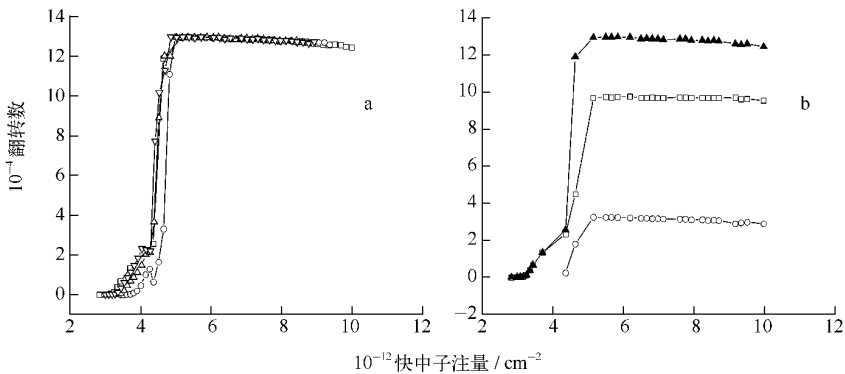


图 3 AT29C256 器件出错与快中子注量的关系

Fig. 3 Error number of AT29C256 versus neutron fluence

a: □——4# 器件;○——5# 器件;△——6# 器件;▽——7# 器件  
b, 4# 器件: ▲——总的翻转数;□——0→1 翻转;○——1→0 翻转

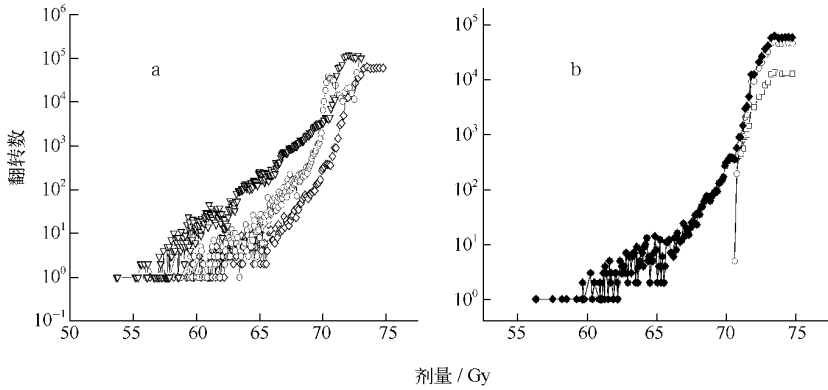


图4 器件出错数与 X 射线剂量的关系

Fig. 4 Error number of AT29C256 versus X-ray irradiation dose

a:  $\diamond$ —8# 器件,  $\circ$ —9# 器件,  $\nabla$ —10# 器件; b, 8# 器件:  $\blacklozenge$ —总的翻转数,  $\square$ —0 $\rightarrow$ 1 翻转,  $\circ$ —1 $\rightarrow$ 0 翻转

### 3.3 稳态直流 X 射线辐照

图 4a 示出了 8#、9#、10# AT29C256 器件出错数与 X 射线辐照剂量的关系曲线。从图 4a 可看出: 3 个器件出现错误的阈值约为 55 Gy; 器件开始出错时的错误单元和数据错误的出现是随机的, 器件出现数据错误存在辐照剂量阈值, 当剂量小于该阈值时, 无数据错误, 达到阈值时, 开始出现数据错误, 错误数及错误地址均是不确定; 随着剂量增加, 错误数增多, 辐照到一定剂量时, 出现雪崩翻转。

8# 器件 0 $\rightarrow$ 1 错误、1 $\rightarrow$ 0 错误随 X 射线剂量增加的翻转动态监测结果示于图 4b。从图 4b 可看出, 8# 器件 0 $\rightarrow$ 1 错误比 1 $\rightarrow$ 0 错误容易出现, 0 $\rightarrow$ 1 错误出现阈值为 56 Gy, 1 $\rightarrow$ 0 错误出现阈值为 70 Gy。X 射线辐照与  $\gamma$  射线辐照一样是典型的总剂量现象, 不同之处是, X 射线因剂量损伤增强, 产生翻转错误、特别是产生雪崩错误所需的总剂量不同, X 射线的剂量损伤阈值低,  $\gamma$  射线的损伤阈值高。比较图 2 和图 4 可知, X 射线辐照器件出现错误的剂量阈值为 55 Gy,  $\gamma$  射线辐照器件出现错误阈值为 140 Gy, AT29C256 的剂量损伤增强因子约为 2.5。究其原因, 可能由于器件采用重金属化工艺而与器件灵敏区构成了高、低原子序数界面, 使得浮栅 ROM 器件存在明显的 X 射线剂量损伤增强效应。因此, 在对电子系统和工程进行 X 射线加固设计时, 必须考虑 X 射线剂量增强这一特点。

## 4 结论

浮栅 ROM 器件  $\gamma$  射线、X 射线和反应堆

快中子辐照效应是典型的总剂量效应, 出现错误时的错误数及错误地址均不确定。器件出现数据错误存在辐照剂量阈值, 当剂量小于该阈值时, 无数据错误, 达到并超过阈值时, 开始出现数据错误。剂量增加到某一值时, 出现了错误数雪崩增加。X 射线的剂量损伤增强, 产生翻转错误的阈值低,  $\gamma$  射线的损伤阈值高, X 射线剂量损伤增强因子约为 2.5。

### 参考文献:

- [1] 贺朝会, 耿斌, 杨海亮, 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.  
HE Chaohui, GENG Bin, YANG Hailiang, et al. Experimental study on irradiation effects in floating gate ROMs[J]. Acta Phys Sin, 2003, 52(1): 180-187 (in Chinese).
- [2] 贺朝会, 耿斌, 杨海亮, 等. 浮栅 ROM 器件的辐射效应机理分析[J]. 物理学报, 2003, 52(9): 2 235-2 238.  
HE Chaohui, GENG Bin, YANG Hailiang, et al. Mechanism analysis of irradiation effects in floating gate ROMs[J]. Acta Phys Sin, 2003, 52(9): 2 235-2 238 (in Chinese).
- [3] 何宝平, 王桂珍, 龚建成, 等. 浮栅 ROM 集成电路空间低剂量率失效时间预估[J]. 物理学报, 2004, 53(9): 3 125-3 129.  
HE Baoping, WANG Guizhen, GONG Jiancheng, et al. Predicting of failure time for floating gate ROM devices at low dose rate in space radiation environment[J]. Acta Phys Sin, 2004, 53(9): 3 125-3 129 (in Chinese).