

浮栅 ROM 器件辐射效应机理分析

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 710613)

(2002 年 9 月 18 日收到 2002 年 12 月 24 日收到修改稿)

分析了浮栅 ROM 器件的辐射效应机理,合理地解释了实验中观察到的现象,指出辐射产生的电子空穴对在器件中形成的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷是导致存储单元及其外围电路出现错误的原因.浮栅 ROM 器件的中子、质子和 ^{60}Co γ 辐射效应都是总剂量效应.

关键词:FLASH ROM,EEPROM,中子,质子, ^{60}Co γ ,总剂量效应

PACC:6180,7340Q

1. 引 言

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,克服了原有只读存储器(ROM)的不足,而且和静态随机存取存储器(SRAM)相比,其存储的数据是非挥发性的,即使掉电,也不会丢失数据.因此,浮栅 ROM 器件已开始应用于航天器的电子系统中.开展浮栅 ROM 器件的辐射效应研究具有重大的现实意义和应用价值.

国外开展了浮栅 ROM 器件的重离子单粒子效应^[1-3]、总剂量和剂量率效应^[2-6],未见关于浮栅 ROM 器件的质子和中子辐射效应方面的报道.国内开展了一些辐射效应研究^[7-10],但关于浮栅 ROM 器件,只有我们开展了中子和质子辐射效应实验^[11-14]观察到浮栅 ROM 器件的 14MeV 中子和 31.9MeV 质子辐照效应不是以往所认为的单粒子效应,而是一种总剂量效应.随后开展了浮栅 ROM 器件的 ^{60}Co γ 验证实验^[15]及 x 射线辐照实验^[16]. ^{60}Co γ 辐射下,浮栅 ROM 器件的出错规律与 31.9MeV 质子和 14MeV 中子辐照下完全一致,验证了我们的设想.浮栅 ROM 器件的 31.9MeV 质子和 14MeV 中子辐照效应不是单粒子效应,而是质子和中子产生的次级带电粒子的累积剂量造成的总剂量效应.已有的浮栅 ROM 辐射损伤机理不能完全解释实验中观察到的现象.本文试图从半导体器件物理的角度分析浮栅 ROM 器件的损伤机理.

2. 辐射效应简介

中子辐照实验是在兰州大学 14MeV 强流中子发生器上进行的.中子注量率为 $(2.1-6.2) \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对应的电离剂量率在 0.26—0.78rad(Si)_s 之间.质子辐照实验是在中国科学院高能物理研究所 35MeV 质子直线加速器上进行的.用散射束进行辐照实验,散射质子能量为 31.9MeV.平均质子注量率为 $9.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对应的电离剂量率在 2.4—3.1rad(Si)_s 之间. γ 辐照实验是在西北核技术研究所的小 ^{60}Co 源上进行, γ 剂量率为 0.354rad(Si)_s.

实验用器件为 29C256,28C256 和 28C64.实验状态分为 3 种:不加电、静态加电和动态监测.不加电就是器件管脚悬空,贴在辐照板上,静态加电就是把器件插入辐照板的插座上,供给 5V 电压,但在辐照过程中,不读取数据,不对器件进行任何操作.辐照前每个字节写入数据“55H”,即“0”与“1”相互间隔.对于不加电和静态加电的器件,辐照后读取数据,与辐照前做比较.动态监测就是辐照过程中循环读取器件中的数据,与辐照前做比较,记录出错单元,统计出错类型和数量.

实验现象可归纳为以下几点^[11-14]:1)器件出现功能错误或数据错误都有个注量或剂量阈值,低于阈值时不会出现相应的错误.2)动态监测和静态加电的器件都出现数据错误,且不能用编程器重新写入数据.然而不加电的器件在更高注量的质子或中子或者更高剂量的 γ 辐照下未出现错误.3)器件刚

开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的.错误数在某一时刻错误多,而在下一时刻,错误反而少了;某一单元在这一时刻出错,而在下一时刻却是正确的,出现不确定错误.4)对于动态监测的器件,在辐照过程中,中断测量一定时间后重新测量,器件的错误数完全未按中断前的变化趋势发展,出现数量级差异.即使停止辐照,错误数仍在增加,甚至有的错误成量级地增加.5)退火效应:对于质子辐照下的静态加电和动态测量的器件,在室温下加电退火112.5h后,仍然不能重新编程;在100℃下加电退火44h20min后,29C256全部可以编程;28C256全部可以写入数据'55H',但全部不能写入数据'AAH'.

3. 浮栅 ROM 的结构及存储原理

浮栅 ROM 存储单元的基本结构如图1所示^[5],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理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”.EEPROM存储单元外围有锁存器、译码器、缓冲器、时钟、锁存控制和逻辑控制等控制电路(见图2),实现电可擦除和电可编程^[4].为了减少读写时间,FLASH ROM中还有命令状态器(command state machine)和写状态器(write state machine)等控制单元^[1].

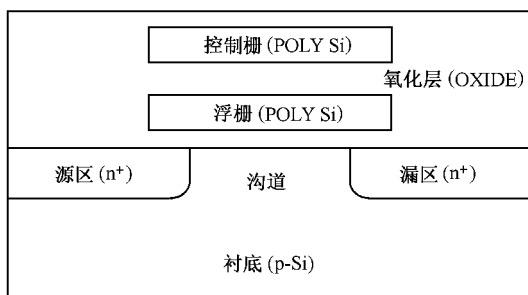


图1 浮栅 ROM 存储单元的基本结构示意图

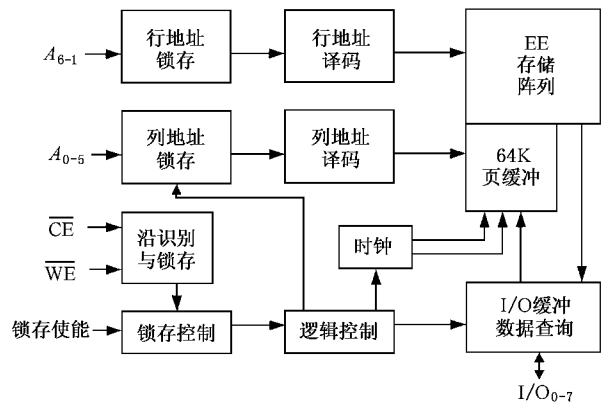


图2 EEPROM 28C256 存储单元外围电路示意图

4. 辐射效应机理分析

辐射可以通过以下4种机理^[3,5]改变浮栅ROM存储单元中的数据.

1) 辐射在沟道氧化层和浮栅周围的氧化层内产生电子空穴对,经过快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.浮栅上的负电荷在氧化层中产生的电场也促使空穴向浮栅漂移,电子向体硅或控制栅漂移.

2) 辐射产生的空穴在沟道氧化层中形成陷阱电荷,减小了浮栅MOSFET的阈值电压.

3) 浮栅上的电子从电离辐射中获得的能量超过氧化层势垒时,发射到控制栅或硅衬底,减少了浮栅上的电子.

4) Cellere^[3]通过研究浮栅存储器的重离子辐射效应指出,如果重离子径迹从浮栅到达硅衬底,会产生一个导电通道,增大漏电,很快减少浮栅上的电子.如果氧化层中的中性缺陷排列成行,产生导电通道,也会增大漏电,从而导致浮栅上的电荷流失.同时,作者认为前一种机理起主要作用,后一种机理起补充作用.

⁶⁰Co γ 光子通过康普顿效应产生电子空穴对.质子本身可以电离产生电子空穴对,但由于其电离能力小,产生的电子空穴对少,然而质子与器件材料中的硅原子发生反应产生次级重离子,一定程度地增加了其电离能力.中子本身不带电,不能电离产生电子空穴对,但它与质子一样可以与器件材料中的硅原子发生反应产生次级重离子,从而电离出电子空穴对.但上述4种机理不能完全解释我们实验中观察到的现象.

根据第 1 种机理,当浮栅上的电子减少到一定程度,阈值电压超过高低电平的噪声容限,就会出现错误,因此器件出现错误都有个注量或剂量阈值。器件加电时,控制栅和浮栅之间,浮栅和沟道之间存在电场,降低了电子空穴对的复合率,更多的空穴漂移到浮栅,复合掉浮栅上更多的电子,导致器件更容易出错。因此,动态监测和静态加电的器件都出现错误,而不加电的器件未出现错误。当浮栅上的电子减少到一定程度,晶体管处于截止和导通的临界状态,其状态是不确定的。应用该机理可以解释实验现象 1 和 3 以及 2 的部分现象,但无法对实验现象 4 和 5 以及不能重新写入数据给出合理的解释。

根据第 3 种机理,浮栅上电子的发射需要达到一定程度才能导致器件出错,因此器件出现错误存在注量或剂量阈值。对于实验现象 3 也可以给出类似于前面的解释,但无法解释实验现象 2、4 和 5。

根据第 4 种机理,如果重离子的径迹构成导电通道联接浮栅与硅衬底,应该很快减少浮栅上的电子,导致某位存储单元出错。这种事件是一种概率事件,不应该存在注量或剂量阈值,且与加电状态关系不大。

第 2 种机理只提到氧化物陷阱电荷,实际上界面陷阱电荷也会导致阈值电压漂移。

我们认为:1)辐射在浮栅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,电子漂移到体硅或控制栅,空穴的迁移率小,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陷阱电荷;一部分在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,存储单元的状态就发生变化,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,才能导致阈值电压超过高低电平的噪声容限,因此,错误发生存在注量或剂量阈值。随着注量或剂量的增加,阈值电压发生漂移的晶体管数目增加,错误数增加。2)辐射产生的电子空穴对在电场下复合率小,逃逸率大,容易形成氧化物陷阱电荷。逃逸出的电子空穴发生漂移,其漂移有方向性,容易在界面处形成界面陷阱电荷;无电场时,迁移率小,复合率大,不易形成氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷。因此,器件在加电状态下出现错误,而在不加电状态下不出现错误。3)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。因此,在存储单元状态彻底改变之前的一段时间内,其状态是不确定的。所以,器件刚开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的。4)高温退火使陷阱中的空穴获得激发而跳出陷阱与电子复合。随着氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的减少或消失,阈值电压逐渐恢复到辐照前的状态。和 29C256 相比,28C256 的功能不易通过高温退火得到恢复,这是由于 28C256 的氧化层比 29C256 厚,氧化物陷阱深的缘故。5)对于实验现象 4 和不能重新编程写入数据的问题,我们认为,是由控制部件出错导致的。这是由于整个器件都处于辐射环境中,辐射在存储单元外围控制部件中也会产生总剂量效应,导致控制部件出错。实验观察到出现不同错误的中子注量阈值不同。对于 29C256,中子注量大于 $9.743 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,不能编程重新写入数据,但存储的数据正确; $5.832 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,数据出错。对于 28C256,中子注量大于 10^{13} cm^{-2} 时,不能编程重新写入数据,但存储的数据正确; $5.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,数据出错。对于 28C64,中子注量大于 10^{13} cm^{-2} 时,开始无法写入新数据;大于 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,出现擦写故障。说明中子辐照首先导致控制部件出错(先写入部件,后擦除部件),其次是存储单元出错。在随后更进一步的⁶⁰Co γ 辐照实验中,监测了器件功耗电流的变化情况。实验观察到,对于 EEPROM 和 FLASH ROM,剂量积累到一定程度,总的功耗电流开始逐渐增大;当电流增大到一定程度时,出现数据错误。Wrobel 研究表明^[4],总剂量效应导致的阈值电压漂移会使功耗电流增大,降低外围电路的驱动能力,引起器件功能失效,出现控制部件错误,随后出现数据错误。这也是一种解释,但终究是由总剂量效应引起的。基于以上的分析,我们认为浮栅 ROM 器件的辐射效应是存储单元及其外围电路发生总剂量效应的综合体现。

表 1 比较了 EEPROM 和 FLASH ROM 器件在中子、质子和⁶⁰Co γ 辐射下出现数据错误时的累积剂量,导致器件出错的累积剂量阈值⁶⁰Co γ 最小;其次是质子;再次是中子。这是由于三种辐射源产生电子空穴对的方式不同:⁶⁰Co γ 光子通过康普顿效应直接产生电子空穴对;质子直接电离产生的电子空穴对少,通过与硅原子发生反应产生次级重离子的反应截面小,绝大部分质子不发生反应而穿过器件(在典型的 $4 \mu\text{m}$ 厚的硅片中,大约 10 万个质子中只有一个质子与硅发生反应);中子不能电离产生电子空穴

对,它与硅原子发生反应的截面也不大.另外, γ 光子电离产生的电子空穴对和重离子电离产生的电子空穴对的空间结构分布不同: γ 光子电离产生的电子空穴对稀疏,复合率小,逃逸率大;重离子电离产生的电子空穴对稠密,柱状分布,复合率大,逃逸率小.因此,在三种辐射源辐照下,氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的形成速率由快到慢依次为 γ 、质子和中子.所以导致浮栅 ROM 器件出错的累积剂量阈值 ^{60}Co γ 最小,其次是质子,再次是中子.

表 1 器件出现数据错误时的累积剂量

器件型号	累积剂量(10^4 rad(Si))		
	中子	质子*	γ *
28C256	7.612	2.790	1.445
29C256	7.290	2.249	1.175

* 质子和 γ 的数据为几个器件的平均值.

5. 结 论

应用总剂量效应机理合理地解释了实验中观察到的现象:错误发生存在注量或剂量阈值,器件在加电状态下出现错误,而在不加电状态下不出现错误;器件刚开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的;高温退火效应和存储单元外围控制部件错误.这些都是辐射产生的电子空穴对在器件中形成氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的缘故,是存储单元及其外围电路发生总剂量效应的综合体现.因此,浮栅 ROM 器件的中子、质子和 ^{60}Co γ 辐射效应都是总剂量效应.导致浮栅 ROM 器件出错的累积剂量阈值 ^{60}Co γ 最小,其次是质子,再次是中子.

- [1] Schwartz H R *et al* 1997 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-44** 2315
- [2] Nguyen D N *et al* 1999 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-46** 1744
- [3] Cellere G *et al* 2001 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-48** 2222
- [4] Wrobel T F 1989 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-36** 2247
- [5] Snyder E S *et al* 1989 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-36** 2131
- [6] Verkasalo R 1994 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-41** 2600
- [7] Wang J P *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1331 (in Chinese) [王剑屏等 2000 物理学报 **49** 1331]
- [8] Zhang T Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆等 2001 物理学报 **50** 2434]
- [9] Wang X Q *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1094 (in Chinese) [王晓强等 2002 物理学报 **51** 1094]
- [10] Lu T *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 145
- [11] He C H *et al* 1999 *Microelectronics* , **29** 262 (in Chinese) [贺朝会等 1999 微电子学 **29** 262]
- [12] He C H *et al* 2000 *Nucl. Elec. & Dec. Tech.* **20** 115 (in Chinese) [贺朝会等 2000 核电子学与探测技术 **20** 115]
- [13] He C H *et al* 2002 *Chinese Journal of Space Sci.* **22** 184 (in Chinese) [贺朝会等 2002 空间科学学报 **22** 184]
- [14] He C H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 180 (in Chinese) (in press) [贺朝会等 2003 物理学报 **52** 180 (in press)]
- [15] He C H *et al* 2002 *Nucl. Elec. & Dec. Tech.* **22** 344 (in Chinese) [贺朝会等 2002 核电子学与探测技术 **22** 344]
- [16] Guo H X *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2315 (in Chinese) [郭红霞等 2002 物理学报 **51** 2315]

Mechanism of radiation effects in floating gate ROMs

He Chao-Hui Geng Bin Yang Hai-Liang Chen Xiao-Hua Li Guo-Zheng Wang Yan-Ping
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

(Received 18 September 2002; revised manuscript received 24 December 2002)

Abstract

Mechanism of irradiation effects is analyzed for floating gate read only memories (ROMs). Phenomena in experiments are reasonably explained. It is proposed that failures in devices result from oxide trapped charge and interface trapped charge generated by radiation in memory cells and peripheral circuitry. The neutron, proton and ^{60}Co γ irradiation effects in FLASH ROM and EEPROM are total dose effects.

Keywords: FLASH ROM, EEPROM, neutron, proton, ^{60}Co γ , total dose effect

PACC: 6180, 7340Q