

# 浮栅 ROM 器件 x 射线剂量增强效应实验研究

郭红霞<sup>1,2)</sup> 陈雨生<sup>2)</sup> 张义门<sup>1)</sup> 韩福斌<sup>2)</sup> 贺朝会<sup>2)</sup> 周 辉<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)

<sup>2)</sup> 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2002 年 1 月 2 日收到, 2002 年 2 月 27 日收到修改稿)

给出了浮栅 ROM 器件在钴源和北京同步辐射装置(BSRF)BWI 白光束线辐照的实验结果, 比较了两种辐照的实验结果及其损伤异同性. 通过实验在线测得位错误数随总剂量的变化, 给出相同累积剂量时 x 射线辐照和  $\gamma$  射线辐照的总剂量效应损伤等效关系. 获得了浮栅 ROM 器件 x 射线剂量增强因子. 这些结果对器件抗 x 射线辐射加固技术研究有重要价值.

关键词: EEPROM, x 射线, 剂量增强剂量效应, 同步辐射

PACC: 6180C, 7340

## 1. 引 言

$\gamma$  和 x 射线都将在电子元器件中产生电离效应并导致器件不同程度的损伤. 国内对电子器件的  $\gamma$  损伤效应研究的较多, 而对较硬的 x 射线的损伤效应, 特别是“剂量增强”效应则研究的不多. 能量在 30—100keV 的 x 射线穿透力强, 不易屏蔽, 且入射在不同原子序数材料的界面时, 在靠近界面处几十  $\mu\text{m}$  内的低原子序数材料中产生较强的剂量增强效应<sup>[1]</sup>. x 射线产生的剂量增强效应不仅与射线的能量, 还与器件的结构, 金属封装类型有关. 器件中引起剂量增强的重金属主要是芯片的金属化部分及封装的材料<sup>[1,2]</sup>. 重金属与器件灵敏区(主要成分为  $\text{SiO}_2$  或 Si)构成原子序数差异很大的界面. 高原子序数材料对 x 射线有较大的光电截面, 其光电效应反应截面为  $\sigma_{\text{ph}} \propto Z^{4-5}$ , 其中  $Z$  为原子序数. x 射线在高原子序数中将产生大量的二次电子, 部分次级电子进入交界面的半导体灵敏区中, 在灵敏区产生明显的剂量增强效应, 造成在相同的辐射剂量下, x 射线对器件和集成电路的损伤较  $\gamma$  射线要严重得多.

我们已开展了不同材料界面的 x 射线剂量增强效应研究<sup>[3]</sup>, 开展了稳态、瞬态 x 射线辐照 CMOS 器件剂量增强效应研究<sup>[4]</sup>. 本文重点给出大规模集成电路浮栅器件 28f256 和 29C256ROM 的硬 x 射线剂量增强效应实验研究结果. 利用 BSRF3W1 白光束线产生的硬 x 射线<sup>[5,6]</sup>环境, 通过实验在线测得浮栅器

件位错误数随总剂量的变化, 给出相同累积剂量时 x 射线辐照和  $\gamma$  射线辐照的总剂量效应损伤等效关系. 尚未见关于浮栅 ROM 器件 x 射线辐射效应方面的报道.

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 器件已广泛应用于航天器在内的各领域的电子系统中. 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.

## 2. 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. 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并对应于存储信息“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,实现电可擦除和电可编程.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.

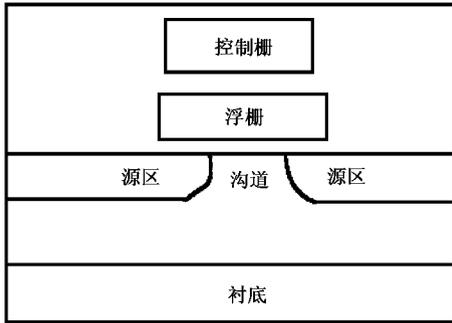


图 1 浮栅 ROM 存储单元的基本结构示意图

### 3. 实验方法

浮栅 ROM 器件的硬 x 射线效应实验是在北京同步辐射装置 3W1 白光(多色光连续谱)束线上进行的<sup>[7,8]</sup>.在出光口加 100 $\mu$ m 铅皮滤光,滤掉能量小于 20keV 的低能 x 射线,使出射能谱变硬.经过滤光片出射的 x 射线能谱见图 2,能谱范围在 20—100keV,峰值约在 45keV.

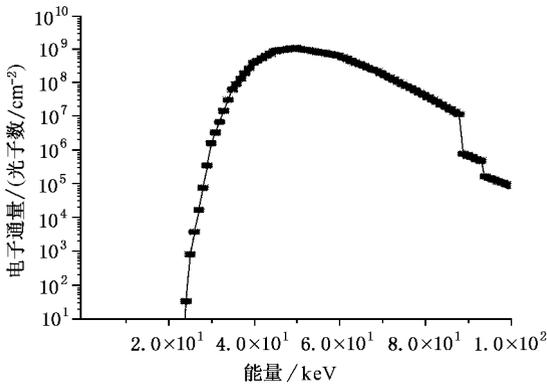


图 2 经过 100 $\mu$ m 铅皮滤光片后的 x 射线能谱

实验布局如图 3 所示.实验前首先用激光准直器准直对光,使靶室中心、剂量监测电离室窗口及标定剂量的 Farmer 剂量计探头在一条线上.同步辐射的束流强度随时间的推移而不断减少,被辐照器件吸收的剂量率不断变化,因此剂量测量是通过标定的电离室的计数来推算的.利用中国计量院研制的 T6576 型剂量计,对电离室进行刻度标定.该剂量计

主要用于测量 x 射线能量大于 20keV 的剂量.电离室输出经弱电流放大, V/F 转换后送入计数器,由计算机定时读取计数器的累积计数显示并进行存储.每秒读取一次计数.实验器件插在辐照板上,辐照板通过长数据传输线将实验数据传输到屏蔽室外的微机.利用研制的在线实时测试系统<sup>[9]</sup>获取辐照时辐照器件的翻转状态及位错误数.实验器件为 28f256 和 29C256.不同辐照源辐照器件各 3 只,分别进行编号.辐照前每个字节写入数据“55H”,即“0”与“1”相互间隔.在加电(+5V)状态下辐照,动态监测,用存储器辐照效应测试系统实时读取数据,统计出错单元及数量. $\gamma$ 效应的实验在西北核技术研究所钴源进行.表 1 给出器件在钴源辐照时开始出错的错误单元和数据.

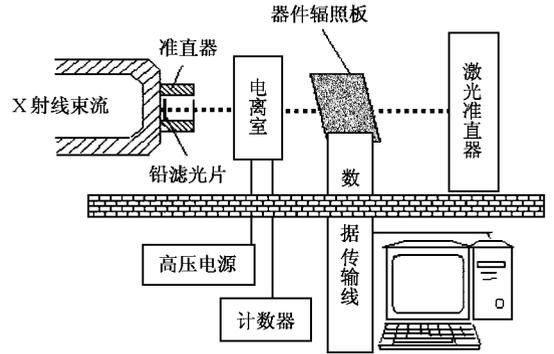


图 3 同步辐射装置辐射效应实验布局

### 4. 实验结果与分析

动态监测中所有器件都出现了错误,开始出错的错误单元和数据错误出现是随机的,见表 1.辐照到一定剂量,即位错误数达到辐照剂量阈值后,出现雪崩翻转.图 4 为动态监测的  $\gamma$  射线辐照 28f256 出错数随辐照剂量变化的关系曲线.当辐照剂量达到 179.5Gy(Si)时,28f256 开始出现 1 位“1” $\rightarrow$ “0”错误,剂量达到 238.3Gy(Si)时,出现“0” $\rightarrow$ “1”错误.刚开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的.“1” $\rightarrow$ “0”错误比“0” $\rightarrow$ “1”错误容易发生,但随着剂量的增加,“0” $\rightarrow$ “1”错误增加很快,最后主要是“0” $\rightarrow$ “1”错误.其他器件的出错规律相同,只是出错的剂量阈值有所不同.

实验后用编程器进行重新编程,发现动态测量的器件不能重新编程.从表 1 及图 3 结果可以看出,器件出现数据错误有个辐照剂量阈值,当剂量小于

表 1 29-1 开始出错时的错误单元和数据

测量时间	错误单元和数据	错误数
0:9:18	03A00 D5	2
0:9:49	03E00 D5	2
0:10:50	01200 D0	4
0:11:3	06000 D0	4
0:11:42	5698 5D 56A8 5D 7188 5D 7788 5D 7928 5D 7998 5D	6
0:11:54	00C00 D0 03400 D0 05800 D0	12
0:12:2	04C00 D0	4
0:12:6	02000 D0 04800 D0	8
0:12:14	00800 D0	4
0:12:18	01D00 D0 03600 D0 03D00 D5	10
0:12:27	03200 D0 05400 D0	8
0:12:31	00000 D0 00800 D0 00C00 D0 03E00 D0	16
0:12:43	01D00 D0 02600 D1 05200 D0	11
0:12:51	00B81 D5 00C00 D0 02A00 D5 03200 D0	11
0:12:56	03D00 D0 04400 D0	8
0:13:0	00000 D0 00781 75	5
0:13:3	00000 D0 00A00 D5 01FA1 75 02800 D0	11
0:13:11	00000 D0 003A2 FD 04000 D0	11
0:13:20	39E2 54 39E2 54 3DE2 54 58E0 51 5AE0 54 5AE2 54 5BE0 54 62E4 D5 6BCA 5D 6EE2 57 6EE4 5D 72E2 51 73E2 51 79E0 54 79E2 54 79E7 54 7CE0 54 7CE2 54 7CE4 54 7CE7 54 7DE0 54 7DE2 54	22

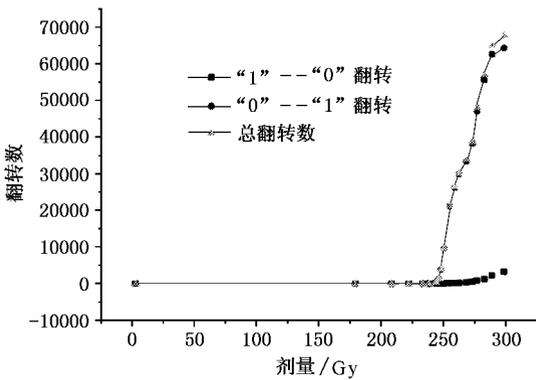


图 4  $\gamma$  射线辐照 28f256 出错数随辐照剂量的变化

某一个值时,无数据错误.达到一定值时,开始出现数据错误.随着剂量的增加,错误数增加.器件刚开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的.数据错误是由控制部件出错导致的.

表 2、表 3 分别给出了 28f256 和 29C256 器件的在同步辐射源和钴源的实验结果.图 5、图 6 是 28f256 和 29C256 在同步辐射源和钴源的位错误数随辐照剂量的变化曲线.可以推算出,28f256 的剂量增强因子在 5.4 左右,29C256 的剂量增强因子约为

3.3. 两种器件均存在 x 射线剂量增强效应,鉴于器件的封装工艺采用塑封,上述器件可能采用了以重金属为主体的多层金属化系统,带来了程度不同的增强损伤.

表 2 28f256 的实验结果

辐照装置	编号	失效辐照剂量/Gy	位错误数/现象
同步辐照源	28f256-1	55.89	11467
	28f256-2	49.16	9806
	28f256-3	52.81	10257
钴源	28f256-4	272.89	10444
	28f256-5	303.99	11912
	28f256-6	307.48	12557

表 3 29C256 的实验结果

辐照装置	编号	失效辐照剂量/Gy	位错误数/现象
同步辐照源	29C256-1	69.30	12809
	29C256-2	63.36	12845
	29C256-3	61.11	13052
钴源	29C256-4	216.76	11411
	29C256-5	215.864	16090
	29C256-6	222.14	14636

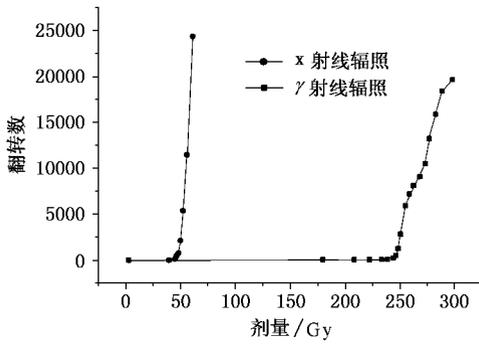


图5 AT28f256 翻转数随辐照剂量的变化

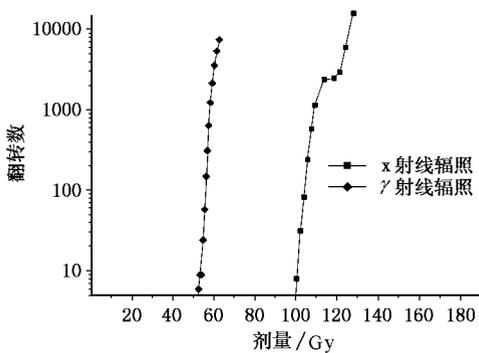


图6 AT29C256 翻转数随辐照剂量的变化

产生上述效应的物理原因如下:  $x$  射线、 $\gamma$  射线及其二次电子在浮栅和周围的绝缘层内电离产生电子空穴对, 动态监测条件下, 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<sup>[10,11]</sup>, 存储单元的状态发生变化, 出现数据错误. 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. 这样, 器件刚开始出错时, 错误数及错误地址

也都是不确定的. 由于界面陷阱电荷的积累需要一定的剂量积累<sup>[12,13]</sup>, 因此, 错误发生存在辐照剂量阈值. 随着剂量的继续增加, 阈值电压漂移的晶体管数目增加, 界面陷阱电荷积累达到饱和, 错误数出现雪崩增加.

## 5. 结 论

浮栅 ROM 器件受辐照后开始出错时, 错误数及错误地址都是不确定的. 不同于 CMOS 器件, 浮栅 ROM 器件出现数据错误有个辐照剂量阈值, 当剂量小于某一个值时, 无数据错误. 达到一定值时, 开始出现数据错误. 随着剂量的增加, 错误数雪崩增加. 这与以前在质子、中子辐照源上获得的浮栅 ROM 器件的损伤规律基本相同, 可以认为是总剂量效应引起的器件损伤.

当辐照源是  $\gamma$  源时, 上述器件的“辐照剂量阈值”较高, 辐照源为  $x$  射线时, 则“辐照剂量阈值”较低. 存在明显的剂量增强效应. 辐照用的器件均采用塑封工艺, 不同于可伐封装的是其封装盖内层没有镀  $2\text{—}3\mu\text{m}$  的金材料. 但从数据结果看出, 28f256 的剂量增强因子在 5.4 左右, 29C256 的剂量增强因子约为 3.3. 分析可能器件采用重金属化工艺, 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  $x$  射线剂量增强效应. 本研究通过实验建立了浮栅 ROM 器件相同累积剂量时  $x$  射线辐照和  $\gamma$  射线辐照总剂量损伤等效关系; 在国内获得了浮栅器件剂量增强因子, 并且建立了存储器  $x$  射线剂量增强效应研究方法, 为器件  $x$  射线抗辐射加固技术研究提供了有价值的数据库.

本工作得到上海航天局 808 所吾勤之同志、中国科学院高能物理所谢亚宁、黄宇营等同志的大力协作和支持, 在此一并表示衷心地感谢.

- [ 1 ] Chadsey W L *X-ray dose enhancement* Vol I :Summary Report , RADC-TR-76-159 ,ADAC26248
- [ 2 ] Lai L Z 1998 *Radiation Hardening Electronics—radiation Effects and Hardening Techniques*( Beijing :National Defense Industry Press ) ( in Chinese ) 赖祖武 1998 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理(北京 :国防工业出版社 )
- [ 3 ] Guo H X *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50**( in Chinese )1545 [ 郭红霞等 2001 物理学报 **50** 1545 ]
- [ 4 ] Guo H X *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 2279 ( in Chinese ) [ 郭红霞等 2001 物理学报 **50** 2279 ]
- [ 5 ] Liu T *et al* 1998 *Acta Phys . Sin . ( Overseas Edition )* **7** 8
- [ 6 ] Cheng J X *et al* 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 287 ,750 ,1105 ,1306 , 1512 ( in Chinese ) [ 成金秀等 2000 物理学报 **49** 287 ,750 ,1105 , 1306 ,1512 ]
- [ 7 ] Yang Z A *et al* 1999 *Acta Phys . Sin .* **48** 1113 ( in Chinese ) [ 杨志安等 1999 物理学报 **48** 1113 ]
- [ 8 ] Ban D Y *et al* 1997 *Acta Phys . Sin .* **46** 587 ,767 ,1817 ( in Chinese ) [ 班大雁等 1997 物理学报 **46** 587 ,767 ,1817 ]
- [ 9 ] He C H *et al* 2000 *Nuclear Electronics and Detection Technology* **20** 115 ( in Chinese ) [ 贺朝会等 2000 核电子学与探测技术 **20** 115 ]
- [ 10 ] Wrobel T F 1989 *IEEE Trans . Nuc . Sci .* NS - **36** 2241
- [ 11 ] Schwartz H R 1997 *IEEE Trans . Nuc . Sci .* NS - **44** 2315
- [ 12 ] Turinetti J R 1998 *IEEE Trans . Nuc . Sci .* NS - **44** 2065
- [ 13 ] Beutler D E 1990 *IEEE Trans . Nuc . Sci .* NS - **37** 1541

## Experimental study on x-rays dose enhancement effects for floating gate ROMs \*

Guo Hong-Xia<sup>1,2)</sup> Chen Yu-Sheng<sup>2)</sup> Zhang Yi-Men<sup>1)</sup> Han Fu-Bin<sup>2)</sup> He Chao-Hui<sup>2)</sup> Zhou Hui<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>( Microelectronics Institute of Xidian University ,Xi 'an 710071 ,China )

<sup>2)</sup>( Northwest Institute of Nuclear Technology ,Xi 'an 710024 ,China )

( Received 2 January 2002 ; revised manuscript received 27 February 2002 )

### Abstract

Experimental results of x-ray dose enhancement effects are given for floating gate read-only memory( ROMs ) irradiated in the Beijing Synchrotron Radiation Facility . The wrong byte numbers vs . total irradiation dose have been tested and the equivalent relation of total dose damage is provided compared the response of devices irradiated with <sup>60</sup>Co $\gamma$ -ray source . The x-ray dose enhancement factors for floating gate ROMs are obtained firstly in our country . These results can be an effective evaluation data for x-rays radiation hardening technology .

**Keywords :** EEPROM , x-rays , dose enhancement effects , synchrotron radiation

**PACC :** 6180C , 7340