

不同集成度 SRAM 硬 X 射线剂量增强效应研究*

郭红霞^{1,1)} 陈雨生¹ 韩福斌¹ 罗剑辉¹ 杨善潮¹
龚建成¹ 谢亚宁² 黄宇萱² 何伟² 胡天斗²

1(西北核技术研究所 西安 710024)
2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 给出了不同集成度 16K—4Mb 随机静态存储器 SRAM 在钴源和北京同步辐射装置 BSRF 3W1 白光束线辐照的实验结果;通过实验在线测得 SRAM 位错误数随总剂量的变化,给出相同辐照剂量时 20—100keV X 光辐照和 Co^{60} γ 射线辐照的剂量损伤效应的比例因子;给出集成度不同的 SRAM 器件抗 γ 射线总剂量损伤能力与集成度的关系;给出不同集成度 SRAM 器件的 X 射线损伤阈值. 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 静态存储器 X 射线 剂量增强效应 同步辐射

1 引言

运行在强辐射环境中的电子系统需考虑抗 X 射线总剂量加固问题. 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 μm 内的低原子序数材料中产生较强的剂量增强效应^[1]. 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盖的材料^[1,2]. 重金属与器件灵敏区(主要成分为 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 $\sigma_{\text{photo}} \propto Z^4$ ^[3],其中 Z 为原子序数. X 射线在高原子序数材料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,明显增强了灵敏区的电离总剂量,这就是“剂量增强”效应. 剂量增强将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 γ 射线要严重得多,即“剂量损伤增强”,其原因是 X 光能量在几个 MeV 以下,光子的吸收系数随

能量的升高急剧减小^[3]. 它是剂量学与微电子学相结合的结果,根据我们的研究,剂量损伤增强因子小于剂量增强因子^[4-6].

我们开展了不同材料界面的 X 射线剂量增强效应研究^[4],稳态、瞬态 X 射线辐照 CMOS 器件剂量增强效应研究^[5],和大规模集成电路浮栅器件 28f256 和 29C256ROM 的硬 X 射线剂量增强效应的实验研究. 本文给出了 CMOS 工艺制成的不同集成度随机静态存储器 SRAM(Static Random Access Memory),包括 16kb 6116(2k × 8 位)、64kb 6264(8k × 8 位)、256kb 62256(32k × 8 位)、1Mb 628128(128k × 8 位)、4Mb 628512(512k × 8 位)在钴源和北京同步辐射装置 BSRF(Beijing Synchrotron Radiation facility) 3W1 白光束线辐照的实验结果;比较了两种辐照源的实验结果及其损伤异同性. 通过实验,在线测得 SRAM 位错误数随总剂量的变化,给出相同累积剂量时 X 光辐照和 γ 射线辐照的总剂量效应损伤等效关系;给出集成度不同的 SRAM(16k—4M)器件抗总剂量损伤能力与集成度的关系;给出不同集成度 SRAM 器件的 X 射线损伤阈值.

2003-04-28 收稿,2003-07-01 收修改稿

* 国防预研基金(3110705)资助

1) E-mail: Hannah_guo@eyou.com

2 随机静态存储器测试系统

存储器是计算机最主要的部件之一,特别是包括航天器在内的各领域的电子系统中得到广泛应用.因此开展不同集成度 SRAM 器件的 X 射线辐射效应研究具有重大的现实意义和应用价值.随着大规模集成电路和存储技术的长足发展,半导体存储器的集成度以每 3 年翻两番的速度在提高.从使用功能角度看,半导体存储器可以分为两大类:断电后数据丢失的挥发性存储器和断电后数据不丢失的非挥发性存储器.把随机读写信息的易失性存储器称为 RAM(Random Access Memory),根据工作原理和条件不同,RAM 又有静态和动态之分,一类是基于触发器原理的静态读写存储器,SRAM(Static RAM).另一类是基于分布电容电荷存储机理的动态随机存储器 DRAM(Dynamic RAM).

SRAM 存储器总剂量效应长线测试系统如图 1 所示,系统主要由微机、控制测试板、传输电缆和辐照板 4 部分组成,控制测试板主要用于被辐照器件的写入和读出数据,它由锁存器、译码器、缓冲器、时钟、锁存控制和逻辑控制等控制电路组成.被辐照器件放置在辐照板上,数据通过 30m 长的扁平电缆传输到控制测试板.

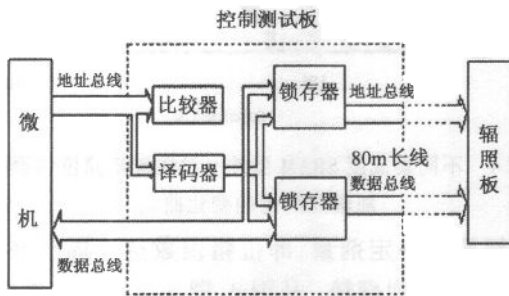


图 1 存储器总剂量效应测试系统

器件型号可以根据需要互换,由于 64k, 256k, 1M, 4M 位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,使辐照板上插座能够同时兼容不同集成度的器件,便于实验操作和测试;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,提高线路板和传输电缆的抗干扰性能;并改进了系统软件,提高了系统的抗干扰能力.

3 实验方法

实验器件为 HITACHI 生产的 64k—4M 位的静态随机存取存储器.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^[7,8].在出光口加 100 μ m 铅皮滤光,滤掉能量小于 20keV 的低能 X 射线,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.

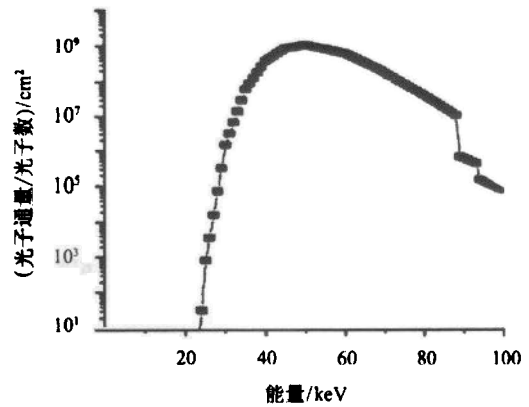


图 2 经过 100 μ m 铅皮滤光片后的 X 射线能谱

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在变化,因此剂量测量是通过标定的电离室的计数来推算的.利用中国计量院为我们研制的 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.电离室输出信号经弱电流放大, 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

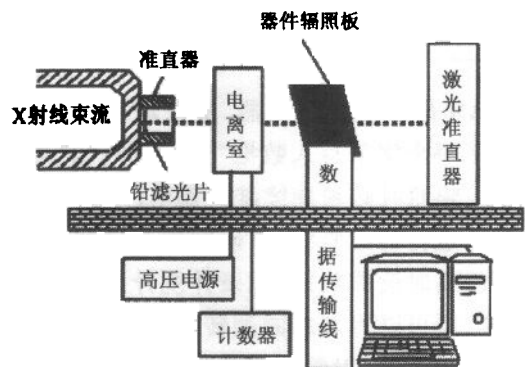


图 3 同步辐射装置辐射效应实验布局

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^[9],获取辐照时辐照器件的翻转状态及位错误数.为了减小实验数据的分散性,对同一型号,要选取同一批次的器件.

表 1 集成度不同的 SRAM 不同辐射源的实验结果

辐照装置	编号	失效辐照剂量 /Gy	位错误数/现象	备注
同步辐照源	6116-1	1583	830	6116 的 RDEF = 3.29
	6116-2	1746	797	
	6116-3	1645	833	
钴源	6116-4	5493	824	RDEF = 3.29
	6116-5	5358	819	
	6116-6	5528	820	
同步辐照源	6264-1	3703	3187	6264 的 RDEF = 2.05
	6264-2	3927	3233	
	6264-3	3531	3261	
钴源	6264-4	7894	3251	RDEF = 2.05
	6264-5	7521	3277	
	6264-6	7493	3269	
同步辐照源	62256-1	2414	12774	62256 的 RDEF = 5.47
	62256-2	2312	12647	
	62256-3	2537	12308	
钴源	62256-4	13098	12539	RDEF = 5.47
	62256-5	13047	12986	
	62256-6	13554	12023	
同步辐照源	628128-1	4805	52213	628128 的 RDEF = 6.47
	628128-2	4829	56252	
	628128-3	5012	50475	
钴源	628128-4	32262	50237	RDEF = 6.47
	628128-5	30826	51931	
	628128-6	31620	510100	
同步辐照源	628512-1	34773	213321	628512 的 RDEF = 3.43
	628512-2	32300	195528	
	628512-3	35229	203897	
钴源	628512-4	126817	2016786	RDEF = 3.43
	628512-5	119297	212748	
	628512-6	104657	209877	

SRAM 是挥发性存储器,所以辐照前首先在加电条件下每个字节写入数据“55H”,即:“0”与“1”相互间隔.辐照时必须继续维持加电(+5V)状态,出束辐照下进行动态监测,用研制的存储器辐照效应测试系统实时读取数据,记录并统计翻转数及其地址,这样,既可以得到总的翻转数,又可得到某一时刻的翻转情况. γ 射线总剂量效应的实验在西北核技术研究所钴源进行.表 1 给出了实验测试结果.

不同辐照源辐照器件各 3 只,分别进行编号.定义器件出错翻转数到达集成度 5% 时为失效,相对剂量损伤增强因子 RDEF(Relative Dose Enhancement Factor)定义为器件失效时 γ 射线辐照剂量与 X 射线辐照剂量之比.表 1 给出不同集成度 SRAM(16k—4M)的 RDEF.可以看出,剂量增强是明显存在的,器件集成度不同,剂量增强因子也不同,剂量增强因子在 2.0—7.0 之间不等.

4 实验结果与分析

图 4、图 5 是不同集成度 SRAM 器件 γ 射线、X 射线辐照位错误数随辐照剂量的变化曲线,可以看出,动态监测中所有器件都出现了错误,开始出错时的错误单元和出错数据是随机的.“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.

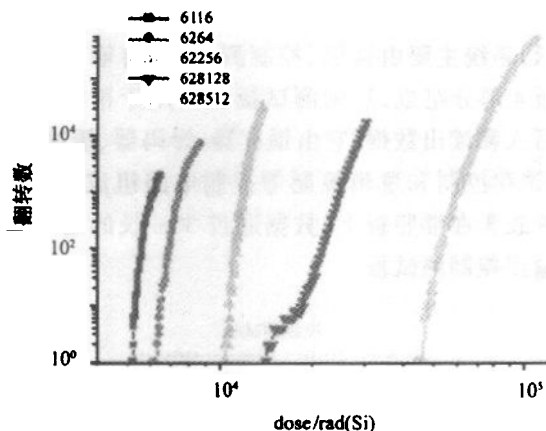


图 4 不同集成度 SRAM 器件 γ 射线源辐照位错误数随辐照剂量的变化曲线

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.从图 4、图 5 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.

CMOS 工艺集成电路在电离辐射的环境下遭受永久性损伤,在 SiO_2 栅氧化层内和 Si/SiO_2 界面处产生大量的辐射感生氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷.这将造成 MOS 器件电参数的变化,如阈值电压的漂移,漏电流的增大,击穿电压变化,跨导降低等.这些电参数的变化将导致 MOS 器件失效.在给出

了 SiO_2 每拉德产生的体密度 ($g_0 = 8.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ rad}^{-1}(\text{Si})$) 和复合后的空穴份额 f_y , 利用下式就可以求得初始阈值电压漂移

$$-\Delta V_T(0^+) = [qg_0 d_{ox} f_y D] / 2C_{ox} = 1.9 \times 10^{-8} d_{ox}^2 f_y D$$

式中 d_{ox} 是栅氧化层厚度, 单位为 nm; C_{ox} 是氧化层电容, 单位是皮法; q 是电荷电量, 单位是库仑; D 为吸收剂量, 单位为拉德 (Si), ΔV_T 初始阈值电压漂移, 单位是伏特。可以看出, 初始电压漂移和氧化层厚度呈平方关系, 这表明若器件具有较薄的栅极氧化层, 其辐射敏感性有明显的改善。

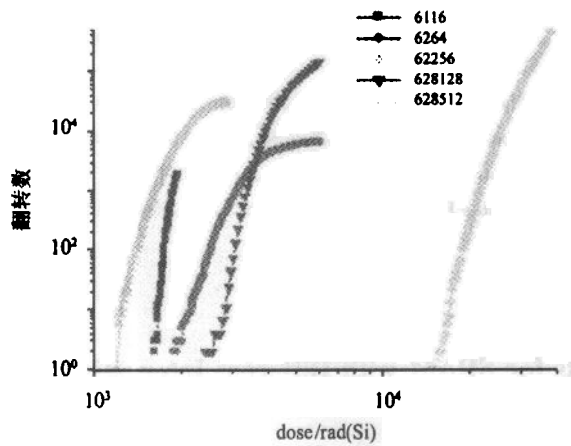


图 5 不同集成度 SRAM 器件 X 射线辐照位错误数随辐照剂量的变化曲线

随着半导体存储器的集成度的不断提高, 工艺条件的不断改善, 栅氧化层厚度越薄, 因此, 从图 4 看出, 器件集成度越高, 抗 γ 射线总剂量电离辐射能力越强。

由于工艺条件的不同, 主要是重金属工艺选材, 衬底掺金浓度的变化, 不同集成度器件 X 射线剂量增强因子是不一样的, 分析器件可能采用了以重金属为主体的多层金属化工艺, 带来了程度不同的增强损伤。如图 5 所示, 特别是 62256 器件, 抗硬 X 射线损伤阈值最低。

产生上述效应的物理原因如下: X 射线、 γ 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^[10,11], 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^[12,13], 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 结束语

随机静态存储器受辐照后开始出错时, 错误数及错误地址都是不确定的。和浮栅 ROM 器件一样, 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。

当辐照源是 Co^{60} γ 源时, 器件的“辐照剂量阈值”较高; 辐照源为 20—100keV X 射线时, 则“辐照剂量阈值”较低。存在明显的剂量增强或剂量损伤增强的效应。

本项研究通过实验建立了不同集成度随机静态存储器相同累积剂量时 X 射线辐照和 γ 射线辐照总剂量损伤等效关系; 获得了其剂量损伤增强因子, 给出了其 X 射线损伤阈值。并且建立了随机静态存储器 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、航天一院十四所张力等同志的大力协作和支持, 在此一并表示衷心地感谢!

参考文献 (References)

- 1 Chadsey W L. X-Ray Dose Enhancement. Vol. I: Summary Report, RADC-TR-76-159, ADAC26248
- 2 LAI Z W. Radiation Hardening Electronics—Radiation Effects and Hardening Techniques. Beijing: National Defense Industry Press, (1998) (in Chinese)
(赖祖武. 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理. 北京: 国防工业出版社, 1998)
- 3 Fudan University et al. Experimental Method of Atomic Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996 (in Chinese)
(复旦大学等. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1996)
- 4 GUO H X, CHEN Y S, ZHANG Y M et al. Acta Physica Sinica, 2001, 50(8): 1545—1548 (in Chinese)
(郭红霞, 陈雨生, 张义门等. 物理学报, 2001, 50(8): 1545—1548)
- 5 GUO H X, CHEN Y S, ZHANG Y M et al. Acta Physica Sinica, 2001, 50(12): 2279—2283 (in Chinese)
(郭红霞, 陈雨生, 张义门等. 物理学报, 2001, 50(12): 2279—2283)
- 6 GUO H X, CHEN Y S, ZHANG Y M et al. Acta Physica Sinica, 2002, 51(10): 2315—2319 (in Chinese)
(郭红霞, 陈雨生, 张义门等. 物理学报, 2002, 51(10): 2315—2319)
- 7 Beutle D E. IEEE Trans. Nuc. Sci., 1990, 37(6): 1541—1546
- 8 XIE Y N et al. HEP & NP, 2001, 25(Supp.): 7—11 (in Chinese)
(谢亚宁等. 高能物理与核物理, 2001, 25(增刊): 7—11)
- 9 GUO H X, CHEN Y S, ZHANG Y M et al. HEP & NP, 2001, 25(Supp.): 1—6 (in Chinese)
(郭红霞, 陈雨生, 张义门等. 高能物理与核物理, 2001, 25(增刊): 1—6)
- 10 HE C H. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2000, 20: 115—120 (in Chinese)
(贺朝会. 核电子学与探测技术, 2000, 20: 115—120)
- 11 Wrobel T F. IEEE Trans. Nuc. Sci., 1989, 36(6): 2241—2247
- 12 Schwartz H R. IEEE Trans. Nuc. Sci., 1997, 44(6): 2315—2321
- 13 Turinetti J R. IEEE Trans. Nuc. Sci., 1998, 44(6): 2065—2069

Study on Hard X-Rays Dose Enhancement Effects for SRAM with Different Integration *

GUO Hong-Xia^{1,1)} CHEN Yu-Sheng¹ HAN Fu-Bin¹ LUO Jian-Hui¹ YANG Shan-Chao¹
GONG Jian-Cheng¹ XIE Ya-Ning² HUANG Yu-Ying² HE Wei² HU Tian-Dou²

1 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Experimental results of x-rays dose enhancement effects are given for SRAM with different integration from 16k to 4M irradiated by 20—100keV X rays in Beijing Synchrotron Radiation Facility and by cobalt source γ rays. The ratio of radiation damage to the SRAMs irradiated with two sources are measured. The relationship of radiation hardness of SRAM versus different integration for γ -rays irradiation and the damage threshold values of X-rays for SRAM with different integration are presented.

Key words SRAM, X-rays, dose enhancement effects, synchrotron radiation

Received 28 April 2003, Revised 1 July 2003

* Supported by National Defense Advanced Research (3110705)

1) E-mail: Hannah_guo@eyou.com