

存储器硬 X 射线损伤效应实验

郭红霞¹ 韩福斌¹ 陈雨生¹ 罗剑辉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 文章给出了大规模集成电路浮栅 ROM, SRAM 器件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; 比较了其两种辐照源的实验结果及其损伤异同性. 通过实验在线测得位错误数随总剂量的变化, 给出其相同累积剂量时 X 射线辐照和 γ 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, 给出了集成度不同的 SRAM (16k—4M) 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 浮栅 ROM SRAM 剂量增强效应 同步辐射

1 引言

γ 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 γ 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 μm 内的低原子序数材料中产生较强的剂量增强效应. X 射线产生的剂量增强效应不仅与射线的能量, 还与器件的结构和金属封装类型有关. 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. 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 $\sigma_{\text{photon}} \propto Z^4 \sim Z^5$, 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 γ 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, 开展了稳态、瞬态 X 射线辐照 CMOS

器件剂量增强效应研究. 本文重点给出大规模集成电路浮栅器件 28f256 和 29C256 ROM 及不同集成度 SRAM 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 γ 射线辐照的总剂量效应损伤等效关系. 这些结果对器件抗 X 射线辐射加固技术研究有重要价值.

2 存储器测试系统简介

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. 因此开展浮栅 ROM、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.

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、传输电缆和辐照板四部分组成, 控制测试板主要用于对被辐照器件写入和读出数据, 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.

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。

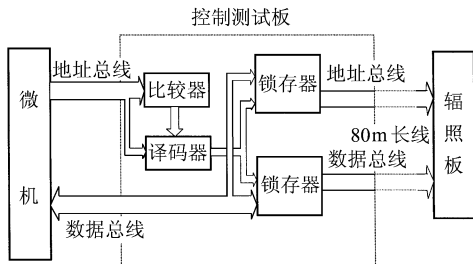


图 1 存储器总剂量效应测试系统

3 实验方法

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。在出光口加 200 μm 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 20keV—100keV,峰值约在 40keV。

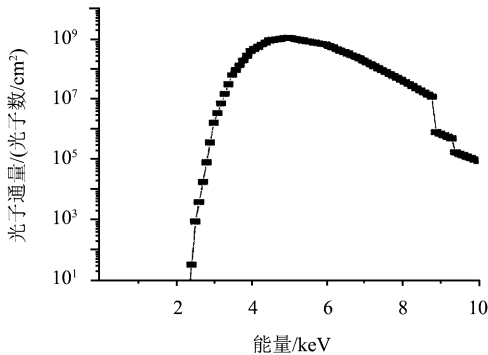


图 2 经过 200 μm 铅皮滤光片后的 X 射线能谱

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。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。器件插在辐照板上。辐照板通过长 30 多米的数据传输线将数据传输到微机,在线实时测试系统获取辐照时辐

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,选取同一批次的器件。

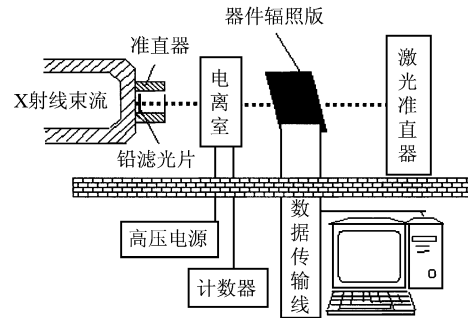


图 3 同步辐射装置实验布局

浮栅 ROM 器件为 28f56 和 29C256, SRAM 器件为 HITACHI 生产的 64k—4M 位的静态随机存取存储器。包括 16kb 6116(2k \times 8 位)、64kb 6264(8k \times 8 位)、256kb 62256(32k \times 8 位)、1Mb 628128(128k \times 8 位)、4Mb 628512(512k \times 8 位)。不同辐照源均取辐照器件各 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,在线监测,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。 γ 效应的实验在西北核技术研究所钴源进行。

4 实验结果与分析

加电监测中所有器件都出现了错误,开始出错时的错误单元和数据错误出现是随机的。辐照一定剂量时,位错误数达到辐照剂量阈值后,出现雪崩翻转。

4.1 浮栅 ROM 器件

图 4 为动态监测 γ 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 180. Gy(Si) 时,28f256 开始出现 1 位“1” \rightarrow “0”错误;剂量达到 238. Gy(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。其它器件的出错规律相同,只是出错的剂量阈值有所不同。

实验后将参试器件用编程器进行重新编程,发现这些加电测量的器件不能重新编程。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

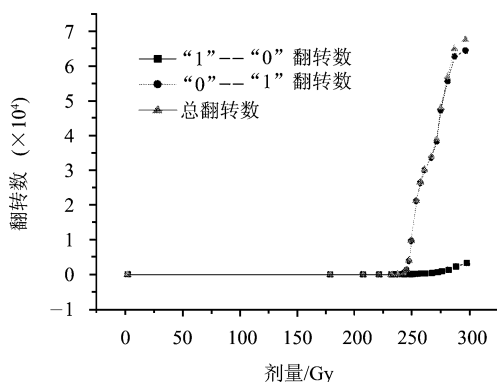


图4 γ 射线辐照 28f256 出错数
随辐照剂量的变化

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.

我们对上述器件进行了 X 射线辐照实验. 目的是得到这些器件的剂量损伤增强因子. 图 5、图 6 是 28f256 和 29C256 的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 的剂量损伤增强因子在 ~ 5.4 左右. 29C256 的剂量损伤增强因子为 ~ 3.3 . 两种器件均存在 X 射线剂量损伤增强效应. 鉴于器件的封装工艺采用塑封, 分析器件可能采用了以重金属为主体的多层金属化系统, 这才带来了程度不同的增强损伤.

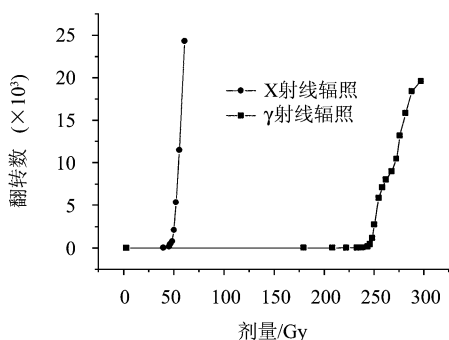


图5 AT28f256 翻转数
随辐照剂量的变化

4.2 不同集成度 SRAM 器件

SRAM 是易失性存储器, 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, 既可以得到总的翻转数, 又可得到某一时刻的

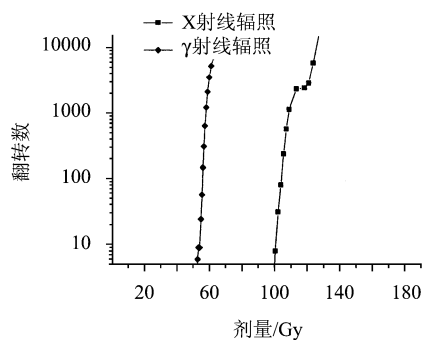


图6 AT29C256 翻转数
随辐照剂量的变化

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. 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, 器件集成度不同, 剂量增强因子也不同, 6116, 6264, 62256, 628128 和 628512 分别剂量增强因子为 3.29, 2.05, 5.47, 6.4 和 3.43, 剂量增强因子在 2.0—7.0 之间不等.

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, 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. 初始电压漂移和氧化层厚度呈平方关系, 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. 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 7 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, 主要是重金属化工工艺选材, 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工艺, 带来了程度不同的增强损伤. 如图 8 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, 存储单元的状态

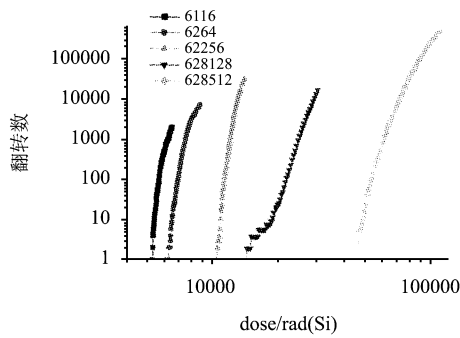


图 7 不同集成度 SRAM 器件 γ 射线源辐照位错误数随辐照剂量的变化曲线

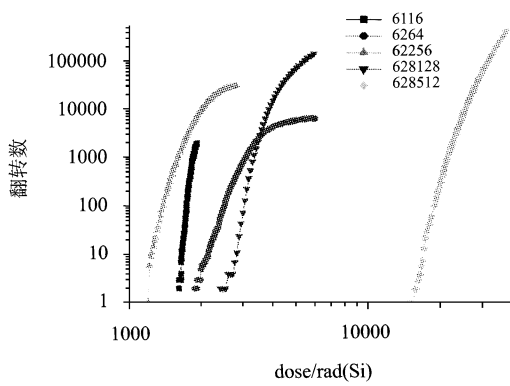


图 8 不同集成度 SRAM 器件 X 射线辐照位错误数随辐照剂量的变化曲线

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,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

在 BSRF 上开展了浮栅 ROM 器件的 X 射线损伤效应研究. 研究显示,浮栅 ROM 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. 与 CMOS 器件不同,器件出现数据错误有个辐照剂量阈值,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. 随着剂量增加到某一值,出现了错误数雪崩增加. 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.

辐照的浮栅器件均采用塑封工艺. 不同于可伐封装,其封装盖内层没有镀 $2-3\mu\text{m}$ 的金材料. 但从实验数据结果看出,28 Ω 256 的剂量损伤增强因子在 ~ 5.4 左右. 29C256 的剂量损伤增强因子为 ~ 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 射线剂量损伤增强效应. 对于 SRAM 器件,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,抗 γ 射线总剂量电离辐射能力越强. 由于工艺条件的不同,主要是重金属化工艺选材,衬底掺杂浓度的变化,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.

本项研究通过实验建立了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;并且建立了存储器 X 射线剂量损伤增强效应研究方法,为器件 X 射线抗辐射加固技术研究提供了实验技术支撑.

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 Experimental Method of Atomic Nuclear Physics(in Chinese)
(复旦大学, 清华大学, 北京大学, 原子核物理实验方法, 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, LUO J, TAO Y et al. HEP & NP, 2001, **25**(Supp.): 7—11 (in Chinese)
(谢亚宁, 骆军, 陶冶等. 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

Experiment on Hard X-Rays Damage Effects for Memory

GUO Hong-Xia¹ HAN Fu-Bin¹ CHEN Yu-Sheng¹ LUO Jian-Hui¹ 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 floating ROM and 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 them 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 floating ROMs, SRAM, dose enhancement effects, synchrotron radiation