

几种半导体器件的硬 X 射线 剂量增强效应研究

郭红霞 韩福斌 陈雨生 周 辉 贺朝会

(西北核技术研究所 西安 710024)

谢亚宁 黄宇营 何 伟 胡天斗

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 本文给出了大规模集成电路 CMOS4069、浮栅 ROM 器件在北京同步辐射装置(BSRF)和钴源辐照的 X 射线剂量增强效应实验结果。通过实验在线测得 CMOS4069 阈值电压漂移随总剂量的变化,测得 28f 256、29c256 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。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 CMOS,EEPROM,X 射线,剂量增强效应,同步辐射

中图分类号 O434.1

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(损伤效应研究得较多,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(射线穿透力强,不易屏蔽,且入射在高、低原子序数材料的界面时,在靠近界面处几十微米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有关,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 SiO₂ 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 $\sigma_{\text{photon}} \propto Z^4$,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^[4,5]。

1 实验方法

硬 X 射线效应实验是在北京同步辐射装置(BSRF)的 3W1 白光(多色光连续谱)^[5,6]束线上进行的^[7,8]。在出光口加 100 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 1,能谱范围在 20—100keV,峰值约在 45keV。

实验布局如图 2 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^[9]获取辐照时器件的翻转状态及位错误数。 γ 效应的实验在西北核技术研究所钴源进行。

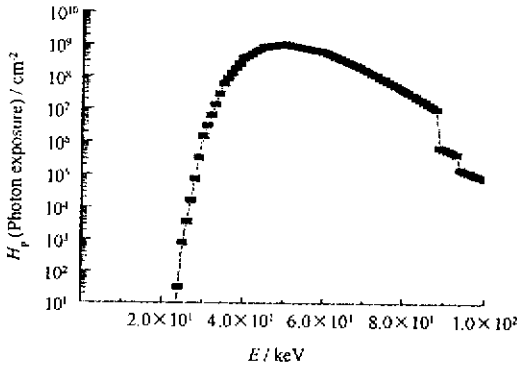


图 1 经过 100 μm 铅皮滤光片后的 X 射线能谱
Fig. 1 X - ray energy spectrum after penetrating 100 μm Pb filter

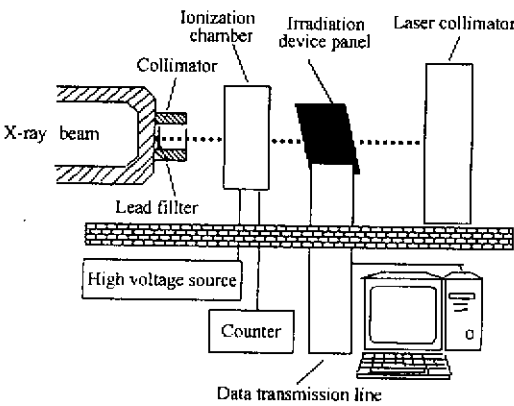


图 2 同步辐射装置辐射效应实验布局
Fig. 2 Schematic diagram of radiation effects research in BSRF

2 实验结果与分析

2.1 CMOS 器件 4069 硬 X 射线剂量增强效应研究

实验样品是 Kovar 盖封装的 CC4069 器件。4069 器件为 CMOS 工艺制作的六反相器电路,辐照时六反向器并联,输入、输出、电源、地和各管脚全引出置辐照板上。 $V_{dd} = 5\text{V}$, $V_{ss} = 0\text{V}$,所有输入端加高电位,即 N 沟一直处于导通状态。图 3 给出 X 射线辐照时器件的 N 沟辐照感生阈值电压漂移随累积剂量的变化关系。可以看出,阈值电压对辐照的响应均呈平滑的响应曲线。这主要是由于电离辐照中,CMOS 电路阈值电压的漂移主要取决于其 SiO_2 氧化物正电荷和界面态的变化,而累积剂量辐照总是引起 CMOS 电路栅极 Si/SiO_2 界面氧化物正电荷和界面态的增加,因此,阈值电压的辐照响应呈现出相对的稳定性。可以清楚地看出,尽管 Kovar 对 X 射线有吸收衰减,但 Kovar 封装内层镀的金使剂量损伤增强效应较为严重,Kovar 的

吸收不如剂量增强的影响大,因此,带盖的器件的剂量损伤阈值甚至低于开盖器件的总剂量损伤阈值。

图 4 给出加电辐照下 X 射线、 γ 射线累积剂量辐照实验结果。在阈值电压漂移量相同的情况下,得到器件 X 射线和 γ 射线总剂量损伤阈值及剂量损伤增强因子。可伐盖封装 CC4069 器件的剂量损伤增强系数为 7.8。由于 X 射线在界面附近产生剂量损伤增强效应,在相同的辐照剂量下,X 射线对器件和集成电路造成的损伤要严重的多,所以,处于 X 射线辐照场下工作的探测器、半导体器件、集成电路、电子系统和设备,应当考虑到剂量损伤增强因子的修正,采取适当的措施来避开或减小这种剂量损伤增强效应。

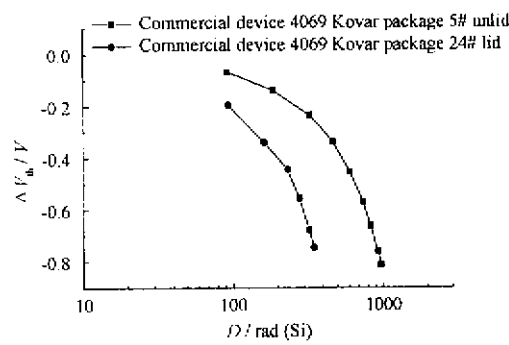


图 3 Kovar 封装器件开盖/不开盖
阈值电压漂移随累积剂量变化
Fig. 3 Shift of threshold voltage dependence on
total dose for unlid/lid package with Kovar

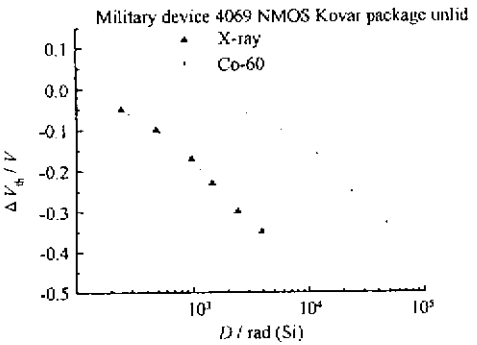


图 4 Kovar 封装 X 射线、 γ 射线
总剂量辐射损伤比较
Fig. 4 Comparison of total dose damage
induced by X-ray and by γ -ray
for Kovar package device

2.2 浮栅 ROM 器件 28f256、29c256 硬 X 射线剂量增强效应研究

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。

动态监测中所有器件都出现了错误,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 5 为动态监测的(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”→“0”错误,剂量达到 238.3 Gy(Si)时,出现“0”→“1”错误。刚开始出错时,错误数及错误地址都是不确定的。“1”→“0”错误比“0”→“1”错误容易发生。但随着剂量的增加,“0”→“1”错误增加很快,最后主要是“0”→“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。从图 5 结果可以看出,器件出现数据错误有一个辐照剂量阈值,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。

表 1、表 2 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 6、图 7 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 的剂量增强因子在约 5.4 左右,29c256 的剂量增强因子为约 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,可能是上述器件采用的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。

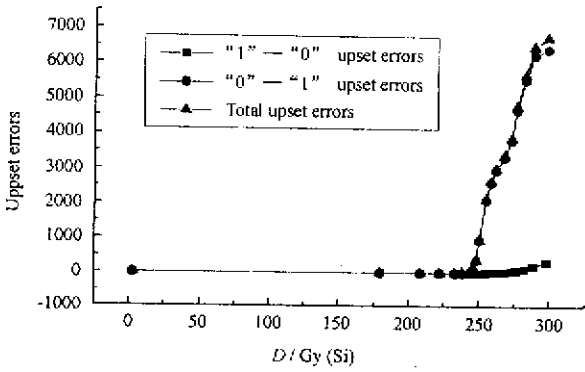


图 5 射线辐照 28f256 出错数随辐照剂量的变化
Fig.5 Errors versus γ - ray total dose for 28f256

表 1 28f256 的实验结果

Table 1 Experimental results for 29f256

辐照装置	器件编号	失效辐照剂量/Gy (Si)	位错误数
Irradiation facility	Device code	Failure irradiation dose/Gy (Si)	Upset errors
同步辐照源 BSRF	28f256 - 1	55. 89	11467
	28f256 - 2	49. 16	9806
	28f256 - 3	52. 81	10257
钴源 Cobalt source	28f256 - 4	272. 89	10444
	28f256 - 5	303. 99	11912
	28f256 - 6	307. 48	12557

表 2 29c256 的实验结果

Table 2 Experimental results for 29c256

辐照装置	器件编号	失效辐照剂量/Gy (Si)	位错误数
Irradiation facility	Device code	Failure irradiation dose/Gy (Si)	Upset errors
同步辐射源 BSRF	29c256 - 1	69. 30	12809
	29c256 - 2	3. 36	12845
	29c256 - 3	61. 11	13052
钴源 Cobalt source	29c256 - 4	16. 76	11411
	29c256 - 5	215. 864	16090
	29c256 - 6	222. 14	14636

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。

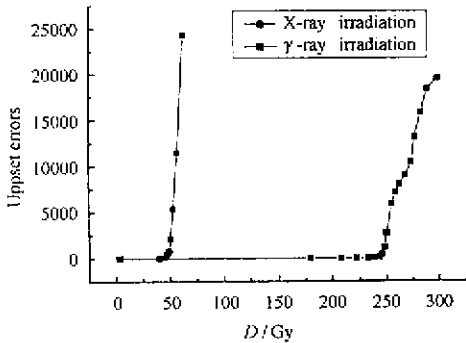


图 6 28f256 翻转数随辐照剂量的变化

Fig. 6 Errors versus irradiation dose for 28f256

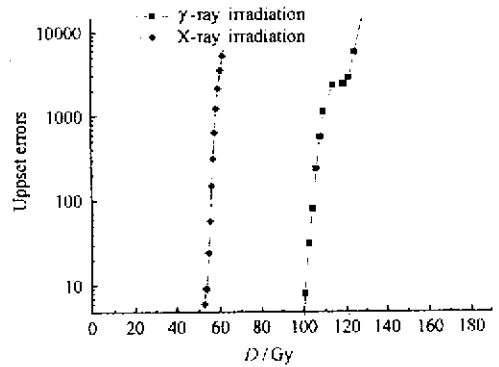


图 7 29c256 翻转数随辐照剂量的变化

Fig. 7 Errors versus irradiation dose for 29c256

辐照用的器件均采用塑封工艺, 不同于 Kovar 封装, 其封装盖内层没有镀 $2-3\mu\text{m}$ 的金材料。但从数据结果看出, 28f256 的剂量增强因子在约 5.4 左右。29c256 的剂量增强因子为约 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。

3 结束语

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 器件出现数据错误存在辐照剂量阈值。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 γ 源时, 器件的‘辐照剂量阈值’较高; 辐照源为 X 射线时, ‘辐照剂量阈值’较低, 存在明显的剂量增强效应。本研究通过实验建立了 CMOS4069 器件、浮栅 ROM 器件相同累积剂量时 X 射线辐照和 γ 射线辐照总剂量损伤等效关系, 并且建立了相应的 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

致谢 本工作得到上海航天局 808 所吾勤之同志、航天科技集团一院 14 所张力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

- 1 Chadsey W L. X-ray dose enhancement Vol. I Summary Report, RADC - TR - 76 - 159, ADAC26248
- 2 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. 296-302
LAI Zhuwu. Radiation Hardening Electronics - radiation Effects and Hardening Techniques. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 296-302
- 3 郭红霞, 陈雨生, 张义门, 等. 物理学报, 2001, 50: 1545-1548

- GUO Hongxia, CHEN Yusheng, ZHANG Yimen, *et al.* Acta Physica Sinica, 2001, **50** 1545—1548
- 4 郭红霞, 陈雨生, 张义门, 等. 物理学报, 2001, **50**(12) 2279—2283
- GUO Hongxia, CHEN Yusheng, ZHANG Yimen, *et al.* Acta Physica Sinica, 2001, **50**(12) 2279—2283
- 5 Liu T, Hu T D, Xie Y N, *et al.* Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1998, **7** 541—546
- 6 成金秀, 缪文勇, 孙可熙, 等. 物理学报, 2000, **49** 282—287
- CHENG Jinxiu, MIAO Wenyong, SUN Kexi, *et al.* Acta Physica Sinica, 2000, **49** 282—287
- 7 杨志安, 靳涛, 杨慎祖, 等. 物理学报, 1999, **48** 1113—1117
- YANG Zhian, JIN Tao, YANG Shenzu, *et al.* Acta Physica Sinica, 1999, **48** 1113—1117
- 8 班大雁, 方容川, 杨凤源, 等. 物理学报, 1997, **46** 587—595
- BAN Dayan, FANG Rongchuan, YANG Fengyuan, *et al.* Acta Physica Sinica, 1997, **46** 587—595
- 9 贺朝会, 陈晓华, 李国政, 等. 核电子学与探测技术, 2000, **20** 115—119
- HE Chaohui, CHEN Xiaohua, LI Guozheng, *et al.* Nuclear Electronics and Detection Technology, 2000, **20** 115—119
- 10 Wrobel T F. IEEE Trans Nucl Sci, 1989, **NS-36** 2247—2251
- 11 Schwartz H R, Nichols D K, Johnston A H. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, **NS-44** 2315—2324
- 12 Turinetti J R, Critchfield K L, Chavez J R, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1998, **NS-44** 2065—2070
- 13 Beutler D E, Beezhold W, Browning J S, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1990, **NS-37** 1541—1547

Study of hard X – ray dose enhancement effects for some kinds of semiconductor devices

GUO Hongxia HAN Fubin CHEN Yusheng ZHOU Hui HE Chaohui

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xian 710024)

XIE Yaning HUANG Yuying HE Wei HU Tiandou

(Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract

Experimental results of X – ray dose enhancement effects are given for CMOS4069 and floating gate ROMs irradiated in Beijing Synchrotron Radiation Facility and in cobalt source. Shift of threshold voltage vs. total dose for CMOS4069 and the errors vs. total dose for 28f256 and 29c256 have been tested on line and the equivalent relation of total dose damage under the same accumulated dose is provided comparing the response of devices irradiated by X – ray and γ – ray source. These results can be provided for X – ray radiation hardening technology as an effective evaluation data.

Key words CMOS, EEPROM, X – ray, Dose enhancement effects, Synchrotron radiation

CLC O434.1