

NMOSFET 器件不同源、不同 γ 剂量率辐射损伤比较

何宝平, 王桂珍, 周 辉, 罗尹虹, 姜景和

(西北核技术研究所西安市 69 信箱六室, 陕西西安 710024)

摘 要: 利用不同剂量率 γ 射线、低能(小于 9MeV)质子和 1MeV 电子对 CC4007RH、CC4011、LC54HC04RH NMOSFET 进行了辐照实验, 结果表明, 在+ 5V 偏置条件下, 9MeV 以下质子造成的损伤总是小于 ^{60}Co , 而且质子能量越低, 损伤越小; 对于同等的吸收剂量, 1MeV 电子和 ^{60}Co 造成的损伤差别不大; 在高剂量率 γ 射线辐射下, 氧化物陷阱电荷是导致器件失效的主要原因, 在接近空间低剂量率辐射环境下, LC54HC04RH 电路失效的主要原因是辐射感生界面态陷阱电荷, 而 CC4007RH 器件则是氧化物陷阱电荷。

关键词: γ 射线; 电子; 质子; 剂量率; 辐射损伤

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08 1229-03

A Comparison of Ionizing Radiation Damage in NMOSFET Device from Different Radiation Resources and Different Dose Rate ^{60}Co Gamma Rays

HE Bao ping, WANG Gui zhen, ZHOU Hui, LUO Yir hong, JIANG Jing he

(Northwest institute of nuclear technology, xi'an 69mail box No. 6 laboratory, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: N channel MOS transistors from CC4007, CC4011 and LC54HC04RH device were irradiated with different dose rate Co-60 gamma rays, lower energy protons (less than 9MeV) and 1MeV electrons. According to the result, under 5V bias conditions during radiation, the damage for protons below 9MeV was always less than Co-60 . The lower the proton energy, the less the damage. Comparison of electrons to Co-60 showed that for equal absorbed doses, the damage produced was almost equivalent. At higher dose rate Co-60 gamma rays radiation environment, the oxide trapped charges by the irradiation was main reason to induce device failure. when approaching the of low dose irradiation environment, interface trapped charges by the irradiation was the main reason to induce the LC54HC04RH failure. The main reason for CC4007 device failure was the oxide trapped charges by the irradiation.

Key words: gamma rays; electrons; protons; dose rate; radiation damage

1 引言

多年来,人们一直是利用 ^{60}Co γ 射线对预定用于空间系统中的 MOS 器件进行模拟辐射实验, 来了解其抗辐射性能。由于空间辐射环境主要是由高能质子和电子组成, 没有 ^{60}Co γ 射线, 那么, γ 射线对 MOS 器件产生的辐射效应同那些由质子和电子产生的辐射效应是否等效, 以及 MOS 器件不同 γ 剂量率电离辐射损伤效应异同性问题, 近年来一直是国内外研究的热点, 并已取得了不少研究成果^[1], 本篇文章报道了 CC4007RH、LC54HC04RH、CC4011 器件 γ 射线、低能质子和电子电离辐射损伤比较情况。

2 实验细节

2.1 辐射实验

2.1.1 ^{60}Co γ 射线辐照 辐照实验是在西北核技术研究所辐照中心的 ^{60}Co γ 射线辐射装置和 7106 校准实验室上进行的, 辐射剂量率范围选取: $0.01 \times 10^{-2} \sim 90.2 \times 10^{-2} \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 辐射剂量率是通过 $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ 热释光剂量片和 PHILIP 剂量仪

测量确定的。

2.1.2 质子源辐照 辐照实验是在北京大学重离子物理研究所的 EN 串列加速器上进行, 选取了 2MeV、5MeV、7MeV、9MeV 等四个能量点的质子对器件进行辐照, 用金硅面垒探测器、法拉第筒及热释光剂量仪对质子环境进行监测, 剂量率 $3 \sim 10 \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 。质子束引到空气中来, 使实验可以方便地在空气中进行。辐照时, 用一放在真空腔体中的金硅面垒探测器对质子束流进行实时监测, 以便对质子总剂量进行修正。

2.1.3 电子源辐照 辐照实验是在西北核技术研究所的电子稳态直线加速器上进行的, 剂量率为 $\sim 1 \times 10^2 \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 加速器可以通过控制射线束流强度和辐照传动轮的速度来调节剂量率, 束流面积为 $1.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 。辐照器件置于辐照传动轮的薄膜上, 当传动轮滚动时, 薄膜在其上向前传动(这可以通过监测系统观测到), 位于传动轮薄膜上的器件运行到束流下时, 受到了电子束的辐照。辐照剂量测量采用薄膜及分光计, 在传动轮速度和束流一定的条件下, 将薄膜进行辐照, 在分光计下给出剂量读数。

2.2 实验样品

实验样品有 CC4007RH、LC54HC04RH 和 CC4011 器件, 其中 CC4007RH 是由 矽山微电子有限公司生产的加固型双互补对 CMOS 倒相器, 硅衬底材料为 N(100) 晶向, 电阻率为 $1\sim 2\Omega\cdot\text{cm}$, 制备工艺采用 $3\mu\text{m}$ 硅栅工艺, 栅氧化制备工艺为干氧化, 氧化温度为 1000°C , 栅氧化层厚度为 $t_{\text{ox}}=70\text{nm}$, 沟道长度 $3\mu\text{m}$. LC54HC04RH 是由西安微电子技术研究所利用硅栅 CMOS 集成电路加固工艺制造的六反向电路, 为了增加电路的输出驱动能力, 每一极反向器均由三级门组成, CC4011 器件为市售产品. 在进行质子和电子实验时, 器件采用开盖辐照. 辐照过程中, 所有的实验器件的偏置条件为: $V_g=V_D=+5\text{V}$, $V_{ss}=0\text{V}$.

2.3 参数的测量

实验参数是利用由微机、HP4156A 半导体参数测试仪、HP3488 矩阵开关和 488 接口卡等组成的半导体参数自动测试系统进行获取的, 并保证每次测量在辐照后 30 分钟内完成.

3 实验结果

由于在辐射过程中 CMOS 电路中的 N 沟 MOS 器件始终处于正偏置状态, 而 P 沟 MOS 管处于零偏置状态, 因此辐射对 P 沟影响不大, 本文只讨论 N 沟 MOS 器件的辐射效应.

3.1 ^{60}Co γ 射线、电子和质子对 CMOS 器件的辐射损伤比较

图 1(a)、(b) 分别给出了 CC4007RH、4011 N 沟 MOS 器件在不同源辐照下, 阈值电压与辐射剂量的关系. 辐射源有: 剂量率为 $90.2\times 10^{-2}\text{Gy}(\text{Si})$ 的 ^{60}Co γ 射线源、1MeV 电子、2MeV、5MeV、7MeV、9MeV 的低能质子等.

从图 1(a)、(b) 中 ^{60}Co γ 射线和不同能量的质子的辐射效应可以看出, 辐射损伤与质子能量成正比, 即器件电离辐射损伤随着质子能量的增加而增加, 较高能量的质子比较低能量的质子造成的损伤更大. 因为在相同的总剂量条件下, 质子的能量越大, 它的累积通量也越大, 对器件的损伤就大; 对于 CC4007RH 器件来讲, 能量在 7MeV 以下的质子要小于 ^{60}Co γ 射线源的辐射

损伤. 而对 CC4011 器件而言, 能量为 9MeV 的质子对器件的损伤要大于 ^{60}Co γ 射线. 能量低于 9MeV 的质子损伤要小于 ^{60}Co γ 射线.

Co γ 射线的辐射.

比较图 1(a)、(b) 中 1MeV 电子和 ^{60}Co γ 射线器件的辐射效应, 从阈值电压的漂移来看, 器件的辐射损伤与 ^{60}Co γ 射线源差别不是很大. 因为 ^{60}Co γ 射线的能量为 1.17MeV 和 1.33MeV, 这个能量的 γ 射线与二氧化硅的作用主要是康普顿散射, γ 射线能量沉积在二氧化硅中, 所沉积的能量被康普顿电子得到, 其最大能量为 $\sim 1\text{MeV}$, 所以, ^{60}Co γ 射线源与 1MeV 电子对器件的损伤相当.

CMOS 器件的损伤程度往往用损伤灵敏度来表示, 它定义为单位剂量下阈值电压漂移值, 电离效应造成的损伤程度与总电离剂量密切相关, 电离损伤开始于 $10^2\sim 10^4\text{Gy}(\text{Si})$, 但是, 不同的辐射源造成的影响是不一样的, 表 1 给出了 CC4007RH NMOS 器件在不同源辐照下的损伤灵敏度以及 ^{60}Co 的比较情况, ^{60}Co 光子能量为 1.17MeV 和 1.33MeV, 其平均能量为 1.25MeV.

表 1 CC4007RH-NMOS 器件在 5V 偏值不同源辐照下的辐照损伤灵敏度, 单位: V/krad

辐射源		损伤灵敏度 V/krad	和 ^{60}Co 比较
种类	能量		
^{60}Co	1.25MeV	0.01010	1.0
电子	1MeV	0.00921	0.92
质子	2MeV	0.00365	0.36
	5MeV	0.00482	0.48
	7MeV	0.00731	0.72

表 2 CC4011-NMOS 器件在 5V 偏值下不同源辐照下的辐照损伤灵敏度, 单位: V/krad

辐射源		损伤灵敏度 V/krad	和 ^{60}Co 比较
种类	能量		
^{60}Co	1.25MeV	0.082	1.0
电子	1MeV	0.074	0.90
质子	2MeV	0.027	0.33
	5MeV	0.049	0.60
	9MeV	0.107	1.30

从表 1 和表 2 来看, 能量小于 9MeV 的低能质子的损伤灵敏度比 γ 射线要小, 质子对 MOS 器件造成的每单位剂量的损伤随着质子能量的增加而增加, 而 1MeV 电子和 ^{60}Co 的损伤灵敏度差别不太大, 认为二者是可以等效的. 电子和 ^{60}Co 这两种源都可以用于做模拟实验, 但它们各有优缺点, 在地面的试验中, 可根据不同要求, 决定采用不同的辐射源. 研究的结果与以前公布的结果^[2,3]基本一致.

3.2 LC54HC04RH 不同辐射剂量率的 γ 射线对 CMOS 器件的辐射损伤比较

大量的研究表明, MOS 器件和 CMOS 电路的辐射效应受辐射剂量、辐射剂量率、辐射时间、辐射温度、偏置状态以及生产工艺等多种因素的影响^[4]. 其中, 辐射剂量率对辐射效应的影响尤为重要, 受不同的剂量率辐射后, 器件的失效机理和失效水平是不同的.

MOS 器件的阈值电压在电离辐射作用下将会发生漂移, 阈值电压的变化主要是由辐射引起的氧化层的陷阱电荷及辐

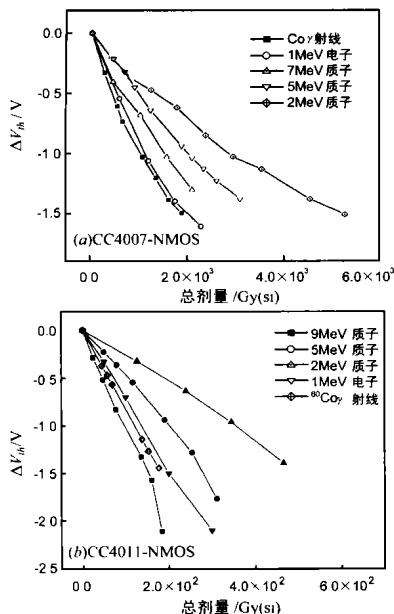


图 1 不同源辐照下, NMOS 器件 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化

射在 Si/SiO₂ 界面引起的界面陷阱电荷而引起的, 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的多少与辐射剂量及辐射剂量率有很大关系. 图 2 给出了 LC54HC04RH、CC4007RH NMOS 器件受不同剂量率 γ 射线辐照时, 阈值电压随辐射剂量的变化关系. 其中 LC54HC04RH 受辐射的剂量率为 $0.03 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $0.06 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $0.38 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 和 $19.8 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$, CC4007RH 受辐射剂量率为 $0.1 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $2.3 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 和 $44 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$.

从图 2(a) 中可以看出, 当辐射剂量率为 $19.8 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 时, 阈值电压的漂移量随辐射剂量的增加而负向增加, 当辐射剂量率为 $0.38 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 时, 阈值电压的漂移量随辐射剂量的增加而正向增加, 出现了“回弹”效应. 辐射剂量率为 $0.06 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 和 $0.38 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 的阈值电压的漂移量处于 $0.03 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 和 $19.8 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{Si})$ 的漂移量之间.

从图 2(b) 中可以看出, 在整个考察的剂量范围内, 无论

在那种剂量率辐照下, 阈值电压的漂移量随辐射剂量的增加而始终负向增加, 并没有观测到“反弹”现象的发生. 在辐射剂量一定时, 阈值电压的漂移量随着辐射剂量率的增加而增加.

对 NMOS 器件, 辐射感生氧化物陷阱电荷会引起阈值电压向负电压方向漂移, 而辐射感生界面陷阱电荷将会使阈值电压向正电压方向漂移, 辐射引起的 NMOS 的阈值电压的漂移方向是由辐射感生氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷两者谁占主要而决定的, 如果辐射感生氧化物电荷对阈值电压的漂移占主要时, 阈值电压的漂移量为负, 相反, 辐射感生界面电荷为主时, 阈值电压的漂移量为正.

实验结果表明, 在高低剂量率辐射下, 不同类型器件的辐射效应、失效机理差别很大, 就所考察的器件而言, 在空间低剂量率辐射环境下, 辐射感生界面陷阱电荷是导致 LC54HC04RH 电路失效的主要原因, 而 CC4007RH 器件则是氧化物陷阱电荷.

4 结论

利用不同辐射剂量率 ^{60}Co γ 射线、电子和质子对 CC4007RH、CC4011 和 LC54HC04RH 电路的 NMOS 器件进行电离辐射效应研究, 得出如下结论:

(1) 在 5V 栅压下, 对于被测试 CC4007RH 器件, 在同等的吸收剂量下, 能量为 2MeV、5MeV、7MeV 的质子对 NMOS 器件产生的电离损伤要小于 ^{60}Co γ 射线; 对于 CC4011 器件, 能量为 2MeV、5MeV 的低能质子造成电离损伤小于 ^{60}Co γ 射线, 而 9MeV 质子的损伤程度大于 ^{60}Co γ 射线.

(2) ^{60}Co γ 射线源与 1MeV 电子的辐射损伤差别不大.

(3) 就所考察的实验器件来讲, 高剂量率辐射下, 氧化物陷阱电荷是导致器件失效的主要原因. 而在接近空间低剂量率辐射环境下导致器件失效的主要原因, LC54HC04RH 电路是辐射感生界面陷阱电荷, 而 CC4007RH 器件则是氧化物陷阱电荷.

参考文献:

- [1] E G Stassinopoulos, et al. Total dose and dose rate dependence of proton damage in MOS device during and after irradiation [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, 31(6): 1444.
- [2] R W Tallon, M R Ackerman et al. A Comparison of ionizing radiation damage in MOSFETs from cobalt 60 gamma rays, 0.5 to 22 MeV protons and 1 to 7 MeV electrons [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1985, 32(6): 4393.
- [3] G J Brucker, O Van Gunten, E G Stassinopoulos, et al. Recovery of damage in Rad hard MOS device during and after irradiation by electrons protons, alphas, and gamma rays [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, 30(6): 4157.
- [4] A H Johnston, S B Roeske. Total dose effects at low dose rates [J]. 1986, 33(6): 1487.

作者简介:



何宝平 男, 1969 年 4 月 6 日出生于内蒙古乌兰察部盟察右后旗, 助理研究员, 1996 年毕业于兰州大学物理系半导体物理专业, 现主要从事电子元器件辐射效应研究工作.



王桂珍 女, 1967 年 7 月 3 日出生于山西省新绛县, 副研究员, 1989 年毕业于复旦大学物理系核物理专业, 现主要从事电子元器件辐射效应研究工作.