

文章编号: 1001-4322(2003)03-0275-04

空间低剂量率辐射诱导电荷效应评估技术研究*

何宝平, 王桂珍, 龚建成, 周 辉, 郭红霞

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710613)

摘 要: 介绍了 LC4007RHA 和 LC4007RHB 两种器件空间低剂量率辐射诱导电荷效应评估情况, 研究表明: 在 MIL-STD 883C 测试方法 1019.4 的基础上, ^{60}Co 辐照加 25 室温退火, 可以提供对空间氧化物陷阱电荷效应相对于 1019.4 不太保守的估计; 另外, 就美军标 1019.4 测试方法中利用 100 168h 高温加速“反弹”实验来检验空间环境中与界面态相关的失效可能出现的现象进行了讨论。

关键词: MOS 器件; 低剂量率; 电荷效应; 反弹现象

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A

在空间环境中, 辐照剂量的累积是一个比较缓慢的过程, 其典型的剂量率分布范围是 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 而考虑到时间、经费等因数, 实验室实际使用的辐照剂量率一般为 $0.5 \sim 3.0 \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 。对于一些具有明显电离辐射损伤剂量率效应的器件, 这种剂量率差异将可能使得实验室测试评判方法得到的器件抗辐射能力与在卫星等小剂量率辐照环境下使用的实际抗辐射能力严重不符, 从而对卫星电子系统可靠性产生极大隐患。在许多空间应用中, 为得到每个系统组成部分的最优加固措施而去描述所有器件受辐射响应是不实际的, 也是不经济的。但是, 无论如何, 在系统应用中, 不应出现辐射失效。针对上述问题, 美军标 1019.4 试验方法已被广泛用于中小规模集成电路的加固性能评估, 有许多证据证明, 1019.4 方法能成功地筛选出可能在空间失效的 MOS 器件^[1,2]。然而, 也有一些实验证明^[3,4], 许多失效器件实际上由于氧化物电荷退火而能够在空间正常运行, 本文研究目的是在 MIL-STD 883C 测试方法 1019.4 的基础上重新评估空间低剂量率电荷效应的测试方法。

1 样品及辐射实验

1.1 样品及测量

实验中所用的样品是由骊山微电子公司生产的加固型 LC4007RH, 采用 $3\mu\text{m}$ 硅栅制备工艺, 样品分两种类型, 即 LC4007RHA 为 1 000 干氧化和 LC4007RHB 为 850 氢氧化。

电离辐射实验在西北核技术研究所 ^{60}Co 射线源上进行, 剂量率为 $0.5 \text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 辐照总剂量为 $1.0 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 。为了考察辐照后器件的退火效应, 我们将辐照后的器件分两部分分别置于 100 和 25 的恒温箱中进行退火, 在不同的时间点取出器件测量, 考察其时间依赖效应。

实验中所有的 射线剂量率都是利用 $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ 热释光剂量片进行标定的。辐射和退火偏置电压: $V_{\text{GS}} = V_{\text{DD}} = +5\text{V}$, $V_{\text{SS}} = 0$ 。

2 空间电荷效应的估计

阈值电压是表征 MOS 器件的一个基本参量。在空间电离辐射环境中, MOS 电路阈值电压的变化主要是由于 Si/SiO₂ 界面氧化物陷阱电荷和界面态电荷密度的变化而引起的。阈值电压的漂移可以分离为完全由氧化物陷阱电荷和界面态电荷引起的漂移量 (V_{ot} 和 V_{it}) 即: $V_{\text{th}} = V_{\text{ot}} + V_{\text{it}}$ 。氧化物陷阱电荷能引起阈值电压负向漂移以及 MOS 栅氧化层和寄生场氧化层结构过渡渗漏。界面态陷阱能引起 N 沟 MOS 管的阈值电压正向漂移, 从而导致 NMOS 和 CMOS 器件及电路的速度和输出驱动能力下降。失效发生的剂量及引发失效的缺陷类型主要取决于器件的工艺、电路设计、工作条件和剂量率。经过几十年的研究, 人们对 MOS 结构电离辐射效应机理有了一定的了解^[5~7], 九十年代以来, 人们更关心如何利用地面实验室模拟来预估器件在空间低剂量率环境下的行为。

* 收稿日期: 2002-08-12; 修订日期: 2002-12-18

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 何宝平(1969-), 男, 助理研究员, 主要从事电子元器件辐射效应研究工作; 西安市 69-13 信箱; E-mail: ffwu@nint.ac.cn。

2.1 空间氧化物陷阱电荷的较保守的测试方法

根据美军标 MIL-38510/657 中规定的 MOS 器件参数失效剂量的定义: 阈值电压的漂移量 1.4V , 即在高剂量率辐照下, 阈值电压漂移 -1.4V 为失效, 而在低剂量率辐照下, 正向漂移 $+1.4\text{V}$ 为失效。我们利用线性响应理论^[5] 计算了 LC4007RHA 器件失效剂量与辐射剂量率的变化关系, 计算结果示于图 1 中。从图中可以看出, LC4007A 器件在 ^{60}Co 剂量率 $0.5 \sim 3.0\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 辐照下失效, 在这一范围内的剂量率比空间环境剂量率大得多, 引起较大的氧化物陷阱电荷, 而界面态电荷产生的较少, 所以, 它的失效是由于 MOS 栅氧化层氧化物电荷俘获引起的, 但在典型的空间环境剂量率 ($< 1.0 \times 10^{-3}\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$) 下未失效, 低剂量率辐照失效剂量比高剂量率的要高。针对空间环境中, 氧化物电荷失效的典型的保守的实验是低剂量率辐照, 因此可以利用低剂量率辐照代替 1019.4 的第一步, 可以得到空间氧化物电荷效应的保守估计, 这与欧洲 ESC/SCC 测试方法一致。ESC/SCC 测试方法选取的剂量率为 $0.01 \sim 0.1\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 或 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 这种氧化物电荷的保守估计法有它的缺点: (1) 辐照时间长, 消耗财力多; (2) 非常低的剂量率下的剂量学问题不易解决; (3) 某些器件经过长时间辐照后, 发现并不适合系统的应用等。为此, 我们认为氧化物电荷估计的最实际的方法是 $0.5 \sim 3.0\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 辐照。

2.2 氧化物陷阱电荷不太保守的测试方法

根据资料表明^[8], 受一定射线剂量辐照的 MOS 器件, 氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移 (V_{ot}) 长时间退火满足以下方程

$$V_{ot}(t) = A \ln(t/t_0) - C \quad (1)$$

式中: A 为退火斜率, 即退火曲线的斜率; t_0 是获得瞬时退火曲线的辐照时间; C 是 $t = t_0$ 时的截距, t 为总的辐照和退火时间; $V_{ot}(t)$ 是每单位剂量的瞬时退火曲线的漂移量。通过积分 (1) 式, 可以得到在所有感兴趣时间内 V_{ot} 的变化。

我们定义, 高剂量率辐照后, 室温 25°C 长时间退火的 V_{ot} 为 $V_{ot, \text{anneal}}$, 低剂量率辐照的 V_{ot} 为 $V_{ot, \text{dose}}$, 积分 (1) 式后, 得出

$$V_{ot, \text{anneal}} = A(\ln X - 1) - C \quad (2)$$

$$V_{ot, \text{dose}} = [A(\ln X + \ln t/t_0 - 1) - C] \quad (3)$$

式中: $X = t/t_0$; $\ln X = \ln(t/t_0)$; $\ln t/t_0 = \ln(t/t_0)$; $t = t_A + t_E$; t_A 是总的辐照时间, t_E 是总的退火时间。

我们利用方程 (2)、(3) 计算了 LC4007RHA 和 LC4007RHB 两种器件在 ^{60}Co 辐照后经过 25°C 退火和低剂量率辐照氧化物陷阱电荷达 30 年的效应, 结果示于图 2。方程中的系数 A 和 C 的确定是根据器件在辐照剂量率为 $0.5\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 总剂量为 $1.0 \times 10^3\text{Gy}(\text{Si})$ 和 25°C 168h 退火数据确定的。

退火率^[5]是指退火斜率归一到辐照结束时阈值电压漂移量的百分比, 即 $A/V_{ot}(\text{辐照结束})$, 它反映了初始条件恢复的百分比, 根据定义, LC4007RHA 器件氧化物陷阱电荷的退火率为 3%, 而 LC4007RHB 器件氧化物陷阱电荷的退火率为 7%。另外, 从图 2 中还可以看出, LC4007RHA 器件辐照后 V_{ot} 为 -1.54V , 经过 25°C 168h 的退火后 V_{ot} 变为 -1.27V , V_{ot} 退掉了 18%, 而 LC4007RHB 器件辐照后 V_{ot} 为 -1.43V , 经过 25°C 168h 的退火后 V_{ot} 变为 -0.78V , V_{ot} 退掉了 46%。

对于氧化物陷阱电荷的评估, 如果实验室辐照源的剂量率比空间剂量率高, 则产生的电荷数量就比空间多, 其阈值电压负漂的程度远远大于空间条件下的漂移。因此, 用实验室条件下的辐照实验预估空间氧化物陷阱电荷效应对某些器件来说过于保守。另外, 从图 2 中看出, 在任何可行的退火时间内, 一周、甚至一年, 经过 ^{60}Co 辐照加 25°C 退火后的 V_{ot} 仍低于 10 年、30 年的低剂量率辐照结果。因此, ^{60}Co 辐照加 25°C 168h 退火提供了一个与空间失效相关的氧化物电荷的保守估计。这种方法与 1019.4 相比, 相对不太保守。

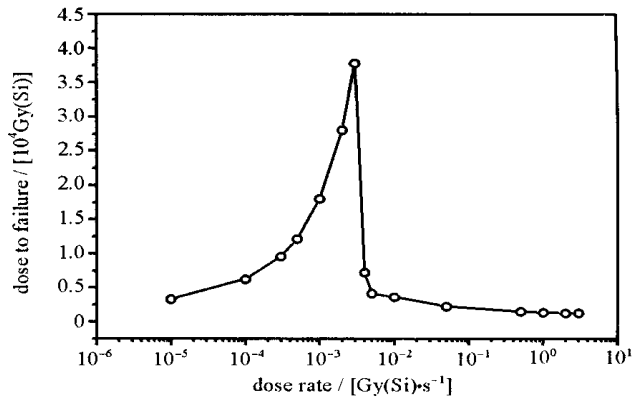


Fig. 1 LC4007A-NMOS device failure dose variation as a function of different dose rate

图 1 LC4007A NMOS 器件失效剂量与不同剂量率的变化关系

2.3 空间界面态电荷效应的估计

在实验室条件下进行室温辐照和室温退火,人们无法确保是否能准确地估计由界面态引起的阈值电压的正向漂移或迁移率的下降。因为在这种条件下会比在空间产生的氧化物陷阱电荷多,产生的界面态则相对较少。为了保守地预估空间界面态效应,必须确保实验能够得到比在空间条件下更大程度的正向漂移。实验证实^[1],将退火温度升高到 100 时,可以提供长时间下或低剂量率下的预估。早期的研究表明^[1],“反弹”实验温度的选择要求低于界面态发生退火的温度,而且界面态电荷的退火特性依赖于器件的工艺流程^[10];TM 1019.4 流程中的一星期 100 退火,是作为一个标准的“反弹”实验来检验空间环境中与界面态相关的失效。

从图 3 (a) 中可看出,LC4007RHA NMOS 高温 100 的退火速度较室温 25 下的退火要快,并且退火 168h 后,100 温度下器件阈值电压发生“反弹”现象;而室温 25 下阈值电压恢复则要慢得多,从退火曲线来估计,器件有发生“反弹”现象的趋势,但需要比较长的时间后才能发生。我们外推 25 退火数据到约 10⁸s 时间阈值电压的漂移量等于 100 168h 的数据,并且约在 10⁸s 时观测到“反弹”现象。外推 25 退火数据得到的“反弹”现象证明了 100 高温加速“反弹”实验的正确性。高温短时间的退火可以用来近似预测低剂量率或较低温度下长时间的退火效应。通过加速退火,“反弹”现象可以被预估,而且室温退火数据显示“反弹”现象的准确性,对于该种器件 100 的退火“反弹”实验是需要的。从图 3 (b) 中可以看出 LC4007RHB 器件 100 高温退火异常现象:在整个 100 退火过程中,界面态电荷引起的电压漂移 V_{it} 随着退火时间的增加而逐渐降低,即界面态电荷发生退火;100 的高温没有加速氧化物陷阱电荷的退火。相对于真实空间应用环境,器件在 100 的高温退火表现出较好的抗辐射能力,这一点可以从器件阈值电压的漂移情况 (V_{th}) 看出。从 25 的退火实验数据可以看出,100 的高温退火不能用来预测低剂量率或低温下长时间的退火效应,为了能够给出器件“反弹”能力的保守估计,需要寻找合适的退火温度。

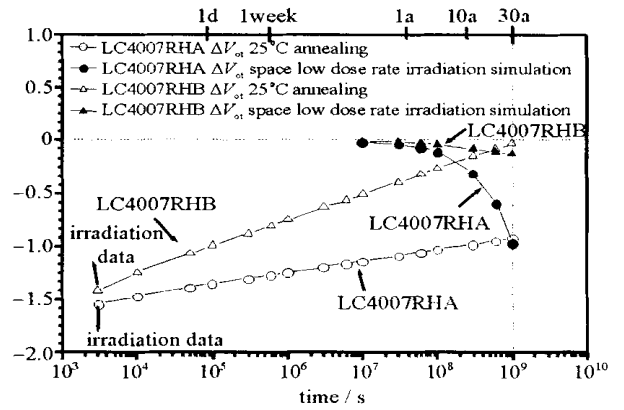


Fig. 2 V_{ot} Comparison of 25 ° anneal and space low dose rate irradiation for two type LC4007-NMOS device

图 2 两种类型 LC4007RH-NMOS 器件的氧化物陷阱引起的阈值电压漂移 V_{ot} 在 25 退火与空间低剂量率辐照下的结果比较

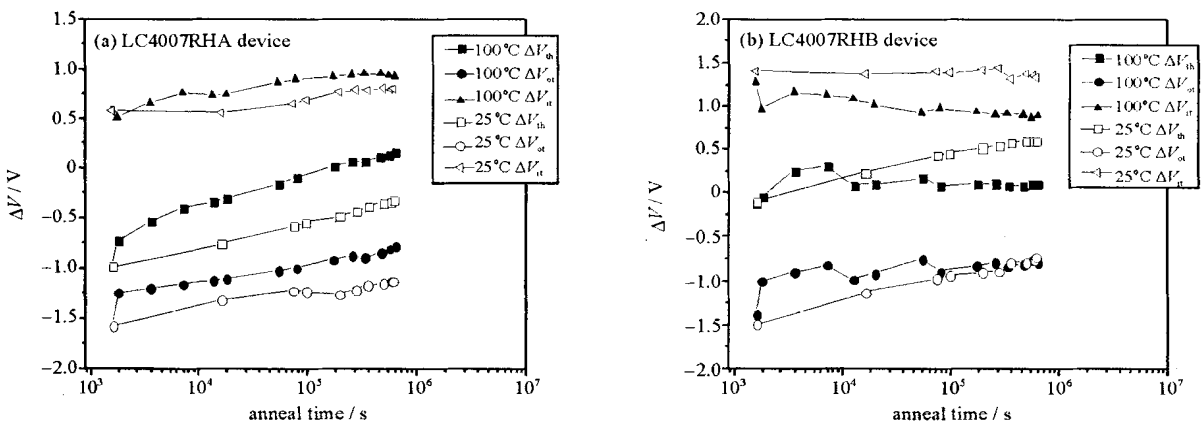


Fig. 3 LC4007RH-NMOS device threshold voltage shift variation as a function of anneal time
图 3 在 100 和 25 温度下,LC4007RH NMOS 器件阈值电压漂移随退火时间的变化关系

实际上,如果 100 高温退火能够快速退掉所有或绝大部分氧化物陷阱电荷,而对界面态影响较小,那么,通过此种方法可以获得“反弹”能力的保守估计。但是如果界面态数量在 100 退火中大量增加,结果将会导致对室温“反弹”能力的估计太保守。人们最希望界面态在整个退火期间的温度内保持不变。如果在退火期间,它们的数量降低,那么,比起在真实的空间应用环境中器件可能表现出较好的抵抗能力;相反,如果在整个加速退火过程中,界面态在增加,那么比起真实的应用环境,器件可能表现出较差的抵抗能力。

3 结 论

我们研究了 LC4007RHA 和 LC4007RHB 两种器件经辐照后在室温 25 和高温 100 下氧化物陷阱电荷以及界面态的生长和退火情况,可以得出以下结论:

对于氧化物陷阱电荷效应的评估:按照美军标 1019.4 实验程序中规定的剂量率进行⁶⁰Co 辐照外加 25 退火可以提供一个与空间失效相关的氧化物电荷效应的保守估计,这种方法与 1019.4 相比,相对不太保守。

对于界面态效应的评估:TM 1019.4 流程中的一星期 100 退火,是作为一个标准的反弹实验来检验空间中与界面态相关的失效,我们根据实验现象将 100 的高温“反弹”实验可能出现的情况归纳为以下几方面:(1)如果通过 100 加速退火,“反弹”现象可以被预估,而且室温退火数据显示“反弹”现象的准确性,则 100 的退火“反弹”实验是需要的;(2)如果 100 的高温对于氧化物陷阱电荷和界面态的影响都不大,而且实验中 100 观察不到“反弹”现象,则 100 的退火“反弹”实验没必要;(3)如果在 100 的退火实验中,界面态电荷有相当数量的增加,因而出现“反弹”现象,但是室温退火数据显示器件在真实的环境条件下 100 的退火数据不正确的,“反弹”实验过分保守;(4)如果在 100 的退火实验中,界面态电荷随着退火时间的增加而减少,室温退火数据显示器件在真实的环境条件下 100 的退火数据是不正确的,100 “反弹”实验不需要。

参考文献:

- [1] Schwank J R, Winokur, McWhorter P J, et al. Physical mechanism contributing to device rebound[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1984, **31**:1434.
- [2] Winokur P S, Sexton F W, Schwank J R, et al. Total dose radiation and annealing studies: implications for hardness assurance testing[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1986, **33**:1343.
- [3] Johnston A H, Roeske S B. Total dose effects at low dose rates[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1986, **33**:1487.
- [4] Schiff D. Measurements of dose to failure versus dose rate for CMOS/NMOS static RAMs[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1986, **33**:1698.
- [5] Winokur P S, Sexton F W. Total dose failure mechanisms of intergraded circuits in laboratory and space environment[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1987, **34**:1448.
- [6] Schrimpf R D, Wahle P J. Dose-rate effects on the total-dose threshold-voltage shift of power MOSFETS[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1988, **35**:1536.
- [7] Roche F M. CMOS inverter design-hardened to the total dose effect[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1996, **43**:3097.
- [8] Winokur P S, Kerris K G, Harper L. Predicting CMOS inverter response in nuclear and space environments[J]. *IEEE Trans Nucl sci*, 1983, **30**:4326.
- [9] Lelis A J, Oldham T R, Delancey W M. Response of interface traps during high-temperature anneals[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, **38**:1590.

Estimating research on space low dose rate radiation-induced charge effects

HE Bao-ping, WANG Gui-zhen, GONG Jian-cheng, ZHOU Hui, GUO Hong-xia
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi 'an 710613, China)

Abstract: This paper presents an estimate method on radiation-induced charge effect from LC4007A and LC4007B device in low dose space environment. According to the result, on the basis of MIL-STD 883C, Test Method 1019.4, ⁶⁰Co irradiation plus 25 annealing can provide effects of oxide-trip charge on MOS device response in space that is estimated significantly less conservative than MIL-STD 883C, Test Method 1019.4. The possible phenomena of one-week high-temperature anneal in MIL-STD 883C, Test Method 1019.4 detecting interface-trip related failures in MOS devices were discussed.

Key words: MOS device; Low dose-rate; Charge effect; Rebound phenomenon