

典型 CMOS 器件总剂量加速试验方法验证

罗尹虹 龚建成 郭红霞 何宝平 张凤祁

(西安西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 应用美军标试验方法 1019.5 和 1019.4 分别对两种典型 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS) 器件进行试验验证, 论述了试验原理, 对试验现象进行了详细的分析, 了解实验室条件下评估空间氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的可行性和保守性。实验表明, 两种不同工艺的 CC4069 器件没有通过 1019.5 所做出的试验验证, 从实验现象观察认为是由于界面陷阱电荷大量建立所引起的。加固 LC4007-RHA NMOS 却通过了与 1019.5 相比过分保守的 1019.4 的试验验证。

关键词 美军标 1019.5, 互补型金属氧化物半导体器件, 辐射效应评估

中图分类号 TN386.1

目前最通用的空间元器件总剂量效应加固保障措施, 是美军标 MIL-STD-883E 试验方法 1019.5, 采用这种方法能对空间低剂量率环境下元器件的辐射响应提供较为合理的保守估计。几十年来, 美军标总剂量加速试验方法在不断的修改和完善, 因此, 对其物理机理的认识、试验条件的选取还存在不同的看法和认识。另一方面, 金属氧化物半导体 (Metal-oxide-semiconductor, MOS) 器件的电离辐射效应研究, 目前还存在两个不确定性, 一是工艺条件可控性和重现性不易实现, 造成对电离辐射效应的影响难以确定, 相同工艺制备的器件之间, 抗电离辐射能力往往差别很大; 二是退火效应难以确定, 电离辐射效应是半永久性损伤, 辐照后引起的损伤会部分恢复, 但该恢复过程还不能确定。基于这两方面的考虑, 我们按照美军标 1019.5 的全过程对典型器件 CC4069 进行了试验验证, 定性描述了所观察到的各种试验现象, 并从理论上进行了详细的分析和解释。

本工作也列出了以前采用美军标 1019.4 对加固 4007 器件进行试验的结果。结合这两种测试方法, 对美军标 1019.5 进行了讨论, 为互补型金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS) 器件空间辐射效应研究提供了有益的借鉴。

1 试验原理

由于 MOS 器件氧化物陷阱电荷和界面陷阱电

荷的建立时间和退火率存在明显差异, 因此单一的高剂量率辐照试验不能预估很宽环境范围的 MOS 器件辐射响应。以这些不能完全反映器件特性的试验结果为基础, 就会得出错误的失效剂量和失效模式, 从而导致实际空间应用时出现很大偏差^[1]。

国外尝试在实验室环境下对器件进行高剂量率辐照, 然后进行高温退火的加速实验方法, 来分别估计氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷对 MOS 器件和电路的影响, 以期在实验室条件下预估元器件的空间辐射效应。美军标 MIL-STD-883E 试验方法 1019.5 对这些问题进行了详细的规范和说明, 它的试验步骤主要包括三步^[2]: (1) 用 ^{60}Co 源 0.5 Gy (Si) / s — 3 Gy (Si) / s 剂量率在最劣偏置条件下辐照器件到规定总剂量, 辐照后去掉偏压, 在两个小时内完成电参数测试。(2) 如果器件仅出现参数失效, 或在辐照中器件的退火可以使器件参数得到恢复, 那么在同样偏置条件下进行室温退火, 室温退火的小时数不超过器件耐受的总剂量与器件工作时所处环境的最大剂量率的比值, 在这里我们选取 24h 退火, 接着再次进行电参数测试。(3) 如果器件通过了电参数测试, 则在相同的辐照条件下附加规定总剂量 50% 的照射, 然后进行高温 100°C 168h 的退火, 并再次进行电参数的测试。

这里对试验步骤进行简单的物理分析。第一步辐照试验中辐照剂量率远高于空间剂量率, 辐照在 CMOS 器件中产生比空间更多的氧化物陷阱电荷, 通过第二步的室温退火, 能够提供空间氧化物陷阱

国防预研基金 (413110705) 资助

第一作者: 罗尹虹, 女, 1974 年 8 月出生, 1996 年毕业于国防科技大学, 工程师, 现为西北核技术研究所读硕士研究生, 主要从事半导体器件辐射损伤效应研究

收稿日期: 初稿 2004-12-02, 修回 2005-03-28

电荷对 MOS 器件响应影响的有效测量。第三步附加 50%过量辐照,一方面补偿了 100 °C 高温退火试验中,由于 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (P channel metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET) 氧化物陷阱电荷退火而导致的阈值电压回漂;另一方面也补偿了在空间环境中由于开关偏置或退火条件所引起的额外界面态建立^[3]。为了保守地预估空间界面态效应,必须确保地面模拟试验时产生的界面态要比空间条件下多,高温 100 °C 168 h 退火提供了低剂量率界面陷阱对 MOS 器件响应影响的最劣测量,得出了比较合理的保守估计。

1019.5 对原有试验方法 1019.4 进行了简单修订,两者差别仅在于 1019.5 在第一步的 ⁶⁰Co 辐照试验后,增加了室温退火。这使一些由于氧化物陷阱电荷产生过多而出现漏电流等参数失效的器件,

可以通过氧化物陷阱电荷的退火得到部分恢复,提高了器件的批接收水平,和试验方法 1019.4 相比不太保守^[4]。因此如果器件能够通过 1019.4 的试验验证,就可以认为能够通过 1019.5 的试验验证。

2 试验方法

2.1 试验样品和实施说明

采用美军标 1019.5 和 1019.4 试验方法,分别对两种 4000 系列器件进行试验验证,一种是 CC4069,包括两种不同工艺形式,用 I 类和 II 类来指代;一种是加固 LC4007-RHA。每种类型选择 7 只样品进行试验,其中辐照试验在西北核技术研究所 ⁶⁰Co 源上进行。辐照过程中 1 只在线测量,监测辐射损伤的程度;其余 6 只移位测量,用于试验验证。试验实施说明如表 1 所示。

Table 1 Conditions to test and validate CC4069 and LC4007-RHA with MIL-STD 883 test method 1019.5 and 1019.4

	Test method	Dose rate / Gy (Si) s ⁻¹	Specified dose / Gy (Si)	Bias in irradiation and annealing
Class I CC4069	MIL-STD 1019.5	0.50	1200	V _{CC} =V _{GS} =10V V _{GND} =0V
	MIL-STD 1019.5	0.144	80	V _{CC} =V _{GS} =10V V _{GND} =0V
Class II CC4069	MTL-STD 1019.5	0.5	1200	V _{CC} =V _{GS} =10V V _{GND} =0V
LC4007-RHA	MTL-STD 1019.4	0.44	1000	V _{GS} =V _{DD} =5V V _{SS} =0V

2.2 参数测量

CC4069 N 管和 P 管阈值电压提取采用美军标规定的 10 μA 恒流注入法;最大驱动电流读取 I_{DS}-V_{GS} 曲线的最大电流值;静态漏电流读取 I_{DS}-V_{GS} 曲线 V_{GS}=0V 和 V_{GS}=10V 时的电流值。

LC4007-RHA 中单管 NMOS 阈值电压的测试通过 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 曲线提取,静态漏电流读取 I_{DS}-V_{GS} 曲线 V_{GS}=0V 时的电流值。

根据美军标 MIL-M-38510,定义器件阈值电压漂移 $\Delta V_{th} > \pm 1.4$ V 时电参数失效。

3 试验结果及分析

3.1 I 类 CC4069 器件,选取剂量率 0.5 Gy (Si) /s, 设定总剂量 1200 Gy (Si), 按照 1019.5 试验流程进行

图 1 显示的是选取剂量率 0.5 Gy (Si) /s, 设定总剂量 1200 Gy (Si) 时, I 类 CC4069 器件在不同

剂量、不同退火时间条件下电流-电压曲线变化情况。可以看出,辐照使曲线左边发生少量负向漂移并开始出现回漂,曲线发生比较明显的畸变;而曲线右边向负方向发生明显漂移,但曲线没有太大畸变,从辐照后退火情况可以看出, I-V 曲线随退火时间的增加曲线左边不断朝正方向漂移,并严重畸变,而曲线右边少量正漂。在整个试验过程中,高

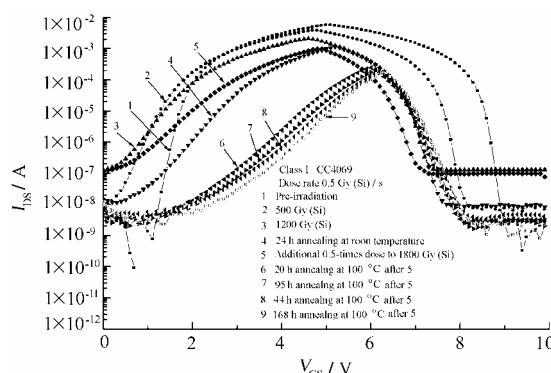


Fig.1 Class I CC4069 current-voltage curves as a function of dose and annealing time

温退火后器件的最大驱动电流与辐照前相比下降了 33 倍, 器件基本丧失驱动能力, 原因主要是由于界面陷阱电荷的大量建立; 而器件静态漏电流随着氧化物陷阱电荷的退火却不断得到恢复。

图 2 显示的是器件 N 管和 P 管阈值电压漂移随辐照剂量和退火时间的关系。可以看出, 第一部分设定总剂量的辐照使 P 管阈值电压向负方向发生明显漂移, 而 N 管阈值电压只有少量的负向漂移并有轻微回漂现象。第二部分室温退火使 N 管阈值电压进一步回漂, 出现“反弹”效应, 而 P 管阈值电压基本保持不变。第三部分附加 50% 过量辐照, N 管和 P 管阈值电压均又负向漂移。第四部分高温退火使 N 管阈值迅速向正方向发生漂移, 在退火 44 h 正向漂移已经达到 3.22 V, 然后逐渐趋于饱和, 最大正向漂移值 3.4 V 左右; P 管阈值电压在高温退火下有轻微回漂, 并很快趋于饱和。

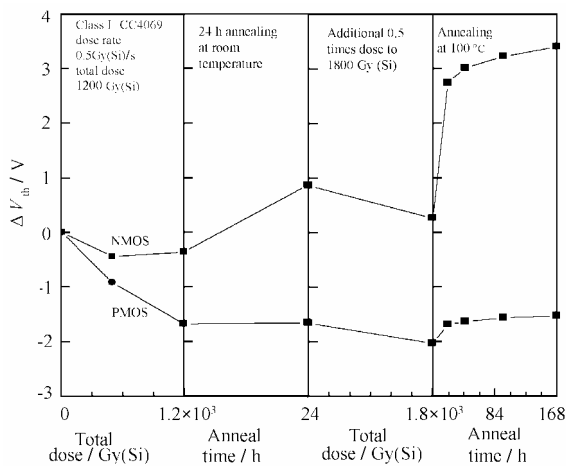


Fig.2 NMOS and PMOS threshold voltage shift of Class I CC4069 as a function of dose and annealing time

这里我们结合图 1 和图 2 对试验现象进行具体的分析。在设定剂量的辐照过程中, N 管阈值电压少量负向漂移并伴有回漂, 电流曲线有较明显畸变, 可以初步判断 N 管氧化物陷阱电荷退火率比较大, 界面态已经建立的比较多; P 管阈值电压向负方向发生明显漂移, 其电流曲线却没有太大畸变, 由此判断 P 管建立了大量的氧化物陷阱电荷, 而界面态建立的还比较少。室温退火使 N 管氧化物陷阱电荷退火, 导致阈值电压出现“反弹”朝正方向漂移; P 管阈值电压基本保持不变, 是由于氧化物陷阱电荷被退火, 而施主界面态却在不断建立, 两者变化对阈值电压的影响相互补偿。附加 50% 过量辐照然后再进行高温 100 °C 168 h 退火, N 管氧化物陷阱电荷被快速退火、受主型界面态充分建立使得 N 管阈值电压迅速向正方向发生漂移, 然后逐步趋于饱和。由于氧化物陷阱电荷的退火, P 管阈值电压在

高温退火下有轻微回漂现象, 但是施主界面态的建立使阈值电压负向漂移, 因此 P 管阈值电压总体仍为负漂并很快趋于饱和。特别说明的是由于 N 管阈值电压正向漂移到达 3.4 V 左右, 已经超过定义的电参数失效标准, 会导致速度、驱动能力降低。

3.2 I 类 CC4069 器件, 选取剂量率 0.144 Gy (Si) / s, 设定总剂量 800 Gy (Si), 按照 1019.5 试验流程进行

图 3 显示的是选取剂量率 0.144 Gy (Si) / s, 设定总剂量 800 Gy (Si) 时, I 类 CC4069 器件在不同剂量、不同退火时间条件下电流-电压曲线变化情况。图 4 显示的是 N 管和 P 管阈值电压漂移随辐照剂量和退火时间的关系。从图 3 和图 4 可以看出, 在试验现象、效应规律上, 与 I 类 CC4069 器件选取剂量率 0.5 Gy (Si) / s 试验时表现出相同的趋势, 因此在物理机理上不再做分析。需要说明的是, 由于选用的剂量率较低, N 管出现回漂的剂量点与辐照剂量率 0.5 Gy (Si) / s 时相比要低一些, 因此试验中所设定的总剂量也相应较低。

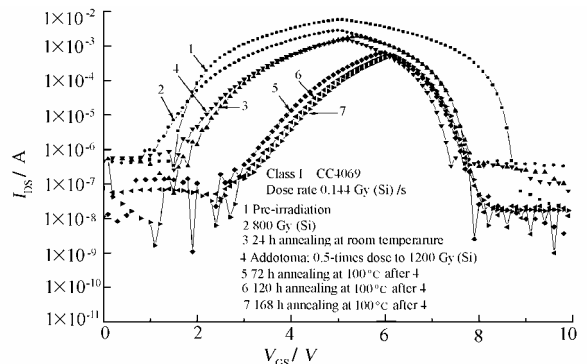


Fig.3 Class I CC4069 current-voltage curves as a function of dose and annealing time

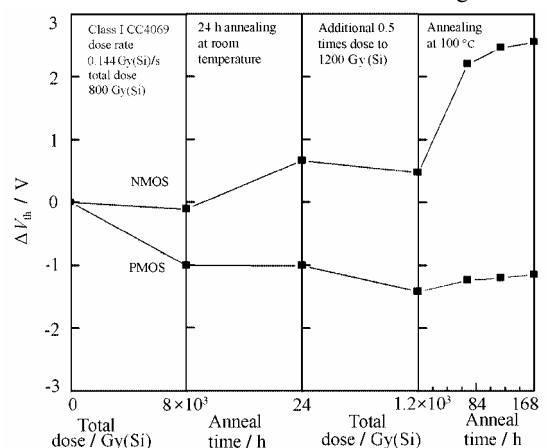


Fig.4 NMOS and PMOS threshold voltage shift of Class I CC4069 as a function of dose and annealing time

由于界面陷阱电荷的饱和值 N_{ss}^{∞} 是辐照剂量、电场强度的函数, 可以表示成^[5]: $N_{ss}^{\infty}(E_1, D) = AD^{2/3} \exp(\beta E_1^{1/2})$, 在其它试验条件

相同的情况下, 当设定总剂量低于剂量率 0.5 Gy (Si) / s 试验所设定的总剂量时, 界面陷阱电荷的饱和值也相应较低, 因此与界面陷阱电荷相关的最大驱动电流的降低量级以及阈值电压的最大正向漂移值也相应较低。最大驱动电流下降 10 倍, 阈值电压最大正向漂移值 2.5 V 左右, 超过失效标准。

3.3 II类 CC4069 器件, 选取剂量率 0.5 Gy (Si) / s , 设定总剂量 1200 Gy (Si) , 按照 1019.5 试验流程进行

图 5 显示的是选取剂量率 0.5 Gy (Si) / s , 设定总剂量 1200 Gy (Si) 时, II 类 CC4069 器件在不同剂量、不同退火时间条件下电流—电压曲线变化情况。图 6 显示的是 N 管和 P 管阈值电压漂移随辐照剂量和退火时间的关系。从图 5 和图 6 同样可以看出, 在试验现象、效应规律上, 与 I 类 CC4069 器件选取剂量率 0.5 Gy (Si) / s 表现出相同趋势, 因此在这里也不再进一步分析。两者试验结果在电参数的测试量值上略有不同, II 类 CC4069 器件 N 管阈值电压最大正向漂移值 2.5 V 左右, 超过电参数失效标准, 最大驱动电流下降 8 倍, 与 I 类 CC4069 器件相比都略有较低, 这和器件的具体加固工艺和封装形式相关。

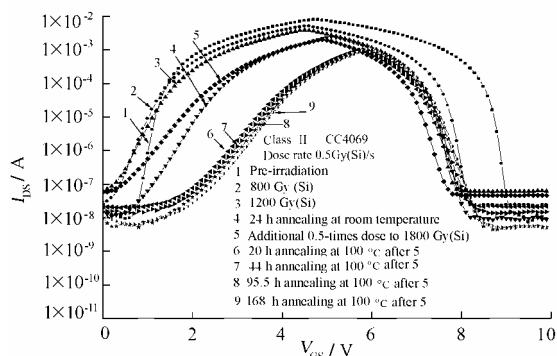


Fig.5 Class II CC4069 current-voltage curves as a function of dose and annealing time

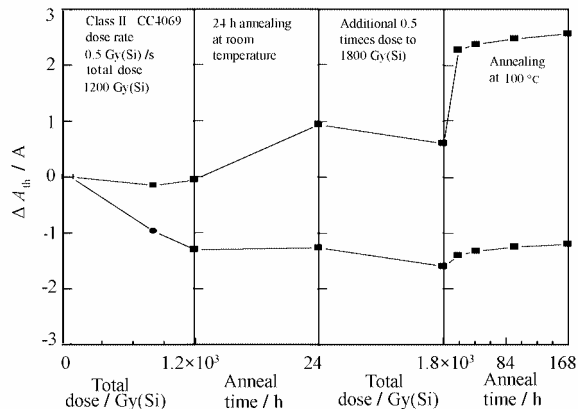


Fig.6 NMOS and PMOS threshold voltage shift of Class II CC4069 as a function of dose and annealing time

3.4 加固 LC4007-RHA NMOS, 选取剂量率 0.44 Gy (Si) / s , 设定总剂量 1000 Gy (Si) , 按照 1019.4 试验流程进行

图 7 显示的是选取剂量率 0.44 Gy (Si) / s , 设定总剂量 1000 Gy (Si) 时, 加固 LC4007-RHA NMOS 在不同剂量、不同退火时间条件下电流—电压曲线变化情况。可以看出, 曲线在辐照过程中不断向负方向发生漂移, 高温退火中曲线不断回漂, 并发生明显畸变。图 8 显示的是加固 LC4007-RHA NMOS 阈值电压漂移随辐照剂量和退火时间的关系。第一部分的设定总剂量辐照和附加辐照, 使阈值电压随着剂量增大不断向负方向发生漂移, 第二部分的高温退火使阈值电压反弹, 向正方向漂移。

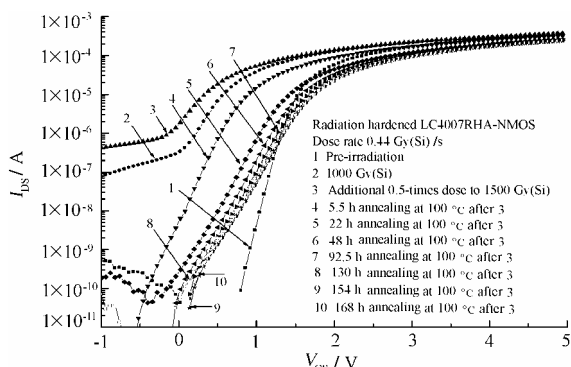


Fig.7 NMOS current-voltage curves for radiation hardened LC4007-RHA as a function of dose and annealing time

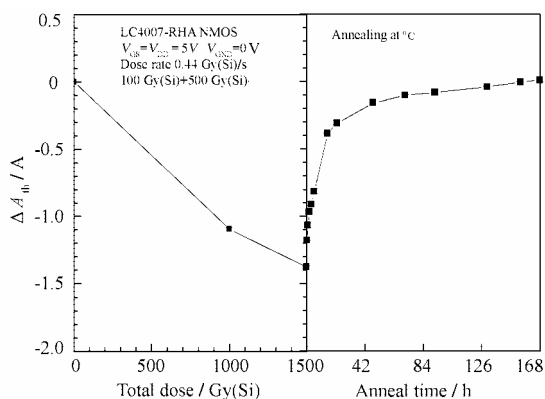


Fig.8 NMOS threshold voltage shift for radiation hardened LC4007-RHA as a function of dose and annealing time

在设定总剂量的辐照中, 亚阈电流曲线由于氧化物陷阱电荷的建立朝负方向发生漂移。由于剂量率比空间辐射环境大的多, 引起较大的氧化物陷阱电荷的建立, 而界面陷阱电荷较小, 这样必然引起 n 沟栅氧和寄生场氧阈值电压漂移比空间环境大的多。所以, 方法 1019.4 第一步试验提供了对空间辐射环境下, 氧化物陷阱电荷引起的 MOS 器件响应的过于保守的估计。N 管阈值电压在规定辐照

通过电参数测试后附加 50% 过量辐照, 然后进行高温退火, 阈值电压由于氧化物陷阱电荷的退火和受主界面态的建立向正方向开始漂移, 回弹在 0 V 左右后接近饱和, 器件的静态漏电流也由于氧化物陷阱电荷的退火不断恢复, 通过电参数测试。

4 讨论

通过采用美军标 1019.5 和 1019.4 对两种不同类型 4000 系列的器件进行试验验证, 可以发现两种器件表现的损伤特性差异比较明显。两种不同工艺的 CC4069 器件在高温退火后阈值电压正向漂移严重, 都没有通过 1019.5 所做出的试验验证, 从实验现象观察认为是由于界面陷阱电荷大量建立所引起的。加固 LC4007-RHA NMOS 却通过了与 1019.5 相比过分保守的 1019.4 的试验验证。通过对试验结果的分析提出以下几点想法:

(1) 从试验现象可以看出, 器件阈值电压在高温退火后期基本处于饱和状态, 可以考虑在今后的评估试验中缩短高温退火的时间。

(2) 从 I 类 CC4069 器件按照 1019.5 试验流

程, 选取两种不同剂量率试验时所表现的损伤效应的一致性, 参照不同剂量率下的剂量失效曲线^[3], 可以考虑用较低辐射剂量率进行评估试验。

(3) 按美军标 1019.5 和 1019.4 来评估 CMOS 器件, 有的通过不了评估测试, 有的却通过了, 说明器件抗空间环境下的总剂量水平相差较大。随着未来器件特征尺寸持续下降以及新的损伤效应的发现, 现有评估方法和技术需要不断的完善和改进, 以适应我国航天技术的发展。

参考文献

- 1 Fleetwood D M, Eisen H A. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, **50**(3): 552-561
- 2 MIL-STD, Test methods and procedures for microelectronics, MIL-STD-883 E, test method 1019.5, Defense Electronics Supply Center, 1997
- 3 Barnes C E, Fleetwood D M, Shaw D C, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1992, **39**(6): 41-54
- 4 Fleetwood D M, Winkur P S, Meisenheimer T L. IEEE Trans Nucl Sci, 1991, **38**(6): 1552-1559
- 5 Mclean F B. IEEE Trans Nucl Sci, 1980, **27**(6): 1651-1660

Total dose accelerated test method to validate typical CMOS devices

LUO Yinong GONG Jiancheng GUO Hongxia HE Baoping ZHANG Fengqi

(Northwest institute of nuclear technology, Xi'an 710024)

ABSTRACT MIL-STD 883 Test Method 1019.5 and 1019.4 are respectively applied to test and validate typical CMOS devices of CC4069 (manufactured in two different technologies) and LC4007-RHA. Principles for the tests are given and test results are analyzed in detail, so as to realize under laboratory conditions the feasibilities and conservatism of estimating oxide trap charges and interface trap charges in space. The studies shows that, while the LC4007-RHA NMOS device passed the comparatively conservative 1019.4 tests, CC4069 devices failed in the 1019.5 tests, suggesting considerable interface trap charge build-up after high temperature annealing.

KEYWORDS MIL-STD-883 Test Method 1019.5, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor (CMOS) device, Radiation effect estimation

CLC TN386.1