

不同辐射环境下 CMOS 器件总剂量效应测试 技术与损伤差异研究*

罗尹虹¹⁾ 龚建成 张凤祁 郭红霞 姚志斌 李永宏 郭宁

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 对应用在不同辐射环境下 HP4156 半导体参数自动化在线测试系统以及脉冲总剂量效应在线测试系统进行了详细的介绍, 说明其工作原理和技术指标, 并利用这两套测试系统对典型 CMOS 器件 4007 在强光一号加速器脉冲硬 X 射线状态、长脉冲 γ 射线状态以及 ^{60}Co 稳态 γ 射线状态下开展了不同辐射环境总剂量损伤效应的比较研究, 为今后深入进行此项工作打下了基础。

关键词 CMOS 测试系统 强光一号加速器 总剂量损伤

1 引言

CMOS 集成电路因为功耗低, 抗干扰能力强, 集成度高等优点在武器系统等军用设备中得到广泛的应用, 在脉冲辐照条件下, 除了产生光电流, 导致电路瞬态翻转, 沉积的总剂量还会引起器件电学性能的退化, 包括: 阈值电压漂移, 跨导降低, 功耗电流增大, $1/f$ 噪声增大等. 这对于未进行抗电离总剂量加固的电子元器件, 特别是 CMOS/Si 工艺器件将会造成严重损伤, 引起武器电子学系统完全失效^[1]. 任何有效的加固工作必须以对器件损伤效应机理和物理过程的充分了解为基础, 电子元器件抗脉冲总剂量加固问题通常需要针对脉冲 X、 γ 射线辐射环境, 研究其相应的损伤机理.

我国对电子元器件稳态总剂量损伤效应研究工作已经开展了很多年, 但由于缺乏能进行相应试验研究的脉冲模拟源, 脉冲高剂量率 X、 γ 射线总剂量效应研究开展的较晚; 前几年工作主要侧重于理论分析, 以及采用稳态 γ 、X 源来开展效应研究和测试损伤阈值. 稳态源和脉冲 X、 γ 射线剂量率相差多个量级, 直接用稳态源作为脉冲 X 射线总剂量效应研究的模拟源, 可能会带来较大的误差.

因此, 为了建立正确的试验方法, 模拟在脉冲辐射环境下的器件响应, 评估 CMOS 器件在脉冲辐射环

境下的抗辐射性能, 迫切需要开展 CMOS 器件脉冲辐射环境与稳态辐射环境总剂量效应异同性研究, 给出损伤因子, 以期通过对稳态辐射环境下电路总剂量损伤阈值的测量来预估脉冲高剂量率环境下的总剂量损伤阈值. 性能良好的测试系统是开展效应研究的关键, 它对于保障我们的研究工作获得有意义的实验数据, 对效应机理做出客观定性的准确分析具有非常重要的作用. 基于这些方面的考虑, 在实验工作中先后建立了适应于稳态辐射环境的 HP4156 半导体参数自动化在线测试系统, 以及适用于脉冲辐射环境的脉冲总剂量效应在线测试系统. 本文对这两套测试系统进行了详细的介绍, 说明其硬件结构、测试原理和技术指标, 并利用这两套系统对典型 CMOS 器件 4007 开展了 ^{60}Co 稳态 γ 射线以及“强光一号”脉冲硬 X 射线、长脉冲 γ 射线的总剂量效应实验. 对不同辐射环境下, 相同总剂量引起的 NMOS 辐射损伤差异有了定性的研究和规律总结, 并从物理机理上进行了详细的分析.

2 HP4156 半导体参数自动化在线测试系统

HP4156 半导体参数自动化在线测试系统是一种基于 GPIB 接口总线的测试系统, 主要由微

2005-04-09 收稿, 2005-06-14 收修改稿

* 国防预研基金(3110702)资助

1) E-mail: lyhsxf@sohu.com

机、HP4156 半导体参数测试仪、HP3488 矩阵开关、稳压电源、488 接口卡等组成。GPIB 接口编程方便,减轻了软件设计负担,便于将多台带有 GPIB 接口的仪器组合起来,形成较大的测试系统,并在计算机的控制下对测试数据进行灵活、方便的传输处理。图 1 为该测试系统框图。

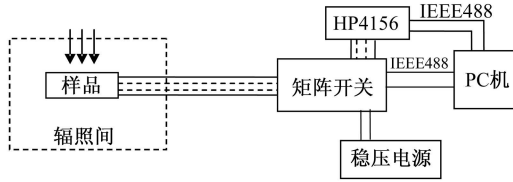


图 1 HP4156 半导体参数自动化在线测试系统框图

该测试系统通过扁平线或多芯同轴电缆将辐射间内的器件和测试间的矩阵开关端子相连,PC 机通过 IEEE-488 接口与 HP4156、矩阵开关连接。通过 QBASIC 语言自行编写的测试程序控制 HP4156 与矩阵开关工作,控制过程如下:对仪器清零、初始化,向仪器发送听指令,使各仪器提供所需的辐照偏置条件;辐照期间,根据设定的辐照时间发送触发命令,使矩阵开关动作,切换到测试状态,HP4156 开始测试并进行数据采集;测试完毕,发送讲指令,将测量数据读入计算机并保存,对数据进行处理,提取相关辐照敏感参数;如果需要获取实验过程中不同辐照剂量点的数据变化情况,可以设置循环多次发送听指令和讲指令。整个测试系统软件主要由参数测量、数据分析处理和数据文件管理 3 大部分组成。该测试系统电路辐照、退火偏置状态与测试状态之间的切换完全由计算机程序控制,不必实际改动管脚连接方式。该测试系统可依次在线测量多个器件,根据不同测试对象,由计算机控制矩阵开关来完成各测试器件间的转换;可一次完成从测试参数的选择到数据的采集、存储再到参数的提取等全过程,测量周期只需 2s,大大提高了工作效率,降低了移位测量带来的退火效应的影响。

3 脉冲总剂量效应在线测试系统

由于 HP4156 半导体参数自动化测试系统测试周期 2s,对研究辐照时间较长的稳态总剂量效应比较适用。而对于核爆辐射环境而言,脉冲辐照后几 ms 的器件响应具有复杂的时间关联,涉及到各种物理过程的不同特征时间,因此为研究脉冲总剂量效应必须建立

一套脉冲辐照后具有快速响应能力的效应测试系统。基于这方面的考虑,自行研制了基于 PCI 插卡式虚拟仪器的实时数据采集系统,该系统的硬件包括 PC 机,数据采集卡、接线屏蔽盒、电流放大器、模拟电子开关、稳压电源以及同步机。虚拟仪器技术是当今计算机辅助测试的一项重要技术。与传统测试仪器不同,虚拟仪器将所有程控仪器的程控信息包含在虚拟仪器的函数模块中,在调用底层设备驱动程序的基础上,通过组合各类函数模块,生成软件来控制仪器。虚拟仪器还可以充分利用计算机强大的图形用户界面来显示采集的数据和存储数据。软件设计平台采用的是 NI 公司的 Labview。图 2 为该测试系统框图。

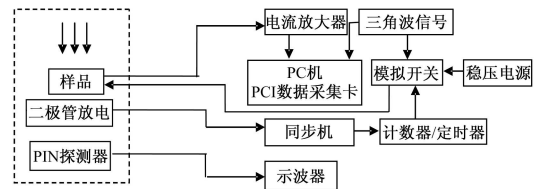


图 2 脉冲总剂量效应在线测试系统框图

下面介绍一下整个系统的工作原理:光信号或者二极管放电电流信号触发同步机;同步机输出信号上升沿触发数据采集卡上的计数器,使其产生一系列连续的脉冲宽度可调、占空比可调的脉冲信号,去控制模拟电子开关的动作,使开关在辐照、退火稳压偏置状态和测试状态之间进行切换;测试状态时数据采集卡模拟输出通道产生的 1ms 三角波电压信号应用到被测器件的输入端,电源电流通过电流放大器转换为电压信号接入模拟输入通道,被数据采集卡采集并记录。该测试系统在脉冲辐照后几十 μs 即可采集并记录 I-V 曲线,测试时间点可随意设置。数据存储后经过数据调用程序可进行数据的后期处理和分析。该系统具有快速触发和快速数据采集相结合的能力,并能根据电流放大器通道数对多个器件进行同时在线测量。

经过设计和试验验证,系统基本达到以下技术指标:

- (1) 脉冲辐照后 20 μs 系统快速触发;
- (2) 测试周期 1ms;
- (3) 秒级内多个测试时间点完整电流电压曲线的获取;
- (4) 多通道独立数据采集,实现器件在线测量;
- (5) 快速数据处理能力,提取敏感参数;
- (6) 电流测量范围 10nA—500 μA ;
- (7) 辐射敏感参数阈值电压的测量误差 $\leq 1\%$ 。

4 不同辐射环境下 CMOS 器件总剂量效应异同性研究

4.1 实验样品及其辐照偏置

选用了两种工艺 4007 器件, 一种为 C4007B, Al 栅工艺, 陶瓷封装; 一种为 CD4007UBE, Si 栅工艺, 塑料封装.

器件偏置状态为: (1) 单管 NMOS 和 PMOS 连成反相器结构, 两种辐照和退火偏置状态: $V_G = 10V(0V)$, $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = 0V$; (2) 反相器, 两种辐照和退火偏置状态: $V_G = 10V(0V)$, $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = 0V$.

4.2 参数测量

对于脉冲辐照环境, 利用装置二极管放电电流信号通过同步机触发脉冲总剂量效应在线测试, 脉冲后 $20\mu s$ 开始测量, 测试并记录器件电流-电压曲线, 并对数据进行处理. 对于稳态辐照环境, 利用 HP4156 半导体参数自动化在线测试系统对器件在辐照到指定剂量点时进行电流-电压曲线测试, 提取辐射敏感参数. 本文选取阈值电压作为器件损伤的表征参数; 对单管 MOS 器件, 阈值电压的提取方法如下: 做出漏极电流减去泄漏电流的平方根 $\sqrt{I_{DS} - I_L}$ 与栅极电压 V_{GS} 的关系曲线, 在斜率最大处作切线并外推, 此直线与横轴的截距即为阈值电压 V_{th} . 对反相器阈值电压的提取方法如下: 电流-电压曲线上 $I_{DS} = 10\mu A$ 时所对应的 V_{GS} 值, 即为阈值电压 V_{th} .

4.3 辐射源及环境测量结果

“强光一号”加速器上选取了两种辐照状态: 一是脉冲硬 X 射线状态下, X 射线能量 20—100keV; 一是长脉冲 γ 射线状态, 平均 γ 射线能量 0.9MeV. 利用 PIN 探测器测量脉冲 X, γ 射线信号波形, 记录脉冲宽度, 测量误差 $\pm 10\%$; 每个器件取多片 LiF(Mg,Ti)-M 型 TLD 测量累积剂量, 测量误差 $\pm 5\%$; 累计吸收剂量

表 1 脉冲硬 X 射线 7 炮辐射环境数据

炮号	脉宽/ns	总剂量/Gy(Si)	剂量率/(10^9 Gy(Si)/s)
04133	31	193.8	6.25
04134	37	223.8	6.05
04135	29	33.13	1.14
04136	37	164	4.43
04137	21	36.21	1.72
04138	37	48	1.3
04139	32	42.46	1.32

除以脉冲宽度即为平均剂量率, 误差 $\pm 15\%$. 表 1 为 7 炮脉冲硬 X 射线辐射环境数据. 表 2 为 5 炮长脉冲 γ 射线辐射环境数据. ^{60}Co γ 源选取 UNIDOS 剂量仪标定辐射剂量率, 剂量率 $0.14Gy(Si)/s$, 根据辐照时间确定辐射总剂量.

表 2 长脉冲 γ 射线 5 炮辐射环境数据

炮号	脉宽/ns	总剂量/Gy(Si)	剂量率/(10^9 Gy(Si)/s)
05028	196	248.94	1.27
05029	198	226.61	1.14
05030	201	118.71	0.59
05031	189	230.99	1.22
05032	145	73.89	0.51

4.4 实验结果及分析讨论

本文主要对不同辐射环境下 CMOS 器件 N 管的总剂量损伤异同性开展机理分析和效应研究. 考虑到硬 X 射线对器件可能引起的剂量增强效应, 在这里将相同总剂量条件下稳态 γ 射线造成的阈值电压负向漂移与长脉冲 γ 射线造成的阈值电压负向漂移之比定为损伤因子. 图 3 为不同辐射环境下 CD4007UBE-N 管阈值电压漂移与总剂量的关系曲线; 图 4 为不同辐射环境下 C4007B-反相器 N 管阈值电压漂移与总剂量的关系曲线.

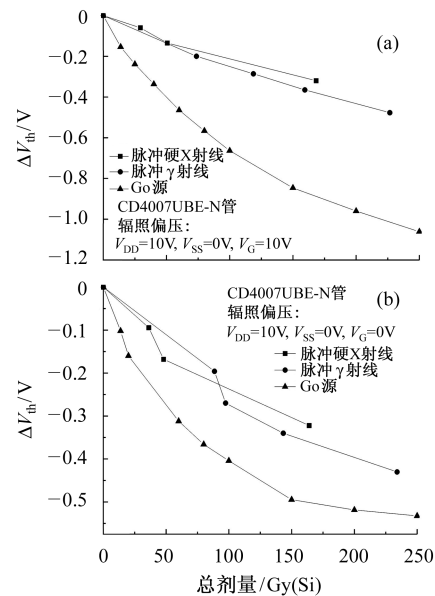


图 3 不同辐射环境下 CD4007UBE-N 管阈值电压漂移与总剂量的关系曲线

(a) 辐照栅偏压 $V_G = 10V$; (b) 辐照栅偏压 $V_G = 0V$.

从图 3, 4 可以看出, 脉冲 X, γ 辐射环境与稳态 γ 辐射环境相比较, 不同辐照栅偏置条件下稳态总剂量造成的 NMOS 阈值电压负向漂移总是高于脉冲总剂量. 这是因为^[2, 3]: 一方面脉冲硬 X 射线、 γ 射线剂量

率超过 10^8Gy(Si)/s , 这种高剂量率辐照脉冲瞬间使得 SiO_2 中电离产生的电子-空穴对饱和, 导致产生的空穴电荷不与剂量成正比, 产生较小的阈值电压漂移; 另一方面高密度电子-空穴对定向移动, 形成空间反向电场, 削弱了正向电场的建立, 导致内部正向场强降低, 增加了电子-空穴对的复合, 影响了空穴向界面的传输, 使得到达界面的空穴减少. 因此在相同总剂量下 NMOS 脉冲辐射损伤比稳态时的辐射损伤要小. 对于不同的辐照栅偏压, NMOS 的损伤因子不同. 辐照栅偏压 10V 时, NMOS 的损伤因子 3.6 左右; 辐照栅偏压 0V 时, 其损伤因子 2 左右. 这是因为稳态辐照下阈值电压的漂移和栅偏压密切相关, 栅电压越高, 产额函数越大, 逃逸初始复合的空穴也就越多, 被俘获的氧化物陷阱电荷也就越多, 引起阈值电压的负向漂移也越大; 而脉冲辐照条件下由于氧化层内瞬间产生的光电流将会导致内部电场崩溃, 电子空穴对的初始复合将会出现与双子复合模型、柱状复合模型不同的新的现象和机理, 出现“无偏性”^[4], 使得不同栅偏压引起的阈值电压漂移差异不大.

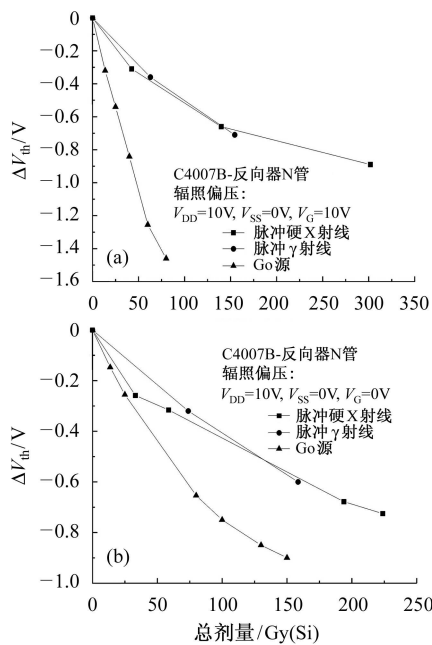


图4 脉冲与稳态辐射环境下 C4007B-反相器 N 管阈值电压漂移与总剂量的关系曲线
(a) 辐照栅偏压 $V_G = 10\text{V}$; (b) 辐照栅偏压 $V_G = 0\text{V}$.

需要强调的是脉冲辐射环境下总剂量引起的阈值电压漂移主要是氧化物陷阱电荷的贡献, 界面态这时还来不及建立. 而稳态辐射环境下由于辐照时间较长, 阈值电压漂移既包括氧化物陷阱电荷引起的阈值电压负向漂移, 也包括受主型界面陷阱电荷引起的阈值电压正向漂移; 稳态总剂量损伤效应是两者共同作用

的结果. 因此如果选用剂量率更高的稳态辐照源, 将会降低受主型界面陷阱电荷对阈值电压漂移的正向贡献, 那么稳态与脉冲辐照相比器件的损伤因子将会更强.

从图中还可以看出, 脉冲硬 X 射线引起的 NMOS 阈值电压漂移与长脉冲 γ 射线相比差别不大, 基本一致. 引起这种现象的原因有几方面: 一方面和器件的工艺密切相关, 本次实验中选用的器件 CD4007UBE 为塑料封装, 硅栅工艺, C4007B 为陶瓷封装, 铝栅工艺, 在器件的封装、结构中均没有引入重金属元素, 与器件灵敏区没有形成高、低原子序数界面, 因此不存在脉冲硬 X 射线剂量增强效应, 这和文献[5]是一致的; 另一方面“强光一号”加速器的脉冲硬 X 射线状态实际上是 X、 γ 射线的混合场, 器件灵敏区吸收剂量中相当一部分是脉冲 γ 射线沉积的剂量, γ 射线能量较高, 与材料相互作用主要通过康普顿效应, 基本上与材料的原子序数无关, 因此 γ 射线不会引起器件剂量增强效应; 最后一点是脉冲硬 X 射线和长脉冲 γ 射线虽然能量范围不同, 但在半导体和绝缘材料中, 它们与物质作用的结果都是产生大量具有不同能量和动量的高能二次电子, 造成过多的电子和空穴, 引起电离辐射损伤, 因此两者损伤效应规律是定性相似的, 当在灵敏区沉积相同总剂量时, 所表现的损伤强度也应该是相同的.

5 结论

(1) HP4156 半导体参数自动化测试系统以及脉冲总剂量效应在线测试系统, 测试方便灵活, 速度快, 精度高, 弥补了移位测试方法的不足; 由于其各自的优势在稳态总剂量和脉冲总剂量效应研究中得到很好的应用和发挥, 在今后的工作中将结合这两套系统的优势进一步开展相关的实验研究.

(2) 脉冲硬 X、长脉冲 γ 辐射环境与稳态 γ 辐射环境相比较, 不同辐照栅偏置条件下稳态总剂量造成的 NMOS 阈值电压负向漂移总是高于脉冲总剂量. 不同的辐照栅偏压下 NMOS 的损伤因子不同, 正向栅偏压下器件的损伤因子大于零栅偏压下的损伤因子.

(3) 本实验采用的 CMOS 器件, 由于封装以及芯片制造过程中未采用重金属工艺, 因此脉冲硬 X 射线引起的 NMOS 阈值电压漂移与长脉冲 γ 射线相比基本一致, 没有观察到脉冲硬 X 射线剂量增强效应. 对于封装以及芯片制作过程中采用重金属工艺的 CMOS 器件, 就必须考虑硬 X 射线的剂量增强效应.

参考文献(References)

- 1 Oldham T R, Mclean F B. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, **50**(3): 483
- 2 MA T P, Dressendorfer P V. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. New York, Wiley, 1989. 292
- 3 Peyre D, Poirot P, Galliaid R. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1992, **50**(6): 103—107
- 4 Rattner S, Boesch H E. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, **33**(3): 1051—1052
- 5 LAI Z W. Radiation Hardening Electronics—Radiation Effects and Hardening Technique. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 298—300 (in Chinese)
(赖祖武等. 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. 298—300)

Total Dose Effect Test Technology and Damage Difference Study on CMOS Devices under Different Irradiation Environment *

LUO Yin-Hong¹⁾ GONG Jian-Cheng ZHANG Feng-Qi GUO Hong-Xia
YAO Zhi-Bin LI Yong-Hong GUO Ning

(Northwestern Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract The two in-circuit test systems, one is a HP4156 semiconductor parameter automation system for measuring steady total dose effect, another one is a system for measuring pulsed total dose effect, under different environment with working principle and technical specification are introduced in detail in the paper. The comparison study of total dose damage effects irradiated by Pulsed hard X ray and long pulsed γ -ray generated in Qiangguang- I accelerator, and by ^{60}Co steady γ -ray on typical CMOS devices utilizing the two test systems has been performed, which lays a foundation for the further research of total dose effect on CMOS devices in the future.

Key words CMOS, test system, qiangguang- I accelerator, total dose damage

Received 9 April 2005, Revised 14 June 2005

*Supported by National Defense Advanced Research (3110702)

1) E-mail: lyhsxf@sohu.com