

# CMOS 电路瞬态辐照脉冲宽度效应的实验研究<sup>\*</sup>

王桂珍, 白小燕, 郭晓强, 杨善潮, 李瑞宾, 林东生, 龚建成

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 在“强光一号”加速器上,对两种 CMOS 反相器和一种 CMOS 存储器进行了长脉冲状态和短脉冲状态下的辐照实验,测量了 CMOS 电路的瞬时辐照效应规律,得到了 CMOS 电路辐射损伤阈值与脉冲宽度的关系,分析了 CMOS 电路在不同脉冲宽度下的效应差异。实验结果表明:CMOS 电路的辐射损伤阈值随脉冲宽度的增加而降低,在 20 ns 的脉冲宽度辐照下,CMOS 反相器 4007 和 4069 的闩锁阈值大约为 150 ns 脉冲辐照下的 2 倍,CMOS 存储器 6264 的翻转阈值在 20 ns 脉冲宽度辐照下为 150 ns 脉冲宽度辐照下的 3 倍。

**关键词:** CMOS 电路; 辐照效应; 闩锁阈值; 翻转阈值; 脉冲宽度; 剂量率

**中图分类号:** TN432

**文献标志码:** A

互补型金属氧化物半导体(CMOS)集成电路具有功耗低、噪声容限大等优点,在给定的封装内可容纳更多的电路,目前 CMOS 集成电路的封装密度已达到了上亿只晶体管,使它成为数字电路、模拟电路以及同一芯片上构成数字、模拟组合电路的首选技术。但 CMOS 电路极易发生电离辐射损伤,深入研究 CMOS 电路的辐射响应及加固技术,有利于提高电子系统的整体抗辐射水平。

美国在 20 世纪就利用不同脉冲宽度的模拟源开展了脉冲宽度效应研究,对各种器件进行了辐照效应测量,在美军标中也有脉冲宽度的有关规定或提示<sup>[1-3]</sup>;科研人员还利用不同脉冲宽度的激光模拟源开展了效应机理的研究,分析了脉冲宽度的影响<sup>[4]</sup>。国内科研人员进行过瞬时辐照的脉冲宽度效应研究<sup>[5]</sup>,对双级器件、CMOS 电路等进行了效应测量,分析了脉冲宽度对电路效应的影响。本文对 CMOS 反相器和 CMOS 存储器进行了不同脉冲宽度的辐照实验,测量了 CMOS 电路的损伤阈值与脉冲宽度的关系。

## 1 CMOS 反相器瞬时辐照效应实验方法

辐照实验在西北核技术研究所的强光一号加速器长脉冲辐射状态和短脉冲辐射状态下进行,长脉冲状态下,脉冲宽度约 150 ns,短脉冲状态下,脉冲宽度约 20 ns。

实验电路为 CMOS 逻辑电路 4007,4069 及 CMOS 随机存储器 6264,测量 CMOS 逻辑电路的闩锁阈值及 SRAM 翻转阈值与脉冲宽度的关系。对于 4069,测量第一对反相器的辐射响应;对于 4007,把第一只 NMOS 管和第一只 PMOS 管结成反相器结构,辐照时反相器输入接低电平,输出为高电平。在辐照过程中监测 CMOS 电路的电源电流。辐照后,如果 CMOS 反相器的输出状态发生变化,且电源电流增加,重新加电,电路功能正常,则判定电路发生闩锁;如果辐照后 CMOS 输出状态及电源电流恢复,则判定电路发生扰动。

静态存储器(SRAM)瞬时辐照效应:用存储器全地址测量系统进行测量。在零前对 SRAM 全地址写入 55H 的内容,使 SRAM 在零时处于片选无效状态,这样可以降低零时的各种干扰对 SRAM 存储内容的影响;零后对存储器进行存储内容的全地址扫描,纪录存储单元的翻转数量,同时监测电源电流的变化,测量存储器的读写功能。

在每一炮的实验中,同时对 6 只位置不同的 CMOS 电路进行辐照,得到相同脉冲宽度、不同剂量率辐照下的效应波形。6 只电路分别供电,消除相互之间的影响,以期得到更为准确的电路损伤阈值。瞬态实验时,采用热释光剂量计测量辐射总剂量  $D$ ,采用闪烁探测器测量脉冲宽度  $t_p$ ,得到辐射剂量率  $\dot{D} = D/t$ 。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 CMOS 反相器的实验测量结果

图 1、图 2 分别为不同宽度脉冲辐照下 4069 和 4007 辐照效应与剂量率的关系,其中纵坐标为 1 时,表示电

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-10-24; 修订日期:2009-02-09

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:王桂珍(1967—),女,山西新绛人,博士研究生,副研究员,从事抗辐射加固技术研究;wangguizhen6773@163.com。

路发生了剂量率闩锁,零后输出状态发生变化,电源电流增加,只有重新加电,电路的功能才可恢复正常;纵坐标为 0 时,表示电路发生了剂量率扰动,扰动持续一段时间后,输出状态恢复正常。

从图中可以得出,在宽度 150 ns 和 20 ns 的  $\gamma$  脉冲辐照下,4069 的闩锁阈值分别为  $1.0 \times 10^9 \sim 1.3 \times 10^9$  rad(Si)/s 和  $2.5 \times 10^9$  rad(Si)/s,4007 的闩锁阈值分别为  $9 \times 10^8$  rad(Si)/s 和  $1.5 \times 10^9 \sim 1.7 \times 10^9$  rad(Si)/s。

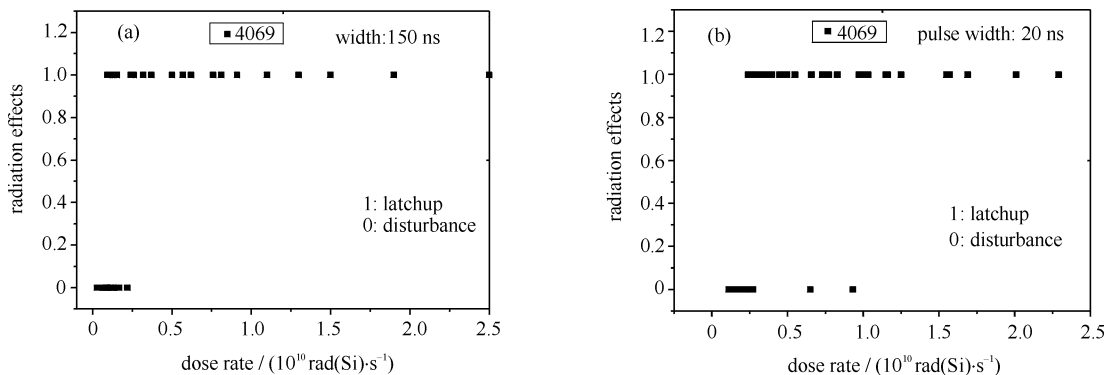


Fig. 1 Radiation effects of 4069 with different pulse width vs dose rate

图 1 不同脉冲宽度下 4069 辐照效应与剂量率的关系

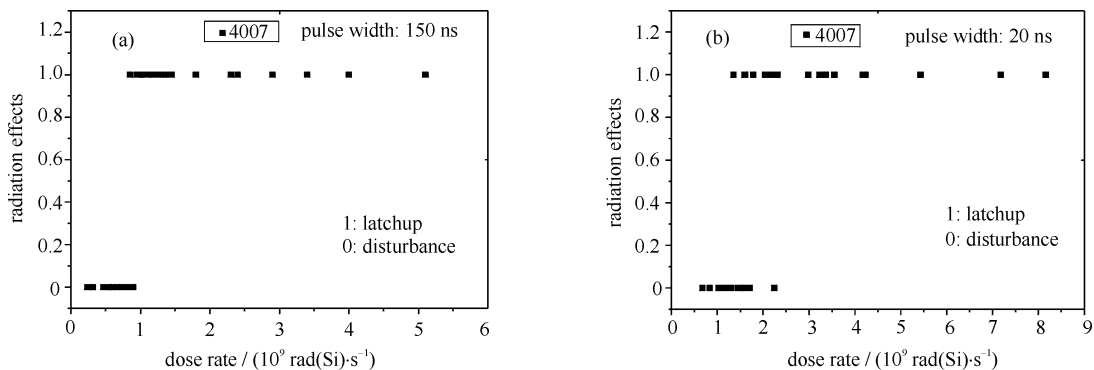


Fig. 2 Radiation effects of 4007 with different pulse width vs dose rate

图 2 不同脉冲宽度下 4007 辐照效应与剂量率的关系

对于 CMOS 电路来说,在瞬时辐射下,会发生剂量率扰动或剂量率闩锁效应。在较低的剂量率辐照下,pn 结产生的光电流改变了输出状态,使电路发生扰动,脉冲过后,光电流消失,电路功能恢复;当剂量率比较大时,辐照感生的光电流也随着增大,注入到阱中的电流使寄生的晶体管从截止状态转变为放大状态,CMOS 结构中寄生的 pnpn 四层结构从高阻状态变为低阻导通状态,这时电源电流增加,输出状态发生变化,而这种状态已经不需要辐照感生光电流的注入就能维持,所以在脉冲过后,虽然辐照感生的光电流消失,但这种低阻状态依然维持,闩锁效应发生。

从 4007 和 4069 的效应规律来看,在低于某一剂量率  $\dot{D}_1$  下,CMOS 电路发生扰动;在大于某一剂量率  $\dot{D}_2$  下,CMOS 电路发生闩锁;在这两个剂量率之间,电路发生剂量率扰动和剂量率闩锁的可能性都存在。分析原因:在比较高的剂量率辐照下,光电流的峰值与持续时间已经足以使寄生的 pnpn 结构发生状态变化,这时必然发生 CMOS 电路的闩锁现象;在低的剂量率辐照下,光电流比较小,不能使寄生的晶体管开启,瞬时光电流对输出状态的影响只是暂时的,这时 CMOS 电路发生扰动,脉冲过后,状态恢复;而在某一段剂量率范围内,光电流峰值及持续时间正好处于寄生晶体管开启阈值范围,并且因为寄生晶体管不是一个固定的状态,所以这时发生剂量率扰动和剂量率闩锁的可能性都有。

## 2.2 存储器的实验测量结果

图 3 为长短脉冲辐照下 6264 翻转数与剂量率的关系。不同宽度的脉冲  $\gamma$  射线辐照下,6264 的效应规律基本一致,存储器存在翻转阈值,在剂量率达到翻转阈值时,翻转数迅速增加,在比较窄的剂量率范围内,翻转数达到最大,之后翻转数不再随着剂量率的增加而增加。

虽然在不同宽度的脉冲  $\gamma$  射线辐照下,6264 的效应规律基本一致,但其翻转阈值和达到最大翻转数的剂量率不同,在脉冲宽度约 150 ns 和 20 ns 的  $\gamma$  射线辐照下,6264 的翻转阈值分别约  $9 \times 10^8$  rad(Si)/s 和  $3 \times 10^9$  rad(Si)/s,翻转数达最高时的剂量率分别约为  $3.5 \times 10^9$  rad(Si)/s 和  $2 \times 10^{10}$  rad(Si)/s,实验结果表明,6264

的瞬时辐射响应存在比较明显的脉冲宽度效应。

### 2.3 CMOS 电路的脉冲宽度效应分析

在宽度约为 150 和 20 ns 的脉冲辐照下,4007 的闩锁阈值分别约为  $9 \times 10^8$  rad(Si)/s 和  $1.5 \times 10^9 \sim 1.7 \times 10^9$  rad(Si)/s;4069 的闩锁阈值分别为  $1.0 \times 10^9 \sim 1.3 \times 10^9$  rad(Si)/s 和  $2.5 \times 10^9$  rad(Si)/s;6264 的翻转阈值分别约为  $9 \times 10^8$  和  $3 \times 10^9$  rad(Si)/s。实验结果表明,CMOS 电路瞬时损伤存在明显的脉冲宽度效应。

CMOS 电路的闩锁效应主要由阱的光电流引起。在 CMOS 结构中,阱和衬底形成的 pn 结或两个阱形成的 pn 结,不仅结的面积大,而且载流子的收集区域大,在这样的结构中,载流子扩散至耗尽层被收集需要一定的时间,即光电流的时间响应较慢,这时对于比较窄的脉冲辐射,扩散电流成份叠加在光电流波形的后沿,对光电流峰值的贡献小,相对比较宽的脉冲辐射,感生的光电流的峰值小;并且在不同宽度脉冲辐照下,光电流波形的宽度也不同,而 CMOS 电路的闩锁效应不仅需要一定幅值的光电流,对光电流的持续时间也有一定的要求,即使光电流的幅度一样,持续时间的不同也会引起不同的辐照响应。对于比较短的脉冲辐射,由于其光电流产生率及脉冲宽度小于宽脉冲辐射,导致短脉冲状态下 CMOS 电路损伤阈值高于长脉冲状态。

### 3 结 论

本文对 CMOS 反相器 4007,4069 及 CMOS 存储器 6264 进行了不同脉冲宽度下的辐照实验,测量了 CMOS 电路的效应规律,得到了 CMOS 电路的辐射损伤阈值与脉冲宽度的关系,探讨了脉冲宽度对 CMOS 电路损伤阈值影响的机制。实验结果表明,CMOS 电路的闩锁阈值及翻转阈值存在脉冲宽度效应,CMOS 电路的损伤阈值随着脉冲宽度的增加而降低。

#### 参考文献:

- [1] MIL-STD-883E, METHOD 1023.2, Dose rate response and threshold for upset of linear microcircuits[S].
- [2] MIL-STD-883E, METHOD 1021.2, Dose rate upset testing of digital microcircuits[S].
- [3] MIL-STD-883E, METHOD 1020.1, Dose rate induced latchup test procedure[S].
- [4] Jonsson M, Mattson S. Transient radiation response of VLSI circuits: shadowing effects and pulse widths dependence in laser measurements [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1991, **38**(6): 1429-1433.
- [5] 王桂珍,姜景和,彭宏论,等. 双极晶体管不同脉冲宽度的  $\gamma$  剂量率效应研究[J]. *微电子学*, 2000, **30**(4): 247-249. (Wang Guizhen, Jiang Jinghe, Peng Honglun, et al. Transient response of transistor to ionizing radiation with different width. *Microelectronics*, 2000, **30**(4): 247-249)

## Transient radiation effects of CMOS circuits with different pulse widths

Wang Guizhen, Bai Xiaoyan, Guo Xiaoqiang, Yang Shanchao,

Li Ruibin, Lin Dongsheng, Gong Jiancheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P.O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Transient radiation response on CMOS circuits were investigated for different pulse widths. CMOS circuits 4007, 4069 and 6264 were irradiated using "Qiangguang-I" accelerator source. Latchup thresholds of CMOS inverters and upset level of CMOS SRAM with different pulse widths were obtained. The data clearly indicate dose-rate dependency on the pulse widths. The latchup threshold for 4007 and 4069 at 20 ns pulse width is 2 times that at 150 ns. The upset level for 6264 at 20 ns pulse width is 3 times that at 150 ns. The results show that the damage thresholds decrease with the increase of pulse widths.

**Key words:** CMOS circuits; radiation effects; latchup threshold; upset threshold; pulse width; dose rate

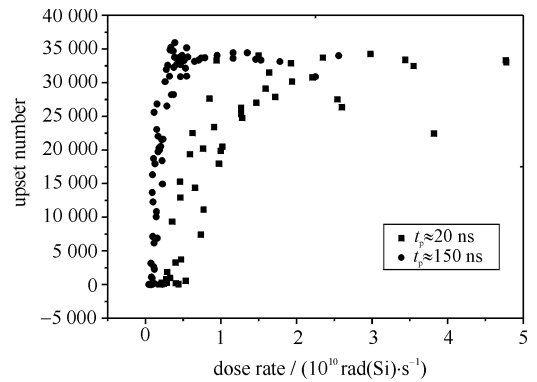


Fig. 3 Upset number of 6264 with different pulse width vs dose rate

图 3 不同脉冲宽度下 6264 存储器翻转数与辐射剂量率的关系