

CMOS 工艺微控制器 瞬时电离辐射效应实验研究

金晓明¹, 范如玉^{1,2}, 陈伟², 王桂珍², 林东生², 杨善潮², 白小燕²

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:利用 CMOS 工艺微控制器的实验测试系统,在“强光一号”加速器上进行了瞬时剂量率效应实验。实验研究采用的 γ 脉冲宽度为 20 ns, 剂量率(以 Si 原子计)为 $6.7 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$ Gy/s。在不同的剂量率水平下观察到了扰动和闭锁效应,获得了微控制器的闭锁阈值,分析了扰动时间、系统功耗电流与剂量率间的关系。瞬时电离辐射在 CMOS 工艺电路的 PN 结中产生光电流,导致了电学和功能参数的退化。

关键词:瞬时电离辐射;微控制器;扰动;闭锁;闭锁阈值

中图分类号:TN431;TN792

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)12-1487-06

Experimental Research on Transient Ionizing Radiation Effects of CMOS Microcontroller

JIN Xiao-ming¹, FAN Ru-yu^{1,2}, CHEN Wei², WANG Gui-zhen²,
LIN Dong-sheng², YANG Shan-chao², BAI Xiao-yan²

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: This paper presents an experimental test system of CMOS microcontroller EE80C196KC20. Based on this system, the transient ionizing radiation effects on microcontroller were investigated using “Qiangguang-I” accelerator. The gamma pulse width was 20 ns and the dose rate (for the Si atom) was in the range of 6.7×10^6 to 2.0×10^8 Gy/s in the experimental study. The disturbance and latchup effects were observed at different dose rate levels. Latchup threshold of the microcontroller was obtained. Disturbance interval and the system power supply current have a relationship with the dose rate level. The transient ionizing radiation induces photocurrent in the PN junctions that are inherent in CMOS circuits. The photocurrent is responsible for the electrical and functional degradation.

Key words: transient ionizing radiation; microcontroller; disturbance; latchup; latchup threshold

20 世纪 60 年代,美国 Sandia 和 Bell 实验室开始对二极管和 MOS 晶体管的瞬时电离辐射效应进行研究,认识到瞬时电离辐射能在半导体材料中电离出电子空穴对,产生光电流,影响电学特性^[1-4]。随着电子工艺水平的提高,电子元器件日益小型化、集成化,大规模集成电路的瞬时电离辐射效应成为新的研究热点,效应规律也更复杂^[5-6]。CMOS 工艺微控制器作为大规模集成电路的一种,拥有高可靠性、高速度和低功耗的特点,在近 30 多年有了飞跃发展,适合实时控制、数据采集和信号处理,在电子系统的应用非常广泛。但 CMOS 工艺的微控制器对瞬时电离辐射十分敏感。有研究表明,瞬时电离辐射造成 CMOS 工艺微控制器 80C31 的功耗电流增

大,地址、数据线和存储器使能端的波形也有瞬时电离辐射效应^[7]。本工作研究微控制器 EE80C196KC20 的瞬时电离辐射效应,对系统功耗电流、重要功能模块 IO 电路和 PWM 电路的输出波形进行测试,并分析干扰时间和辐射剂量率的关系。

1 微控制器测试系统

以 INTEL 公司 16 位 CMOS 工艺微控制器 EE80C196KC20 为研究对象,研制效应参数测试系统,用于辐射效应实验研究。该硬件系统的组成为 EE80C196KC20、稳压电源 LM7805、晶振电路、复位电路、地址锁存器 74LS373、片外程序存储器 EEPROM AT28C256 及串行通信电路,如图 1 所示。

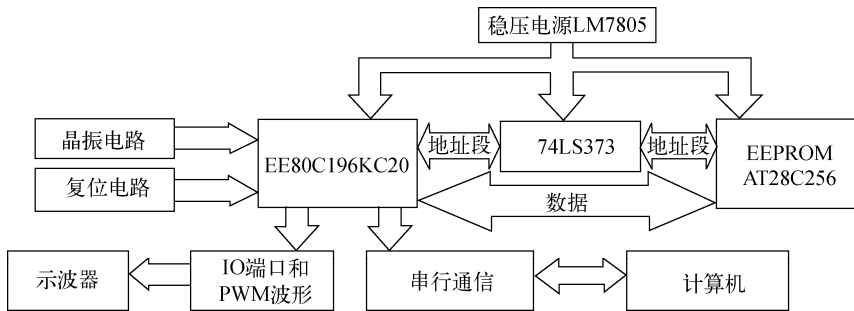


图 1 微控制器实验测试系统示意图

Fig. 1 Schematic representation of microcontroller experimental test system

在该测试系统中,晶振电路为微控制器的片内振荡器提供振荡频率,外部晶振的频率为 11 MHz,经振荡器二分频后输出时钟信号,决定了微控制器工作的状态周期为 181 ns。复位电路确保微控制器在反复上电时稳定复位,并能通过开关手动复位。在复位时,微控制器从设定的最初状态开始运行。稳压电源芯片位于辐照板上,输入电压 7~12 V,输出电压 5 V。由于实验为长线测试,从测试间到辐照板的传输线上有电势降,故该电源芯片能为微控制器、地址锁存器和程序存储器提供稳定的工作电压。微控制器执行的程序段位于 EEPROM 中,为二进制机器码组成的指令序列。微控制器的地址和数据总线是复用的,微控制器在读取 1 条指令时,该总线先发送指令地址,然后通过总线读入指令数据,故用地址锁存器保存总

线发送的指令地址。微控制器与计算机之间用串行通信方式交换数据,微控制器将指令执行结果发送给计算机,计算机也可给微控制器发送指令,使微控制器执行不同的程序段。

实验测试了微控制器 CPU 执行指令的能力、AD 转换结果寄存器及寄存器 RAM 的数据状态,通过串行通信电路将测试结果发送给上位机,测量了系统的功耗电流。同时,用示波器测量微控制器 IO 端口和 PWM 的瞬时效应波形。在指令段的 1 次循环中,让 IO 端口的电平反转 1 次,即高电平变低、低电平变高,这样,IO 端口即产生了 1 个占空比为 50% 的方波信号。程序段的 1 个循环周期是 1.2 s,故 IO 端口的波形周期为 2.4 s。复位时,设定 IO 的 P1.0 为低电平,P1.1 为高电平,该两路信号的相位相反。PWM 的输出波形主要由计数器和

PWM控制寄存器决定,即选择了PWM输出波形的占空比为50%。计数器为8位寄存器,每个状态周期增1,从最小值0增加到最大值255,溢出后归0。设定PWM控制寄存器的值为128,当计数器的值比PWM控制寄存器小时,PWM输出高电平;当计数器的值比PWM控制寄存器大时,PWM输出低电平。由于PWM控制寄存器的值为计数器最大值的一半,故该寄存器的设定值决定了PWM的占空比为50%,而计数器的最大值决定了PWM波形周期为256个状态周期,即46 μs 。

2 实验方法

微控制器的瞬时电离辐射效应实验的模拟源为西北核技术研究所的“强光一号”强流脉冲加速器,利用该加速器产生的 γ 短脉冲辐射进行效应实验。 γ 光子的平均能量为1.5 MeV,脉冲宽度约20 ns,典型的 γ 脉冲波形如图2所示。该 γ 脉冲波形由闪烁探测器测量得到,脉冲波形的半高宽定义为脉冲宽度。在进行瞬时电离辐射效应实验时,将热释光剂量计置于微控制器芯片上,测量该位置的辐射总剂量。用总剂量除以脉冲宽度,即得到辐射剂量率。

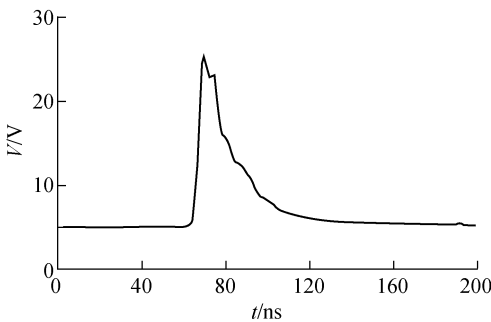


图2 γ 脉冲波形

Fig. 2 Waveform of gamma pulse

微控制器和外围电路置于不同的金属盒内,以屏蔽电磁干扰,并用铅砖对外围电路进行瞬时辐射屏蔽。辐射场不同位置处的 γ 脉冲剂量率的值不同,离辐射源越近,剂量率越高,反之越低。微控制器闭锁的主要特点是瞬时电离辐射引起的过量高电流状态,破坏电路的正常工作,只有断开电源重新上电才能恢复正常。实验时,将微控制器置于靶前实验平台前后的

不同位置,研究微控制器在不同剂量率下的辐射效应规律,由此确定微控制器产生闭锁效应的最低剂量率,即闭锁阈值。微控制器的输出波形信号线和串行通信数据线由屏蔽电缆传送至测试间,分别送入示波器和计算机的输入端。在 γ 脉冲作用瞬时,闪烁探测器为示波器提供触发信号,使示波器采集到瞬时电离辐射效应波形。微控制器与计算机的串行通信状态,用于测试微控制器在 γ 脉冲作用下的功能变化。

3 实验结果

在“强光一号”加速器上进行了不同剂量率的辐照效应实验。实验结果表明,根据辐射损伤等级的不同,微控制器的瞬时电离辐射效应表现为剂量率扰动和剂量率闭锁。剂量率(以Si原子计,下同)闭锁阈值为 1×10^8 Gy/s,当剂量率小于该阈值时,微控制器出现瞬态扰动,经一段中断时间后能自行恢复;当剂量率大于该阈值时,微控制器发生闭锁,功能失效,之后无法自动恢复正常。以下详细讨论两种不同损伤等级下微控制器的辐射效应规律,分析系统功耗电流与剂量率的关系。

3.1 微控制器的剂量率扰动效应

在剂量率为 7.9×10^7 Gy/s时,微控制器在 γ 脉冲作用下出现扰动,IO端口和PWM的波形分别如图3a、c所示,图3b、d分别是IO端口和PWM的波形干扰脉冲的局部放大图。由图3b可看出,当 γ 瞬时脉冲作用于微控制器时,P1.0处于高电平,脉冲在其信号上引起了瞬态干扰信号,该干扰信号的幅值为2 V;P1.1处于低电平,脉冲引起的干扰信号的幅值为5 V。由图3d可看出,PWM波形在 γ 脉冲的作用下产生了幅值为22 V的瞬态干扰信号。图3c表明,脉冲造成该波形的干扰时间为640 μs ,这正是微控制器的功能中断时间,也是IO端口波形的扰动时间。在该时间内,微控制器无功能输出,与计算机的通信中断。IO端口的波形由于周期比干扰时间大得多,在图3a中观察到一窄脉冲信号。在中断时间过后,微控制器内部的光电流衰减至0,功能和电参数恢复。在同样宽度的 γ 脉冲作用下,微控制器发生剂量率扰动效应的扰动时间随着剂量率的增大而增大,当剂量率为6.7、6.9、23、79 MGy/s

时,扰动时间分别为 16、20、120、640 μs ,如图 4 所示。当微控制器瞬时扰动时,系统功耗电流会变大,在扰动过后恢复正常。此外,在扰动过

后,CPU 执行指令的能力、AD 转换结果寄存器、寄存器 RAM 的数据均恢复正常,IO 端口和 PWM 的波形也恢复正常。

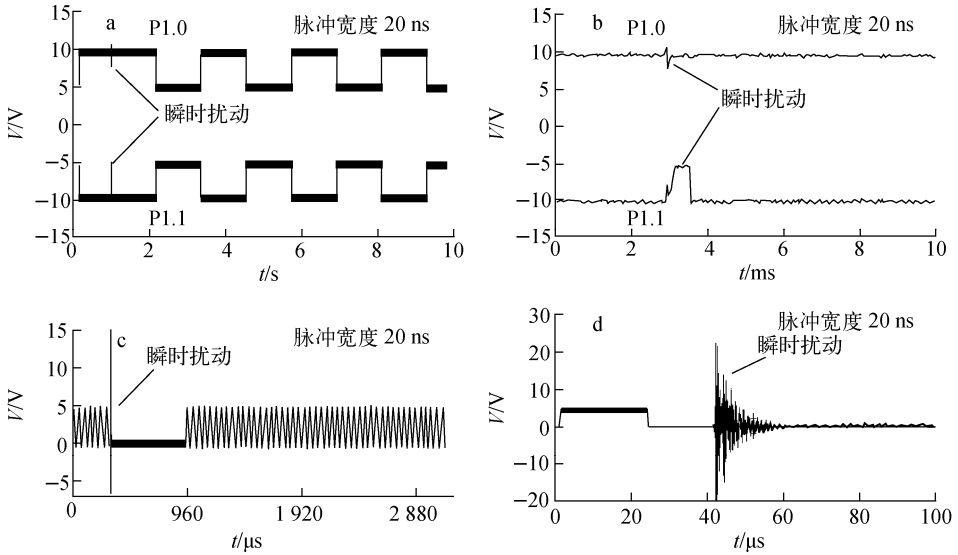


图 3 瞬时扰动下的波形

Fig. 3 Waveform of IO port and PWM under transient disturbance

a——IO 端口波形;b——IO 端口局部放大波形;c——PWM 波形;d——PWM 局部放大波形

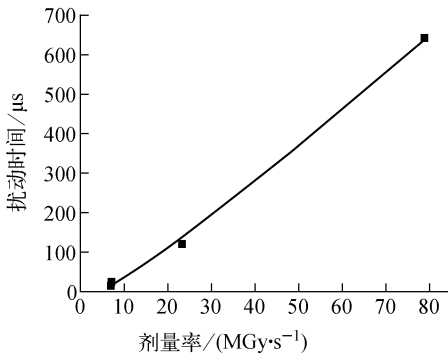


图 4 瞬时扰动下扰动时间随剂量率的变化

Fig. 4 Disturbance versus dose rate under transient disturbance

3.2 微控制器的剂量率闭锁效应

在剂量率为 1.3×10^8 Gy/s 时,微控制器在 γ 脉冲作用下发生剂量率闭锁效应,IO 端口和 PWM 的波形分别如图 5a 和 c 所示,图 5b 和 d 分别是 IO 端口和 PWM 的波形干扰脉冲的局部放大图。由图 5a 可知,在 γ 脉冲来时,P1.0 处于高电平,P1.1 处于低电平,剂量率闭锁造成两路信号均钳位于高电平。图 5b 表明,P1.0 的干扰脉冲幅度为 4 V。由图 5c 和 d 可

看出, γ 脉冲给 PWM 造成幅度为 10 V 的瞬态干扰信号,剂量率闭锁效应造成其衰减为低电平。当微控制器闭锁时,系统的功耗电流维持在 0.95 A,不能与计算机进行串行通信,上位机无法测试 EE80C196KC20 的 CPU 执行指令的能力、AD 转换结果寄存器及寄存器 RAM 数据状态,对 EE80C196KC20 的软件和硬件复位均无效,只能断电后重新上电使其功耗电流、IO 端口和 PWM 的波形及通信功能恢复。

3.3 微控制器系统功耗电流随剂量率的变化

图 6 示出了整个测试系统的功耗电流与剂量率的变化,其变化反映了 γ 瞬时脉冲作用于微控制器 EE80C196KC20 所产生的光电流。系统正常的功耗电流为 0.27 A,在剂量率为 2×10^8 Gy/s 时,系统的功耗电流可达 0.95 A。从图 6 可看出,在低剂量率下,光电流近似正比于剂量率,在高剂量率下,光电流趋于饱和。需指出的是,在剂量率低于闭锁阈值 1×10^8 Gy/s 时,图中电流为系统的瞬时峰值电流,在扰动过后能恢复正常;在剂量率高于闭锁阈值时,图中电流为闭锁时系统的持续电流,只有断电后重新上电才能恢复正常。

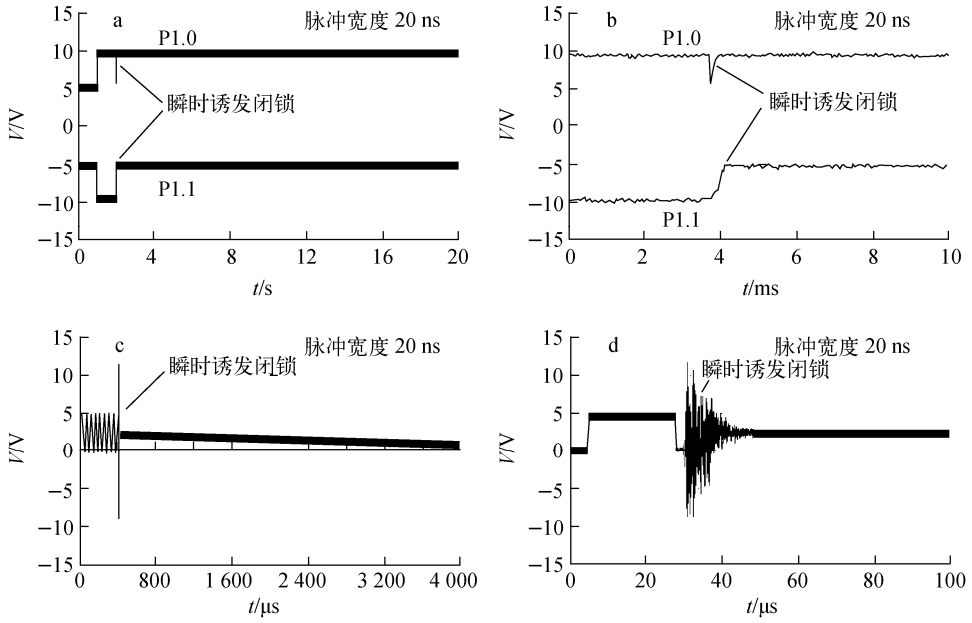


图5 瞬时诱发闭锁效应下的波形

Fig. 5 Waveform of IO port and PWM under transient-induced latchup effect

a— IO 端口波形; b— IO 端口局部放大波形; c— PWM 波形; d— PWM 局部放大波形

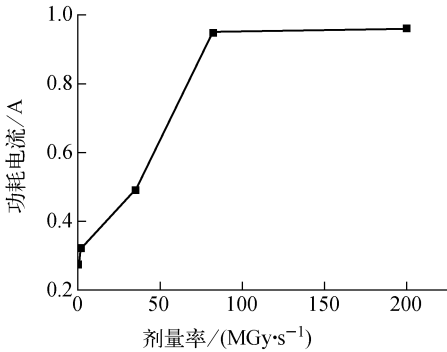


图6 系统功耗电流随剂量率的变化

Fig. 6 System power supply current versus dose rate

4 实验结果分析

微控制器 EE80C196KC20 采用的是体硅 CMOS 工艺,隔离阱结面积较大,瞬时电离辐射在隔离阱中电离出电子空穴对,产生的光电流均匀分布在隔离阱中,比 MOS 晶体管的源和漏结产生的电流大得多,是 CMOS 器件光电流的主要来源^[8]。在较低的剂量率作用下,EE80C196KC20 发生剂量率扰动效应,引入的光电流导致微控制器电路的电学参数发生突然变化,无法正常执行指令,输出波形发生强烈扰动。感生光电流正比于剂量率,持续时间比 γ 脉冲有很大的扩展,在该实验中达到百微秒量

级,这是造成微控制器扰动时间比 γ 脉冲宽度大得多的原因。从实验得到的数据来看,扰动时间与剂量率近似成正比关系,说明光电流的持续时间决定了微控制器的扰动时间。在 γ 脉冲的剂量率低于闭锁阈值时,产生的光电流的强度较低,不能造成寄生晶体管导通,对微控制器电路造成的影响只是暂时的,光电流衰减之后恢复正常。

在高剂量率作用下,该微控制器发生剂量率闭锁效应,这与体硅 CMOS 电路的寄生 pnpn 结构有关。正常工作时,pnpn 路径处于高阻断开状态,但高剂量率的瞬时电离辐射感生的光电流会引起可控硅效应^[9-10],该效应通常造成 pnpn 路径处于低阻状态,在电路电源和地之间形成几乎短路的低阻状态,并在辐照后保持该低阻状态,造成电路的永久失效,即产生了闭锁效应。产生闭锁主要有 3 个必要条件:寄生的 npn 和 pnp 双极晶体管的电流增益乘积大于闭锁要求的最小值;pnpn 结构处于正偏,该情况下寄生的 npn 和 pnp 晶体管的发射极-基极结具有正向电势降,能引起寄生晶体管的导通;电源能向 pnpn 四层结构提供的电流大于闭锁维持电流。在 CMOS 器件中存在 3 种类型的闭锁通路,分别是反相器闭锁通路、输

入保护电路的闭锁通路和传输门闭锁通路,3种通路对电流增益乘积和维持电流的要求依次降低,具有不同的闭锁阈值。剂量率越高,形成的闭锁通路越多,造成的芯片的闭锁电流越大。实验中的微控制器是在满足最低闭锁条件的情况下发生的闭锁效应,即传输门闭锁通路发生闭锁。一般,闭锁效应与电路工艺结构的关系很大,不存在寄生 pnpn 结构的电路,如 SOI 电路、SOS 电路和加固介质隔离的双极电路,对瞬时电离辐射闭锁效应不敏感^[11]。

5 结论

以 INTEL 公司生产的商用微控制器 EE80C196KC20 为研究对象,研究了其在不同剂量率的瞬时电离辐射作用下的辐射效应。根据辐射损伤等级的不同,低剂量率的瞬时电离辐射造成微控制器发生剂量率扰动,高剂量率的瞬时电离辐射造成微控制器发生剂量率闭锁,闭锁阈值为 1×10^8 Gy/s。瞬时电离辐射引入光电流是微控制器瞬时辐射效应的基本机制,光电流波形由 γ 脉冲和电路响应所决定。在剂量率较低时,产生的光电流较小,造成电路的扰动,扰动时间随剂量率的增加而增大,在扰动时间内微控制器的功耗电流变大,IO 端口和 PWM 的波形失效,与上位机的通信中断,在扰动过后均自行恢复正常。在剂量率较高时,产生的光电流较大,形成持续的大的功耗电流,造成微控制器的闭锁,IO 端口和 PWM 的波形失效,与上位机的通信中断,且不能通过软件和硬件复位,只有断电后重新上电才能恢复正常。

参考文献:

- [1] WIRTH J L, ROGERS S C. The transient response of transistors and diodes to ionizing radiation[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1964, 11(5): 24-38.
- [2] RAYMOND J P, WILLIS J. Generalized model analysis of ionizing radiation effects in semiconductor devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1965, 12(5): 55-68.
- [3] HABING D H, WIRTH J L. Anomalous photocurrent generation in transistor structures[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1966, 13(6): 86-94.
- [4] BOWMAN W C, CALDWELL R S, JOHNSTON A H, et al. Transient radiation response mechanism in microelectronics[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1966, 13(6): 309-315.
- [5] JÖNSSON M, MATTSSON S. Transient radiation response of VLSI circuits: Shadowing effects and pulse widths dependence in laser measurements[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1991, 38(6): 1 429-1 433.
- [6] KIRGIZOVA A V, NIKIFOROV A Y, GRIGOR'EV N G, et al. Dominant mechanisms of transient-radiation upset in CMOS RAM VLSI circuits realized in SOS technology[J]. Russian Microelectronics, 2006, 35(3): 162-176.
- [7] 周开明, 谢泽元, 杨有莉. 瞬时电离辐射对 80C31 单片机性能的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 981-984.
ZHOU Kaiming, XIE Zeyuan, YANG Youli. Influence of transient radiation for the behavior of the 80C31 single-chip microcontrollers [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6): 981-984(in Chinese).
- [8] ALEXANDER D R. Transient ionizing radiation effects in devices and circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(3): 565-582.
- [9] GREGORY B L, SHAFER B D. Latch-up in CMOS integrated circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1973, 20(6): 293-299.
- [10] KER M D, HSU S F. Physical mechanism and device simulation on transient-induced latchup in CMOS ICs under system-level ESD test [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(8): 1 821-1 831.
- [11] HARGROVE M J, VOLDMAN S, GAUTHIER R, et al. Latchup in CMOS technology[C]//Reliability Physics Symposium Proceedings, 36th Annual, 1998 IEEE International. [S. l.]: [s. n.], 1998: 269-278.