

# EE80C196KC20 单片机 $\gamma$ 辐射总剂量效应

金晓明<sup>1, 2</sup>, 范如玉<sup>1, 2</sup>, 陈伟<sup>2</sup>, 杨善潮<sup>2</sup>, 林东生<sup>2</sup>

(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:** 建立商用 16 位单片机 EE80C196KC20 辐射效应在线测试系统, 利用  $^{60}\text{Co}$  源在 20 rad (Si) /s 的剂量率条件下研究了电离辐射的失效模式和敏感参数。实验获得了单片机的失效阈值, 得到了功耗电流、I/O 输出、PWM 输出随总剂量的变化规律, 从工艺和电路结构分析了敏感参数变化的物理机理, 对抗辐射加固设计有重要意义。

**关键词:** 电离辐射; 微处理器; 功耗电流; 电平漂移

**中图分类号:** TN431; TN792      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0528-05

## Gamma Irradiation Induced Total Dose Effects of EE80C196KC20 Single Chip Microprocessor

JIN Xiao-ming<sup>1, 2</sup>, FAN Ru-yu<sup>1, 2</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>,  
YANG Shan-chao<sup>2</sup>, LIN Dong-sheng<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** An on-line test system of single chip microprocessor EE80C196KC20 for total ionizing dose radiation effects was presented. The total ionizing dose exposure was performed using a  $^{60}\text{Co}$  irradiator at a dose rate of 20 rad(Si)/s. The degradation process and sensitive parameters were investigated in detail. The failure dose threshold was obtained and the results show that the supply current and output voltage of I/O port and PWM change versus total ionizing dose regularly. The degradation mechanism was discussed associated with fabrication technology and circuit conformation and is significant for radiation hardness assurance.

**Key words:** ionizing irradiation; single chip microprocessor; supply current; voltage shifts

随着航天技术和微电子技术的发展, 先进的电子系统的应用日益广泛, 可靠性和稳定性一直是关注的重点和热点问题。在航天的辐射环境中, 电离辐射总剂量效应会对电子器件的电性能造成影响, 甚至造成功能失效。单片机集成了计算机的基本功能, 特别适用于实时控制、数据采集、信号处理, 在电子系统

中的应用日益广泛。CMOS 单片机对电离辐射十分敏感, 其总剂量效应一直受到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。开展单片机总剂量效应的实验和理论研究, 对了解其辐射性能和进行抗辐射加固设计有着重要的意义。

本文以 INTEL 公司生产的 16 位 CMOS 工艺单片机 EE80C196KC20 为研究对象, 设计

用于辐射效应研究的远距离在线测试系统, 用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对其电学参数和功能特性进行测试。由于辐射总剂量达到了 100 krad (Si), 得到了单机电离辐射总剂量效应敏感参数完整的退化过程。由总剂量效应的物理机理可知电离辐射在  $\text{SiO}_2$  中产生感生陷阱电荷在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面产生感生界面态电荷, 造成了 MOSFET 阈值电压漂移、漏电增加、迁移率降低<sup>[4-5]</sup>, 本文在电路结构基础上分析由此造成的芯片电参数的变化。

## 1 测试原理和实验方法

### 1.1 测试系统

采用商用 INTEL 生产的 CHMOS 工艺单

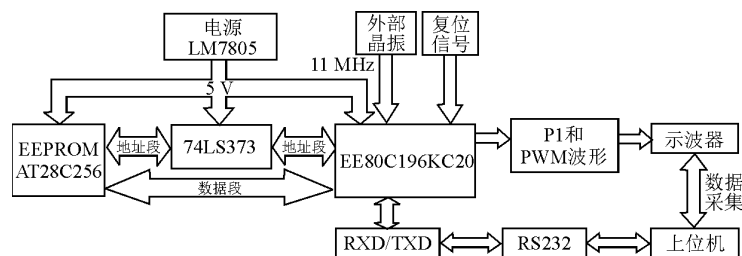


图 1 EE80C196KC20 辐射效应测试系统

Fig. 1 Radiation effects test system of EE80C196KC20

### 1.2 辐射模拟源

辐照实验在西北核技术研究所的  $^{60}\text{Co}$  放射源上进行, 该放射源产生 1.17 和 1.33 MeV 的  $\gamma$  射线, 辐射剂量率为 20 rad (Si) /s。在辐照过程中, 用铅砖对单片机的外围芯片进行屏蔽, 只对单片机进行辐照, 记录单片机的电参数和功能参数随电离总剂量的变化情况, 得到单机电离辐射效应的敏感参数和退化规律。实时记录单片机的工作电流、功能状态、I/O 和 PWM 的波形输出。

## 2 实验结果与分析

EE80C196KC20 对  $\gamma$  射线引起的电离效应十分敏感, 随着电离总剂量的累积, 单片机在 8 krad (Si) 时功耗电流发生明显增长, 即电参数开始退化。当总剂量达到 12 krad (Si) 时,

单片机的 EE80C196KC20, 建立单片机最小系统, 包括锁存器 74LS373、程序存储器 EEPROM、电源、晶振、复位电路, 利用 RS232 电路实现单片机和个人计算机的串行通信, 其电路原理图如图 1 所示。用上位机对单片机的内部 RAM、运算功能、逻辑功能和 AD 转换结果进行测试。利用定时器 1 溢出中断设计了 I/O 端口 P1 输出周期为 180 ms 的方波信号, 并在程序段的初始化设计中使 P1 口的 8 路输出高低电平相隔。配置 PWM 特殊功能寄存器, 使 PWM 端口输出周期为 46.3  $\mu\text{s}$  的方波信号。辐照过程中实时测试单片机的功耗电流, 用示波器记录 P1 口的两路输出 P1.0 和 P1.1 及 PWM 输出的信号。

单片机和上位机之间的串行通信失效, 上位机不能继续测试单片机的内部 RAM、计算和逻辑功能以及 AD 转换功能, 此时, P1 端口的两路输出 P1.0 和 P1.1 在功能失效后输出箝位在固定电平, 由于两路输出在设计中反相, 失效时, 其中一路处于高电平, 另一路处于低电平。分析可知, 单片机在 12 krad (Si) 时不能继续执行程序存储器中的指令, 因此, 不能将数据发送给上位机, 也不能对上位机发送的数据作出响应, 表现为串口通信功能的失效, 同时, 由于无法执行定时器溢出中断程序导致 P1 端口的波形消失。PWM 波形不需要 CPU 执行指令来触发, 故依然有波形输出, 最终在总剂量达到 30 krad (Si) 时, 由于单片机内部时钟发生器失效, 即时钟信号的丢失造成了 PWM 输出波形的失效。总之, EE80C196KC20 的电参数失效的

总剂量为 8 krad (Si), 功能失效的总剂量为 12 krad (Si), 时钟发生器失效的总剂量为 30 krad (Si)。

### 2.1 功耗电流

图 2 为两个样本的功耗电流随着总剂量的变化曲线。在总剂量达到 8 krad (Si) 时, 功耗电流随着总剂量的增加开始迅速增长, 在 12 krad (Si) 之前增长率从 0 开始不断增大。总剂量在 12~20 krad (Si) 之间时, 功耗电流随着总剂量近似线性增加, 增长率为  $9.7 \times 10^{-6}$  A/rad (Si)。在 20 krad (Si) 之后, 增长率逐渐减小至 0, 在 100 krad (Si) 时达到饱和值 0.192 A。图中两条功耗电流曲线在约 30 krad (Si) 时突然降低, 为单片机时钟信号丢失所致, EE80C196KC20 正常工作的功耗电流与时钟频率成线性关系, 故单片机在丢失工作频率后功耗电流会突然降低。EE80C196KC20 单片机是 CHMOS 工艺的大规模集成电路, 电离辐射的敏感区为 MOSFET 的场氧和栅氧部分。当受到电离辐射时, 短期内主要是氧化物陷阱电荷造成了晶体管电特性的退化。场氧和栅氧区靠近硅衬底区域会逐渐累积陷阱空穴, 空穴密度随着总剂量和氧化层厚度乘积的增加而增大<sup>[6-7]</sup>, 场氧隔离层由于厚度较大, 陷阱空穴的密度较大。陷阱空穴导致晶体管阈值电压负向漂移, 在总剂量较小时, 漂移量近似正比于总剂量和氧化层厚度的平方。因此, 场氧寄生晶体管的阈值电压变化大于栅氧晶体管。以 NMOSFET 为例, 处于截止状态时栅极偏置为 0, 随着总剂量的累积, 阈值电压不断发生负漂移, 晶体管从截止状态向导通状态转变。由图 2 中功耗电流的效应曲线可知, 在 8 krad (Si) 之前, 陷阱空穴引起的阈值电压漂移不足以引起场氧和栅氧晶体管的导通, 故功耗电流不增长。当总剂量达到 8 krad (Si) 之后, 场氧寄生晶体管开始陆续导通<sup>[8]</sup>, 源漏之间形成了一条寄生低阻漏电通道, 低阻通道的形成造成功耗电流不断增加。当总剂量继续增加时, 栅氧晶体管的阈值电压也降

到 0 以下, 场氧和栅氧晶体管均陆续导通, 从而造成了功耗电流的进一步增长。当总剂量足够高之后, 场氧和栅氧中的陷阱基本全被空穴占据而达到饱和, 阈值电压漂移至极限值, 不再产生新的低阻通道, 故功耗电流达到饱和值。

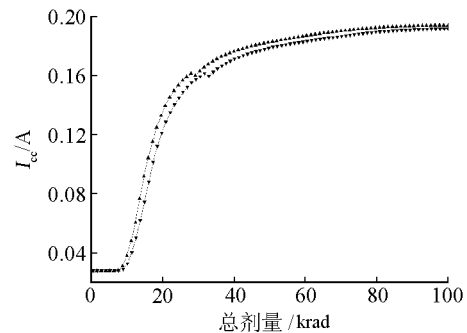


图 2 功耗电流随总剂量的变化

Fig. 2 Supply current versus total ionizing dose

### 2.2 P1 口输出电平

随着总剂量的增加, P1 输出电平也会发生漂移, 高电平发生负向漂移, 低电平略微正向漂移, 两个样本的 P1 口高电平和低电平随总剂量的变化分别示于图 3。EE80C196KC20 的 P1 口的电路图如图 4 所示, 其中 P1~P3 是 3 个 p 型沟道增强型 FET, N 为 n 型沟道增强型 FET。P1 口作为输出口使用时, 若 CPU 向端口发送的数据为 0, 即端口锁存器  $Q=1$ , N 导通, P1 和 P2 截止, P3 的栅极上为端口经反相器的信号, 也为 1, 故 P3 也截止。若 CPU 向端口发送数据 1, 即端口锁存器  $Q=0$ , 使 N 截止, P2 导通, P2 产生微弱的上拉作用。在两个振荡周期内因延时线的作用或门输出 0, P1 保持导通, 使端口很快拉向高电平。两个振荡周期之后 P1 由导通变为截止, 而此时反相器输出 0 使 P3 导通, 对外提供源电流。故由所述可知, P2 和 P3 构成了内部上拉电阻的固定部分, P1 在端口由 0 改写为 1 时起迅速上拉作用。

电离辐射引起电路中 FET 管阈值电压的负向漂移。当 P1 口输出高电平时, P1 和 N 截止, P2 和 P3 导通。当辐射在 FET 管的场氧和栅氧区建立的氧化物陷阱电荷不断增加时, P1 的阈

值电压将更负, 始终保持截止状态, 而 P2 和 P3 会由导通状态向截止状态变化, N 会由截止状态向导通状态变化, 可认为 P2 和 P3 的电导不断减小, N 的电导逐渐增大, 因此, P1 口输出的高电平会不断降低。最后, 由于 P2 和 P3 的截止以及 N 的导通, P1 口输出变为低电平, 这解释了图 3 中电平随着总剂量的变化规律, 故单片机的高电平是电离辐射的敏感电参数。当 P1 口输出低电平时, N 处于导通状态, P1、

P2 和 P3 处于截止状态。当电离辐射导致 FET 的阈值电压发生漂移时, 晶体管的导通截止状态不会发生改变, 故经理论分析可知, 单片机的低电平不是特别敏感的电参数。实验中观察到, P1 口的电平随总剂量的增加略微升高, 可能是在长线测试中由电流增加造成的影响, 另一个原因可能是由于电离辐射导致 N 沟道电子迁移率降低<sup>[9]</sup>, 即 N 的电导降低, 使得 P1 口的电平略微升高。

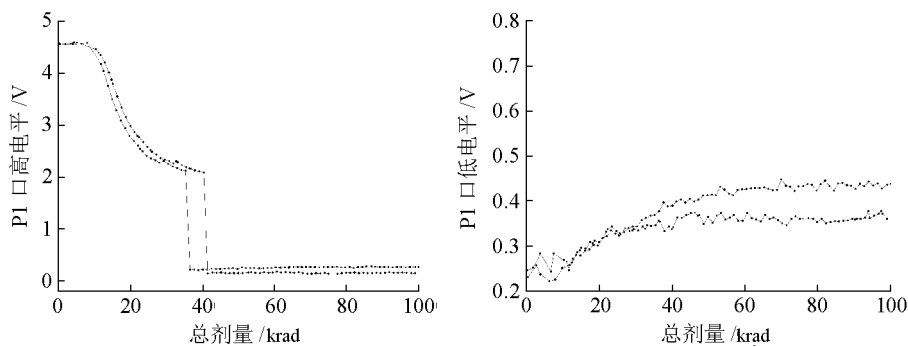


图 3 P1 口高、低电平随总剂量的变化

Fig. 3 High and low voltage of P1 versus total ionizing dose

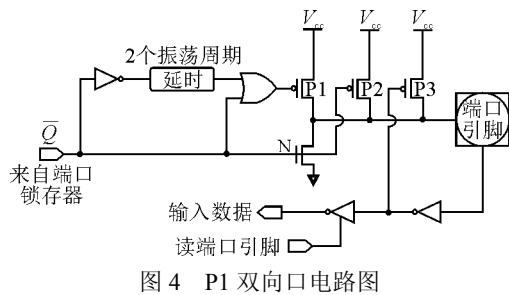


图 4 P1 双向口电路图

Fig. 4 Circuit diagram of bidirectional I/O port 1

### 2.3 PWM 输出电平

PWM 输出波形不需 CPU 执行指令来维持, 其波形由相应的配置寄存器决定, 在单片机时钟信号丢失时箝位在固定电平。失效前时钟信号的频率会发生跳变, 导致 PWM 波形的频率也发生跳变。与 P1 口高电平类似, PWM 高电平也发生了负向漂移效应, 如图 5 所示。

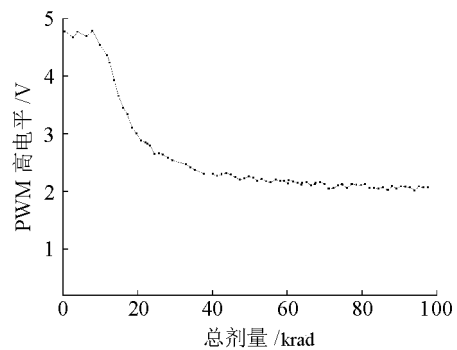


图 5 PWM 高电平随总剂量的变化

Fig. 5 High voltage of PWM vs total ionizing dose

### 3 结论

CMOS 电路的辐射损伤的基本机理是辐

射感生氧化物陷阱电荷和界面态电荷引起的 MOSFET 性能变化。一般来讲, 短时间的辐照最先形成的是氧化物陷阱电荷, 而界面态电荷的生长时间相对较慢。对于 EE80C196KC20, 功耗电流、P1 端口、PWM 输出电平是电离辐射总剂量效应的敏感参数。累积到一定的总剂量后功耗电流开始增加, 分为保持不变、加速增

长、线性增长、减速增长、饱和 5 个阶段。功耗电流的变化与 MOSFET 场氧隔离区和栅氧区电荷建立密切相关,寄生晶体管和主晶体管在辐射作用下由截止变为导通,在电路中不断形成低阻通道,是造成功耗电流增加的原因。P1 和 PWM 输出的高电平随总剂量增加而减小,低电平随着总剂量的增加而增大,是由 MOSFET 性能变化或开关特性的改变引起电路状态的改变。

#### 参考文献:

- [1] SHAW D C, LEE C I. Radiation evaluation of the 80C186 16-bit microprocessor utilizing an in-circuit emulator for in-situ electrical biasing and characterization[J]. IEEE NSREC Workshop Record, 1995: 60-63.
- [2] HASS K J, TREECE R K, GIDDINGS A E. A radiation-hardened 16/32-bit microprocessor[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1989, 36(6): 2 252-2 257.
- [3] SCHINICHI Y, HIROSHI K, MASATSUGU A. A radiation-hardened 32-bit microprocessor based on the commercial CMOS process[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 481-2 486.
- [4] OLDHAM T R, MCLEAN F B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(3): 483-499.
- [5] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FLEETWOOD D M, et al. Radiation effects in MOS oxides [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, 55(4): 1 833-1 853.
- [6] KRANTZ R J, AUKERMAN L W, ZIETLOW T C, et al. Applied field and total dose dependence of trapped charge buildup in MOS devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1987, 34(6): 1 196-1 201.
- [7] VIESWANATHAN C R, MASERJIAN J. Model for thickness dependence of radiation charging in MOS structures[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1976, 23(6): 1 540-1 545.
- [8] BRISSET C, CAVROIS V F, FLAMENT O, et al. Two-dimensional simulation of total dose effects on NMOSFET with lateral parasitic transistor[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(6): 2 651-2 658.
- [9] SCARPULLA J, AMRAM A L, GIN V W, et al. Gate size dependence of the radiation-produced charged in threshold voltage, mobility, and interface state density in bulk CMOS[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(6): 1 990-1 997.