

大规模集成电路浮栅 ROM 器件总剂量辐射效应

何宝平^{1,2,†} 周荷琴¹ 郭红霞² 周 辉² 罗尹虹² 姚志斌² 张凤祁²

(1 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(2 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 提出了一种大规模集成电路总剂量效应测试方法: 在监测器件和电路功能参数的同时, 监测器件功耗电流的变化情况, 分析数据错误和器件功耗电流与辐射总剂量的关系. 根据该方法利用⁶⁰Co 射线进行了浮栅 ROM 集成电路(AT29C256)总剂量辐照实验, 研究了功耗电流和出错数量在不同 射线剂量率辐照下的总剂量效应, 以及参数失效与功能失效时间随辐射剂量率的变化关系, 并利用外推实验技术预估了电路在空间低剂量率环境下的失效时间.

关键词: 大规模集成电路; 总剂量效应; 低剂量率; 失效时间

PACC: 6180E; 7340Q

EEACC: 2560R

中图分类号: TN386. 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0121-05

1 引言

目前我国航天器上已经大量使用大规模集成电路, 然而, 空间辐射环境中的带电粒子和电子产生的电离总剂量效应会导致大规模集成电路功能异常, 严重影响航天器的可靠性及在轨寿命. 近年来, 大规模集成电路的总剂量辐射效应一直是国外辐射效应研究领域的热点^[1,2], 国内在小规模电路的效应机理、实验测量以及模拟方法等方面取得了一定的成绩^[3~6]. 我们以往的总剂量效应研究都是针对中小规模集成电路, 特别是门电路, 大规模集成电路(存储器和 CPU 等)的总剂量效应如何测试, 抗总剂量水平如何评价, 这些都是需要解决的问题. 国外尚无统一规范的实验方法, 目前国内对于大规模集成电路的总剂量效应研究尚处于探索阶段.

大规模集成电路浮栅 ROM 器件(主要是 FLASH ROM 和 EEPROM)在单一的工作电压下, 就可以完成读出、擦除和写入功能, 克服了原有只读存储器(ROM)的不足; 而且和静态随机存取存储器(SRAM)相比, 其存储的数据是非挥发性的, 即使掉电, 也不会丢失数据. 因此, 浮栅 ROM 集成电路已被广泛应用于包括航天器在内的各领域的电子系统中, 开展浮栅 ROM 集成电路的总剂量辐射效应研究具有重大的现实意义和应用价值. 本文给出了初步的大规模集成电路总剂量效应的测试方法, 并利用该方法对大规模集成电路浮栅 ROM 器件总剂量

辐射效应进行了研究.

2 总剂量效应测试方法

总剂量效应一个重要的敏感参数就是阈值电压, 对于门电路、反相器等中小规模集成电路, 主要测试其阈值电压随辐照剂量的变化. 对于单个晶体管, 可以得到氧化物陷阱导致的阈值电压漂移量和界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移量. 然而, 对于由成千上万只 nMOS 和 pMOS 晶体管组成的大规模集成电路, 仅有几十个管脚, 目前尚无有效的方法来测量某个晶体管的阈值电压. 因此, 适用于小规模集成电路的总剂量效应测试方法无法应用于大规模集成电路. 如果许多 nMOS 晶体管的准静态电流增大, 就会导致器件的功耗电流增大. 随辐射电离总剂量的继续增加, 阈值电压漂移越来越大, 原本应该截止的晶体管导通(或相反)时, 器件会出现逻辑功能错误, 引起数据错误或运算错误.

浮栅 ROM 集成电路的集成度高, 采用传统的方法测量内部某个晶体管的敏感参数(如阈值电压)不太容易, 因此我们提出初步的总剂量效应测试方法: 在线监测器件和电路功能参数的同时, 监测器件功耗电流的变化情况. 器件在进行辐照前, 每个字节写入数据, 在辐照过程中循环读取存储单元中的数据, 与辐照前作比较, 记录出错单元, 统计出错类型和数量, 同时监测器件功耗电流的变化情况, 分析数据错误和器件功耗电流与辐射总剂量效应的变化关

†通信作者. Email: baopinghe@126.com

2005-08-14 收到, 2005-09-25 定稿

系.

3 辐射实验

辐照实验是在西北核技术研究所的 4000 居里 Co-60 源上进行,辐照温度为室温,利用 UNIDOS 剂量仪标定的辐照剂量率有:50rad(Si)/s,16.56rad(Si)/s,2.93rad(Si)/s,0.26rad(Si)/s 四种.实验电路为浮栅 ROM 集成电路 AT29C256,分两类:一类为 AT29C256(9911),另一类为 AT29C256(9939).辐照前每个字节写入数据“55H”,即:“0”与“1”相互间隔.在加电(+5V)状态下辐照,用存储器辐照效应测试系统和电流测试系统动态连续、实时监测被测电路的功能和功耗电流的大小,实时读取数据,统计出错单元的数量和功耗电流值,辐照结束后,继续室温在线监测半小时.

4 实验结果

4.1 总剂量辐射效应

我们根据以往的研究了解到,受辐射的非加固 CMOS 器件,能够在栅氧化层中诱导产生氧化物陷阱电荷累积,这种累积的电荷能够引起 CMOS 晶体管阈值电压发生漂移.但是,辐射同样也会在场氧化层中发生氧化物陷阱电荷的积累,这样的电荷积累导致器件漏电情况增加.因此,对于许多非加固的集成电路来讲,功耗电流是一个敏感的辐射损伤参数.实验中,我们把功耗电流作为浮栅 ROM 集成电路一个辐射敏感参数,来研究其总剂量辐射效应.同时,利用存储器测试系统实时、在线监测集成电路出错数量与辐照剂量的变化,研究电路功能与辐照剂量的关系.图 1,2 分别给出了浮栅 ROM 集成电路 AT29C256 在不同剂量率辐照下,功耗电流和出错数量随时间的变化关系.因为集成电路辐照后第一个测量点的功耗电流与辐照前相比,基本没发生什么变化,它可以反映电路辐照前的电流情况,故图 1 中没有给出辐照前的数据点.图 2 给出的是辐照后翻转数与时间的变化关系,因为辐照前电路的翻转数为零.

从图 1,2 中可以看出,剂量积累到一定程度,功耗电流逐渐增大,当电流增大到一定值时,出现数据错误.电路出现数据错误有个累积剂量阈值,当累积剂量小于某一个值时,无数据错误.当累积剂量达到一定值时,开始出现数据错误.随着累积剂量的增加,错误数量迅速增加.功耗电流和出错数量都随着辐照时间的增加而逐渐增加.这主要是因为辐射在浮栅及其周围的绝缘层内电离产生电子空穴对.

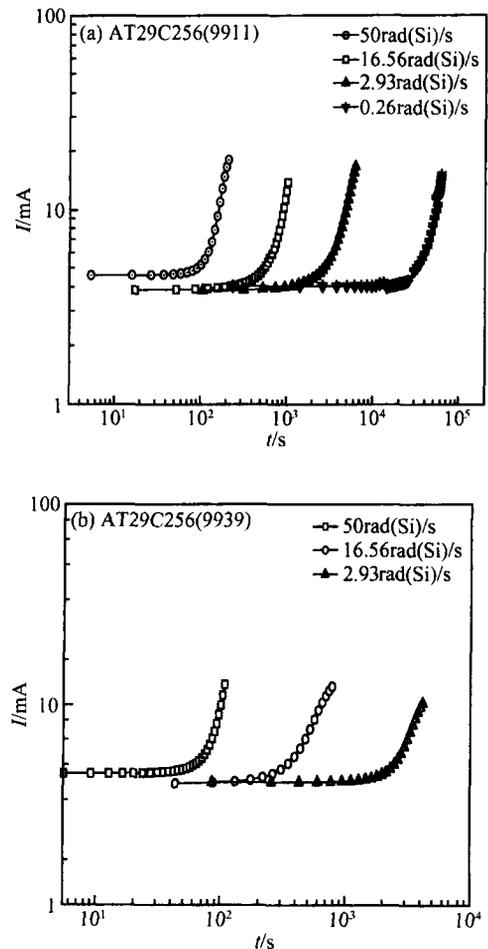


图 1 不同剂量率辐照下,功耗电流随辐照时间的变化
 Fig. 1 At radiation of different dose rates, AT29C256 supply current versus time

电子空穴在电场的作用下漂移,在界面处形成界面陷阱电荷,使晶体管的阈值电压向负方向漂移.当界面陷阱电荷积累到一定程度,使原来截止的晶体管导通,存储单元的状态发生变化,出现数据错误.由于界面陷阱电荷的积累需要一定的剂量积累,因此,错误的发生存在累积剂量阈值.随着累积剂量的增加,阈值电压漂移的晶体管数目增加,错误数量增加.刚开始出错时的错误单元和数据,错误数量及错误地址都不确定,即在某一时刻错误多,而在下一时刻,错误反而少了;某一单元在这一时刻出错,而在下一时刻却是正确的,出现不确定错误.这是由于阈值电压漂移量不大时,晶体管处于截止和导通的临界状态,没有使存储单元由一种状态彻底变为相反状态.在存储单元状态彻底改变之前的一段时间内,其状态是不确定的.

实验中发现 AT29C256 器件的数据错误全是由“0”变成“1”,这时候对应的浮栅晶体管由截止变为导通,导致功耗电流增大.这种由“0”变成“1”的现

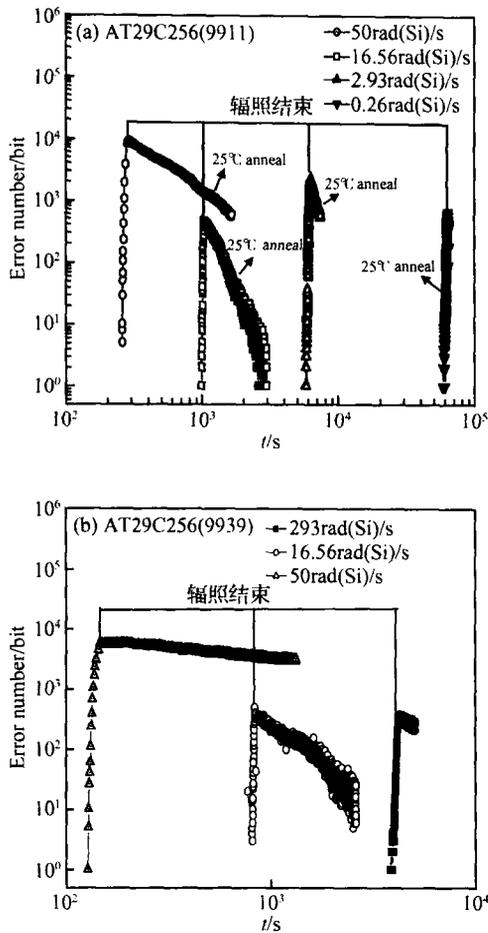


图 2 不同剂量率辐照下, 错误数量随辐照时间的变化
Fig. 2 At radiation of different dose rates, A T29C256 error number versus time

象随辐照时间的增加而增加, 所以功耗电流随辐照时间的增加而增加。

为了研究浮栅 ROM 器件 29C256 辐照后高温退火特性, 我们将剂量率 (50rad(Si)/s) 辐照失效的浮栅 ROM 29C256 器件置于 70 和 100 环境中进行高温退火, 实验结果如图 3 所示。比较图 2 和图 3, 一方面可以看出, 图 2 中 50rad(Si)/s 辐照结束时, 器件出错数约为 10^4 位, 而在 70 和 100 环境中开始退火时的出错数约为 10^3 位, 这主要是因为器件在室温放置 1h 后出现退火恢复效应所致。另一方面可以看出, 室温 25 环境下, 器件出错数随退火时间的增加而减少, 表现出明显的恢复效应, 而 100 环境下出错数恢复比 70 要快, 并且出错数开始随着退火时间的增加而增加, 退火 1000s 后, 出错数随退火时间的增加而开始减少, 对于这种高温退火异常的详细解释, 有待于进一步深入研究。

4.2 空间低剂量率效应预估

实验室条件下研究浮栅 ROM 集成电路

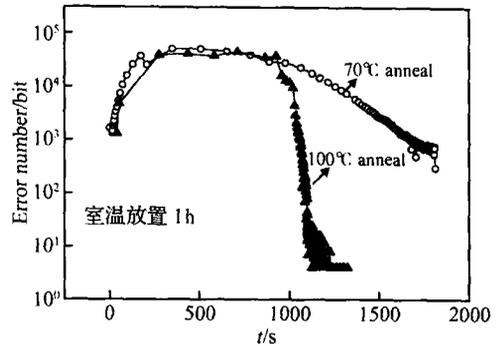


图 3 不同温度下, A T29C256 出错数量随退火时间的变化
Fig. 3 At 70 and 100 , A T29C256 error number versus anneal time

A T29C256 不同剂量率下的辐射响应, 目的是确定电路在剂量率降低的辐射响应趋向。本文介绍了一种利用实验室高剂量率辐射实验数据来外推空间低剂量率的辐射响应方法。该方法的主要思想是: 根据定义的失效判据, 将每一种剂量率辐射结果外推到失效定义值, 可以得到不同剂量率辐射下的失效时间。然后将失效时间拟合成剂量率的函数, 进而可以预估空间低剂量率的失效时间。在本研究中, 我们定义浮栅 ROM 集成电路 (A T29C256) 失效判据: 功耗电流超过 100mA 或者出错数超过 10% 为失效, 也就是说, 出错数超过 25600 为失效。图 4 (a), (b) 分别给出了 A T29C256(9911) 集成电路不同剂量率辐照下, 功耗电流和出错数的拟合、外推以及失效时间的提取过程。根据定义的失效判据, 我们将从图 4 (a)、(b) 中提取的在不同剂量率辐照下的失效时间进行拟合, 得到如下方程:

$$T = 10^{(A \lg D + B)} \quad (1)$$

其中 T 为失效时间; D 为辐照剂量率 rad(Si)/s, A, B 为常数。表 1 给出了拟合 A T29C256 (9911) 和 A T29C256 (9939) 实验数据, 满足方程 (1) 的 A, B 常数。

表 1 A T29C256(9911) 和 A T29C256 (9939) 满足方程 (1) 的常数 A, B

Table 1 Constant A and B of equation (1) for A T29C256 (9911) and A T29C256 (9939)

器件类型	A T29C256(9911)		A T29C256(9939)	
	A	B	A	B
按功耗电流拟合	- 0.967	4.643	- 1.620	5.486
按出错数量拟合	- 0.970	4.297	- 1.791	5.276

利用方程 (1) 和表 1 中的数据, 我们给出了浮栅 ROM 集成电路 A T29C256 失效时间随辐照剂量率的关系, 见图 5。对于典型的 10^{-3} rad(Si)/s 空间剂

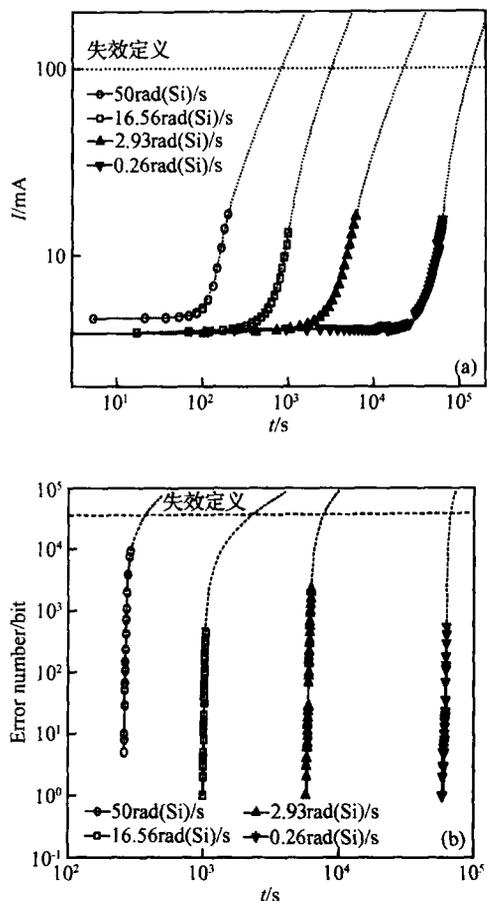


图 4 不同剂量率辐照下,实验数据的拟合和外推结果 (a) 功耗电流;(b) 出错数量

Fig. 4 Under different dose rate irradiation ,fitting and extrapolation of experimental data

量率环境, A T29C256 (9911) 电路按照功耗电流数据预估电路的失效时间约为 3.4×10^7 s,按照出错数预估电路的失效时间约为 2.0×10^7 s; A T29C256 (9939) 电路按照功耗电流数据预估电路的失效时间约为 2.2×10^{10} s,按照出错数预估电路的失效时间约为 4.4×10^{10} s.

5 结束语

上述研究表明,对于大规模集成电路浮栅 ROM 器件,采取在监测器件和电路功能参数的同时监测器件功耗电流变化这一方法是可行的,有利于分析大规模集成电路总剂量效应.而且在我们并不详细了解其辐射损伤机理的情况下,在实验室条件下根据不同剂量率辐射的功耗电流和出错数量,利用外推技术可以预估集成电路在空间低剂量率的辐射效应.

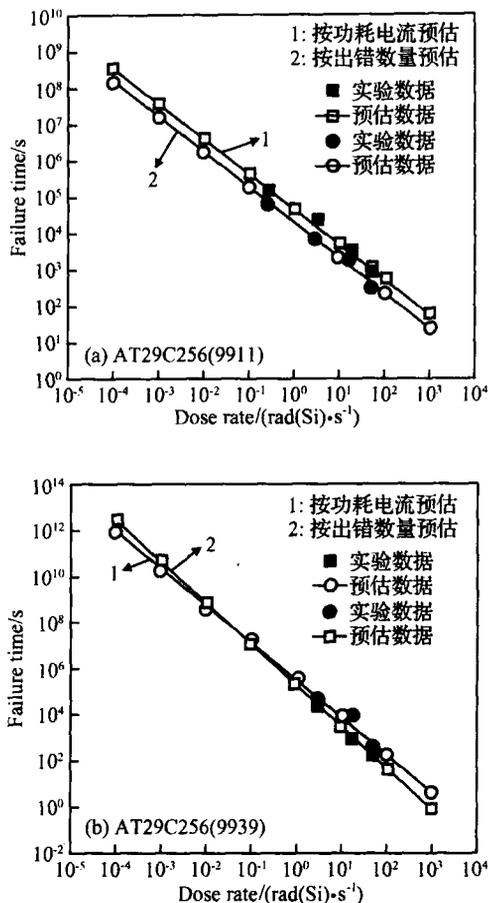


图 5 A T29C256 集成电路失效时间随辐射剂量率的变化
Fig. 5 Time to failure versus dose rate for A T29C256

参考文献

- [1] Nguyen D N, Guertin S M, Swift G M, et al. Radiation effects on advanced flash memories. IEEE Trans Nucl Sci, 1999, 46(6): 1744
- [2] Lelis A J, Murrill S R, Oldham T R, et al. Radiation response of advanced commercial SRAMs. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(6): 3103
- [3] Yao Yujuan, Zhang Zhengxuan, Jiang Jinghe, et al. Bias annealing of radiation induced positive trapped charges in metal oxide semiconductor transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(4): 378 (in Chinese) [姚育娟, 张正选, 姜景和, 等. MOS 晶体管中辐照引起的陷阱正电荷的强压退火. 半导体学报, 2000, 21(4): 378]
- [4] He Baoping, Gong Jiancheng, Wang Guizhen, et al. Isothermal and isochronal annealing characteristics in irradiated MOS devices. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(3): 302 (in Chinese) [何宝平, 龚建成, 王桂珍, 等. CMOS 器件的等时、等温退火效应. 半导体学报, 2004, 25(3): 302]
- [5] He Baoping, Yao Yujuan, Peng Honglun, et al. Influence of temperatures and radiation dose rate on CMOS device characteristic parameter. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(6): 779 (in Chinese) [何宝平, 姚育娟, 彭宏论, 等. 环境温

- 度、电离辐射剂量率对 NMOSFET 器件特性参数的影响. 半导体学报, 2001, 22(6): 779]
- [6] He Baoping, Wang Guizhen, Zhou Hui, et al. Predicting nMOS device radiation response at different dose rates in -

rays environment. Acta Physica Sinica, 2003, 52(1): 188 (in Chinese) [何宝平, 王桂珍, 周辉, 等. nMOS 器件不同剂量率射线辐射响应的理论预估. 物理学报, 2003, 52(1): 188]

Total Dose Effect of Large-Scale Integrated Circuit Floating Gate ROM Devices

He Baoping^{1,2,†}, Zhou Heqin¹, Guo Hongxia², Zhou Hui², Luo Yinhong²,
Yao Zhibin², and Zhang Fengqi²

(1 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(2 *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China*)

Abstract : A method for testing total dose effects is presented for VLSI. The consumption current of the device is measured. Meanwhile, the function parameters of the device and circuit are also measured. The relations between data errors, consumption current and total radiation dose are analyzed. Ionizing radiation experiments are performed on floating gate ROM devices by using ^{60}Co γ -rays as prescribed by this test method. The experimental aim is to examine the radiation response at various dose rates. The parameters and function failure of the devices as function of dose rate are studied. By extrapolation, we predict the failure time of a floating gate ROM device in a space radiation environment.

Key words : very large scale integrated circuits; total dose effect; low dose rate; failure time

PACC : 6180E; 7340Q **EEACC :** 2560R

Article ID : 0253-4177(2006)01-0121-05

†Corresponding author. Email: baopinghe@126.com

Received 14 August 2005, revised manuscript received 25 September 2005