

非易失性阻变存储器总剂量效应试验研究

常思远 杨生胜 文 轩 安 恒 王 鷁 曹 洲 银 鸿

(兰州空间技术物理研究所 空间环境材料行为与评价重点实验室 兰州 730000)

摘要 存储器作为航天器电子系统不可或缺的一部分,在航天应用中需要有良好的抗辐射能力。阻变存储器(Resistive Random Access Memory, RRAM)是一种新型的非易失性半导体存储器,性能优良,但对其辐射效应的研究较少。本文侧重于在理论分析的基础上,结合 ^{60}Co γ 射线辐照试验得到的结果对 RRAM 的总剂量效应失效机理进行分析研究。首先,通过对 RRAM 中单个 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)管总剂量效应的分析,提出器件失效机理的两个假设,然后对写入不同初始数据的器件进行有针对性的辐照试验,对不同累积剂量时存储器的数据读取功能和静态工作电流进行测量,统计得到的结果验证了假设的正确性。研究结果表明:RRAM 辐照敏感单元为存储阵列,RRAM 读取功能失效是由于 MOS 管在辐照下产生漏电流,导致读电路的电平输出状态改变而引起的。

关键词 阻变存储器, 总剂量效应, 理论分析, 辐照试验, 失效机理

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120502

Experimental study on the total ionizing dose effects of nonvolatile RRAM

CHANG Siyuan YANG Shengsheng WEN Xuan AN Heng WANG Yi CAO Zhou YIN Hong

(National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment,

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] As an indispensable part of spacecraft electronic systems, memory device is required to have good radiation resistance in aerospace applications. Resistive random access memory (RRAM) is a new type of non-volatile semiconductor memory with excellent performance, but little attention has been paid on its radiation effect research. [Purpose] This study aims to investigate the failure mechanism of RRAM total ionizing dose effects. [Methods] First of all, on the basis of theoretical analysis, combined with the results of ^{60}Co γ irradiation test. The total ionizing dose effect failure mechanism of a single metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) in RRAM was analyzed. Two hypotheses on the failure mechanism of the device were put forward. Then, irradiation experiments were carried out on devices with different initial data written, and the data reading function and static operating current of the memory under different cumulative doses were measured. [Results & Conclusions] The experimental results obtained by statistics verify the correctness of the hypothesis. The radiation sensitive unit of RRAM is the memory array, and the failure of the RRAM reading function is caused by the leakage current generated by the MOSFET under irradiation, which changes the level output state of the reading circuit.

Key words RRAM, Total ionizing dose effects, Theoretical analysis, Irradiation tests, Failure mechanism

空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室资助

第一作者: 常思远, 男, 1994 年出生, 2017 年毕业于哈尔滨工业大学, 现为硕士研究生, 研究方向为空间环境效应及控制

通信作者: 杨生胜, E-mail: 2syang@sina.com

收稿日期: 2020-09-11, 修回日期: 2020-11-12

Supported by National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment

First author: CHANG Siyuan, male, born in 1994, graduated from Harbin Institute of Technology in 2017, master student, focusing on space environmental effects and control

Corresponding author: YANG Shengsheng, E-mail: 2syang@sina.com

Received date: 2020-09-11, revised date: 2020-11-12

星载存储器是航天器电子系统的重要组成部分,在航天器飞行任务的完成中有着很重要的作用。在地球空间环境中,航天器在轨会遭遇来源于太阳辐射和星际空间辐射等辐射环境,包括粒子辐射和太阳电磁辐射,这些辐射环境受太阳活动的调制。其中,粒子辐射环境主要由电子、质子、少量的重离子等组成,主要来源于地球辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线。这样的辐射环境能够引发一些材料和器件的单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应、表面充放电效应和内带电效应等,从而引起材料和器件性能退化甚至功能失效^[1]。星载存储器除了要能够保证完成本身存储数据的功能外,还要能够适应恶劣的空间辐射环境。因此,对性能优良且适应空间辐射环境的存储器的探索就成为了一项重要工作。阻变存储器(Resistive Random Access Memory, RRAM)是一种利用阻变材料的阻变效应来实现数据存储的新型非易失性半导体存储器。作为一种新型的非易失性存储器,阻变存储器凭借其良好的微缩性、非易失性、与传统 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 工艺兼容、低功耗、较快的读写速度等特点在众多新型存储器中脱颖而出,被业内普遍看好,具有良好的发展前景和市场竞争力。然而,目前对于阻变存储器在空间环境中辐射效应的研究目前仍相对较少。RRAM 作为一种 MOS 工艺电子器件,应该优先考虑其在空间辐射环境中的辐射电离效应。关于阻变存储器辐射电离效应的研究,国外的相关研究已经表明:阻变存储器中的多数材料的阻变元件具有非常好的抗辐射性能,而对完整器件的研究相对较少;国内对阻变存储器的空间辐射研究尚处于探索阶段。在本次研究中,着重对阻变存储器在空间环境中的总剂量效应展开试验研究。首先,在选择好试验器件后,经过初步的理论分析对 RRAM 失效的机理作出假设,然后设计针对性的辐照试验,测量 RRAM 在不同辐照累计剂量时的功能,由试验结果验证 RRAM 失效机理假设的正确性。希望通过对 RRAM 总剂量效应失效机理的试验研究,能够为 RRAM 的抗辐射设计和辐射加固保证提供理论依据以及 RRAM 在空间环境中的应用提供实验依据。

1 阻变存储器工作原理

与人们较为熟知的 Flash 存储器利用 MOS 管栅极存储电荷的多少表示数字逻辑上的“1”和“0”不同,RRAM 具有全新的结构和存储原理。目前市场上主流的性能良好的 RRAM 是以 1T1R (One Transistor One Resistor) 结构(图 1)作为二进制存储

单元的,1T1R 结构的二进制存储单元由一个 MOS 管和一个阻变元件(resistor)组成,其中阻变元件存储二进制信息,MOS 管来作为选通管来控制阻变元件的状态,并将被选择的阻变元件隔离。一系列 1T1R 结构的存储单元通过字线和位线的电路连接组成存储阵列,再加上地址译码器和读/写控制电路等外围电路构成一块完整的阻变存储器。

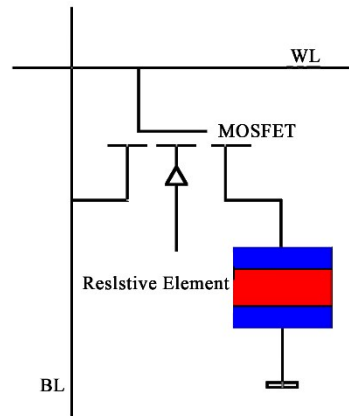


图 1 RRAM 中 1T1R 结构的二进制存储单元
Fig.1 Diagram of binary storage unit of 1T1R structure in RRAM

阻变元件由上下电极和中间的电阻转变层组成,如图 2 所示。

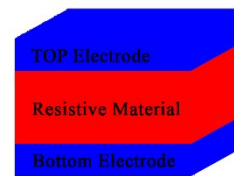


图 2 阻变元件结构
Fig.2 Structure diagram of resistive switching element

上下电极为金属或导电率较高的薄膜材料,中间电阻转变层为绝缘材料,该材料一般选用二元或者多元的氧化物,如 AlO_x 、 SiO_x 、 TaO_x 、 NiO_x 、 HfO_x 、 TaO_x 以及 WO_x ^[2]等,这些材料均对辐射总剂量效应不敏感^[3-6]。在 RRAM 中,通过其阻变元件中电阻转变层电阻值的高低状态来表示数字逻辑上的“0”和“1”,通常用高电阻值状态(High Resistance State, HRS)来表示逻辑“0”,而用低电阻值状态(Low Resistance State, LRS)来表示逻辑“1”。电阻转变层电阻值状态的改变是通过在阻变元件两端施加不同电压的电场而达到的。在施加 set 电压(V_{set})时,中间电阻转变层的电阻由高电阻值状态转变为低电阻值状态;在施加 reset 电压(V_{reset})时,电阻转变层的电阻由低电阻值状态转变为高电阻值状态。这样,电阻转变层高低电阻值状态的可逆变换就对应着数字逻辑上“0”和“1”的转变。另外,阻变元件在刚制备成

功时的初始状态为高电阻值状态,其阻值比HRS更大。所以,为了使阻变元件能够进入到高低阻态的可逆循环之中,需要在阻变元件两端施加一个电压大于 V_{set} 的forming电压($V_{forming}$)^[7-8]。RRAM正是充分利用了阻变元件的高低电阻值状态来存储二进制信息的。

表1 MB85AS4M 器件特征参数
Table 1 Characteristic parameters of MB85AS4M device

特性 Characteristic	典型值 Typical value
容量 Capacity	4 Mbits(524 288 words×8 bits)
串行接口 Serial interface	SPI
写缓存 Write cache	256 字节 256 Bytes
工作频率 Working frequency	5 MHz
数据重复写入次数 Number of data repeated words	1.2×10 ⁶ 次/字节 1.2×10 ⁶ Times/byte
工作电压 Operating voltage	1.65~3.6 V
工作电流 Working current	写入电流:1.3 mA Write current: 1.3 mA 读出电流:0.2 mA Read current: 0.2 mA 静态电流:10 μA Quiescent current: 10 μA

该器件由4 Mb存储阵列及外围电路组成,存储阵列周围的外围电路包括地址译码器、读/写控制电

2 试验研究器件选择

试验研究中选择的阻变存储器为日本富士通半导体公司的MB85AS4MT器件,该器件是一款较新发布的商业器件,器件中存储单元采用1T1R结构,阻变元件中阻变材料为HfO₂,对总剂量效应具有很好的免疫性,器件的特征参数如表1所示。

路和串行输入输出接口等模块,器件电路结构如图3所示。

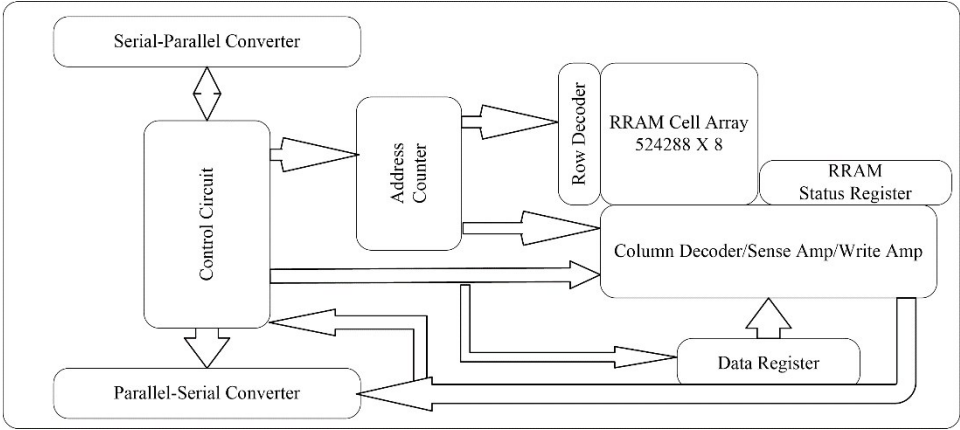


图3 MB85AS4MT 器件电路结构
Fig.3 Block diagram of MB85AS4MT device circuit structure

3 RRAM 总剂量效应试验及失效机理分析

3.1 RRAM失效机理初步分析

半导体存储器的电路实质是集成电路,通常包括几个具有不同功能的电路模块。每个电路模块都有可能受到辐射的影响发生电路性能退化或者功能失效,从而影响整个器件的性能或功能^[9-10]。对于半导体存储器辐射失效的分析,应找到失效发生的电路模块以及该模块电路发生失效的具体原因。RRAM的功能包括读取数据和写入数据,其性能包

括存储窗口、开关速度及耐受性等,这些都可能受到总剂量效应的影响,使性能退化或功能失效。其中,对RRAM读取数据功能的辐照试验相较而言更容易开展,而且,通过对读取数据功能失效的试验以及失效机理分析可以对器件的辐射效应形成本质上的认识,从而对RRAM其他功能失效以及性能退化机理的研究提供依据。所以本次试验以辐照下RRAM数据读取功能为主要测试对象。

RRAM器件包括存储阵列和外围电路两个部分。对于试验研究器件存储阵列部分,其二进制存储单元为1T1R结构,包括一个NMOS晶体管和一個阻变元件。已知阻变元件对总剂量效应不敏感,

那么器件的总剂量效应就应从MOS晶体管的总剂量效应着手考虑。当MOS器件被 γ 射线等辐照时,氧化层中会出现电子空穴对。这些电子空穴对一小部分会发生复合,其余的会通过扩散/漂移离开产生区域。在扩散/漂移过程中,部分发生复合,其余一部分中的空穴被氧化层陷阱和界面态陷阱俘获,形成氧化层陷阱电荷以及界面态陷阱电荷。其中,氧化层陷阱电荷引起阈值电压负向漂移,界面态陷阱电荷引起阈值电压正向漂移,但氧化物陷阱电荷密度大于界面态陷阱电荷密度,总体的结果是阈值电压负向漂移。同时,陷阱电荷的存在会使得导电沟道中载流子数目增多,产生漏电流。另外,存储阵列是基于NMOS集成电路工艺的,用于隔绝作用的场氧化层在总剂量效应的作用下,也会积累正电荷,进而在与场氧化层相邻的Si衬底表面反型形成新的漏电路径,产生漏电流。由于场氧化层相对于栅氧

化层厚很多,所以其产生的漏电流会相对大许多,栅氧化层和场氧化层在总剂量效应作用下产生的漏电流如图4中(1)和(2)所示^[11-14]。

在分析了单个MOS管的总剂量效应之后,展开RRAM存储单元总剂量效应的分析。首先,在1T1R结构的二进制存储单元中,MOS晶体管作为选通管,起到开关作用,阈值电压漂移可能会引起未被选取存储单元中MOS晶体管的异常打开,影响到对同一位线上被选取存储单元的正确读取;其次,产生的漏电流(1)和(2)升高到一定值时,会改变正常的读电流值,影响到电路正常电平的输出,进而引起对相关阻变元件阻态的误读。而MOS晶体管栅氧化层较之于场氧化层薄很多,因此可初步假设总剂量效应引起的阈值电压漂移对器件功能的影响不及漏电流对器件功能的影响。

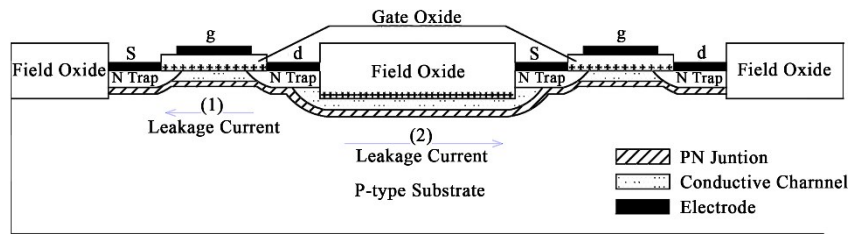


图4 总剂量效应作用下栅氧和场氧中产生的漏电流
Fig.4 Leakage current generated in gate oxygen and field oxygen under the effect of total dose

对于外围电路部分,外围电路中各功能电路地址译码器、读写控制电路等在辐射剂量达到一定程度时候,同样会因为其中的MOS管阈值电压漂移严重,漏电流过高失去其功能^[8]。但是,与存储阵列相比较,外围电路在工艺上没有较厚的场氧化层作为隔离层,不会产生比较大的漏电流。因此,可先假设RRAM总剂量效应辐照敏感单元为存储阵列部分,即存储阵列会先于外围电路发生功能失效。在上述假设中漏电流的产生是引起RRAM数据读取功能失效的原因,所以,在试验中还应测量RRAM器件的工作电流。

3.2 试验测试系统

本次试验测试系统为自主研发的针对MB85AS 4MT器件的辐射效应测试系统,为了能够测量器件的数据读取功能和静态工作电流,该测试系统具有以下功能:

- 1)可以在RRAM器件中写入数据;
- 2)可以读取在RRAM器件中写入的数据;
- 3)能够自动将每次读出的数据与初始写入的数据进行比对,统计错误地址及数量并记录;
- 4)能够实时读取器件的工作电流。

研制的测试系统基于STM32控制器实现,主要包括STM32微控制器、数据读写控制、网口通信等功能模块,实物图如图5所示。具体操作过程中,上位机输入读写指令,经网口通信进入STM32微控制器,对数据读写电路实现控制,监测存储器内部的数据逻辑状态变化。

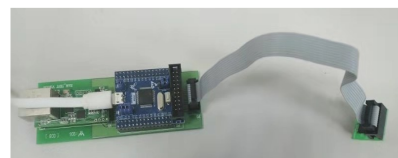


图5 RRAM总剂量效应试验测试系统
Fig.5 Test system for RRAM total dose effect

3.3 RRAM总剂量效应试验及失效机理分析

在RRAM总剂量效应试验中选用最常用的⁶⁰Co γ 射线源作为辐照源^[15],辐照剂量率按照典型的辐照剂量率选取,本次实验选用辐照剂量率为75 rad(Si)·s⁻¹。由于试验用的 γ 射线能量较低,不足以穿透器件的封装材料,在试验前需要对器件进行开盖处理,开盖处理后的器件用显微镜拍照得到的图片如图6所示。试验测试采用原位实时监测的方式。

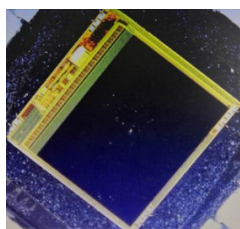


图6 MB85AS4MT 器件开盖处理后照片
Fig.6 Photograph of MB85AS4MT device after removing the cover

首先,考虑器件在总剂量效应下漏电流对器件数据读取功能的影响。试验中选择两块测试样品,分别记录他们的总剂量辐照试验结果,试验结束后统计试验数据,分析试验现象。

试验流程图如图7所示,具体试验流程如下:

1)试验前,初始化测试系统,并在样品中写入初始数据“55H(01010101)”;

2)确定辐射剂量率 $75 \text{ rad}(\text{Si}) \cdot \text{s}^{-1}$,开始辐照试验;

3)辐照过程中,累计辐照累计剂量每增加 $10 \text{ krad}(\text{Si})$ 时,测试系统循环读取数据,并与原始数据比较得到错误数据和地址,统计总错误数,以及 $1 \rightarrow 0$ 的错误数和 $0 \rightarrow 1$ 的错误数;

4)辐照过程中,实时监测器件的工作电流。

重复步骤3)、4),直至累计剂量达到试验要求,停止试验。

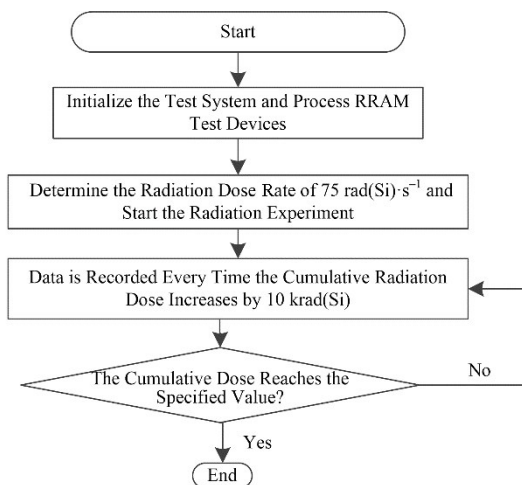


图7 RRAM总剂量效应试验流程图
Fig.7 Flowchart of total ionizing dose effects of RRAM test procedure

按照以上的试验流程,统计在辐照的总剂量效应下试验样品中数据发生的翻转数,发现所有的翻转现象均为从“0”到“1”的翻转,试验中记录的翻转数如表2所示。通过计算得到数据翻转率如图8所示。

由表1可知,器件的静态工作电流 $10 \mu\text{A}$ 。试验

表2 试验读取数据翻转数统计
Table 2 Statistics of the number of flips in the data being read in the test

累积辐照剂量 Cumulative radiation dose / Mrad(Si)	样品1 翻转数 Sample 1 flip number	样品2 翻转数 Sample 2 flip number
0	0	0
1	0	0
2	22	25
3	40	38
4	100	120
5	160	186
6	210	230
7	300	280
8	480	520
9	674	719
10	835	943

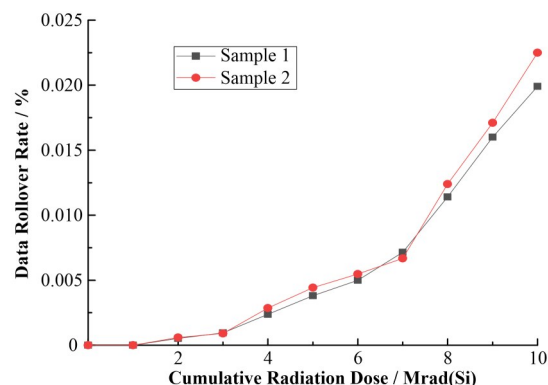


图8 数据翻转率随累计剂量的变化
Fig.8 Variation of data rollover rate with cumulative dose

过程中,实时监测辐照对器件工作电流的影响,得到器件的工作电流随累积辐射剂量的变化情况如图9所示,器件工作电流的增大可以反映出辐照下器件漏电流的产生以及增大现象。由于在样品中写入的初始数据均为“55H(01010101)”,同一位线上存储单元中阻变元件的阻态都相同,即使未被选取的存储单元因MOS管阈值电压漂移被异常选中,也不会影响对被选取字上存储单元中阻变元件阻态的读取,这样有效地避开了阈值电压漂移对数据读取时的影响。由图8,在 ^{60}Co γ 射线辐照下RRAM样品数据发生翻转错误的阈值在 $1\sim 2 \text{ Mrad}(\text{Si})$ 之间,之后随着辐照累积剂量的增加,数据翻转错误增多,并且错误翻转均为从“0”到“1”的翻转。同时,从图9可以看出,当累积辐射剂量在 $1\sim 2 \text{ Mrad}(\text{Si})$ 之间时,RRAM的工作电流也明显地开始升高,并随着累计辐照剂量的增加,工作电流逐渐升高,说明随着累计剂量的增加,器件中产生的漏电流产生并逐渐升高。避开MOS管电压漂移引起数据读取错误的因素,以

及考虑到数据翻转与工作电流明显增大的同步性,足以说明读取数据时发生翻转错误的原因总剂量效应作用下器件氧化层中积累的正电荷使得反型层产生的漏电流。漏电流增大了原读电路中的电流,引起读电路输出电平升高,当累积辐照剂量达到一定值时,漏电流的升高会使得读电路输出低电平升高到高电平,而高电平仍为高电平,这正好解释了上述的统计结果中只发生存储数据从“0”到“1”的翻转现象。

在分析 RRAM 在总剂量效应下漏电流对其数据读取功能的影响之后,考虑器件在总剂量效应下 MOS 管阈值电压漂移对器件数据读取功能的影响。总剂量效应试验流程与漏电流对器件影响试验中的流程基本一致,不同之处在于给样品中写入的初始数据不同。本次在样品中交叉输入数据“55H”和“AAH”,即奇数次的字中输入数据“55H”,偶数次的字中输入数据“AAH”。在试验结束后,将统计到的试验结果与漏电流对器件影响试验中得到的结果进行比较。统计得到的读取数据错误率的结果与漏电流对器件影响试验中得到的结果非常近似,可见 MOS 管阈值电压对器件功能的影响程度低于漏电流对器件功能的影响。同时,也说明之前认为 RRAM 总剂量效应辐照敏感单元为存储阵列部分这个假设是正确的,所以,在 RRAM 中,存储阵列是总剂量效应的辐照敏感单元。

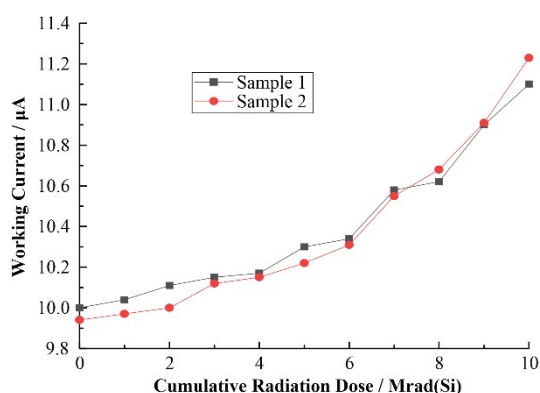


图9 工作电流随累积辐射剂量的变化

Fig.9 Variation of working current with cumulative radiation dose

4 结语

本文选用了具有代表性的 MB85AS4MT 器件作为实验器件。通过初步的理论分析,先假设在实验器件中 MOS 管泄漏电流对器件数据读取功能的影响高于 MOS 管阈值电压漂移对器件数据读取功能的影响,且器件总剂量效应的辐照敏感单元为存储阵列。之后,选用 ^{60}Co γ 射线源作为辐照源进行

总剂量效应试验,对样品输入不同的初始数据:“55H”以及“55H”和“AAH”的交叉输入数据,根据试验结果确定辐照产生的漏电流是导致器件功能发生错误的原因,即辐照使得场氧化层和栅氧化层产生陷阱电荷,陷阱电荷使得反型层中产生漏电流,进而增大了原读电路中的电流,引起读电路输出电平升高,当累积辐照剂量达到一定值时,泄漏电流的增大会使得输出低电平升高到高电平,只发生存储数据从“0”到“1”的翻转现象。另外,试验结果也说明了总剂量效应的辐照敏感单元为存储阵列。本次研究表明:MB85AS4MT 器件具有良好的抗总剂量辐射能力,同时,通过在 RRAM 中输入不同的初始数据来起到控制变量的作用,而且取得了很好的效果。相信本次研究中采用的试验方法以及对器件损伤机理的分析能够为以后其他 RRAM 器件辐射效应的研究提供参考价值。

参考文献

- 1 沈自才,丁义刚. 抗辐射设计和辐射效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 13-51.
SHEN Zicai, DING Yigang. Anti-radiation design and radiation effect[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015: 13-51.
- 2 Dash C S, Prabakaran S R S. Science and technological understanding of nano-ionic resistive memories (RRAM) [J]. Nanoscience & Nanotechnology-Asia, 2019, 9(4): 444 - 461. DOI: 10.2174/2210681208666180621095241.
- 3 刘洋, 辜科, 李平, 等. 新型非易失性存储器的抗辐射能力研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6): 966 - 971. DOI: 10.11805/tyda201606.0966.
LIU Yang, GU Ke, LI Ping, *et al.* Research progress of the radiation response of new non-volatile RAMs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6): 966 - 971. DOI: 10.11805/tyda201606.0966.
- 4 Yuan F, Zhang Z G, Wang J C, *et al.* Total ionizing dose (TID) effects of γ ray radiation on switching behaviors of Ag/AlO_x/Pt RRAM device[J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9(1): 452. DOI: 10.1186/1556-276x-9-452.
- 5 Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 1833 - 1853. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001040.
- 6 Agashe K, Sarwade N, Joshi S, *et al.* Effect of gamma irradiation on resistive switching of Al/TiO₂/n(+) Si ReRAM[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics

- Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, **403**: 38 – 44. DOI: 10.1016/j.nimb.2017.04.091.
- 7 Wu Z P, Zhu J. Enhanced unipolar resistive switching characteristics of $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ thin films with high ON/OFF ratio[J]. Materials, 2017, **10**(3): 322. DOI: 10.3390/ma10030322.
- 8 Hu S G, Wu S Y, Jia W W, *et al.* Review of nanostructured resistive switching memristor and its applications[J]. Nanoscience and Nanotechnology Letters, 2014, **6**(9): 729 – 757. DOI: 10.1166/nnl.2014.1888.
- 9 徐导进, 刘伟鑫, 王晨, 等. 典型 CMOS 存储器电离辐照效应[J]. 上海航天, 2011, **28**(1): 65 – 68. DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2011.01.016.
XU Daojin, LIU Weixin, WANG Chen, *et al.* Ionizing irradiation effect on typical CMOS memory devices[J]. Aerospace Shanghai, 2011, **28**(1): 65 – 68. DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2011.01.016.
- 10 Cao X B, Xiao L Y, Huo M X, *et al.* Heavy ion-induced single event upset sensitivity evaluation of 3D integrated static random access memory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(3): 31. DOI: 10.1007/s41365-018-0377-1.
- 11 Sharma A K. Advanced semiconductor memories architectures, designs and applications[M]. Wiley: IEEE Press, 2009.
- 12 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 145 – 221.
CHEN Panxun. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 145 – 221.
- 13 Bi J S, Duan Y, Xi K, *et al.* Total ionizing dose and single event effects of 1 Mb HfO_2 -based resistive-random-access memory[J]. Microelectronics Reliability, 2018, **88** – **90**: 891 – 897. DOI: 10.1016/j.microrel.2018.07.017.
- 14 Zhang X Y, Guo Q, Li Y D, *et al.* Total ionizing dose and synergistic effects of magnetoresistive random-access memory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(8): 111. DOI: 10.1007/s41365-018-0451-8.
- 15 陈伟, 郭晓强, 姚志斌, 等. 空间辐射效应地面模拟等效的关键基础问题[J]. 现代应用物理, 2017, **8**(2): 1 – 12. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2017.020101.
CHEN Wei, GUO Xiaoqiang, YAO Zhibin, *et al.* Key basic issues in equivalent ground simulation of space radiation effects[J]. Modern Applied Physics, 2017, **8**(2): 1 – 12. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2017.020101.
- 16 安恒, 杨生胜, 苗育君, 等. CMOS APS 光电器件单粒子效应电荷收集特性仿真分析[J]. 核技术, 2017, **40**(7): 070502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070502.
AN Heng, YANG Shengsheng, MIAO Yujun, *et al.* Simulation of characteristic of charge collecting for CMOS APS with single event effects[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(7): 070502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070502.