

Toggle MRAM电离总剂量与瞬态电离辐射效应研究

熊 涔 杜川华 陈泉佑 李何依 赵洪超

(中国工程物理研究院电子工程研究所 绵阳 621900)

摘要 设计了一套存储器辐射效应远程在线测试系统,对一款磁阻随机存取存储器(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM)在不同工作模式下开展了电离总剂量和瞬态电离辐射效应实验研究,获得了以下研究结果:1)电离总剂量辐照实验中,在动态读写模式下,首先出现的效应为电源电流显著增加,器件在30 krad(Si)时,出现了读数据错误;2)瞬态电离辐射辐照实验中,MRAM在静态加电模式和动态读数据模式未观测到数据或功能错误,但在动态写数据模式下出现数据写入失败的现象。初步分析认为写数据失败的原因可能是 γ 射线引起的PN结光电流形成电路全局光电流,造成MRAM电源波动,触发MRAM写保护有效。本文研究结果表明在总剂量与瞬态电离辐射环境下,MRAM会出现功能异常。MRAM的外围电路是其抗辐射性能的敏感薄弱环节。

关键词 磁阻随机存取存储器, 电离总剂量, 瞬态电离辐射, 光电流

中图分类号 TN386.1

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250185

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250185

Total ionization dose and transient dose rate effects of a Toggle magnetoresistive random access memory

XIONG Cen DU Chuanhua CHEN Quanyou LI Heyi ZHAO Hongchao

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract [Background] Magnetoresistive random access memory (MRAM) has the advantages of non-volatility, fast speed, low power consumption, high endurance, and long data retention, making it a potential candidate for application in aerospace electronic systems. [Purpose] This study aims to examine the total ionization dose (TID) and transient dose rate (TDR) effects of a Toggle MRAM. [Methods] A remote on-line test system was designed for in-situ measurement of the radiation effect of the MRAM. Five test modes were designed for experimental test, including static mode, static power-on mode, dynamic read-write mode, dynamic write mode, and dynamic read mode. The TID and TDR response of MRAM were studied experimentally in five working modes. [Results] Experimental results show that the early response of the MRAMs is an increase of the supply current during TID experiment, and bit errors occur at a total dose of 30 krad(Si). Neither data nor function errors are observed in static power-on mode and dynamic read mode during the TDR experiment, whereas data write failure occurs in dynamic

国家自然科学基金(No.12505310)资助

第一作者: 熊涔, 女, 1989年出生, 2016年于西安交通大学获博士学位, 研究领域为电子器件辐射效应

通信作者: 杜川华, E-mail: 419671908@qq.com

收稿日期: 2025-04-26, 修回日期: 2025-09-16

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12505310)

First author: XIONG Cen, female, born in 1989, graduated from Xi'an Jiaotong University with a doctoral degree in 2016, focusing on radiation effects on electronic devices

Corresponding author: DU Chuanhua, E-mail: 419671908@qq.com

Received date: 2025-04-26, revised date: 2025-09-16

write mode. Reason for the write failure may be a fluctuation in the power supply caused by the global photocurrent of the circuit which triggers the write protection of the device and hinders the following data writing process.

[Conclusions] Results of this study indicate that MRAM exhibits malfunctions under total dose and transient ionizing radiation environments. The radiation sensitive and vulnerable part of the MRAM is its peripheral circuits.

Key words Magnetoresistive random access memory, Total ionization dose, Transient dose rate, Photocurrent

磁阻随机存取存储器 (Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM) 是一种以磁性质来存储数据的随机存储器, 采用磁化方向不同所导致的磁电阻不同来存储信息^[1]。与传统存储器件相比, MRAM 具有读写速度快、静态功耗低、存储密度大、使用次数多等优点^[2-3], 在航空航天领域具有广泛的应用前景。

MRAM 的基本存储单元是磁性隧道结^[4] (Magnetic Tunnel Junction, MTJ)。MTJ 由上下两层磁性材料和中间厚仅几纳米的较薄绝缘材料构成。若上下两层磁性材料磁矩平行, MTJ 呈现低电阻; 反之, 若上下两层的磁矩反平行, MTJ 呈现高电阻。利用 MTJ 电阻值的不同, 在物理上实现了可变的两种稳定电阻态, 进而可以实现二进制比特信息的存储功能。

目前市面上的商用磁随机存储器主要包括磁场牵引型存储器 (Toggle MRAM) 和自旋转移矩存储器 (Spin Transfer Torque MRAM, STT MRAM)。Toggle MRAM 利用两条相互垂直的写字线与写位线上流过电流产生的磁场完成数据写入, 而 STT MRAM 则利用自旋转移矩效应实现纯电学写入。国内外对 MRAM 的总剂量效应 (Total Ionizing Dose, TID)^[5-7]、单粒子效应 (Single Event Effect, SEE)^[8-9] 进行了较多研究。研究结果表明 MTJ 存储单元的抗总剂量能力较强, 能达到 1 Mrad (Si) 以上^[2]。完整的 MRAM 器件中除包含存储阵列外, 还集成了互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺的外围电路, 外围电路是 MRAM 总剂量效应的薄弱环节^[10-12]。重离子辐照可能影响 CMOS 外围电路, 使 MRAM 出现单粒子门锁、单粒子功能中断等效应; 当粒子累积剂量更高时, 也可能破坏 MTJ 材料或界面特性, 导致硬损伤^[13-15]。瞬态电离辐射也会影响金属氧化物半导体 (Metal-Oxide Semiconductor, MOS) 器件的工作状态^[16-17], 也可能影响 MRAM 的功能和性能。目前, 对于 MRAM 在瞬态电离辐射下的瞬时剂量率效应还未见报道, 未掌握 MRAM 在瞬态电离辐射下的响应。本文针对一款 Toggle MRAM, 设计了专用的辐射效应远程在线测试系统, 开展了电离总剂量和瞬态电离辐射效应实验研

究, 并对实验中出现的效应机理进行了分析和讨论。

1 实验对象

本文选取了一款 Toggle MRAM 作为研究对象。器件采用体硅 CMOS 工艺制造, 在低电压下具有自动写保护功能。MRAM 存储单元的构成为 1T-1MTJ, 即 1 个晶体管和 1 个 MTJ, 如图 1 所示^[18]。

当器件处于写入模式时, 用作访问晶体管的 N 型金属氧化物半导体 (N-type MOS, NMOS) 晶体管处于关闭状态, 两条互相垂直的编程线以一定的时序间隔通过持续一定时间的电流脉冲, 在通过电流的编程线周围会产生一定强度的磁场, 通过两条互相垂直的编程线配合将自由层的磁化方向翻转 180°。当自由层的磁化方向与固定磁层的磁化方向一致时, MTJ 表现为低电阻, 低阻状态作为二进制数据“0”; 当自由层的磁矩方向与固定层的磁矩方向相反时, MTJ 在垂直方向上表现为高电阻, 高阻状态作为二进制数据“1”。当器件处于读取模式, 访问晶体管在信号线的激励下打开, 存储单元中流过的电流信号经过灵敏放大电路后, 通过与参考电压对比判读出 MTJ 中的电阻态, 进而完成二进制信息的读取。

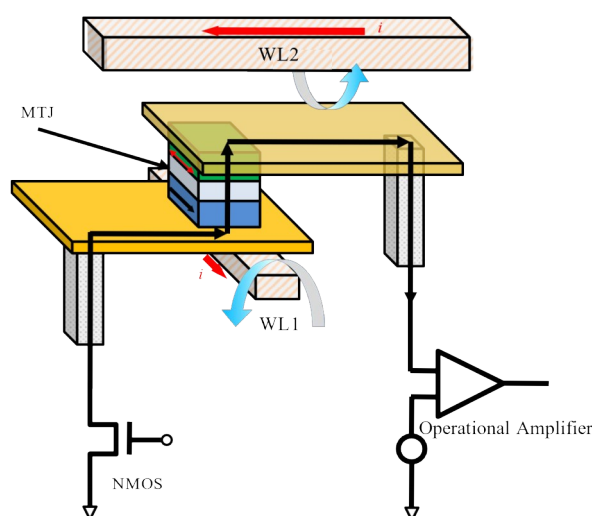


图1 Toggle存储器 1T-1MTJ 存储单元原理图^[18]
(彩图见网络版)

Fig.1 Simplified depiction of the 1T-1MTJ bit cell of a Toggle MRAM^[18] (color online)

2 测试系统

为了完成 MRAM 电离总剂量效应和瞬态电离辐射效应的远程在线实时测试,设计了一套专用的存储器辐射效应测试系统。测试系统包括上位机、信号转换模块、电缆转换模块、主控模块和待测器件 (Device Under Test, DUT) 模块 5 大部分,各模块的主要功能与连接关系如图 2 所示。

上位机运行测试软件,向主控模块下发指令并回收测试数据。信号转换模块为 USB 转 RS422 的接口转换器,将上位机的 USB 信号转换成 RS422 信号,通过长电缆发送给主控模块。主控模块内部的高性能现场可编程门阵列(Field Programmable Gate

Array, FPGA) 是测试主体,通过固定接口连接 DUT 模块并实现测试功能;主控模块采用兼容性设计,可支持多种类型、多种接口的存储器测试。DUT 模块上设计了夹具和接口,以便连接主控模块和安装被测器件。DUT 测试电路上仅安装被测器件和必要的电阻电容。测试系统采用外部稳压电源供电, DUT 模块与测试系统其他部分分开独立供电,以便于测量 DUT 的工作电流。为了防止实验现场的电磁干扰, DUT 模块、主控模块均安装在金属壳体内部,所有传输电缆采用屏蔽电缆。在辐照实验过程中,主控电路放置在远离靶面的实验平台上,并采用铅砖防护,以免受到辐射干扰。

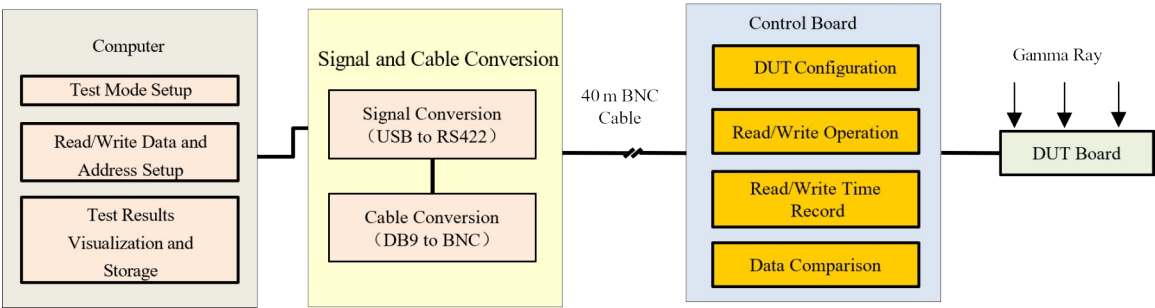


图2 测试系统连接图
Fig.2 Connection diagram of the test system

为了测试存储器关键电学参数变化及各功能单元在不同工作状态下的响应,测试系统设计了 5 种测试模式,包括静态模式、静态加电模式、动态读写数据模式、动态写数据模式和动态读数据模式。各模式的测试方法如下:

- 1)静态模式:实验前通过上位机向 DUT 写完数据后,断开 DUT 模块的供电;辐照期间 DUT 处于无偏置状态,辐照完成后,读出被测器件内部的存储数据,与写入数据进行对比;
- 2)静态加电模式:与静态辐照模式基本相同,但在辐照期间保持 DUT 模块供电;
- 3)动态读写模式:辐照期间,以一定时间周期或不间断地向 DUT 写数据,再回读数据;
- 4)动态写数据模式:向 DUT 写数据期间开展辐照;
- 5)动态读数据模式:在 DUT 读出数据期间开展辐照。

实验时读写数据的格式包括随机数、递增数、给定数等,可通过上位机上的控制软件设置。读写数据的地址范围设置为以下三种:

- 1)全片测试:对存储器全部存储单元的读写操作;
- 2)区域读写:对存储器任意指定地址区间的读

- 写操作;
- 3)单字节读写:对存储器内某一字节进行读写。

3 实验结果及分析

3.1 总剂量效应实验结果与分析

3.1.1 实验结果

MRAM 的电离总剂量实验在 ^{60}Co γ 射线源上开展,辐照剂量率为 $50 \text{ rad}(\text{Si}) \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验时,器件处于动态读写模式,即每隔 1 min 对被测器件进行一次全片数据读写操作,以检测数据和功能,同时测试器件的电源电流。实验时写入的数据为随机数和递增数交替读写。

实验过程中,存储器的电源电流如图 3 所示。从图中可以看出,器件电源电流随累积总剂量增加而增大。典型总剂量下的电源电流与器件功能如表 1 所示。实验前电源电流约 $65 \mu\text{A}$,总剂量达到 $21 \text{ krad}(\text{Si})$ 时,电源电流增大约 33%,读写数据和功能正常。总剂量达到 $27 \text{ krad}(\text{Si})$ 时,电源电流增大约 230%,读写数据和功能正常。总剂量达到 $30 \text{ krad}(\text{Si})$ 时,电源电流增大约 5 倍,此时读出数据开始出现少量错误。

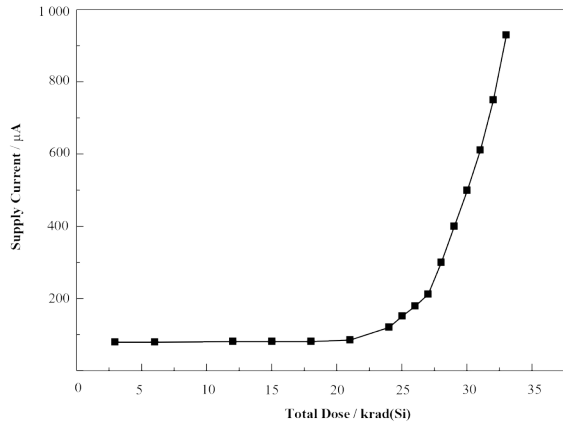


图3 MRAM静态电源电流随累积总剂量的变化
Fig.3 Variation of MRAM quiescent supply current with cumulative total dose

表1 不同总剂量下读电流与器件功能
Table 1 Read current and function under various total dose

总剂量 Total dose / krad(Si)	电源 Supply current / μA	器件功能 Device function
0	65.0	功能正常 Normal
21	86.5	功能正常 Normal
27	214.5	功能正常 Normal
30	390.0	读出数据出现少量错误 Read bit-error occurs

实验过程中观察到,随着累积总剂量增加,DUT的读、写数据时间增加。总剂量达到12 krad(Si)时,写数据时间增加了0.5 s,读数据时间无显著变化;总剂量达到42 krad(Si)时,写数据时间增加了0.516 s,读数据时间增加了1.3 s。

3.1.2 实验结果分析

已有研究表明^[10],MRAM总剂量效应的薄弱环节是其中的CMOS电路。 γ 射线辐照产生的氧化物电荷导致MOS晶体管的阈值电压漂移,引起NMOS中寄生晶体管开启,单管漏电流增大,进而导致存储器静态电源电流增加。

实验中发现的读错误可能是总剂量导致MRAM数据读取电路误判。典型MRAM存储器的数据读取电路原理图如图4所示^[19]。其中包含两个支路,一个支路连接数据存储单元(Data Cell),另一个支路连接参考单元(Reference Cell)。每个分支由负载晶体管(M1和M5)、钳位NMOS(M2和M6)和读使能NMOS(M3和M7)组成。M4和M8分别为数据存储单元和参考单元的访问晶体管。在读取操作中,WL上施加一定电压使两个访问晶体管(M4和M8)开启,读电流 I_{read} 流经数据存储单元和参考单元,形成两个输出电压 V_{data} 和 V_{ref} 。 V_{data} 和 V_{ref} 进入灵敏

敏放大器(Sense Amplifier, SA)进行处理,从节点Q输出读出值。

为便于分析,将MTJ处于高阻态与低阻态时的阻值分别记为 R_H 和 R_L ,参考单元的电阻 $R_{\text{ref}}=(R_L+R_H)/2$ 。数据存储单元中MTJ的电阻记为 R_{mtj} 。将访问晶体管的沟道电阻记为 R_{DS} ,则有:

$$V_{\text{ref}} = I_{\text{read}}(R_{\text{ref}} + R_{\text{DS}}) \quad (1)$$

$$V_{\text{data}} = I_{\text{read}}(R_{\text{mtj}} + R_{\text{DS}}) \quad (2)$$

$$I_{\text{read}}(R_L + R_{\text{DS}}) < I_{\text{read}}(R_{\text{ref}} + R_{\text{DS}}) < I_{\text{read}}(R_H + R_{\text{DS}}) \quad (3)$$

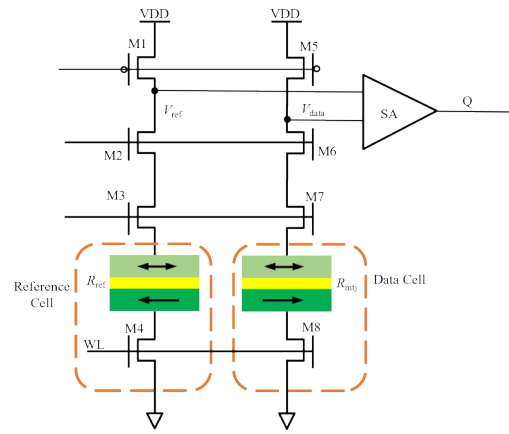


图4 典型MRAM数据读取电路原理图^[19]
Fig.4 Schematic of the data reading circuit of a typical MRAM^[19]

在总剂量实验中, γ 射线在浅槽隔离(Shallow Trench Isolation, STI)氧化物中产生带正电的陷阱电荷,导致存储单元NMOS晶体管有效宽度增加,阈值电压负向漂移,并导致寄生晶体管开启,上述因素使得NMOS的沟道电阻减小^[19]。当数据存储单元MOS管的 R_{DS} 降低程度大于参考单元时,导致MTJ为高阻时的输出电压小于参考电压,此时出现“0”到“1”的误判。反之,当数据存储单元MOS管的 R_{DS} 降低程度小于参考单元时,可能出现“1”到“0”的误判^[20]。不管哪种情况出现,MRAM都会表现出读错误。

总剂量辐照后器件读写数据时间增加,可能与辐照后读写控制电路的逻辑延迟增加^[21]、驱动电流减小^[21]导致磁化翻转速度降低等因素有关。

3.2 瞬态电离辐照实验数据及分析

3.2.1 瞬态电离辐照实验结果

MRAM的瞬态电离辐照实验在“强光一号”强流脉冲加速器上完成。辐照射线脉宽为15~30 ns,剂量率范围为 $10^9 \sim 10^{11} \text{ rad(Si)} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[22]。本文共开展了13组瞬态电离辐照实验,其中静态加电模式6组、动态写数据模式5组、动态读数据模式2组。具体实验条件见表2。主要测试数据包括存储器的读写功

能测试、数据保持情况、错误数据和地址单元数量以及电源上的瞬态脉冲电流。

在静态加电模式下,分别在辐照前向存储器全部存储单元(4 Mb)写入不同图形数据(00、55、AA、FF、随机数、递增数),辐照结束后读出数据,并与写入数据进行对比。在辐照结束后读出数据未出现错误。

在全片动态读数据模式下,实验前向芯片写入不同图形数据(随机数、递增数),在辐照期间读出数据。经对比,该模式下读出的数据无错误。

在动态写数据模式下,获得了 5 组有效实验数据,其中有 3 组数据为全片写数据,即在向全部存储单元写数据的过程中触发 γ 脉冲辐射;2 组数据为区域写数据,即在对存储器部分存储单元写数据的过程中触发 γ 脉冲辐射。在全片写数据时,发生了数据写入失败,即显示数据错误的存储单元,仍然保持为实验前写入的数据。区域写数据时未检测到错误。

实验期间测得的存储器电源电流上的瞬态脉冲电流波形如图 5 所示,电流峰值约 200 mA,恢复时间为 40~60 μ s。

辐照结束后,对器件进行测试,发现全片写数据时间增加了约 31 ms。这可能是因为瞬态 γ 辐照实验会在器件中沉积能量,造成总剂量效应,对存储器写入时间产生影响。经过大约 10 h 放置后,全片写数据时间相比于初始值仅增加了 16 ms,说明辐射损伤在室温下具有一定的退火效应,这可能与辐照诱发氧化物陷阱电荷的退火有关。

3.2.2 实验结果分析

瞬态电离辐射实验中,入射光子在半导体内产

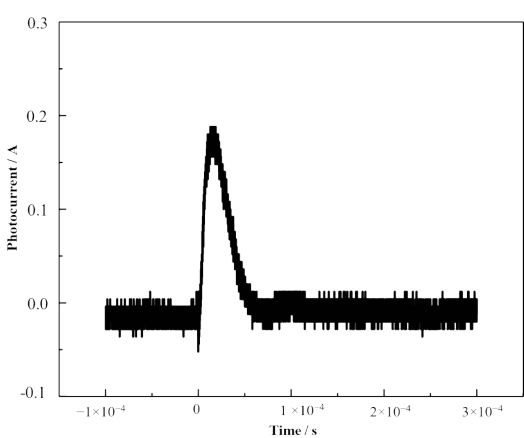


图5 电源线瞬态光电流波形
Fig.5 Waveform of transient photocurrent in the power supply

生电离电荷,电离电荷通过漂移和扩散被收集并形成光电流,光电流方向为从 PN 结的 N 区流向 P 区。当作用在单个节点的电荷足够大时,会引起关态 MOS 管导通或触发器状态翻转^[17]。多个 PN 结汇集形成的全局光电流在电路的电源和地线上传输,引起显著的电源和地平面电压波动时,会造成功能单元的瞬态电压跌落,这种现象也称为路轨塌陷^[23]。

静态加偏置状态下,MRAM 在瞬态电离辐射辐照实验后(未断电重启)读取数据无错误,说明瞬态辐照产生的光电流未改变 MTJ 单元的磁化状态。辐照期间外围控制电路均处于加电不工作状态,供电电源上的瞬态脉冲电流尽管峰值较大,但在微秒内恢复正常,未形成电流电压钳位、功能失效。说明:1)MTJ 存储单元在本文的瞬态电离辐射环境下不敏感;2)外围 CMOS 控制电路未发生闭锁效应;3)写入数据的图形格式对存储单元的辐射敏感性无影响。

表2 MRAM 的瞬态电离辐射辐照实验条件
Table 2 Experimental setup for transient dose rate effect of the MRAM

测试方法	实验条件	实验次数	辐射效应
Test method	Experimental setup	Number of repeats	Radiation Effects
静态加电模式	实验前分别写全 00、55、AA、FF、随机数、递增数	6	无错误;实验后写入数据时间增加
Static test with power up	DUTs written to a pattern of either 00, 55, AA, FF, random number and increasing number		No error; write cycle time increased after irradiation
动态写数据模式(全片写)	全片写 55、AA	3	写入数据失败
Dynamic writing (to all addresses)	DUTs written to a pattern of either 55 or AA		Writing failure
动态写数据模式(区域写)	部分地址单元写 55	2	无错误 No error
Dynamic writing (to partial addresses)	Part of the DUT written to 55		
动态读数据模式	全片写入递增数、随机数	2	无错误 No error
Dynamic reading	DUT written to a data pattern of increasing numbers or random numbers		

MRAM在动态写数据模式下发生了数据写入失败,在动态读数据模式下则未检测到功能和数据错误。由于存储单元对瞬态电离辐射不敏感,可判断造成写数据失败的原因为CMOS外围电路。

一般而言,体硅CMOS电路的瞬态电离辐射效应主要包括闭锁效应、翻转效应和扰动效应等^[24]。本文的MRAM中未检测到闭锁效应,可能是由于在工艺制造中增加了外延层,阻隔了PNPN寄生结构的形成。但以下效应不可避免:1)光电流可能引起晶体管开关功能和状态异常;2)触发器状态翻转;3)控制信号或数据信号的瞬态干扰,以及电路中电源信号的剧烈波动。

实验用的MRAM具有掉电保护的功能。在瞬态电离辐射环境下,当电源电流从 μA 增加到数百mA时,可能造成电路电源电压跌落至低电平状态,从而触发电路的自动写保护功能,导致写入失败。

在两次区域写数据实验中,未检测到错误。分析认为,并不是区域测试与全片测试有显著的效应差异,可能是由于区域写数据时间太短(301个地址单元写数据时间小于1 ms,1 000个地址单元写数据时间约为3.2 ms),而脉冲 γ 辐射的脉冲宽度为ns级别,辐射触发时刻与写数据时间未能重合。实验后的数据测试发现,给定区域的数据写入不会对其他存储单元造成影响。

4 结语

本文研究了一款Toggle MRAM的总剂量和瞬态电离辐射效应。总剂量效应实验研究表明,MRAM在动态读写模式下受到电离总剂量辐照时,出现电源电流增加,在总剂量30 krad(Si)出现了读数据错误。瞬态电离辐射辐照实验研究表明,MRAM在静态加电模式和动态读数据模式均未检测到数据或功能错误,但在动态写数据模式下有数据写入失败的现象。初步认为可能的原因为:脉冲 γ 射线引起的PN结光电流形成电路全局光电流,造成存储器外围电路的电源剧烈波动,触发MRAM写保护有效。

作者贡献声明 熊涔负责论文初稿撰写、实验结果分析与论文修改投稿;杜川华负责实验系统与方案设计、实验实施指导及论文撰写指导;陈泉佑负责实验组织、结果记录与初步分析;李何依、赵洪超负责实验实施。

参考文献

- 1 Ikegawa S, Mancoff F B, Janesky J, *et al.* Magnetoresistive random access memory: present and

- future[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, **67**(4): 1407 - 1419. DOI: 10.1109/TED.2020.2965403.

- 2 孙杰杰, 王超, 李嘉威, 等. 抗辐照MRAM研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2023, **45**(6): 174 - 195. DOI: 10.11887/j.cn.202306020.

- SUN Jiejie, WANG Chao, LI Jiawei, *et al.* Research progress of anti-irradiation MRAM[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, **45**(6): 174 - 195. DOI: 10.11887/j.cn.202306020.

- 3 于春青, 李同德, 王亮, 等. 一款商用MRAM电离总剂量效应研究[J]. 现代应用物理, 2023, **14**(1): 175 - 181. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2023.010605.

- YU Chunqing, LI Tongde, WANG Liang, *et al.* Total ionizing dose effect of a commercial magnetoresistive random access memory[J]. Modern Applied Physics, 2023, **14**(1): 175 - 181. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2023.010605.

- 4 白月, 殷加亮, 郭宗夏, 等. 低功耗自旋电子器件技术路线及展望[J]. 微纳电子与智能制造, 2021, **3**(1): 104 - 128. DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2021.01.104.

- BAI Yue, YIN Jialiang, GUO Zongxia, *et al.* Technology roadmap and expectation of low-power spintronic devices [J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2021, **3**(1): 104 - 128. DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2021.01.104.

- 5 Cui Y, Yang L, Gao T, *et al.* Total ionizing radiation-induced read bit-errors in toggle magnetoresistive random-access memory devices[J]. Chinese Physics B, 2017, **26** (8): 087501. DOI: 10.1088/1674-1056/26/8/087501.

- 6 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.

- 7 Ingalls J D, Gadlage M J, Wang J, *et al.* Total dose and heavy ion radiation response of 55 nm avalanche technology spin transfer torque MRAM[C]//2019 IEEE Radiation Effects Data Workshop. July 8 - 12, 2019, San Antonio, TX, USA. IEEE, 2019: 1 - 4. DOI: 10.1109/REDW.2019.8906645.

- 8 Katti R R, Lintz J, Sundstrom L, *et al.* Heavy-ion and total ionizing dose (TID) performance of a 1 Mbit magnetoresistive random access memory (MRAM) [C]//2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop. July 20-24, 2009. Quebec, Canada. IEEE, 2009: 103 - 105. DOI: 10.1109/redw.2009.5336307.

- 9 Heidecker J, Allen G, Sheldon D. Single event latchup

- (SEL) and total ionizing dose (TID) of a 1 Mbit magnetoresistive random access memory (MRAM) [C]// 2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop. July 20 - 23, 2010. Denver, CO, USA. IEEE, 2010: 4. DOI: 10.1109/redw.2010.5619499.
- 10 Nguyen D N, Irom F. Radiation effects on MRAM[C]// 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. September 10-14, 2007, Deauville, France. IEEE, 2007: 1 - 4. DOI: 10.1109/RADECS.2007.5205554.
 - 11 Cochran D J, Buchner S P, Sanders A B, *et al.* Compendium of recent total ionizing dose results for candidate spacecraft electronics for NASA[C]//2008 IEEE Radiation Effects Data Workshop. July 14-18, 2008, Tucson, AZ, USA. IEEE, 2008: 5 - 10. DOI: 10.1109/REDW.2008.9.
 - 12 张浩浩, 毕津顺, 王海滨, 等. 磁随机存储器总剂量效应及退火特性研究[J]. 功能材料与器件学报, 2017, **23**(1): 40 - 47.
ZHANG Haohao, BI Jinshun, WANG Haibin, *et al.* Study on total dose effect and annealing characteristics of magnetic random access memory[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2017, **23**(1): 40 - 47.
 - 13 Conraux Y, Nozières J P, Da Costa V, *et al.* Effects of swift heavy ion bombardment on magnetic tunnel junction functional properties[J]. Journal of Applied Physics, 2003, **93**(10): 7301 - 7303. DOI: 10.1063/1.1558659.
 - 14 Zhao P X, Liu T Q, Cai C, *et al.* Heavy ion irradiation induced hard error in MTJ of the MRAM memory array [J]. Microelectronics Reliability, 2019, **100** - **101**: 113347. DOI: 10.1016/j.microrel.2019.06.039.
 - 15 Xiao T P, Bennett C H, Mancoff F B, *et al.* Heavy-ion-induced displacement damage effects in magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, **68**(5): 581 - 587. DOI: 10.1109/TNS.2021.3057348.
 - 16 Kauppila J S, Sternberg A L, Alles M L, *et al.* A bias-dependent single-event compact model implemented into BSIM4 and a 90 nm CMOS process design kit[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, **56**(6): 3152 - 3157. DOI: 10.1109/TNS.2009.2033798.
 - 17 杜川华, 段丙皇, 熊涔, 等. SOI 晶体管 and 电路的瞬时电离辐射效应研究[J]. 核技术, 2024, **47**(4): 040402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040402.
DU Chuanhua, DUAN Binghuang, XIONG Cen, *et al.* Transient radiation response of SOI transistors and SOI devices[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(4): 040402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040402.
 - 18 Engel B N, Akerman J, Butcher B, *et al.* A 4-Mb toggle MRAM based on a novel bit and switching method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, **41**(1): 132 - 136. DOI: 10.1109/TMAG.2004.840847.
 - 19 Zhang H H, Bi J S, Wang H B, *et al.* Study of total ionizing dose induced read bit errors in magneto-resistive random access memory[J]. Microelectronics Reliability, 2016, **67**: 104 - 110. DOI: 10.1016/j.microrel.2016.10.013.
 - 20 施辉, 张海良, 宋思德, 等. MRAM 的辐射效应分析及加固方法简述[J]. 航天器环境工程, 2021, **38**(1): 106 - 114.
SHI Hui, ZHANG Hailiang, SONG Side, *et al.* Analysis of the effects of radiation on MRAMs and corresponding hardening techniques[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, **38**(1): 106 - 114.
 - 21 陈荣梅. 纳米体硅 CMOS 工艺逻辑电路单粒子效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
CHEN Rongmei. Study of single-event effects of logic circuits in nanometer bulk CMOS process[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
 - 22 郭亚鑫, 李洋, 彭治钢, 等. SiGe HBT 瞬时剂量率效应实验及仿真研究[J]. 微电子学, 2023, **53**(6): 971 - 980. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.230341.
GUO Yaxin, LI Yang, PENG Zhigang, *et al.* Experimental and simulation research of transient dose rate effect on SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Microelectronics, 2023, **53**(6): 971 - 980. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.230341.
 - 23 王桂珍, 郭晓强, 李瑞斌, 等. 64K CMOS 随机存储器瞬时辐射损伤模式分析[J]. 原子能科学技术, 2010, **44**(1): 121 - 123.
WANG Guizhen, GUO Xiaoqiang, LI Ruibin, *et al.* Damage pattern of transient γ -radiation in 64K CMOS SRAM[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(1): 121 - 123.
 - 24 王桂珍, 林东生, 齐超, 等. 0.18 μm CMOS 电路瞬时剂量率效应实验研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(11): 2165 - 2169.
WANG Guizhen, LIN Dongsheng, QI Chao, *et al.* Experimental research of transient dose rate effect on CMOS circuit with feature size of 0.18 μm [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(11): 2165 - 2169.