

# MRAM 的辐射效应分析及加固方法简述

施辉<sup>1</sup>, 张海良<sup>1\*</sup>, 宋思德<sup>1</sup>, 曹利超<sup>1</sup>, 王印权<sup>1</sup>, 刘国柱<sup>1</sup>, 顾祥<sup>1</sup>,  
吴建伟<sup>1</sup>, 洪根深<sup>1</sup>, 李明华<sup>2</sup>, 贺琪<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十八研究所, 无锡 214072;  
2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 回顾从首款商用磁随机存取存储器 (MRAM) 芯片面世以来国际上对 MRAM 芯片辐射效应的研究; 总结 MRAM 总剂量电离效应和单粒子效应辐照试验研究结果, 以及辐射效应导致 MRAM 读写错误的物理机制; 分析辐射效应对磁性隧道结结构和性能的影响, 并指出 MRAM 应当针对外围电路、存储单元晶体管和磁性隧道结等处不同类型辐射效应进行对应的抗辐射加固; 最后从材料和工艺方面简要介绍 MRAM 加固方法。

**关键词:** 磁随机存取存储器; 磁性隧道结; 辐射效应; 抗辐射加固技术

中图分类号: O483; TN406

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2021)01-0106-09

DOI: [10.12126/see.2021.01.017](https://doi.org/10.12126/see.2021.01.017)

## Analysis of the effects of radiation on MRAMs and corresponding hardening techniques

SHI Hui<sup>1</sup>, ZHANG Hailiang<sup>1\*</sup>, SONG Side<sup>1</sup>, CAO Lichao<sup>1</sup>, WANG Yinquan<sup>1</sup>, LIU Guozhu<sup>1</sup>, GU Xiang<sup>1</sup>,  
WU Jianwei<sup>1</sup>, HONG Genshen<sup>1</sup>, LI Minghua<sup>2</sup>, HE Qi<sup>1</sup>

(1. No.58 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214072, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper reviews the international studies of the space radiation effects on MRAMs since the emergence of the first commercial MRAM chip. Firstly, the results of the total ionizing dose effect (TID) testing, the single event effect (SEE) testing on MRAM chips and the physical mechanism of the W/R errors caused by the radiation effect are summarized and analyzed. Then, the radiation effects on the magnetic tunnel junction (MTJ) is analyzed. Moreover, it is pointed out that the corresponding radiation hardening techniques should be implemented for different types of radiation effects at various sensitive nodes such as the periphery circuits, the storage cell, and the MTJs. Finally, some radiation hardening techniques for MRAM are introduced briefly from the aspects of materials and processes.

**Keywords:** MRAM; magnetic tunnel junction; radiation effect; radiation hardening techniques

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 51371025); 江苏省科技计划 (资金) 项目 (编号: SBE2019010119); 北京市自然科学基金项目 (编号: 2182037)

引用格式: 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 H, ZHANG H L, SONG S D, et al. Analysis of radiation effects on MRAMs and corresponding hardening techniques[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(1): 106-114

## 0 引言

磁性随机存取存储器(magnetic random access memory, MRAM)的技术发展最早可以追溯到 19 世纪 50 年代提出的铁氧体环芯磁随机存储器<sup>[1]</sup>; 1984 年 Honeywell 公司利用磁性薄膜的磁电阻各向异性设计出磁电阻随机存储器, 代表真正现代电子学意义上的磁随机存储器的诞生; 80~90 年代, 巨磁电阻效应(giant magnetoresistance, GMR)、室温高隧穿磁电阻效应(tunneling magnetoresistance, TMR)、自旋转移矩效应(spin transfer torque, STT)的相继发现为 MRAM 带来了新的应用前景, 研究人员提出了 GMR-MRAM 设计方案并相继研发出 Toggle-MRAM 和 STT-MRAM 等芯片产品; 当前, 基于自旋轨道力矩写入技术的磁随机存储器(spin orbit torque based MRAM, SOT-MRAM)以及电压控制磁随机存储器(MeRAM)也正处于研究阶段。MRAM 兼具静态随机存取存储器(SRAM)的高读写速度和动态随机存取存储器(DRAM)的高集成度, 并且具有非易失性、可无限擦写和低功耗等优势, 被认为是构建下一代非易失性缓存和主存的理想器件<sup>[2-3]</sup>。此外, 存储单元磁性隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)还具有较好的抗电离辐射和耐高低温性能, 因此 MRAM 有望成为未来空间飞行任务普遍采用的理想存储器。

大量研究表明, 空间辐射效应对 MRAM 的外围 CMOS 电路和 MRAM 存储单元都会产生影响。对外围 CMOS 电路而言, 其存在电离总剂量(TID)损伤、单粒子锁定(SEL)、单粒子翻转(SEU)、单粒子瞬态(SET)和单粒子功能中断(SEFI)等风险。在 MRAM 存储单元方面, 典型的 MRAM 存储单元结构为 1T-1MTJ(1 个 MTJ 和 1 个 NMOS 晶体管漏端相连, 也即 1M1T)结构, 其中 NMOS 晶体管受辐射效应影响会产生阈值漂移现象, 而认为 MTJ 对辐射免疫<sup>[4-5]</sup>的论断也被证明并不符合实际<sup>[6-7]</sup>。

本文主要总结国际上关于第一代 Toggle-MRAM 和少量的第二代 STT-MRAM 的辐射试验研究结果, 包括 TID 效应致 MRAM 读错误机制、单粒子效应(SEE)致 MRAM 写错误机制以及辐射效应对 MTJ 性能的影响。而全面准确地理解 MRAM 的抗辐射机理有利于更好地利用新材料、新结构来提高 MRAM 的抗辐射性能。

## 1 MRAM 的辐射效应研究

### 1.1 辐射效应导致 MRAM 读写错误的物理机制

自 2006 年 Freescale 公司推出第一款型号为 MR2A16A 的商用 Toggle-MRAM 芯片以来, MRAM 技术不断发展。为了确保 MRAM 能够应用于空间飞行任务, 研究人员对这些不断量产面世的 MRAM 进行了大量总剂量效应和单粒子效应评估试验。

在长期空间飞行任务中, MRAM 的读操作概率远远大于写操作; 当系统处于休眠模式时, MRAM 进入静态模式。研究人员对静态模式、读模式和读写模式进行了 TID 试验评估, 表 1 为 Everspin (Freescale)、Aeroflex 和 Honeywell 三家公司的不同型号 MRAM 器件的 TID 试验结果(表中以不同颜色作区分, 蓝色区域为商用 MRAM, 粉色区域为抗辐射加固 MRAM), “测试条件”列给出了辐照试验过程中 MRAM 的操作模式、辐照试验采用的辐照源以及剂量率, 文献中未给出测试条件的以符号“—”标注; “抗 TID 能力”列的数值给出的是 MRAM 未出现读写错误的最高辐照剂量( $\geq$ )或出现读写错误的最低剂量( $<$ )。表 1 中除 Honeywell 公司的一款抗辐射 STT-MRAM 和 Avalanche 公司的一款商用 STT-MRAM 外, 都是 Toggle-MRAM。相同型号 MRAM 抗 TID 能力的差异可能和芯片工艺偏差、辐照剂量率以及辐照过程中 MRAM 的读写模式的不同有关。从表 1 可以看出, 静态模式、读模式以及读写模式下的 TID 试验结果均表明, 几乎所有 MRAM 产品都可以承受 40 krad(Si) 以上的总剂量电离辐射<sup>[8]</sup>, 有些甚至可以达到 100 krad(Si) 以上的抗总剂量辐射水平。考虑到空间真实剂量率更低<sup>[9]</sup>, 总剂量效应产生的电子-空穴对数目更少, 对 MRAM 性能影响较小, MRAM 极有可能实现空间应用<sup>[10]</sup>。2009 年, Honeywell 公司研发出第一款 1 Mbit 的抗辐射加固 MRAM(型号为 HXNV0100), 其采用 SOI CMOS 电路(称为 SOI-MRAM), 研究发现该 MRAM 经 1 Mrad(Si) 的总剂量辐照( $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线和 X 射线)后, 读写参考电压、读写参考电流、读写周期等读写性能没有发生明显的变化, 这表明 SOI-MRAM 经 1 Mrad(Si) 的总剂量辐照后硅衬底和隧穿势垒层中的电荷捕获和阈值漂移不明显<sup>[7]</sup>。

Aeroflex 公司的抗辐射加固采用 0.18 μm TSMC CMOS 工艺, 其抗总剂量辐射能力在 100 krad(Si)~1 Mrad(Si) 之间, 而 Honeywell 公司采用 SOI CMOS 电路加固的 SOI-MRAM 的抗总剂量辐射能力均可

以达到 1 Mrad(Si) 以上<sup>[7,11-14]</sup>。Katti 等的研究表明, 受制于硅器件的阈值漂移效应和 MTJ 的 AlO<sub>x</sub> 绝缘势垒层性能, MRAM 的抗 TID 能力和抗重离子效应能力无法进一步提高<sup>[7]</sup>。

表 1 MRAM 抗总剂量效应能力评估

Table 1 Data of total ionizing dose resistance of MRAM Chips

年份	制造商	型号	容量/Mbit	技术节点	抗TID能力/rad(Si)	测试条件	文献
2007	Freescale	MR2A16A	4	90 nm CMOS	≥60 k	读模式, <sup>60</sup> Co γ, 25 rad(Si)/s	[8]
2007	Freescale	MR2A16A	4	90 nm CMOS	≥40 k	读写模式, <sup>60</sup> Co γ, 25 rad(Si)/s	[8]
2008	Freescale	MR2A16A	4	90 nm CMOS	≥90 k	读模式, <sup>60</sup> Co γ, 30 rad(Si)/s	[9,15]
2010	Everspin	MR0A08B	1	0.13 μm CMOS	≥75 k	读写模式, <sup>60</sup> Co γ, 25 rad(Si)/s	[16]
2017	Everspin	MR0A08B	1	0.13 μm CMOS	<30 k	静态模式, <sup>60</sup> Co γ, 50 rad(Si)/s	[17]
2017	Everspin	MR2A08A	4	0.18 μm CMOS	<120 k	静态模式, <sup>60</sup> Co γ, 50 rad(Si)/s	[17]
2016	Everspin	MR4A08B	16	0.18 μm CMOS	<65 k	静态模式, <sup>60</sup> Co γ, 50 rad(Si)/s	[18]
2018	Everspin	MR25RH10	1	—	<40 k	静态模式, <sup>60</sup> Co γ, 78 rad(Si)/s	[19]
2018	Everspin	MR25RH10	1	—	<40 k	静态模式, 电子束, 75 rad(Si)/s	[19]
2019	Avalanche	AS008MA12A	8	55 nm CMOS	≥2 M	—	[20]
2012	Aeroflex	UT8MR2M8	16	0.18 μm TSMC CMOS	<75 k	—(加固前)	[11]
2012	Aeroflex	UT8MR2M8	16	0.18 μm TSMC CMOS	≥300 k	—(加固后)	[11]
2012	Honeywell	HXNV0100	1	0.15 μm SOI CMOS	≥1 M	<sup>60</sup> Co γ, X-ray	[7]
2014	Honeywell	HXNV01600	16	0.15 μm SOI CMOS	≥1 M	—	[12]
2014	Honeywell	HXNV06400	64	0.15 μm SOI CMOS	≥1 M	—	[13]
2018	Honeywell	—(STT)	256	0.15 μm SOI CMOS	≥1 M	—	[14]

大量研究表明, 当总剂量超过 MRAM 所能承受的阈值时, 发生读错误的比特单元数目将急剧增加<sup>[9,16]</sup>。目前关于 TID 致 MRAM 读错误机制还没有统一定论, Zhang 等<sup>[18]</sup> 提出存储单元晶体管电阻漂移模型(如图 1<sup>[18]</sup> 所示)。

是由总剂量电离效应产生的电子-空穴对在浅槽隔离区域(shallow trench isolation, STI)被陷阱捕获从而形成陷阱电荷和界面态导致的, 此时 STI 区域相当于栅氧。进行读操作时, MRAM 存储单元依据式(1)进行状态读取:

$$I_{read}(R_{DS} + R_L) < I_{read}(R_{DS} + R_{REF}) < I_{read}(R_{DS} + R_H) \quad (1)$$

式中:  $I_{read}$  为读电流;  $R_{DS}$  为存储单元晶体管的沟道电阻;  $R_L$  为比特信息为“0”的 MTJ 的电阻;  $R_H$  为比特信息为“1”的 MTJ 的电阻;  $R_{REF} = (R_L + R_H)/2$ , 为参考电阻。

随着 TID 剂量增加, 更多正电荷被 STI 氧化物捕获, 导致 NMOS 有效沟宽增大、寄生晶体管阈值负漂移增大, 进而导致存储单元晶体管的沟道电阻  $R_{DS}$  降低。如图 2 所示, 由于 TID 效应,  $R_{DS}$  降低程度大于参考单元 MOS 管的沟道电阻降低程度, 导致部分  $I_{read}(R_{DS} + R_H)$  值小于  $I_{read}(R_{DS} + R_{REF})$  值, 从而导致一部分状态“1”被读成“0”的读错误; 反之,  $R_{DS}$  降低程度小于参考单元 MOS 管的沟道电阻降低程度, 则会导致一部分状态“0”被读成“1”的读错误。

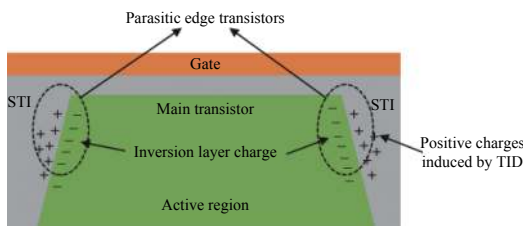
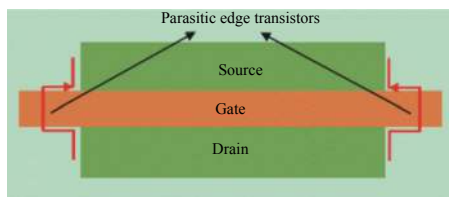


图 1 存储单元晶体管电阻漂移模型

Fig. 1 Resistance drift model of transistor in memory cell

由图 1 可知, 存储单元晶体管由 1 个 NMOS 晶体管和 2 个寄生晶体管组成, 寄生晶体管的存在

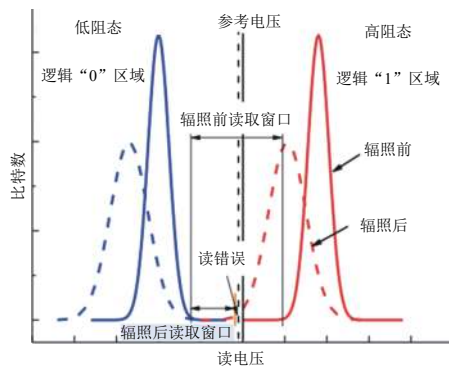


图 2 总剂量效应导致 Toggle-MRAM 读错误机制示意<sup>[18]</sup>  
 Fig. 2 Physical mechanism of TID-induced Read errors in Toggle-MRAM<sup>[18]</sup>

表 2 为三家公司不同型号 MRAM 器件的 SEE 试验结果(表中同样以不同颜色区分商用 MRAM 和抗辐射加固 MRAM, 且除表 1 所述的 2 款 STT-MRAM 外, 都是 Toggle-MRAM)。表中的 SEE 阈

值为 MRAM 未出现读写错误的最高辐照剂量( $\geq$ )或出现读写错误的最低剂量( $<$ )。由表 2 可见, MR2A16A MRAM 对 SEL 敏感<sup>[15]</sup>, 而 MRAM 存储单元采用 NMOS 管与 MTJ 集成工艺, 物理上不存在 PNP 寄生结构, 不会产生单粒子锁定效应<sup>[21]</sup>, 因此前端体硅 CMOS 外围电路是 MRAM 的 SEL 辐射敏感区域<sup>[15]</sup>。关于敏感节点, Elghefari 等认为这种敏感性主要是由 CMOS 中有源区引起的<sup>[22]</sup>, 有研究人员认为晶体管的漏端是最敏感的节点。经设计加固和在 CMOS 制程中采用外延层后, MR0A08B 的单粒子锁定阈值可达  $84 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  以上<sup>[16,23]</sup>。Honeywell 和 Aeroflex 公司的 SOI MRAM 对 SEL 免疫, 单粒子翻转率  $\leq 10^{-10} (\text{d}^{-1}\cdot\text{bit}^{-1})$ , 这主要是因为 SOI CMOS 电路避免或缓解了体硅 CMOS 器件中的辐射效应<sup>[14]</sup>。

表 2 MRAM 抗单粒子效应能力评估

Table 2 Data of single event effect resistance of MRAM Chips

年份	型号	单粒子锁定阈值/ ( $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ )	单粒子翻转率/ ( $\text{d}^{-1}\cdot\text{bit}^{-1}$ )	硬错误阈值/ ( $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ )	其他单粒子效应阈值/ ( $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ )	文献
2007	MR2A16A	$<7$	—	—	—	[8]
2008	MR2A16A	$<10$	—	—	—	[22]
2010	MR0A08B	$\geq 84$	—	—	—	[16]
2013	(4Mb MRAM)	—	0	—	—	[23]
2017	MR0A08B	$\geq 67.97$	—	—	—	[24]
2019	AS008MA12A	—	—	—	SEFI $\geq 60$	[20]
2009	HXNV0100	免疫	$\leq 10^{-10}$	$\geq 69$	—	[7, 25]
2012	UT8MR2M8 (加固前)	$<17$	—	—	—	[11]
2012	UT8MR2M8 (加固后)	$\geq 112$	—	—	SET $< 18.1$ SEFI $< 29.5$	[11]
2014	HXNV06400	免疫	$\leq 10^{-10}$	—	—	[13, 26]
2017	HXNV01600	免疫	$\leq 10^{-10}$	$< 88$	—	[14, 25]
2018	—(STT)	免疫	—	$> 88$	—	[14]

在传统的半导体电荷存储器, 如静态随机存储器 SRAM<sup>[27]</sup> 和动态随机存储器 DRAM<sup>[28]</sup> 中, 单粒子效应在 MOS 晶体管的阱区和源漏端引发电子-空穴对, 产生的寄生电流会使存储单元比特状态改变, 从而导致单粒子翻转错误。Toggle-MRAM 数据写入后, 其数值取决于 MTJ 磁化层的磁化状态, 单粒子效应产生的寄生电流( $\mu\text{A}$  级)不足以改变存储单元状态(改写电流为 mA 级), 故大量研究认为静态和写入状态下 Toggle-MRAM 对 SEU 免疫<sup>[16,24]</sup>。Toggle-MRAM 的读电流在  $10 \mu\text{A}$  左右, 因此理论上 Toggle-MRAM 在读操作状态下最敏感; 但 2013 年 Tsiliagiannis 等研究发现, 在中子和  $\alpha$  射线

辐照下 MRAM 没有产生 SEU 软错误<sup>[24]</sup>。分析 SEU 产生需要的 3 个条件: 1) 辐照产生寄生电流; 2) 存在敏感区域; 3) 读取时间窗口足够大。而 MRAM 读取时间较短(35 ns)且只有 8 个灵敏放大器, 因此 MRAM 读操作时产生 SEU 的概率也极低。2012 年 Aeroflex 公司对抗辐射加固 UT8MR2M8 MRAM 芯片进行 SEU 测试<sup>[11]</sup>, 试验采用氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe) 4 种重离子, LET (linear energy transfer) 值范围为  $5.7\sim 112 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ , 研究发现 MRAM 没有发生 SEU, 分析认为器件在离子辐照过程中读操作时所探测到的错误是由 SET 和 SEFI 效应引起的, 并分别在 LET 阈值为 18.1 和

29.5 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 时观察到 SET 和 SEFI。

Sakimura 等<sup>[29]</sup> 和 Wakimura 等<sup>[30]</sup> 分别对 STT-MRAM 和 STT-MRAM 的 1M1T 存储单元进行单粒子翻转仿真, 研究表明, 随着 STT-MTJ 技术节点越来越小, 其翻转电流不断变小, 发生 SEU 的概率也越来越大。2016 年, Yang 等<sup>[31]</sup> 研究了重离子辐照下 STT-MRAM 存储单元的写错误机制, 提出在没有重离子入射时, MTJ 的写电流为

$$I_{\text{write}} = \frac{V_{\text{dd}}}{R_{\text{DS}} + R_{\text{MTJ}}} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{dd}}$  为电源电压;  $R_{\text{MTJ}}$  为 MTJ 在写入电流和对应偏压下的结电阻。若重离子轰击存储单元 NMOS 源端, 则在离子入射的通道处产生大量电子-空穴对, 从而在源端和衬底之间形成临时沟道。将该临时沟道电阻定义为  $R_{\text{SB}}$ , 写“1”时位线接地, 则  $R_{\text{SB}}$  和  $R_{\text{MTJ}}$  并联(如图 3(a) 所示), 根据 Kirchhoff 电流定律和 Kirchhoff 电压定律可知, 此时 MTJ 的写电流为

$$I'_{\text{write}} = \frac{V_{\text{dd}}}{R_{\text{DS}} + R_{\text{MTJ}} \left(1 + \frac{R_{\text{DS}}}{R_{\text{SB}}}\right)} \quad (3)$$

可见, 写电流和临时沟道电阻  $R_{\text{SB}}$  呈正比。临时沟道电阻  $R_{\text{SB}}$  和辐射强度有关: 辐射强度越大;  $R_{\text{SB}}$  越小, 写电流越小; 当写电流减小至不足以翻转 MTJ 磁矩时就会导致 MTJ 写“1”错误。相反, 写“0”时, 由于衬底接地, 临时沟道电阻  $R_{\text{DB}}$  和  $R_{\text{DS}}$  并联(如图 3(b) 所示), 此时 MTJ 的写电流为

$$I'_{\text{write}} = \frac{V_{\text{dd}}}{R_{\text{DS}} // R_{\text{DB}} + R_{\text{MTJ}}} \quad (4)$$

可见, 随辐射强度增大, 临时沟道电阻  $R_{\text{DB}}$  减小, 从而导致 MTJ 写电流增大, 但这并不会导致 MTJ 写“0”错误, 因此写“1”错误是 STT-MRAM 最主要的写错误形式。

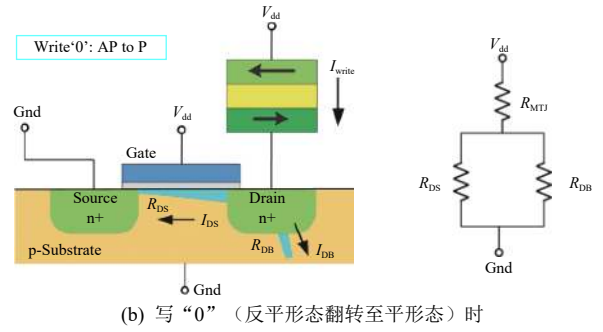
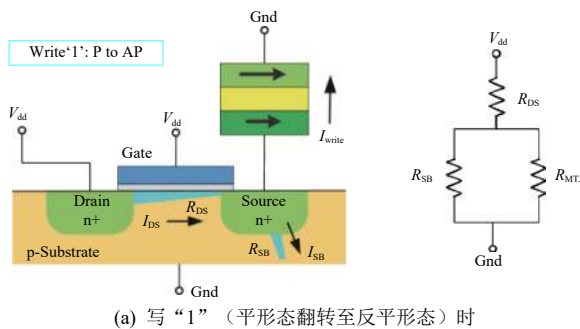


图 3 重离子轰击存储单元晶体管形成临时沟道示意和等效电路<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Physical mechanism of Write errors in STT-MRAM after heavy ion impact on the access transistor and equivalent circuit<sup>[31]</sup>

## 1.2 辐射对磁性隧道结性能的影响

一直以来, 大多数研究主要是对 MRAM 芯片进行辐照试验, 但是要弄清楚磁性隧道结是否对辐射免疫, 需要单独研究辐射对 MTJ 性能的影响<sup>[32-34]</sup>。

磁性隧道结若在辐射环境下能够正常工作, 其核心性能应该至少满足以下条件: 1) 较高的隧穿磁电阻 (TMR) 值, 使得 MRAM 具有足够大的读区间, 避免由于低 TMR 值导致的读错误; 2) 较小的磁性隧道结电阻和结面积的积矢 (the area resistance, RA); 3) 足够高的热稳定性系数  $\Delta$  ( $>60 \sim 70$ ), 从而使得数据保持时间可以足够长 (10 年以上)。热稳定性系数可以表示为

$$\Delta = \frac{E}{k_{\text{B}}T} = \frac{M_{\text{s}}H_{\text{k}}V}{2k_{\text{B}}T} \quad (5)$$

式中:  $M_{\text{s}}$  为饱和磁化强度;  $H_{\text{k}}$  为有效各向异性场;  $V$  为自由层的体积;  $k_{\text{B}}$  为 Boltzmann 常数;  $T$  为绝对温度。可以看出, 要获得高的  $\Delta$  值, 铁磁电极的饱和磁化强度  $M_{\text{s}}$  和矫顽力  $H_{\text{C}}$  ( $H_{\text{C}}$  和  $H_{\text{k}}$  成正比) 需要足够大。

早期的研究集中在离子 (如 He<sup>+</sup><sup>[34-35]</sup>、Ar<sup>+</sup><sup>[35-38]</sup>、C<sup>-</sup><sup>[39]</sup>、O<sup>2-</sup><sup>[39]</sup>、Ni<sup>+</sup><sup>[39]</sup>、Kr<sup>+</sup><sup>[39]</sup>、Si<sup>4+</sup><sup>[40]</sup>、Ag<sup>+</sup><sup>[40-42]</sup>、Ga<sup>+</sup><sup>[40-42]</sup> 等) 辐射对 AIO<sub>x</sub> 势垒 MTJ 输运性能和磁性能的影响, 结果表明 TMR 随离子注量增加而降低。其主要原因为: 1) 铁磁/氧化物界面互扩散增强, 铁磁电极的自旋极化率降低, 从而降低 TMR; 2) 绝缘层缺陷密度增大, 产生额外的电子传输通道, 但该通道对电流的极化弱于直接隧穿, 因此 TMR 降低<sup>[34,38]</sup>。RA 随离子注量、能量增加而增大直至饱和<sup>[36]</sup>, RA 饱和平台主要是由势垒缺陷密度增大和势垒变宽

两个因素的竞争作用导致的:一方面,随离子注量增加,势垒层中缺陷密度增加,导致势垒电阻降低,从而降低 RA;另一方面,辐射导致 Al 和 O 原子配位发生局部变化(不影响自旋极化率/TMR),导致势垒变宽,从而增大 RA。同时,随离子注量增加,铁磁电极的  $H_C$  降低,而  $M_s$  不发生变化。以上研究表明,在重离子轰击下 MTJ 并不完全抗辐射:辐射对 MTJ 的影响虽然很小但不可逆,这和 MTJ 的结构以及离子的种类、能量和注量有关;辐射导致隧穿势垒层附近的界面效应变化和电子结构变化是辐射效应影响 MTJ 性能最主要的因素。

2012 年, Hughes 等<sup>[43]</sup> 和 Ren 等<sup>[44]</sup> 分别对基于 MgO 势垒的面内磁各向异性 MTJ 进行辐射效应研究,结果在质子(约  $10^{12}/\text{cm}^2$ )<sup>[43]</sup>、中子(约  $10^{15}/\text{cm}^2$ )<sup>[44]</sup> 和  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(10 Mrad(Si))<sup>[43]</sup> 辐射下, MTJ 薄膜的磁化曲线、电阻和 TMR 没有发生变化;同时 MTJ 的比特状态和写入性能没有发生变化。这说明  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线、质子和中子辐射对 MTJ 的磁性能 ( $M_s$ ,  $H_C$ ) 和 STT 翻转特性影响不大,从而表明这些辐射环境下 MRAM 产生的读写错误是由 CMOS 电路引起的<sup>[43]</sup>。最近的研究工作表明, MgO 势垒的垂直磁各向异性 MTJ 也对  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线和质子辐射免疫<sup>[45]</sup>, 但以上研究均未涉及重离子辐射对 MgO 势垒 MTJ 性能的影响。2014 年,日本东北大学的 Kobayashi 等<sup>[46]</sup> 研究了不同偏压条件下 Si 离子(约  $10^{12}/\text{cm}^2$ )对垂直磁各向异性 MTJ 的辐射效应,发现在 Si 离子轰击下,辐射前后磁性隧道结比特状态相同,这表明静态下 MTJ 有很强的抗 SEU 能力;该研究同时表明 MTJ 的结电阻和热稳定性系数  $\lambda$  几乎不变。Katti 等<sup>[7]</sup> 利用高注量重离子辐照 Toggle-MRAM 芯片(HXNV0100)的研究发现, MRAM 有硬错误并伴随着 MTJ 电阻的明显降低,并认为这可能由重离子对隧穿势垒层的破坏和位移损伤导致<sup>[47-48]</sup>; 2017 年, Katti<sup>[6]</sup> 研究重离子对 Toggle-MRAM(型号 HXNV01600)的截面损伤(Cross-Section)发现,尽管辐照过程中并无 SEU 发生,但一些重离子的 LET 值超过某一阈值后,重离子辐射会对 MTJ 的势垒层造成截面损伤,因此相较于粒子注量, LET 值和重离子的原子序数是对 MTJ 重离子截面更为重要的影响因素,这表明重离子辐射对 MTJ(尤其是隧

穿势垒层)的影响是瞬时的而非渐进的——在极高 LET 值和极高注量下,重离子可能会击穿隧穿势垒层<sup>[14]</sup>。这些研究表明 MTJ 并不完全抗辐射:辐射可能使 MTJ 的结构和性能发生变化从而导致错误。2018 年, Katti 等<sup>[14]</sup> 采用  $\text{Ne}^+$ 、 $\text{Ar}^+$ 、 $\text{Kr}^+$  和  $\text{Au}^+$  等重离子对 256 Mbit STT-MRAM 进行重离子辐照测试,发现所有辐射条件下 STT-MRAM 均无硬错误发生,而 Toggle-MRAM 在较强辐射下产生硬错误。这主要是由于 STT-MTJ 采用 MgO 势垒材料以及由于尺寸微缩导致入射至 STT-MRAM 比特单元的离子数目减少。Wang 等<sup>[49]</sup> 近期研究发现, 1907 MeV 的  $\text{Ta}^+$  离子和 2000 MeV 的  $\text{Kr}^+$  离子辐射仍未影响双 CoFeB/MgO 界面 STT-MTJ 的电学性能,表明基于 MgO 势垒的 STT-MTJ 具有良好的抗辐射性能。

## 2 MRAM 加固技术简述

图 4 为几款 MRAM 的 SEL 阈值和抗总剂量能力总结,第一款 MRAM 芯片 MR2A16A 的抗总剂量能力和抗 SEL 能力均较弱;MR0A08B 经设计加固和在 CMOS 工艺中采用外延层后, SEL 阈值得以提高; Honeywell 公司的 HXNV 系列 MRAM 采用 SOI CMOS 电路,抗总剂量能力得到了大幅度提高并对 SEL 免疫。

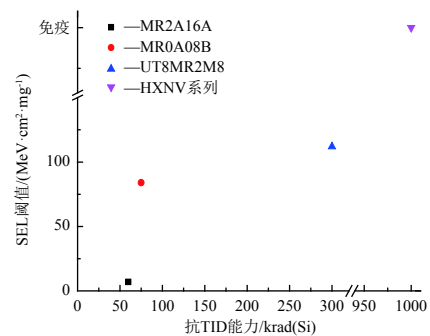


图 4 几款 MRAM 的 SEL 阈值和抗总剂量能力  
Fig. 4 SEL threshold and TID resistance for several MRAM chips

MRAM 存储区和外围电路的辐射失效类型和辐射失效机理不同,因此 MRAM 应在不同的节点针对不同的辐射类型进行相应的加固。此前研究人员已经提出一些 MRAM 的电路设计加固方法<sup>[50-51]</sup>。目前在工艺方面,外围电路多采用 SOI CMOS 电路以避免 SEL 效应<sup>[52-53]</sup>, 提高抗总剂量能力; MRAM 存储单元多采用 NMOS 管与 MTJ 集成工艺,物理上不存在 PNP 寄生结构,不会产生 SEL 效应。对

于存储单元 NMOS 而言,可通过提高沟道宽长比、采用环形栅以及场区注入等方法进行加固;对于 MTJ 而言,应尽可能提高其 TMR 值,以减少辐射后 TMR 降低对 MRAM 的影响。

### 3 结束语

商用 MRAM 采用体硅 CMOS 外围电路,因此对 SEL 效应较为敏感;SOI-MRAM 则能消除 SEL 效应敏感。辐射环境下 MRAM 读写错误的物理机制还不完全清楚:存储单元晶体管沟道电阻改变可能是 MRAM 受总剂量电离辐射产生读错误的物理机制之一;重离子入射轨迹临时沟道的形成则可能是 MRAM 受重离子辐射产生写错误的物理机制之一。Toggle-MRAM 中的  $\text{AlO}_x$  势垒磁性隧道结并不完全抗辐射——辐射会影响 MTJ 的电输运性能和磁性能,极高 LET 值重离子辐射可能会击穿 MTJ 势垒层从而会导致 MRAM 芯片发生硬错误。STT-MRAM 采用 MgO 势垒且存储单元尺寸缩小,因此其抗单粒子硬错误能力增强;但由于 STT-MTJ 尺寸微缩引起的临界翻转电流降低也导致其 SEU 风险增大。辐射效应对 MTJ 性能的影响与 MTJ 的结构以及离子的种类、能量和注量有关;隧穿势垒层附近的界面效应和电子结构变化是辐射效应影响 MTJ 性能最主要的原因。

随着基于自旋转移矩写入技术的垂直磁各向异性磁性隧道结的逐步推广应用,辐射效应对垂直磁各向异性的影响,不同种类重离子辐射对 MTJ 阵列读写性能和数据保持的影响,重离子辐射和磁性隧道结中扩散(铁磁电极和 MgO 势垒层的互扩散、元素扩散)的关联,以及如何通过调节磁性隧道结材料、结构和尺寸来提高 MRAM 抗辐射性能等仍然需要深入研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] WANG A N. Pulse transfer controlling devices: US12276949A[P]. 1955-05-17
- [2] 赵巍胜,王昭昊,彭守仲,等. STT-MRAM 存储器的研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2016, 46(10): 63-83  
ZHAO W S, WANG Z H, PENG S Z, et al. Recent progresses in spin transfer torque-based magnetoresistive random access memory (STT-MRAM)[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(10): 63-83
- [3] 吕晓蓉. 磁随机存取存储器: 专利视角下的产业化趋势[J]. 科学通报, 2016, 61(9): 996-1007  
LÜ X R. Magnetic random access memory: commercialization trend from the perspective of patents[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(9): 996-1007
- [4] BRADY F T, MAIMON J D, HURT M J. A scaleable, radiation hardened shallow trench isolation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999, 46(6): 1836-1840
- [5] MANGHISONI M, RATTI L, RE V, et al. Comparison of ionizing radiation effects in 0.18  $\mu\text{m}$  and 0.25  $\mu\text{m}$  CMOS technologies for analog applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 1827-1833
- [6] KATTI R R. Heavy-ion device cross-section response in magnetic tunnel junctions for a radiation hardened 16 Mb Magnetic random access memory (MRAM)[C]//2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2017). New Orleans, LA, USA, 2017: 1-4
- [7] KATTI R R, LINTZ J, SUNDSTROM L, et al. Heavy-ion and total ionizing dose (TID) performance of a 1 Mbit Magnetic random access memory (MRAM)[C]//2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2009). Quebec City, QC, Canada, 2009: 103-105
- [8] NGUYEN D N, IROM F. Radiation effects on MRAM[C]//9<sup>th</sup> European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS2007). Deauville, France, 2007: 1-4
- [9] OLDHAM T R, PLAM A, FRIENDLIEH M. Total dose test report for Freescale 4M MRAM (Magnetic RAM) nonvolatile memory: NEPP Rep G07OCT\_MR2A16A\_TID\_I032707[R]. Washington DC: NASA, 2007
- [10] GADLAGE M J, KAY M J, HOWARD A H, et al. Extend life testing of previously heavy-ion irradiated MRAMs[C]//2015 Government Microcircuit Applications & Critical Technology Conference (GOMAC2015). St Louis, MO, USA, 2015: 23-26
- [11] HAFER C, VON THUN M, MUNDIE M, et al. SEU, SET, and SEFI test results of a hardened 16 Mbit MRAM device[C]//2012 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2012). Tucson, AZ, USA, 2012: 1-4
- [12] HXNV01600 1024 k $\times$ 16 non-volatile magnetic RAM, Honeywell data sheet[EB/OL]. [2020-05-20]. <http://aerospace.honeywell.com>
- [13] HXNV06400 64 Mb non-volatile MRAM, Honeywell data sheet[EB/OL]. [2020-05-20]. <http://aerospace.honeywell.com>

- com
- [14] KATTI R R, GUERTIN S M, YANG-SCHARLOTTA J Y, et al. Heavy ion bit response and analysis of 256 megabit non-volatile spin-torque-transfer magnetic random access memory (STT-MRAM)[C]//2018 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2018). Waikoloa Village, HI, USA, 2018: 1-4
- [15] 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 (REDW2008). Tucson, AZ, USA, 2008
- [16] HEIDECKER J, ALLEN G, SHELDON D. Single event latchup (SEL) and total ionizing dose (TID) of a 1 Mbit magnetic random access memory (MRAM)[C]//2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2010). Denver, CO, USA, 2010: 4
- [17] CUI Y, YANG L, GAO T, et al. Total ionizing radiation-induced read bit-errors in Toggle magnetic random-access memory devices[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(8): 087501
- [18] ZHANG H, BI J, WANG H, et al. Study of total dose ionizing dose induced read bit errors in magneto-resistive random access memory[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 67: 104-110
- [19] ZHANG X Y, GUO Q, LI Y D, et al. Total ionizing dose and synergistic effect of magnetic random access memory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(8): 111-118
- [20] 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 (REDW2019). San Antonio, TX, USA, 2019: 190-193
- [21] LAYTON P J, CZAJKOWSKI D R, MARSHALL J C, et al. Single event latchup protection of integrated circuits[C]//1997 4<sup>th</sup> European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS1997). Cannes, France, 1997: 327-331
- [22] ELGHEFARI M, MCCLURE S. Radiation effects assessment of MRAM devices[EB/OL]. [2020-05-20]. <http://hdl.handle.net/2014/40809>
- [23] ADELL P C, MORO S, GOUYET L, et al. Single event effect assessment of a 1-Mbit commercial magneto-resistive random access memory (MRAM)[C]//2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW2017). New Orleans, LA, USA, 2017: 1-4
- [24] TSILIGIANNIS G, DILILLO L, BOSIO A, et al. Testing a commercial MRAM under neutron and alpha radiation in dynamic mode[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2617-2622
- [25] HEIDECKER J. MRAM technology status[EB/OL]. [2020-05-20]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140000668>
- [26] RADTKE M. Honeywell's radiation hardened 16 Mb and 64 Mb MRAM non-volatile memory products for space applications[C]//23<sup>rd</sup> Annual Single-Event Effects (SEE) Symposium coupled with the Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD) Workshop. San Diego, CA, USA, 2014
- [27] RECH P, GALLIERE J M, GIRARD P, et al. Neutron-induced multiple bit upsets on two commercial SRAMs under dynamic-stress[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 893-899
- [28] SCHEICK L Z, GUERTIN S M, SWIFT G M. Analysis of radiation effects on individual DRAM cells[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2534-2538
- [29] SAKIMURA N, NEBASHI R, NATSUI M, et al. Analysis of single-event upset of magnetic tunnel junction used in spintronic circuits caused by radiation-induced current[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(17): 17B748
- [30] WAKIMURA G, MATUOKA T, KAMAKURA Y. A simulation study on soft error rate in STT-MRAM[C]//2015 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK2015). Kyoto, Japan, 2015: 104-105
- [31] YANG J, WANG P, ZHANG Y, et al. Radiation-induced soft error analysis of STT-MRAM: a device to circuit approach[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2015, 35(3): 380-393
- [32] SHOCKLEY W, HOLLOWOMON J H, MAURER R, et al. Imperfections in nearly perfect crystals[M]. London: John Wiley & Sons Publication, 1952: 2-15
- [33] CONRAUX Y. Préparation et caractérisation d'un alliage amorphe ferrimagnétique de GdCo entrant dans la conception de jonctions tunnel magnétiques Résistance des jonctions tunnel magnétiques aux rayonnements ionisants[D]. Grenoble: Université Joseph-Fourier-Grenoble, 2005: 3-31
- [34] LU J, POON S, WOLF S A, et al. Radiation effects of the magnetism and the spin dependent transport in magnetic materials and nanostructures for spintronic applications[J].



- Journal of Materials Research, 2015, 30(9): 1430-1439
- [35] SCHMALHORST J, HOINK V, REISS G, et al. Influence of ion bombardment on transport properties and exchange bias in magnetic tunnel junctions[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(9): 5556-5558
- [36] SACHER M D, SAUERWALD J, SCHMALHORST J, et al. Influence of noble-gas ion irradiation on alumina barrier of magnetic tunnel junctions[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(10): 103532
- [37] SCHMALHORST J, REISS G. Temperature and bias-voltage dependent transport in magnetic tunnel junctions with low energy Ar-ion irradiated barriers[J]. Physical Review B, 2003, 68(22): 224437
- [38] SCHMALHORST J, REISS G. Transport properties of magnetic tunnel junctions with ion irradiated  $\text{AlO}_x$  barriers[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 272: E1485-E1486
- [39] CONRAUX Y, NOZIERES 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
- [40] BANERJEE T, SOM T, KANJILAL D, et al. Effect of ion irradiation on the characteristics of magnetic tunnel junctions[J]. The European Physical Journal: Applied Physics, 2005, 32(2): 115-118
- [41] SNOECK E, BAULES P, BENASSAYAG G, et al. Modulation of interlayer exchange coupling by ion irradiation in magnetic tunnel junctions[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(5): 055219
- [42] QI X J, WANG Y G, YAN J, et al. Influence of  $\text{Ga}^+$  ion irradiation on thermal relaxation of exchange bias field in the IrMn-based magnetic tunnel junctions[J]. Solid State Communications, 2010, 150(35/36): 1693-1697
- [43] HUGHES H, BUSSMANN K, MCMARR P J, et al. Radiation studies of spin-transfer torque materials and devices[J]. IEEE Transactions on nuclear science, 2012, 59(6): 3027-3033
- [44] REN F, JANDER A, DHAGAT P, et al. Radiation tolerance of magnetic tunnel junctions with MgO tunnel barriers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 3034-3038
- [45] MONTOYA E A, CHEN J, NGELALE R, et al. Immunity of nanoscale magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy to ionizing radiation[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1-8
- [46] KOBAYASHI D, KAKEHASHI Y, HIROSE K, et al. Influence of heavy ion irradiation perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(4): 1710-1716
- [47] WANG B, WANG Z, CAO K, et al. Effects of gamma irradiation on magnetic properties of double-interface CoFeB/MgO multi-films[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 66(1): 77-81
- [48] CONLEY J F, SUEHLE J S, JOHNSTON A H, et al. Heavy-ion-induced soft breakdown of thin gate oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1913-1916
- [49] WANG B, WANG Z, DU A, et al. Radiation impact of swift heavy ion beams on double-interface CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116: 172401
- [50] CHABI D, ZHAOW S, KLEIN J O, et al. Design and analysis of radiation hardened sensing circuits for spin transfer torque magnetic memory and logic[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 3258-3264
- [51] LAKYS Y, ZHAO W S, KLEIN J O, et al. Hardening techniques for MRAM-based nonvolatile latches and logic[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 1136-1141
- [52] LOPES J, DI PENDINA G, ZIANBETOV E, et al. Radiative effects on MRAM-based non-volatile elementary structures[C]//2015 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Montpellier, France, 2015: 321-326
- [53] ROCHE P, AUTRAN J L, GASLOT G, et al. Technology downscaling worsening radiation effects in bulk: SOI to the rescue[C]//2013 IEEE International Electron Device Meeting (IEDM2013). Washington DC, USA, 2013: 31.1.1-31.1.4

(编辑:张艳艳)

一作简介: 施辉(1993—),男,硕士学位,主要从事于硅基集成电路辐射机理与抗辐射加固研究。E-mail: shihuicetc58@163.com。

\*通信作者: 张海良(1980—),男,硕士学位,高级工程师,主要从事于硅基集成电路的辐射机理与抗辐射加固研究。E-mail: 2656131@qq.com。