

抗辐照 MRAM 研究进展*

孙杰杰^{1,2,3}, 王超², 李嘉威², 姜传鹏¹, 曹凯华¹, 施辉², 张有光³, 赵巍胜¹

(1. 北京航空航天大学集成电路科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏无锡 214072; 3. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:新型非易失磁性随机存储器(magnetic random access memory, MRAM)具有读写速度快、数据保持时间长、功耗低等优点,引起了研究人员的广泛关注。其优异的抗辐照能力被人们深入挖掘,有望进一步应用于航天等领域。本文回顾了MRAM的产业化发展历程、技术变革及应用情况,列举了近年成熟的MRAM产品,对不同的代际MRAM的优缺点进行了剖析;对MRAM核心存储单元——磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)和外围基于互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)的读写电路的辐射效应分别进行了探讨;总结了近年来MRAM抗辐照加固设计方面的最新成果;对抗辐照MRAM在航空航天领域甚至核能领域的发展前景进行了展望。

关键词:磁性随机存储器;磁隧道结;辐照;电离总剂量;单粒子效应

中图分类号:TN4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)06-174-22



听语音
与作者互动
聊科研

Research progress of anti-irradiation MRAM

SUN Jiejie^{1,2,3}, WANG Chao², LI Jiawei², JIANG Chuanpeng¹, CAO Kaihua¹, SHI Hui², ZHANG Youguang³, ZHAO Weisheng¹

(1. School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

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

3. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The novel non-volatile MRAM (magnetic random access memory) has the advantages of fast read and write speed, long data retention time and low power consumption, which attracts wide attention from researchers. Its excellent anti-irradiation capabilities are explored in depth, and further applications in aerospace and other fields are expected. The industrial development, technological changes and applications of MRAM were reviewed, the mature MRAM products of recent years were listed, and the advantages and disadvantages of different generations of MRAM were analyzed. The radiation effects of MTJ (magnetic tunnel junction) and read/write circuit based CMOS (complementary metal oxide semiconductor) were discussed. The recent achievements in anti-radiative hardening design for MRAM were summarized. The development prospect of anti-irradiation MRAM in aerospace field and even nuclear energy field was prospected.

Keywords: magnetic random access memory; magnetic tunnel junction; irradiation; total ionizing dose; single event effect

随着近年来云计算、物联网、大数据、人工智能、区块链等各种新兴技术的涌现,传统存储技术面临严峻的挑战,其中之一便是计算机体系架构中的“存储墙”问题^[1-4]。传统易失性静态随机存储器(static random access memory, SRAM)和动态随机存储器(dynamic random access memory, DRAM)性能的提升不再显著,SRAM昂贵的芯片面积开销与DRAM刷新操作导致的高功耗,越来越无法满足新型应用的需求。传统的非易失存储器以FLASH应用最为广泛,但却存在着读写速度慢、擦写次数有限的问题^[5-6],无法用作系统缓存

或主存。

另外,随着近年来航天技术的飞速发展,宇航电子系统不仅面临上述问题,还面临着空间辐照环境对其保存的数据和信息的干扰与破坏等问题,这进一步提高了对存储器可靠性的要求。然而,SRAM、DRAM和FLASH均易遭受空间辐照效应的影响^[7-12]。这些存储器在不进行抗辐照加固或无系统纠错措施的情况下不仅难以胜任航天任务,甚至还会严重影响航天器的在轨安全。而对芯片和系统采取辐照加固措施,往往会造成芯片面积增加、功耗增加、速度降低^[13-14]等问题。

* 收稿日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62001014,92164206)

作者简介:孙杰杰(1989—),男,山东东营人,高级工程师,博士研究生,E-mail:sunjiejie1989@126.com;

曹凯华(通信作者),男,山东东营人,助理教授,博士,硕士生导师,E-mail:kaihua.cao@buaa.edu.cn

如果存储器的存储单元本身无辐射抗性或者抗性很差,则其加固更为困难。

解决以上问题的一种有效办法是采用磁性随机存储搭建抗辐照存储系统,同时辅以其他加固措施。磁性随机存储器(magnetic random access memory, MRAM)具备非易失性、非常快的读写速度、出色的耐擦写特性、优良的数据保持能力、低功耗和存储单元天然抗辐照等优点^[15-17]。其天然抗辐照能力来源于存储数据的物理机理——它通过电子的自旋方向存储数据而非电荷,前者更不容易受到辐照影响。目前,MRAM 商用芯片的存储密度已高达 1 Gbit/芯片^[18-19],通过多芯片封装总容量已达 8 Gbit^[20]。

本文首先介绍了 MRAM 存储单元——磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)的基本结构及原理,简要概括了 MRAM 的产业化发展历程、技术变革及应用情况,然后对 MRAM 及 MTJ 的各种辐照效应进行了探讨,随后总结了近年来 MRAM 抗辐照加固设计方面的最新成果,最后对抗辐照 MRAM 的发展前景进行了展望。

1 MRAM 技术及其产业化发展历程

1.1 磁隧道结的基本结构及原理

MRAM 利用电子的“自旋”属性存储信息,核心单元为 MTJ。其基本结构如图 1 所示,主要包含参考层(reference layer, RL)、隧穿势垒层和自由层(free layer, FL)。RL 的磁化方向是固定的,

FL 的磁化方向可随外磁场方向变化而变化,当 FL 和 RL 磁化方向一致时,MTJ 表现为低电阻状态(R_p),当 FL 和 RL 磁化方向相反时,MTJ 表现为高电阻状态(R_{AP}),两种状态可分别代表逻辑“0”和“1”(或相反)。该现象被称为隧穿磁阻效应(tunnel magnetoresistance, TMR),TMR 的大小可用式(1)计算:

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} \times 100\% \quad (1)$$

TMR 值越大,“0”和“1”之间的读取窗口越大,芯片设计难度越小。

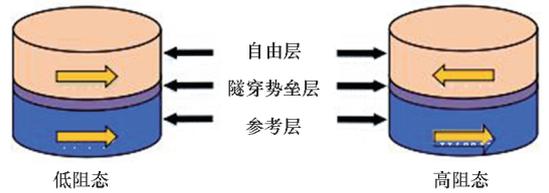


图 1 磁隧道结基本结构

Fig. 1 Basic structure of magnetic tunneling junction

早期的 MTJ 隧穿势垒层采用无定形态的 AlO_x , TMR 值可达 18%^[21]。后来,人们发现采用单晶 MgO ,可使 TMR 值达到 200% 左右^[22-23],甚至达到 604%^[24](理论预测可达 1 000%^[25-26]),所以采用单晶 MgO 作为隧穿势垒层成为主流。

1.2 MRAM 的产业化发展历程、技术变革及应用

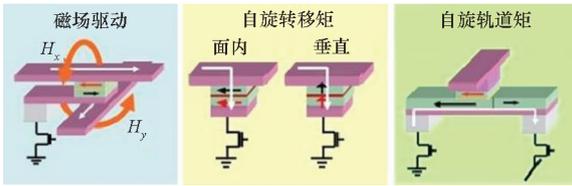
自 2006 年飞思卡尔推出第一款商用 4 Mbit 独立式 MRAM,大量的研究机构投身其中,并取得了丰硕的成果(见表 1)。

表 1 MRAM 产业化发展历程——主要研究机构及代表产品

Tab. 1 MRAM industrialization development process—main research institutions and representative products

发展历程	技术类型	代表厂家	代表产品	工艺	参考文献
第一代 MRAM	Toggle	Everspin	独立式 128 Kbit ~ 32 Mbit 串、并口系列	180 nm, 130 nm, 90 nm	[27-30]
		Aeroflex	独立式抗辐照 16 Mbit, 64 Mbit MRAM(空间应用)	180 nm TSMC CMOS	[31-32]
		Honeywell	独立式抗辐照 1 Mbit, 16 Mbit, 64 Mbit MRAM(空间应用)	150 nm SOI CMOS	[33-35]
第二代 MRAM	面内 STT	Everspin	独立式 64 Mbit MRAM	90 nm	[36-37]
		Everspin	独立式 256 Mbit, 1 Gbit	40 nm, 28 nm	[19, 38-40]
	垂直 STT	Avalanche	独立式 64 Mbit, 1 ~ 8 Gbit 嵌入式 64 Mbit	55 nm, 22 nm	[20, 41-42]
		TSMC	嵌入式 2 ~ 32 Mbit	22 nm ULL/16 nm FinFET	[43-44]
		Global Foundries	嵌入式 4 ~ 48 Mbit	22 nm FD-SOI	[45]
		三星	嵌入式 1 Gbit	28 nm, 22 nm	[18, 46-47]
Intel	嵌入式 7 ~ 16 Mbit	22 nm	[48-50]		

如图 2 所示,MRAM 核心单元 MTJ 历经了三次主要的技术变革。第一代 MRAM 采用磁场牵引(Toggle)写入技术^[27],MTJ 的势垒层采用 AlO_x (Toggle-MRAM 的后续产品也逐渐用 MgO 取代了 AlO_x),其 RL 和 FL 的磁化方向都平行于薄膜平面,即面内磁各向异性(in plane magnetic anisotropy, IMA)。FL 采用合成反铁磁(synthetic antiferromagnetic, SAF)结构,易磁化轴方向与字线、位线各呈 45° 。写入操作时对字线和位线按照特定时序施加写入电流从而形成 45° 连续变化的三组感应磁场(如图 3 所示),利用磁场改变 FL 磁化方向,完成数据写入。基于这种技术, Everspin 陆续推出了容量 128 Kbit ~ 32 Mbit 的商用 MRAM 产品。这些商用产品的 MTJ 具有抗辐照特性,但其外围互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)逻辑并未进行辐照加固,仍然难以满足空间应用的要求。因此,一方面,研究机构对 Everspin 商用 MRAM 进行了辐射效应评估,辅以一些系统加固措施,以满足在一定条件范围内的应用;另一方面, Aeroflex 和 Honeywell 从 Everspin 获得授权,采用其 MTJ 技术,并在此基础上对 CMOS 逻辑部分进行了抗辐照加固,随后采用陶瓷封装,并通过一系列严格的筛选及质量检验措施使其真正成为满足空间应用的宇航级抗辐照产品。



(a) Toggle 磁场写入 (b) STT 写入 (c) SOT 写入
(a) Toggle write mode (b) STT write mode (c) SOT write mode

图 2 MTJ 技术类型

Fig. 2 MTJ technology types

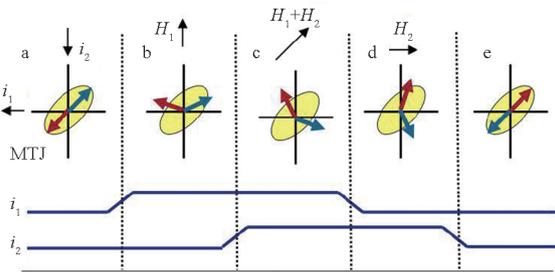


图 3 Toggle-MRAM 写时序^[27]

Fig. 3 Writing sequence in Toggle-MRAM^[27]

然而,Toggle 磁场写入存在功耗高(mA 级)、存储密度低和设计复杂等缺点,这限制了 Toggle-

MRAM 的应用前景。第二代 MRAM 凭借自旋转移矩^[51-52](spin transfer torque, STT)^[51-52]及垂直磁各向异性^[53-54](perpendicular magnetic anisotropy, PMA)的应用很好地解决了上述问题。首先,相较于 Toggle-MRAM 通过电流产生磁场而间接改变 FL 磁矩的写入方式,STT-MRAM 是依靠电流流过 MTJ 直接翻转 FL 磁矩,从而实现数据的写入,因此又被称为纯电学写入方式。STT-MRAM 写入电流的方向决定 FL 的磁化翻转方向,写入电流密度在 $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ 之间,且写入电流的大小随工艺尺寸的缩小而减小,写入功耗大大降低,同时免去了复杂的设计。其次,PMA 的应用解决了面内磁各向异性 MTJ(iMTJ)尺寸不能进一步微缩的问题,大大提高了存储密度,同时获得了更低的临界翻转电流(I_c)。因此,在产业化发展过程中,iMTJ 很快被垂直磁各向异性 MTJ(pMTJ)所取代,现在所说的第二代 MRAM 主要是指具有 PMA 的 STT-MRAM。

STT-MRAM 以其较快的读写速度、较高的存储密度及出色的数据保持特性吸引了几乎所有半导体厂商(TSMC、Global Foundries、三星、Intel、UMC、海力士、索尼、IBM 等)的关注与研发。其主要原因 eFLASH 已止步于 28 nm 工艺节点,而 STT-MRAM 是目前最有希望的嵌入式存储器候选者^[55]。此外,人们也在研究将其用于最后一级缓存,以取代数据易失的 SRAM。

相比于 Toggle-MRAM,STT-MRAM 缺点主要体现在擦写次数和数据保持两个指标互相矛盾,无法兼得。其原因与 STT 电流写入模式有关:提升 MTJ 的数据保持能力需提升其热稳定性,而热稳定性的提升导致 STT 临界翻转电流(电压)的上升,而势垒层介质的寿命(与时间相关)又与写入电流(电压)呈负相关,势垒层寿命的下降导致擦写次数降低。因此,对于 pSTT-MRAM 产品,只能突出优化其中一个方面。而第一代 Toggle-MRAM 一方面由于其为磁场写入,势垒层寿命不会受到写入电流的影响而降低,因此其擦写次数理论上无限次;另一方面,可以通过优化其 MTJ 器件结构、材料和参数来提升其数据保持能力,而不用担心影响到擦写次数。经过优化,其数据保持能力可达 20 年(@ 125°C)。另外,STT-MRAM 的写入速度也存在瓶颈,这一瓶颈来源于写入初期微弱的自旋转移矩导致的“初始延迟”,虽然可以通过增加写入电流来解决这一问题,但也增加了势垒层被击穿的风险。表 2 为几代 MRAM 性能的综合比较。

表2 不同代际 MRAM 产品性能比较

Tab.2 Performance comparison of MRAM products in different generations

技术指标	第一代 MRAM	第二代 MRAM		第三代 MRAM	第四代 MRAM 可能的方向
		擦写次数优化	数据保持优化		
类型	Toggle-MRAM	pSTT	pSTT	SOT	EB-MRAM 存储技术
容量	32 Mbit	1 Gbit	20 Mbit	32 Mbit, 64 Mbit	1 Gbit
数据保持	20 年 (@ 125 °C)	3 个月 (@ 70 °C)	10 年 (@ 150 °C)	20 年 (@ 125 °C)	20 年 (@ 125 °C)
擦写次数	无限次	10^{10}	10^6 (1 Mbit) 10^5 (>1 Mbit)	$>10^{12}$	$>10^{12}$
写入速度	<30 ns	<30 ns	约 30 ns	≤ 0.3 ns	≤ 1 ns
写入功耗	大	小	小	小	小
工作温度	-40 ~ 125 °C	0 ~ 85 °C	-40 ~ 125 °C	-40 ~ 125 °C	-40 ~ 125 °C
参考文献	[29]	[40]	[43]	[56-57]	[58-59]

为解决 STT-MRAM 的问题,科学家进行了大量研究,其中比较有效的方案是 Miron 和 Liu 所在的研究小组^[60-65]提出的自旋轨道矩 (spin orbit torque, SOT)。采用 SOT 效应翻转 FL 磁矩的 MRAM 被称为第三代 MRAM。SOT-MTJ 为三端器件,利用流经底部重金属的电流产生 SOT 以驱动 FL 完成磁化翻转。该方案将写入电流与读出电流路径分开,有效避免了写入电流对势垒层的损伤,提升了写入速度,理论上擦写次数与 Toggle-MRAM 一样(无限次),解决了 STT 擦写次数和数据保持时间的矛盾,有效提升了器件可靠性。但 SOT-MTJ 相比于 STT-MTJ 面积较大,集成度低,未成为各大机构研发的主流,市场上也暂无相关的产品。即便如此,SOT-MRAM 由于其出色的写入速度和高可靠性在高速应用场合(L1 ~ L3 级缓存)和高可靠应用场合(航空航天)仍有非常大的吸引力。为了解决 SOT-MRAM 低集成度的问题,人们提出了很多解决措施,有望成为第四代 MRAM 可能的方向。例如由 STT 与 SOT、压控磁各向异性(voltage control magnetic anisotropy, VCMA)与 SOT 的协同自旋矩效应构成的 NAND 型高密度串联结构^[66-72],以及通过将存储层由铁磁层(ferromagnet, FM)转变为 SAF,利用 SAF 的交换偏置场的磁存储技术^[58-59](exchange bias-MRAM, EB-MRAM),有望极大提升 MRAM 的存储密度。

在应用端,第一代 Toggle-MRAM 不仅没有被市场逐渐淘汰,反而在高可靠应用场合(例如航空航天、汽车电子等领域)扮演着重要角色。2009 年瑞典公司 AAC (Angstrom Aerospace

Corporation)与日本东北大学合作开发的 TAMU (Tohoku-AAC MEMS unit) 搭载一颗小卫星 SpriteSat 进入了 680 km 的极地轨道,其中便使用了 Everspin 公司商用 4 Mbit MRAM 来取代 FLASH 和 SRAM^[73]。2011 年 10 月,由密歇根大学研制的立方体卫星 M-Cubed 也使用了 Everspin 公司商用 16 Mbit MRAM。在此后的 10 年里,Toggle-MRAM 已大量应用于航空航天领域。此外,pSTT-MRAM 已逐步应用于企业级固态硬盘的缓存,用于防止数据掉电丢失。但因其技术成熟度和可靠性等原因,尚未有应用于航天器的报道。即便如此,pSTT-MRAM 在空间应用方面仍具有很大的潜力。

MRAM 的空间应用需要考虑空间辐射环境。空间环境中存在高能离子、质子、中子、电子、 α 粒子和 γ 射线等辐射源^[74-75],这些辐射源与电子元器件中半导体材料发生碰撞、电离等相互作用,可造成元器件参数漂移、功能退化甚至彻底失效,严重降低电子元器件可靠性^[76-77]。MRAM 作为一种新型存储器,研究其辐射效应及加固技术对提升 MRAM 的应用潜力意义重大。

2 MRAM 中 MTJ 单元的辐照效应及加固技术

目前,对 MTJ 的辐照效应和机理的研究仍处于探索阶段,进行相关研究时一些概念仍然沿用辐照对 MOS 器件的一些术语。比如“电离总剂量效应”(total ionizing dose, TID)和“单粒子效应”(single event effect, SEE)等,而实际上这些术语对于 MTJ 的辐照效应并不完全恰当。例如“电离总

剂量效应”主要是指由于辐照引发了 MOS 器件中 SiO_2/Si 界面处“电荷的积累”,其物理效应主要跟“电荷积累”有关。而在 MTJ 的所谓“电离总剂量效应”的研究中并未发现“电荷积累”相关的效应。因此在 MTJ 的辐照效应和物理机理完全清晰之前,本节按照辐照源对 MTJ 辐照效应进行了分类。

2.1 MTJ 的 γ 辐照效应

带能量的光子(γ 及 X 射线等)同固体物质相互作用时,电离损伤是主要损伤。根据光子能量不同,可以与材料发生不同的电磁相互作用——光电效应(光子能量小于 100 keV)、康普顿效应(光子能量在 100 keV 到几 MeV 之间)和电子-空穴对为主的效应(更高的能量),这些相互作用均带来电离损伤。除此之外,光子还可以引发位移损伤效应,但概率很低^[78-79]。放射性同位素⁶⁰Co γ 射线源能提供均匀的沉积剂量及稳定 γ 光子流,非常适用于电子元器件的电离总剂量辐照试验。因此在对 MTJ 进行辐照研究时,人们也尝试使用了⁶⁰Co γ 射线源。本小节中以下的研究若无特殊说明,均是以⁶⁰Co γ 为辐射源。

2.1.1 AlO_x -MTJ

AlO_x -MTJ 为第一代 Toggle-MRAM 所采用。目前尚未见到单独对 AlO_x -MTJ 进行的总剂量效应试验,所有的试验结果均来源于 MRAM 芯片整体的辐照结果。根据文献[80]可知,Honeywell 的 Toggle-MRAM 产品整体抗 TID 能力达到 1 Mrad(Si)(注:1 rad = 10^{-2} Gy),这意味着其内部 AlO_x -MTJ 的抗 TID 能力至少也达到了 1 Mrad(Si)。而 Honeywell 产品中 MTJ 采用 Everspin 的工艺,因此可推测,Everspin 产品抗总剂量能力有限的原因来自未进行抗辐照加固的外围 CMOS 逻辑,而非 MTJ。

然而也有例外,Cui 等^[81]在对 Everspin 公司的 1 Mbit MRAM 和 4 Mbit MRAM 进行的辐照对比试验中发现,1 Mbit MRAM 在 TID 为 30 krad、60 krad、90 krad(Si)时均出现了随机性 bit 错误。相反,4 Mbit MRAM 在 120 krad(Si)的剂量下,在电参数失效之前未出现 bit 错误。分析表明两种 MRAM 采用了不同的 MTJ 结构,其中 1 Mbit MRAM 的 MTJ 结构从下到上分别是 Ta、MnPt、CoFeNi、 AlO 、(Co/Ni)_n、MnNi,4 Mbit MRAM 的 MTJ 结构从下到上分别是 Ta、MnPt、CoFe、Ru、CoFe、 AlO 、CoFe、NiFe。结合 1 Mbit MRAM 辐照后 bit 错误表现特征及两种不同的 MTJ 结构特点,其将 1 Mbit MRAM 出现 bit 错误的原因归结

为其 MTJ 更容易受到辐照的影响。首先,两种 MTJ 的 FL 是不同的,数据存储机制不同。辐照后 MTJ 的 TEM 和 EDX 光谱结果显示,1 Mbit MRAM 的 MTJ 中 Mn 元素向 FL 的扩散程度比 4 Mbit MRAM 的更严重。它将破坏 FL 薄膜的晶格结构和界面结构^[82-83],降低磁晶各向异性和界面各向异性。其次, γ 射线中有少量圆极化光子,当 γ 射线通过薄膜时,会发生磁康普顿散射^[84-85](magnetic Compton scattering, MCS)。1 Mbit MRAM 的 FL 的 (Co/Ni)_n 薄膜的畴壁磁化更容易通过康普顿效应从一个方向转移到相反的方向。再次,在此过程中, γ 光子激发的高能自由电子可能与晶格原子发生碰撞,导致晶格位移损伤,从而降低 FL 的各向异性。另外, γ 射线辐照会引起晶格加热,降低 FL 的有效磁各向异性势垒,从而提高热辅助自旋翻转的概率。这些机制将有助于辐照过程中 FL 的磁矩翻转,从而改变 MTJ 的磁电阻,导致读取错误。由于圆偏振光子的数量非常少,读位错误的数量也很少。磁矩翻转仅改变数据存储状态,不影响器件的电磁特性和功能。因此,当再次向器件写入数据时,位错误消失。

2.1.2 MgO -MTJ

新一代 MRAM 均采用了 MgO 作为 MTJ 势垒层,为了评估这种 MTJ 的性能及对空间辐照环境的适应性,科学家进行了大量研究。Amara-Dababi 等^[86]认为 γ 辐射可以在 MgO 中产生电子-空穴对,当 MgO 内捕获的电荷密度足够高时,会导致 MgO 击穿。因此研究 γ 辐射对 MgO -MTJ 的影响是有必要的。

Ren 等^[87]对 MgO -iMTJ 进行的辐照效应研究结果表明,使用 γ 射线以 9.78 rad/min 的剂量率对 MTJ 进行辐照,累积剂量达 10 Mrad(Si)后,MTJ 的 R_p 、 R_{AP} 和矫顽力(H_c)均未发生统计学意义上的变化。同年,Hughes 等^[88]试验结果也有着相同的结论,总剂量达到 10 Mrad(Si)后,MTJ 膜堆的磁性、 H_c 、有效磁化强度、自由层阻尼系数、电阻面积矢量积(resistance area product, RA)均未发生统计学意义上的变化。两人研究的 MTJ 器件均为 IMA,尺寸太大,集成度低,应用潜力有限。而 PMA 有效减小了 MTJ 的尺寸,提高了存储密度。但由于 PMA 的主要来源是界面各向异性,电离辐射可能引起的界面缺陷在 pMTJ 中比在 iMTJ 中更受关注。

Zink 等^[89]对 pMTJ 的 γ 辐照研究结果表明,辐照剂量累计达到 1 Mrad(Si)后,MTJ 的电阻和 TMR 变化不大。另外,TID 可以引起 pMTJ 关键

性能参数(热稳定因子、临界翻转电压 V_c 和写入能量)的变化。但这些影响在尺寸较大的 MTJ 中更为显著,当 MTJ 尺寸较小时影响很小,因此有利于 MRAM 集成度的提升。Montoya 等^[90]研究了极剂量(1.47 Mrad(SiO₂))的 γ 辐射对纳米级 pMTJ 的影响,试验结果表明辐照后 pMTJ 的 TMR、临界翻转磁场和 I_c 均无统计学意义上的变化。此外,在 γ 辐照下,热激活的 pMTJ 翻转率几乎没有变化,表明 γ 辐射并不影响 pMTJ 翻转的过程。

除了以上针对单界面 pMTJ 的研究外, Wang 等^[91]研究了 CoFeB/MgO 双界面 pMTJ^[92]在不同剂量 γ 辐照下的辐射特性。其制备的双界面 CoFeB/MgO 多重膜的结构如图 4(a)所示。MTJ 基于热 SiO₂ 基底,底部为 CuN、Ta 种子层,从下至上分别为 [Co/Pt]₆、Co、Ru、Co、[Co/Pt]₃、W、CoFeB、MgO、CoFeB、W、CoFeB、MgO、Ta、Ru。试验结果表明在总剂量分别为 5 Mrad、10 Mrad、

20 Mrad(Si) 时, H_c 相比辐照前分别增加了 5.5%、16.1% 和 19.7%, 而饱和磁化强度 M_s 则没有变化。但是,如果照射剂量足够大(247 Mrad 或 475 Mrad(Si)),磁性就会被破坏。 H_c 的增加是多种因素共同作用的结果,包括 MCS、两层 (Co/Pt)_n 多层膜之间的 Ru 层被破坏、双界面结构中 FL 的有效厚度受辐照影响而增加,以及 γ 辐照引起的电离能沉积对畴壁运动的阻止作用。在 247 Mrad(Si) 或 475 Mrad(Si) 辐照下,磁性几乎消失,可能原因为热应力和内应力^[93-94]。从图 4 所示的显微镜图像可以看出,多层膜存在由热应力和内应力引起的微米级裂纹。薄膜热应力是由多层薄膜结构与衬底之间热膨胀系数的差异引起的。此外, γ 辐照引起的电离能沉积或温度分布不均匀也会产生热应力进而影响磁性能^[95-96]。因此,辐射引起的热应力和内应力可能会破坏 MTJ 的磁性。

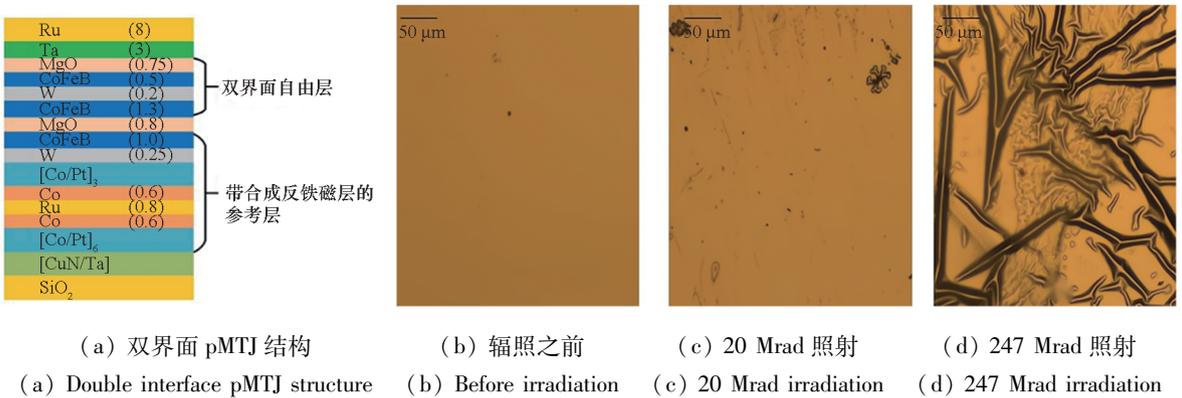


图 4 双界面 pMTJ 多重膜结构和样品的表面形貌

Fig. 4 Structure of the double-interface pMTJ multilayers and surface appearance of samples

综上, AlO_x -MTJ 抗 γ 辐照的能力与 MTJ 的结构、材料及参数有关。MgO-iMTJ 抗 γ 辐照能力至少可达 10 Mrad(Si) 以上。小尺寸 MgO-pMTJ 抗 γ 辐照能力至少可达 1 Mrad(Si) 以上。 γ 光子对 MTJ 的效应或损伤主要包含: MCS、位移损伤和热应力。良好 γ 辐照抗性的获得需要对 MTJ 的结构、材料及参数进行特殊设计,以削弱这些效应或损伤。

2.2 MTJ 的重离子辐照效应

重离子是指原子序数 $Z \geq 2$ 的离子。在空间中,这些重核离子虽然通量较低,但能量很高(为数十 MeV 到数百 GeV),通过材料时产生强烈电离且很难屏蔽,这是 SEE 发生的主要原因。对于大多数重离子而言,大部分能量转移是产生电离效应,只有少部分带来位移损伤。

MTJ 由多层薄膜堆叠而成,各层薄膜厚度普

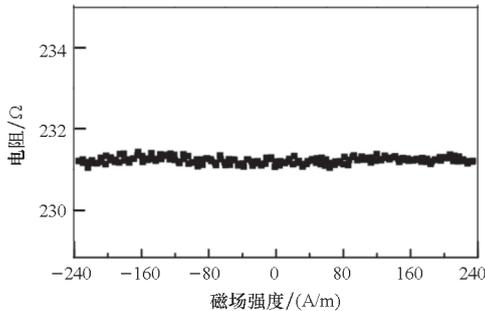
遍很小($\text{\AA}/\text{nm}$ 量级),当总注量达到一定程度时,重离子轰击很可能会对多层纳米薄膜造成位移损伤,导致器件电学和磁学特性的改变。

2.2.1 AlO_x -MTJ

Al_2O_3 作为 MTJ 的势垒层对 MTJ 的特性起着重要作用。虽然 Al_2O_3 是良好的抗辐射绝缘体^[97],并且常用于强辐射环境,但当其为薄膜形式时对快速重离子辐照的反应可能并不理想。在快速重离子照射其他材料(例如 Ge^[98-99])时,已经观察到了块体形式和薄膜形式不同的抗辐照行为。因此研究辐照对 AlO_x -MTJ 的影响时,必须重新评估重离子辐照对 Al_2O_3 的影响。

2003 年, Schmalhorst 等^[100]研究了 $\text{Mn}_{83}\text{Ir}_{17}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{AlO}_x/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 结构的 MTJ 在 Al 膜被等离子体氧化后立即被低能 Ar 离子束辐照后器件的输运特性。经过 150 eV 离子辐照后,器件电阻

增加了 40 倍, *TMR* 值和介电稳定性有所降低。该作者认为导致该现象的原因是离子辐照引起势垒层中 Al 和 O 的原子配比发生了局部变化, 从而导致势垒层存在局部缺陷。同年, Conraux 等^[101]对 AlO_x 介质的 MTJ 进行了 C、O、Ni 离子效应研究, 结果表明 MTJ 受单粒子影响很小但不可逆, 因此, AlO_x -MTJ 并非对单粒子辐照完全免疫。研究表明随着注量率的增加, *TMR* 值逐渐降低, 该作者将这一现象的原因归结为 AlO_x 势垒层中 Al 和 O 化学计量的变化——势垒中的 O 消耗, 而非互相扩散作用。2005 年, Sacher 等^[102]研究了 $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ 结构的 MTJ 在 Ar 和 He 离子辐照下的输运特性。对于这两种离子, MTJ 的 RA 随辐照离子能量的增加而增大, 而 *TMR* 值减小。该研究表明辐照离子的能量和种类会影响辐照离子在 MTJ 中的分布, 影响局域电子态的数目以及界面处缺陷的形成和自旋极化状态。同年, Banerjee 等^[103]研究了 Si 和 Ag 离子辐照对 $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 结构的 MTJ 特性的影响。如图 5 所示, 采用能量为 70 MeV、总注量为 5×10^{11} ions/ cm^2 的 Si 离子辐照后, *TMR* 值由初始的 20.3% 降低到了 18.2%, H_c 发生显著变化, 并伴随着 R_{AP} 和 R_p 的下降; 采用能量为 200 MeV、总注量为 1×10^{11} ions/ cm^2 的 Ag 离子辐照后, MTJ 被完全破坏, *TMR* 效应完全丧失, 且 MTJ 电阻大幅下降。为了解释所观测到的变化, 该文献作者结合库仑爆炸模型^[104]和热脉冲模型^[105]进行了分析, 认为



(c) Ag 离子辐照对 MTJ 特性的影响

(c) Effect of Ag ion irradiation on the characteristic of MTJ

图 5 电阻随外磁场的变化关系 (+5 mV 偏置, 室温)^[103]

Fig. 5 Plot of resistance versus applied magnetic field at RT at a bias of +5 mV^[103]

快速重离子在 Al_2O_3 中诱导的缺陷可以近似认为是多条并行的导电路径, 这些导电路径降低了整体结电阻。当离子通过这些层时, 可能会在 FM/势垒层界面上出现小程度的原子重新分布。另外, 原子位移、原子聚集在单个膜层以及原子穿过界面将产生强自旋依赖散射和自旋独立散射, 这可能与 *TMR* 的降低有关。

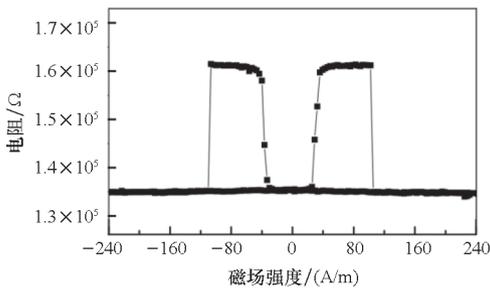
通过以上研究可以看出, 重离子辐照可能会对 AlO_x -MTJ 多层膜造成位移损伤, 在膜层或界面处产生缺陷, 也可能会影响 MTJ 中局域电子态, 进而影响自旋极化状态, 最终导致 MTJ 的 *TMR* 值、RA 等关键参数发生变化。

2.2.2 MgO-MTJ

与 AlO_x -MTJ 相比, MgO-MTJ 的薄膜结构和材料特性发生了极大的改变。由于 AlO_x 为非晶材料, 对电子的散射作用严重。穿过势垒层的电子的自旋极化率被 AlO_x 消耗, 导致 AlO_x -MTJ 的 *TMR* 值普遍较低。而在 CoFeB 非晶层上可以生长出 $\langle 001 \rangle$ 晶向的 MgO 薄膜, 且单晶化程度更高。MTJ 膜堆沉积完成后, 通过热退火工艺使得临近 MgO 势垒层的 CoFeB 薄膜以 $\langle 001 \rangle$ 晶向 MgO 为模板结晶, 从而使自旋极化电子更高效穿透势垒层, 自旋极化率几乎保持不变, 因此单晶 MgO 比多晶 AlO_x -MTJ 的 *TMR* 值更高^[22-26]。

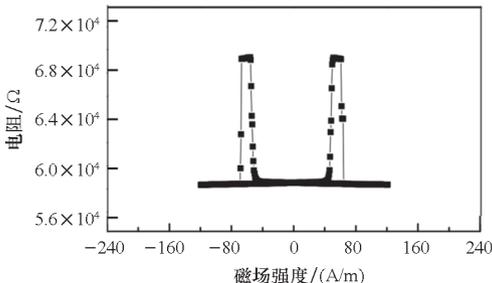
有研究表明, 在经历 10 ~ 100 个 15 MeV Si 离子 (施加偏压)^[106]辐照后, MgO-pMTJ 的 R_{AP} 、 R_p 和 *TMR* 值基本保持不变, 表现出良好的抗单粒子特性。同时, MTJ 的热稳定性因子没有显著变化, 这意味着数据保持特性并未发生变化。

然而, 也有一些实验表明离子辐照会对 MTJ 薄膜结构产生一定的损伤, 导致器件电学或者磁学特性发生一定程度的退化。Singh 等^[107]用能



(a) 辐照前 MTJ 的特性

(a) Characteristics of MTJ before irradiation



(b) Si 离子辐照对 MTJ 特性的影响

(b) Effect of Si ion irradiation on the characteristic of MTJ

量为 120 MeV、总注量为 $1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{13}$ ions/cm² 的 Ag 离子垂直照射 Fe/MgO/Fe/Co 多层膜,观察到垂直磁滞回线的形状发生了显著变化。辐照后 MgO 层中 Fe、Co 和 Au 原子有所增加,界面处 Fe 的价态发生了变化,重离子通过材料时会诱导磁矩沿其方向排列,这三方面的因素改变了辐照后膜堆的 H_c 。Xiao 等^[108] 的研究表明,pMTJ 经历低注量 (10^{11} ions/cm²) 的 Ta 离子辐照后, TMR 、 V_c 和临界翻转磁场基本不受影响,电学特性基本无变化;但随着注量的增加,pMTJ 受损伤程度增加,其 TMR 、 V_c 和临界翻转磁场逐渐退化,甚至在总注量达到 10^{13} ions/cm² 后完全失去磁阻效应。这种退化主要来源于 CoFeB/MgO 界面的结构损伤:①辐照离子破坏了电子隧穿势垒的对称性,降低了自旋极化;②辐照离子降低了结构的 PMA。Kobayashi 等^[109] 研究了各种类型的高能离子 (250 MeV Ar、322 MeV Kr、400 MeV Fe、454 MeV Xe 和 490 MeV O) 对 10 nm 尺寸下 pMTJ 的影响。研究发现 490 MeV O 离子可以在 MTJ 中产生可恢复的位翻转,即软错误,而其他离子却无此现象。其还试验了电压对翻转可能产生的影响,但没有检测到。例如在 400 MeV Fe 辐照中,在 +0.2 V (接近翻转临界电压) 条件下也不会出现翻转;而相反,即使减小偏置电压到 -0.01 V, O 离子轰击仍然可以导致翻转。他们认为软错误发生的原因可能是重离子轰击引起局部温度升高,从而引发了铁磁层的磁化翻转。Park 等^[110] 研究了 Cr 离子束对 iMTJ 和 pMTJ 的影响。研究发现,器件性能的退化与 Cr 离子辐照引起的位移损伤密切相关,Cr 离子辐照位置主要集中在距离表面的几纳米处。因此,iMTJ 的损伤位置主要出现在铁磁层顶层,从而仅减小了其磁化强度。但是 pMTJ 的损伤位置会扩展到 FM/势垒层界面,从而降低 TMR 。该研究提供了一个提高抗单粒子能力的方法,即通过引入保护层来阻止离子穿过 MTJ。Coi 等^[111] 研究了 995 MeV Xe 离子对 pMTJ 的影响,实验结果表明 pMTJ 对 SEE 的敏感性比较低。重离子辐照对 MgO 的结晶度有类似退火的作用,使得 TMR 值轻微的增大。辐照离子造成的晶体缺陷可以作为成核中心,形成更多的成核位点,导致 H_c 降低。界面缺陷的增加和重离子对 SAF 的损伤会降低 PMA,另外,重离子辐照也可能通过热激发或热诱导效应影响 MTJ。Wang 等^[112] 研究了 Ta 离子和 Kr 离子对双界面 CoFeB/MgO MTJ 的辐照效应。在总注量为 10^{11} ions/cm² 和能量为 1 907 MeV 的

Ta 离子辐照后,双界面产生了一定的损伤,导致 H_c 存在一定程度的降低而且无法恢复;而总注量为 5×10^{10} ions/cm² 和能量为 2 060 MeV 的 Kr 离子辐照破坏了 MTJ 的体特性,导致 M_s 下降。然而,双界面 MTJ 的电性能几乎不受 Kr 离子辐照的影响。

2021 年,Alamdar 等^[113] 研究了 SOT-pMTJ 的辐照效应。研究结果表明,其对于总注量 10^{12} ions/cm² 的 Ta 离子具有较好的抗辐照能力,但在更高注量 ($10^{12} \sim 10^{14}$ ions/cm²) 的辐照环境下,磁性膜堆的 H_c 和 PMA 变小,主要源于底部 CoFeB/MgO 界面处层间原子混合的增强作用。越接近底部重金属层和衬底,受损伤的程度越大。

上述研究采用不同能量、不同注量的各种离子对各种结构的 MTJ 进行了辐照实验和分析,根据实验结果和提出的理论机制可以看到,无论是 AlO_x 还是 MgO 基的 MTJ,对单粒子并不是完全免疫的。重离子的轰击会对膜堆结构产生一定的位移损伤,其电学特性或者磁学性能会发生一定程度的退化,在非常大的总注量或者能量下甚至会失去磁阻效应。某些重离子的轰击也能产生软错误,但机理尚未清晰。为了加强 MTJ 的抗重离子辐照能力,可以从膜堆结构或者材料上进行优化。

然而,离子辐照并非只带来坏处,若能掌握其与 MTJ 中各种材料的相互作用规律,可以尝试利用离子辐照对材料进行可控修饰和改性,从而实现所需的材料特性。快速重离子辐照对材料造成的变化往往是不可逆的,如结构变化、界面变化或通过形成缺陷导致的相的构成变化等^[114-115]。高能离子穿过固体时失去能量,要么与原子中电子产生非弹性碰撞,要么与原子核产生弹性散射。前者往往造成与材料特性的变化,后者主要造成原子的位移。这使人们可以研究 MTJ 界面和势垒变化对磁性能、自旋输运和隧穿行为的影响,以便于更好地制作特殊应用的 MTJ。实际上,利用离子辐照对磁薄膜的磁特性进行改性已经得到一些研究^[116-126]。例如:Co/Pt 体系的磁界面各向异性因离子辐照而受到抑制^[125];FePt(Pd) 合金的磁界面各向异性因化学有序而增加^[126];在类似的系统中,将抗蚀剂掩模与 He 或 Ga 聚焦离子束^[127-128] 结合使用,也观察到了纳米尺度上的磁性能变化。这些可能在超高密度存储的垂直磁介质中得到潜在应用。

2.3 MTJ 的质子辐照效应

质子是银河宇宙射线和太阳宇宙射线的主要

组成部分,是空间辐射最重要的辐射来源。银河宇宙射线中质子能量为几 MeV 到几百 GeV,太阳宇宙射线中质子能量为数百 MeV。质子入射材料通过卢瑟福散射,将能量传递给材料,引起原子激发、电离或位移。质子在材料中的能量损失具有以下特点:①对于低等和中等能量的质子(100 MeV以下),其能量损失的主要方式是使作用物质中的原子和分子激发或电离,其他方式的能量损失可以忽略不计;②随质子能量的升高,核反应在总能量损失中变得逐渐显著,这时弹性核散射的能量损失很小,可以忽略;③由于粒子减速而造成的韧致辐射能量损失可忽略不计。因此,分析质子对 MTJ 的影响主要从原子的激发、电离、位移三个方面着手。

Oldham 等^[129]对 Freescale 的 MR2A16A 进行研究,器件经受能量为 89 MeV 和 189 MeV、注量为 $2 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11}$ ions/cm² 的质子辐照。结果表明,当器件处于静态或读/写状态时,辐照均未造成内部存储信息错误,处于读/写状态时也未造成读/写过程错误。这说明 AlO_x-MTJ 和外围 CMOS 逻辑均未受到显著影响。Zhang 等^[130]对 Everspin 的 16 Mbit Toggle-MRAM 进行了质子辐照试验,质子能量为 3 MeV。结果表明,当质子注量低于 1×10^{11} ions/cm² 时,3 颗 MRAM 都能正常工作,电参数未观察到明显漂移;当质子注量达到 2.5×10^{11} ions/cm² 时,观察到读取错误,电特性参数超出正常规格。退火一定时间后,MRAM 性能有了很大的恢复。该作者认为芯片电特性参数超标的原因是质子作用于 MOSFET 栅极,诱导了显著的捕获电荷,最终导致了 TID 效应。

Hughes 等^[88]单独对 MgO-iMTJ 进行了质子辐照研究,结果表明,在总注量为 1×10^{11} ions/cm²、 5×10^{11} ions/cm²、 1×10^{12} ions/cm² 和能量为 2 MeV、220 MeV 的质子辐照下 MTJ 膜堆的磁性、 H_c 、有效磁化强度、自由层阻尼系数、RA 和 TMR 值均未发生变化。Park 等^[110]也对 MgO-iMTJ 进行了质子辐照研究,结果表明,在经历能量为 50 keV、100 keV、200 keV、20 MeV 和注量为 1×10^{12} ions/cm²、 1×10^{13} ions/cm²、 1×10^{14} ions/cm² 的质子束照射后,其磁滞回线、FL 和 RL 的磁矩、RL 的 H_c 、TMR 值均未发生统计学意义上的变化,表明质子束引起的位移损伤可忽略不计。

综上,质子辐照对 AlO_x-MTJ 和 MgO-iMTJ 单元影响并不明显,MTJ 参数均未发现统计学意义上的变化。

2.4 MTJ 的中子辐照效应

中子是空间粒子辐射的一个重要因素。大气中的反照中子、高能粒子与航天器物质作用产生的二次中子,是航天器内部中子的两个主要来源。由于中子不带电,必须靠近原子核 10^{-15} m 时才会与原子核发生相互作用,因此中子在材料中的穿透能力很强。中子与原子核碰撞时将能量传递给原子核,产生带电的次级粒子引起电离作用。中子与物质的相互作用分为散射和吸收两大类。散射包括弹性散射和非弹性散射,吸收包括辐射俘获、放出带电粒子和核裂变等。在中等和高等能量下,中子的强子相互作用与质子的情况类似。然而,在低能量情况下非常不同。低能质子在布拉格峰(Bragg peak)处迅速失去能量,并且在接近原子核时会受到强的库伦势垒作用;而低能中子在热能的情况下(动能 $E_{kin} \leq 20$ MeV)依然可以发生复杂的强子相互作用。

Hirose 等^[131]认为,理论上中子可以通过以下三个过程与 MTJ 相互作用:①单步过程:中子可能直接撞击 MTJ 并对其造成影响。②两步过程:中子击中 MTJ 周围的材料,诱导核反应,产生二次离子,二次离子可能撞击 MTJ。③三步过程:中子击中晶体管周围的材料,产生二次离子,继而产生许多电子和空穴;产生的噪声载流子聚集在漏端,产生电流,从而影响 MTJ。基于上述的第二个过程,通过理论预测高能中子可能导致 pMTJ 的软错误,但预期风险小于 1×10^{-6} FIT/pMTJ,而热中子(能量远小于 1 MeV)几乎没有风险。Ren 等^[87]对 MgO-iMTJ 进行的中子效应研究结果表明,MTJ 对超热中子(中子总注量 2.9×10^{15} ions/cm²,注量率 5×10^{10} ions/(cm²·s⁻¹),能量 0.1 eV ~ 10 MeV)不敏感,试验前后 TMR 和 H_c 均未发生变化。而该注量可导致 SiO₂ 和高 k 半导体材料的不可逆位移损伤^[132]。Narita 等^[133]研究了快中子辐照对 MgO-pMTJ 的影响,结果表明未施加偏置电压的 MTJ 经过能量为 1 MeV 和注量为 3.79×10^{12} ions/cm² 的中子辐照后,电阻-磁场曲线、 R_p 和 R_{AP} 、TMR 值均未发生变化。Montoya 等^[90]研究了总注量为 2.8×10^{15} ions/cm² 的中子辐照对 MgO-pMTJ 的影响,试验结果表明辐照后 MTJ 的 TMR 值、临界翻转磁场和临界翻转电流均无统计学意义上的变化。

综上,从试验结果看,中子对 MgO-iMTJ 和 MgO-pMTJ 的参数并未产生统计学意义上的影响。

2.5 MTJ 器件加固技术

研究表明,小尺寸 MgO-pMTJ 的抗 γ 辐照能力至少可达 1 Mrad(Si) 以上,已远远满足航天工程应用要求(100 krad(Si))。质子和中子对 MTJ 器件参数并未产生明显的改变。

AlO_x -MTJ 抗总剂量的能力可能与 MTJ 的结构、材料及参数有关。因此,良好 TID 抗性的获得需要对 MTJ 的结构、材料及参数进行特殊设计。FL 采用 $(\text{Co}/\text{Ni})_n$ 多层薄膜可能会获得比 CoFe 薄膜更好的抗 TID 能力。

多项实验表明重离子辐照会对磁性薄膜产生一定的损伤,造成器件性能的退化。目前尚未有 MTJ 器件单粒子加固方法研究的相关报道,通过各类失效模型的分析,本文提出以下可能的加固方法:①MTJ 周围沉积一层特殊介质作为保护层,阻止高能离子对 MTJ 的侧壁甚至薄膜内部进行破坏;②MTJ 顶层沉积特殊材料作为保护层,有效降低高能离子的穿透性;③优化磁性薄膜结构,在合适的位置引入阻挡层,既有效阻止高能离子的迁移,又不影响 MTJ 器件参数。MTJ 器件的加固技术研究目前还处于初始阶段,需要更多的研究机构去发掘和探索有效且实际的加固方法。

3 MRAM 中 CMOS 逻辑的辐照效应和抗辐照技术

文献[80]详细统计并分析了 Everspin (Freescale)、Aeroflex 和 Honeywell 三家公司的不同型号 MRAM 产品的 TID 和 SEE 试验结果。试验结果表明影响产品抗 TID 和 SEE 能力的短板来源于未加固的 CMOS 逻辑,而非 MTJ 单元。经采用外延片、SOI 工艺等加固手段后,MRAM 产品抗辐照能力显著提升^[17,31,33-35,129,134-147]。

因此空间应用的 MRAM 除了 MTJ 单元需要对辐照具有较强的抗性以外,其外围的 CMOS 逻辑同样需要具备较强的抗辐照能力。针对 CMOS 逻辑的电离总剂量效应和单粒子闩锁(single event latchup, SEL)加固方法已有很多研究成果,也同样适用于 MRAM 的加固。本节针对 MRAM 电路的逻辑特点,分析 CMOS 逻辑的辐照效应和易发生单粒子翻转的敏感节点和行为,并简要概括近年来抗单粒子设计加固方法的研究情况。

3.1 CMOS 逻辑的辐照效应

CMOS 逻辑的辐照效应主要包括总剂量效应和单粒子效应。

总剂量效应的主要辐射来源有 γ 射线、电子、X 射线等。对 CMOS 逻辑的主要影响为:随着总剂量的累积,MOSFET 阈值电压漂移和漏电逐渐增大,CMOS 逻辑性能降低,严重的直接丧失功能。引起的效应是半永久性或永久性的,适当退火(加电场或加热)可部分恢复,完全恢复相当困难^[78]。TID 对 CMOS 器件的影响随着工艺尺寸的缩小而降低,当工艺节点降到 65 nm 及以下时,其对 CMOS 的影响已经很小,几乎可以忽略^[148]。

单粒子效应主要来源为高能质子、重离子等。对 CMOS 逻辑的主要影响为:单粒子辐照 MOS 器件中的反向偏置 P-N 结时产生电子-空穴对,电子-空穴对的数量取决于线性能量转移(linear energy transfer, LET)、粒子的能量和轨迹、硅衬底(结构、掺杂)和局域电场。例如,一个 LET 为 $1 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的粒子可以沉积约 $10 \text{ fC}/\mu\text{m}$ 轨道长度的电荷^[149-150]。空穴或电子被晶体管中的电场驱动产生电流脉冲,造成相应节点的电压上升或下降,从而产生单粒子瞬态^[151](single event transient, SET)。当这种 SET 发生在锁存结构且辐照产生的电荷总量超过临界值,将引起锁存结构中数据发生变化,即产生单粒子翻转(single event upset, SEU)。随着工艺节点的降低,单粒子多位翻转(single event multiple upset, SEMU)正成为新兴纳米 CMOS 技术中高能粒子碰撞的主要效应。SEMU 是指粒子撞击芯片并影响多个敏感节点,甚至在 SEU 加固的芯片中也会发生多位翻转的现象^[152-153]。

由 α 粒子引发的 SET 电流脉冲可以由以下双指数模型^[154-156]来模拟:

$$I_{\text{inj}}(t) = I_0 \cdot (e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (2)$$

式中: $I_0 = \frac{Q_{\text{inj}}}{\tau_1 - \tau_2}$ 为最大注入电流, Q_{inj} 为最大注入电荷, τ_1 为收集时间常数(典型值为 150 ps), τ_2 为粒子径迹确立时间常数(典型值为 50 ps)。图 6 为不同电荷量情况下瞬态电流脉冲形状。

3.2 MRAM 单粒子敏感模块分析

图 7 和图 8 分别为并行接口和串行接口 MRAM 的典型逻辑设计架构。在并行接口 MRAM 设计中,主要逻辑模块包括控制信号($\bar{G}/\bar{E}/\bar{W}$)缓冲模块、地址译码模块、存储阵列、数据写入缓冲及写入模块、灵敏放大器及输出驱动模块。除此之外,有的 MRAM 设计可能出于时序设计等原因在数据输入和输出通路中增加了数据寄存器。

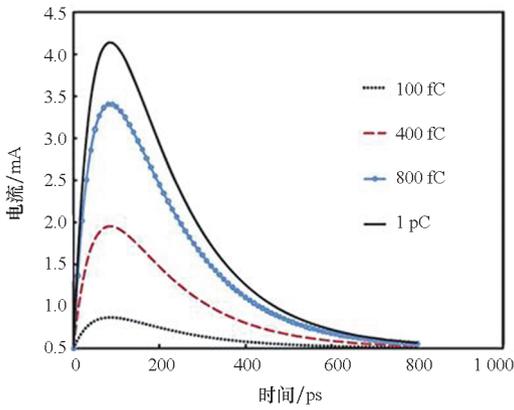


图 6 不同电荷量情况下瞬态电流脉冲形状^[157]
 Fig. 6 Pulse shape of transient current under different charge quantities^[157]

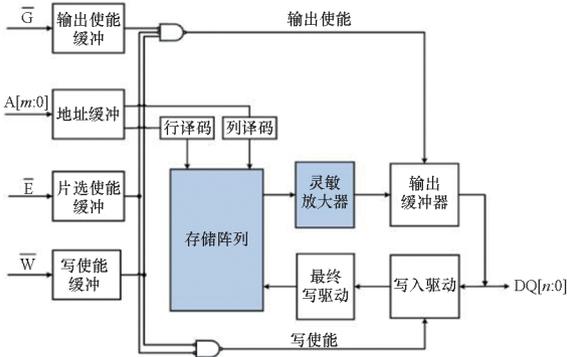


图 7 并行接口 MRAM 逻辑设计架构
 Fig. 7 Typical logic design architecture of parallel interface MRAM

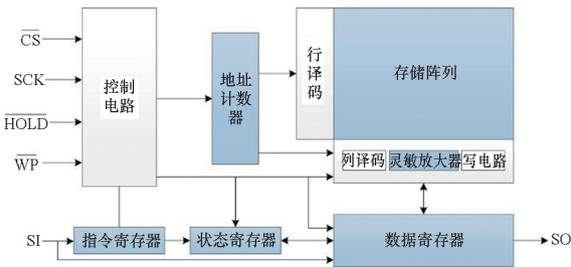


图 8 串行接口 MRAM 典型逻辑设计架构
 Fig. 8 Typical logic design architecture of serial interface MRAM

相比于并行接口 MRAM, 串行接口 MRAM 中存储阵列的结构未发生变化, 数据写入和读出存储单元的方式也未发生变化。其主要区别是将地址输入方式改为了时钟计数方式, 因此增加了地址计数器(易失); 数据的输入和输出仅靠 SI 和 SO 两个端口实现, 因此需要数据寄存器(易失)实现数据串-并和并-串转换功能; 另外针对电路的状态控制增加了指令寄存器(易失)和状态寄存器(非易失)。

在并行接口和串行接口 MRAM 的逻辑架构中, 可能发生单粒子翻转的模块或单元有: 灵敏放大器(一般含交叉放大锁存结构)、寄存器和 MTJ 单元。其余电路模块均为组合逻辑, 无锁存结构, 不会发生数据翻转, 但会产生 SET。针对锁存结构, 需预防与时钟沿同时刻的 SET 噪声信号被寄存器收集而转变为 SEU, 此时可考虑采用 C 单元^[158]或延迟锁存^[150, 159]的方法解决。另外, 时钟树也是 SET 敏感结构, 时钟上的 SET 会引发寄存器数据更新, 若输入端口数据与原存储数据不同, 则引发错误, 需对时钟树进行 SET 加固^[160-162]。

3.3 读写电路单粒子敏感点分析及其加固措施

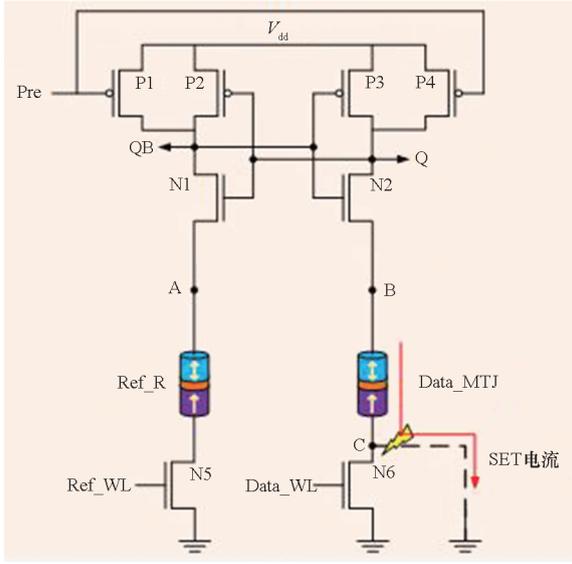
读写电路是 MRAM 核心模块, 也是单粒子加固的重点模块。当读写模块受到单粒子影响时, 可能引发读写故障, 甚至改变 MTJ 磁化状态, 造成非易失性数据错误。读故障通常包括锁存结构翻转故障、判读故障和干扰故障。如果单粒子轰击读出放大器中锁存结构, 可能引起翻转故障; 若引发读取或参考支路中电压波动, 可能发生判读故障; 若通过 MTJ 的读电流大于其临界翻转电流, 就会产生读干扰, 导致 MTJ 翻转^[163-164]。对于设计良好的感应放大器电路, 辐射引起的读取干扰几乎不会发生。另外, 在写入过程中, 当 MTJ 翻转受到干扰, 导致翻转延迟超过施加的持续时间时, 可能会导致写入失败^[165]。

3.3.1 读电路

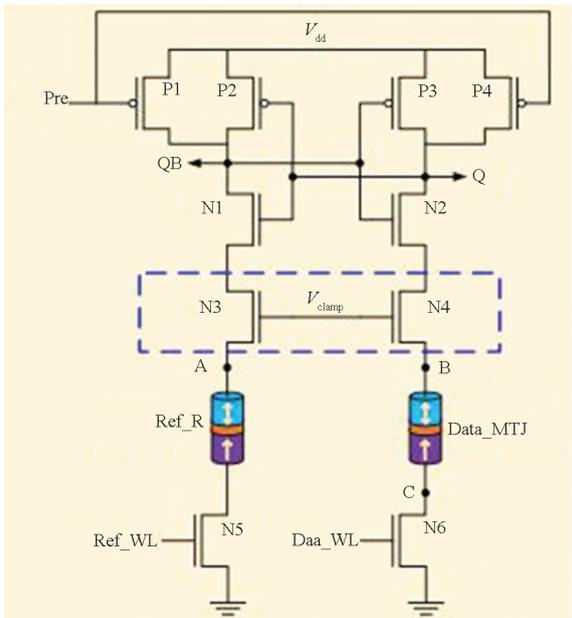
图 9(a) 为未进行辐照加固设计的典型的灵敏放大器结构——预充电式灵敏放大器^[166] (precharge sensitive amplifier, PCSA)。当该结构处于读取模式时, 单粒子若轰击 MOS 管 P1 ~ P4、N1 和 N2, 均有可能引发敏感节点 Q 和 QB 电位上升或下降, 一旦电位超过反相器的开关阈值, 就会造成电平翻转, 从而发生单粒子翻转效应。同时, 该结构与其他基于锁存结构的灵敏放大器一样, 存在自锁的风险。当重离子在预充电信号 Pre 上升沿前瞬间轰击敏感节点(例如 N5 或 N6) 时, 有可能引起 Q 或 QB 的电位值无法预充到电源电压 V_{dd} , 锁存器可能被锁定在未知状态。另外, 在预充或读取过程中, 若 N6(或 N5) 漏极遭受单粒子轰击, 则会引发 N6 漏极到地 SET 电流, 若此时 B 点电位较高且辐照引发的电子-空穴对数量足够多, SET 电流将超过 MTJ 的写电流阈值, 造成 MTJ 数据改写。此外, 在读取过程中, N5 或 N6 管遭受轰击还可能引发 A 和 B 两点电压紊乱, 导致放大器误判, 读出错误结果。

在 STT-MRAM 设计中, 为了防止读干扰问题

(非辐照环境也存在),限制 MTJ 两端电压,人们加入了一对钳位 NMOS(N3 和 N4),并设置了钳位电压 V_{clamp} [167] (见图 9(b)),问题得到了有效解决。在辐照环境下,这对钳位 NMOS 仍然能有效发挥抗干扰作用,当 N5 或 N6 遭受辐照时,虽然会产生电子-空穴对,但由于 A 和 B 点电压被钳位,SET 电流将低于 MTJ 的临界翻转电流,无法引发 MTJ 状态翻转。



(a) 无钳位 NMOS [166]
(a) Non-clamping NMOS [166]



(b) 增加钳位 NMOS [167]
(b) Add clamping NMOS [167]

图 9 预充电式灵敏放大器

Fig. 9 Precharge sensitive amplifier

读取电路的抗辐照加固主要围绕上述问题展开。研究人员从机理、仿真、逻辑设计优化等方面

进行了探索和研究。为了分析单粒子对 STT-MRAM 造成的影响, Yang 等 [165] 提出了一种综合的辐射诱导软错误的分析框架,通过跨层建模和仿真准确捕捉单粒子辐照对 MTJ、读写电路和存储阵列的影响。 Sakimura [163] 和 Wakimura [164] 等针对 STT-MRAM 中 SET 电流引发 MTJ 翻转的概率分别进行了仿真分析。前者仿真结果表明当一个 LET 为 $14 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的中子辐照芯片时, SET 电流引发临界翻转电流为 $30 \mu\text{A}$ 的 MTJ 产生状态翻转的概率大于 10^{-12} ; 后者仿真结果如图 10 所示,对于相同的临界翻转电流和 LET,若粒子垂直辐照 NMOS 管漏极中心位置,则 MTJ 翻转概率大约为 10^{-20} 。虽然可以通过增加 MTJ 临界翻转电流的方式来降低其受 SET 电流的影响,但会增加写入功耗和时间。 Chabi 等 [168] 针对这一问题提出了一种新型的抗辐照灵敏放大器设计,通过较小的面积和适度的性能牺牲显著提升了 MTJ 单元的抗辐照翻转能力。 Wang 等 [169-171] 针对 SOT-MRAM 读取放大器中锁存结构易受辐照而发生翻转的问题,提出了一种抗 SEU 以及两种同时抗 SEU 和双节点翻转 (double-node LET upset, DNU) 的灵敏放大器结构 (其中一种结构如图 11 所示)。三种结构均采用了 DICE 双互锁原理 [172] 作为理论基础,利用特殊的逻辑结构防止电压波动扩散到其他敏感节点,利用反馈对被轰击节点进行充放电,在数百皮秒内快速恢复初始状态。

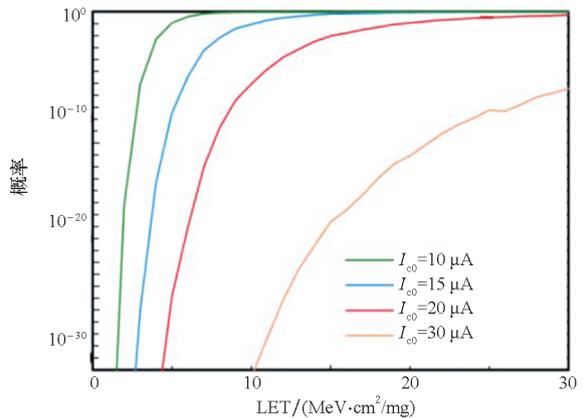


图 10 MTJ 翻转概率与 I_{c0} 及 LET 的关系 [164]

Fig. 10 MTJ switching probability as a function of I_{c0} and LET [164]

3.3.2 写电路

图 12 为 MRAM 典型写逻辑原理图, STT 与 SOT-MRAM 可采用相同的写驱动逻辑。 WEN 为写使能信号 (低电平有效), Data 为写入数据, BL 为位线, SL 为源线, WL1、WWL 和 RWL 为选择管

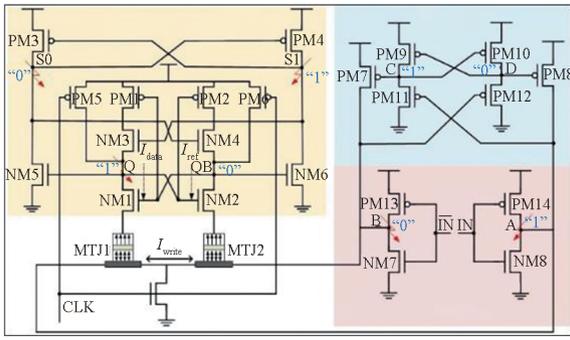


图 11 SOT-MRAM 的读/写电路

Fig. 11 Read/write circuit for SOT-MRAM

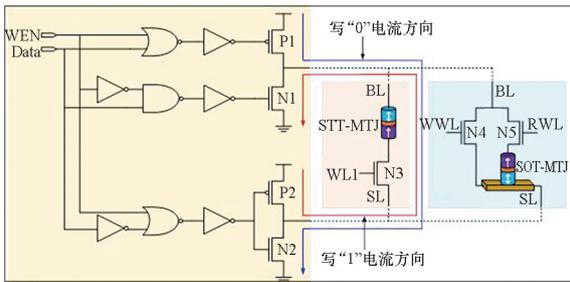


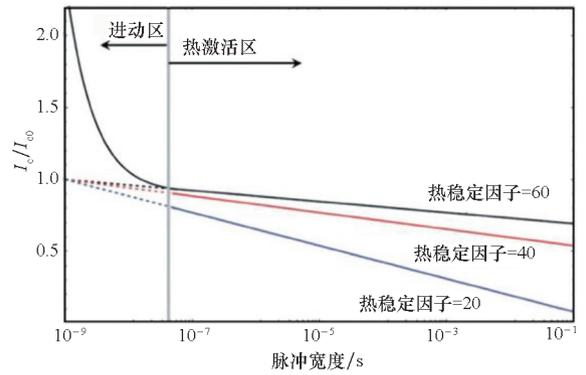
图 12 MRAM 典型写逻辑^[173-177]

Fig. 12 Typical write logic for MRAM^[173-177]

控制信号。写“0”时，P1、N3（或 N4）、N2 管打开，N1 和 P2 关闭；写“1”时，P2、N3（或 N4）、N1 打开，P1 和 N2 关闭。静态或者读取时 WEN 为高电平，P1 和 N1 均关闭，输出为高阻态；同时 P2 关闭，N2 开启，输出低电平。读取状态时 N3（或 N5）打开，N4 关闭，N2 为读取电流提供对地通路。该电路中无锁存结构，因此仅需考虑 SET 的影响：

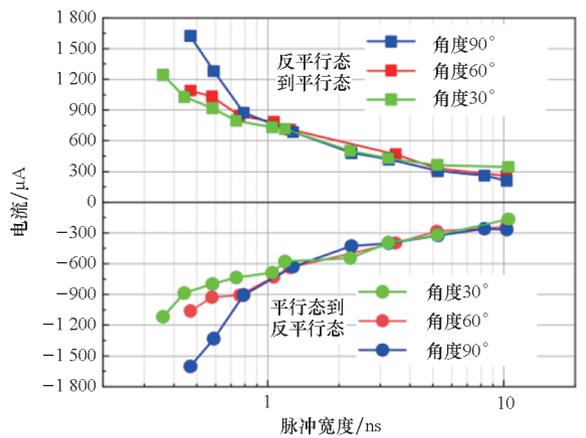
1) SET 可能直接改写 MTJ 数据。若器件处于读取状态，N3（或 N5）和 N2 开启，此时若 P1 管漏极被单粒子轰击则形成从 P1 衬底到漏极的导电通路，或 P1 栅极遭受 SET 脉冲直接导致 P1 管开启，两者均会引发 SET 电流按照写“0”的方向流动。若原数据为“1”，当 SET 电流大小及持续时间超过 MTJ 的临界翻转电流和临界翻转时间（图 13 为 STT-MTJ 翻转电流与写入脉冲的关系），则 MTJ 将发生翻转，SET 转化为 SEU。另外，若器件处于写入状态，Data 信号中含 SET 脉冲，则造成写电流反向，MTJ 可能被写入相反数据，若恰处于写脉冲末期，则直接造成写入错误。

2) SET 可能影响写操作，造成写入时间增加甚至写入失败。MTJ 的磁化翻转是一个累积场效应的结果，STT/SOT 电流产生的扭矩在驱动磁化到另一个稳态的过程中起着重要的作用。这个过程的中断或干扰将延迟 MTJ 翻转时间（图 14 展



(a) 归一化翻转电流密度与写入脉冲宽度的关系^[178]

(a) Dependence of normalized switching current density on write pulse width^[178]

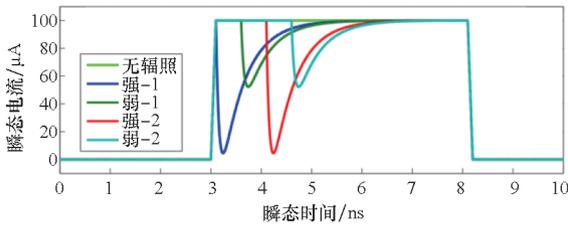


(b) 临界翻转电流与写入脉冲宽度及角度的关系^[179]

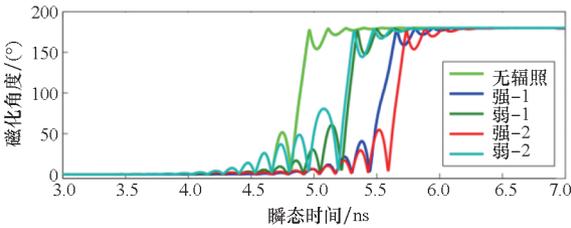
(b) Relation between the critical switching current and the write pulse width and angle^[179]

图 13 STT-MTJ 翻转电流与写入脉冲的关系
Fig. 13 Relationship between STT-MTJ switching current and write pulse

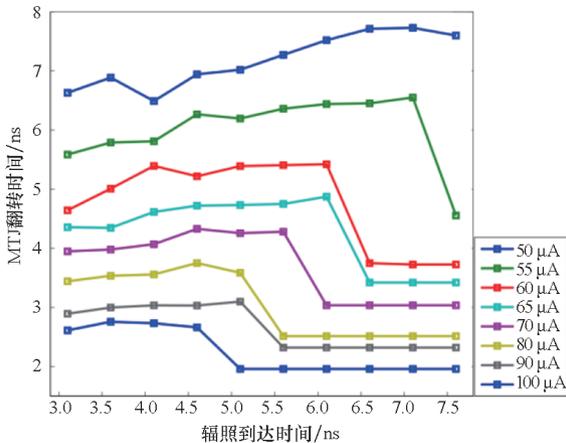
示了粒子轰击对 STT-MTJ 翻转的影响)。若器件处于写入状态，例如写“0”，则单粒子轰击 N1 或 P2 漏极，均可造成写电流在短时间内降低甚至直接降为 0；P1、N1、P2、N2、N3、N4 栅极也可能遭受 SET 电压脉冲，造成写电流短暂时间内降低或停止；另外，WEN 信号若含 SET，也会导致写操作短暂停止，这些情况均会延长写入时间，若恰逢写周期的末尾，则可能导致写入失败。此外若 Data 信号中含 SET 脉冲，则写电流反向，MTJ 可能被写入相反数据，若恰处于写周期末期，则直接造成写入错误；若处于其他时间段，则会增加写入时间（但不会影响写入结果）。如果粒子轰击发生在 MTJ 翻转的末端或之后，则原始的 MTJ 翻转时间不会受到影响。对于这类现象可通过增加 MTJ 的临界翻转电流或写入脉冲宽度来解决，但会增加写入功耗和降低写入速度。



(a) 辐射强度对 STT-MTJ 翻转瞬态电流的影响
(a) Effect of radiation intensity on STT-MTJ switching transient current



(b) 辐射强度对 STT-MTJ 磁化角度的影响
(b) Effect of radiation intensity on STT-MTJ magnetization angle



(c) 不同写电流下粒子轰击到达时间对 STT-MTJ 翻转时间的影响
(c) STT-MTJ switching time delayed under different write current and radiation arrival time

图 14 粒子轰击对 STT-MTJ 翻转的影响^[165]
Fig. 14 Effect of particle bombardment on STT-MTJ switching^[165]

Wang 等^[169-171]认为 STT-MTJ 受 SET 的影响较小,因为多数情况下 SET 脉冲的宽度远远小于写脉冲的宽度,不足以引起 STT-MTJ 的翻转。然而,对于 SOT-MTJ,其翻转速度很快,最快可达亚纳秒级^[179-181],更容易受到 SET 的影响。因此该团队针对 SOT-MRAM,提出了两种抗单粒子加固的写电路结构,有效提升了抗单粒子性能。

3.4 非易失锁存器加固技术

MTJ 技术的出现和发展使得非易失性锁存器

有了更新的实现方式。人们不断开发出利用 MTJ 实现非易失锁存的逻辑结构^[182-183],同时也在努力赋予这些锁存结构良好的抗单粒子辐照能力。

2012 年, Lakys 等^[157]基于典型的 PCSA 提出一种新型抗辐照锁存器结构,如图 15 所示。该结构主要由两个 PCSA 及将两者紧密结合起来的组合逻辑组成。当重离子轰击敏感节点使其中一个 PCSA 发生 SEU 时,两个 PCSA 输出结果不同,组合逻辑检测到差异并使读取电路重新进行预充及读取操作,从而将结果纠正。该结构也能避免自锁的情况,即使重离子在“CLK”上升沿到来之前的瞬间轰击敏感节点,造成其中一个 PCSA 预充失败并输出结果错误,组合逻辑也会使电路进入重置状态,重新预充并读出正确结果。该结构由于具有两对相同的互补输出 (Q_0/QB_0 和 Q_1/QB_1),其行为与传统的 DICE 型锁存器相同。例如,它可以与一个 DICE 类型的从锁存器相关联,以实现抗辐照主从触发器,并具有额外的非易失性特征。但这种结构缺点也很明显:它只能应对单个粒子对单节点带来的影响,无法应对多节点翻转 (multiple node upset, MNU);同时,该结构使得 MTJ 结的数量从两个增加到四个,用到了较多的 MOS 管,不仅需要翻倍的写入与读出功耗,还需要更大的面积。2014 年, Zhang 等^[184]基于 C 单元和 PCSA 提出一种抗辐照锁存器结构,如图 16 所示。此结构也具备与 Lakys's 锁存器结构类似的优缺点,可有效抵抗 SEU,但功耗高、面积大,也无法应对 MNU。每个数据节点,即每个 C 单元的输出,是由其他两个具有相同逻辑值的节点决定的。例如,节点 N1 的逻辑值依赖于节点 N2 和节点 N4 的逻辑值,若 N2 与 N4 同时发生 SEU,节点 N1 的值将无法纠正,产生错误结果。

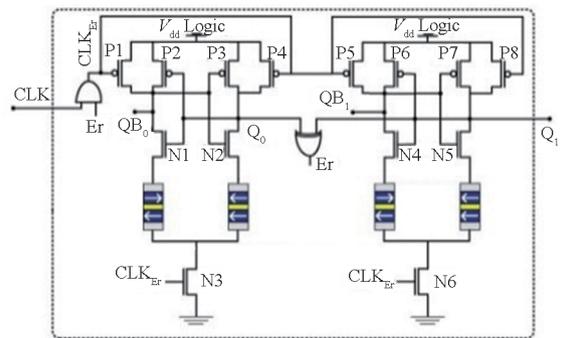


图 15 Lakys's 锁存器结构^[157]
Fig. 15 Lakys's latch structure^[157]

Kang 等^[185]提出了一种可以应对双节点翻转 (double node upset, DNU) 的锁存器结构,如图 17 所示。相较于图 15、图 16 这两种结构,该结构所需

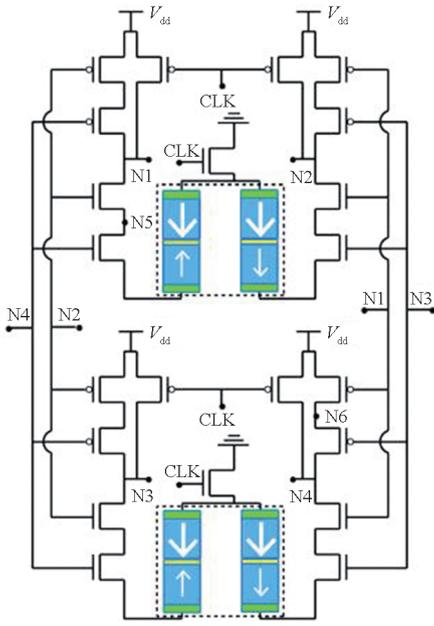


图 16 Zhang's 锁存结构^[184]

Fig. 16 Zhang's latch structure^[184]

MTJ 数量更少,所用 CMOS 更少,在成本、功耗、集成度方面有着更好的表现。

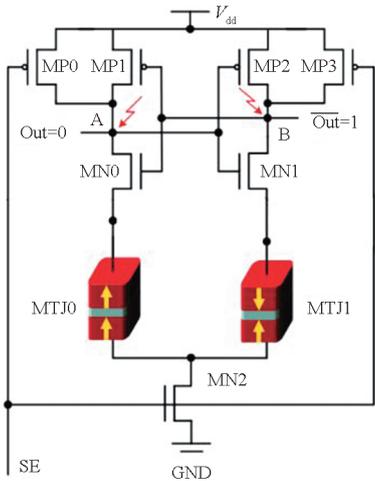


图 17 Kang's 锁存结构^[185]

Fig. 17 Kang's latch structure^[185]

4 总结与展望

商用 MRAM 未进行辐照加固设计,因此难以直接胜任航天任务。MRAM 应用于航天器,在抗辐照方面需要具备两个条件:一是 MTJ 单元本身具备一定的天然抗辐照能力;二是外围 CMOS 逻辑需采取针对性的抗辐照加固措施,达到一定的抗辐照指标。

以目前研究来看,对 MTJ 特性影响较大的粒子主要是重离子和 γ 光子,质子和中子未见统计学意义上的影响。重离子和 γ 光子影响 MTJ 的

主要方式或效应主要有:①辐照粒子与 MTJ 材料(尤其是磁性材料)中电子发生相互作用,影响电子的自旋,进而影响各膜层的磁性;②重离子与 MTJ 材料原子核发生弹性相互作用,带来位移损伤,破坏原膜层结构和界面完整性,使 MTJ 电学性能和磁性能发生变化(这方面 γ 光子造成影响概率较低,可忽略不计);③粒子辐照 MTJ 后带来热效应,使 MTJ 内部产生热应力,从而改变 MTJ 膜层和界面的物理性状,带来永久损伤,也可能引起两个状态之间的势垒降低,带来软错误。这些效应的物理作用机理目前尚未清晰。如何通过优化 MTJ 的结构、材料和参数来进一步提升 MTJ 的抗辐照性能仍是一个需要研究的课题。

CMOS 逻辑加固方面:对于总剂量效应和单粒子闩锁,可采用一些通用的加固方法,这方面已有大量的研究成果可借鉴;对于单粒子翻转和单粒子瞬态加固,应重点对数据写入、读出结构以及数据/状态寄存器进行加固,这方面虽然有许多文献报道,但多基于仿真,实际抗单粒子效果仍需结合所用工艺进行试验证实。

抗辐照 MRAM 在航空航天领域甚至核能领域将具有广阔的应用前景。随着 Everspin、TSMC、三星、Global Foundries 等国际半导体领军企业在 MRAM 上的研发投入不断增加,MRAM 工艺技术将不断提高,集成度和可靠性将进一步提升,成本也会逐步降低。同时随着人们对 MTJ 辐照效应和机理以及对 CMOS 逻辑辐照加固技术的进一步探索,MRAM 的抗辐照能力也将越来越强。抗辐照 MRAM 将朝着更强的抗辐照能力、更高的集成度(STT 或其他技术)、更快的速度(SOT 或其他技术)、更高的可靠性(SOT 或其他技术)、更强的抗外界磁场干扰能力(EB-MRAM 或其他技术)方向发展。从抗辐照 MRAM 的应用场景角度看,随着技术的不断进步,MRAM 将首先取代读写速度较慢、容量较小的 EEPROM(容量 1 Mbit 以内);然后取代读写速度较慢且对辐照较为敏感的 NOR FLASH(容量 4 Mbit ~ 1 Gbit);进而取代数据易失且功耗较大的外部缓存 DRAM(容量 4 Gbit 及以上);若擦写次数达到 10^{16} ,写延迟达到 1 ns 以内,单元面积小于 SRAM,则将有望作为一级缓存取代 SRAM。

参考文献 (References)

[1] 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): 70-90.
 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): 70–90. (in Chinese)
- [2] WULF W A, MCKEE S A. Hitting the memory wall [J]. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 1995, 23(1): 20–24.
- [3] ZIDAN M A, STRACHAN J P, LU W D. The future of electronics based on memristive systems [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(1): 22–29.
- [4] ALSHAHRANI R. The path to exascale computing [C]// *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA)*, 2015: 123–126.
- [5] COMPAGNONI C M, GODA A, SPINELLI A S, et al. Reviewing the evolution of the NAND Flash technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(9): 1609–1633.
- [6] KONO T, ITO T, TSURUDA T, et al. 40 nm embedded SG-MONOS flash macros for automotive with 160 MHz random access for code and endurance over 10M cycles for data [C]// *Proceedings of 2013 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, 2013: 212–213.
- [7] MOHR K C, CLARK L T, HOLBERT K E. A 130-nm RHBD SRAM with high speed SET and area efficient TID mitigation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, 54(6): 2092–2099.
- [8] HONG X H, PAN L Y, ZHANG W D, et al. Simulation and research on a 4T-cell based duplication redundancy SRAM for SEU radiation hardening [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(11): 114003.
- [9] BOUGEROL A, MILLER F, GUIBBAUD N, et al. Experimental demonstration of pattern influence on DRAM SEU and SEFI radiation sensitivities [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(3): 1032–1039.
- [10] AGRAWAL G R, MASSENGILL L W, GULATI K. A proposed SEU tolerant dynamic random access memory (DRAM) cell [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41(6): 2035–2042.
- [11] BAGATIN M, CELLERE G, GERARDIN S, et al. TID sensitivity of NAND Flash memory building blocks [C]// *Proceedings of 2008 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*, 2008: 34–39.
- [12] GERARDIN S, BAGATIN M, PACCAGNELLA A, et al. Radiation effects in Flash memories [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(3): 1953–1969.
- [13] CLARK L T, MOHR K C, HOLBERT K E. Reverse-body biasing for radiation-hard by design logic gates [C]// *Proceedings of 2007 IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2007: 582–583.
- [14] 曹靓, 田海燕, 王栋. 一种抗单粒子瞬态辐射效应的自刷新三模冗余触发器 [J]. *电子与封装*, 2018, 18(9): 36–38, 41.
CAO L, TIAN H Y, WANG D. A single-event transient hardened triple modular redundancy flip-flop with self-refresh [J]. *Electronics & Packaging*, 2018, 18(9): 36–38, 41. (in Chinese)
- [15] CHEN A. A review of emerging non-volatile memory (NVM) technologies and applications [J]. *Solid-State Electronics*, 2016, 125: 25–38.
- [16] 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.
- [17] HEIDECCKER J. MRAM technology status [EB/OL]. NASA Electronic Parts and Packaging Program JPL publication. (2013–02–01) [2022–01–16]. https://nepp.nasa.gov/files/24256/12_124_JPL_Heidecker_MRAM%20Technology%20Status%20jpl%20pub%2013_3%202_13%20rec%204_15_13.pdf.
- [18] LEE K, BAK J H, KIM Y J, et al. 1 Gbit high density embedded STT-MRAM in 28 nm FDSOI technology [C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2019: 2.2.1–2.2.4.
- [19] AGGARWAL S, ALMASI H, DEHERRERA M, et al. Demonstration of a reliable 1 Gb standalone spin-transfer torque MRAM for industrial applications [C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2019: 2.1.1–2.1.4.
- [20] Avalanche Technology. 1 Gbit–8 Gbit dual quad SPI P-memory [EB/OL]. (2023–09–13) [2022–07–20]. <https://www.avalanche-technology.com/document-page/1gbit-8gbit-dual-quad-spi-p-sram-memory>.
- [21] MOODERA J S, KINDER L R, WONG T M, et al. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(16): 3273–3276.
- [22] PARKIN S S P, KAISER C, PANCHULA A, et al. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO(100) tunnel barriers [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(12): 862–867.
- [23] YUASA S, NAGAHAMA T, FUKUSHIMA A, et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(12): 868–871.
- [24] IKEDA S, HAYAKAWA J, ASHIZAWA Y, et al. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(8): 054416.
- [25] BUTLER W H, ZHANG X G, SCHULTHESS T C, et al. Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches [J]. *Physical Review B*, 2001, 63(5): 054416.
- [26] MATHON J, UMERSKI A. Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction [J]. *Physical Review B*, 2001, 63(22): 220403.
- [27] DURLAM M, ADDIE D, AKERMAN J, et al. A 0.18 μm 4 Mb toggling MRAM [C]// *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting*, 2003.
- [28] 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.
- [29] Everspin Technologies Inc. 8-bit/16-bit parallel interface MRAM [EB/OL]. [2022–01–16]. <https://www.everspin.com/parallel-interface-mram>.
- [30] Everspin Technologies Inc. Serial peripheral interface [EB/OL]. [2022–01–16]. <https://www.everspin.com/serial-peripheral-interface>.
- [31] Aeroflex. UT8MR2M8 16Megabit non-volatile MRAM [EB/OL]. [2022–01–16]. <https://www.electronicsdatasheets.com/download/116833.pdf?format=pdf>.

- [32] CAES. 64Megabit non-volatile MRAM [EB/OL]. [2022 - 01 - 16]. <https://caes.com/sites/default/files/documents/Datasheet-UT8MR8M8.pdf>.
- [33] Honeywell. HXNV0100 1Megabit 64K × 16 non-volatile magneto-resistive RAM [EB/OL]. [2022 - 01 - 16]. http://www.protec-semi.de/files/HXNV0100_1_Megabit_64K_x_16_Non_Volatile_Magneto-Resistive_RAM_new.pdf.
- [34] Honeywell. 16Megabit non-volatile magneto-resistive RAM[EB/OL]. [2022 - 01 - 16]. http://www.protec-semi.de/files/HXNV01600_16_Megabit_Non-Volatile_Magneto-Resistive_RAM_new.pdf.
- [35] Honeywell. HXNV06400 64Mb non-volatile MRAM [EB/OL]. [2022 - 01 - 16]. <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/microelectronics/datasheet/HXNV06400-C.pdf>.
- [36] RIZZO N D, HOUSAMEDDINE D, JANESKY J, et al. A fully functional 64 Mb DDR3 ST-MRAM built on 90 nm CMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(7): 4441 - 4446.
- [37] JANESKY J, RIZZO N D, HOUSAMEDDINE D, et al. Device performance in a fully functional 800 MHz DDR3 spin torque magnetic random access memory [C]//Proceedings of 2013 5th IEEE International Memory Workshop, 2013: 17 - 20.
- [38] SLAUGHTER J M, NAGEL K, WHIG R, et al. Technology for reliable spin-torque MRAM products [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2016.
- [39] SLAUGHTER J M, NAGEL K, WHIG R, et al. Spin-torque MRAM product status and technology for 40 nm, 28 nm and 22nm nodes [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 2017.
- [40] Everspin Technologies Inc. EMD4E001GAS2 datasheet [EB/OL]. [2022 - 01 - 16]. https://www.everspin.com/sites/default/files/EMD4E001GAS2_1.3_10102022.pdf.
- [41] HUAI Y M, ABEDIFARD E, ZHANG J, et al. Fully functional 64 Mb STT-MRAM utilizing advanced PMTJ on 300 mm wafers [C]//Proceedings of 2016 International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS), 2018.
- [42] WANG Z, HAO X, HU L, et al. 22 nm embedded STT-MRAM macro with 10 ns switching and $>10^{14}$ endurance for last level cache applications [C]//Proceedings of 2021 Symposium on VLSI Technology, 2021: 1 - 2.
- [43] GALLAGHER W J, CHIEN E, CHIANG T W, et al. 22 nm STT-MRAM for reflow and automotive uses with high yield, reliability, and magnetic immunity and with performance and shielding options [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2019.
- [44] CHEN C H, CHANG C Y, WENG C H, et al. Reliability and magnetic immunity of reflow-capable embedded STT-MRAM in 16 nm FinFET CMOS process [C]//Proceedings of 2021 Symposium on VLSI Technology, 2021: 1 - 2.
- [45] NAIK V B, LEE K, YAMANE K, et al. Manufacturable 22 nm FD-SOI embedded MRAM technology for industrial-grade MCU and IOT applications [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2019: 2.3.1 - 2.3.4.
- [46] PARK J H, LEE J, JEONG J, et al. A novel integration of STT-MRAM for on-chip hybrid memory by utilizing non-volatility modulation [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2019: 2.5.1 - 2.5.4.
- [47] HAN S H, LEE J H, SUH K S, et al. Reliability of STT-MRAM for various embedded applications [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 2021: 1 - 5.
- [48] O'DONNELL J A, CONNOR C, PRAMANIK T, et al. eNVM MRAM retention reliability modeling in 22FFL FinFET technology [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 2019: 1 - 3.
- [49] ALZATE J G, ARSLAN U, BAI P, et al. 2 MB array-level demonstration of STT-MRAM process and performance towards L4 cache applications [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2019: 2.4.1 - 2.4.4.
- [50] WEI L Q, ALZATE J G, ARSLAN U, et al. 13.3A 7Mb STT-MRAM in 22FFL FinFET technology with 4 ns read sensing time at 0.9 V using write-verify-write scheme and offset-cancellation sensing technique [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2019: 214 - 216.
- [51] HUAI Y M, ALBERT F, NGUYEN P, et al. Observation of spin-transfer switching in deep submicron-sized and low-resistance magnetic tunnel junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(16): 3118 - 3120.
- [52] HAYAKAWA J, IKEDA S, MIURA K, et al. Current-induced magnetization switching in MgO barrier magnetic tunnel junctions with CoFeB-based synthetic ferrimagnetic free layers [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(7): 1962 - 1967.
- [53] NAKAYAMA M, KAI T, SHIMOMURA N, et al. Spin transfer switching in TbCoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/TbCoFe magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 210.
- [54] IKEDA S, MIURA K, YAMAMOTO H, et al. A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 721 - 724.
- [55] EDELSTEIN D, RIZZOLO M, SIL D, et al. A 14 nm embedded STT-MRAM CMOS technology [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2020: 11.5.1 - 11.5.4.
- [56] NATSUI M, TAMAKOSHI A, HONJO H, et al. Dual-port SOT-MRAM achieving 90-MHz read and 60-MHz write operations under field-assistance-free condition [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, 56(4): 1116 - 1128.
- [57] GARELLO K, YASIN F, COUET S, et al. SOT-MRAM 300 nm integration for low power and ultrafast embedded memories [C]//Proceedings of 2018 IEEE Symposium on VLSI Circuits, 2018: 81 - 82.
- [58] ZHU D Q, GUO Z X, DU A, et al. First demonstration of three terminal MRAM devices with immunity to magnetic fields and 10 ns field free switching by electrical manipulation of exchange bias [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2021: 17.5.1 - 17.5.4.
- [59] PENG S Z, ZHU D Q, LI W X, et al. Exchange bias switching in an antiferromagnet/ferromagnet bilayer driven by spin-orbit torque [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12):

- 757 - 764.
- [60] MIRON I M, GAUDIN G, AUFFRET S, et al. Current-driven spin torque induced by the Rashba effect in a ferromagnetic metal layer [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 230 - 234.
- [61] MIRON I M, GARELLO K, GAUDIN G, et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection [J]. *Nature*, 2011, 476(7359): 189 - 193.
- [62] CUBUKCU M, BOULLE O, DROUARD M, et al. Spin-orbit torque magnetization switching of a three-terminal perpendicular magnetic tunnel junction [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4): 042406.
- [63] LIU L Q, LEE O J, GUDMUNDSEN T J, et al. Current-induced switching of perpendicularly magnetized magnetic layers using spin torque from the spin Hall effect [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(9): 096602.
- [64] LIU L Q, PAI C F, LI Y, et al. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of Tantalum [J]. *Science*, 2012, 336(6081): 555 - 558.
- [65] PAI C F, LIU L Q, LI Y, et al. Spin transfer torque devices utilizing the giant spin Hall effect of tungsten [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(12): 122404.
- [66] ZHANG C L, TAKEUCHI Y, FUKAMI S, et al. Field-free and sub-ns magnetization switching of magnetic tunnel junctions by combining spin-transfer torque and spin-orbit torque [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(9): 092406.
- [67] CAI W L, SHI K W, ZHUO Y D, et al. Sub-ns field-free switching in perpendicular magnetic tunnel junctions by the interplay of spin transfer and orbit torques [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(5): 704 - 707.
- [68] WANG M X, CAI W L, ZHU D Q, et al. Field-free switching of a perpendicular magnetic tunnel junction through the interplay of spin-orbit and spin-transfer torques [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(11): 582 - 588.
- [69] WANG Z H, ZHOU H C, WANG M X, et al. Proposal of toggle spin torques magnetic RAM for ultrafast computing [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(5): 726 - 729.
- [70] ZHANG K L, ZHANG D M, WANG C Z, et al. Compact modeling and analysis of voltage-gated spin-orbit torque magnetic tunnel junction [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 50792 - 50800.
- [71] WANG Z H, ZHANG L, WANG M X, et al. High-density NAND-like spin transfer torque memory with spin orbit torque erase operation [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(3): 343 - 346.
- [72] SHI K W, CAI W L, ZHUO Y D, et al. Experimental demonstration of NAND-like spin-torque memory unit [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(4): 513 - 516.
- [73] BRUHN F, LAMOUREUX E, CHOSSON G, et al. Bridging the space technology "Valley of Death": two spaceflights in 2009 to validate advanced MEMS/microtechnology systems and subsystems [J/OL]. *Journal of Applied Physics*, 2009. [2022 - 01 - 16]. https://www.researchgate.net/publication/268206349_Bridging_the_Space_Technology_Valley_of_Death_Two_spaceflights_in_2009_to_validate_advanced_MEMSMicrotechnology_systems_and_subsystems.
- [74] DALY E J. The evaluation of space radiation environments for ESA projects [J]. *ESA Journal*, 1988, 12(2): 229 - 247.
- [75] HESS W N, O' BRIEN B J. The radiation belt and magnetosphere [J]. *Physics Today*, 1969, 22(10): 73 - 74.
- [76] HERRERA-ALZU I, LOPEZ-VALLEJO M. Design techniques for Xilinx Virtex FPGA configuration memory scrubbers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(1): 376 - 385.
- [77] SHAH J S, NAIRN D, SACHDEV M. A 32 kb macro with 8T soft error robust, SRAM cell in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(3): 1367 - 1374.
- [78] 刘忠立, 高见头. 半导体材料及器件的辐射效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- LIU Z L, GAO J T. Radiation effects in semiconductor materials and devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [79] 高武. 抗辐射集成电路设计理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- GAO W. Design theories and methods of radiation-hardened CMOS integrated circuits [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018. (in Chinese)
- [80] 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 the effects of radiation on MRAMs and corresponding hardening techniques [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(1): 106 - 114. (in Chinese)
- [81] 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.
- [82] SOO Y L, HUANG S, KIM S, et al. Effects of heat treatment on diffusion of Cu atoms into CdTe single crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(25): 3729 - 3731.
- [83] FUKUMOTO Y, SHIMURA K I, KAMIJO A, et al. High thermal stability of magnetic tunnel junctions with oxide diffusion barrier layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(2): 233 - 235.
- [84] TSCHENTSCHER T, MCCARTHY J E, HONKIMÄKI V, et al. High-energy magnetic Compton scattering experiments at ESRF [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 1998, 5(3): 940 - 942.
- [85] AHUJA B L, DASHORA A, HEDA N L, et al. Reversal of orbital magnetic moment on substitution of Bi in multiferroic CO_2MnO_3 : a magnetic Compton scattering study [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21): 212502.
- [86] AMARA-DABABI S, SOUSA R C, CHSHIEV M, et al. Charge trapping-detrapping mechanism of barrier breakdown in MgO magnetic tunnel junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(8): 083501.
- [87] REN F H, 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.
- [88] 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.
- [89] ZINK B, YANG-SCHARLOTTA J, MANCOFF F, et al. Influence of total ionizing dose on magnetic tunnel junctions

- with perpendicular anisotropy [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(5): 748–755.
- [90] MONTOYA E A, CHEN J R, NGELALE R, et al. Immunity of nanoscale magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy to ionizing radiation [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10220.
- [91] WANG B, WANG Z H, CAO K H, et al. Effects of gamma irradiation on magnetic properties of double-interface CoFeB/MgO multilayers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(1): 77–81.
- [92] WANG M X, CAI W L, CAO K H, et al. Current-induced magnetization switching in atom-thick tungsten engineered perpendicular magnetic tunnel junctions with large tunnel magnetoresistance [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 671.
- [93] MOULIN J, MAZALEYRAT F, MENDEZ A, et al. Internal stress influence on the coercivity of FeCuNbSiB thin films [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(9/10/11/12): 1275–1278.
- [94] PEASE R L, SHANEYFELT M, WINOKUR P, et al. Mechanisms for total dose sensitivity to preirradiation thermal stress in bipolar linear microcircuits [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, 45(3): 1425–1430.
- [95] MANDAL K, TENA M, CASTAFLO F J, et al. The stress induced anisotropy in amorphous magnetic thin films [C]// *Proceedings of 2000 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 2000: 73.
- [96] RONG J H, YUN G H, NARSU B, et al. Ferromagnetic resonance and stress anisotropy in a ferromagnetic/antiferromagnetic bilayer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(8): 083901.
- [97] JOLLET F, DURAUD J P, NOGUERA C, et al. Surface modifications of crystalline SiO₂ and Al₂O₃ induced by energetic heavy ions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1990, 46(1/2/3/4): 125–127.
- [98] SOM T, SATPATI B, SATYAM P V, et al. Swift heavy ion induced interface modification in Ni/Ge [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2003, 212: 206–210.
- [99] HUBER H, ASSMANN W, GRÖTZSCHEL R, et al. Void formation and surface rippling in Ge induced by high energetic Au irradiation [J]. *Materials Science Forum*, 1997, 248/249: 301–312.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] FLEISCHER R L, PRICE P B, WALKER R M. *Nuclear tracks in solids: principles and applications* [M]. Oakland, California; University of California Press, 1975.
- [105] SEITZ F, TURNBULL D, NACHTRIEB N H. *Solid state physics: advances in research and applications*. Vol. 1 [J]. *Physics Today*, 1956, 9(6): 31.
- [106] KOBAYASHI D, KAKEHASHI Y, HIROSE K, et al. Influence of heavy ion irradiation on perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions [C]// *Proceedings of 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, 2013: 1–5.
- [107] SINGH J P, LIM W C, GAUTAM S, et al. Swift heavy ion irradiation induced effects in Fe/MgO/Fe/Co multilayer [J]. *Materials & Design*, 2016, 101: 72–79.
- [108] XIAO T Y, BENNETT C H, MANCOFF F B, et al. Heavy-ion-induced displacement damage effects in magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy [C]// *Proceedings of Proposed for Presentation at the Nuclear & Space Radiation Effects Conference*, 2020.
- [109] KOBAYASHI D, HIROSE K, MAKINO T, et al. Soft errors in 10-nm-scale magnetic tunnel junctions exposed to high-energy heavy-ion radiation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(8): 0802B4.
- [110] PARK J Y, KIM J M, RYU J, et al. Effects of proton and ion beam radiation on magnetic tunnel junctions [J]. *Thin Solid Films*, 2019, 686: 137432.
- [111] COI O, DI PENDINA G, SOUSA R, et al. Heavy-ion irradiation effects on advanced perpendicular anisotropy spin-transfer torque magnetic tunnel junction [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(5): 588–596.
- [112] WANG B, WANG Z H, 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(17): 172401.
- [113] ALAMDAR M, CHANG L J, JARVIS K, et al. Irradiation effects on perpendicular anisotropy spin-orbit torque magnetic tunnel junctions [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(5): 665–670.
- [114] SOM T, AYYUB P, KABIRAJ D, et al. Formation of Au_{0.6}Ge_{0.4} alloy induced by Au-ion irradiation of Au/Ge bilayer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(2): 903–906.
- [115] SUEHLE J S, VOGEL E M, ROITMAN P, et al. Observation of latent reliability degradation in ultrathin oxides after heavy-ion irradiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(7): 1282–1284.
- [116] MALLICK P, AGARWAL D C, RATH C, et al. Swift heavy ion irradiation induced texturing in NiO thin films [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 2008, 266(14): 3332–3335.
- [117] SHARMA S K, KUMAR S, THAKUR P, et al. Irradiation induced texturing in the Mg_{0.95}Mn_{0.05}Fe₂O₄ ferrite thin film [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(8): 2758–2761.
- [118] SRIVASTAVA P C, GANESAN V, SINHA O P. AFM studies of swift heavy ion-irradiated surface modification in Si and GaAs [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 36(1/2/3/4/5/6): 671–674.
- [119] DASH P, MALLICK P, RATH H, et al. Surface

- modifications of ultra-thin gold films by swift heavy ion irradiation[J]. *Indian Journal of Physics*, 2010, 84(10): 1391–1397.
- [120] OCHEDOWSKI O, OSMANI O, SCHADE M, et al. Graphitic nanostripes in silicon carbide surfaces created by swift heavy ion irradiation [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3913.
- [121] POTDAR S, GUPTA R, GUPTA A, et al. In situ x-ray reflectivity study of swift heavy ion induced interface modification in a W/Si multilayer X-ray mirror[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(1): 015305.
- [122] VERMA R, LAL C, JAIN I P. Formation of metal silicide by swift heavy ion induced mixing at Mn/Si interface[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2014, 3(3): 257–263.
- [123] RAJPUT P, GUPTA A, SATHE V. Study of swift heavy-ion-induced modification in Ti/Si using X-ray standing waves[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, 21(9): 095006.
- [124] CHAKRABORTY B R, DIVA K, KABIRAJ D, et al. Characterisation of swift heavy ion-induced mixing using secondary ion mass spectrometry [J]. *Defence Science Journal*, 2009, 59(4): 356–362.
- [125] CHAPPERT C, BERNAS H, FERREÉ J, et al. Planar patterned magnetic media obtained by ion irradiation [J]. *Science*, 1998, 280(5371): 1919–1922.
- [126] BERNAS H, ATTANÉ J P, HEINIG K H, et al. Ordering intermetallic alloys by ion irradiation: a way to tailor magnetic media [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(7): 077203.
- [127] MOUGIN A, POPPE S, FASSBENDER J, et al. Magnetic micropatterning of FeNi/FeMn exchange bias bilayers by ion irradiation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(11): 6606–6608.
- [128] LOHAU J, MOSER A, RETTNER C T, et al. Writing and reading perpendicular magnetic recording media patterned by a focused ion beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(7): 990–992.
- [129] OLDHAM T R, PLAM A, FRIENDLIEH M. Total dose test report for Freescale 4M MRAM (Magnetoresistive RAM) nonvolatile memory [R/OL]. (2017–03–08) [2022–01–16]. https://nepp.nasa.gov/files/19505/G07OCT_MR2A16A_TID_I032707.pdf.
- [130] ZHANG H H, BI J S, DUAN Y, et al. Proton irradiation effects and annealing behaviors of 16Mb magneto-resistive random access memory(MRAM) [C]//Proceedings of 2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2016: 1194–1196.
- [131] HIROSE K, KOBAYASHI D, ITO T, et al. Memory reliability of spintronic materials and devices for disaster-resilient computing against radiation-induced bit flips on the ground [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(8): 0802A5.
- [132] SROUR J R, MARSHALL C J, MARSHALL P W. Review of displacement damage effects in silicon devices[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(3): 653–670.
- [133] NARITA Y, TAKAHASHI Y, HARADA M, et al. Fast neutron tolerance of the perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions with junction diameters between 46 and 64 nm [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(8): 0802B3.
- [134] NGUYEN D N, IROM F. Radiation effects on MRAM [C]//Proceedings of 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007: 1–4.
- [135] 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]//Proceedings of 2008 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2008: 5–10.
- [136] 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]//Proceedings of 2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2010: 4.
- [137] 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.
- [138] 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): 1–5.
- [139] 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]//Proceedings of 2019 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2019: 1–4.
- [140] HAFER C, VON THUN M, MUNDIE M, et al. SEU, SET, and SEFI test results of a hardened 16 Mbit MRAM device [C]//Proceedings of 2012 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2012: 1–4.
- [141] 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]//Proceedings of 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2009: 103–105.
- [142] 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 magnetoresistive random access memory (STT-MRAM) [C]//Proceedings of 2018 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 2018: 1–4.
- [143] WANG L F, LIU H N, CHEN L K, et al. Experimental study of single event upset and single event latch-up in SOI SRAM [C]//Proceedings of 2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2016: 1506–1508.
- [144] ELGHEFARI M, MCCLURE S. Radiation effects assessment of MRAM devices [EB/OL]. [2022–01–20]. https://nepp.nasa.gov/files/16431/08_173_J1_PL_%20Elghefari.pdf.
- [145] 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]//Proceedings of 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 2017: 1–4.
- [146] 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.
- [147] RADTKE M. Honeywell's radiation hardened 16 Mb and

- 64 Mb MRAM non-volatile memory products for space applications [C]//Proceedings of Annual Single-Event Effects (SEE) Symposium Coupled with the Military and Aerospace Programmable Logic Devices, 2014.
- [148] REZZAK N, MAILLARD P, SCHRIMPF R D, et al. The impact of device width on the variability of post-irradiation leakage currents in 90 and 65 nm CMOS technologies[J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(11): 2521–2526.
- [149] BAUMANN R. Soft errors in advanced computer systems[J]. *IEEE Design & Test of Computers*, 2005, 22(3): 258–266.
- [150] MAVIS D G, EATON P H. Soft error rate mitigation techniques for modern microcircuits [C]//Proceedings of 2002 IEEE International Reliability Physics Symposium (Cat. No. 02CH37320), 2002: 216–225.
- [151] MAZREAH A A, MANZURI SHALMANI M T. Low-leakage soft error tolerant dual-port SRAM cells for cache memory applications[J]. *Microelectronics Journal*, 2012, 43(11): 766–792.
- [152] LIN S, KIM Y B, LOMBARDI F. Analysis and design of nanoscale CMOS storage elements for single-event hardening with multiple-node upset[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2012, 12(1): 68–77.
- [153] SHESHADRI V B, BHUVA B L, REED R A, et al. Effects of multi-node charge collection in flip-flop designs at advanced technology nodes[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium, 2010: 1026–1030.
- [154] MESSENGER G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, 29(6): 2024–2031.
- [155] CHA H, RUDNICK E M, PATEL J H, et al. A gate-level simulation environment for alpha-particle-induced transient faults [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1996, 45(11): 1248–1256.
- [156] KLEINOSOWSKI A, OLDIGES P, WILLIAMS R Q, et al. Modeling single-event upsets in 65-nm silicon-on-insulator semiconductor devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(6): 3321–3328.
- [157] 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.
- [158] SHAMS M, EBERGEN J C, ELMASRY M I. Modeling and comparing CMOS implementations of the C-element [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2002, 6(4): 563–567.
- [159] 周昕杰, 陈嘉鹏, 郭刚, 等. 一种抗单粒子瞬态扰动触感器加固结构[J]. *固体电子学研究与进展*, 2017, 37(6): 429–432.
- ZHOU X J, CHEN J P, GUO G, et al. An radiation hardened flip-flop for anti-single event transient effect[J]. *Research & Progress of SSE*, 2017, 37(6): 429–432. (in Chinese)
- [160] HAO P P, CHEN S M, HUANG P C, et al. Novel SET mitigation technique for clock distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2018, 18(1): 105–113.
- [161] SCHRAPE O, BREITENREITER A, ANDJELKOVIC M, et al. D-SET mitigation using common clock tree insertion techniques for triple-clock TMR flip-flop [C]//Proceedings of 2018 21st Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), 2018: 201–205.
- [162] CHIPANA R, KASTENSMIDT F L. SET susceptibility analysis of clock tree and clock mesh topologies [C]//Proceedings of 2014 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, 2014: 559–564.
- [163] 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.
- [164] WAKIMURA G, MATSUOKA T, KAMAKURA Y. A simulation study on soft error rate in STT-MRAM [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 2015: 104–105.
- [165] YANG J L, WANG P Y, ZHANG Y J, 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*, 2016, 35(3): 380–393.
- [166] ZHAO W S, CHAPPERT C, JAVERLIAC V, et al. High speed, high stability and low power sensing amplifier for MTJ/CMOS hybrid logic circuits[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 3784–3787.
- [167] DONG Q, WANG Z H, LIM J, et al. A 1-Mb 28-nm 1T1MTJ STT-MRAM with single-cap offset-cancelled sense amplifier and in situ self-write-termination[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(1): 231–239.
- [168] CHABI D, ZHAO W 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.
- [169] WANG B, WANG Z H, CAO K H, et al. Radiation hardening design for spin-orbit torque magnetic random access memory [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018: 1–4.
- [170] WANG B, WANG Z H, HU C Y, et al. Radiation-hardening techniques for spin orbit torque-MRAM peripheral circuitry [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11): 1–5.
- [171] WANG B, WANG Z H, WU B, et al. Novel radiation hardening read/write circuits using feedback connections for spin-orbit torque magnetic random access memory[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2019, 66(5): 1853–1862.
- [172] CALIN T, NICOLAIDIS M, VELAZCO R. Upset hardened memory design for submicron CMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(6): 2874–2878.
- [173] BISHNOI R, EBRAHIMI M, OBORIL F, et al. Improving write performance for STT-MRAM [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(8): 1–11.
- [174] NOGUCHI H, IKEGAMI K, TAKAYA S, et al. 4Mb STT-MRAM-based cache with memory-access-aware power optimization and write-verify-write/read-modify-write scheme [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2016: 132–133.
- [175] SEO Y, KWON K W, ROY K. Area-efficient SOT-MRAM with a Schottky diode [J]. *IEEE Electron Device Letters*,

- 2016, 37(8): 982–985.
- [176] ALHALABI R, NOWAK E, PREJBEANU I L, et al. High density SOT-MRAM memory array based on a single transistor [C]//Proceedings of 2018 Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS), 2018: 1–3.
- [177] SEO Y, ROY K. High-density SOT-MRAM based on shared bitline structure[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2018, 26(8): 1600–1603.
- [178] APALKOV D, KHVALKOVSKIY A, WATTS S, et al. Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM) [J]. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, 2013, 9(2): 1–35.
- [179] HONJO H, NGUYEN T V A, WATANABE T, et al. First demonstration of field-free SOT-MRAM with 0.35 ns write speed and 70 thermal stability under 400 °C thermal tolerance by canted SOT structure and its advanced patterning/SOT channel technology [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2019: 28.5.1–28.5.4.
- [180] WANG Z H, LI Z W, WANG M, et al. Field-free spin-orbit-torque switching of perpendicular magnetization aided by uniaxial shape anisotropy [J]. Nanotechnology, 2019, 30(37): 375202.
- [181] PRENAT G, JABEUR K, VANHAUWAERT P, et al. Ultra-fast and high-reliability SOT-MRAM: from cache replacement to normally-off computing [J]. IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems, 2016, 2(1): 49–60.
- [182] ENDOH T, TOGASHI S, IGA F, et al. A 600 MHz MTJ-based nonvolatile latch making use of incubation time in MTJ switching [C]//Proceedings of 2011 International Electron Devices Meeting, 2011: 4.3.1–4.3.4.
- [183] NA T, RYU K, KIM J, et al. A comparative study of STT-MTJ based non-volatile flip-flops [C]//Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2013: 109–112.
- [184] ZHANG D M, KANG W, CHENG Y Q, et al. A novel SEU-tolerant MRAM latch circuit based on C-element [C]//Proceedings of 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2014: 1–3.
- [185] KANG W, ZHAO W S, DENG E Y, et al. A radiation hardened hybrid spintronic/CMOS nonvolatile unit using magnetic tunnel junctions [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(40): 405003.