

文章编号: 2095-4980(2016)06-0966-06

新型非易失性存储器的抗辐射能力研究进展

刘 洋, 辜 科, 李 平, 李 威

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 通过研究铁电存储器、磁性随机存储器、相变存储器和阻变存储器 4 种新型非易失性存储器的抗辐射能力, 总结了每种非易失性存储器的总剂量效应和单粒子效应。针对总剂量效应和单粒子效应进行了对比与分析, 得到了目前的新型非易失性存储器的抗辐射能力仍然取决于存储单元以外的互补金属氧化物半导体(CMOS)外围电路的抗辐射能力。该结论为抗辐射非易失性存储器的研究提供了参考。

关键词: 非易失性存储器; 辐射效应; 总剂量效应; 单粒子效应; 抗辐射加固

中图分类号: TN386.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0966

Research progress of the radiation response of new non-volatile RAMs

LIU Yang, GU Ke, LI Ping, LI Wei

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Device, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu
Sichuan 610054, China)

Abstract: The radiation responses of several new non-volatile Random Access Memory safety(RAMs), namely Ferroelectric Random Access Memory(FeRAM), Magnetic Random Access Memory(MRAM), Phase Change Random Access Memory(PCRAM) and Resistive Random Access Memory(RRAM) are investigated. The total dose effect and single event effect of each kind of these new non-volatile RAMs are summarized and analyzed. A conclusion is drawn that the radiation response of these new non-volatile RAMs is determined by the radiation response of the Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) peripheral circuit. This paper serves as a reference for the research and development of anti-radiation non-volatile RAM.

Keywords: non-volatile Random Access Memory; radiation effects; total dose effects; single event effects; radiation hardening

非易失性存储器在电子系统中常常作为程序和数据存储器来使用, 是电子系统的重要组成部分。最新的 2013 年国际半导体发展技术路线图(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)认为目前主流的非易失性存储器为 Flash 存储器, 包括 NAND Flash 存储器以及 NOR Flash 存储器。除此之外, 路线图中还介绍了 4 种新型非易失性存储器: 铁电存储器(FeRAM), 磁性随机存储器(MRAM), 相变存储器(PCRAM)和阻变存储器(RRAM)。其中, FeRAM, MRAM 和 PCRAM 都已经实现了量产, 而报告中暂时将 RRAM 作为潜在的解决方案, 因为 RRAM 目前只有小规模的应用^[1]。

新型非易失性存储器与传统非易失性存储器相比最大的区别在于新型非易失性存储器不依靠电荷存储数据, 因此新型非易失性存储器的存储单元被认为有较好的抗总剂量能力^[2]。但是, 由于目前新型非易失性存储器仍然基于 CMOS 工艺生产, 因此其最终抗辐射能力仍要由基于 CMOS 工艺制作的外围电路决定。在新型非易失性存储器的发展过程中, 研究人员对其抗辐射能力进行了大量深入的研究, 提出了很多改善新型非易失性存储器抗辐射性能的方法, 推动了新型非易失性存储器在军事和航空航天领域中的应用。目前, 美军的合格制造厂认证名单(Qualified Manufacturer's List, QML)中已经出现了专注于生产 MRAM 的厂商 Everspin。其他 QML 厂商, 例如 BAE, Aeroflex, TI, Honeywell 等也纷纷推出了自己的新型非易失性存储器产品。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)也在持续关注新型非易失性存储器在航空航天领域中的应用。

1 FeRAM 的辐射效应

铁电存储器的存储单元类似一个平行板电容,但是上下极板之间是铁电晶体。铁电晶体晶格中心的原子在外加电场的作用下会发生偏移,这种偏移被称为铁电晶体的极化。铁电晶体的极化状态在外加电场撤除后可以保持。铁电晶体的极化宏观表现为铁电电容上下极板的电压,配合相应的读写电路以及必要的外围电路可以实现数据的存储与读写。

1.1 FeRAM 的总剂量效应

2001年,D. N. Nguyen等对Ramtron公司采用Rohm 0.8 μm 工艺制造的2款铁电存储器FM1608(容量为64 Kbit)和FM1808(容量为256 Kbit)使用Co-60 γ 辐射源进行了总剂量效应研究。研究中被测芯片在2种不同剂量率下进行辐射,分别是50 rad(Si)/s的高剂量率和0.011 6 rad(Si)/s的低剂量率。芯片接受高剂量率辐射时处于未加偏置的状态,芯片接受低剂量率辐射时芯片处于5 V的静态偏置。在高剂量率辐射下,2款芯片的辐射响应非常一致,均在总剂量为12 krad(Si)下开始出现读取错误,这2款存储器均在总剂量为25 krad(Si)时失效,而且在100 $^{\circ}\text{C}$ 、24 h的退火后错误没有恢复。在低剂量率辐射时,FM1608在总剂量达到20 krad(Si)时出现了错误,而FM1808在总剂量为15 krad(Si)时开始出现错误^[3]。2008年,Mauro Zanata等对Ramtron采用富士通0.35 μm 工艺制造的FM18L08铁电存储器使用10 keV的X射线进行了总剂量效应研究。研究结果表明,总剂量达到280 krad(Si)之前,芯片工作正常,当总剂量继续增加时,芯片出现了少量失效位,但是读写功能保持正常;当总剂量继续增加到400 krad(Si)时,芯片读写功能失效^[4]。2014年,GU Ke等分别使用X射线和 γ 射线对Ramtron基于0.13 μm CMOS工艺制造的FM28V100的不同功能模块进行了总剂量效应研究。X射线辐射下,该FeRAM的存储阵列在总剂量达到2.8 Mrad(SiO_2)后开始出现位翻转,而敏感放大器部分在总剂量达到220 krad(SiO_2)后就开始出现读写错误。使用 γ 射线对全芯片进行辐射时,研究人员在总剂量为58 krad(SiO_2),120 krad(SiO_2)和175 krad(SiO_2)时进行了功能检查,器件在总剂量为58 krad(SiO_2)时工作正常,在总剂量为120 krad(SiO_2)时出现了读错误,在总剂量为175 krad(SiO_2)时读取的数据为全“0”^[5]。

1.2 FeRAM 的单粒子效应

2003年,Stephen C. Philpy等对一款采用设计加固,基于0.35 μm 工艺生产的FeRAM的辐射效应进行了研究。在单粒子效应的研究中,研究结果表明该芯片在高传能密度(Linear Energy Transfer, LET)为20 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时没有发生单粒子门锁现象^[6]。2001年,Leif Scheick等使用重离子对来自Ramtron的FM1806,FM1808以及来自Hynix的Hy8064商用FeRAM的单粒子效应进行了研究。研究结果表明,来自Hynix的FeRAM的单粒子翻转阈值为30 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,单粒子门锁阈值为25 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$;来自Ramtron的FeRAM的单粒子翻转阈值为22 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ^[7],单粒子门锁阈值为20 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 。2015年,Taiki Uemura等对一款基于0.18 μm CMOS工艺生产的FeRAM进行了单粒子效应研究。研究结果表明,该FeRAM在LET为32 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时没有发生单粒子翻转现象^[8]。

1.3 FeRAM 的辐射效应总结

尽管FeRAM的存储单元有较强的抗总剂量能力,但是FeRAM芯片整体的抗总剂量能力仍然与制造工艺有很大的联系。小尺寸工艺上制造的FeRAM比大尺寸工艺上制造的FeRAM有更强的抗总剂量能力。单粒子效应方面,铁电存储器的抗单粒子翻转和抗单粒子门锁能力由存储阵列以外的译码、敏感放大器、数据锁存等外围电路的抗辐射能力决定。因此,铁电存储器在军事和航空航天领域应用时,需要进行抗辐射加固。

2 MRAM 的辐射效应

磁随机存取存储器(MRAM)的数据存储基于巨磁阻(Giant Magneto Resistance, GMR)效应,后来发现的隧道磁电阻(Tunnel Magneto Resistance, TMR)效应催生了基于半导体工艺的MRAM。MRAM的存储单元为巨磁阻单元,巨磁阻单元上下的位线和字线在脉冲电流的作用下可以改变巨磁阻单元的磁化方向,实现了数据的存储。

2.1 MRAM 的总剂量效应

2007年,D N Nguyen等对一款Freescale基于90 nm CMOS工艺生产的商用MRAM MR2A16A进行了辐射效应研究。在总剂量效应研究中,研究人员采用了剂量率为25 rad(Si)/s的Co-60 γ 辐射源。研究结果表明,当对

芯片进行循环的读、写操作时,芯片在 40 krad(Si)以下的总剂量下工作正常,总剂量增加到 45 krad(Si)时,器件出现了错误位,随着总剂量的增加,芯片出现了更多的错误位;当只对器件进行读操作时,芯片功能在总剂量为 60 krad(Si)以下时保持正常^[9]。NASA 曾在 2008 年对 Freescale 生产的商用 MRAM MR2A16ATS35CUOYAN 进行了总剂量效应研究。研究中的辐射源为 Co-60 γ 辐射源,剂量率为 25 rad(Si)/s,研究结果显示芯片在 90 krad(Si)以下的总剂量下保持正常,总剂量增加到 100 krad(Si)时开始出现错误,分析表明错误来源于 MRAM 的控制电路的失效^[10]。2009 年,Romney R. Katti 等使用 Co-60 γ 辐射源和 X 射线对 Honeywell 的一款基于 SOI 工艺的 1 Mbit MRAM 进行了总剂量效应研究。2 种辐射源下,芯片的抗总剂量能力都达到了 1 Mrad(Si),且芯片的电学特性在受辐射之后没有出现明显的漂移^[11]。2010 年,Jason Heidecker 等对一款来自 Everspin 公司的 1 Mbit MRAM 产品进行了辐射效应研究。其中,总剂量效应研究中的辐射源为 Co-60 γ 辐射源,研究结果表明该芯片的抗总剂量能力为 75 krad(Si),在更高的剂量下芯片开始出现错误位。需要注意的是,在进行辐射实验之前,由于芯片没有经过筛选,再加上芯片仍然只是原型,已经存在一些错误位^[12]。

2.2 MRAM 的单粒子效应

D.N. Nguyen 等在对 MR2A16A 的辐射效应研究中使用了 Ne,Ar,Cu 和 Ag 离子束,研究了该芯片的单粒子效应。研究结果表明,该器件在 LET 为 $7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时发生了单粒子门锁现象^[13]。Jason Heidecker 等对 Everspin 公司的 1 Mbit MRAM 使用 Kr,Xe 和 Au 离子束进行了单粒子效应研究,研究中离子束的最大高传能密度(LET)为 $84.1 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 。辐射过程中芯片既没有发生单粒子门锁,也没有发生单粒子翻转。Craig Hafer 等曾使用 Xe 离子束对一款抗辐射加固的 16 Mbit MRAM 进行了单粒子效应研究。研究结果表明,在 LET 为 $18.1 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时器件发生了单粒子翻转,在 LET 为 $29.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时器件发生了读取错误。而高传能密度(LET)在 $112 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 以内时 MRAM 单元没有出现逻辑错误,整个芯片也没有发生单粒子门锁^[14]。G.Tsiligiannis 等在对一款商用的 MRAM 器件进行中子和 α 粒子辐照后发现,芯片在高达 80 MeV 的中子辐照下没有产生任何数据错误,而在 α 粒子的辐照下也没有产生错误。文章指出,之所以该 MRAM 能有优良的抗单粒子性能是因为该 MRAM 采用了磁性隧道结(Magnetic Tunneling Junction, MTJ)结构,磁性单元位于 CMOS 器件上方,对 α 粒子有屏蔽作用^[15]。

2.3 MRAM 的辐射效应总结

MRAM 的存储单元虽然有很强的抗辐射能力,但是 MRAM 对数据的读写仍然需要配合 MOS 器件来完成。因此,MRAM 的抗总剂量效应取决于 MRAM 中 MOS 器件的抗总剂量能力。总剂量效应会影响 MRAM 的功能,但是不会影响存储单元中的数据。MRAM 的单粒子效应同样受限于存储单元以外的外围逻辑电路的抗辐射能力,即使经过抗辐射加固的器件在高 LET 下同样有可能发生单粒子翻转。MRAM 存储器的结构对 MRAM 单粒子效应也有显著的影响。

3 PCRAM 的辐射效应

相变存储器依靠相变材料进行存储,目前主要使用硫系化合物为相变介质材料。相变材料在晶态时电阻较小,在非晶态时电阻较大。如果使相变材料短时间升温直到其熔化温度,然后在极短的时间内冷却后相变材料就会失去长程有序的特性,转变为非晶态。处于非晶态的相变材料升温到结晶温度以上、融化温度以下,再经过较长时间的冷却后相变材料可以重新结晶,转变为晶态。相变材料的加热依靠电阻完成,在进行读写操作时,需要外围电路为加热电阻提供电流。

3.1 PCRAM 的总剂量效应

2007 年,Alberto Gasperin 等对 STMicroelectronics 基于 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 工艺的 4 Mbit PCRAM 测试芯片进行了总剂量效应研究。总剂量效应实验中的辐射源为 8 MeV 的电子束,剂量率为 13 krad(SiO_2)/s,实验中,4 片被测芯片分别接受 1 Mrad(SiO_2),3 Mrad(SiO_2),10 Mrad(SiO_2)和 30 Mrad(SiO_2)的总剂量。实验结果表明,在所有的总剂量值下测试芯片只有极少数据错误,而且分析表明数据错误的来源是字线与位线选择管在总剂量效应下的失效^[16]。2010 年 John Rodgers 等对 BAE 与 Ovonyx 两公司合作研发的一款基于 $0.25 \mu\text{m}$ 抗辐射加固 CMOS 工艺的 4 Mbit PCRAM 的辐射效应进行了研究。在进行总剂量效应研究时,研究人员使用 Co-60 γ 辐射源对芯片进行辐射,在总剂量为 100 krad(Si),200 krad(Si),500 krad(Si),1 Mrad(Si)和 2 Mrad(Si)下测试了芯片的数据保持能力和功能,发现芯片一直正常工作。随后研究人员继续增加总剂量直到 10 Mrad(Si),芯片的功能仍然正常。这款芯片的设计

抗总剂量能力为 1 Mrad(Si), 实验结果证明该芯片的抗总剂量能力远远超过了设计指标^[16]。

3.2 PCRAM 的单粒子效应

在 2010 年 John Rodgers 等的研究中, Ne, Ar, Kr, Xe 和 Bi 离子束被用来研究芯片的单粒子效应。研究结果表明, 在 LET 值高达 $120 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时, 芯片没有发生单粒子门锁, 数据存储单元没有发生单粒子翻转, 但是敏感放大器部分出现了瞬态错误。2014 年 S. Gerardin 等在对 Micron 公司的一款基于 45 nm CMOS 工艺的相变存储器(PCRAM)的辐射效应测试中发现当重离子在沿着字线射入存储单元后发生了翻转。这是首次在 PCRAM 单元上发现单粒子翻转现象, 在此芯片中发生这种翻转的 LET 大于 $38 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ^[17]。

3.3 PCRAM 的辐射效应总结

PCRAM 中数据的读写需要通过 MOS 器件提供电流对相变材料进行加热, 因此 PCRAM 的总剂量效应同样受限于 MOS 器件, 例如 MRAM 的字线、位线选择管与控制逻辑等等。PCRAM 的单粒子效应主要反映了 PCRAM 所基于的 CMOS 工艺的单粒子效应。但是, 最新的研究表明, 由于热效应对以相变材料为主的存储单元的影响很大, 重离子以一定角度入射 PCRAM 存储单元的特定位置时, 有可能发生单粒子翻转, 破坏存储的数据。

4 RRAM 的辐射效应

阻变存储器依靠忆阻材料进行数据的存储。忆阻材料的电阻在电压作用下可以在 2 个稳态之间转换, 实现了数据的存储。一般来说, 阻变存储器的存储单元使用了金属-介质-金属的三明治结构, 2 层金属之间为忆阻材料。如果通过外围电路改变上下金属电极的电压, 可以使忆阻材料在高阻态和低阻态之间转变, 这样就完成数据的读写。目前, RRAM 还没有实现大规模量产, 但是针对阻变存储器存储单元的辐射特性已经有较多的研究成果。

4.1 RRAM 的总剂量效应

2012 年, Matthew J. Marinella 等使用 X 射线、 γ 射线和质子对 TaO_x 忆阻器进行了总剂量效应研究。研究结果表明, 在 X 射线的辐射下, 总剂量小于 10 krad(Si)时发生了高低阻态的转换, 在 Co-60 γ 辐射源产生的 γ 射线辐射下, 总剂量达到 5 Mrad(Si)时忆阻器没有发生阻态变化, 读写功能正常。在 4.5 MeV 的质子辐射下, 总剂量达到 5 Mrad(Si)时没有发生阻态转换与功能错误。在 105 MeV 与 480 MeV 的质子辐射下, 忆阻器发生了无规律的阻态变化^[18]。

2013 年, J. S. Bi 等针对基于 HfO_2/Hf 的双极型忆阻存储器进行了 X 射线辐射试验与质子辐射试验。在 X 射线辐射试验中, 忆阻器件的功能在 7 Mrad(SiO_2)的总剂量下仍然保持正常; 在质子辐射试验中, 虽然能量为 1.8 MeV 的质子在忆阻器件中引入了晶格错位缺陷, 但是该缺陷没有影响到忆阻器件的功能^[19]。2013 年, P. Dandamudi 等在对 Ag-Ge₄₀S₆₀ 忆阻器件的总剂量效应研究中发现, 在 Co-60 γ 辐射源产生的 γ 射线辐射下, 该器件的抗总剂量效应能力达到了 10 Mrad(Si)^[20]。2014 年, David R. Hughart 等在对 TaO_x 和 TaO_2 两种忆阻器的辐射效应进行研究时发现, 2 种忆阻器在受到 28 MeV 的 Si 离子辐射时, 在 60 Mrad(Si)的总剂量下开始出现阻值状态的改变, 而在使用 10 keV 的 X 射线进行辐射时, 在总剂量为 18 Mrad(Si)时, 2 种忆阻器的功能未发生大的变化^[21]。2014 年, Stephanie L. Weeden-Wright 等对一个基于 65 nm 工艺的 HfO_2/Hf 阻变存储器进行了总剂量效应评估, 结果表明, 当器件受到 1.8 MeV 的质子辐射时, 尽管与忆阻器件相连的 MOS 管发生了严重的退化, 但是忆阻器内存储的数据没有遭到破坏, RRAM 的抗总剂量能力达到了 1 Mrad(SiO_2)^[22]。2014 年, YUAN Fang 等使用 Co-60 γ 辐射源产生的 γ 射线对 Ag/ AlO_x /Pt 阻变存储器的总剂量效应进行了研究。研究结果表明, 该阻变存储器的抗总剂量能力达到了 1 Mrad(Si)^[23]。

4.2 RRAM 的单粒子效应

2014 年 NASA 使用重离子针对一款已经量产的 RRAM 产品进行了抗辐射能力评估。这款产品为 Panasonic 基于嵌入式 RRAM 的微处理器。结果显示, 来自 RRAM 存储阵列部分的抗单粒子性能达到了 $75 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, 但是芯片在单粒子辐射过程中出现了功能性错误。由于 RRAM 中没有电荷泵结构, 从而杜绝了 Flash 中常常出现的块擦除错误。

4.3 RRAM 的辐射效应总结

阻变存储器是目前新型非易失性存储器中唯一没有实现大规模量产的存储器, 从已有的研究发现, 阻变存储

器的存储单元具有优异的抗总剂量能力。但是需要注意的是,目前对 RRAM 的研究大多针对单纯的忆阻器单元,并没有将忆阻器与 CMOS 电路进行大规模的整合。实际情况下每个阻变存储器单元都需要连接一个 MOS 管进行相应的读写操作,已经有研究显示未加固的阻变存储器在总剂量下均会发生不同程度的退化。因此,在进入军事与航天领域之前,阻变存储器应当重点解决其抗辐射加固问题。

5 结论

FeRAM,MRAM,PCRAM 和 RRAM 四种非易失性存储器在存储原理上与传统非易失性存储器不同,它们不依靠电荷进行数据的存储。新型的存储方式不仅仅带来了性能上的突破,在抗辐射能力上新型非易失性存储器也有先天的优势。大量研究数据表明,新型非易失性存储器的存储单元具有很好的抗辐射性能。但是对量产器件的研究发现,由于新型非易失性存储器的生产目前仍然依赖于 CMOS 工艺,因此商用器件并没有表现出很好的抗辐射性能。为了解决这个问题,许多厂商使用了抗辐射加固的 CMOS 工艺以及抗辐射加固设计对新型非易失性存储器进行了抗辐射加固,效果比较显著。经过加固的新型非易失性存储器可以在军事及航空航天领域中发挥其相对于传统非易失性存储器的性能优势,给运行在特殊环境中的电子系统带来大幅度的性能与可靠性提升。

参考文献:

- [1] WILSON L. International technology roadmap for semiconductors(ITRS)[J]. Semiconductor Industry Association, 2013:1-2.
- [2] NUNS T,DUZELLIER S,BERTRAND J,et al. Evaluation of recent technologies of nonvolatile RAM[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,55(4):1982.
- [3] NGUYEN D N,SCHEICK L Z. TID testing of ferroelectric nonvolatile RAM[C]// Radiation Effects Data Workshop. [S.l.]:IEEE, 2001:57-61.
- [4] ZANATA M,WRACHIEN N,CESTER A. Ionizing radiation effect on ferroelectric nonvolatile memories and its dependence on the irradiation temperature[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,55(6):3237-3245.
- [5] GU K,LIOU J J,LI W,et al. Total ionizing dose sensitivity of function blocks in FRAM[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6):873-878.
- [6] PHILPY S T,KAMP D A,DERBENWICK G F. Nonvolatile and SDRAM ferroelectric memories for aerospace applications[C]// Aerospace Conference. University Park,PA,USA:IEEE, 2004:2294-2299.
- [7] SCHEICK L Z,SWIFT G M,GUERTIN S M. SEU evaluation of SRAM memories for space applications[C]// Radiation Effects Data Workshop. [S.l.]:IEEE, 2000:61-63.
- [8] UEMURA T,HASHIMOTO M. Investigation of single event upset and total ionizing dose in FeRAM for medical electronic tag[C]// 2015 IEEE International Reliability Physics Symposium. [S.l.]:IEEE, 2015:1.1-1.5.
- [9] NGUYEN D N,IROM F. Radiation effects on MRAM[J]. Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007:1-4.
- [10] 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. [S.l.]:IEEE, 2008:510.
- [11] KTTI R R,LINTZ J,Sundstrom L,et al. Heavy-ion and Total Ionizing Dose(TID) Performance of a 1 Mbit Magnetoresistive Random Access Memory(MRAM)[C]// 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop. [S.l.]:IEEE, 2009:103-105.
- [12] HEIDECKER J,ALLEN G,SHELDON D. Single Event Latchup(SEL) and Total Ionizing Dose(TID) of a 1 Mbit Magnetoresistive Random Access Memory(MRAM)[C]// 2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop. [S.l.]:IEEE, 2010:4.
- [13] 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. [S.l.]:IEEE, 2012:1-4.
- [14] 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.
- [15] GASPERIN A,WRACHIEN N,PACCAGNELLA A,et al. Total ionizing dose effects on 4 Mbit phase change memory arrays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,4(55):2090-2097.
- [16] RODGERS J,ROCKETT L,MAIMON J,et al. Characterization and qualification of radiation hardened nonvolatile phase change memory technology[C]// Aerospace Conference. [S.l.]:IEEE, 2010:1-8.
- [17] GERARDIN S,BAGATIN M,PACCAGNELLA A,et al. Upsets in phase change memories due to high-LET heavy ions impinging at an angle[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(6):3491-3496.
- [18] MARINELLA M J,DALTON S M,MICKEL P R,et al. Initial assessment of the effects of radiation on the electrical characteristics of memristive memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012,59(6):2987-2994.

- [19] BI J S, HAN Z S, ZHANG E X, et al. The impact of X-ray and proton irradiation on-based bipolar resistive memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6):4540–4546.
- [20] DANDAMUDI P, BARNABY H J, KOZICKI M N, et al. Total ionizing dose tolerance of the resistance switching of Ag-Ge₄₀SeO based Programmable Metallization Cells[C]// Radiation and Its Effects on Components and Systems. [S.l.]: IEEE, 2013.
- [21] HUGGHART D R, PACHECO J L, LOHN A J, et al. Mapping of radiation-induced resistance changes and multiple conduction channels in memristors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6):2965–2971.
- [22] WEEDEN-Wright S L, BENNETT W G, HOOTEN N C, et al. TID and displacement damage resilience of 1T1R resistive memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6):2972–2978.
- [23] YUAN F, ZHANG Z, WANG J C, et al. Total ionizing dose(TID) effects of γ ray radiation on switching behaviors of Ag/AlO_x/Pt RRAM device[J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9(1):1–6.

作者简介:



刘 洋(1992–), 男, 山东省曲阜市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为集成电路可靠性、超大规模集成电路设计. email: qfliuyang@hotmail.com.

辜 科(1985–), 女, 成都市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为半导体存储器设计、辐射效应.

李 平(1957–), 男, 四川省雅安市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为可编程逻辑器件、超大规模集成电路设计与验证等.

李 威(1959–), 男, 沈阳市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超大规模集成电路设计、集成电路工艺、军用及宇航级集成电路设计、制造, 军用及宇航级集成电路产业、标准化等.

Applied Optics and Photonics China, 2017

8-10 May 2017, Beijing, China

<http://www.cnoenet.com/aopc/>

中国光学工程学会(CSOE)联合国际光学工程学会(SPIE)在北京共同举办AOPC 2017。大会开始征文, 通过评审的稿件将推荐到SCI期刊、Ei期刊和Ei文集正式发表。投稿请登录http://www.manuscript-cnoenet.com/index_en.htm。具体可参考《太赫兹科学与电子信息学报》网站(www.iaeej.com)。第一轮截稿时间: 2017年2月28日。欢迎相关人员投稿参与会议交流!

Sponsors: SPIE, Chinese Society for Optical Engineering (CSOE)

General chairs: Guangjun Zhang (Beihang University, China), Byoung-ho Lee (Seoul National University, Korea)

Technical Conferences:

Conf1: Laser Components, Systems, and Applications

Conf2: 3D Measurement Technology for Intelligent Manufacturing

Conf3: Optical Storage and Display Technology

Conf4: Optoelectronics and Micro/nano-optics

Conf5: Optical Spectroscopy and Imaging

Conf6: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications

Conf7: Telescope and Space Optics

Conf8: Optical Information and Optical Network

Contact us: Yan Liu, liuyan@csoe.org.cn; Fangfang Cai, cai_ff@csoe.org.cn; Jin Li, lijin@csoe.org.cn

Tel: 86-22-58168510, 86-22-58168541, 86-22-58168516