第 36 卷 第 3 期
2019 年 9 月

原 子 核 物 理 评 论
Nuclear Physics Review

Vol. 36, No. 3
Sep., 2019

文章编号: 1007-4627(2019) 03-0367-06

电离总剂量对纳米 SRAM 器件单粒子翻转敏感性的影响

姬庆刚[1,2], 刘 杰[1,†], 李东青[1,2], 刘天奇[1], 叶 兵[1], 赵培雄[1,2], 孙友梅[1], 陆 妩[3], 郑齐文[3]

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;
3. 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 电离总剂量 (TID) 与单粒子效应 (SEE) 是纳米 SRAM 器件在航天应用中的主要威胁。随着 CMOS 工艺的进步, 两种辐射效应在纳米 SRAM 器件中的协同效应出现了一些新现象, 有必要进一步开展深入研究。利用 γ 射线以及不同种类重离子对两款纳米 SRAM 器件开展了辐照实验, 研究了不同辐照参数、测试模式以及数据图形条件下, 电离总剂量对单粒子翻转 (SEU) 敏感性的影响。研究结果表明, γ 射线辐照过后, 存储单元中反相器开关阈值减小, 漏电流增大, 导致 SRAM 存储单元抗翻转能力降低, SEU 截面有明显增大; 未观察到"印记效应", 数据图形对测试结果没有明显影响; 多位翻转 (MBU)比例无明显变化。

关键词: 单粒子翻转; 总剂量效应; 协同效应; 静态随机存储器

中图分类号: O571.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.367

http://www.npr.ac.cn

1 引言

静态随机存取存储器 (Static Random Access Memory, SRAM) 具有速度快, 功耗低等诸多优点, 在航天器中广泛应用。电离总剂量 (Total Ionizing Dose, TID) 和单粒子效应 (Single Event Effects, SEE) 是 SRAM 在航天应用中面临的最主要威胁[1]。在微米 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 器件中, 总剂量效应主要影响器件的栅氧层。总剂量辐照使栅氧化物中产生正极性的陷阱电荷, 导致晶体管的阈值电压漂移以及关态漏电流增大[2–3]。而单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU) 的灵敏区是处于闭态的晶体管的漏极区域, 带电粒子入射该区域产生的电流脉冲若足够大, 会导致存储单元的状态发生翻转[4]。晶体管关态漏电流的增大会影响存储节点的电势, 而阈值电压的漂移会导致发生翻转所需的临界电荷的变化, 进而影响存储单元的 SEU 敏感性。此外, 辐照过程中处于开态的晶体管受总剂量效应的影响更为严重[5]。由于总剂量对晶体管性能参数改变的不对称, 在测试中, 器件的单粒子敏感性往往会表现出对存储数据图形的依赖性, 该现象被称为"印记效应"[6–8]。在深亚微米以及纳米器件中, 浅沟槽隔离 (Shallow Trench Isolation, STI) 成为对总剂量效应最敏感的区域[9–11]。目前, 总剂量效应对深亚微米以及纳米器件SEU敏感性的影响规律还不够明确。已有研究表明, 总剂量辐照减弱了 SRAM 器件的抗 SEU 的能力[12]。另一项研究表明, 总剂量辐照导致某些型号 SRAM 器件的 SEU 截面明显增大, 但对另外一些 SRAM 器件的 SEU 截面没有明显的影响[13]。本文利用 γ 射线与不同种类重离子对 90 和 65 nm 工艺的两款 SRAM 器件进行系统性辐照实验, 详细讨论了电离总剂量对基于纳米工艺的 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响。

2 器件信息与测试方法

2.1 器件信息

实验器件为 Cypress 公司生产的两款商用 SRAM 器件, 两款器件分别采用 90 与 65 nm 工艺制程, 存储单元均为 6-T 结构。器件详细信息如表 1 所列。

表 1 器件信息

器件型号	特征尺寸/nm	容量	工作电压/V
CY7C1019D	9	128 k × 8	3.3
CY7C1318KV18	65	1 M × 18	1.8

2.2 测试方法

总剂量实验在中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Coγ 源平台进行, 辐照剂量率设置为 300

收稿日期: 2019-01-29; **修改日期:** 2019-03-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1532261, 11690041, 11675233)
作者简介: 姬庆刚 (1991–), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 从事总剂量与单粒子协同效应研究; E-mail: jiqinggang@impcas.ac.cn
† **通信作者:** 刘杰, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn。

rad(Si)/s。辐照前，对待测器件进行开封，并测试器件功能与电学参数，然后选取功能正常的器件开展实验。90 nm 器件写入 55H 数据图形，65 nm 器件写入 00H 数据图形。而后将器件工作模式设置为静态模式，即保持器件加电，但不对器件进行读写操作。辐照期间，实时监测器件的电流变化。总剂量实验中，所有剂量点均采用未辐照过的全新芯片进行辐照。γ射线辐照结束后，由于中国科学院新疆理化技术研究所到中国科学院近代物理研究所之间运输的需要，芯片在室温下放置约 24 h，而后放置在 −80 ℃ 的低温环境下保存，直至单粒子效应实验开始。

单粒子效应测试在兰州重离子研究装置(Heavy Ions Research Facility in Lanzhou HIRFL) 的单粒子效应实验终端(TR5) 进行。实验采用HIRFL 加速器提供的 ^{28}Si, ^{40}Ar, ^{86}Kr, ^{181}Ta 和 ^{209}Bi 五种离子，实验中选用宽LET值变化范围，即从 1.44 到 99.8 MeV·cm^2/mg。重离子辐照时，采用静态与动态两种测试模式，90 nm 器件写入 55H或 AAH 两种数据图形，65 nm 器件写入 00H 或 FFH 两种数据图形。在动态测试中，单粒子效应测试系统对器件中存储的数据进行循环读出操作，并与初始数据进行比较，计算机实时记录并显示错误地址、错误数据等信息。每次测试，在累积报告超过 100 个错误后停止。在静态测试中，器件被设置为静态模式。累积注量达到 7×10^5 ions/cm^2 后，切断束流，读出器件中的数据，并与初始数据进行比较。重离子辐照实验中，根据离子种类的不同，选用重离子注量率约为 100~500 ions/(cm^2·s)，并实时监测器件工作电流的变化。

3 实验结果

3.1 γ射线辐照

在γ射线辐照过程中，实时监测静态模式下器件的电流变化，90 nm SRAM 器件在辐照过程中电流的变化如图 1 所示。累积剂量达到 100 krad(Si) 后，电流随累积剂量的增加迅速增大。当累积剂量达到 600 krad(Si) 时，静态功耗电流增长到 20.15 mA，约为初始值的 34.5 倍。由于测试系统的原因，未能对 65 nm SRAM 器件的电流变化进行实时监测。辐照前，65 nm 器件的静态电流约为 75.0 mA。辐照结束 11 min 后，对其进行了测试，静态功耗电流为 180.0 mA，约为初始值的 2.4 倍。辐照结束后，立即对器件的功能进行测试，所有器件的读写功能仍保持正常。

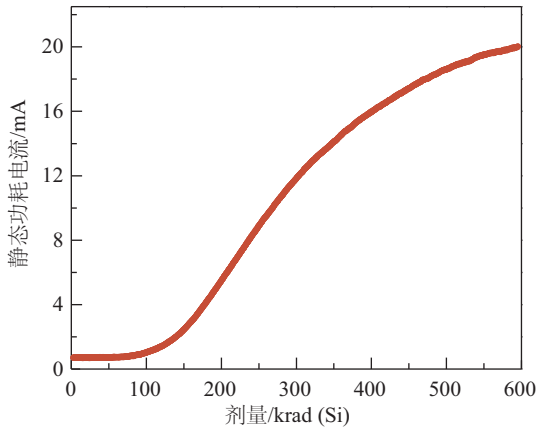

图 1 CY 7C1019D 器件的静态功耗电流随累积剂量的变化

3.2 重离子单粒子效应测试

重离子辐照前，测试所有待测器件的静态电流，测试结果如图 2 所示。待测 90 nm 器件中，未辐照γ射线的器件静态电流约为 0.57 mA。经过约 160 h 的退火后，γ射线累积剂量为 200, 300, 400 krad(Si) 的器件的静态电流已经下降到接近未辐照器件的水平，而预辐照 500 krad(Si) 的器件的静态电流为 1.0 mA，仍明显大于未辐照器件。待测 65 nm 器件中，未辐照γ射线的器件的静态电流约为 75 mA。在经过相同时间的退火后，预辐照 600 krad(Si) 的器件的静态电流为 100 mA。

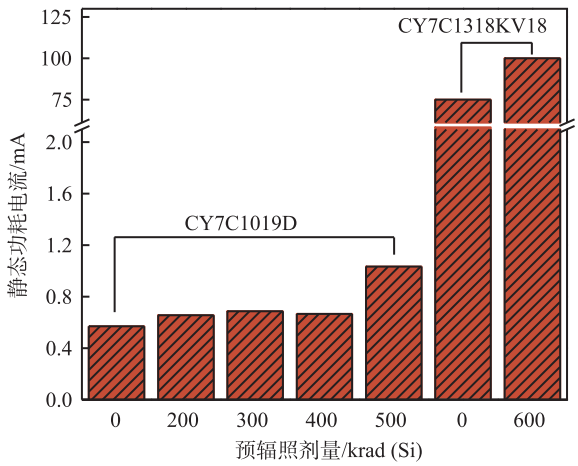

图 2 (在线彩图)重离子单粒子效应测试前，预辐照不同剂量的器件的静态电流

然后，对两款器件进行了不同测试模式、不同LET 值的重离子单粒子辐照实验。在不同参数的重离子辐照下，两款器件均未发生单粒子锁定(Single Event Latchup,SEL)现象。累积剂量对 SEU 截面的影响如图 3 所示。未经γ射线辐照的 90 nm 与 65 nm 两款 SRAM 器件的 SEU 截面分别为 7.8×10^{-8} 和 3.9×10^{-8} cm^2/bit。在经过 500 krad(Si) 辐照后，

http://www.npr.ac.cn

90 nm 器件 SEU 截面为 1.5×10^{-7} cm^2/bit，增长了 923%。在经过 600 krad(Si) 辐照后，65 nm 器件 SEU 截面为 6.3×10^{8} cm^2/bit，增长了 61.5%。并且，无论单粒子测试期间写入与 γ 射线辐照时相同或互补的数据图形，对 SEU 截面的增长趋势都没有明显影响。

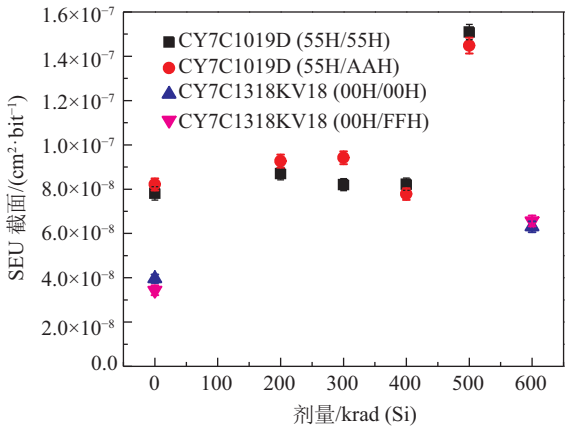

图 3　(在线彩图)同剂量 γ 射线辐照后器件的 SEU 截面，测试采用 LET 值为 99.8 $MeV\cdot cm^2/mg$ 的 ^{209}Bi 离子完成

图 4 展示了 γ 射线辐照前后改变重离子 LET 值对 90 nm 器件 SEU 截面的影响。累积剂量对该款器件的 LET 阈值没有明显影响，LET 阈值约为 0.5 $MeV\cdot cm^2/mg$。γ 射线辐照后，SEU 饱和截面明显增大。累积剂量与 SEU 的协同效应在较大LET值时更为明显。

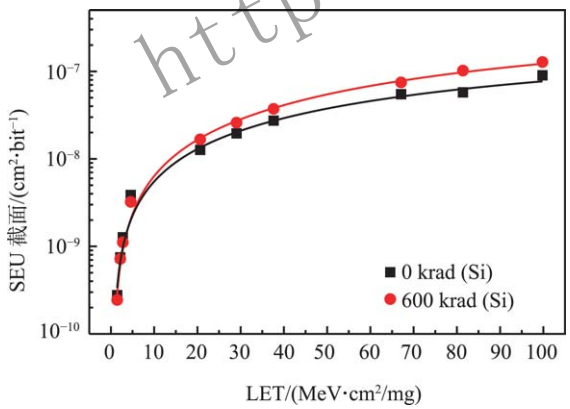

图 4　(在线彩图)γ 射线辐照前后，不同 LET 值下 CY7C1019D 器件的 SEU 截面

最后，对 γ 射线辐照前后 90 nm 器件单位翻转 (Single Bit Upset, SBU) 与多位翻转 (Multiple Bit Upset, MBU) 的比例进行了统计，结果如图 5 所示。无论器件是否经过 γ 射线辐照，随着 LET 值的增大，重离子引起的翻转错误中 MBU 的比例都迅速增大。在 LET 值为 20.65 $MeV\cdot cm^2/mg$ 时，γ 射线辐照后 MBU 的比例增大了 22%。而在其它 LET 值下，辐照后 MBU 所占的比例仅增长了 0.5% 到 8% 不等，γ 射线辐照对 MBU 所占错误比例有一定影响，但并不明显。

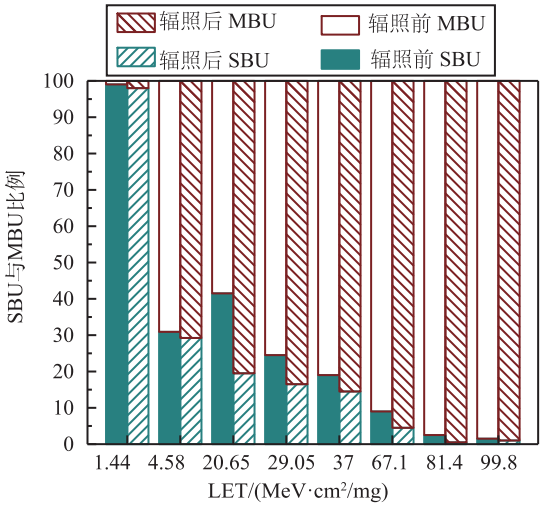

图 5　(在线彩图)γ 射线辐照前后，CY7C1019D 器件中 SBU 与 MBU 所占比例随 LET 值的变化

4　分析讨论

对于基于深亚微米以及纳米工艺的 CMOS 器件，总剂量效应影响的主要是浅沟槽隔离 (STI) 区域。γ 射线辐照在隔离氧化物中产生电子空穴对，部分空穴很快与电子复合，部分空穴通过漂移、扩散，在靠近隔离氧化物与衬底界面处被陷阱所俘获，形成氧化物陷阱正电荷。以 NMOS 管为例，沟道侧面的氧化物中陷阱正电荷的累积，导致源极和漏极之间的寄生通道开启，晶体管的关态漏电流增大。此外，辐射引起的窄沟道效应 (Radiation-Induced Narrow Channel Effect, RINCE) 还会导致 NMOS 管阈值电压减小，PMOS 管阈值电压增大[9]。γ 射线辐照过后，NMOS 管更容易导通，更难关断。而 PMOS 管更难导通，更容易关断。在 SRAM 存储单元中，处于开态的 PMOS 管与处于关态的 NMOS 管组成漏电通道，导致了器件静态功耗电流的增大。

两款器件的存储单元均采用 6-T 结构，如图 6 所示。两个 NMOS(N_1 和 N_2) 与两个 PMOS(P_1 和 P_2)组成两个交叉耦合的反相器。用存储节点 Q 与 Q_N 电势的高低表示存储数据“0”或“1”。若存储数据为“1”，N_2 与 P_1 导通，$Q=1$, $Q_N=0$。反之，若存储数据为“0”，N_1 与 P_2 导通，$Q=0$, $Q_N=1$。N_3 和 N_4 为双向传输管，为读写操作提供权限。在静态单粒子测试中，器件处于静态模式。在动态单粒子测试中，对存储单元中的数据进行循环读取，并与预存在单粒子效应测试系统中的初始数据进行比对。假设在重离子辐照前存储单元写

http://www.npr.ac.cn

入数据“1”，即存储节点Q=1, Q_N=0。在读过程中，首先，位线BL与BLN预充电至高电位。然后，字线WL被选中，N_3与N_4导通。读操作开始，BL保持原本的高电位，BLN通过N_2与N_4放电，把Q和Q_N点的电位传输到位线BL和BLN上。在这个过程中，Q_N节点的电位会有一定程度的升高，导致存储单元抗干扰能力减弱。

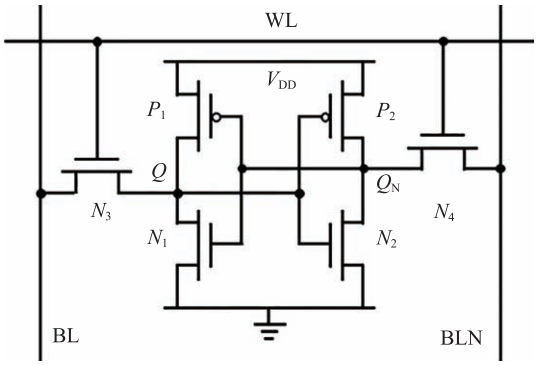

图 6　6-T SRAM单元结构

利用^{181}Ta离子对90 nm器件进行了动态测试与静态测试的对比实验，然而结果显示，测试模式对SEU截面没有明显影响，如图7所示。本实验选用芯片的面积约为1.8×10^{-2} cm^2，实验中重离子注量率约为500 ions/(cm^2·s)，入射到芯片上的重离子只有约9 ions/s。当存储阵列中某个单元处于读操作时，重离子正好入射到该单元灵敏节点的概率非常小。因此，无论测试模式采用静态或动态模式，均可认为待测器件工作在数据保持状态，传输管N_3与N_4对协同效应的影响可以忽略。

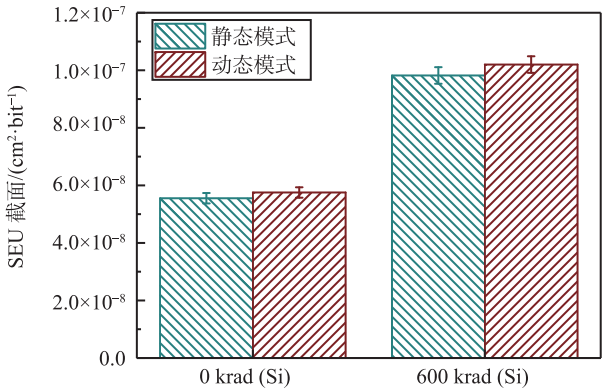

图 7　(在线彩图)CY7C1019D 器件动态与静态模式下SEU截面对比

下面着重讨论辐射效应对数据存储单元的N_1/P_1、N_2/P_2管的影响。一般来说，在特征尺寸较大的微米器件中，相比于PMOS管，NMOS管受偏置电压的影响更明显[14]。NMOS管施加正栅压时，隔离氧化物中由栅极指向衬底的强电场会减弱电子空穴对的复合，使辐射损伤更为严重。随着CMOS工艺到了深亚微米以及纳米尺度，MOS管在辐照期间的最恶劣偏置条件发生了改变。在累积到一定剂量后，零栅压NMOS管中也可能会产生不弱于正栅压NMOS管的阈值电压漂移[15]。存储单元由两个交叉耦合的反相器组成，反相器的开关阈值V_M可以表示为[16]

$$V_M=\frac{\left(V_{Tn}+\frac{V_{DSATn}}{2}\right)+r\left(V_{DD},+V_{Tp}+\frac{V_{DSATp}}{2}\right)}{1+r},$$

$$r=\frac{\upsilon_{satp}W_p}{\upsilon_{satn}W_n}, \tag{1}$$

其中：V_T为晶体管阈值电压；V_{DSAT}为载流子速度饱和时的漏电压；υ_{sat}为载流子的饱和速度；W为晶体管宽度。电子和空穴的饱和速度大致相同。在如图6所示的6-T SRAM单元的设计过程中，通常使N_3/N_4的电阻大于N_1/N_2，而N_1/N_2晶体管的宽度大于P_1/P_2，以保持存储单元工作稳定，并尽可能减小晶体管尺寸。因此，r值小于1。γ射线辐照后，NMOS管的阈值电漂移对反相器开关阈值的影响更大。由于NMOS管阈值电压的减小，存储单元中的两个反相器在辐照后开关阈值均降低。

此外，还要考虑NMOS管关态漏电流的影响。本实验中，γ射线辐照期间，两个反相器处于相反的偏置状态。然而在辐照结束后，无论在器件中写入与辐照期间相同或互补数据，静态功耗电流都呈现出相同程度的增长，没有观察到“印记效应”。据此，我们认为N_1与N_2产生了相同程度的漏电流的增长。假设γ射线辐照期间存储数据为“1”，即存储节点Q=“1”，Q_N=“0”。辐照过后，存储单元中，N_1与N_2的关态漏电流增大，左右两个反相器开关阈值减小。若重离子测试期间，写入互补数据“0”，即Q=“0”，Q_N=“1”。由于N_2的漏电流与寄生电阻的存在，导致节点Q_N的电势小于“1”，存储单元的噪声容限减小。此时若有重离子入射到N_2的漏极，重离子入射引起的负的电流脉冲更容易使节点Q_N的电势降低到N_1的阈值电压之下。若有重离子入射到P_1的漏极，重离子入射引起的正的电流脉冲也更容易使节点Q的电势上升到N_2的导通电压之上，导致存储单元状态发生翻转。反之，若重离子测试期间仍写入数据“1”，也是同理。因此，在重离子测试期间，无论写入与γ射线辐照时相同或互补的数据，SEU截面都是增大的。

在90 nm器件中，辐照剂量为200, 300, 400 krad(Si)的器件，在单粒子效应测试前，静态电流回

http://www.npr.ac.cn

落到接近未辐照时的值。这说明总剂量效应导致的存储单元内晶体管电学性能的退化已经近乎完全退火。因此，器件的 SEU 敏感性并未表现出与未辐照器件的不同。随着入射离子 LET 值的增大，不仅 MBU 的比例有一定增大，每个 MBU 包含的翻转位数也呈上升趋势。这是由于 γ 射线辐照过后，存储单元噪声容限减小，发生数据翻转所需的临界电荷减小，器件更容易发生多位翻转。

5　结论

利用 γ 射线与不同种类重离子辐照，研究了纳米 SRAM 器件中总剂量与单粒子的协同效应，并分析了数据图形、测试模式与辐照参数对翻转截面的影响。结果表明，γ 射线累积剂量越高，对 SEU 敏感性的影响越大。辐照过后，SEU 饱和截面明显增大。MBU 所占的比例有一定增大，但并不明显。单粒子效应测试模式与数据图形对协同效应没有明显影响，未发现“印记效应”。

参考文献：

[1] ECOFFET R. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, **60**(3): 1791.

[2] OLDHAM T R LELIS A J, BOESCH H E, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 1987, **34**(6): 1184.

[3] ZEBREV G I, GORBUNOV M S. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, **56**(4): 2230.

[4] DODD P E, MASSENGILL L W. Nuclear Science, IEEE Transactions on, 2003, **50**(3): 583.

[5] MENG Zhiqin, HAO Yue, TANG Yu, *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2007, **28**(2): 241. (in Chinese).
(孟志琴, 郝跃, 唐瑜, 等. 半导体学报, 2007, **28**(2): 241.)

[6] NAIR D, GALE R. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, **60**(4): 2611.

[7] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FELIX J A, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(4): 1772.

[8] KOGA R, YU P, CRAWFORD K, *et al.* Synergistic Effects of Total Ionizing Dose on SEU Sensitive SRAMs[C]// 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop IEEE, 2009: 127.

[9] FACCIO F, CERVELLI G. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, **52**(6): 2413.

[10] GUO Hongxia, DING Lili, XIAO Yao, *et al.* Chinese Physics B, 2016, **25**(9): 096109.

[11] ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, ZHOU Hang, *et al.* Chinese Physics B, 2015, **24**(10): 106106.

[12] ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, LU Wu, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018 **65**(8): 1920.

[13] SCHWANK J R, DODD P E, SHANEYFELT M R, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, **51**(6): 3592.

[14] DRESSENDORFER P V, VSODEN J M, HARRINGTON J J, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 1981, **28**(6): 4281.

[15] ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, LU Wu, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(2): 691.

[16] RABAEY J M, CHANDRAKASAN A, NIKOLIC B. Digital Integrated Circuits: A Design Perspective[M]. 2ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017. (in Chinese)
(RABAEY J M, CHANDRAKASAN A, NIKOLIC B. 数字集成电路：电路、系统与设计[M]. 第 2 版. 北京：电子工业出版社，2017.)

http://www.npr.ac.cn

Impact of Total Ionizing Dose on Single Event Upset Sensitivity of Nano-SRAMs Devices

JI Qinggang[1,2], LIU Jie[1,†], LI Dongqing[1,2], LIU Tianqi[1], YE Bing[1], ZHAO Peixiong[1,2], SUN Youmei[1], LU Wu[3], ZHENG Qiwen[3]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China;*
2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

Abstract: Total ionizing dose (TID) and single event effect (SEE) are both the main threats to nano-SRAMs devices in space application. With the development of CMOS technology, some new phenomena were observed during studying the synergistic effect between TID and SEE on nano-SRAMs. γ ray and heavy ion irradiations were performed to investigate the impact of total ionizing dose on single event upset (SEU) sensitivity of SRAMs. The influence of irradiation parameters, test modes and data patterns on synergistic effect were studied. The results showed that γ ray irradiation led to the decrease of threshold voltage and the increase of leakage current of inverters, which reduced the SEU hardness of SRAMs. Meanwhile, the SEU cross section increased compared with that of non-TID irradiated devices. There was no significant change in the percentage of multiple-bit upset (MBU). No "imprint effect" was observed. Data pattern applied in TID and SEE tests had no influence on the test results of SEU cross section.

Key words: single event upset; total ionizing dose; synergistic effect; static random access memory

http://www.npr.ac.cn

Received date: 29 Jan. 2019; **Revised date:** 3 Mar. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1532261, 11690041, 11675233)

† **Corresponding author:** LIU Jie, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn.