

文章编号: 2095-4980(2022)09-0877-08

浮栅器件的单粒子翻转效应

琚安安^{1,2}, 郭红霞^{*3}, 丁李利³, 刘建成⁴, 张凤祁³, 张 鸿¹, 柳奕天¹,
顾朝桥¹, 刘 晔¹, 冯亚辉¹

(1.湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2.上海精密计量测试研究所, 上海 201109;
3.西北核技术研究院, 陕西 西安 710024; 4.中国原子能科学研究院, 北京 102488)

摘 要: 基于中国原子能科学研究院的 HI-13 加速器, 利用不同线性能量传输(LET)值的重离子束流对 4 款来自不同厂家的 90 nm 特征尺寸 NOR 型 Flash 存储器进行了重离子单粒子效应试验研究, 对这些器件的单粒子翻转(SEU)效应进行了评估。试验中分别对这些器件进行了静态和动态测试, 得到了它们在不同 LET 值下的 SEU 截面。结果表明大容量器件的 SEU 截面略大于低容量的器件; 是否加偏置对器件的翻转截面几乎无影响; 两款国产替代器件的 SEU 截面比国外商用器件高。国产替代器件 SEU 效应的 LET 阈值在 12.9 MeV·cm²/mg 附近, 而国外商用器件 SEU 效应的 LET 阈值处于 12.9~32.5 MeV·cm²/mg 之间。此外, 针对单粒子和总剂量效应对试验器件的协同作用也开展了试验研究, 试验结果表明总剂量累积会增加 Flash 存储器的 SEU 效应敏感性, 分析认为总剂量效应产生的电离作用导致了浮栅上结构中的电子丢失和晶体管阈值电压的漂移, 在总剂量效应作用的基础上 SEU 更容易发生。

关键词: NOR 型 Flash 存储器; 重离子; 单粒子效应; 总剂量效应; 协同效应

中图分类号: TN60

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021440

Study on Single Event Upset of floating gate device

JU Anan^{1,2}, GUO Hongxia^{*3}, DING Lili³, LIU Jiancheng⁴, ZHANG Fengqi³, ZHANG Hong¹, LIU Yitian¹,
GU Chaoqiao¹, LIU Ye¹, FENG Yahui¹

(1.School of Materials and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China; 2.Shanghai Institute of Precision Measurement and Test, Shanghai 201109, China; 3.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China; 4.China Institute of Atomic Energy, Beijing 102488, China)

Abstract: Four types of NOR Flash memories from different manufacturers with 90 nm feature sizes are studied, based on the HI-13 accelerator of the China Academy of Atomic Energy. Aiming to evaluate the Single Event Upset(SEU) effect for those memories, heavy-ion with different Linear Energy Transfer (LET) values is utilized to irradiate the devices. Both static and dynamic tests are performed to obtain the SEU cross-section of the device. Test results show that the memory with large capacities has a slightly bigger SEU cross-section than the devices with small capacities. There is almost no impact on the SEU cross-section of the device with or without bias. The SEU cross-section of the domestic alternative devices is bigger than that of two foreign commercial devices. The LET threshold of the domestic alternative devices is nearly at 12.9 MeV·cm²/mg, while that value of foreign commercial devices between 12.9~32.5 MeV·cm²/mg. The SEU cross-section results from static and dynamic tests have good consistency, which indicates test mode has no obvious influence on SEU effect. In addition, the synergistic effects of Single Event Effect(SEE) and Total Ionizing Dose(TID) effect for Flash memory are also studied, the results show that TID dose will increase the sensitivity of the device to SEE. The analysis shows that the ionization caused by the TID effect leads to the electron leakage from the floating

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11875229; 51872251)

*通信作者: 郭红霞 email:guohxnint@126.com

gate and the drift of transistor threshold voltage, therefore SEU is more likely to occur on the basis of TID effect.

Keywords: NOR Flash memory; heavy ions; Single Event Effect(SEE); Total Ionizing Dose(TID) effect; synergistic effects

Flash 存储器是一种利用浮栅上的电子来存储数据的非挥发性存储器, 由于价格较低, 存储容量大, 在目前的存储器市场占主导地位。Flash 存储器具有 NAND 型和 NOR 型两种架构, NAND 型 Flash 器件的存储密度大, 通常用来保存数据; NOR 型 Flash 器件的存储密度小^[1], 通常用来存储程序代码。随着科技的发展, Flash 存储器逐渐被应用到航空航天领域, 但空间环境中存在大量高能粒子及射线, 它们会对电子元器件产生各种辐射效应(如单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应等), 在这些效应中, 单粒子效应(SEE)出现的频率最多并且随着摩尔定律的发展对器件产生的影响会越来越严重, 因此 Flash 存储器的 SEE 研究^[2-6]备受关注。Flash 器件的 SEE 分为存储单元中的 SEE 和外围电路中的 SEE, 存储阵列中的 SEE 会导致存储单元浮栅结构中的电子发生瞬间泄漏, 数据出现翻转, 该现象被称为单粒子翻转(SEU)效应。尽管 Flash 存储器的 SEU 效应时有发生, 但目前对其产生的物理机理仍然在讨论中。1989 年 Snyder^[7]提出了电子发射模型, 认为浮栅上的电子会从电离辐射中得到能量, 跃过氧化物势垒向外界发射, 跃迁到控制栅上或者衬底上。2004 年, G Cellere^[8-9]等提出了瞬态导电路径模型, 该模型认为粒子入射浮栅晶体管后产生的高浓度电子-空穴对会导致氧化物势垒能带结构发生崩塌, 在隧道氧化物中产生一个非常薄的瞬态导电路径。2008 年, N Z Butt 和 M Alam^[10]提出了瞬态载流子通量模型, 该模型主要考虑了高能载流子的产生和载流子进入和流出浮栅的通量, 以及其产生电流的大小, 认为浮栅上的电荷泄漏是由于进出浮栅载流子通量不平衡导致的。2018 年, 毕津顺^[11]等对同款国产替代 NOR 型 Flash 开展了重离子 SEE 试验, 并提出在重离子辐照过程中有两种物理机制共同存在, 瞬态导向路径机制或者是瞬态载流子通量机制会导致浮栅电子的瞬间泄漏, 而辐照结束后的电子泄漏过程则是由材料中的电活性缺陷导致。

本文基于中国原子能科学研究所的 HI-13 加速器对 4 款 NOR 型 Flash 开展了单粒子效应试验, 研究了 Flash 存储器的 SEU 效应, 为其效应机理分析提供试验依据。此外, 考虑到 Flash 存储器在实际的空间应用中会同时受到多种辐射粒子产生的辐射效应影响, 为了模拟 Flash 存储器在实际应用中受单粒子和总剂量效应的共同影响, 对试验样品的单粒子和总剂量效应的协同作用开展了试验研究。

1 试验样品的选择及预处理

本文研究的 4 款 NOR 型 Flash 器件特征尺寸均为 90 nm, 它们具有相同的 SPI 接口和管脚定义。根据器件集成度的不同, 存储容量有 4 M 和 64 M 两种, 详细信息如表 1 所示。试验之前准备表 1 中的 4 种 Flash 若干只, 去除器件表面的塑料封装以便重离子径迹可以穿透芯片衬底, 达到芯片有源区。为了避免去封装过程对试验样品造成损坏从而影响测试结果, 所有去封装后的器件需要进行加电测试检查其功能是否正常, 去除损坏的器件。

表 1 试验样品的器件信息

Table 1 Details of the device under test

device ID	capacity	feature size/nm	manufacture
KW25Q04M	4 Mbit(4 k × 128 sector)	90	IMECAS (Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Science)
KW25Q64M	64 Mbit(4 k × 2 048 sector)		
S25FL164K	64 Mbit(4 k × 2 048 sector)		Cypress
MX254006E	4 Mbit(4 k × 128 sector)		Macronix

为了研究不同累积总剂量对存储器 SEU 效应的影响, 针对表 1 中的两款国外商用器件开展了总剂量预辐照试验, 即在进行重离子单粒子效应试验之前对试验器件进行了特定剂量的 γ 射线预辐照处理, 该预处理操作是在西北核技术研究院的 ^{60}Co 辐照源试验平台进行的。首先向试验样品中写入棋盘式数据“55H”, 并将它们分为预处理组和未处理组, 预处理组的器件在进行单粒子效应试验前接受 γ 射线辐照, 而未处理组的器件直接开展重离子单粒子试验。预处理组的器件在未加电、所有管脚接地的状态下接受 γ 射线辐照至预设定的剂量。这些器件被进一步分成两组, 一组辐照至 20 krad(Si), 另外一组辐照至 40 krad(Si) 的剂量。经过总剂量预辐照后检查每只存储器内的数据, 发现并没有错误产生, 因此存储器在后续单粒子效应试验中出现的错误均由 SEE 导致。为了最大程度抑制存储器中的退火现象, 在总剂量辐照结束后将预辐照组器件置于干冰桶(低温 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$)中保存, 直到进行重离子辐照前取出。

2 试验过程及方法

本文中的重离子 SEE 试验基于中国原子能科学研究所的 HI-13 串列加速器进行，试验中分别选用了 3 种不同 LET 值的重离子束流对 NOR 型 Flash 存储器的 SEE 进行了研究，表 2 中列出了本文使用的重离子种类。图 1 所示为型号 MX254006E 的 NOR 型 Flash 器件的纵切结构(其他 3 款器件具有相近的尺寸)，器件衬底位于图 1 中的上方，可以看出器件内的金属布线层至衬底仅 2~3 μm，重离子的穿透深度足以穿过器件。辐照过程中，试验样品放置在真空舱内，分别使用 3 种不同种类的重离子束流辐照样品，试验中相同辐照状态下至少测试 3 只器件以确认数据一致性，由于这 4 款 Flash 器件均采用 SPI 接口封装，几何尺寸较小。为了提高束流利用率，在静态测试中使用束斑面积为 5 cm² 的正方形重离子束流对多只器件同时进行辐照。

表 2 试验中使用的重离子种类信息
Table2 Details of the ions used in the test

ion	energy/(MeV/nucleus)	penetration depth in Si/μm	LET value/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)
Cl ⁻	164	47.4	12.9
Cu ⁻	200	31.5	32.5
I ⁻	283	30.0	65.6

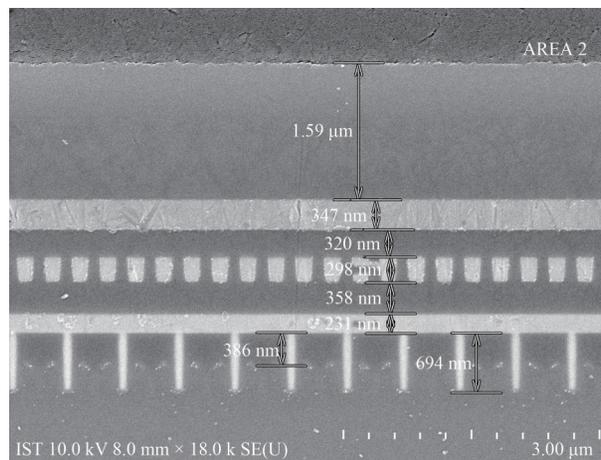


Fig.1 Slitting structure of MX254006E NOR Flash(the substrate at the top of the figure)
图 1 MX254006E NOR 型 Flash 器件的纵切结构(衬底在图中上方)

本试验分别对试验样品进行了动态和静态测试，在辐照试验之前首先向所有的存储器中写入棋盘式数据“55H”。静态测试中的器件未加电，所有芯片管脚浮空。利用注量率为 2×10⁴ ions·cm⁻²·s⁻¹ 的重离子束流辐照器件至 1×10⁷ ions/cm² 的注量后，通过 Flash 测试系统读出器件内的数据，并将其与原始数据“55H”比较，把其中发生变化的数据定义为错误数据，统计并记录这些错误数据的数量。动态测试中的器件处于正常工作条件下，存储器测试系统在器件接受重离子辐照的同时对其执行连续数据读出指令。动态测试中的重离子注量率同样为 2×10⁴ ions·cm⁻²·s⁻¹，每只器件中累积的重离子注量从 2×10⁶ ions/cm² 到 5×10⁶ ions/cm² 不等。在动态测试中，测试系统可以实时监测器件中产生的错误数量。

无论是静态测试还是动态测试，通过测试系统测量到存储器中发生的错误数量后，根据式(1)可以得到存储器的 SEU 截面：

$$\sigma = \frac{N}{\Phi \times M} \quad (1)$$

式中： σ 为 SEU 截面，单位为 cm²/bit； N 为存储器中累积的错误数量； Φ 为器件在辐照过程中累积的离子注量，单位为 ions/cm²； M 为存储器的总容量，单位为 bit。

3 试验结果及分析

3.1 静态测试

3.1.1 NOR 型 Flash 单粒子翻转截面

在静态测试中顺利得到了表 1 中 4 款 NOR 型 Flash 存储器在未加电状态下的静态翻转截面，如图 2 所示。可

[14]中的试验数据可以对该款 Flash 存储器的 SEU 截面进行 Weibull 拟合。拟合结果如图 5 所示，其中红色点为文献[14]中的翻转截面，黑色点为本文试验研究中的翻转截面。从图中看出，除了 LET 为 50 MeV·cm²/mg 的翻转截面偏离曲线外，其余数据与 Weibull 拟合曲线的分布规律吻合度较高，该组数据与其他数据仍在同一个数量级内，因此认为该拟合曲线可信度较好。另外需要指出的是：文献中使用的离子注量为 1×10⁷ ions/cm²，本工作中使用的离子注量为 2×10⁶ ions/cm²。经过拟合后得到该款 NOR 型 Flash 存储器的 SEU 饱和截面约为 2.4×10⁻¹⁰ cm²/bit，单粒子翻转效应的 LET 阈值约为 15 MeV·cm²/mg。

3.1.2 总剂量效应累积对 Flash 存储器 SEU 截面的影响

为了探讨总剂量累积对 NOR 型 Flash 单粒子翻转截面的影响，本文对表 1 中的两款国外商用 Flash 存储器进行了总剂量预辐照处理。辐照结束后对器件进行加电测试，发现 Flash 存储器中保存的数据并未发生改变，表明预处理并未导致器件存储单元发生数据翻转。为了缓解总剂量辐照后器件中发生的退火过程，在预处理之后将试验样品置于干冰中保存，直到开展重离子辐照试验前取出(由于单粒子效应试验平台加速器束流调试的安排，器件在总剂量辐照后距离开展单粒子效应试验的时间间隔约为 4~5 天)。最后对预处理组的实验样品开展了静态不加电状态下的重离子辐照试验，得到了它们在不同 LET 值下的 SEU 截面，如图 6 和图 7 所示，分别展示了 MX254006E 和 S25FL164K 型 NOR 型 Flash 存储器的测试结果。

两款器件在 LET 为 12.9 MeV·cm²/mg 的氯离子辐照下均未发生 SEU 效应，因此并未表现在图 6 和图 7 中。对于图 6 中的 MX254006E Flash 存储器而言，在 LET 值为 32.5 MeV·cm²/mg 的铜离子累积辐照 5×10⁶ ions/cm² 注量后，经过总剂量预处理和未经过总剂量预处理的器件中都产生了个位数错误。表明在该 LET 值的重离子辐照下，是否累积总剂量对器件的 SEE 敏感性影响并不大，该结果与 LET 值为 12.9 MeV·cm²/mg 的氯离子辐照结果类似，因此认为该器件的单粒子翻转 LET 阈值要大于 32.5 MeV·cm²/mg。在 LET 值为 65.8 MeV·cm²/mg 的碘离子辐照结果中，预累积总剂量对 Flash 存储器的 SEE 敏感性有了较明显的影响。在碘离子累积辐照 2×10⁶ ions/cm² 注量后，经过 20、40 krad(Si)总剂量辐照的 Flash 器件翻转截面比未经过总剂量处理(即累积 0 krad(Si)的一组)的器件截面分别增加了 0.5 倍和 1 倍。

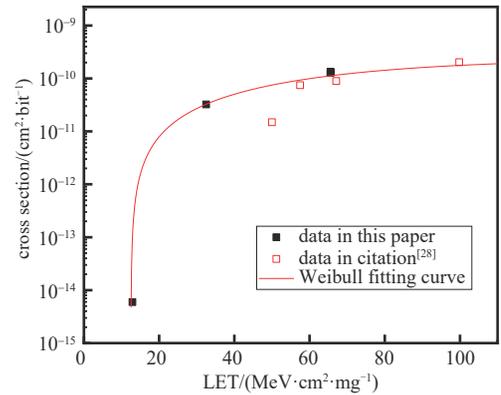


Fig.5 SEU cross section vs. LET value in KW25Q64M Flash after Weibull fitting
图 5 KW25Q64M Flash 的翻转截面在不同 LET 值下的 Weibull 拟合曲线

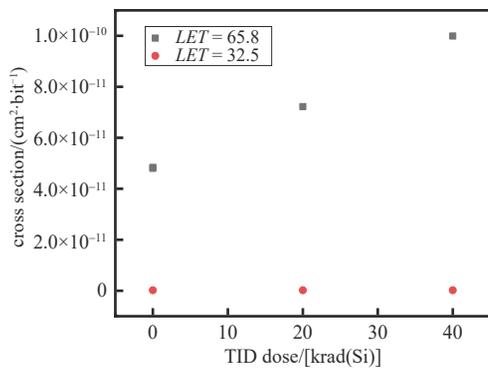


Fig.6 The SEU cross section of S25FL164K Flash vs. different γ -ray pre-irradiation doses
图 6 总剂量预辐照后的 MX254006E Flash 器件在不同 LET 值重离子辐照下的单粒子翻转截面

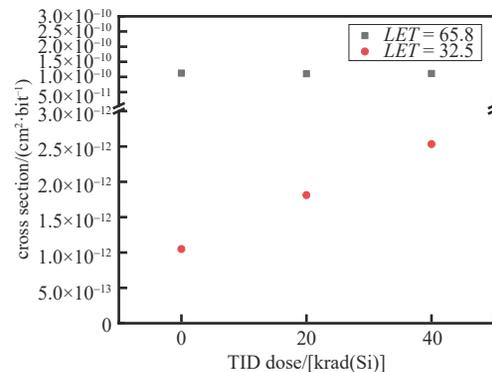


Fig.7 The SEU cross section of S25FL164K Flash vs. different γ -ray pre-irradiation doses
图 7 总剂量预辐照后的 S25FL164K Flash 器件在不同 LET 值重离子辐照下的单粒子翻转截面

而对于图 7 中的 S25FL164K Flash 存储器，总剂量预辐照对器件 SEE 的影响在 LET 值为 32.5 MeV·cm²/mg 的铜离子辐照结果中就开始出现明显差异。铜离子累积辐照 5×10⁶ ions/cm² 注量后，经过 20、40 krad(Si)总剂量辐照的器件 SEU 截面分别比未处理(0 krad(Si))的器件增长了 0.7 倍和 1.4 倍。然而，在 LET 值为 65.8 MeV·cm²/mg 的碘离子试验结果中，该器件的 SEU 截面并未继续表现出上述规律。在碘离子辐照下，预累积总剂量似乎并不会对 SEU 截面产生影响。分析认为当 LET 值为 65.5 MeV·cm²/mg 时，该款器件的 SEU 截面已经趋于饱和。在达到器件 SEU 饱和截面之前，预累积总剂量效应会使 Flash 存储器的 SEU 截面增加，这在 LET 值高于器件单粒子翻转 LET

阈值的重离子辐照下表现明显。该结果意味着在一定程度内,随着Flash存储器在空间辐射环境中工作时间的延长,其存储单元发生SEU效应的概率会逐渐增加。

重离子导致的SEE可以导致存储单元浮栅结构上的电子发生泄漏,晶体管的阈值电压在瞬间降低,如图8的A过程所示。 γ 射线入射浮栅晶体管后会在浮栅结构的氧化层中电离产生电子-空穴对,一部分电子-空穴对发生复合,存活的载流子中电子具有较高的迁移率,迅速从氧化层中逃离,而空穴的迁移率低,向浮栅迁移,中和了一部分浮栅上的电子。空穴在氧化物中的迁移过程也会产生缺陷,这些缺陷同样会俘获一部分浮栅上的电子。此外, γ 射线还会和浮栅上的电子相互作用,使电子能量增加,跃过氧化物的势垒向外界发射。这些过程都会导致浮栅上的电子丢失、存储单元阈值电压漂移,如果累积剂量比较高,浮栅电子丢失数量比较多,数据同样会发生翻转,如图8的B过程所示。在本试验中,Flash存储器在经过 ^{60}Co - γ 射线辐照后并未发现有数据翻转,因此总剂量对存储单元造成的阈值电压偏移 $\Delta U_{th}(TID)$ 有限,并未使浮栅晶体管的阈值电压降低至读电压以下。总剂量和SEE的协同作用使得存储单元发生SEU更加容易。单粒子效应对存储单元阈值电压的改变 $\Delta U_{th}(SEE)$ 与入射重离子的LET值有关,由于两款实验样品在氯离子辐照下并未发生SEU效应,认为LET为 $12.9\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的氯离子不会改变存储单元阈值电压,或者对阈值电压的改变 $\Delta U_{th}(SEE)$ 较小,不足以导致数据发生翻转。LET值高于 $32.5\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的重离子能够对存储单元产生影响,改变晶体管阈值电压。在总剂量效应已经使存储单元阈值电压发生漂移 $\Delta U_{th}(SEE)$ 的情况下,SEE可以使存储单元阈值电压的改变更加容易,如图8的C过程所示,会有更多的存储单元在高于LET阈值的重离子辐照下发生翻转。

在未达到器件SEU饱和截面之前,随着 γ 射线剂量的累积,发生SEU效应的存储单元数量会逐渐增加,SEU截面也会随之增加。 $20\text{ krad}(\text{Si})$ 的剂量累积产生的阈值电压漂移 $\Delta U_{th}(SEE)$ 程度要低于 $40\text{ krad}(\text{Si})$ 累积剂量导致的漂移,因此在图7中累积 $20\text{ krad}(\text{Si})$ 的器件SEU截面增加要小于累积 $40\text{ krad}(\text{Si})$ 的器件。

3.2 动态测试

除了上述的静态测试外,在NOR型Flash存储器的动态测试过程中也发生了单粒子翻转。以KW25Q64M器件为例,图9为在碘离子辐照下该器件内的错误数量随辐照时间的变化过程。错误数量随着离子注量的增加几乎呈线性增长,在一些读出操作中器件会出现单粒子功能中断(Single Event Functional Interrupt, SEFI)效应和单粒子闩锁效应(Single Event Latch-up, SEL)^[15]。在不考虑SEFI和SEL效应的前提下,器件在每次读出过程中平均增长14位翻转数据,即器件在 3×10^4 个碘离子辐照下发生了14个SEU效应,则该器件翻转截面为 $1.11\times 10^{-10}\text{ cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$ 。对比图5中器件在静态测试下的单粒子翻转截面,当LET为 $65.8\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时,器件的静态翻转截面为 $1.29\times 10^{-10}\text{ cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$ 。静态测试和动态测试中得到的SEU截面数据一致性较好,因此认为测试模式对存储单元SEU效应的影响并不大。

对于这4款器件的SEFI和SEL效应,它们的LET阈值均低于 $12.9\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。当SEFI效应出现时,存储器中出现大量错误,这些错误数据是由于器件的读电路受到瞬态电流的扰动导致,而并非是存储单元发生了数据翻转,它们会随着电流扰动的消失而恢复;当SEL效应出现时,存储器进入高电流闩锁状态,测试系统无法从器件中读出正确的数据。在Flash存储器中,SEFI效应来自器件的外围电路,SEU效应产生于器件的存储阵列,图2中两款国外商用器件SEU效应的LET阈值大于 $12.9\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$,而SEFI效应的LET阈值均低于 $12.9\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。因此认为在90 nm工艺节点下,Flash器件的外围电路比存储单元对单粒子效应更加敏感。鉴于外围电路的结构极其复杂且

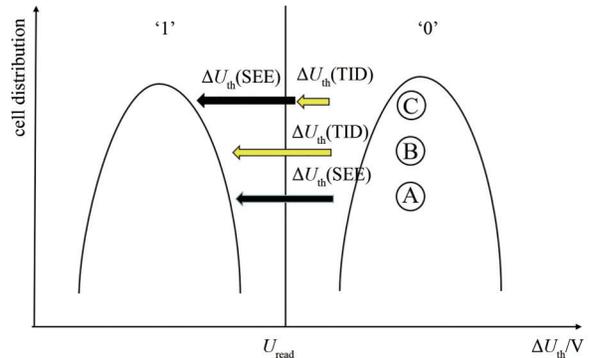


Fig.8 The synthetic effect of TID and SEE to the threshold voltage of Flash cells

图8 总剂量和单粒子效应的协同作用对Flash存储单元阈值电压的影响

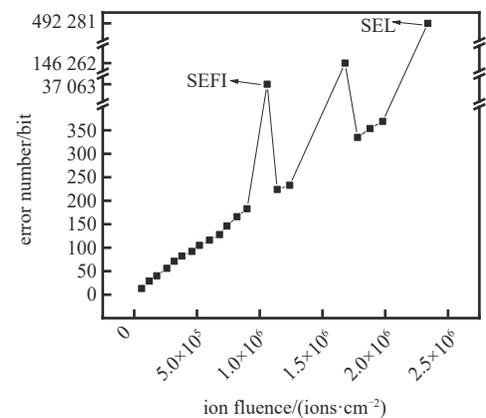


Fig.9 Buildup of errors in KW25Q64M under read-only dynamic test mode

图9 动态只读测试下KW25Q64M的错误数据随离子注量积累的变化

电路板图很难获取，本文未对Flash器件中SEFI和SEL的效应机理做进一步分析。

4 结论

本文针对不同厂家生产的90 nm浮栅器件进行了重离子SEE试验研究，旨在研究对这些器件的SEU效应，为空间电子元器件的选用和器件的在轨运行可靠性评估提供参考。试验结果发现两款国产替代器件比国外商用器件的SEU截面稍低，差别在一个数量级内。文中通过对试验数据进行Weibull拟合，得到国产替代器件的SEU效应饱和截面约为 $2.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$ ，SEU效应的LET阈值约为 $15 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 。试验中通过静态和动态测试模式的对比，发现Flash存储器的SEU效应截面一致性较好，测试模式对Flash器件的SEU效应截面的影响不大。分析结果认为Flash存储器中的SEU效应来自器件的存储阵列中，仅与浮栅结构中的电荷数量及浮栅晶体管的特征尺寸有关，与Flash存储器外围电路是否处于工作状态无关。此外，本文对总剂量效应与SEE的协同作用对NOR型Flash器件的影响进行了研究，发现器件的SEU效应截面在达到饱和截面之前随着总剂量效应的累积而增加。这意味着Flash存储器在轨运行过程中，随着 γ 射线剂量的累积，它对SEE的敏感性增加，对于评估电子元器件在轨运行的寿命具有重要参考价值。

参考文献：

- [1] 曾庆锴,李彩,卢健,等. 平面型浮栅Flash单粒子效应研究进展[J]. 环境技术, 2019,37(6):56–60. (ZENG Qingkai,LI Cai,LU Jian,et al. Process of floating gate Flash memory single event effects study[J]. Environmental Adaptability & Reliability, 2019, 37(6):56–60.)
- [2] GERADINE S,BAGATIN M,PACCAGNELLA A,et al. Radiation effects in Flash memories[J] IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,60(3):1953–1969.
- [3] NGUYEN D N,SCHEICK L Z. TID,SEE and radiation induced failures in advanced Flash memories[C]// 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Monterey,CA,USA:IEEE, 2003:18–23.
- [4] BELLOTTI G,LIBERALI V,STABILE A,et al. A radiation hardened by design charge pump for Flash memories[C]// 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems(RADECS). Oxford,UK:[s.n.], 2013:1–4.
- [5] IROM F,NGUYEN D N,ALLEN G R. Single event effect and total ionizing dose results of highly scaled Flash memories[C]// 2013 IEEE Radiation Effects Data Workshop(REDW). San Francisco,CA:IEEE, 2013:1–4.
- [6] SCHWARTZ H R,NICHOLS D K,JOHNSTON A H. Single-event upset in Flash memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997,44(6):2315–2324.
- [7] SNYDER E S,MCWHORTER P J,DELLIN T A,et al. Radiation response of floating gate EEPROM memory cells[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(6):2131–2139.
- [8] CELLERE G,PACCAGNELLA A,VISCONTI A,et al. Transient conductive path induced by a single ion in 10 nm SiO₂ layers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3304–3311.
- [9] CELLERE G,PACCAGNELLA A,VISCONTI A,et al. Subpicosecond conduction through thin SiO₂ layers triggered by heavy ions[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(7):074101-1–7.
- [10] BUTT N ZALAM M. Modeling single event upsets in floating gate memory cells[C]// 2008 IEEE International Reliability Physics Symposium. Phoenix,AZ,USA:IEEE, 2008:547–555.
- [11] BI J S,XI K,LI B,et al. Heavy ion induced upset errors in 90 nm 64 Mb NOR-type floating-gate flash memory[J]. Chinese Physics B, 2018,27(9):619–623.
- [12] GRURMANN K, WALTER D, HERRMANN M, et al. MBU characterization of NAND-Flash memories under heavy-ion irradiation[C]// 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. Seville,Spain:[s.n.], 2011: 207–212.
- [13] MCNULTY P J,YOW S,SCHEICK L Z,et al. Charge removal from FG MOS floating gates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002,49(6):3016–3021.
- [14] BI J S. Radiation effects of Floating-Gate(FG) and Charge-Trapping(CT) Flash memory technologies[C]// 2019 International Conference on IC Design and Technology(ICICDT). Suzhou,China:[s.n.], 2019:1–3.
- [15] JU Anan,GUO Hongxia,DING Lili,et al. Analysis of ion-induced SEFI and SEL phenomena in 90 nm NOR flash memory[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021,68(10):2508–2515.