

Flash 存储器单粒子效应测试研究综述*

黄姣英, 王乐群, 高成
(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 随着 Flash 存储器在航天系统中的大量应用, 其单粒子效应评价至关重要。首先综述了 Flash 存储器单粒子效应研究进展, 总结出在重离子辐照实验中常见单粒子效应及其故障原因, 包括由存储单元故障和外围电路故障造成的单粒子翻转、单粒子功能中断和单粒子闭锁。随后, 归纳出常见单粒子效应的测试区分方法、测试算法和测试流程, 为相关测试实验研究提供参考。

关键词: Flash 存储器; 单粒子效应; 测试方法; 辐照实验

中图分类号: TN307

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200210

中文引用格式: 黄姣英, 王乐群, 高成. Flash 存储器单粒子效应测试研究综述[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 44-48, 52.

英文引用格式: Huang Jiaoying, Wang Lequn, Gao Cheng. Review of single event effects testing research for flash memories[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 44-48, 52.

Review of single event effects testing research for flash memories

Huang Jiaoying, Wang Lequn, Gao Cheng
(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: There has been increased importance for single event effects characterization of flash memories because of their wide application in space systems. This paper firstly summarizes the single event effects research progress as well as common single event effects during ion beams irradiation experiments of flash memories. These effects caused by both floating gate array and peripheral circuitry include single event upsets, single event functional interrupt and single event latch-up. Then we sum up the identification approaches, testing algorithms and testing procedures of common single event effects. This paper offers a reference for single event effects testing experiments of flash memories.

Key words: flash memories; single event effects; testing approach; irradiation experiment

0 引言

空间环境中存在的一些高能粒子(包括质子、中子、重离子和 α 粒子等)会对航天航空系统中半导体器件造成辐射损伤, 威胁着航天器的安全。空间辐射效应主要分为三类: 总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应。当单个高能粒子入射到半导体器件中, 与器件的灵敏区域相互作用产生的电子-空穴对被器件收集所引发的器件功能异常或者器件损坏就是单粒子效应, 包括单粒子翻转、单粒子闭锁、单粒子功能中断和单粒子瞬态等。随着半导体器件的特征尺寸不断缩小, 单粒子效应越来越显著, 并已经成为影响宇航电子系统正常工作的主要因素。

Flash 存储器的基本单元是基于浮栅工艺的 MOS 管, 它有两个栅: 一个控制栅和一个位于沟道和控制栅之间的浮栅。按照 Flash 内部架构以及技术实现特点, 可以将其分为 NOR 型和 NAND 型。NOR Flash 各单元间是

并联的, 它传输效率高, 读取速度快, 具有片上执行功能, 作为重要的程序和 FPGA 位流存储器, 大量应用于各型号航天系统。NAND 型 Flash 各存储单元间是串联的, 它比 NOR 架构有更高的位密度, 每位的成本更低。NAND Flash 的非易失性、低功耗、低成本、低重量等特性也使其在航天系统中得到了应用。故对 Flash 存储器的单粒子效应评价至关重要。

地面高能粒子模拟实验是目前单粒子效应研究中最常用的实验方法, 它能较好地反映器件的辐射特性, 常用的地面模拟源有粒子加速器提供的重离子束或质子束、 ^{252}Cf 裂片模拟源、14MeV 中子源等, 本文讨论的内容都是针对重离子辐照实验开展的。目前国内单粒子效应试验均依据 QJ10005 标准开展, 但标准中没有给出具体效应的测试方法, 传统测试方法中缺失了对器件存储区与外围电路的效应区分和不同影响考虑, 故本文对国内外 Flash 存储器单粒子效应实验中常见效应及其测试区分方法进行综述, 总结分析测试流程, 为相关测试实验研究提供参考。

* 基金项目: 装备领域预研基金(41402040301); 军用电子元器件科研项目(1905WK0014)

综述与评论 Review and Comment

1 Flash 存储器单粒子效应研究进展

在早期对 Flash 存储器单粒子效应的研究中,存储单元阵列的外围电路对单粒子效应更敏感,入射带电离子基本不会影响到浮栅单元^[1]。如图 1 所示,外围电路包括电荷泵、页缓冲器和控制电路。控制电路和页缓冲器的翻转会导致存储单元的位故障。页的内容在被串行输出到设备管脚之前被传输到页缓冲器(Page buffer)中,它是放大器和锁存器的组合,在特定的输入脉冲电平作用下改变状态,对辐照较敏感^[2]。

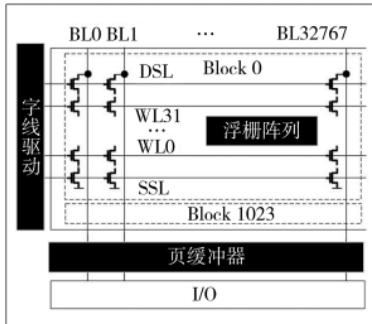


图 1 某型 NAND Flash 功能模块结构^[3]

外围电路引起的单粒子功能中断(SEFI)也是这一阶段的主要研究对象。一类 SEFI 是器件的读/擦/写功能失效,需要重置器件才能恢复。另一类 SEFI 表现为整块整页或连续的大量数据翻转,是由外围寄存器或缓冲器翻转造成的,不需要重置器件就可恢复^[4]。文献[5]在对 64 Mb Flash 存储器进行重离子辐照后,发现 SEFI 出现在任何读、写或擦除操作期间以及等待状态下。由于读写时存在高压,SEFI 发生的机率要更大^[6]。实验结果表明 SEFI 不会对器件造成永久损伤^[7-8]。SEFI 出现的原因有很多,可能来源于页缓冲器和控制电路中的寄存器,也可能源于电荷泵。电荷泵由大电容器和二极管组成,用于产生浮栅单元编程和擦除操作所需的高电压(多数器件读取时也使用电荷泵)。重离子留下的电子空穴轨迹可能会使电容器的电极暂时短路,从而导致编程电压降低,电荷泵故障会导致器件擦写失效^[3,9]。

在后来的研究中,人们不仅发现了浮栅(FG)阵列造成的数据翻转,而且随着 Flash 存储器特征尺寸的缩小,

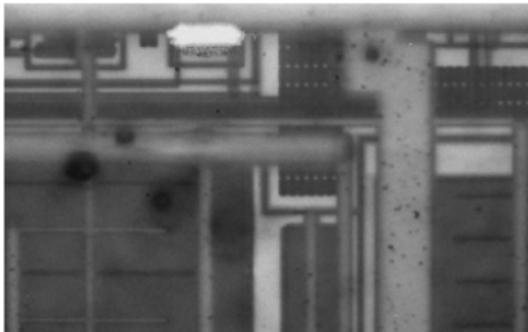


图 2 电荷泵失效时的热像图^[9]

浮栅单元的单粒子效应灵敏度也在增加,器件对这种错误的截面大小甚至超过了外围电路错误。当一个高能离子击中一个浮栅时,它会在其周围留下一个高密度的电子和空穴轨迹,浮栅中的电荷通过隧道氧化物中的导电通道丢失导致导通阈值电压漂移^[10],造成数据翻转。

Flash 存储器的重离子辐照实验中还会发生一种故障是单粒子闭锁(SEL),它是由寄生可控硅的激活引起的。SEL 会产生远高于额定值的工作电流,如果闭锁状态持续存在,可能会对器件造成永久性的破坏,比如总线电压下降和电源损坏等,相比于 SEFI,SEL 的产生需要更高的 LET 阈值,而且必须通过切断电源来防止破坏^[6]。

对于新一代 Flash 存储器,其特征尺寸进一步缩小,密度也在增大,由于浮栅单元在编程状态下存储电荷的减少,它们对单粒子效应的敏感程度随之提高。在重离子辐照后不仅会发生单位翻转(SBU),还存在多单元翻转(MCU)和多位翻转(MBU)。研究表明相同容量和规格下,单层单元(SLC)器件的单粒子翻转敏感度小于多层单元(MLC)器件^[11-12]。因为器件在 MLC 模式下,只需要更少的电荷量变化就能改变浮栅管的阈值电压,进而破坏存储的数据。

近年来 Flash 存储单元阵列的结构从平面变为了立体。如图 3、图 4 所示:浮栅型 3-D NAND 的存储单元具有圆柱形环状结构,浮栅夹在隧道氧化物和栅氧化物之间,字线是由水平面构成的。相比于平面结构,3-D 存储单元可以通过更大的特征尺寸和更多的每个逻辑状态电子数来实现相同或更好的密度,克服了小尺寸平面结构 Flash 存储器的局限(比如单元间干扰导致的阈值电压不稳定)。文献[13]研究了美光 384 Gb 3-D NAND 中浮栅单元在重离子辐照后的表现,将其与平面器件中的阈值电压偏移进行比较,结果显示在给定位密度的情况下,偏移灵敏度显著降低,这是由于 3-D 存储单元在表示每位数据时有更大的电荷量。

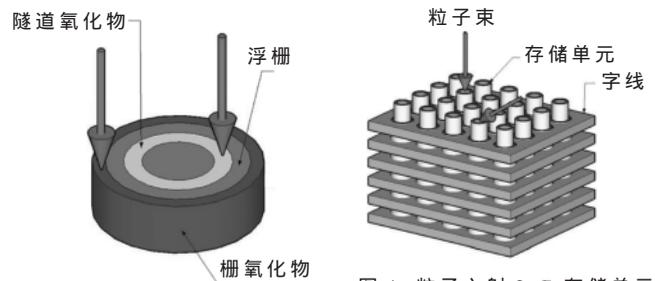


图 3 3-D 浮栅单元结构

图 4 粒子入射 3-D 存储单元阵列示意图

2 Flash 存储器单粒子效应测试方法

Flash 存储器在重离子辐照后的主要故障模式有存储阵列外围电路造成的单粒子翻转、单粒子功能中断(包含整页整块翻转和功能失效)、单粒子闭锁和浮栅单元造成的单粒子翻转(分为可恢复错误和单粒子栅穿)。具体分类和故障原因如图 5 所示。

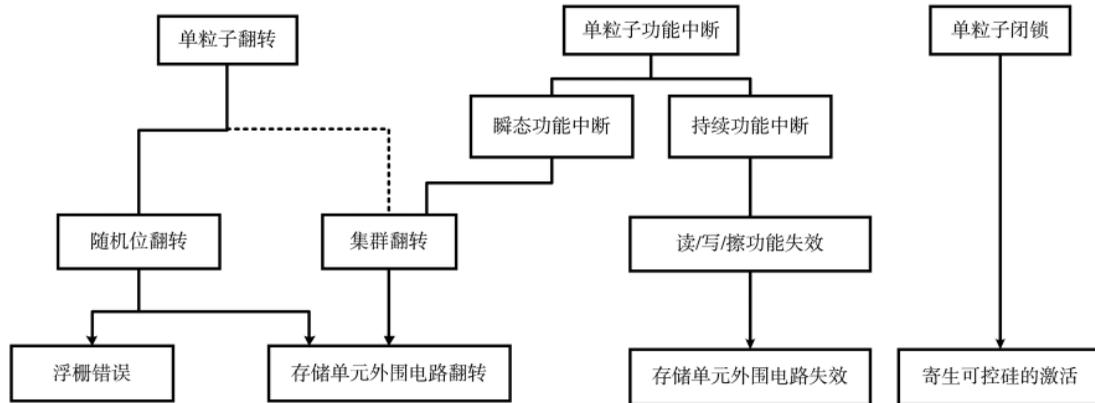


图5 Flash存储器单粒子效应分类及故障原因

2.1 单粒子翻转

由于浮栅单元本身和外围缓冲器等电路在重离子入射后都会造成存储数据的翻转,因此对翻转故障原因的判断是Flash存储器单粒子效应测试中需要注意的问题:

(1)在辐照后连续读取观察错误是否消失,若错误消失判断是外围页缓冲器故障,若错误没有消失则是由粒子入射浮栅造成的。

浮栅中的电荷损失和俘获导致浮栅管阈值电压漂移,造成数据翻转。Flash存储器的读取时间很短且不存在高压,再次读取页就能检索正确的信息,这意味着实际存储在浮栅上的信息没有损坏(浮栅存储电荷量没有过大变化)。相反,仍存在的错误位其浮栅单元存储电荷量发生变化导致阈值电压漂移到另一状态,信息永久丢失。

(2)浮栅错误存在退火效应^[8,10,14],错误会随在室温静置时间的增加而减少,根据文献^[10]的实验结果,如图6所示,错误在辐照后100小时内逐渐减少,在100小时后没有出现较大变化。根据实际需求,在静置足够长的时间后,当错误不能通过重新擦写恢复时,可以认为这些位发生了单粒子栅穿(硬错误)。

(3)部分翻转错误会在连续读取中反复出现又消失,这是由于浮栅的阈值电压处在读取电压附近,该位有时被

读取为1,有时被读取为0,这类错误发生的数量较少^[10]。

2.2 单粒子功能中断

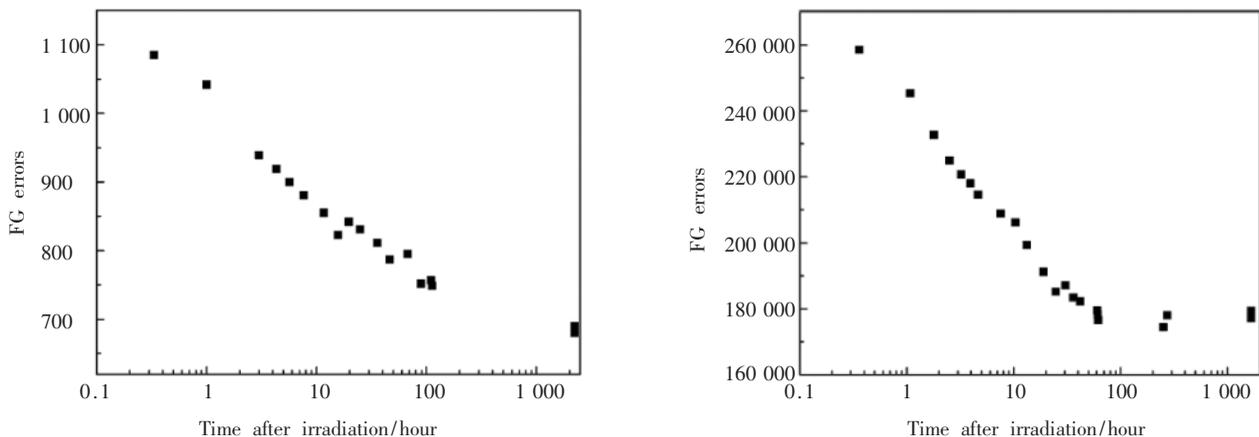
对单粒子功能中断的分析较为复杂,因为它的特征、恢复机理和与器件操作模式的关系变化较大。单粒子功能中断分为瞬态和持续两种。瞬态SEFI是由粒子入射控制电路和缓冲器引起的,与持续SEFI不同,它不需要重置器件就会消失。

瞬态SEFI被进一步划分为:

- (1)页错误,某页中错误数远超其他页的平均值;
- (2)块错误,某块中错误数远超其他块的平均值;
- (3)垂直错误,一页/块出现错误后,在后续页/块中的同样位置也出现错误^[15]。

在测试中,对于整块整页或连续的大量数据翻转,研究人员普遍把它归因于SEFI,而不是大量单个位的翻转^[7-9,12]。根据存储器容量设置位翻转阈值,当读取到的错误数大于这个阈值时,判断发生了SEFI。

持续SEFI表现为器件的功能失效,可根据实际现象进行判断,比如在连续读取操作中出现整页读取失败的现象,则它与浮栅单元外围电路的辐射损伤有关。具体现象有地址无法访问、写/读/擦操作暂停、部分擦除、就绪信号永远保持忙碌状态导致操作无限循环等。持续SEFI都可以通过电源循环或复位命令来恢复^[4,10]。

图6 对数坐标下浮栅错误的室温退火效应^[10]

综述与评论 Review and Comment

2.3 单粒子闭锁

单粒子闭锁是由寄生可控硅的激活引起的,表现为工作电流持续增大。器件正常运行时,控制电路和寄存器中的逻辑状态切换可能引起内部总线争用,可能导致设备电流的突然增大,SEFI 也会导致工作电流增大^[4,12]。不同于 SEL,这些由粒子入射引起的电流峰值持续时间很短^[9,11],工作电流可自行恢复到正常状态。通过检测器件的工作电流,当电流大于设置的阈值时切断电源,来避免 SEL 破坏电路。

高温高压高入射离子 LET 值是 SEL 产生的最佳条件,在器件 SEL 效应敏感性的测试中,通常让器件工作在这些极限条件下。在静态偏置模式下进行实验,可使器件获得更强的 SEL 效应,而不被 SEFI 造成的结果干扰^[14]。

2.4 单粒子效应量化表述

线性能量传输(Liner Energy Transfer, LET)是粒子在材料中入射路径单位尺度范围内沉积的能量,它用来表示入射粒子对器件损伤的强弱。对于某一器件,能够引起某种单粒子效应的最低 LET 值则称为 LET 阈值^[16]。通常除以硅的密度将 LET 值用密度归一化,单位变为 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。

$$\text{LET} = \frac{dE}{dL \times \rho} = \frac{\text{MeV}}{\text{cm} \times \text{mg}/\text{cm}^3} = \text{MeV} \times \text{cm}^3/\text{mg} \quad (1)$$

单粒子效应发生的几率通常用截面来表示,定义为:

$$\sigma = \frac{N}{\Phi \times \cos\theta} \quad (2)$$

式中: σ 为单粒子效应截面,单位是 cm^2 ,截面越大,器件抗单粒子效应的能力越差; N 为器件发生某一种效应的次数; Φ 是粒子注量,为单位面积的入射粒子数,单位是 cm^{-2} ; θ 指离子的入射方向与器件的垂直方向的夹角。随着重离子 LET 的增大,效应截面不再增加时的截面即为饱和截面。图 7 和图 8 为典型单粒子效应截面和 LET 的关系图。

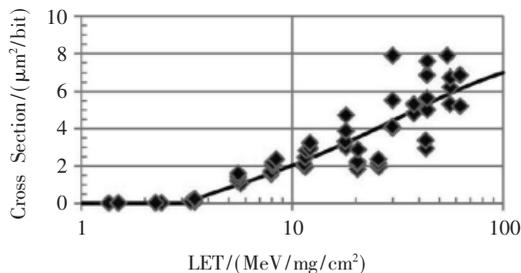


图 7 单粒子翻转截面与 LET 关系及 Weibull 拟合曲线^[17]

2.5 测试数据模式

写入数据可以选择伪随机序列及其互补序列,用于模拟真实数据,也可以选择全 0 和全 1,棋盘格和反棋盘格。多数实验结果表明,重离子不会对存储数据为 1 即擦除状态的浮栅单元产生翻转。由于存储数据为 1 的

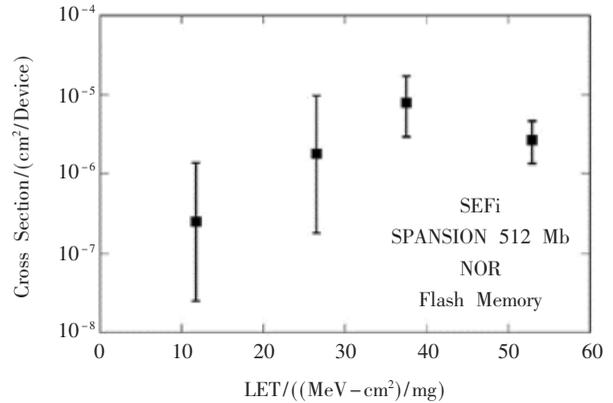


图 8 单粒子功能中断截面与 LET 关系(95%置信区间)^[18]

浮栅单元中没有电子或者只有很少量的电子,重离子对存储数据为 1 的浮栅单元的阈值电压影响很小。但也有研究发现,高能质子和以较大角度入射的重离子会造成处于擦除状态的浮栅单元发生翻转^[19],并给出推断:电子从处于编程状态的浮栅泄露到处于擦除状态的浮栅,如图 9 所示。

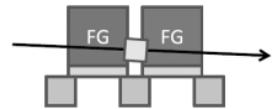


图 9 浮栅导致的 1 到 0 翻转机理^[19]

通常全 0 模式都是出现单个位错误的最坏情况。然而,由于外围电路中的错误会导致存储单元两种模式的翻转,且外围电路在全 1 模式更易发生位错误^[10,15],因此在大多数测试中都使用了棋盘格和随机序列,从 1 到 0 的误差表明错误来自外围电路。在辐照后,所有数据模式都可以用来测试 DUT,以判断它是否发生功能失效。

2.6 测试流程

对应于航天任务中器件遇到的不同操作场景,一般 Flash 存储器单粒子效应测试流程如下:

(1)对器件进行开封处理。因为其成本低、重量轻的特点,商用器件一般采用塑料封装的形式。塑料封装的主要成分是环氧树脂,常采用浓硝酸和浓硫酸对塑料封装进行去除。

(2)静态无偏。先写入一种数据并读取加以验证,然后去掉偏置电压,对器件进行粒子辐照。当辐照达到预期注量时停止,恢复偏置电压,读取 Flash 中数据并记录错误。

(3)静态。除了在偏置状态下对器件进行辐照,其余部分都类似于静态无偏模式。

静态和静态无偏模式都可以排除外围电路 SEL 和 SEFI 的影响,入射粒子只对浮栅单元产生作用。

(4)动态读取。将一种类型数据写入器件并验证,然后在辐照过程中连续读取,记录错误。这种测试模式可以区分外围电路造成的翻转和浮栅错误。

(5)动态读/写。类似于动态读取模式,只是在辐照时对读取中发现的错误位执行写操作。

(6)动态读/擦/写。类似于动态读/写模式,只是在对

综述与评论 Review and Comment

错误位重新写入前执行一次擦除操作。

所有动态测试的目的是寻找外围控制电路中的瞬态错误,由于擦除和写入操作中存在高压,在这些操作过程中 Flash 更容易发生破坏性故障。

(7)在动态测试中观察到 SEFI,记录错误并重置器件,然后继续测试。当观察大幅增加的电流时断开电源,短暂静置待 SEL 消除后重新通电。

(8)对每个器件在同一入射能量下进行多次实验,获得多个数据点并计算翻转截面,得出效应截面和入射 LET 值的关系。通过 Weibull 方程进行曲线拟合,得到单粒子效应发生的 LET 阈值和饱和截面,作为评价单粒子效应敏感性的重要指标。

3 结论

本文总结了 Flash 存储器在重离子辐照实验中常见单粒子效应,归纳了浮栅阵列和外围电路单粒子翻转、单粒子功能中断、单粒子闭锁的测试区分方法和测试流程,可为研究人员进行此类实验研究提供参考。

在实际使用中,如果 Flash 存储器在大部分时间内保持待机状态,并且间隔长读取一次,则存储在浮栅阵列中的信息的可靠性需要得到重点关注,而如果设备非常频繁地被读取,则控制电路尤其是页缓冲器的单粒子效应敏感度更为重要。

随着 Flash 存储器的特征尺寸缩小,位密度越来越高,阵列结构由平面变为立体,单元结构出现变化(V-NAND),其单粒子效应故障模式和机理都会出现变化,测试区分方法也会随之变化,这些都是未来需要进一步深入研究和探索的。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SCHEICK L Z, SWIFT G M, GUERTIN S M. SEU evaluation of SRAM memories for space applications[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2000.
- [3] BAGATIN M, CELLERE G, GERARDIN S, et al. Single event effects in 1Gbit 90nm NAND flash memories under operating conditions[C]. IEEE International On-line Testing Symposium, 2007.
- [4] NGUYEN D N, SCHEICK L Z. SEE and TID of emerging non-volatile memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2002.
- [5] KOGA R, TRAN V, GEORGE J, et al. SEE sensitivities of selected advanced flash and first-in-first-out memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2004.
- [6] OLDHAM T R, FRIENDLICH M, HOWARD J W, et al. TID and SEE Response of an Advanced Samsung 4G NAND flash memory[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2007.
- [7] LANGLEY T E, MURRAY P. SEE and TID test results of 1 Gb flash memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2004.
- [8] OLDHAM T R, LADBURY R L, FRIENDLICH M, et al. SEE and TID characterization of an advanced commercial 2Gbit NAND flash nonvolatile memory[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53: 3217-3222.
- [9] IROM F, NGUYEN D N. Single event effect characterization of high density commercial NAND and NOR nonvolatile flash memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2547-2553.
- [10] BAGATIN M, GERARDIN S, CELLERE G, et al. Key contributions to the cross section of NAND flash memories irradiated with heavy ions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 55(6): 3302-3308.
- [11] IROM F, NGUYEN D N, HARBOE-SORENSEN R, et al. Evaluation of mechanisms in TID degradation and SEE susceptibility of single and multi-level high density NAND flash memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(5): 2477-2482.
- [12] WILCOX E P, CAMPOLA M J. A TID and SEE characterization of multi-terabit COTS 3D NAND flash[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2019.
- [13] BAGATIN M, GERARDIN S, PACCAGNELLA A, et al. Effects of heavy-ion irradiation in vertical 3D NAND flash memories[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 318-325.
- [14] HANSEN D L, HILLMAN R, MERAZ F, et al. Radiation performance of a flash NOR device[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2018.
- [15] SCHMIDT H, WALTER D, BRUGGEMANN M, et al. Heavy ion SEE studies on 4-Gbit NAND-flash memories[C]. 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. IEEE, 2007.
- [16] 刘征. 单粒子效应电路模拟方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [17] PETERSEN E L. Dosimetry comparisons between various single event test facilities[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 57(6): 3477-3482.
- [18] IROM F, NGUYEN D N. SEE and TID response of Span-512Mb NOR flash memory[C]. Radiation Effects Data Workshop (REDW). IEEE, 2011.
- [19] GERARDIN S, BAGATIN M, PACCAGNELLA A, et al. Upsets in erased floating gate cells with high-energy protons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017, 64(1): 421-426.
- [20] PATTERSON J D, GUERTIN S M, NGUYEN D N. Radiation tests on 2Gb NAND flash memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2007.

(下转第 52 页)

综述与评论 Review and Comment

与部署方面取得的相对优势,形成服务全球并具普惠意义的低轨卫星互联网系统。

参考文献

[1] 尚志.全球低轨空间互联网发展与展望[J].太空探索, 2019(6): 14-17.

[2] 尹志忠,张龙,周贤伟.LEO/HEO/GEO 三层卫星网络层间 ISL 性能分析[J].计算机工程, 2010, 46(12): 9-13.

[3] 高瓔园,王妮炜,陆洲.卫星互联网星座发展研究与方案构想[J].中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.

[4] 刘悦.新兴卫星互联网星座对传统卫星制造发展的启示[J].国际太空, 2016(11): 51-58.

[5] 刘洁,潘坚,曹世博.低轨互联网星座业务发展趋势分析[J].中国航天, 2015(7): 17-21.

[6] 姜文华,王学磊,曾志毅.国内外卫星互联网发展现状、风险及对策分析[J].信息通信, 2016(11): 11-12.

[7] 翟继强,李雄飞.OneWeb 卫星系统及国内低轨互联网卫星系统发展思考[J].空间电子技术, 2017(6): 1-7.

[8] 姜燕丽.低轨卫星互联网发展问题研究[J].数字通信世界, 2018(8): 21-22.

(上接第 43 页)

佳行业解决方案的同时尽显最优性价比,与运营商及产业生态链达到价值共赢。

参考文献

[1] 郭希蕊,张涛,李福昌,等.中国联通 5G 数字化室分演进方案探讨[J].邮电设计技术, 2019(8): 7-11.

[2] 周一青,李国杰.未来移动通信系统中的通信与计算融合[J].电信科学, 2018, 34(3): 1-7.

[3] 方绍湖,李馨,卜斌龙.基于开放平台小基站的 5G 数字室分解决方案[J].电信科学, 2019, 35(7): 69-77.

[4] 方绍湖,杨波,向炜.一种微小区基站系统、相关设备及数据处理方法:中国:201410391064.9[P].2017-12-26.

(上接第 48 页)

[21] OLDHAM T R, SUHAIL M, FRIENDLICH M R, et al. TID and SEE response of advanced 4G NAND flash memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2008.

[22] 殷亚楠. Flash 存储器单粒子效应及与总剂量的协同效应研究[D]. 兰州:中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2018.

[23] 曹洲,薛玉雄,高欣,等.NAND Flash 存储器单粒子效应试验研究[J].空间电子技术, 2019(3): 81-86.

[24] BAGATIN M, GERARDIN S, PACCAGNELLA A, et al. SEE tests of the NAND flash radiation tolerant intelligent memory stack[C]. 2015 IEEE Radiation Effects Data

[9] 付毅飞. 156 颗小卫星构建天基互联网[N]. 科技日报, 2017-8-31(3).

[10] 左赛春.全球低地球轨道互联网卫星星座竞争格局与面临的挑战[J].中国航天, 2018(2): 42-45.

[11] 全球低轨卫星移动通信与空间互联网项目落户重庆[J].卫星与网络, 2018(12): 74-75.

[12] 沈永言.5G 时代卫星通信的发展态势[J].国际太空, 2020(1): 48-52.

[13] “鸿雁”星座谱写我国低轨卫星互联网建设新篇章[J].中国航天, 2019(2): 6-9.

(收稿日期:2020-04-28)

作者简介:

王子剑(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:网络通信技术。

杜欣军(1974-),男,博士,研究员,主要研究方向:软件无线电技术、软件化雷达、开放体系架构。

尹家伟(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:计算机设计。

[5] 中国移动边缘计算开放实验室.中国移动边缘计算技术白皮书[R].2019.

[6] 3GPP TS 23.501 V15.3.0(2018-09). Technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system[S]. 2018.

(收稿日期:2020-06-11)

作者简介:

方绍湖(1982-),男,本科,工程师,主要研究方向:移动通信小基站相关技术和产品。

罗漫江(1979-),男,硕士,工程师,主要研究方向:移动通信系统相关技术和产品。

康冬(1976-),男,本科,工程师,主要研究方向:移动通信系统网络覆盖解决方案。

Workshop(REDW), 2015.

[25] JORDAN A, FARRIS T, HAFER C, et al. SEE test results on a commercially designed and manufactured NOR flash[C]. European Conference on Radiation & Its Effects on Components & Systems, IEEE, 2011.

(收稿日期:2020-03-21)

作者简介:

黄姣英(1977-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:电子元器件可靠性试验、分析与评价。

王乐群(1996-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:元器件测试与可靠性评价, E-mail: wanglq@buaa.edu.cn.

高成(1972-),男,博士,研究员,主要研究方向:电子元器件可靠性评价、大规模集成电路测试。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所