



纳米级静态随机存取存储器的 α 粒子软错误机理研究

张战刚 叶兵 姬庆刚 郭金龙 习凯 雷志锋 黄云 彭超 何玉娟 刘杰 杜广华

Mechanisms of alpha particle induced soft errors in nanoscale static random access memories

Zhang Zhan-Gang Ye Bing Ji Qing-Gang Guo Jin-Long Xi Kai Lei Zhi-Feng Huang Yun Peng Chao He Yu-Juan Liu Jie Du Guang-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 136103 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201796

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201796>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

14 nm FinFET和65 nm平面工艺静态随机存取存储器中子单粒子翻转对比

Comparison of neutron induced single event upsets in 14 nm FinFET and 65 nm planar static random access memory devices

物理学报. 2020, 69(5): 056101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191209>

空间高能离子在纳米级SOI SRAM中引起的单粒子翻转特性及物理机理研究

Single event upset characteristics and physical mechanism for nanometric SOI SRAM induced by space energetic ions

物理学报. 2017, 66(24): 246102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.246102>

基于重离子试验数据预测纳米加固静态随机存储器质子单粒子效应敏感性

Prediction of proton single event upset sensitivity based on heavy ion test data in nanometer hardened static random access memory

物理学报. 2020, 69(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190878>

HfO₂基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits

物理学报. 2020, 69(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200123>

铁电存储器中高能质子引发的单粒子功能中断效应实验研究

Experimental study about single event functional interrupt of ferroelectric random access memory induced by 30–90 MeV proton

物理学报. 2018, 67(23): 237803 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181225>

中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing

物理学报. 2019, 68(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181843>

纳米级静态随机存取存储器的 α 粒子软错误机理研究*

张战刚¹⁾ 叶兵²⁾ 姬庆刚²⁾ 郭金龙²⁾ 刁凯³⁾ 雷志锋^{1)†}
黄云^{1)‡} 彭超¹⁾ 何玉娟¹⁾ 刘杰²⁾ 杜广华²⁾

1) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 510610)

2) (中国科学院近代物理研究所, 材料研究中心, 兰州 730000)

3) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2019年11月26日收到; 2020年4月23日收到修改稿)

本文使用镅-241 作为 α 粒子放射源, 开展 65 和 90 nm 静态随机存取存储器软错误机理研究, 结合反向分析、TRIM 和 CREME-MC 蒙特卡罗仿真揭示 α 粒子在器件中的能量输运过程、沉积能量谱和截面特性. 结果表明, 65 nm 器件的软错误敏感性远高于 90 nm 器件, 未发现翻转极性. 根据西藏羊八井地区 4300 m 海拔的实时测量软错误率、热中子敏感性和 α 粒子软错误率, 推算得到 65 nm 静态随机存取存储器在北京海平面应用的总体软错误率为 429 FIT/Mb, 其中 α 粒子的贡献占比为 70.63%. 基于反向分析结果构建器件三维仿真模型, 研究 α 粒子入射角度对单粒子翻转特性的影响, 发现随着入射角度从 0° 增大至 60° , 灵敏区中粒子数峰值处对应的沉积能量值减小了 40%, 原因为衰变 α 粒子的能量较低, 入射角度增大导致 α 粒子穿过空气层和多层金属布线的厚度增大 $1/\cos(\theta)$ 倍, 引起粒子能量减小, 有效 LET 值随之减小. 随着入射角度从 0° 增大至 60° , 单粒子翻转截面增大了 79%, 原因为 65 nm 器件灵敏区中明显的单粒子翻转边缘效应.

关键词: α 粒子, 软错误, 单粒子翻转, 加速试验

PACS: 61.80.Jh, 61.82.Fk, 85.40.-e, 02.50.Ng

DOI: 10.7498/aps.69.20201796

1 引言

半导体器件的各种制造和封装材料中存在痕量的铀 (U)、钍 (Th) 等杂质, 这些杂质具有天然放射性, 其释放的 α 粒子具有较强的电离能力, 在穿过电子器件时可产生大量的电子-空穴对, 电子-空穴对被器件收集进而导致软错误的出现^[1]. 软错误虽然可以被纠正, 但当其发生在关键位置 (如中央处理器指令缓存) 且没有被及时修正时, 可能导致

严重的后果.

随着集成电路 (integrated circuit, IC) 工艺的持续发展, 受集成度增大、供电电压降低、节点电容减小等因素的影响, 电离粒子在先进工艺器件中引起的软错误成为应用可靠性的关键威胁^[2-4]. 在大气环境中, 软错误主要来源于 α 粒子、高能中子和热中子^[5-7]. 其中, α 粒子引起的软错误率 (soft error rate, SER) 占比与器件工艺、封装材料等级、使用环境等因素密切相关^[8], 是总体 SER 的重要组成部分. 随着集成电路的工艺尺寸进入纳米尺

* 国家自然科学基金 (批准号: 61704031)、广东省科技计划 (批准号: 2017B090901068, 2017B090921001) 和广州市科技计划 (批准号: 201707010186) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: leizhifeng@ceprei.com

‡ 通信作者. E-mail: yunhuang@ceprei.com

度,国内外相关研究多聚焦在集成电路的 α 粒子 SER 测量、与中子 SER 的贡献比例等研究^[9-11], α 粒子在其中引起软错误的机理尚不完全清晰,如灵敏区中的沉积能量谱特性、多角度入射下的敏感性变化及机理等,亟需开展深入研究,为加速试验方法和风险评价奠定基础。

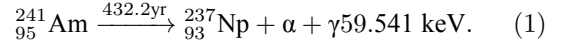
本文从放射源选取、试验技术、仿真计算等方面开展纳米级静态随机存取存储器 (SRAM) 的 α 粒子软错误研究。在试验技术方面,基于放射源参数、封装材料 α 粒子发射率等级、单粒子翻转 (single event upset, SEU) 截面等信息,获得器件在真实应用环境下的 SER。在机理研究方面,结合使用辐照试验、反向分析和蒙卡仿真,研究 α 粒子能量运输特性、沉积能量谱、角度依赖性等微观特性,基于模型建立对结果进行解释。

2 试验条件

2.1 放射源

选用镅-241(Am-241)源作为本试验使用的 α 粒子放射源,其衰变产物如 (1) 式,大多数 α 粒子的能量在 5.4—5.5 MeV 之间,其中 84.5% 的 α 粒子能量为 5.486 MeV, 13% 的 α 粒子能量为

5.443 MeV, 1.6% 的 α 粒子能量为 5.388 MeV.



使用的放射源参数如表 1 所列,其放射率为 5.73×10^5 粒子/ $(2\pi \cdot \text{min})$,即 1.69×10^3 粒子/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, α 粒子从放射源表面 2π 各向同性向外发射。根据 JESD89 A 标准^[5],用于软错误测试的 α 粒子源的厚度应不小于 0.04 mm,以保证其产生的 α 粒子能谱为分布式能谱,更接近器件真实情况。该 Am-241 源厚度为 1 mm,产生的 α 粒子能谱与芯片真实环境下的 α 粒子能谱较为接近,但粒子通量远远高于真实环境,适合用于开展 α 粒子软错误率加速测试。

表 1 使用的放射源参数

Table 1. Parameters of the radioactive source being used.

α 粒子源	Am-241
放射率/粒子· $2\pi^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	5.73×10^5
尺寸	圆柱体, $\Phi 18 \text{ mm}$, 1 mm厚

2.2 被测器件及单粒子效应测试系统

被测器件参数如表 2 所列,选用 CYPRESS 公司的三款商用 SRAM 开展试验。试验前,对器件进行化学开封处理。

表 2 被测器件参数

Table 2. Parameters of the devices under test.

器件类型	型号	厂商	工艺尺寸/mm	测试容量/Mb	工作电压/V	硅片尺寸
DDR-II SRAM	CY7C1318	CYPRESS	65	1.125	1.8	5 mm \times 8 mm
QDR-II SRAM	CY7C1412	CYPRESS	65	18	1.8	5 mm \times 8 mm
SRAM	CY7C1019D	CYPRESS	90	1	3.3	2 mm \times 2 mm

图 1 为测试装置示意图,测试在大气中进行,气压为 $(81 \pm 1) \text{ kPa}$ 。Am-241 源放置在开封后的芯片表面,放射源与硅片同轴。试验过程中,由于 CY7 C1019 D 使用插座进行固定和电连接,所以放射源与其芯片之间的间距约为 5 mm,其余两种

器件的间距均为 1 mm。使用单粒子效应测试系统监测辐照过程中 SRAM 芯片发生的软错误信息,包括数量、地址、错误数据等。试验过程中,需注意放射源辐射防护安全。

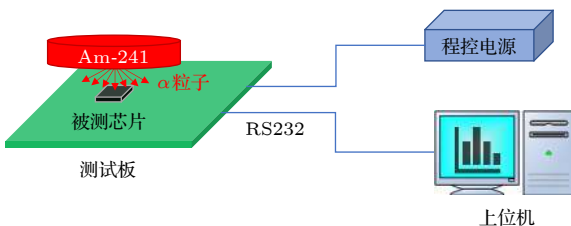


图 1 测试装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the test setup.

3 试验及仿真结果

3.1 试验结果

首先,根据具体的试验空间布局,对到达硅片表面的 α 粒子注量率进行建模和蒙特卡罗计算。放射源和被测器件硅片尺寸见表 1 和表 2, α 粒子从放射源表面发射, 2π 方向各向同性。放射源与硅片同轴,间距分别为 1 mm (65 nm SRAM) 和

5 mm (90 nm SRAM). 对到达硅片表面的 α 粒子进行统计和分析, 结果如图 2 和图 3 所示. 由图可见, α 粒子在两类器件表面均匀分布. 统计计算后得到, 相比于放射源表面发射注量率, 到达 65 nm SRAM 和 90 nm SRAM 器件表面的 α 粒子注量率分别下降了 21% 和 56%. 根据该下降比例和 α 粒子放射源发射率, 即可计算得到硅片表面的实际粒子注量率.

需要说明的是, 放射源与被测器件之间空气层的存在会导致 α 粒子能量产生一定的衰减. 例如,

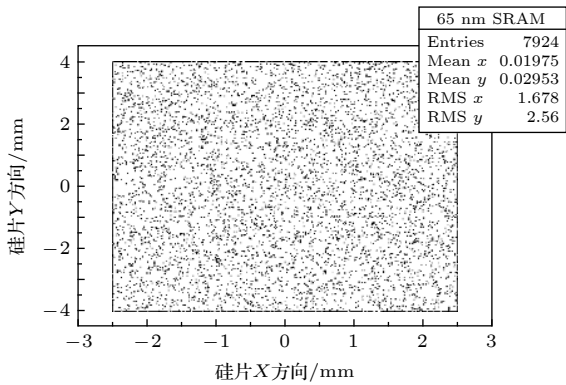


图 2 蒙特卡洛仿真得到的 65 nm SRAM 硅片表面 α 粒子分布图

Fig. 2. α particle distribution on the silicon surface of the 65 nm SRAM.

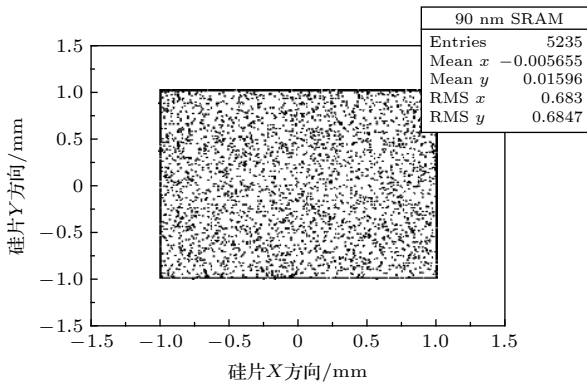


图 3 蒙特卡洛仿真得到的 90 nm SRAM 硅片表面 α 粒子分布图

Fig. 3. α particle distribution on the silicon surface of the 90 nm SRAM.

对于 65 nm 器件, 5.486 MeV 的 α 粒子穿过 1 mm 厚的空气层后能量为 5.40 MeV, 减小了 1.6%; 对于 90 nm 器件, 5.486 MeV 的 α 粒子穿过 5 mm 厚的空气层后能量为 5.04 MeV, 减小了 8.1%.

基于之前的 α 粒子注量率建模计算, 进一步得到三种型号器件的 SEU 截面测试结果如表 3 所列. SRAM 器件的初始写入图形均为棋盘格. 单粒子翻转截面 σ 计算公式为:

$$\sigma = \frac{N_{\text{SEU}}}{N_b \times F \times t}, \quad (2)$$

其中, N_{SEU} 为 SEU 数量, N_b 为测试容量 (Mb), F 为粒子注量率 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), t 为测试时长 (s). 为了获得良好的数据统计, 每种测试条件下的错误数均累积超过了 100 个. 由表 3 可见: 1) 相比于 65 nm SRAM, 90 nm SRAM 的 α 粒子 SEU 截面减小约两个数量级; 2) 两款 65 nm 器件均为同一公司的 DDR-II 系列 SRAM, 其 SEU 截面差别小于 6%.

为了研究初始写入图形对 SEU 截面的影响, 试验过程中针对两款 65 nm 器件使用了棋盘格、全 0 和全 1 三种写入图形, 测得的 SEU 截面如图 4 所示. 由图可见, 棋盘格图形、全 0 和全 1 图形对应的 SEU 截面差别小于 $\pm 7\%$, 且两款器件的 SEU 截面变化趋势无明显规律.

本文中使用的三款器件均为引线键合、塑料封装, 其放射性 α 粒子主要来自于模塑料. 假定 α 粒子发射率为 R_a (单位为 $/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$), 通常分为三个等级, 如表 4 所示. 基于上述数据可进一步计算得到

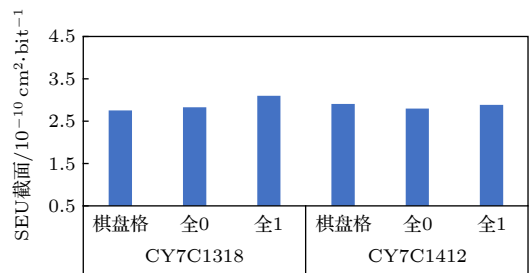


图 4 初始写入图形对 SEU 截面的影响

Fig. 4. Impact of initial data pattern on SEU cross section.

表 3 SEU 截面测试结果

Table 3. Test results of SEU cross section.

器件	测试容量/Mb	粒子注量率/ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	测试时长	SEU数量	SEU截面/ $\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$
CY7 C1318(65 nm)	1.125	1.33×10^3	7 min 52 s	204	2.76×10^{-10}
CY7 C1412(65 nm)	18	1.33×10^3	3 min 41 s	1613	2.91×10^{-10}
CY7 C1019 D(90 nm)	1	7.42×10^2	16 h	127	2.83×10^{-12}

表 4 α 粒子发射率等级及对应的软错误率
Table 4. The α particle emissivity level and corresponding soft error rate.

α 粒子发射率等级	发射率/cm ² ·h ⁻¹	65 nm SRAM软错误率/FIT·Mb ⁻¹	90 nm SRAM软错误率/FIT·Mb ⁻¹
ULA	~0.001	3.03×10^2	2.97
Low Alpha (LA)	~0.01	3.03×10^3	29.7
Uncontrolled Alpha	~20	6.06×10^6	5.94×10^4

表 5 65 nm SRAM 在 4300 m 海拔试验地点及北京海平面使用时的软错误率及 α 粒子、高能中子和热中子贡献占比
Table 5. Soft error rates of the 65 nm SRAM at the experimental site with an altitude of 4300 m and sea level of Beijing city being used. The contribution rates of α particle, high energy neutron and thermal neutron are analyzed, respectively.

粒子种类	4300 m海拔处的软错误率/FIT·Mb ⁻¹	占比(4300 m海拔)	北京海平面处的软错误率/FIT·Mb ⁻¹	占比(北京海平面)
全部	2356	100%	429	100%
α 粒子	303	12.86%	303	70.63%
高能中子	2053	87.14%	126	29.37%
热中子	0	0%	0	0%

器件真实环境下 α 粒子导致的软错误率 (单位为 FIT/Mb):

$$SER = R_a \times \sigma \times 1024^2 \times 10^9, \quad (3)$$

其中 σ 为单粒子翻转截面 (单位为 cm²/bit). 由表 4 可知, 当 65 nm SRAM 的封装材料使用提纯后的超低 α 粒子 (ultra low alpha, ULA) 发射率等级时, 其软错误率为 303 FIT/Mb, 即 1 Mb 容量的器件在 10⁹ 个工作小时 (约 11.4 万年) 内发生 303 个错误. 需要说明的是, 表 4 中 SER 的计算使用的 SEU 截面为上文中的两款器件、三种初始写入图形的平均截面. 当 90 nm SRAM 的封装材料使用提纯后的 ULA 发射率等级时, 其软错误率为 2.97 FIT/Mb.

表 5 给出了 65 nm SRAM 在 4300 m 海拔试验地点及北京海平面使用时的软错误率计算结果及 α 粒子、高能中子和热中子贡献占比分析. 根据我们之前的研究报道 [12], 该类器件在 4300 m 海拔的西藏羊八井地区长期测量得到的实时软错误率为 2356 FIT/Mb, 其中包含了 α 粒子、高能中子 ($E > 10$ MeV) 和热中子 ($E < 0.4$ eV) 的共同贡献. α 粒子引起的软错误率与所处地点没有关系, 固定为 303 FIT/Mb. 进一步开展的中子辐照试验和二次离子质谱 (secondary ion mass spectroscopy, SIMS) 测量和分析, 均表明该类器件对热中子不敏感, 所以热中子对实时软错误率没有贡献. 经过软件计算得到, 羊八井地区的高能中子通量 (118.9 n/(cm²·h)) 比北京海平面 (7.3 n/(cm²·h)) 高 16.3 倍, 由此可计算得到该 65 nm SRAM 在北京海平面使用时高能中子引起的软错误率为

126 FIT/Mb. 最终得到, 该 65 nm SRAM 在北京海平面使用时的软错误率为 429 FIT/Mb, 其中 α 粒子的贡献占比为 70.63%.

3.2 仿真分析

为了更深入地理解试验结果, 对内在机理进行分析, 本文基于 TRIM [13,14] 和 CREME-MC [15-18] 两种仿真工具, 结合器件的反向分析结果, 对上述试验过程进行了仿真, 得到了 α 粒子在器件中的传播轨迹、灵敏区沉积能量、单粒子翻转截面等微观信息.

3.2.1 反向分析

图 5 给出了 65 nm 工艺 SRAM 的横切面和存储区图像, 该 SRAM 共使用六层金属布线, M5 为 Al 材料, 其他 (M4—M0) 为 Cu 材料. 在 M0 和灵敏硅层之间发现 W 塞的存在. 根据图 5(b), 该器件存储单元为六管结构, 大小约为 1 μ m \times 0.5 μ m;

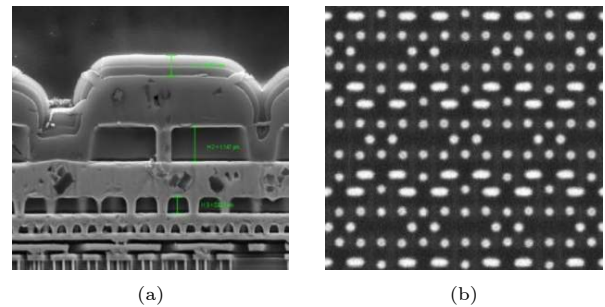


图 5 65 nm SRAM 的反向分析结果 (a) 横切面; (b) 存储区图像

Fig. 5. Reverse analysis results of the 65 nm SRAM: (a) Cross section; (b) memory area image.

表 6 65 nm SRAM 的存储单元尺寸和灵敏区参数
Table 6. Memory cell size and SV parameters of the 65 nm SRAM device.

器件	存储单元尺寸	灵敏区尺寸	灵敏区厚度/ μm	重离子LET阈值/ $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$	临界能量/ keV
65 nm SRAM	$1\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$	$0.2\ \mu\text{m} \times 0.19\ \mu\text{m}$	0.45	$0.22^{[19]}$	$22.5^{[19]}$

将“关”态 NMOS 的漏区作为单粒子翻转灵敏区, 其大小为 $0.2\ \mu\text{m} \times 0.19\ \mu\text{m}$; 考虑电离电荷的漂移、扩散、漏斗长度等收集过程, 将灵敏区的厚度设置为阱深, 即 $0.45\ \mu\text{m}$. 表 6 给出了 65 nm SRAM 的存储单元尺寸和灵敏区参数.

3.2.2 TRIM 仿真

基于 SRIM-2008.04(stopping and range of ions in matter-version 2008.04) 软件中的 TRIM (Monte Carlo transport of ions in matter) 蒙特卡罗仿真工具开展 α 粒子在器件中的运输仿真. 如图 6 所示, 10^6 个 α 粒子从零点处垂直入射, 初始能量为 5.486 MeV, 经过 1 mm 的空气层后依次穿过 65 nm SRAM 器件的表层金属布线、灵敏层和衬底. 计算类型为“ion distribution and quick calculation of damage”, 考虑了 α 粒子在器件运输过程中的直接电离和库仑散射过程. TRIM 工具可详细追踪粒子在器件中的轨迹, 记录粒子能量、动量、位置、出射角等信息.

图 6(a) 中, 器件灵敏区位于灵敏层中心 (虚线处). 由图可见: 1) α 粒子可以穿透空气层和器件表层金属布线, 在器件灵敏区中沉积能量, 但没有粒子能穿透器件衬底; 2) 由于库仑散射相互作用, α 粒子在器件的传播过程中呈现出较大的位置分

布, 产生背散射粒子的概率为 2.5×10^{-5} ; 3) 99.75% 的能量损失通过 α 粒子直接电离过程完成, 其余过程 (如反冲核、空位、声子等) 占比很小.

3.2.3 CREME-MC 仿真

根据反向分析结果, 建立三维器件仿真模型如图 7 所示, 模型大小为 $10\ \mu\text{m} (x) \times 10\ \mu\text{m} (y)$, 器件灵敏区位于多层金属布线层下方中心处. 在每次 CREME-MC 仿真过程中, 10^8 个 α 粒子随机入射, 初始能量为 5.486 MeV, 经过 1 mm 空气层 (未在图 7 中绘出) 后达到器件表面. 由于器件实际环境和试验环境中 α 粒子入射至器件表面时具有方向性, 因此仿真试验使用 0° , 30° 和 60° 三种入射角度条件, 探讨角度对单粒子翻转特性的影响. 需要说明的是, 对于倾角入射的 α 粒子, 其到达器件表面前穿过的空气层厚度增大 $1/\cos(\theta)$ 倍 (θ 为入射角度), α 粒子的能量随之减小. 计算过程中详细考虑 α 粒子的二次电子和核反应过程, 记录灵敏区中的沉积能量分布和截面信息. 使用的物理过程包括 decay, EmStandardScreened, hElasticWEL_CHIPS_HP, particles, G4 GammaLeptoNuclearPhys, hInelastic FTFP_CEM_HP, stopping, IonInelasticLAQGSM 等.

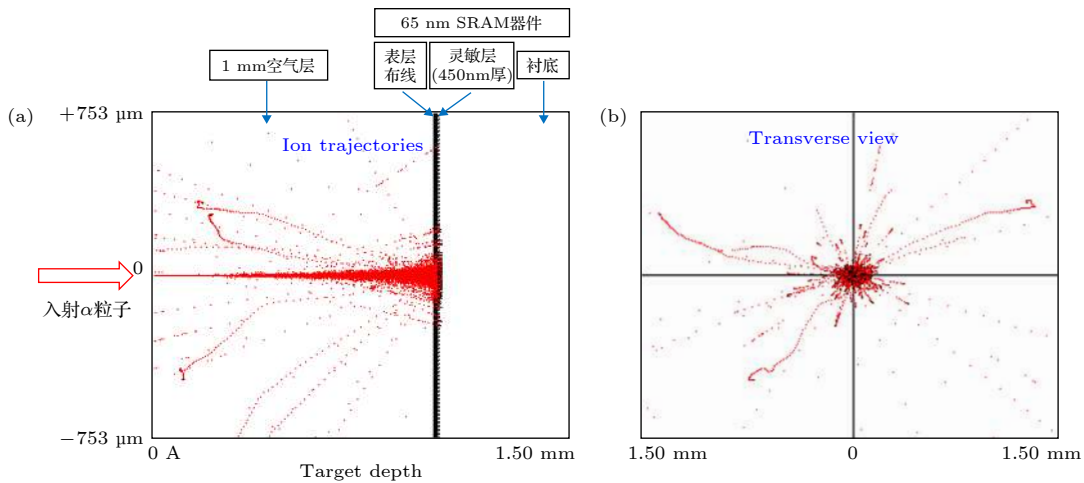


图 6 TRIM 仿真结果 (a) α 粒子在器件中的传播轨迹; (b) 器件横断面视角下的 α 粒子轨迹 (粒子初始入射位置为中心零点处)
Fig. 6. TRIM simulation results: (a) The propagation trajectory of alpha particles in the device; (b) the alpha particle trajectory from the cross-sectional view of the device (the initial incident position of the particle is at the zero center).

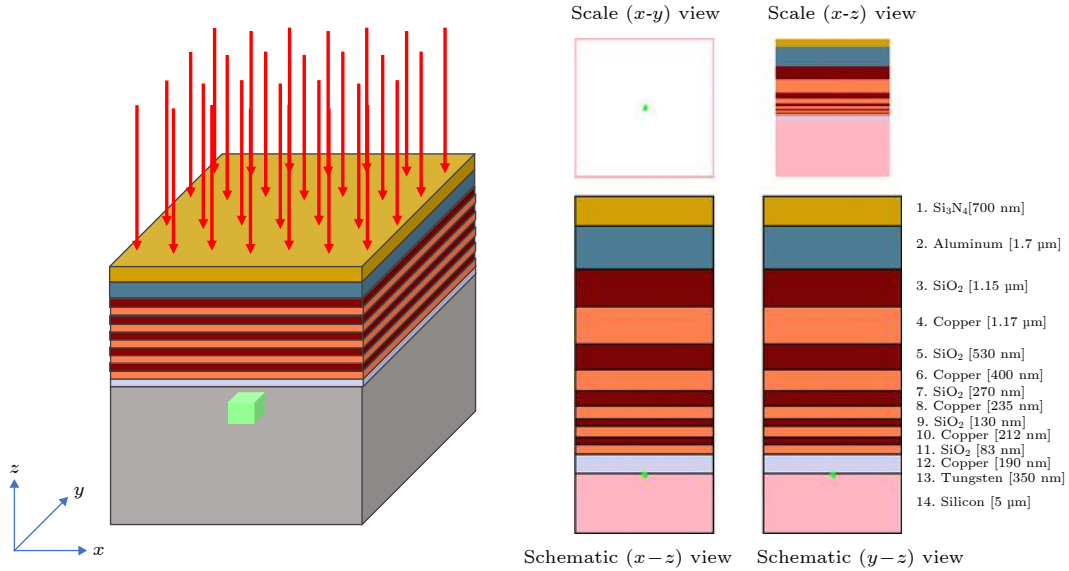


图 7 65 nm 工艺器件三维仿真模型

Fig. 7. 3 D simulation model of the 65 nm device.

图 8 给出了不同入射角度下器件灵敏区中的沉积能量谱. 由图可见, 随着入射角度的增大, 沉积能量谱表现出典型特征: 粒子数峰值处对应的沉

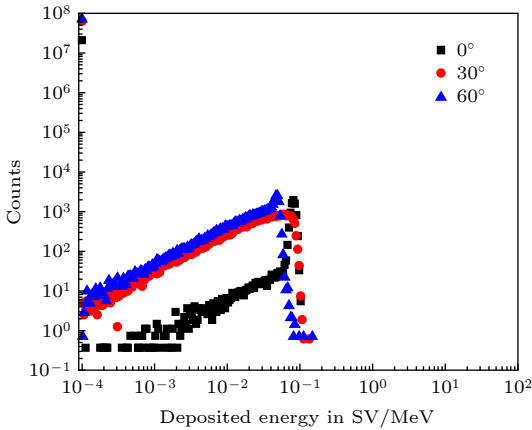


图 8 不同入射角度下器件灵敏区中的沉积能量谱

Fig. 8. Deposited energy spectra in sensitive regions of devices at different incident angles.

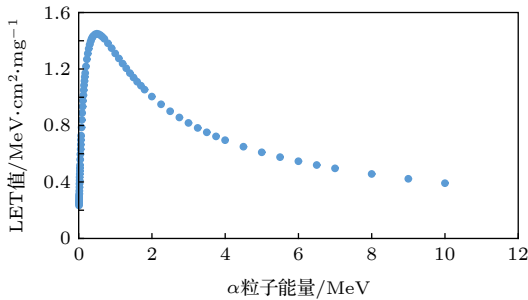


图 9 α 粒子在硅材料中的 LET 值与能量的关系

Fig. 9. Relationship between LET value and energy of α particle in silicon material.

积能量值呈减小趋势, 从垂直入射时的 81.3 keV 减小至 60°倾角入射时的 49 keV, 原因为随着入射角度的增大, α 粒子穿过空气层和多层金属布线的厚度增大 $1/\cos(\theta)$ 倍, 导致粒子能量减小, 有效 LET 值随之减小. 图 9 为 α 粒子在硅材料中的 LET 值与能量的关系. 计算得到, 垂直入射、30° 和 60°倾角入射条件下 α 粒子最终在灵敏区处的 LET 值分别为 0.78, 0.49 和 0.23 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$.

图 10 为不同入射角度下单粒子翻转截面与临界能量的关系, 由前文可知该器件的单粒子翻转临界能量为 22.5 keV (约 1 fC), 可得图 11. 垂直入射条件下, 器件的单粒子翻转截面为 $3.9 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 即 $0.039 \mu\text{m}^2/\text{bit}$, 与器件灵敏区的表面积基本一致. 该 SEU 截面略大于上一节放射源试验获得的 SEU 截面值 (65 nm SRAM 的 SEU 截面平均值为 $2.89 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{bit}$), 差别源于放射源试验中粒子能量及入射方向与仿真不同. 随着入射角度从 0°增大至 60°, 器件的单粒子翻转截面增大了 79%, 该现象与图 8 中“粒子数峰值处对应的沉积能量值呈减小趋势”的规律相反. 经分析得知原因为, 虽然随着入射角度增大, 粒子数峰值处对应的沉积能量值有所减小, 但该能量值高于器件的临界能量, 对单粒子翻转截面影响较小; 另一方面, 不同于以往大尺寸器件的“薄片”形灵敏区, 该器件的灵敏区三维尺寸为 $0.2 \mu\text{m}(L) \times 0.19 \mu\text{m}(W) \times 0.45 \mu\text{m}(D)$, 导致明显的单粒子翻转“边缘效应” (见图 12).

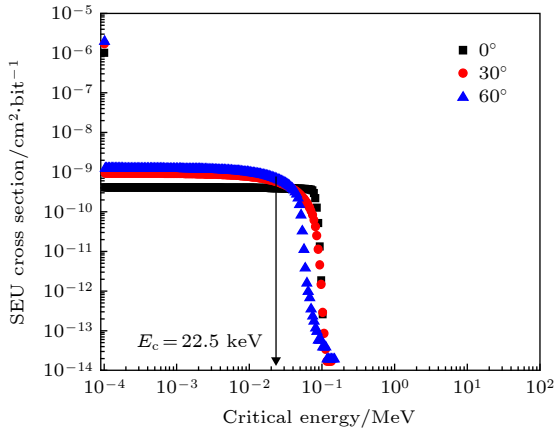


图 10 不同入射角度下单粒子翻转截面与临界能量的关系
Fig. 10. Relationship between single event upset cross section and critical energy at different incident angles.

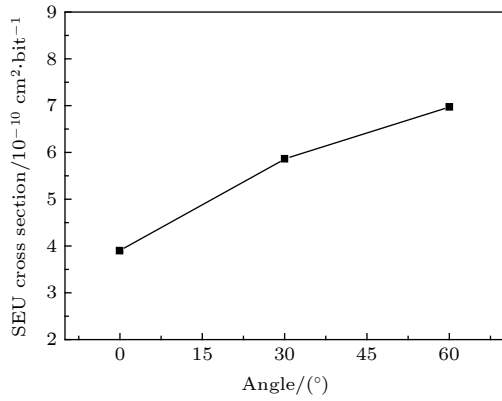


图 11 不同入射角度下的单粒子翻转截面
Fig. 11. Single event upset cross section at different incident angles.

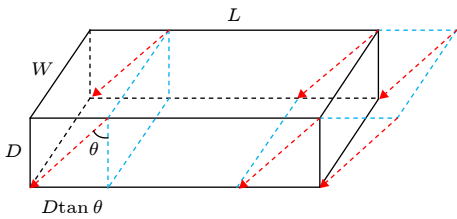


图 12 边缘效应示意图 (未按实际比例绘图)^[20,21]
Fig. 12. Schematic diagram of edge effect (not scaled)^[20,21].

如图 12 所示, 垂直入射条件下, 器件的单粒子翻转截面为

$$\sigma = W \times L, \quad (4)$$

其中 W 为灵敏区的宽度, L 为灵敏区的长度. 倾角入射条件下, 若离子 LET 值足够大, 路径长度变短并不影响入射离子在灵敏区中沉积足够的能量产生单粒子翻转, 即沉积能量仍大于临界能量. 则单粒子翻转截面为

$$\sigma = W(L + D \tan(\theta)), \quad (5)$$

其中 D 为灵敏区的厚度, θ 为入射粒子方向与器件法线之间的夹角. 因此, 边缘效应导致的单粒子翻转截面最大偏差为

$$\left| \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right| = \frac{|WL - W(L \pm D \tan(\theta))|}{WL} = \frac{D}{L} \tan(\theta), \quad (6)$$

计算可得该最大偏差为 390%. 对于本文的情况, 由图 8 可知 60° 倾角入射条件下粒子数峰值处对应的沉积能量值为 49 keV, 比 65 nm SRAM 的临界能量 (22.5 keV) 高超过两倍. 当入射粒子沿图 12 模型中灵敏区的边缘入射时, 粒子在灵敏区中的路径长度将减小, 导致沉积能量降低, 若该能量小于临界能量, 将不能引起单粒子翻转. 所以, 边缘效应导致倾角入射条件下单粒子翻转截面的增大, 但 (6) 式中的最大偏差为极限情况, 故本文中单粒子翻转截面的增量小于该值.

4 结论

本文基于 Am-241 放射源, 搭建 SRAM 单粒子效应测试系统, 结合 α 粒子辐照试验、反向分析和蒙特卡罗仿真开展 α 粒子在 65 和 90 nm 工艺 SRAM 器件中的软错误机理研究. 研究表明, 65 nm SRAM 在 Am-241 放射源加速试验条件下的 α 粒子单粒子翻转截面约为 $2.89 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 远高于 90 nm SRAM, 且未表现出明显的翻转极性. 结合其塑封料的 ULA 级 α 粒子发射率, 计算得到该器件的 α 粒子软错误率为 303 FIT/Mb, 对总体软错误率的贡献占比为 70.63% (北京海平面).

基于反向分析结果构建器件三维仿真模型, 65 nm SRAM 器件使用六层金属布线, 灵敏区大小为 $0.2 \mu\text{m}(x) \times 0.19 \mu\text{m}(y) \times 0.45 \mu\text{m}(z)$, 临界电荷约为 1 fC. 蒙特卡罗仿真表明, 65 nm SRAM 器件的灵敏区沉积能量谱和单粒子翻转截面表现出明显的入射角度依赖性. 随着入射角度从 0° 增大至 60°, 灵敏区中粒子数峰值处对应的沉积能量值减小了 40%, 原因为衰变 α 粒子的能量较低, 入射角度增大导致 α 粒子穿过空气层和多层金属布线的厚度增大 $1/\cos(\theta)$ 倍, 引起粒子能量减小, 有效 LET 值随之减小. 随着入射角度从 0° 增大至 60°, 单粒子翻转截面增大了 79%, 原因为 65 nm 器件灵敏区中明显的单粒子翻转边缘效应.

参考文献

- [1] May T C, Woods M H 1979 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **ED-26** 2
- [2] Bhuva B 2018 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 1–5, 2018 p34.4.1
- [3] Lei Z F, Zhang Z G, En Y F, Huang Y 2018 *Chin. Phys. B* **27** 066105
- [4] Wang X, Zhang F Q, Chen W, Guo X Q, Ding L L, Luo Y H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 052901 (in Chinese) [王勋, 张凤祁, 陈伟, 郭晓强, 丁李利, 罗尹虹 2019 *物理学报* **68** 052901]
- [5] JESD89 A *Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices* JEDEC standard, October 2006 [标准]
- [6] Auden E C, Quinn H M, Wender S A, O' Donnell J M, Lisowski P W, George J S, Xu N, Black D A, Black J D 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 29
- [7] Weulersse C, Houssany S, Guibbaud N, Segura-Ruiz J, Beaucour J, Miller F, Mazurek M 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1851
- [8] Autran J L, Munteanu D, Sauze S, Gasiot G, Roche P 2014 *IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW)* Paris, France, July 14–18, 2014 p1
- [9] Lee S, Uemura T, Monga U, Choi J H, Kim G, Pae S 2017 *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* Monterey, CA, USA, April 2–6, 2017 pSE-1.1
- [10] Uemura T, Lee S, Min D, Moon I, Lim J, Lee S, Sagong H C, Pae S 2018 *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* Burlingame, CA, USA, March 11–15, 2018 pSE.1-1
- [11] Fang Y, Oates A S 2018 *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* Burlingame, CA, USA, March 11–15, 2018 p4C.2-1
- [12] Zhang Z, Lei Z, Tong T, Li X, Xi K, Peng C, Shi Q, He Y, Huang Y, En Y 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1368
- [13] The Stopping and Range of Ions in Matter, Ziegler J F <http://www.srim.org/> [2019-7-3]
- [14] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U 1985 *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press)
- [15] Adams J H, Barghouty A F, Mendenhall M H, Reed R A, Sierawski B D, Warren K M, Watts J W, Weller R A 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3141
- [16] Tylka A J, Adams J H, Boberg P R, Brownstein B, Dietrich W F, Flueckiger E O, Petersen E L, Shea M A, Smart D F, Smith E C 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 2150
- [17] Weller R A, Mendenhall M H, Reed R A, Schrimpf R D, Warren K M, Sierawski B D, Massengill L W 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1726
- [18] Mendenhall M H, Weller R A 2012 *Nucl. Instrum. Methods A* **667** 38
- [19] Zhang Z, Lei Z, En Y, Liu J 2016 *Radiation Effects on Components & Systems Conference (RADECS)* Bremen, Germany, September 19–23, 2016 PH14
- [20] Gu S, Liu J, Zhao F Z, Zhang Z G, Bi J S, Geng C, Hou M D, Liu G, Liu T Q, Xi K 2015 *Nucl. Instrum. Methods B* **342** 286
- [21] Zhang Z G 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张战刚 2013 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]

Mechanisms of alpha particle induced soft errors in nanoscale static random access memories*

Zhang Zhan-Gang¹⁾ Ye Bing²⁾ Ji Qing-Gang²⁾ Guo Jin-Long²⁾ Xi Kai³⁾
 Lei Zhi-Feng^{1)†} Huang Yun^{1)‡} Peng Chao¹⁾ He Yu-Juan¹⁾
 Liu Jie²⁾ Du Guang-Hua²⁾

1) (*Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 510610, China*)

2) (*Material Research Center, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

3) (*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(Received 26 November 2019; revised manuscript received 23 April 2020)

Abstract

In this paper, the Am-241 is used as an alpha particle radioactive source to investigate the soft error mechanism in 65-nm and 90-nm static random access memory (SRAM). Combining reverse analysis, TRIM and CREME-MC Monte Carlo simulation, the energy transport process, deposited energy spectrum and cross-section characteristics of alpha particles in the device are revealed. The results show that the soft error sensitivity of the 65-nm device is much higher than that of the 90-nm device, and no flipping polarity is found. According to the real-time measured soft error rate at an altitude of 4300 m in Tibetan Yangbajing area, the thermal neutron sensitivity and alpha particle soft error rate, the overall soft error rate of 65-nm SRAM used at sea level of Beijing city is 429 FIT/Mb, and the contribution from alpha particles is 70.63%. Based on the results of reverse analysis, a three-dimensional simulation model of the device is constructed to study the influence of the incident angle of alpha particles on the single event upset characteristics. It is found that the corresponding deposition energy value at the peak of the number of particles in the sensitive region decreases by 40% with the incident angle increasing from 0° to 60°. While the single event upset cross section increases by 79% due to the apparent single event upset edge effect in a sensitive region of the 65-nm device.

Keywords: alpha particle, soft error, single event upset, accelerated test

PACS: 61.80.Jh, 61.82.Fk, 85.40.-e, 02.50.Ng

DOI: 10.7498/aps.69.20201796

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61704031), the Science and Technology Research Project of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2017B090901068, 2017B090921001), and the Science and Technology Plan Project of Guangzhou, China (Grant No. 201707010186).

† Corresponding author. E-mail: leizhifeng@ceprei.com

‡ Corresponding author. E-mail: yunhuang@ceprei.com