

# 大气中子在电荷俘获型 3D NAND 闪存中引起的单粒子翻转特性及机理研究\*

李鸿德<sup>1)2)</sup> 张鸿<sup>2)</sup> 焦扬<sup>3)</sup> 雷志锋<sup>2)</sup> 杨炜坤<sup>2)</sup> 李惠<sup>1)</sup>  
路国光<sup>2)†</sup> 张战刚<sup>2)‡</sup>

1) (安徽大学物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601)

2) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性技术全国重点实验室, 广州 511370)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2025 年 8 月 20 日收到; 2025 年 11 月 27 日收到修改稿)

基于中国散裂中子源大气中子辐照谱仪提供的 meV-GeV 宽能谱中子束流, 对 128 层电荷俘获型 (charge trap, CT) 3D NAND 闪存开展中子辐照实验和仿真. 研究发现, CT 型 3D NAND 闪存在宽能谱中子辐照下的主要失效模式为单位翻转 (single bit upset, SBU)、多单元翻转 (multiple cell upset, MCU), 其中 SBU 占比为 82.6%. 通过构建单粒子翻转 (single event upset, SEU) 事件的三维空间分布图发现, 不同于重离子 SEU 的“串型”分布, 中子 SEU 表现出显著的随机空间分布特点, 仅存在少量“串型”分布的 MCU 事件. 在 MCU 事件中, 2 位 MCU 占比最高, 达到 MCU 事件的 83.6%, 高于 2 位的大尺寸 MCU 占比为 16.4%, 最大的 MCU 位数为 7 位. MCU 图形以沿中子入射方向分布为主. 进一步的中子输运仿真结果表明, 中子在器件灵敏区内产生的二次粒子主要为 N 离子和 Si 离子. 其中, 线性能量传输 (linear energy transfer, LET) 小于  $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$  的短射程二次粒子占主导, 是诱发 SBU 的主要因素. 少量 LET 值大、射程长的二次粒子是 MCU 的产生诱因.

**关键词:** 3D NAND 闪存, 大气中子, 单粒子翻转, 多单元翻转

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251123](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251123)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251123](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251123)

## 1 引言

随着平面 NAND 器件遵循摩尔定律持续微缩, 存储单元的电荷保持能力与耐受性等可靠性指标显著恶化<sup>[1]</sup>. 为突破这一瓶颈, 垂直堆叠工艺被引入闪存架构. 其中电荷俘获型 3D NAND 闪存采用圆柱体单元设计和垂直沟道结构大幅提升了存储密度, 栅极包围式结构显著地增强了抗干扰能力, 使辐射环境下的数据保持特性得到系统性的改善<sup>[2-5]</sup>. 但是, 随着电荷俘获型存储单元特征尺寸的

不断缩小, 单个信息位对应的电子数量显著减少, 致使现代闪存对单粒子电离效应的敏感性急剧增强. 这一演变直接表现为: 相较于传统工艺节点, 当代闪存可能被更低电离能力的粒子诱发单粒子翻转事件.

近年来, 闪存器件的单粒子效应 (single-event effects, SEE) 研究取得了显著的进展, 国内外多个研究团队针对不同类型闪存器件开展了系统性研究<sup>[6-15]</sup>. 在重离子辐照效应研究方面, Jiao 等<sup>[16]</sup>对 CT 型 3D NAND 闪存进行了实验研究, 重点分析了多位翻转的数量和尺寸与重离子线性能量传输

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12175045) 和国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0616600) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [luguog@126.com](mailto:luguog@126.com)

‡ 通信作者. E-mail: [zhangangzhang@163.com](mailto:zhangangzhang@163.com)

(linear energy transfer, LET) 值的关联特性. 在辐照效应机理研究方面, Bagatin 等<sup>[17]</sup>发现 FG 型 3D NAND 闪存在大气中子辐照下会出现明显的阈值电压漂移现象. Zheng 等<sup>[18]</sup>通过重离子辐照实验揭示了商用 CT 型 3D NAND 闪存外围电路对单粒子闩锁 (single event latch-up, SEL) 效应具有较高的敏感性. 然而, 目前国内外还未有关于大气中子对 CT 型 3D NAND 闪存辐照效应的研究报道. 随着 CT 型 3D NAND 闪存在航空、通信、汽车等领域的大量应用, 大气中子在其中诱发的 SEE 可能对应用可靠性造成严重威胁, 急需开展 CT 型 3D NAND 闪存的大气中子 SEE 特性和机理研究.

本研究采用实验与蒙特卡罗模拟相结合的方法, 研究了 128 层 CT 型双栈堆叠 3D NAND 闪存中大气中子诱发的单粒子翻转效应. 通过将错误地址转换为三维空间分布图, 分析不同物理形状多单元翻转事件的形成机制. 通过蒙特卡罗仿真揭示中子与器件灵敏区相互作用产生二次粒子的关键特性 (种类、LET 值及射程) 对单粒子翻转的影响机制. 研究表明, 中子辐照产生的二次粒子在三维存储阵列中的空间分布特性是决定 MCU 物理形状特征的关键因素.

## 2 实验参数

### 2.1 被测器件

本研究采用长江存储科技有限责任公司 (YMTC) X2-9060 商用 CT 型 3D NAND 闪存芯片作为实验样品. 图 1(a) 为大气中子束流垂直入射芯片表面; 图 1(b) 为扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 截面图, 显示芯片采用典型三层结构, 自上而下分别为钝化层/金属层、128 层堆叠存储阵列 (双 deck 结构, 总高度 8.7  $\mu\text{m}$ )

和 CMOS 电路层; 图 1(c) 为 3D NAND 闪存模型为 Macaroni 结构设计.

所有测试芯片均配置为单层单元 (single-level cell, SLC) 缓存模式运行. 被测器件在 SLC 模式下总容量为 23 GB, 其存储架构包含 1980 个存储块 (block), 每个 block 由 768 个页 (page) 构成, 每 6 个 page 组成一个物理存储层 (layer), 共 128 个 layer. 实验前连续三次回读筛选出 10 个无随机错误的 block 作为统计基准, 最终测试样本容量为 1006632906 bits.

本研究采用封闭封装测试方案以保证器件真实工作状态. 实验前, 待测芯片所有存储单元写入初始数据 AA. 辐照实验在 25  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下进行, 采用静态测试模式, 中子辐照时间为 30 min, 辐照期间施加额定工作电压并使用厚度为 2 cm 的碳化硼屏蔽热中子干扰. 如图 1(a) 所示, 2.5 cm $\times$ 2.5 cm 的中子束斑完全覆盖芯片表面.

### 2.2 中子源

本研究基于中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 大气中子辐照谱仪 (atmospheric neutron irradiation spectrometer, ANIS) 开展大气中子辐照实验. 如图 2 所示, ANIS 通过高能质子轰击钨靶产生宽能谱中子束<sup>[19-21]</sup>, 其能谱分布 (meV-GeV) 与 JEDEC 标准给出的真实大气中子环境接近<sup>[22]</sup>, 但注量率提升  $10^9$  倍, 可实现大气中子效应的加速模拟.

本实验采用的中子注量率约为  $1\times 10^6 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . 测试结果显示, 在  $1.09\times 10^6$  和  $1.21\times 10^6 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  两种注量率条件下, 器件的单粒子翻转截面保持稳定. 为确保统计可靠性, 实验严格遵循错误发生率  $<1 \text{ s}^{-1}$  的基本原则, 有效地避免了因错误累积导致的统计偏差.

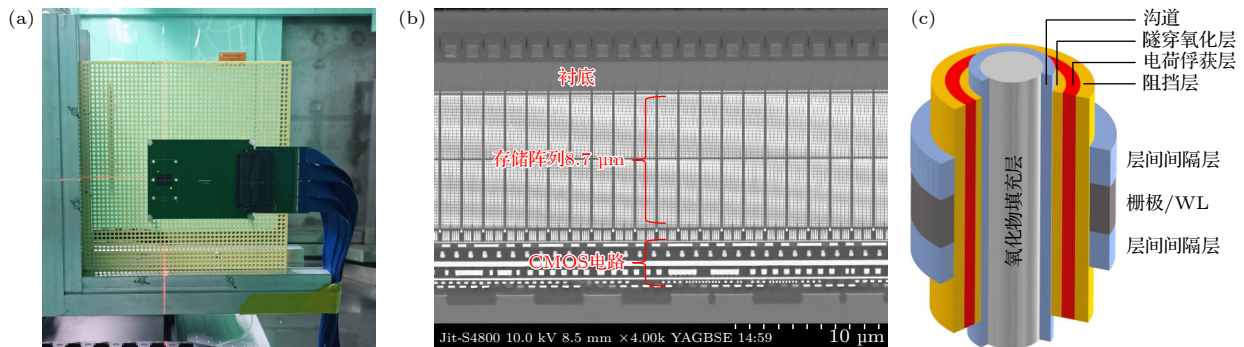


图 1 (a) 被辐照器件; (b) 128 层 3D NAND 闪存的 SEM 视图; (c) 3D NAND 闪存三维模型

Fig. 1. (a) Device under test; (b) SEM view of the 128-layer 3D NAND flash memory; (c) three-dimensional model of 3D NAND flash memory.

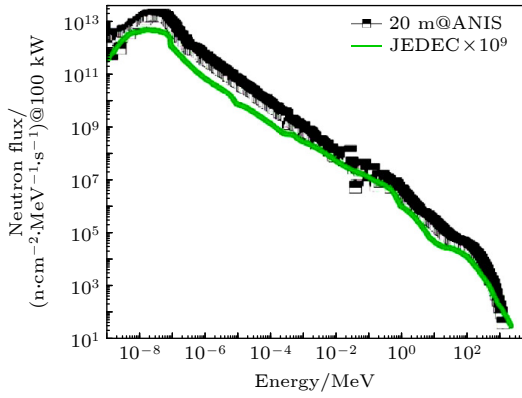


图2 ANIS与JEDEC中子微分能谱的比较<sup>[22]</sup>

Fig. 2. Comparison of neutron differential energy spectra between ANIS and JEDEC<sup>[22]</sup>.

### 3 实验与仿真结果

#### 3.1 实验结果

辐照结束后, 立即对芯片进行连续三次回读, 统计出实验前选取没有随机错误的 block 在辐照后出现的位翻转数. 选取三次回读的中位翻转数 699, 记为本次实验测试得出的有效翻转数.

MCU 的筛选方法: 1) 将实验得到的所有软错误的逻辑地址, 通过位图中的对应关系, 转换为物理地址, 即可获得所有软错误的三维物理空间坐标; 2) 将多个在空间位置上相邻的软错误判断为一个多位翻转事件. 在 3D NAND 闪存中, MCU 事件的定义需考虑其三维结构特性: 将沿同一离子轨迹上多个物理空间相邻的存储位同时发生逻辑状态翻转的单一错误事件视为一个 MCU 事件. 与 2D NAND 器件中局限于 XY 平面的 MCU 分布不同,

3D 器件的 MCU 呈现明显的垂直分布特征. 这些 MCU 事件具有以下关键特征: 1) 统一的位翻转机制; 2) 相邻的字节地址分布; 3) 由单一高能粒子诱发. 值得注意的是, 由于 3D NAND 中每条字线 (WL) 对应独立的页, 沿垂直字符串 (从顶部到底部) 发生的位翻转实际上分布于不同字节地址, 因此在逻辑地址映射层面均表现为单比特翻转.

根据以下公式计算出大气中子的 SEU 截面和 MCU 截面:

$$\sigma_{\text{SEU}} = \frac{N_{\text{upset}}}{\varphi N_{\text{b}}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{MCU}} = \frac{N_{\text{MCU}}}{\varphi N_{\text{b}}}, \quad (2)$$

其中  $\sigma_{\text{SEU}}$  为器件的 SEU 截面;  $N_{\text{upset}}$  为单粒子翻转数;  $\varphi$  为中子总注量, 即实验时间内器件接收到的总中子数;  $N_{\text{b}}$  为测试容量;  $\sigma_{\text{MCU}}$  为器件的 MCU 截面;  $N_{\text{MCU}}$  为 MCU 事件数. 选取  $E > 1 \text{ MeV}$  的总注量代入 (1) 式和 (2) 式, 计算得出  $\sigma_{\text{SEU}} = 2.64 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ,  $\sigma_{\text{MCU}} = 4.61 \times 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{bit}$ .

通过逻辑-物理地址映射转换, 本研究构建了具有三维空间坐标的 SEU 空间分布图. 如图 3(a) 所示, 大气中子诱导 SEU 在三维存储阵列中呈现两种典型分布模式: 1) 随机离散分布; 2) 沿离子轨迹的“串”型分布. 从物理机制来看, 编程操作时栅极电场驱动的电子注入过程会使存储层俘获部分电荷. 当入射中子与存储阵列发生核反应时, 产生的二次粒子引发电离效应, 其产生的电荷被相邻敏感节点共享, 从而导致 MCU. 与图 3(b) 中  $^{78}\text{Kr}$  离子 ( $\text{LET} = 11.4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ) 辐照<sup>[16]</sup>形成的密

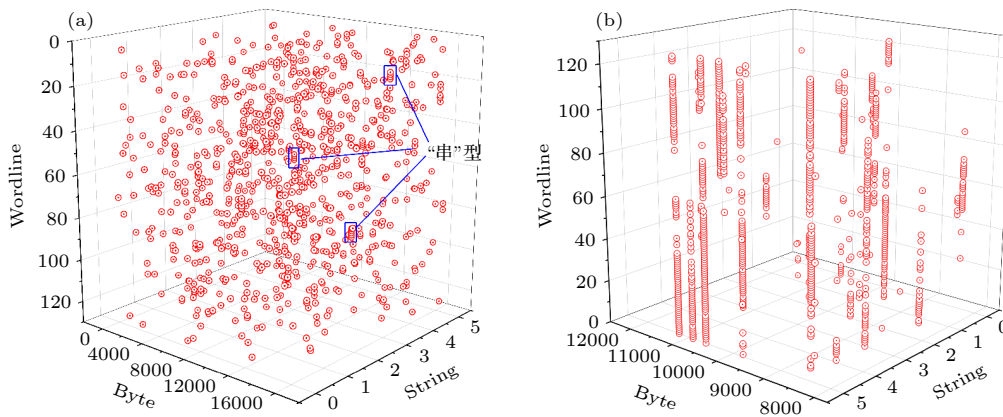










图3 (a) 大气中子辐照条件下, SEU 的三维空间分布图; (b) 在重离子注量为  $1 \times 10^6 \text{ ions}/\text{cm}^2$ ,  $\text{LET} = 11.4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$  条件下的 SEU 三维空间分布<sup>[16]</sup>

Fig. 3. (a) Three-dimensional spatial distribution map of SEU under atmospheric neutron irradiation conditions; (b) under the condition of heavy ion fluence rate of  $1 \times 10^6 \text{ ions}/\text{cm}^2$ , the three-dimensional spatial distribution of SEU with LET of  $11.4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ <sup>[16]</sup>.

集“串”型分布相比,图3(a)中稀疏的“串”型分布特征表明,大气中子与存储层相互作用产生的二次粒子中存在少量的LET值大,射程长的重离子.

如图3(a)所示,大气中子诱发的MCU事件呈现出多样化的三维空间分布图形<sup>[23]</sup>.通过对这些不同尺寸的MCU事件进行分类统计,本研究获得了如表1所列的定量分析结果.

表1 测试结果汇总  
Table 1. Summary of test results.

错误类型	数量	MCU的物理形状
SBU	577	/
MCU	122	/
MCU2	90	
	12	
MCU3	9	
	2	
MCU4	5	
MCU5	2	
MCU6	1	
MCU7	1	

为深入地探究MCU的产生机制,本研究采用MCU/SEU比值作为参数进行统计分析:

$$W_{MCU} = \frac{N_{MCU}}{N_{SBU} + N_{MCU}}, \quad (3)$$

其中  $W_{MCU}$  为MCU所占的比例,  $N_{MCU}$  为MCU ( $\geq 2$  bit) 的个数,  $N_{SBU}$  为SBU的个数. 统计得出MCU约占SEU总数的17.45%.

如表1所列,MCU事件呈现显著的范围依赖性:MCU( $\geq 2$  bits)占比仅为17.45%,而SBU占比高达82.55%.这一分布特征与大气中子能谱特性密切相关,其中  $E < 10$  MeV 的中子占主导,  $E > 10$  MeV 的中子数量较少.中子与存储单元相互作用生成的大部分二次粒子具备低LET值、射程短的特性.这些粒子由于LET值低,且射程较短,无法穿透相邻存储层.因此,其能量沉积被有效地限制在单个存储单元内,从而成为触发SBU的关键因素.少量LET值大,射程长的二次粒子是诱发MCU事件的主要机制,且所有MCU事件在存储阵列中均呈现随机分布特征,验证了其大气中子诱发的内在机理.

图4为不同尺寸MCU的来源示意图,图中红色为发生翻转的存储单元.当高能中子入射存储阵列时,其产生的二次粒子沿径迹引发存储单元阈值电压 ( $V_{th}$ ) 漂移,当漂移量超过参考电压时即发生单元翻转<sup>[24]</sup>.值得注意的是,由于通孔蚀刻工艺高刻蚀比的原因,整个通孔呈现圆锥形,导致各存储层的电荷俘获特性存在差异,即使处于同一离子径迹上的存储单元也并非全部发生翻转.如图4所示,中子辐照产生的二次粒子多数沿通孔方向(即中子入射轨迹)运动,其空间分布特征表现为:遵循通孔轴向传播,形成贯穿多存储层的连续离子径迹,导致沿垂直方向(Z轴)排列的大尺寸MCU事件.少数二次粒子运动轨迹偏离入射方向,这些离子具有较低LET值、短射程,空间影响范围小的特性.

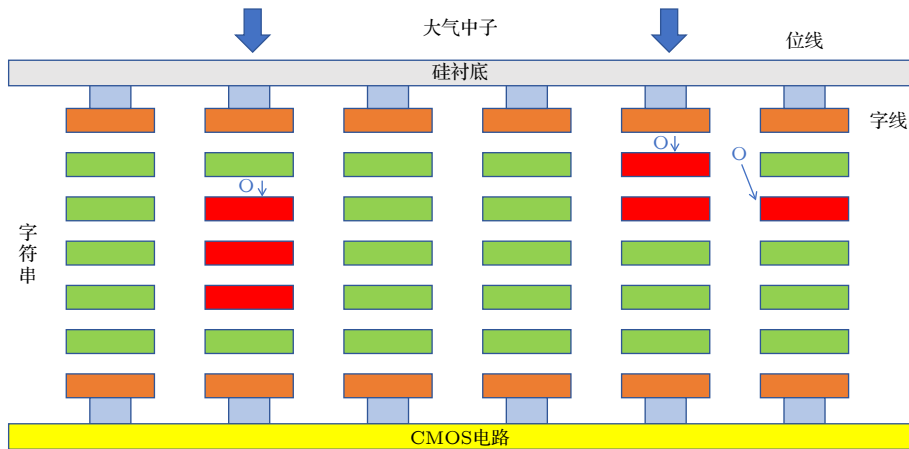


图4 不同尺寸MCU的来源示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the sources of MCU of different sizes.

物理机制分析表明, 大尺寸 MCU 事件的形成主要取决于以下关键因素: 1) 离子径迹与敏感体积中心的距离. 当二次粒子轨迹靠近敏感区中心时, 产生的  $V_{th}$  漂移量足以克服工艺波动引起的临界电荷变化. 2) 二次粒子特性. 中子产生具有较高 LET 值和较长射程的二次粒子更易诱发大尺寸 MCU. 实验观测结果与理论分析吻合: 由于大气中子谱中  $E > 10$  MeV 的中子占比较低 (图 2), 导致高 LET 值二次离子产额较低, 这直接解释了大尺寸 MCU (>2 bits) 的发生率约占 SEE 事件的 2.86%.

### 3.2 蒙特卡罗仿真

本研究基于文献 [24,25] 和反向分析结果构建了 128 层 3D NAND 闪存的存储单元仿真模型. 如图 5 所示, 该结构采用圆柱形通孔设计, 其 A-A 剖面自内向外依次为: 20 nm 氧化物填充层、10 nm 多晶硅沟道、8 nm  $SiO_2$  隧穿层、8 nm  $Si_3N_4$  电荷俘获层及 8 nm  $Al_2O_3$  阻挡层. 模拟设置中,  $1 \times 10^9$  个中子垂直入射, 穿过衬底到达存储阵列, 中子能谱分布与实测数据 (图 2) 保持一致. 如图 6 所示, 选取单层存储层作为敏感区 (sensitive volume, SV), 其几何参数为 92 nm (外径)  $\times$  76 nm (内径)  $\times$  34 nm (厚度).

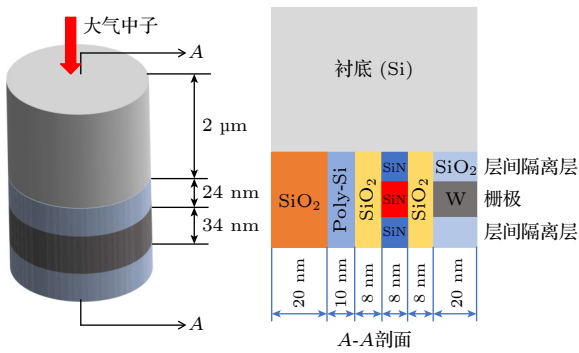


图 5 NAND 闪存器件模型  
Fig. 5. Model of the NAND flash device.

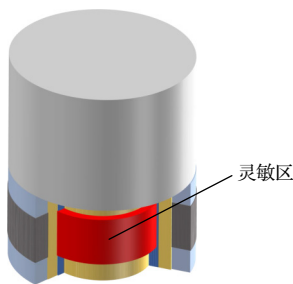


图 6 敏感区及其位置  
Fig. 6. Sensitivity volume and its position.

图 7 为大气中子在灵敏体积中产生的二次粒子种类分布 ( $E > 1$  MeV), 生成的二次粒子以硅离子 (占比 37.98%) 和氮离子 (占比 27.95%) 为主. 由于灵敏区材料为氮化物, 所以中子与灵敏区之间的相互作用主要是弹性碰撞, 并在此过程中生成二次粒子.

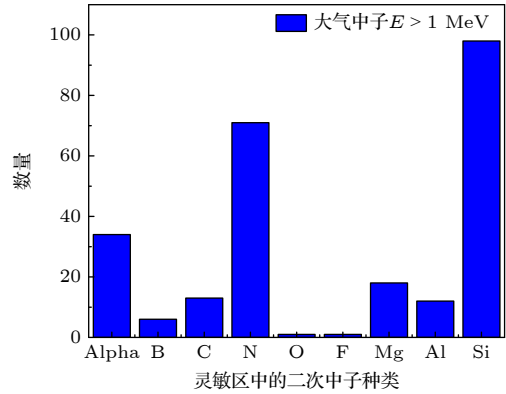


图 7 大气中子在器件灵敏体积中产生的二次粒子种类分布 ( $E > 1$  MeV)  
Fig. 7. Atmospheric neutrons induced secondary particle distribution in the device SV ( $E > 1$  MeV).

图 8 的模拟结果表明: 大多数二次粒子具有低 LET 值 ( $< 5$  MeV $\cdot$ cm $^2$  $\cdot$ mg $^{-1}$ ) 和短射程 ( $< 100$  nm), 这些二次粒子是 SBU 的主要诱因. 但仍有约 1.2% 的离子呈现高 LET 值 ( $> 10$  MeV $\cdot$ cm $^2$  $\cdot$ mg $^{-1}$ ) 的特性, 并且 32.68% 的离子具有长射程 ( $> 1$   $\mu$ m), 灵敏区中二次粒子的 LET 值最高达 12.05 MeV $\cdot$ cm $^2$  $\cdot$ mg $^{-1}$ . 对于本研究采用的存储单元 (图 6), 这些二次粒子可沿通孔方向贯穿多达 7 个相邻单元, 从而诱发大

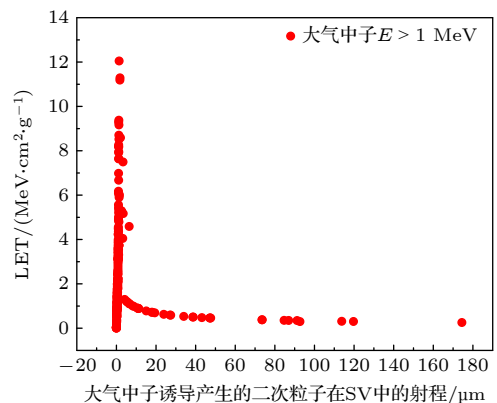


图 8 大气中子诱导产生的二次粒子在 SV 中的 LET 值和射程 ( $E > 1$  MeV)  
Fig. 8. The LET value and range of secondary particles generated by atmospheric neutrons in the device SV ( $E > 1$  MeV).

尺寸 MCU 事件. 值得注意的是, 尽管二次粒子主要垂直入射有源层, 但中心区域存在少量的二次粒子会产生斜向径迹, 这正是表 1 中观测到的不同 MCU 物理形状的根本成因. 模拟结果与实验数据的良好吻合, 验证了该物理模型的准确性.

基于图 8 可对 3D NAND 闪存产生 SEU 的临界电荷进行计算. 对同一临界电荷区间内二次粒子进行统计计算, 等效为同一临界电荷区间内二次粒子的分布. 根据 Zhang 等<sup>[26]</sup>报道的 (5) 式, 得出临界电荷:

$$Q_C = \frac{LET_{th}\rho_{Si}d}{3.6 \times 10^{-6}} \times 1.6 \times 10^{-4}, \quad (4)$$

其中  $Q_C$  为临界电荷, 单位 fC;  $LET_{th}$  为诱发 SEU 的 LET 阈值, 单位为  $MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}$ ;  $\rho_{Si}$  为硅材料的密度, 单位为  $mg/cm^3$ ;  $d$  为灵敏区的厚度, 单位为 cm.

由于灵敏区的入射面积相比大气中子入射面积相差较大, 故通过 (5) 式归一化二次粒子在灵敏区中的沉积电荷分布概率:

$$W_{LET} = \frac{N}{N_{总}} \frac{S_{SV}}{S_{Si}}, \quad (5)$$

其中  $W_{LET}$  为二次粒子沉积电荷的分布概率,  $N$  为一个沉积电荷范围内入射中子的数量,  $N_{总}$  为入射的二次粒子总数量 ( $10^9$  个),  $S_{SV}$  为中子入射灵敏区的面积,  $S_{Si}$  为中子入射硅的面积.

图 9 为大气中子在器件灵敏区内二次粒子的沉积电荷. 由于敏感体面积较小, 实际进入灵敏区的有效通量较低. 在图 9 中, 二次粒子在灵敏区中临界电荷最大可达 4.24 fC. 统计结果显示, 临界电

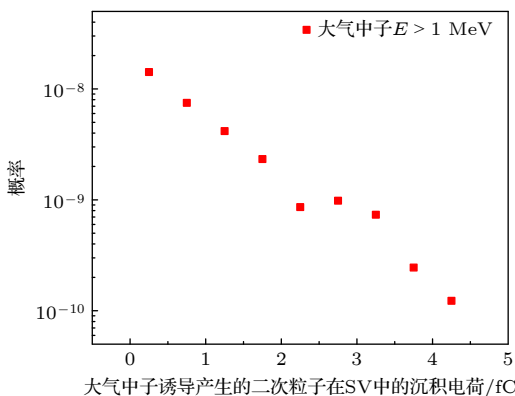


图 9 大气中子诱导产生的二次粒子在 SV 中的沉积电荷 ( $E > 1$  MeV)

Fig. 9. Deposition charge of atmospheric neutrons in the device SV ( $E > 1$  MeV).

荷  $Q_C > 3.3$  fC 的二次粒子仅占比 1.2%, 对应 LET 值  $> 10$   $MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}$ . 这一分布特征与观测结果相符: 大尺寸 MCU ( $> 2$  bits) 占 SEE 事件的 2.86%, 与高 LET 值二次粒子的作用机制相符.

## 4 结 论

本研究基于中国散裂中子源提供的大气中子辐照谱仪, 对 128 层 CT 型 3D NAND 闪存开展中子辐照实验研究和仿真. 研究发现, CT 型 3D NAND 闪存主要失效模式为 SBU 和 MCU, SBU 事件为 577 个, MCU 事件为 122 个. 通过构建 SEU 三维空间分布图发现, 不同于重离子 SEU 的“串型”分布, 中子 SEU 表现为显著的随机分布, 仅存在少量“串型”分布的 MCU 事件. 在 MCU 事件中, 2 位 MCU 占比最高, 达到 MCU 事件的 83.6%, 高于 2 位的大尺寸 MCU 占比为 16.4%, 最大的 MCU 位数为 7 位. MCU 图形主要沿中子入射方向分布.

基于实验和反向分析结果建立器件模型, 开展中子输运仿真.  $E > 1$  MeV 中子在器件灵敏区中产生丰富的二次粒子, 主要以氮离子和硅离子为主, 由于灵敏区材料为氮化物, 这表明中子与灵敏区之间的相互作用主要以弹性碰撞为主, 生成二次粒子. 进一步模拟分析显示, 器件灵敏区内产生的二次粒子中, LET 值  $< 10$   $MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}$ , 短射程的二次粒子占主导, 是诱发 SBU 的主要因素. 少量高 LET 值、长射程的二次粒子是 MCU 的产生诱因.

感谢中国散裂中子源和大气中子辐照谱仪研究工作人员在实验方面对本工作的支持.

## 参 考 文 献

- [1] Marinella M J 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 546
- [2] Righetti G P N 2017 *IEEE International Integrated Circuit Reliability Workshop (IIRW)* South Lake Tahoe, CA, USA, October 8–12, 2017 p51
- [3] Mizoguchi K, Takahashi T, Aritome S, Takeuchi K 2017 *IEEE International Memory Workshop (IMW)* Monterey, CA, USA, May 14–17, 2017 p119
- [4] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A, Beltrami S, Camerlenghi E, Bertuccio M, Costantino A, Zadeh A, Ferlet-Cavrois V, Santin G, Daly E 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 318
- [5] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A, Beltrami S 2024 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **71** 412
- [6] Wilcox E P, Campola M J 2019 *IEEE Radiation Effects Data*

- Workshop (REDW)* San Antonio, TX, USA, July 8–12, 2019 p238
- [7] Coïc L, Augustin G, Serrano L, Guillermin J, Chatry N, Carron J, Ecoffet R 2022 *Radiation Effects on Components and Systems Conference (RADECS)* Venice, Italy, October 3–7, 2022 p1
- [8] Oldham T R, Ladbury R L, Friendlich M, Kim H S, Berg M D, Irwin T L, Seidleck C, LaBel K A 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3217
- [9] Schmidt H, Walter D, Gliem F, Nickson B, Harboe-Sorensen R, Virtanen A 2008 *IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW)* Tempe, AZ, USA, July 14–18, 2008 p38
- [10] Irom F, Nguyen D N, Bagatin M, Cellere G, Gerardin S, Paccagnella A 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 266
- [11] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A, Ferlet-Cavrois V 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2675
- [12] Wilcox E P, Breeding M L, Casey M C, Pellish J A, Reed R A, Alles M L, Schrimpf R D 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 835
- [13] Conway P M, Gadlage M J, Ingalls J D, Williams A M, Bruce D I, Bossev D P 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 466
- [14] Chen D, Wilcox E, Ladbury R L, Kim H, Phan A, Seidleck C, LaBel K A 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 332
- [15] Chen D, Wilcox E, Ladbury R L, Seidleck C, Kim H, Phan A, LaBel K A 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 19
- [16] Jiao Y, Yang J, Wang Q, Xi K, Li X, Liu Y, Chen Q, Li Z, Sun Y, Zhao P, Liu J 2025 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **72** 2689
- [17] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A, Beltrami S, Cazzaniga C, Frost C D 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1361
- [18] Zheng X, Wang Y, Mo R, Wei Z, Mei B, Liu C, Huo M, Xiao L 2025 *6th International Conference on Radiation Effects of Electronic Devices (ICREED)* Yangzhou, China, April 16–18, 2025 p1
- [19] Yu Q Z, Yin W, Liang T J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 052501 (in Chinese) [于全芝, 殷雯, 梁天骄 2011 物理学报 **60** 052501]
- [20] Shen F, Liang T R, Yin W, Yu Q Z, Zuo T S, Yao Z E, Zhu T, Liang T J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 152801 (in Chinese) [沈飞, 梁泰然, 殷雯, 于全芝, 左太森, 姚泽恩, 朱涛, 梁天骄 2014 物理学报 **63** 152801]
- [21] Wang X, Zhang F Q, Chen W, Guo X Q, Ding L L, Luo Y H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 052901 [王勋, 张凤祁, 陈伟, 郭晓强, 丁李利, 罗尹虹 2019 物理学报 **68** 052901]
- [22] Yu Q Z 2024 *Appl. Radiat. Isot.* **203** 111075
- [23] Zhang Z, Lei Z F, Tong T, Li X H, Xi K, Peng C, Shi Q, He Y J, Huang Y, En Y F 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1368
- [24] Park J, Han J W, Yoon G, Go D, Kim D, Kim J, Lee J S 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 6089
- [25] TechInsights, <https://www.techinsights.com/blog/ymtcs-xtack-ing-30-not-what-techinsights-was-expecting-see> [2025-11-27]
- [26] Zhang Z G, Liu J, Sun Y M, et al. 2014 *10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRAMS)* Guangzhou, China, August 6–8, 2014 p114

## Characteristics and mechanisms of single event upset induced by atmospheric neutrons in charge trap 3D NAND flash memory\*

LI Hongde<sup>1)2)</sup>    ZHANG Hong<sup>2)</sup>    JIAO Yang<sup>3)</sup>    LEI Zhifeng<sup>2)</sup>  
 YANG Weikun<sup>2)</sup>    LI Hui<sup>1)</sup>    LU Guoguang<sup>2)†</sup>    ZHANG Zhangang<sup>2)‡</sup>

1) (*Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China*)

2) (*National Key Laboratory of Reliability Technology for Electronic Components, Fifth Institute of Electronics, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China*)

3) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*)

( Received 20 August 2025; revised manuscript received 27 November 2025 )

### Abstract

In this work, an experimental study on the atmospheric neutron single-event effects in 128-layer charge trapping (CT) 3D NAND flash memory is conducted by using the atmospheric neutron irradiation spectrometer (ANIS) at the China Spallation Neutron Source (CSNS). By integrating irradiation experiments, reverse analysis, and Monte Carlo neutron transport simulations, the influence of atmospheric neutron irradiation on the multiple-cell upset (MCU) susceptibility of CT 3D NAND flash memory is investigated and the underlying

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12175045), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFF0616600).

† Corresponding author. E-mail: [luguog@126.com](mailto:luguog@126.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhangangzhang@163.com](mailto:zhangangzhang@163.com)

mechanisms, including the distribution of secondary particles within the sensitive volume and the characteristics of deposited charge are analyzed.

The results indicate that under broad-spectrum neutron irradiation, the primary failure modes in CT 3D NAND flash memory are single-bit upsets (SBU) and MCU, with SBU accounting for 82.55% of the total events. By constructing a three-dimensional spatial distribution map of single-event upset (SEU), it is observed that compared with the dense “string-like” distribution formed by  $^{78}\text{Kr}$  ion irradiation ( $\text{LET} = 11.4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ), the spatial distribution resulting from neutron-induced SEU is much more random, with the former having only a small number of MCU showing a “string-like” pattern. Among the MCU events, 2-bit MCUs are dominant, accounting for 83.6% of all MCUs, while larger sized MCUs ( $>2$  bits) makes up 16.4%. The maximum observed MCU size is 7 bits. Furthermore, the spatial distribution of MCUs is primarily aligned along the direction of neutron incidence.

By using the reverse analysis results, a device model is constructed, and Monte Carlo neutron transport simulations are performed. The simulation results reveal that secondary particles generated in the sensitive volume (SV) of the device by neutrons with energy  $E > 1 \text{ MeV}$  are predominantly silicon ions (37.98%) and nitrogen ions (27.95%). Since the SV material is nitride, the interaction between neutrons and the SV is mainly elastic scattering, during which secondary particles are produced. Among the secondary particles generated in the SV, most propagate along the direction of neutron incidence, while a small number of secondary particles in the central region produce oblique tracks. The majority of secondary particles generated in the SV have low LET values ( $<5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ) and short ranges ( $<100 \text{ nm}$ ), and these secondary particles are the primary cause of SBU. However, approximately 1.2% of the ions exhibit high linear energy transfer (LET) values ( $>10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ), with the maximum LET value of secondary particles in the SV reaching  $12.05 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ . A small number of secondary particles with high LET values and long ranges are responsible for generating MCUs.

**Keywords:** 3D NAND Flash, atmospheric neutron, single event upset, multi cell upset

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251123](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251123)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251123](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251123)

大气中子在电荷俘获型3D NAND闪存中引起的单粒子翻转特性及机理研究

李鸿德 张鸿 焦扬 雷志锋 杨炜坤 李惠 路国光 张战刚

**Characteristics and mechanisms of single event upset induced by atmospheric neutrons in charge trap 3D NAND flash memory**

LI Hongde ZHANG Hong JIAO Yang LEI Zhifeng YANG Weikun LI Hui LU Guoguang ZHANG Zhangang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030817 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251123

CSTR: 32037.14.aps.75.20251123

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251123>

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

质子辐照作用下浮栅单元的数据翻转及错误退火

Data inversion and erroneous annealing of floating gate cell under proton radiation

物理学报. 2022, 71(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212405>

3D NAND闪存中氟攻击问题引起的字线漏电的改进

Improvement of fluorine attack induced word-line leakage in 3D NAND flash memory

物理学报. 2024, 73(6): 068502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231557>

近存计算架构AI芯片中子单粒子效应

Neutron induced single event effects on near-memory computing architecture AI chips

物理学报. 2024, 73(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240430>

基于3D-NAND的神经形态计算

3D-NAND flash memory based neuromorphic computing

物理学报. 2022, 71(21): 210702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220974>

基于青藏高原的14 nm FinFET和28 nm平面CMOS工艺SRAM单粒子效应实时测量试验

Experimental study on real-time measurement of single-event effects of 14 nm FinFET and 28 nm planar CMOS SRAMs based on Qinghai-Tibet Plateau

物理学报. 2023, 72(14): 146101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230161>

一种基于3D NAND存储器的存算一体架构及其系统技术协同优化仿真

A compute-in-memory architecture and system-technology codesign simulator based on 3D NAND flash

物理学报. 2025, 74(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250891>