

纳米静态随机存储器质子单粒子多位翻转角度相关性研究

罗尹虹 张凤祁 郭红霞 郭晓强 赵雯 丁李利 王国明

Angular dependence of proton single event multiple-cell upsets in nanometer SRAM

Luo Yin-Hong Zhang Feng-Qi Guo Hong-Xia Guo Xiao-Qiang Zhao Wen Ding Li-Li Wang Yuan-Ming

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 216103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.216103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cu 对用于高速相变存储器的 Sb_2Te 薄膜的结构及相变的影响研究

Effect of Cu on the structure and phase-change characteristics of Sb_2Te film for high-speed phase change random access memory

物理学报.2015, 64(15): 156102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.156102>

应用于相变存储器的 $\text{Cu-Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜的结构及相变特性研究

Structure and phase change in $\text{Cu-Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films for use in phase change random access memory

物理学报.2015, 64(1): 016103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.016103>

生长条件对脉冲激光沉积制备 ZnO:Al 薄膜光电性能的影响

Influence of the growth conditions on the transparent conductive properties of ZnO:Al thin films grown by pulsed laser deposition

物理学报.2013, 62(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.216102>

低温下二硫化钼电子迁移率研究

Investigation on mobility of single-layer MoS_2 at low temperature

物理学报.2013, 62(20): 206101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.206101>

串口型铁电存储器总剂量辐射损伤效应和退火特性

Serial ferroelectric memory ionizing radiation effects and annealing characteristics

物理学报.2013, 62(15): 156107 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.156107>

纳米静态随机存储器质子单粒子多位翻转 角度相关性研究*

罗尹虹[†] 张凤祁 郭红霞 郭晓强 赵雯 丁李利 王园明

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2015年5月11日收到; 2015年7月10日收到修改稿)

器件特征尺寸的减小带来单粒子多位翻转的急剧增加, 对现有加固技术带来了极大挑战. 针对 90 nm SRAM(static random access memory, 静态随机存储器)开展了中高能质子入射角度对单粒子多位翻转影响的试验研究, 结果表明随着质子能量的增加, 单粒子多位翻转百分比和多样性增加, 质子单粒子多位翻转角度效应与质子能量相关. 采用一种快速计算质子核反应引起单粒子多位翻转的截面积分算法, 以 Geant4 中 Binary Cascade 模型作为中高能质子核反应事件发生器, 从次级粒子的能量和角度分布出发, 揭示了质子与材料核反应产生的次级粒子中, LET(linear energy transfer)最大, 射程最长的粒子优先前向发射是引起单粒子多位翻转角度相关性的根本原因. 质子能量、临界电荷的大小是影响纳米 SRAM 器件质子多位翻转角度相关性的关键因素. 质子能量越小, 多位翻转截面角度增强效应越大; 临界电荷的增加将增强质子多位翻转角度效应.

关键词: 质子, 纳米随机静态存储器, 单粒子多位翻转, 角度效应

PACS: 61.82.Fk, 25.40.Ep, 85.30.De

DOI: 10.7498/aps.64.216103

1 引言

随着器件特征尺寸发展到纳米尺度, 存储单元临界电荷降低, 存储单元间距减小, 使得单个离子入射引起多个物理上相邻位同时发生翻转即单粒子多位翻转(MCU)已成为空间单粒子软错误的主要来源. 由于多位翻转极大地增加了器件单粒子翻转(SEU)软错误率, 即使在器件版图设计中采用了位间隔交错技术, 累积一个字里的多位翻转(MBU)的概率仍急剧增加, 对现有EDAC(error detection and correction)加定时刷新的加固技术产生了极大挑战.

质子和重离子是空间辐射环境中造成器件单粒子效应的两大来源. 国际上针对纳米器件重离子单粒子多位翻转的研究较多并形成了一些结论^[1-5], 结果表明随着离子入射角度的增加, 多位

翻转的多样性、翻转位数和百分比均明显增加, 因此多位翻转的角度效应是器件抗单粒子加固设计时必须考虑的问题. 而质子单粒子多位翻转研究方面, 传统的质子单粒子效应地面试验方法, 认为中高能质子与材料发生核反应产生较高LET值的次级粒子所引起的单粒子效应是各向同性的, 试验中不考虑入射质子的方向^[6]. 1988年Koga等^[7]首次实验报道了1.25 μm SRAM器件在50 MeV质子辐照下SEU截面的各向异性. 随着器件工艺的发展, 2002年Reed等^[8]在实验中发现0.35 μm SOI(silicon on insulator)工艺SRAM和0.5 μm SOS(silicon on sapphire)工艺预分频器质子不同角度入射引起的SEU截面差异可达一个量级, 并指出灵敏体积纵横比高的器件即纵向厚度小于横向两维尺寸的器件易观察到质子角度效应. 2004年Buchner等^[9]首次针对单粒子多位翻转报道了16 M DRAM(dynamic random access memory)观

* 国家科技重大专项(批准号: 2014ZX01022-301)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn

观察到质子大角度入射时单粒子双位翻转具有增强效应, 并基于蒙卡方法计算了质子能量和临界电荷对双位翻转截面的影响. 2005年 Ikedade 等^[10]开展了同步 0.18 μm SRAM 质子单粒子多位翻转试验研究, 结果显示, 对于 30 MeV 和 70 MeV 质子, 垂直入射多位翻转截面小于倾角入射, 计算表明质子能量越小, 前向散射的次级粒子越多. 国内由于缺乏可用于单粒子效应试验的中高能质子加速器, 因此可见报道的质子单粒子效应实验所采用的最大质子能量仅为 35 MeV^[11], 难以充分观察质子核反应对单粒子效应的影响. 质子单粒子效应研究工作主要集中在采用蒙卡方法开展质子单粒子翻转截面的计算工作^[12-14], 对单粒子翻转和多位翻转的角度相关性研究在试验和理论方面基本处于空白.

综上所述, 针对纳米器件单粒子多位翻转角度相关性研究国内外还未见公开报道, 质子入射角度在不同因素下对单粒子多位翻转影响的物理机理还没有形成清晰的认识. 本文基于瑞士保罗谢勒研究所 (PSI) 的中高能质子辐照装置对 90 nm SRAM 器件开展了纳米器件质子单粒子多位翻转角度相关性研究工作, 从试验和理论两方面分析了中高能质子入射角度对单粒子多位翻转的影响, 揭示了单粒子多位翻转角度相关性的物理机理以及关键影响因素, 为下一步国内质子单粒子效应模拟试验技术的建立打下了良好的基础.

2 实 验

质子单粒子效应试验在瑞士保罗谢勒研究所质子辐照装置 (PIF) 上完成, 该装置最大质子能量 250 MeV, 初始能量 230 MeV 和 74 MeV. 试验中为研究中高能质子核反应产生的次级粒子可能引入的角度相关性, 试验中质子能量点选择为 150, 70, 30 MeV 共 3 个能量点. 基于 230 MeV 质子采用降能片衰减到 150 MeV 质子, 基于 74 MeV 质子采用不同厚度降能片衰减到 70 MeV, 30 MeV. 试验在空气中进行, 辐照时采用准直器, 束斑直径 3 cm. 试验样品选用 Cypress 90 nm 异步 SRAM 器件 CY62126EV30LL, 该器件为 CY62126 系列最小容量器件, 额定电压 3.0 V, 存储容量 64 k \times 16 位共 1 Mbit. 在 3 个能量点分别开展了质子倾斜角度试验, 包括 3 种离子入射方向: 垂直入射, 沿位线即沿 Y 方向 70° 入射, 沿字线即沿 X 方向 70° 入射, 如图 1 所示, 辐照时填充测试图形 5555 H.

试验时质子低注量率辐照, 测试系统高速回读, 系统完成全芯片一次循环检测的时间约为 10 ms, 试验中质子注量率选定的原则是保证辐照中每个回读周期测试的翻转数小于芯片总容量的 0.01%, 这样发生“伪”多位翻转 (即两个或多个离子打在相邻存储单元引起的多位翻转) 的最劣概率小于 1×10^{-3} . 试验数据保存记录后, 结合逻辑位图到物理位图的映射软件, 统计不同位数的多位翻转事件数, 处理获取单粒子多位翻转百分比、均值、截面等参数.

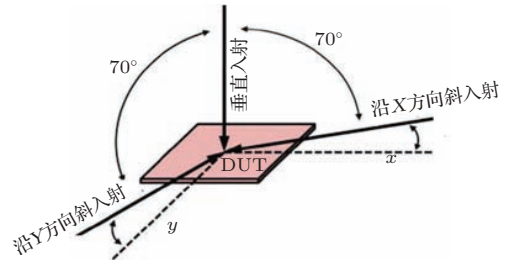


图1 质子三种方向入射器件示意图

Fig. 1. Schematic of three proton incidence orientations relative to DUT.

3 实验结果

图 2 给出了单粒子翻转 (SEU) 截面和多位翻转 (MCU) 截面与质子能量和角度的关系曲线. 从图中可以看出, SEU 截面与角度没有明显相关性, 表现为各向同性, 与通常对质子单粒子效应的认识是一致的. 垂直入射时 30 MeV 质子 MCU 截面小于 70 MeV 和 150 MeV, MCU 截面随着质子能量的增加逐渐增大. 对于 70 MeV 和 150 MeV, 垂直入射和倾角入射对 MCU 截面无明显影响, 而对于 30 MeV 质子, 垂直入射时 MCU 截面小于倾角入射, 沿 X 方向 70° 入射和沿 Y 方向 70° 入射 MCU 截面基本一致.

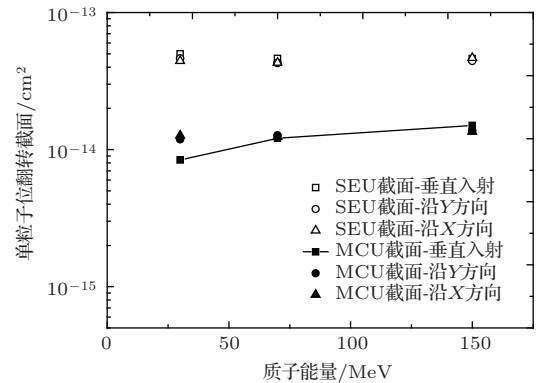


图2 SEU 和 MCU 截面与质子能量和角度的关系曲线
Fig. 2. SEU and MCU cross section versus proton energy and angle.

图3(a), (b), (c)给出了3种质子能量时不同质子入射方向单位翻转(SCU)和多位翻转事件百分比. 可以看出, 垂直入射时随着质子能量的增加, 单位翻转百分比逐渐减小, 多位翻转百分比逐渐增加, 多位翻转的多样性和翻转位数增加. 其中2位翻转以水平翻转为主, 3位翻转以L形为主, 4位翻转以田字形为主, 大于4位的多位翻转拓扑图形更加多样化. 对于70 MeV和150 MeV质子, 相同质子能量下3种不同质子入射方向时, MCU事件百分比基本一致; 而对于质子能量30 MeV时, 倾角入射时多位翻转事件百分比明显高于垂直入射, 这和图2中30 MeV质子倾角入射时MCU截面高于垂直入射情况是一致的. 需要说明的是, 对于相同质

子能量, 不同方向入射时多位翻转的多样性、相同位数多位翻转的百分比以及拓扑形状均存在一定的差异. 以150 MeV质子为例, 倾角入射相比于垂直入射, 2位翻转事件百分比降低, 而高位翻转即3位和4位翻转事件百分比增加; 另一方面, 倾角入射时虽然2位翻转仍以水平翻转为主, 三位翻转以L形为主, 但当质子沿Y方向斜入射时, 垂直2位翻转百分比有所增加, 沿X方向斜入射时, 水平3位翻转百分比有所增加, 多位翻转拓扑形状表现出一定的离子径迹朝向特性.

4 质子单粒子多位翻转理论模拟

4.1 单粒子多位翻转计算方法

在质子单粒子效应理论研究方面, 通常采用基于蒙特卡洛计算的方法. 对入射粒子在器件中的输运进行模拟, 跟踪次级粒子, 计算次级粒子在每个灵敏体积内的能量沉积, 判断沉积能量产生的电荷量是否大于临界电荷, 得到发生翻转的存储单元数目. 如果发生翻转的存储单元大于1, 则器件发生多位翻转, 否则只发生单位翻转. 基于蒙特卡洛仿真的方法优势在于可以详细考虑器件的几何结构, 材料信息, 核反应过程等等, 获得较为精细的结果. 但由于质子与硅材料发生非弹性碰撞的截面很小, 大约 10^5 个入射质子才能引发一次核反应, 仿真中想提高单粒子多位翻转计算结果的精度需要很大的计算量, 耗时过长. 这里采用一种快速计算质子核反应引起单粒子多位翻转的截面积分算法, 对于任意单方向入射的单能质子, 从靶材料原子次级粒子的双微分散射截面 $d^2\sigma(Z)/dEd\theta$ 出发, 器件单粒子效应截面表示为

$$\sigma(E_P) = \int_V \sum_Z \int_0^\infty \frac{1}{2\pi} \int_\varphi \int_\theta \frac{d^2\sigma(Z, E, \theta)}{dEd\theta} \times P(Z, E, \theta, \varphi) d\theta d\varphi dEdV, \quad (1)$$

其中, $\sigma(E_P)$ 为质子能量为 E_P 时的单粒子效应截面, V 表示对器件所在的全空间积分, Z 表示对带有 Z 个电荷的次级粒子求和, E 为次级粒子的能量, (θ, φ) 为次级粒子动量方向的空间方位角. 这里双微分截面 $d^2\sigma(Z)/dEd\theta$ 仅与 θ 角相关, 由于多了一重对 φ 的积分, 因此增加了归一化系数 $1/2\pi$. $P(Z, E, \theta, \varphi)$ 表示带有个 Z 电荷, 能量为 E 的次级粒子, 沿 (θ, φ) 方向飞出, 产生单粒子翻转的概率. 当计算多位翻转时, $P(Z, E, \theta, \varphi)$ 可以通过计算次级粒子在两个及以上灵敏体积内沉积的能量, 判断

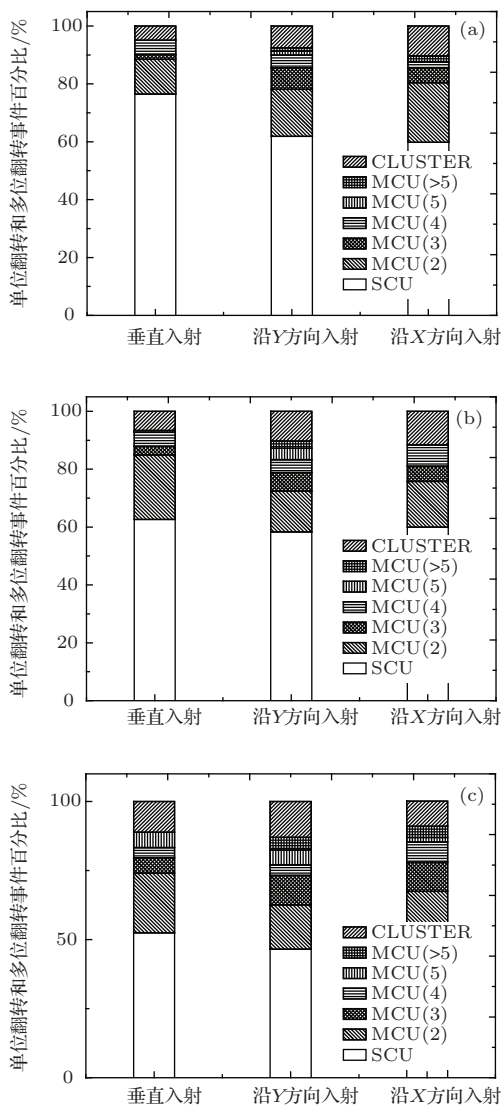


图3 不同质子入射方向下单粒子单位翻转和多位翻转事件百分比 (a) 30 MeV 质子; (b) 70 MeV 质子; (c) 15 MeV 质子

Fig. 3. Event percentage of SCU and MCU with different proton incidence orientations: (a) 30 MeV proton; (b) 70 MeV proton; (c) 150 MeV proton.

是否大于临界能量的方法得到, 当大于时为1, 否则为0.

中高能质子 ($30 \text{ MeV} < E < 1000 \text{ MeV}$) 与硅核相互作用, 以非弹性碰撞为主, 质子导致的核反应过程可以描述为2个阶段即核内级联阶段和蒸发-散裂(裂变)阶段. Geant4 的 Binary Cascade 模型^[15], 包含了上述所有过程, 是中能质子核反应的一个比较精确的模型^[16]. 基于 Geant4 采用强迫碰撞的方法, 将质子 Binary Cascade 模型用作事件发生器, 计算一千万次质子与硅材料发生非弹性碰撞的事件, 并记录每次事件, 包括次级粒子的电荷数、能量以及角度分布. 最后, 根据实际的核反应截面, 对数据进行处理, 获得包含次级粒子能量与角度分布信息的双微分散射截面.

器件几何结构模型建立需要用到敏感体积与临界电荷2个概念. 该 SRAM 器件存储单元单元大小为 $0.84 \mu\text{m} \times 1.2 \mu\text{m}$, 基于存储单元版图并结合文献^[17]中对敏感体积的设定方法, 每个存储单元包含 SV1 和 SV2 两个敏感体积. SV1 为反偏 NMOS(N-channel Metal Oxide Semiconductor) 和门控管的漏极、栅极, 面积为 $0.23 \mu\text{m} \times 0.404 \mu\text{m}$; SV2 是反偏 PMOS(P-channel Metal Oxide Semi-

conductor) 的漏极和栅极, 面积为 $0.17 \mu\text{m} \times 0.29 \mu\text{m}$. 灵敏体积厚度为 N 阱和 P 阱的阱深 $0.55 \mu\text{m}$. 为计算质子多位翻转截面, 建立 1 个 9×9 的 SRAM 阵列. 建立的阵列考虑写入数据 5555 H, 相邻 SRAM 单元之间沿 X 与 Y 镜像排布, 如图 4 所示. 图 4(a) 中标注了包含 SV1 和 SV2 的一个存储单元所在位置, 其中面积较大的为 SV1, 面积较小的为 SV2. 采用 TCAD 数值模拟利用重离子分别入射反偏 NMOS 和 PMOS 漏区获取两个敏感区的 LET 阈值. 计算表明反偏 NMOS 单粒子翻转阈值为 $0.36 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 相应的能量阈值 45 keV 、临界电荷 2 fC ; 反偏 PMOS 的翻转阈值为 $0.54 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 相应的能量阈值为 67 keV 、临界电荷 3 fC . 翻转判据设为在 SV1 沉积能量超过 45 keV , 或在 SV2 沉积能量超过 67 keV , 或者在 SV1, SV2 沉积总能量超过 2 个临界能量的最大值. 由于该器件低的单粒子翻转临界电荷, 质子与多层金属布线中高 Z 材料发生核反应产生高 LET 值次级粒子的概率极小, 因此基于通常质子单粒子效应计算中^[8-10]对器件材料的考虑, 并结合文献中^[18]所给出的互联层厚度, 在敏感体积上方布放了 $3.5 \mu\text{m}$ 厚的硅层.

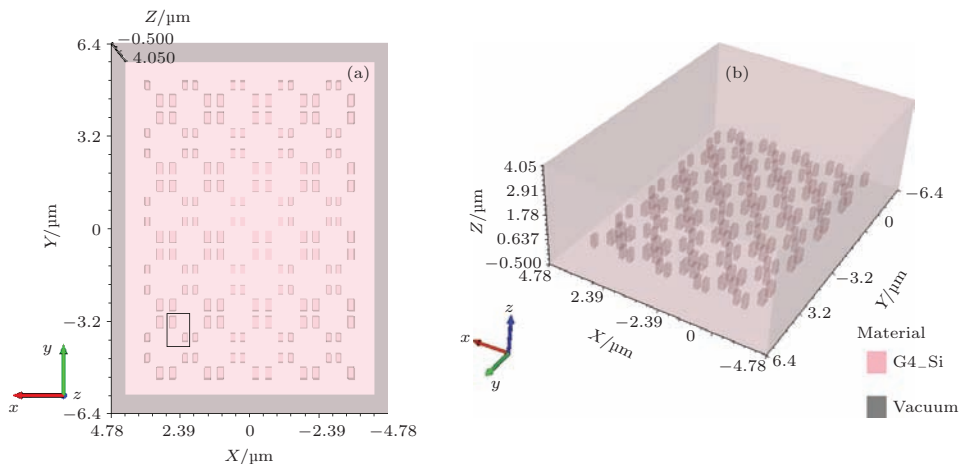


图4 (网刊彩色) 模拟采用的 9×9 SRAM 存储单元敏感体积几何模型 (a) 几何模型的俯视图; (b) 几何模型的三维结构图

Fig. 4. (color online) Geometry model of sensitive volumes of a 9×9 SRAM memory cells array: (a) Top-view of geometry model; (b) 3D structure diagram of geometry model.

4.2 质子核反应次级粒子分布

采用 Geant4 的 Binary Cascade 模型计算得到的 30 MeV , 70 MeV , 150 MeV 质子与硅材料发生非弹性碰撞, 生成各个次级粒子的截面如图 5 所示. 可以看出, 能量越高, 反应道越多, 产生的次级粒子

种类越多, 原子序数相对较小的次级粒子含量也越多. 对于 150 MeV 质子入射, 产生的次级粒子原子序数涵盖从 3 到 15, 而对于 30 MeV 质子, 产生的次级粒子原子序数集中在 11—15 之间. 对于三种质子能量, 原子序数为 13 的次级粒子具有最大的反应截面.

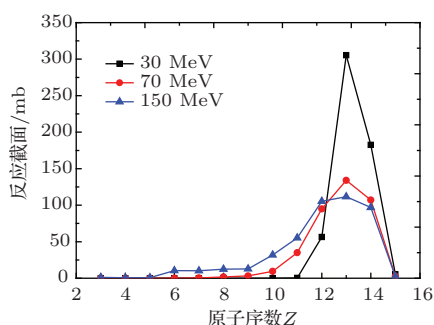


图5 不同能量质子与硅原子发生核反应生成的次级粒子截面

Fig. 5. Cross section of secondary particle from different energy proton-silicon nuclear reaction.

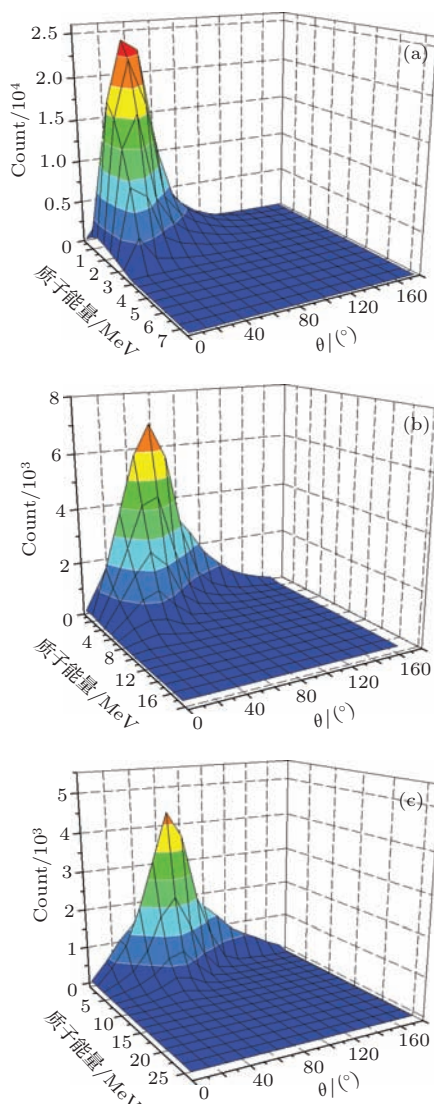


图6 (网刊彩色) 不同入射能量质子, 非弹性碰撞产生的 $Z = 13$ 次级粒子能量角度分布 (a) 30 MeV 质子; (b) 70 MeV 质子; (c) 15 MeV 质子

Fig. 6. (color online) The distribution of energy and angle of secondary particle with $Z = 13$ from inelastic collision for different energy protons: (a) 30 MeV proton; (b) 70 MeV proton; (c) 150 MeV proton.

对于三种入射能量的质子, 具有最大反应截面的原子序数 $Z = 13$ 的次级粒子能量角度分布如图6所示, 这里角度 θ 为(1)式中次级粒子与入射质子方向的夹角. 从图中可以看到, 非弹性散射次级粒子的角分布依赖于入射质子能量. 由于次级粒子能量在布拉格曲线的上升沿, 次级粒子能量越高, LET 值越大, 射程越长. 对于三种能量的质子, 均表现出能量越高即 LET 值越大的次级粒子, 发射角度越小, 最大限度地保持与入射质子的方向一致, 更加前向从而保存动量, 能量越低的次级粒子具有更宽的角度分布范围. 入射质子能量越大, 次级粒子能量和角度分布范围越宽, 具有更多的侧向散射离子, 倾向于各向同性, 相同散射角时的次级粒子能量也越高. 由此可知, 能量最高, LET 最大, 射程最长的粒子优先进向发射, 而低能次级粒子, 即低 LET 值、射程短的粒子倾向于各向同性, 次级粒子存在角度分布不均匀的现象.

4.3 单粒子多位翻转角度相关性

图7计算了不同能量质子倾角入射情况下, 多位翻转截面随质子入射角度的变化, 以及归一化到垂直入射时多位翻转截面增强因子随入射角度的变化. 由于实验和计算中质子沿不同器件方向倾角入射时 MCU 截面均基本保持一致, 因此这里仅给出质子沿 Y 方向倾角入射时的计算结果并进行讨论分析. 从图中可以看出, 垂直入射即入射角度 0° 时, 随着入射质子能量的增加, MCU 截面也随之有所增加. 随着质子入射角度的增加, 30 MeV 质子单粒子 MCU 截面表现出较明显的角度相关性, 70° 倾角入射时 MCU 截面相比于垂直入射可增加2倍以上. 当质子能量增加, 这种角度效应将不断减弱, 当质子能量达到 150 MeV 时, MCU 截面与垂直入射时基本一致, 表现出各向同性.

从4.2节次级粒子的分布可知, 当质子入射与材料发生核反应, 能量最高, LET 最大, 射程最长的粒子优先进向发射. 入射质子能量越高, 次级粒子角度分布范围越宽, 侧向散射的粒子能量也越高, LET 越大. 垂直入射时, 质子能量越高能够引起多位翻转的侧向散射粒子越多, 因此 MCU 截面随质子能量的增加而增加. 当 30 MeV 质子垂直入射时, 由于其次级产物角度分布范围窄, 同时侧向散射的次级粒子相比于 70 MeV, 150 MeV 质子, 在相同出射角时次级粒子 LET 低、射程短, 因此大多数侧向散射粒子不足以引起相邻灵敏体积沉积足

够能量引发多位翻转. 而具有高LET的次级粒子由于优先前向发射, 垂直入射时无法贡献多位翻转. 只有当质子倾角入射时, 前向发射的高LET次级粒子倾向于相邻灵敏体积的方向, 才具有足够的LET值和射程引发多位翻转, 使得MCU截面随着质子入射角度的增大而增加, 表现出多位翻转角度效应. 随着质子能量的增加, 垂直入射时侧向散射的次级粒子LET值增加, 能够引发多位翻转的次级粒子逐渐增加, 因此多位翻转角度效应逐渐减弱. 当150 MeV质子垂直入射时, 其侧向散射的次级粒子LET值就足以引起相邻灵敏体积沉积足够能量引发多位翻转, 因此倾角入射时对MCU截面没有增强效应, 多位翻转表现为各向同性.

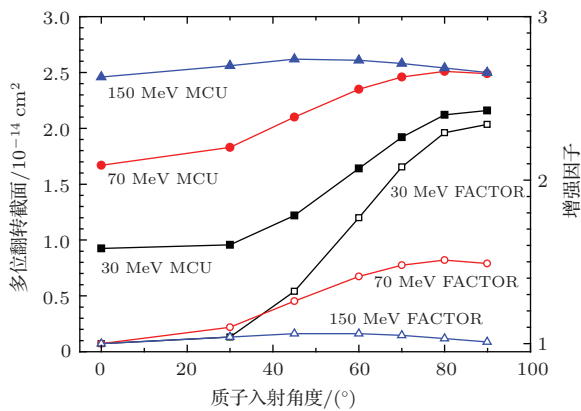


图7 不同能量质子入射, 90 nm SRAM 多位翻转截面、增强因子与质子入射角度的关系

Fig. 7. MCU cross section and enhancement factor in 90 nm SRAM as a function of proton incidence angle for different energy proton.

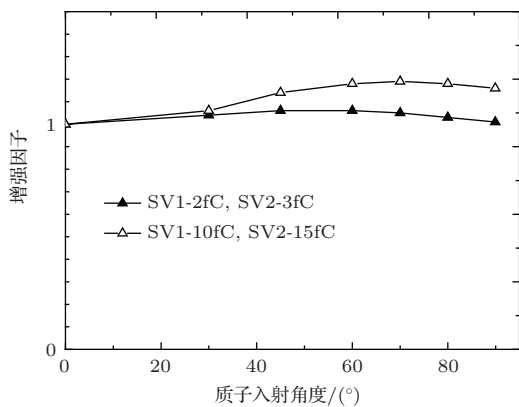


图8 150 MeV 质子入射, 90 nm SRAM 多位翻转截面角度增强因子与质子入射角度的关系

Fig. 8. Angular enhancement factor of MCU cross section versus incidence angle with 150 MeV proton.

临界电荷的大小会影响存储单元单粒子翻转的敏感性, 将灵敏体积的临界电荷增大5倍, 即SV1

临界电荷10 fC, SV2临界电荷15 fC, 计算对质子单粒子多位翻转角度相关性的影响, 如图8所示. 以150 MeV质子为例, 由于商用90 nm器件单粒子翻转临界电荷低, 低LET次级粒子的宽角度范围即各向同性使得器件MCU不易表现出角度效应. 当临界电荷增大到10 fC时, 质子垂直入射时能够引发多位翻转的侧向散射粒子减少, 而倾角入射时, 前向高LET的次级粒子倾向于相邻灵敏体积的方向引发多位翻转, 这时相对于临界电荷2 fC时150 MeV质子也表现出一定程度的多位翻转角度效应.

5 结 论

试验研究了90 nm SRAM器件中高能质子入射角度对单粒子多位翻转的影响. 针对试验中观察到的在较低质子能量下表现的多位翻转角度效应, 采用一种快速计算质子核反应产生的次级粒子引发单粒子多位翻转的截面积分算法, 从次级粒子的能量和角度分布出发, 揭示了质子与材料核反应产生的次级粒子中, LET最大, 射程最长的粒子优先前向发射是引起角度效应的根本原因. 计算结果进一步表明, 质子能量、临界电荷的大小是影响纳米SRAM质子多位翻转角度相关性的关键因素. 质子能量越小, 多位翻转截面角度增强效应越大, 随着质子能量的增加, 多位翻转倾向于各向同性; 临界电荷的增加将增强质子多位翻转角度效应.

参考文献

- [1] Giot D, Roche P, Gasiot G, Harboe-Sorensen R 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 904
- [2] Correas V, Saigné F, Sagnes B, Wrobel F, Boch J, Gasiot G, Roche P 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 2050
- [3] Lawrence R K, Kelly A T 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3367
- [4] Giot D, Roche P, Gasiot G, Autran J L, Harboe-Sorensen R 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2048
- [5] Tipon A D, Pellish J A, Hutson J M, Baumann R, Deng X, Marshall A, Xapsos M A, Kim H S, Friendlich M R, Campola M J, Seidleck C M, Label K A, Mendenhall M H, Reed R A, Schrimpf R D, Weller R A, Black J D 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 2880
- [6] Space Component Coordination Group 1995 *ESA/SCC Basic Specification* NO. 25100
- [7] Koga R, Kolaskinski W A, Osborn J V, Elder J H, Chitty R 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1638

- [8] Reed R A, Marshall P W, Kim Hak S, McNulty P J, Fodness B, Jordan T M, Reedy R, Tabbert C, Liu M S T, Heikkila W, Buchner S, Ladbury R, LaBel K A 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3038
- [9] Buchner S, Campbell A, Reed R, Fodness B, Kuboyama S 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3270
- [10] Ikedade N, Kuboyama S, Matsuda S, Handa T 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2200
- [11] He C H, Yang H L, Geng B, Chen X H, Li G Z, Liu E K, Luo J S 2000 *Nuclear Electronics & Detection Technology*. **20** 253 (in Chinese) [贺朝会, 杨海亮, 耿斌, 陈晓华, 李国政, 刘恩科, 罗晋生 2000 核电子学与探测技术 **20** 253]
- [12] He C H, Chen X H, Li G Z 2002 *Chinese Journal of Computation Physics* **19** 367 (in Chinese) [贺朝会, 陈晓华, 李国政 2002 计算物理 **19** 367]
- [13] Wang Y M, Chen W, Guo H X, He B P, Luo Y H, Yao Z B, Zhang F Q, Zhang K Y, Zhao W 2010 *Atomic Energy Science and Technology* **44** 1505 (in Chinese) [王园明, 陈伟, 郭红霞, 何宝平, 罗尹虹, 姚志斌, 张凤祁, 张科营, 赵雯 2010 原子能科学技术 **44** 1505]
- [14] Wang T Q 2003 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defence Technology) (in Chinese) [王同权 2003 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [15] Folger G, Ivanchenko V, Wellisch J 2004 *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei* **21** 407
- [16] Clemens M A 2012 *Ph. D. Dissertation* (Nashville: Vanderbilt University)
- [17] Warren K M, Weller R A, Sierawski B D 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 898
- [18] Artola L, Velazco R, Hubert G, Duzellier S, Nuns T, Guerard B, Peronnard P, Mansour W, Pancher F, Bezerra F 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2644

Angular dependence of proton single event multiple-cell upsets in nanometer SRAM*

Luo Yin-Hong[†] Zhang Feng-Qi Guo Hong-Xia Guo Xiao-Qiang Zhao Wen
Ding Li-Li Wang Yuan-Ming

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an 710024, China)

(Received 11 May 2015; revised manuscript received 10 July 2015)

Abstract

Single event multiple-cell upsets (MCU) increase sharply as the feature size of semiconductor devices shrinks. MCU poses a large challenge on present radiation hardening technology and modeling test technique. Experimental study of the influence of proton incidence angle on single event multiple-cell upsets in 90 nm static random access memory (SRAM) for middle and high energy proton is carried out. The result shows that MCU percentage and multiplicity increase with increasing proton energy, and the MCU topological pattern presents a certain track-orientation characteristic along the trajectories of the incidence ion when the incidence proton is tilted along the X -direction or Y -direction. Single event upset (SEU) cross section has no evident angular dependence. There is some difference in proton MCU cross section between normal incidence and tilt angle incidence only for 30 MeV proton. Angular effect of proton MCU is associated with proton energy. Due to the lower efficiency of Monte-Carlo method in calculating proton MCU, a fast calculation method for cross section, which aims at single event MCU induced by proton nuclear reaction, is adopted. The binary cascade model in Geant4 toolkit serves as event generators in middle on high proton nuclear reaction. In terms of double differential scattering cross section of secondary particle from proton-material spallation reaction, proton MCU cross section is calculated through integration over the entire space of memory cells array. Based on the distribution of secondary particles, those spallation products with the highest linear energy transfer (LET) and longest range are revealed to emit preferentially in the forward direction, which is the root cause why the angular effect of proton-induced MCU exists. The angular dependence of single event MCU in nanometer SRAM depends strongly on proton energy and critical charge. The higher the proton energy is, the wider the angular distribution of secondary particle is, the greater the energy and LET value of the lateral scattered secondary particle is; and so the angular enhancement effect in MCU cross section for lower energy protons is greater than the higher energy protons. MCU cross section is more isotropic with the increase of the proton energy. Angular effect in MCU cross section becomes stronger with the increase of the critical charge for the same energy proton.

Keywords: proton, nanometer SRAM, single event multiple-cell upsets, angular effect

PACS: 61.82.Fk, 25.40.Ep, 85.30.De

DOI: [10.7498/aps.64.216103](https://doi.org/10.7498/aps.64.216103)

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2014ZX01022-301).

[†] Corresponding author. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn