

质子与金属布线层核反应对微纳级静态随机存储器单粒子效应的影响分析

赵雯 郭晓强 陈伟 邱孟通 罗尹虹 王忠明 郭红霞

Effects of nuclear reactions between protons and metal interconnect overlayers on single event effects of micro/nano scaled static random access memory

Zhao Wen Guo Xiao-Qiang Chen Wei Qiu Meng-Tong Luo Yin-Hong Wang Zhong-Ming Guo Hong-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 178501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.178501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压应变 Ge/(001)Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 空穴散射与迁移率模型

Hole scattering and mobility in compressively strained Ge/(001)Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>

物理学报.2015, 64(3): 038501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038501>

堆叠栅介质对称双栅单 Halo 应变 Si 金属氧化物半导体场效应管二维模型

Two-dimensional model of symmetrical double-gate strained Si single Halo metal-oxide semiconductor field effect transistor with gate stack dielectric

物理学报.2014, 63(24): 248502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248502>

对称三材料双栅应变硅金属氧化物半导体场效应晶体管二维解析模型

Two-dimensional analytical models for the symmetrical triple-material double-gate strained Si MOSFETs

物理学报.2014, 63(14): 148502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148502>

90 nm 互补金属氧化物半导体静态随机存储器局部单粒子门锁传播效应诱发多位翻转的机理

Mechanism of multiple bit upsets induced by localized latch-up effect in 90 nm complementary metal semiconductor static random-access memory

物理学报.2014, 63(12): 128501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128501>

SOI SiGe HBT 结构设计及频率特性研究

Structure design and frequency characteristics of SOI SiGe HBT

物理学报.2014, 63(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118501>

# 质子与金属布线层核反应对微纳级静态随机存储器单粒子效应的影响分析\*

赵雯<sup>†</sup> 郭晓强 陈伟 邱孟通 罗尹虹 王忠明 郭红霞

(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3月11日收到; 2015年4月22日收到修改稿)

金属布线层对微纳级静态随机存储器 (static random access memory, SRAM) 质子单粒子效应敏感性的影响值得关注. 利用 Geant4 针对不同能量 (30 MeV, 100 MeV, 200 MeV 和 500 MeV) 的质子与微纳级 SRAM 器件的核反应过程开展计算, 研究了核反应次级粒子的种类、线性能量传输值 (linear energy transfer, LET) 及射程情况, 尤其对高 LET 值的核反应次级粒子及其射程开展了详细分析. 研究表明, 金属布线层的存在和质子能量的增大为原子序数大于或等于 30 的重核次级粒子的产生创造了条件, 器件体硅区中原子序数大于 60 的重核离子来源于质子与钨材料的核反应, 核反应过程中的特殊作用机理会生成原子序数在 30 至 50 之间的次级粒子, 且质子能量的增大有助于这种作用机理的发生, 原子序数在 30 至 50 之间的次级粒子在器件体硅区的 LET 值最大约为  $37 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ , 相应射程可达到几微米, 对于阱深在微米量级的微纳级 SRAM 器件而言, 有引发单粒子门锁的可能. 研究结果为空间辐射环境中宇航器件的质子单粒子效应研究提供理论支撑.

**关键词:** 质子, 核反应, 微纳级静态随机存储器, 单粒子效应

**PACS:** 85.30.De, 78.70.-g, 25.40.Cm, 25.40.Ep

**DOI:** 10.7498/aps.64.178501

## 1 引言

宇宙空间中存在大量高能质子, 高能质子穿透航天器屏蔽层进入到内部电子学系统, 与系统中的半导体器件发生相互作用产生单粒子效应, 影响航天器的在轨可靠运行<sup>[1-13]</sup>. 质子与半导体器件发生核反应生成的次级粒子的电离作用是引起质子单粒子效应的主要因素<sup>[7-13]</sup>, 虽然核反应截面相对于质子直接电离截面较低, 对于穿过南大西洋异常区 (该区是低高度太阳同步轨道卫星、回收型卫星及载人飞船、空间站等航天器经过的区域) 的航天器而言, 质子的高注量补偿了相对低的核反应截面, 使得质子单粒子效应尤为显著.

自 20 世纪 90 年代以来, 国内外研究者针对质子与硅材料的核反应过程开展研究并取得一定成果. 文献<sup>[9]</sup>计算了不同能量的质子在存储单元的

体硅灵敏区内的能量沉积分布, 发现随着质子能量的增加, 沉积能量谱中的低能成分减少, 高能成分增加, 更容易引起翻转能量阈值较高的存储器发生单粒子翻转; 文献<sup>[10]</sup>计算了不同能量的质子与硅发生核反应生成的次级粒子种类、截面、能谱和双微分截面, 发现反冲核的产生截面依赖于入射质子能量, 反冲核的出射方向大多前倾; 文献<sup>[11]</sup>计算了质子入射到硅材料中的总能量沉积、核能量损失和电子能量损失, 发现质子能量越高, 核反应过程的贡献越大; 文献<sup>[12]</sup>计算了 200 MeV 质子与硅发生核反应生成的次级粒子的 LET 值分布, 文献<sup>[13]</sup>在文献<sup>[12]</sup>的基础上计算了 50 MeV, 100 MeV, 200 MeV 和 500 MeV 质子与硅发生核反应生成的次级粒子种类及其 LET 值分布, 发现次级粒子的原子序数最大为 15, LET 值不超过  $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ . 随着半导体器件中新材料、新工艺和新结构的发展, 微纳级 SRAM 器件的金属布线

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11175271) 和国家科技重大专项 (批准号: 2014ZX01022-301) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zhaowen@nint.ac.cn

层,特别是金属布线层中高原子序数(以下将原子序数简称为 $Z$ )材料的引入,成为加重质子单粒子效应的一个因素.文献[14]计算了质子与几种不同靶原子材料(氧、硅、铝、铜、钛和钨)核反应后生成次级粒子的LET值分布,发现498 MeV质子与钨(以下简称W)材料核反应后生成次级粒子的LET值大于 $30 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ;文献[15]计算了不同能量质子与W材料核反应后生成次级粒子的LET值分布,发现LET值最大接近 $40 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ ,提示单粒子门锁的LET阈值低于 $40 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的宇航用电子元器件有必要开展高能质子单粒子效应地面模拟试验,但对于高LET值的次级粒子及其射程未作深入分析.

综合看来,目前的相关理论计算以质子与单一材料的核反应为主,未考虑真实情况下质子与SRAM器件多层金属布线的复合结构发生核反应后对器件单粒子效应的影响.此外,对于单粒子效应而言,LET值和射程均是影响器件单粒子效应敏感性的关键参数,已有研究中以核反应次级粒子的LET值分析为主,对于具有高LET值的次级粒子的射程问题有必要进一步分析研究.

本文利用Geant4计算研究质子与金属布线层核反应对微纳级SRAM器件单粒子效应的影响.首先计算分析了顶层金属布线存在与否对器件体硅中次级粒子的种类和出现概率的影响;其次统计了各金属布线层中重核次级粒子的种类和出现概率,用于研究体硅中重核次级粒子的来源问题;最后针对具有高LET值的重核次级粒子及其射程开展了进一步分析.

## 2 SRAM单元几何结构模型建立和物理模型选取

这里主要研究质子单粒子效应的能量沉积过程,未涉及电荷收集,所以器件几何结构模型中不考虑灵敏单元.参照微纳级CMOS工艺器件的内部结构(如图1所示),在模型中保持多层金属布线层.作为栓塞的W用于连接各金属层、体硅等,在金属布线层中分布广泛,为分析质子核反应的最劣情况,将W等价于一层简化的W层置于模型中,且放置于紧邻体硅的位置,具体几何结构模型如图2所示,模型的表面积为 $13.05 \mu\text{m} \times 15.30 \mu\text{m}$ .

质子与靶材料的核反应过程分弹性碰撞和非弹性碰撞两种,在物理模型的选取方面[18],根据

质子能量的不同,质子与靶材料发生核反应的非弹性碰撞采用不同的强作用模型: Bertini级联模型(0—9.9 GeV), LEP参数模型(9.5—25 GeV)和 QGS模型(15—100 GeV);质子与靶材料发生核反应的弹性碰撞采用G4 LElastic模型.

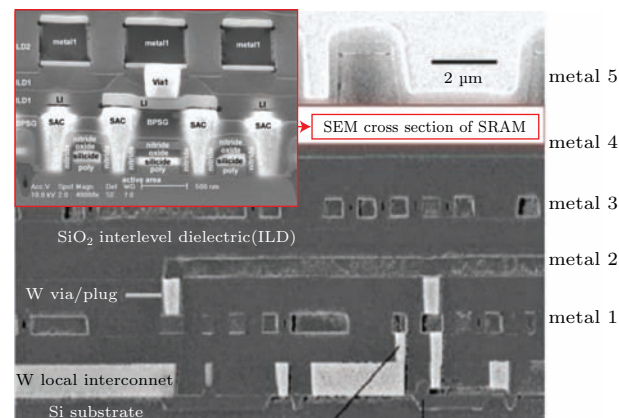


图1 一种微纳级CMOS器件的电子显微镜照片[16],内嵌图为一种SRAM器件的电子显微镜照片[17]

Fig. 1. The scanning electron microscope cross section of a micro/nano scale CMOS device [16], the inline image is the scanning electron microscope cross section of a SRAM [17].

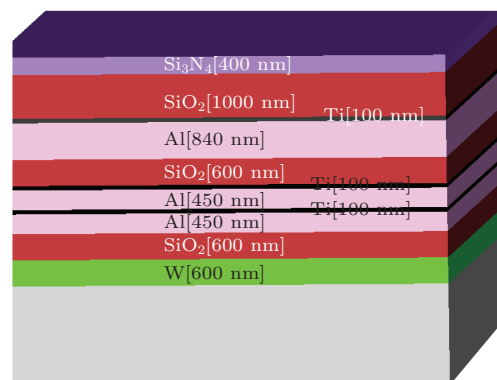


图2 SRAM单元几何结构模型

Fig. 2. Geant4 geometry model of the candidate SRAM cell.

## 3 计算分析

相对质子与硅材料的核反应过程,质子与多层金属布线层发生核反应生成的次级粒子的种类会有所不同,因此对前面建立的SRAM单元几何结构模型作两种考虑:一种是保留多层金属布线层,另一种是用同等厚度的硅层替代多层金属布线层.通过对比不同能量(30 MeV, 100 MeV, 200 MeV和500 MeV)的质子与两种几何结构的SRAM器件发生核反应后在体硅中的次级粒子的相关参数,来分

析金属布线层存在与否对器件单粒子效应可能造成的影响. 计算时, 设置质子从顶层金属布线/顶层硅上方中心位置垂直入射, 单能粒子源, 运行  $10^9$  个事件.

图3所示为不同能量的质子与两种几何结构的SRAM器件发生核反应后, 体硅中次级粒子的存在概率, 分图3(a)—(d)代表四种不同能量质子的计算结果, 分图中横坐标为次级粒子的 $Z$ (考虑 $Z \geq 2$ 的次级粒子), 纵坐标为体硅中次级粒子的存在概率. 圆圈标识的数据代表质子与顶层硅的SRAM器件发生核反应后, 体硅中次级粒子的存在概率; 十字标识的数据代表质子与顶层金属布线的

SRAM器件发生核反应后, 体硅中次级粒子的存在概率. 从计算结果可以看出: 1) 30 MeV质子与两种几何结构的SRAM器件发生核反应后, 体硅中除 $\alpha$ 粒子外, 次级粒子的 $Z$ 均主要分布在11—15区间; 100 MeV, 200 MeV和500 MeV的质子与两种几何结构的SRAM器件发生核反应后, 体硅中次级粒子的 $Z$ 均主要分布在2—15区间. 2) 质子与顶层硅的SRAM器件发生核反应后, 体硅中未发现 $Z$ 大于16的次级粒子; 质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, 体硅中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的数量随质子能量增大而增加的趋势明显.

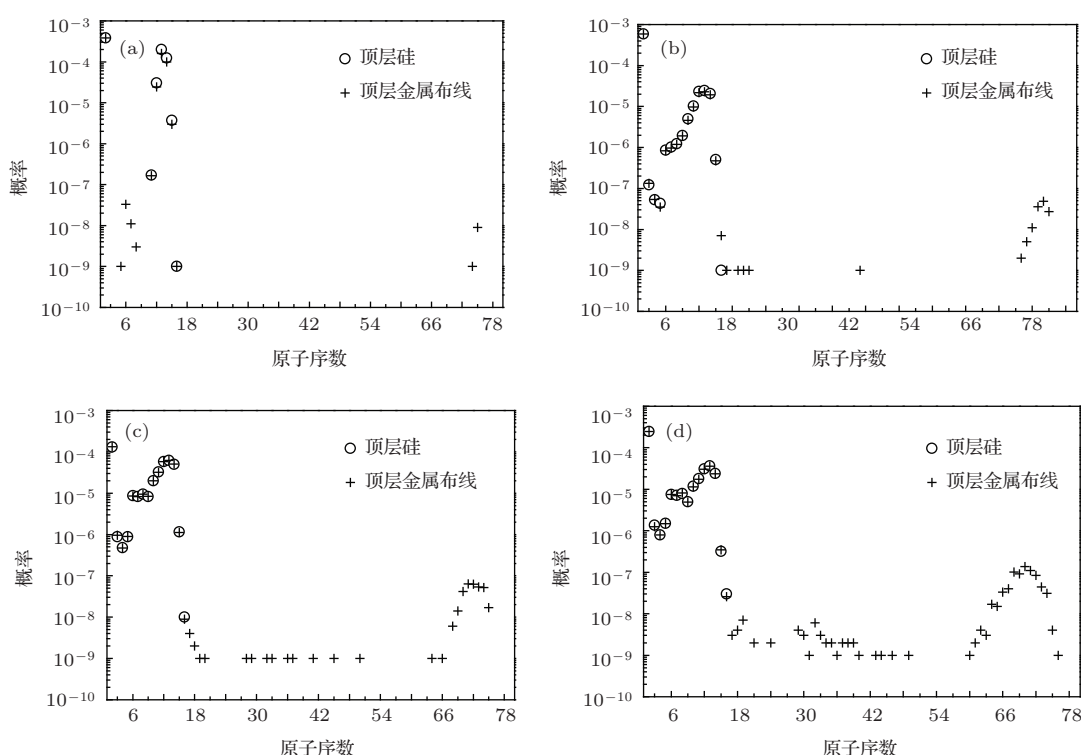


图3 不同能量的质子与SRAM器件发生核反应后, 体硅中次级粒子的存在概率 (a) 30 MeV质子; (b) 100 MeV质子; (c) 200 MeV质子; (d) 500 MeV质子

Fig. 3. The probabilities of existing in bulk silicon for secondary particles, which are from nuclear reactions between protons of different energies and SRAMs: (a) 30 MeV protons; (b) 100 MeV protons; (c) 200 MeV protons; (d) 500 MeV protons.

由此可见, 质子与两种几何结构的SRAM器件发生核反应后, 体硅中的次级粒子种类随着质子能量的增大而更加丰富; 质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, 体硅中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )数量随着质子能量的增大而增加的趋势明显; 金属布线层的存在和质子能量的增大为重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的产生创造了条件.

图4所示为500 MeV的质子与顶层金属布线

的SRAM器件发生核反应后, 各层材料中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的存在概率. 按照金属布线层自上而下的布线顺序将各层材料中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的存在概率分别示于分图4(a)—(d)中, 分图中横坐标为次级粒子的 $Z$ , 纵坐标为各层材料中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的存在概率. 从计算结果可以看出:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ (紧邻W层的除外), Al和Ti层中次级粒子的 $Z$ 均小于50; W层、

紧邻W层的SiO<sub>2</sub>层和体硅中存在 $Z > 60$ 的重核离子, 且重核离子在W层中的概率最大. 结合上述结论并考虑到500 MeV质子与硅发生核反应后不生成 $Z > 60$ 的重核离子(见图3(d)), 推得体硅中

$Z > 60$ 的重核离子来源于质子与W的核反应. 不难发现,  $Z > 60$ 的重核离子在体硅中的存在概率明显大于在SiO<sub>2</sub>层(紧邻W层)中的存在概率, 这也侧面说明质子核反应的产物主要分布在前冲方向.

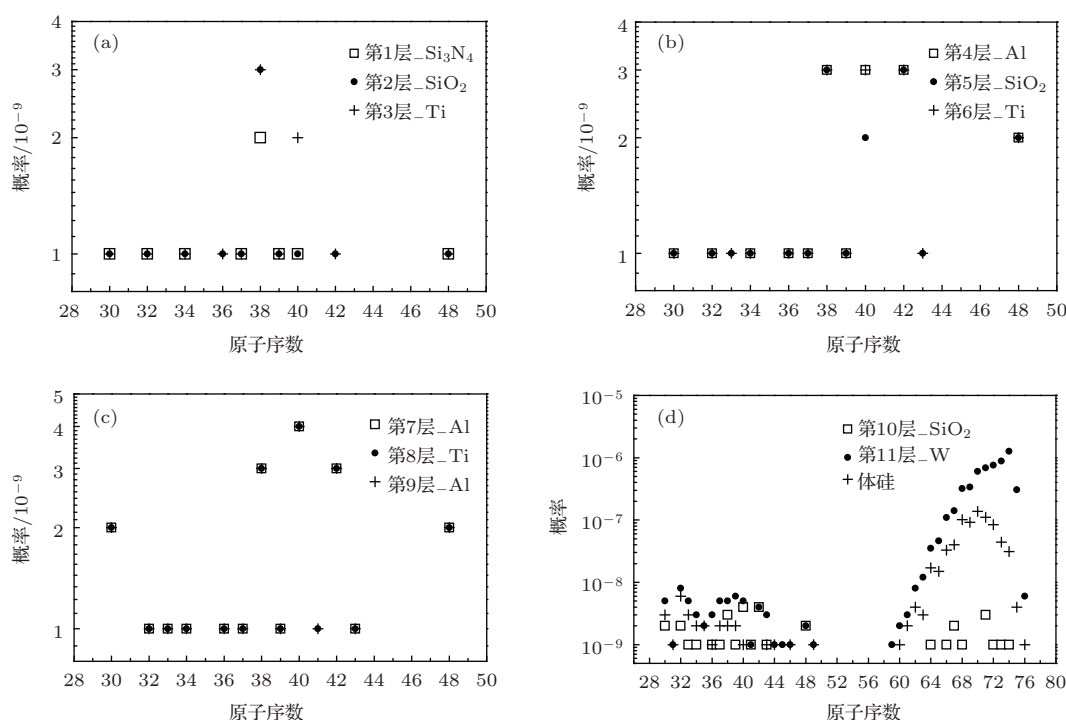


图4 500 MeV的质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, 各层材料中的重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的存在概率 (a) 金属布线的第1—3层材料; (b) 金属布线的第4—6层材料; (c) 金属布线的第7—9层材料; (d) 金属布线的第10—11层材料和体硅

Fig. 4. The probabilities of existing in different overlays for secondary particles with  $Z \geq 30$ , which are from nuclear reactions between 500 MeV protons and the SRAM topped with interconnect overlays: (a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-overlayer, SiO<sub>2</sub>-overlayer and Ti-overlayer; (b) Al-overlayer, SiO<sub>2</sub>-overlayer and Ti-overlayer; (c) Al-overlayer, Ti-overlayer and Al-overlayer; (d) SiO<sub>2</sub>-overlayer, W-overlayer and bulk silicon.

此外, 与W层上方的各层材料相比, W层中 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子种类增多, 且部分次级粒子的存在概率增大, 考虑这种现象与质子和W材料的核反应过程有关. 高能质子与W核的相互作用机理极为复杂, 非弹性碰撞未达到热平衡时会有碎裂和拾取多种可能,  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子会伴随这些特殊作用机理而产生.

图5所示为两种能量质子(200 MeV和500 MeV)与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, W层和体硅中 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的存在概率. 分图5(a)和(b)分别代表W层和体硅中 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的存在概率, 分图中横坐标为次级粒子的 $Z$ , 纵坐标为次级粒子的存在概率. 圆圈标识的数据代表200 MeV质子与顶层硅的SRAM器件发生核反应后, 次级粒子的存在概率; 十字标识的数据代表500 MeV质子与顶层

金属布线的SRAM器件发生核反应后, 次级粒子的存在概率. 可以看出, 500 MeV质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, W层和体硅中 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的存在概率与200 MeV质子的结果相比有明显增大, 次级粒子种类也更加多样, 说明生成 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的核反应作用机理与质子能量存在相关性, 质子能量的增大有助于这种作用机理的发生.

LET值是单粒子效应的一项重要参数, 这里统计了500 MeV质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, 体硅中 $Z \geq 30$ 的次级粒子的LET值(硅材料中的LET值). 发现 $Z > 60$ 的重核离子的LET值均小于20 MeV·cm<sup>2</sup>/mg,  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的LET值存在接近40 MeV·cm<sup>2</sup>/mg的情况, 将 $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子在体硅中的LET值分布示于图6. 从图中可以看出: 500 MeV质

子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后,  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子在体硅中的LET值大多高于  $20 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ , 最高约  $37 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ .

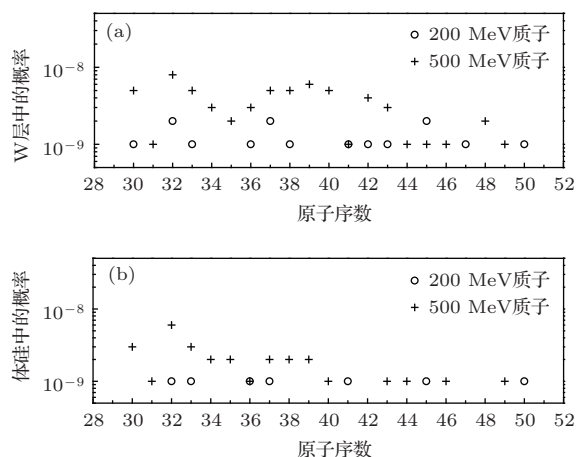


图5 200 MeV/500 MeV 质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, W层和体硅中  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的存在概率 (a) W层中的概率; (b) 体硅中的概率

Fig. 5. The probabilities of existing in different overlays (W-overlayer and bulk silicon) for secondary particles with  $30 \leq Z \leq 50$ , which are from nuclear reactions between 200 MeV/500 MeV protons and the SRAM topped with interconnect overlayers: (a) the probabilities in W-overlayer; (b) the probabilities in bulk silicon.

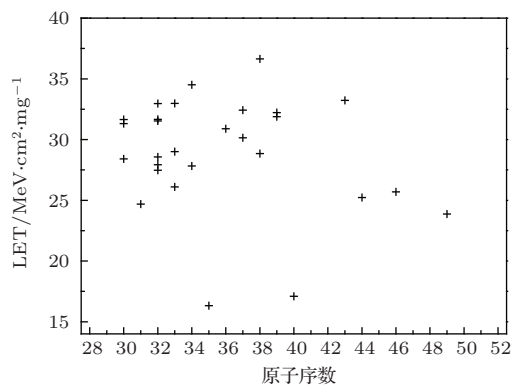


图6  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子在体硅中的LET值分布  
Fig. 6. Distribution of LETs for secondary particles with  $30 \leq Z \leq 50$  in bulk silicon.

除LET值之外, 射程也是影响器件单粒子效应敏感性的一个重要参数, 图7所示为图6中各LET值对应的次级粒子在体硅中的射程情况. 从图中可以看出: LET值大于  $20 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的次级粒子在体硅中的射程均在微米量级, 这有可能导致微纳级SRAM器件发生单粒子翻转, 但与  $Z \leq 20$ 的次级粒子相比,  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的生成概率很低(500 MeV质子的计算结果显示最

大生成概率接近  $10^{-8}$ ), 只有在500 MeV质子通量足够大的特殊空间环境中(比如火星探测器经过的区域)且器件翻转阈值大于  $20 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的情况下,  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子引起的单粒子翻转数才不容忽视. 从图7中还可以看出: LET值为  $37 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的次级粒子在体硅中的射程可达到几微米, 对于阱深在微米量级的微纳级SRAM器件而言, 有引发单粒子闩锁的可能, 由于单粒子闩锁是硬损伤, 一旦发生会对航天器造成严重危害, 即使  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子的生成概率很低, 只要存在引发单粒子闩锁的可能, 就应该引起足够重视. 质子单粒子效应测试相关的文献[15, 19]提示: 单粒子闩锁LET阈值低于  $40 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的宇航用电子元器件有必要开展高能质子单粒子效应地面模拟试验, 我们的计算结果较好支撑了这一结论.

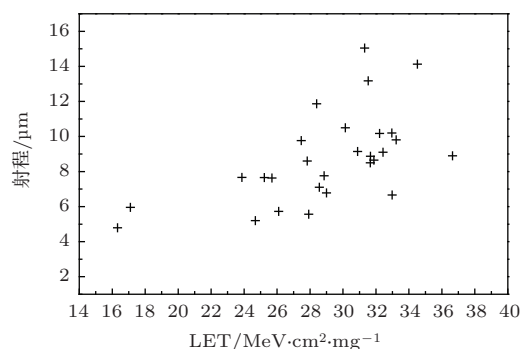


图7 各LET值对应的次级粒子在体硅中的射程情况  
Fig. 7. Distribution of ranges for secondary particles in bulk silicon vs. LETs.

## 4 结 论

利用Geant4, 针对不同能量(30 MeV, 100 MeV, 200 MeV和500 MeV)质子与微纳级SRAM器件的核反应过程开展计算, 分析了核反应次级粒子的种类、LET值及射程情况. 研究发现, 体硅中的次级粒子种类随着质子能量的增大而更加丰富; 质子与顶层金属布线的SRAM器件发生核反应后, 体硅中重核次级粒子( $Z \geq 30$ )数量随着质子能量的增大而增加的趋势明显; 金属布线层的存在和质子能量的增大为重核次级粒子( $Z \geq 30$ )的产生创造了条件. 通过计算还发现, 器件体硅区中  $Z > 60$ 的重核离子来源于质子与W的核反应, 核反应过程中的特殊作用机理会生成  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子, 且质子能量的增大有助于这种作用机理的发生.  $30 \leq Z \leq 50$ 的次级粒子在体硅中的LET

值大多高于 20 MeV cm<sup>2</sup>/mg, 且射程均在微米量级, 但要在 500 MeV 质子通量足够大的特殊空间环境中(比如火星探测器经过的区域)且器件翻转阈值大于 20 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 的情况下, 这些次级粒子引起的单粒子翻转数才不容忽视;  $30 \leq Z \leq 50$  的次级粒子在器件体硅区的 LET 值最大约为 37 MeV·cm<sup>2</sup>/mg, 相应射程可达到几微米, 对于阱深在微米量级的微纳级 SRAM 器件而言, 有引发单粒子门锁的可能, 由于单粒子门锁是硬损伤, 一旦发生会对航天器造成严重危害, 即使  $30 \leq Z \leq 50$  的次级粒子的生成概率很低, 只要存在引发单粒子门锁的可能, 就应该引起足够重视. 质子单粒子效应测试相关的文献提示: 单粒子门锁 LET 阈值低于 40 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 的宇航用电子元器件有必要开展高能质子单粒子效应地面模拟试验, 我们的计算结果较好支撑了这一结论. 本文工作尚未涉及电荷收集过程, 且次级粒子的电离径迹结构会对微纳级 SRAM 器件的电荷收集产生影响, 需要结合器件物理模拟等手段开展进一步研究.

## 参考文献

- [1] Zhang K Y, Zhang F Q, Luo Y H, Guo H X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 028501
- [2] Zhang K Y, Guo H X, Luo Y H, Fan R Y, Chen W, Lin D S, Guo G, Yan Y H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 068501
- [3] He C H, Geng B, Yang H L, Chen X H, Wang Y P, Li G Z 2003 *Acta Phys. Sin* **52** 2235 (in Chinese) [贺朝会, 耿斌, 杨海亮, 陈晓华, 王燕萍, 李国政 2003 物理学报 **52** 2235]
- [4] Zhang Q X, Hou M D, Liu J, Wang Z G, Jin Y F, Zhu Z Y, Sun Y M 2004 *Acta Phys. Sin* **53** 566 (in Chinese) [张庆祥, 侯明东, 刘杰, 王志光, 金运范, 朱智勇, 孙友梅 2004 物理学报 **53** 566]
- [5] James A F, James R S, Marty R S, Jacques B, Philippe P 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2161
- [6] Harry Y L, Michael S L, Harold L H 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3502
- [7] Edward P 2011 *Single Event Effects in Aerospace* (United States of America: IEEE Press) p42
- [8] Wang T Q 2003 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology) (in Chinese) [王同权 2003 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [9] He C H, Chen X H, Li G Z 2002 *Chinese Journal of Computational Physics* **19** 367 (in Chinese) [贺朝会, 陈晓华, 李国政 2002 计算物理 **19** 367]
- [10] He C H, Chen X H, Li G Z, Yang H L 2000 *Chinese Space Science and Technology* **5** 10 (in Chinese) [贺朝会, 陈晓华, 李国政, 杨海亮 2000 中国空间科学技术 **5** 10]
- [11] Zhang W Y 2002 *M. D. Dissertation* (Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology) (in Chinese) [张文勇 2002 硕士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [12] Neill P M, Badhwar G D, Culpepper W X 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2467
- [13] David M H, Ewart W B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2246
- [14] Cellere G, Paccagnella A, Visconti A 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2908
- [15] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Baggio J 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2908
- [16] Loke L A S 1999 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Graduate School of Stanford University)
- [17] Warren K M 2010 *Ph. D. Dissertation* (Nashville: Graduate School of Vanderbilt University)
- [18] Physics Reference Manual Version: geant4 10.1, Geant4 Working Groups <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml/> [2014-12-01]
- [19] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Dodd P E 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2110

# Effects of nuclear reactions between protons and metal interconnect overlayers on single event effects of micro/nano scaled static random access memory<sup>\*</sup>

Zhao Wen<sup>†</sup> Guo Xiao-Qiang Chen Wei Qiu Meng-Tong Luo Yin-Hong  
Wang Zhong-Ming Guo Hong-Xia

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

( Received 11 March 2015; revised manuscript received 22 April 2015 )

## Abstract

Since metal interconnect overlayers are central components of micro/nano scaled static random access memory (SRAM), the effects of their presence on proton-induced single-event susceptibility are noteworthy. Geant4 is used to calculate the kinds and probabilities of secondary particles existing in bulk silicon, which are produced from nuclear reactions between protons of different energies (30, 100, 200 and 500 MeV) and micro/nano scaled SRAM. The probabilities of secondary particles with  $Z \geq 30$  in different overlays are compared with one another; the particles are chiefly coming from nuclear reactions between 500 MeV protons and the SRAM topped with interconnect overlayers. In addition, the kinds and ranges of the secondary particles with high LETs (linear energy transfers) are also analyzed. Results show that there is an increase in the production of secondary particles with  $Z \geq 30$  due to the presence of metal interconnect overlayers and the rise of proton energy. The secondary particles with  $Z > 60$  in bulk silicon are generated by proton interactions with tungsten. As another consequence of the interactions, the secondary particles with  $30 \leq Z \leq 50$  are produced, the probability of which is higher as the proton energy increases. The maximum LET for the secondary particles with  $30 \leq Z \leq 50$  is about  $37 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$  and the corresponding range is several microns, which may induce single event latch-up in micro/nano scaled SRAM with well depths on the order of microns. Results obtained support the theoretic analysis of proton-induced single event effects of aerospace devices in space radiation environment.

**Keywords:** proton, nuclear reaction, micro/nano scaled static random access memory, single-event effects

**PACS:** 85.30.De, 78.70.-g, 25.40.Cm, 25.40.Ep

**DOI:** 10.7498/aps.64.178501

<sup>\*</sup> Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175271), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2014ZX01022-301).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhaowen@nint.ac.cn](mailto:zhaowen@nint.ac.cn)