

**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**

罗尹虹 张凤祁 郭红霞 Wojtek Hajdas

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

Luo Yin-Hong Zhang Feng-Qi Guo Hong-Xia Wojtek Hajdas

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 018501 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20190878

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190878>

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**

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>

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>

新型绝缘体上硅静态随机存储器单元总剂量效应

Total ionizing dose effects on innovative silicon-on-insulator static random access memory cell  
物理学报. 2019, 68(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190405>

铁电存储器<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 射线及电子总剂量效应研究

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under <sup>60</sup>Co gamma rays and electrons  
物理学报. 2018, 67(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180829>

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>

应用中国散裂中子源9号束线端研究65 nm微控制器大气中子单粒子效应

Atmospheric neutron single event effect in 65 nm microcontroller units by using CSNS-BL09  
物理学报. 2019, 68(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191196>

# 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\*

罗尹虹<sup>1)†</sup> 张凤祁<sup>1)</sup> 郭红霞<sup>1)</sup> Wojtek Hajdas<sup>2)</sup>

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

2) (保罗谢勒研究所, 菲林根 5232 瑞士)

(2019年6月6日收到; 2019年10月6日收到修改稿)

为实现对纳米 DICE (dual interlocked cell) 加固器件抗质子单粒子能力的准确评估, 通过对 65 nm 双 DICE 加固静态随机存储器 (static random access memory, SRAM) 重离子单粒子翻转试验数据的分析, 获取了其在重离子垂直和倾角入射时的单粒子翻转 (single event upset, SEU) 阈值以及离子入射最劣方位角, 并结合蒙卡仿真获取不同能量质子与器件多层金属布线层发生核反应产生的次级粒子 LET (linear energy transfer) 值最大值以及角度分布特性, 对器件在不同能量下的质子单粒子效应敏感性进行了预测, 质子单粒子效应实验结果验证了预测方法的有效性以及预测结果的准确性, 并提出针对 DICE 加固类器件在重离子和质子单粒子效应试验评估中均应开展离子最劣方位角下的倾角入射试验.

**关键词:** 双双互锁存储单元加固, 单粒子翻转, 质子, 最劣方位角

**PACS:** 85.30.De, 61.80.Az, 21.60.Ka

**DOI:** 10.7498/aps.69.20190878

## 1 引言

空间辐射环境下, 重离子、质子是造成器件单粒子效应的主要原因, 由于中高能质子主要通过核反应产生的次级粒子引发单粒子效应, 所以质子单粒子效应截面通常远小于重离子直接电离产生的单粒子效应截面, 但在空间低轨环境下, 高的质子通量使得器件单粒子效应主要来自于质子<sup>[1,2]</sup>. 为准确评估器件在轨单粒子错误率, 通常对器件应开展重离子和质子单粒子效应实验获取器件单粒子效应截面曲线. 相比于质子单粒子效应试验带来的辐射活化和放射性残留等问题, 以及用于开展单粒子效应试验的中高能质子加速器的相对缺乏, 重离子实验更加易于开展. 因此国际上提出了一些基于重离子试验数据获取质子单粒子翻转截面的计算

模型, 如 Peterson 模型<sup>[3]</sup>、Profit 模型<sup>[4]</sup>、Edmonds 模型<sup>[5]</sup> 以及 J.Barak 模型<sup>[6]</sup> 等, 这些模型通常做了很多近似假设, 且主要考虑质子与硅发生核反应产生的次级粒子. 随着器件工艺不断发展, 这些模型结果由于各自的局限性为空间质子单粒子翻转率预估带来极大不确定性<sup>[7,8]</sup>. 在重离子试验数据的基础上基于蒙卡仿真计算质子单粒子效应截面也是目前常用的一种手段, 由于器件灵敏体积的建立对于仿真结果的准确性至关重要, 通常需结合重离子试验数据对灵敏体积几何尺寸、临界电荷、收集效率等参数进行确定和校准, 该方法物理过程清晰, 对于非加固器件质子单粒子效应截面的计算结果精度较高<sup>[9-11]</sup>. 但对于采用多节点冗余加固的器件, 不同敏感节点对的方向性、距离以及临界电荷均存在差异, 在灵敏体积构建时除考虑重离子试验数据, 还需要详细的器件工艺和几何信息结合

\* 国家自然科学基金重大项目 (批准号: 11690043, 11690040) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn

TCAD (technology computer aided design) 或 SPICE (simulation program with integrated circuit emphasis) 仿真对灵敏体积模型进一步优化, 难度和复杂性明显增加<sup>[12-14]</sup>.

因此开展质子单粒子效应试验仍然是保障器件空间可靠应用最直接有效的手段. 但目前国内仅有中国原子能科学研究院 100 MeV 质子回旋加速器可用于开展 25 MeV 以上质子单粒子效应实验. 对于一些非加固器件, 通常单粒子效应 LET 阈值低, 质子能量 100 MeV 时器件已经达到饱和状态, 基本满足单粒子效应试验和空间质子单粒子错误率预估的需求. 而对于加固器件, 通常有高的单粒子效应 LET 阈值<sup>[15-18]</sup>, 则需要进一步开展大于 100 MeV 的质子单粒子效应实验, 欧空局单粒子效应实验方法<sup>[19]</sup>中规定的最大质子能量为 200 MeV. 由于质子与硅核反应产生的次级粒子最大 LET 值不超过  $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  时, 因此当器件重离子 LET 阈值大于  $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  时, 通常认为无需再开展质子单粒子效应试验. 但随着器件技术的发展, 器件工艺中采用了一些新的金属材料, 导致质子与材料核反应产生的次级粒子种类、LET 值分布更加广泛, 最大 LET 值可能超过  $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ <sup>[20,21]</sup>. 为确保空间环境下关键系统的可靠性, 必须对这类加固器件的抗质子单粒子能力进行准确地试验评估. 由于国内现有质子加速器实验条件的限制, 能量 100 MeV 以上的质子实验需要依托国外的质子加速器开展, 实验成本昂贵, 实验机时难以保障. 因此基于重离子实验数据, 并结合蒙特卡洛仿真获取质子核反应产生的次级粒子分布, 对质子单粒子效应敏感性进行先期预测, 可以对器件是否需要开展质子单粒子效应实验以及是否需开展 100 MeV 以上质子实验进行判断和筛选, 从而降低对质子试验机时的需求.

本工作基于 65 nm 双 DICE 加固 SRAM 器件, 依托国内两台重离子辐照装置获取了重离子单粒子效应试验结果, 结合质子蒙特卡洛仿真获取不同能量质子与器件多层金属布线层作用产生的次级粒子分布, 预测了该器件在国内现有加速器最大质子能量 100 MeV 时和相关标准中规定的最大质子能量 200 MeV 时的单粒子效应敏感性, 质子试验结果验证了预测结果的准确性, 并对开展此类器件重离子和质子单粒子效应试验提出了建议.

## 2 试验

### 2.1 试验样品

试验样品为 128 kbit 双 DICE SRAM, 采用 65 nm 体硅 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor transistor) 工艺, 图 1 为 DICE 存储单元电路原理图. 由于 DICE 器件仅有一个灵敏节点对的两个灵敏节点同时沉积足够电荷才能引发单粒子翻转, 其抗单粒子翻转能力依赖于灵敏节点之间的距离. 随着器件特征尺寸的减小, 灵敏节点间距也随之减小, DICE 单元抗单粒子翻转有效性降低. 因此该 SRAM 存储单元设计时采用了双 DICE 单元交叉版图布局的设计方式 (见图 2), 即在 DICE 单元每两个相邻晶体管之间插入另一个 DICE 单元相应的晶体管, 通过采用交叉布局实现面积共用, 在不牺牲面积和功耗的情况下, 有效增加了 DICE 单元灵敏节点对之间的距离. 当器件存储数据时, 存在四组单粒子翻转灵敏节点对, 当任意一对灵敏节点收集电荷超过单粒子翻转临界电荷时, DICE 单元发生单粒子翻转. 表 1 列出了当 DICE 存储单元存储不同数据时的灵敏节点对情况. 图 2 中标注了存储数据 1 时 DICE 单元的 4 组灵敏节点对分布情况.

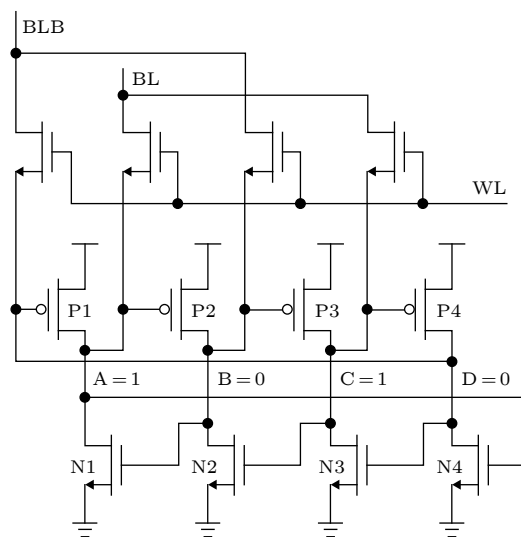


图 1 DICE 存储单元电路原理图

Fig. 1. Diagram of the DICE memory cell.

### 2.2 重离子试验方案

重离子单粒子效应试验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器以及兰州近物所回旋加速

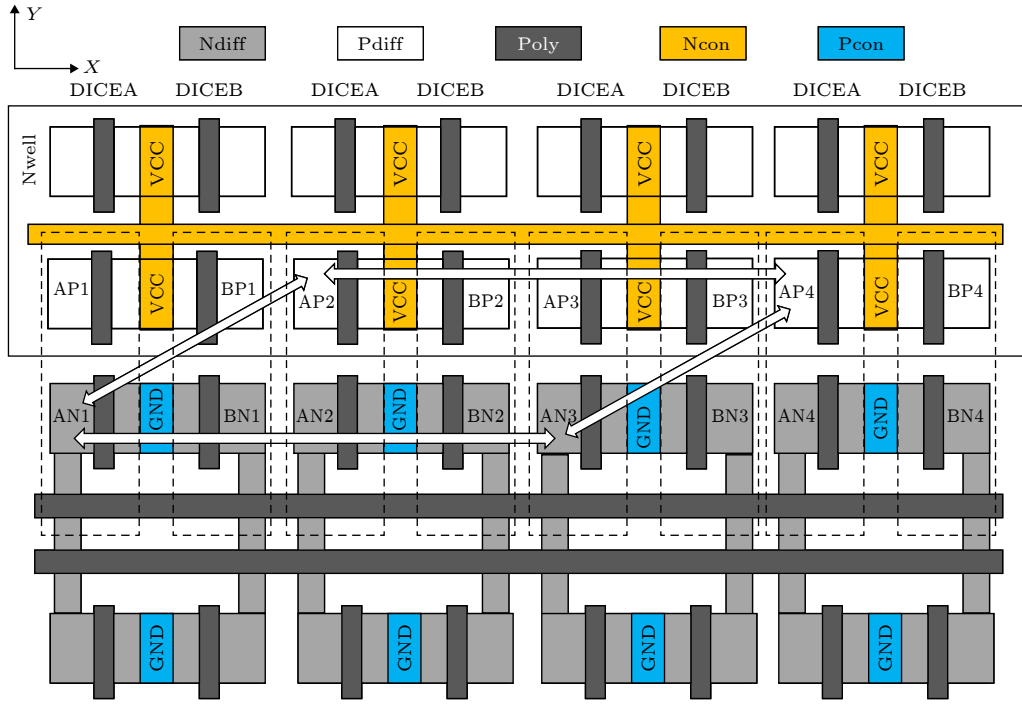


图 2 双 DICE 存储单元交叉布局版图示意图以及存储数据 1 时 DICE 单元 4 组灵敏节点对分布情况  
Fig. 2. Layout diagram of dual DICE cells and the distribution of four sensitive pairs with “1”.

表 1 双 DICE 存储单元存储不同数据时的灵敏节点对  
Table 1. Sensitive pairs with different data stored in dual DICE cell.

存储数据	灵敏节点对	存储数据	灵敏节点对
BL = 1, (A, B, C, D) = (1, 0, 1, 0)	N1/N3	BL = 0, (A, B, C, D) = (0, 1, 0, 1)	N2/N4
	P2/P4		P1/P3
	N1/P2		N2/P3
	N3/P4		N4/P1

器重离子辐照装置 (HIRFL) 上开展, 考虑到纳米器件多层金属布线层对重离子能量的衰减会影响有效 LET 值的表征, 表 2 列出了试验中所选用的离子种类信息并结合器件多层金属布线层信息计算了入射到器件灵敏区的重离子有效 LET 值。

在一些指定离子开展了离子 30°, 60°倾角入射试验, 倾角入射时选用了两种入射方位角, 分别为

沿着器件 X 轴  $\phi = 0^\circ$  即沿着阱的方向, 以及沿着 Y 轴  $\phi = 90^\circ$  即横跨阱的方向倾角入射, 如图 3 所示. 为进一步获取器件单粒子翻转最劣方位角, 根据四组灵敏节点对的方向, 在 Br 离子入射时, 开展了四种方位角下即  $\phi = 0^\circ, \phi = 45^\circ, \phi = 90^\circ, \phi = 135^\circ$  的倾角 60° 单粒子效应试验. 试验中存储单元填充的测试图形均为 55 H, 阵列工作电压 1.2 V.

表 2 试验离子种类信息  
Table 2. Ion species in Heavy ion testing.

序号	离子种类	能量/MeV	射程/ $\mu\text{m}$	垂直入射时有效LET/(MeV·cm <sup>2</sup> /mg)	倾角30°、60°时对应的有效LET/(MeV·cm <sup>2</sup> /mg)
1	<sup>19</sup> F <sup>9+</sup>	110	82.7	4.4	5.1/9.3
2	<sup>35</sup> Cl <sup>11, 14+</sup>	160	46.0	14.0	16.5/30.7
3	<sup>48</sup> Ti <sup>10, 15+</sup>	169	34.7	23.5	
4	<sup>74</sup> Ge <sup>11, 20+</sup>	210	30.5	37.4	
5	<sup>79</sup> Br <sup>13, 21+</sup>	220	30.4	40.5	45.8/63.3
6	<sup>127</sup> I <sup>15, 25+</sup>	265	28.8	52.7	57.7/68.0
7	<sup>209</sup> Bi <sup>31+</sup>	923	53.7	99.8	



试验时采用动态辐照, 辐照过程中测试系统对存储数据进行连续回读, 并对发生翻转的单元地址和数据记录。

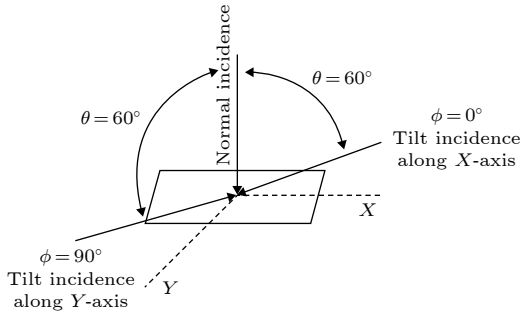


图 3 重离子沿不同方位角倾斜 60°入射器件示意图  
Fig. 3. Schematic of heavy ion tilt 60° incidence along different orientational angle.

### 3 重离子单粒子效应试验结果及分析

图 4 给出了 DICE SRAM 器件重离子单粒子位翻转截面与有效 LET 值的关系曲线, 并对垂直入射条件下器件单粒子翻转试验数据进行了威布尔拟合. 重离子垂直入射时, F 离子和 Cl 离子均未引起 SRAM 发生单粒子翻转, 仅当 LET 值 23.5 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 的 Ti 离子入射且入射总注量达到 1 × 10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup> 时才发生 1 次单粒子翻转. 根据威布尔拟合结果可知, 重离子垂直入射时, 器件单粒子翻转阈值可达 22 MeV·cm<sup>2</sup>/mg, 而通常的非加固 6 管 SRAM 器件其单粒子翻转阈值约为 0.3 MeV·cm<sup>2</sup>/mg<sup>[22]</sup>, 重离子试验结果表明采用双 DICE 交叉布局方法极大提高了 SRAM 单元 SEU 阈值. 重离子倾角入射时, 当 LET 值 14 MeV·cm<sup>2</sup>/mg

的 Cl 离子沿 X 方向 30°倾角入射时就能引发单粒子翻转, 且翻转截面高于 Ti 离子垂直入射时的 SEU 截面, 而沿 Y 方向 30°倾角入射却不能引发 SEU, 这表明相比于离子沿 Y 方向入射, 沿 X 方向入射更易引起 SEU 且明显降低器件 SEU 阈值, 此时单粒子翻转阈值约为 14 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 左右.

对 Br 离子在四种方位角下倾角 60°入射时的 SEU 截面数据进行分析可知, 当入射方位角  $\phi = 45^\circ$ ,  $\phi = 135^\circ$  时, SEU 截面基本一致, 位于方位角  $\phi = 0^\circ$  与  $\phi = 90^\circ$  两者 SEU 截面之间, 可见离子沿 X 方向倾角入射器件单粒子翻转敏感性最高, 而沿 Y 方向倾角入射 SEU 敏感性最低. 当沿  $\phi = 0^\circ$  和  $\phi = 90^\circ$  两种方位角入射时, 离子倾斜角度越大 SEU 截面差异越明显. 在 I 离子倾角 30°时, 离子沿 X 方向斜入射时的翻转截面比 Y 方向斜入射时的截面高 2 倍, 而在倾角 60°时, 沿 X 方向斜入射时的翻转截面比 Y 方向斜入射时的截面高 7 倍. 另一方面, 当离子沿 Y 方向倾角入射, 有效 LET 值 57.7 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 以上时, 单粒子翻转截面随 LET 值的增加不再发生明显变化, 进入饱和状态; 而离子沿 X 方向倾角入射时, SEU 截面随 LET 值持续增加, 当有效 LET 值达到 68 MeV·cm<sup>2</sup>/mg 时, SEU 截面已达  $4.4 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup> 即 4.4  $\mu$ m<sup>2</sup>, 高于垂直入射时器件的 SEU 饱和截面  $1.4 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>, 并远高于非加固标准 6 管 SRAM 存储单元的面积 0.50 或 0.625  $\mu$ m<sup>2</sup>. 可见, 对于 65 nm 工艺采用双 DICE 的版图设计增大敏感节点对之间的距离, 虽增大了器件单粒子翻转阈值, 但高 LET 值时器件单粒子翻转依然非常严重, 特别在沿 X 方向倾角入射时.

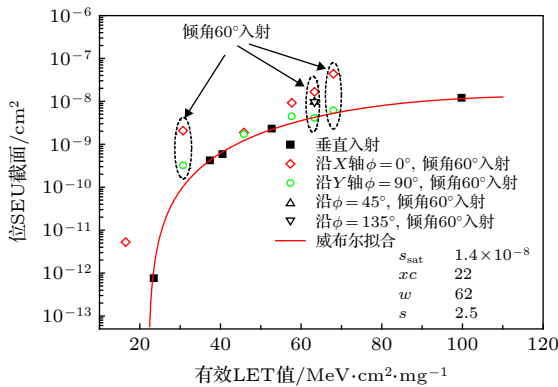


图 4 65 nm SRAM 重离子单粒子位翻转截面曲线  
Fig. 4. 65 nm dual DICE SRAM heavy ion bit SEU cross section versus the effective LET.

CMOS 器件通常采用双阱工艺, 电荷漂移、扩散和双极放大是单粒子电荷收集的几种主要机制. 通常双极放大效应主要发生在 N 阱 PMOS 中, 因此为稳定阱电势避免寄生双极晶体管开启导致器件发生 SEU, 器件版图设计时 (见图 2) 在 N 阱中增加了实体 N<sup>+</sup> 保护环, 而 P 阱中添加了 P<sup>+</sup> 间歇式保护环. 以存储数据 1 为例, 当离子垂直入射时, 由于 N<sup>+</sup> 保护环的存在, 在 N 阱中沉积的电子仅引起入射晶体管下方阱电势扰动, 电子将被保护环快速收集, 抑制电势扰动的传播, 因此间距远的敏感节点对 AP2/AP4 难以通过寄生双极放大效应同时收集足量电荷引发 SEU. 而空穴迁移率低, 扩散距离有限, 且电荷在从 AP2 向 AP4 扩散

过程中 DICE B 的敏感节点 BP2 也将收集电荷, 扩散电荷量进一步减少, 扩散空穴也难以同时被 AP2/AP4 敏感节点对收集引发 SEU. 因此, 离子垂直入射时, P 阱中电子沿阱的方向扩散引起 NMOS 敏感节点对 AN1/AN3 电荷收集是导致 DICE A 单元 SEU 的主要原因. 而当离子沿 X 方向倾角入射时, 将使 N 阱中沿离子入射径迹多个 PMOS 下方的阱电势扰动, 使得敏感节点对 AP2/AP4 甚至 BP2/BP4 触发寄生双极放大效应; 同时 P 阱中离子径迹穿过的多个 NMOS 下方也会由于电荷扩散导致 AN1/AN 收集电荷, 二者共同作用, 将导致 DICE A 发生 SEU, 甚至引发 DICE A/DICE B 发生两位多位翻转. 从分析可知, 当离子沿 X 方向即阱的方向入射时, 会引起最大的电荷共享和阱电势的调制, 更易触发单粒子翻转和多位翻转, 因此离子沿阱的方向倾角入射是 DICE 器件单粒子效应的最劣方位角, 在开展单粒子效应试验时, 必须考虑离子入射方位角对器件 SEU 的影响.

#### 4 质子核反应产生的次级粒子分布计算

在质子单粒子效应理论研究方面, 通常采用蒙特卡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, 统计翻转数, 获取器件单粒子效应截面. 由于双 DICE 加固设计器件每个存储单元涉及多个敏感节点对, 每组敏感节点对距离不同, 且两个存储单元又相互嵌套, 为构建双 DICE SRAM 灵敏体积阵列带来了极大的难度. 因此这里并不直接计算双 DICE SRAM 的质子单粒子效应截面, 而是关注质子与器件上方多层金属布线层作用产生的次级粒子 LET 值分布情况, 基于不同能量质子与不同互联材料发生核反应所产生的次级粒子 LET 值最大值的差异, 以及次级粒子角度分布特性, 预测其对 65 nm 双 DICE SRAM 质子单粒子敏感性可能带来的影响, 从而指导质子单粒子效应试验工作的开展.

由于国内现有加速器最大质子能量为 100 MeV, 相关试验标准中规定的最大质子能量为 200 MeV, 因此仿真中质子能量点选择 100, 200 MeV 两个能量点. 图 5 中给出了 65 nm DICE SRAM 有源区

上方多层金属布线层的材料和厚度信息, 该器件采用了 Cu 作为互联材料取代了原有的铝互联工艺. 由于器件单粒子效应灵敏区厚度通常为 1  $\mu\text{m}$ , 因此图 6 计算结果中给出了质子穿过多层金属布线层后在体硅区表面 1  $\mu\text{m}$  厚度范围内的次级粒子 LET 值分布情况.

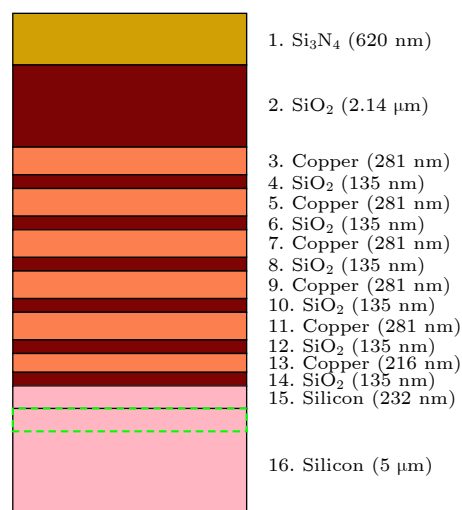


图 5 65 nm DICE SRAM 有源区上方多层金属布线层  
Fig. 5. Multiple metal-interconnection layers above the active area in 65 nm SRAM.

从图 6(a) 中可以看出, 当采用铝互联工艺时, 100 MeV 质子和 200 MeV 质子产生的次级粒子最大 LET 值分别为 11 和 13.2  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ , 与早期所报道的质子产生的次级粒子最大 LET 值小于 15  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  的认知是一致的. 重离子单粒子效应试验结果表明, 重离子垂直入射时 65 nm DICE SRAM 的单粒子翻转阈值为 22  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ . 由于相关试验标准中规定质子单粒子效应试验仅在垂直入射条件下开展即可, 如果基于以前的认识, 则无需进一步开展 200 MeV 及以下质子单粒子效应试验. 但由于器件采用了铜互连工艺, 图 6(b) 计算结果表明, 此时 100 MeV 质子和 200 MeV 质子产生的次级粒子最大 LET 值分别为 19.8 和 24.9  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ . 基于计算结果和重离子试验数据, 可以初步判断, 100 MeV 质子垂直入射时不能引起器件单粒子翻转, 而 200 MeV 质子大注量垂直入射时能够引起器件单粒子翻转, 但截面较小.

入射质子能量不同, 与材料原子反应道不同, 产生的次级粒子种类和能量也就不同. 质子能量越高, 反应道越多, 产生的次级粒子种类也就越多.

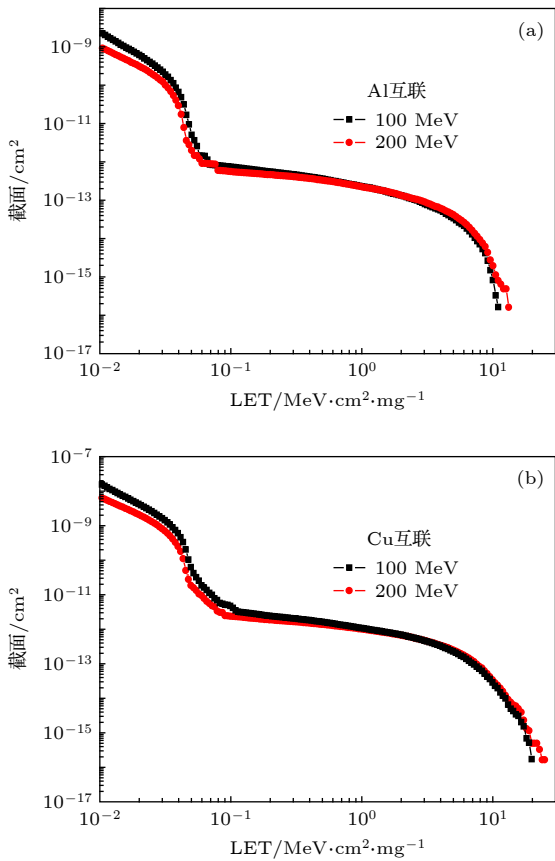


图 6 100 MeV 和 200 MeV 质子穿过器件多层金属布线层后在硅中产生的次级粒子 LET 值分布 (a) 铝互联; (b) 铜互联

Fig. 6. LET distribution of secondary particle in silicon with 100 MeV and 200 MeV protons passing through multiple metallization layers: (a) Al interconnection; (b) Cu interconnection.

当质子与 Cu 发生核反应时, 产生的次级粒子包括质子、中子、 $\alpha$  离子、重离子等, 其中重离子种类覆盖从原子序数 3 到 30 之间. 为了解核反应产生的次级粒子相比于入射质子其出射角的分布情况, 以反应截面较高的原子序数  $Z = 27$  的次级粒子为例, 图 7 给出了 100 MeV 质子穿过器件多层 Cu 金属布线层产生的  $Z = 27$  次级粒子能量角度分布情况,  $\theta$  为次级粒子与入射质子方向之间的夹角. 从图中可以看出, 能量越高的次级粒子, 出射角度越小, 最大限度地保持与入射质子的方向一致, 更加前向出射从而保存动量. 而能量越低的次级粒子则具有更宽的角度分布范围, 即低 LET 值、射程短的次级粒子倾向于各向同性. 通常质子单粒子效应试验认为核反应产生的次级粒子是各向同性的, 试验中无需考虑质子入射角度对单粒子效应截面的影响, 仅采用垂直入射开展效应试验即

可. 但计算结果表明, 能量最高、LET 最大、射程最长的次级粒子具有优先前向出射的特性, 这必然会对灵敏节点对具有明显方向性的 DICE 加固设计类器件的质子单粒子效应产生影响. 由于 100 MeV 和 200 MeV 质子穿过多层 Cu 金属布线层后产生的最大 LET 值分别为 19.8 和 24.9 MeV·cm<sup>2</sup>/mg, 均大于重离子沿最劣方位角倾角入射时 65 nm DICE SRAM 的单粒子翻转阈值 14 MeV·cm<sup>2</sup>/m, 因此, 可以判断当 100 MeV 质子和 200 MeV 质子沿着器件最劣方位角倾角入射时, 均能引发器件发生单粒子翻转. 对于 LET 值 14 MeV·cm<sup>2</sup>/m 以上的次级粒子, 由于 200 MeV 质子产生的次级粒子反应截面约为 100 MeV 质子的两倍, 因此 200 MeV 质子倾角入射时的单粒子翻转截面应大于 100 MeV 质子.

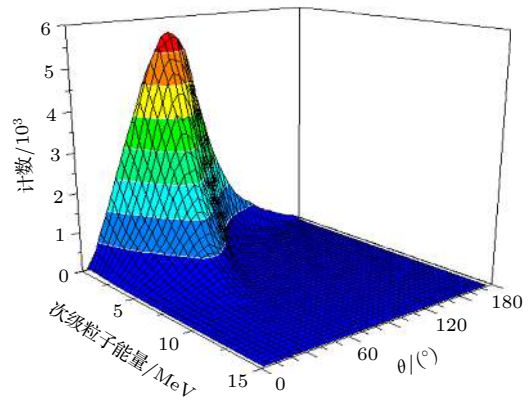


图 7 65 nm 双 DICE SRAM 质子单粒子翻转截面

Fig. 7. Proton single event upset cross section in 65 nm dual DICE SRAM.

## 5 质子单粒子效应试验验证

### 5.1 试验条件

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, 基于国内现有加速器质子能量条件以及相关标准中规定的最大质子能量, 试验中质子能量点选择 100 MeV, 200 MeV 两个能量点. 为研究中高能质子核反应产生的次级粒子可能引入的单粒子效应角度效应, 在两个能量点下均进行了垂直和倾角 60° 试验, 其中倾角试验中的方位角设定为重离子试验中确定的最劣方位角, 即质子沿 X 方向即阱的方向倾角入射. 试验在空气中进行, 辐照时采用准直器, 束斑面积 3 cm<sup>2</sup>, 质子注量均



设定为  $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ .

## 5.2 试验结果及分析

图 8 给出了双 DICE 加固器件质子单粒子效应试验结果. 从图中可以, 当垂直入射时, 100 MeV 质子没有产生单粒子翻转, 而在 200 MeV 时引起 1 次单粒子翻转. 当质子沿最劣方位角倾角  $60^\circ$  入射时, 此时 100 MeV 质子也能引发单粒子翻转, 同时 200 MeV 质子倾角入射时 SEU 截面比垂直入射时高 8 倍, 试验结果表现出明显的质子 SEU 角度效应. 另一方面, 倾角入射时 200 MeV 质子 SEU 截面是 100 MeV 质子 SEU 截面的 4 倍, SEU 截面随能量增加而增加, 没有达到饱和. 质子试验结果验证了重离子试验数据结合质子核反应次级粒子仿真数据预测质子单粒子效应敏感性结果的准确性. 值得注意的是, 如果仅以 100 MeV 质子加速器或质子垂直辐照试验结果作为空间质子翻转率预估依据, 将会明显高估器件抗单粒子能力, 为空间应用带来隐患. 另一方面, 虽然 DICE 器件质子单粒子效应截面很低, 相比于非加固 6 管 SRAM 器件 200 MeV 时 SEU 截面<sup>[22]</sup> 低了一个数量级左右, 单粒子效应阈值也高达 100 MeV, 具有很强的抗质子单粒子能力, 但由于这类 DICE 器件通常应用在核心关键系统上, 当工作于低轨卫星等质子通量丰富的空间环境时, 仍需开展质子单粒子试验考核评估, 且应沿着阱的方向进行倾角入射获取最劣试验条件下的质子 SEU 截面, 从而保障其空间应用的高可靠.

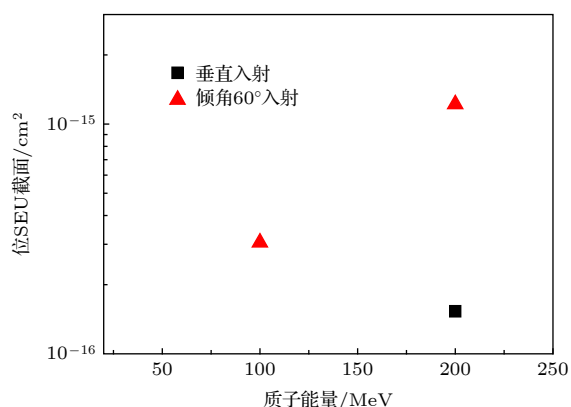


图 8 100 MeV 质子穿过多层金属布线层产生的  $Z = 27$  次级粒子能量角度分布

Fig. 8. The distribution of energy and angle of secondary particle with  $Z = 13$  induced by interaction with multiple metallization layers by 100 MeV protons.

## 6 结 论

本文针对国内质子加速器现状, 为准确评价纳米 DICE 加固器件抗质子单粒子能力, 实现其空间可靠应用, 针对 65 nm 双 DICE 加固设计器件, 在重离子单粒子效应试验研究基础上, 明确了双 DICE 设计在提高纳米器件抗单粒子翻转阈值方面的有效性, 并获取了器件在重离子垂直和倾角入射时的单粒子翻转阈值以及离子入射最劣方位角. 蒙特卡洛仿真获取了不同能量质子与器件多层金属布线层发生核反应产生的次级粒子 LET 值最大值以及次级粒子的角度分布特性. 通过二者结合, 对 65 nm DICE SRAM 在国内现有加速器最大质子能量 100 MeV 时和相关标准中规定的最大质子能量 200 MeV 时的单粒子效应敏感性进行了先期预测, 质子单粒子效应试验结果验证了预测方法的有效性以及预测结果的准确性. 通过该方法, 可以对器件是否需要开展质子单粒子效应试验以及是否需开展 100 MeV 以上质子试验进行有效判断和筛选, 并明确对质子加速器最大能量条件的要求, 降低对质子试验机时的需求. 另一方面, 研究结果也表明, DICE 类器件质子单粒子翻转也存在明显的角度效应, 因此针对 DICE 加固类器件在重离子和质子单粒子效应试验评估中均应开展离子最劣方位角下的倾角入射试验.

## 参考文献

- [1] Hoeffgen S K, Durante M, Ferlet-Cavrois V, Harboe-Sørensen R, Lennartz W, Kuendgen T, Kuhnhenh J, Latessa C, Mathes M, Menicucci A, Metzger S, Nieminen P, Pleskac R, Poivey C, Scharadt D, Weinand U 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 1161
- [2] Falguere D, Boscher D, Nuns T, Duzellier S, Bourdarie S, Ecoffet R, Barde S, Cueto J, Alonzo C, Hoffman C 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2782
- [3] Peterson E L 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 1600
- [4] Calvel P, Barillot C, Lamothe P, Ecoffet R, Duzellier S, Falguere D 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 2827
- [5] Edmonds L D 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 1713
- [6] Barak J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3336
- [7] Koga R, George J, Swift G, Yui C, Edmonds L, Carmichael C, Langley T, Murray P, Lanes K, Napier M 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2825
- [8] Hansen D L 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2874
- [9] Sierawski B D, Pellish J A, Reed R A, Schrimpf R D, Warren K M, Weller R A, Mendenhall M H, Black J D, Tipton A D, Xapsos M A, Baumann R C, Deng X, Campola M J, Friendlich M R, Kim H S, Phan A M, Seidleck C M 2009



- IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3085
- [10] Warren K M, Weller R A, Sierawski B D, Reed R A, Mendenhall M H, Schrimph R D, Massengill L W, Porter M E, Wilkinson J D, Label K A, Adams J H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 898
- [11] Xi K, Geng C, Zhang Z G, Hou M D, Sun Y M, Luo J, Liu T Q, Wang B, Ye B, Yin Y N, Liu J 2016 *Chin. Phys. C* **40** 066001
- [12] Warren K M, Sierawski B D, Reed R A, Weller R A, Carmichael C, Lesea A, Mendenhall M H, Dodd P E, Schrimph R D, Massengill L W, Hoang T, Wan H, De Jong J L, Padovani R, Fabula J J 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2419
- [13] Gorbunov M S, Boruzdina A B, Dolotov P S 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 2250
- [14] Loveless T D, Jagannathan S, Reece T, Chetia J, Bhuva B L, McCurdy M W, Massengill L W, Wen S J, Wong R, Rennie D 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 1008
- [15] Amusan O A, Massengill L W, Baze M. P., Bhuva B L, Witulski A F, DasGupta S, Sternberg A L, Fleming P R, Heath C C, Alles M L 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2584
- [16] Gorbunov M S, Dolotov P S, Antonov A A, Zebrev G.I, Emeliyanov V V, Boruzdina A B, Petrov A G, Ulanova A V 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 1575
- [17] Liu L, Yue S G, Lu S J 2015 *J. Semicond.* **36** 115007
- [18] Cabanas-Holmen M, Cannon E H, Rabaa S, Amort T, Ballast J, Carson M, Lam D, Brees R 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4374
- [19] European Space Agency 2014 *ESCC Basic Specification* NO. 25100
- [20] Turflinger T L, Clymer D A, Mason L W, Stone S, George J S, Koga R, Beach E, Huntington K, Turflinger T L 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 309
- [21] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Baggio J, Dodd P E, Felix J A, Ferlet-Cavrois V, Paillet P, Lambert D, Sexton F W, Hash G L, Blackmore E 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2622
- [22] Luo Y H, Zhang F Q, Wang Y P, Wang Y M, Guo X Q, Guo H X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 068501 (in Chinese) [罗尹虹, 张凤祁, 王燕萍, 王圆明, 郭晓强, 郭红霞 2016 *物理学报* **65** 068501]

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

Luo Yin-Hong<sup>1)†</sup> Zhang Feng-Qi<sup>1)</sup> Guo Hong-Xia<sup>1)</sup> Wojtek Hajdas<sup>2)</sup>

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

2) (*Paul Scherrer Institute, Villigen PSI 5232, Switzerland*)

(Received 6 June 2019; revised manuscript received 6 October 2019)

## Abstract

In order to evaluate the radiation tolerance to proton single event effect(SEE) in nanometer dual interlocked cell (DICE) hardening device accurately, single event upset (SEU) linear energy transfer (LET) threshold at heavy ion normal and tilt incidence, and the worst case SEU orientational angle are acquired based on the analysis of heavy ion SEU testing data in 65 nm dual DICE static random access memory (SRAM). It is proved that dual DICE design is effective for improving the LET threshold against SEU. However, heavy ion tilt incidence at the worst orientational angle will significantly reduce the SEU threshold and increase the SEU cross section. The worst orientational angle for SEU in DICE SRAM is the large tilting angle along the well. The maximum LET value and the emission angle distribution of secondary particle induced by the nuclear reaction between protons with different energy and layers with different multiple metallization are obtained by using Monte-Carlo simulation. The maximum LET value of secondary particle from proton-copper spallation reaction is higher than  $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  for 100 MeV and 200 MeV protons. Secondary particles with the maximum energy and longest range are emitted preferentially in the forward direction. Proton SEU sensitivity is further predicted through combining heavy ion test data with Monte-Carlo simulation. Proton SEU test data verify the effectiveness of the prediction method and the accuracy of the prediction results. The research results indicate that the tolerance of nanometer DICE hardening technique against proton SEU will be overestimated if SEE evaluation test is carried out with only 100 MeV proton accelerator or normal incidence. Proton single event upset in nanometer dual DICE SRAM has an evident dependence on tilt angle and orientational angle. By adopting the above prediction method, whether proton SEE test needs performing or not in nanometer radiation-hardening device can be judged and screened. The requirements for the maximum energy of proton accelerator can be ascertained. In order to ensure that the devices are applied to space with high reliability, SEE test should be carried out including tilt incidence at the worst orientational angle in nanometer DICE hardening device in the process of heavy ion and proton SEE test evaluation.

**Keywords:** double dual interlocked cell hardening, single event upset, proton, the worst orientational angle

**PACS:** 85.30.De, 61.80.Az, 21.60.Ka

**DOI:** 10.7498/aps.69.20190878

\* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11690043, 11690040).

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