

静态随机存储器单粒子翻转 的 Monte Carlo 模拟^{*}

李 华[†]

(暨南大学物理系 广州 510632)

(2005 年 7 月 5 日收到 2005 年 12 月 4 日收到修改稿)

利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法, 对 10—20MeV 中子在静态随机存储器 (SRAM) 中引起的单粒子翻转进行了模拟, 着重对中子在 SRAM 灵敏区引起的电离能量沉积进行了计算, 并对中子引起单粒子翻转过程相关物理量进行了计算. 这些计算模拟结果为了解 10—20MeV 中子引起 SRAM 单粒子翻转过程提供了详细的统计信息, 为 SRAM 的抗辐射加固提供相关参考信息.

关键词: SRAM 单粒子翻转, Monte Carlo 模拟, 能量沉积

PACC: 6180, 0250, 2970G

1. 引 言

工作在辐射环境中的高密度静态随机存储器 (SRAM) 会发生单粒子效应^[1-3]. 由于高密度 SRAM 被广泛应用于地球轨道飞行器和空间探测器上, 因此有必要对 SRAM 发生的单粒子翻转过程进行详细研究. SRAM 单粒子翻转可由高能粒子直接引起, 也可由高能粒子间接引起. 中子引起的 SRAM 单粒子翻转属于间接引起. 中子引起存储器单粒子翻转的研究已有很多^[4-10], 但利用 Monte Carlo 方法对其进行研究的较少. 我们已利用 Monte Carlo 方法对中子引起的单粒子翻转进行了一些模拟研究^[11-13], Monte Carlo 模拟可以为了解中子引起 SRAM 单粒子翻转内部物理过程提供详细的相关信息.

10—20MeV 中子引起 SRAM 单粒子翻转物理过程如下描述: 中子射入 SRAM 硅片后, 入射中子与硅原子将发生碰撞, 其中一些中子与硅原子将发生核反应, 产生质子、 α 粒子和相应的反冲核. 产生的带电粒子质子和 α 粒子射程较长, 它们在经过硅片的过程中通过电离能量沉积损失能量; 反冲核射程较短, 它们损失能量并停留在硅片中. 同时, 在这些能量沉积的路径上有大量的电子-空穴对产生. 在

SRAM 灵敏区内产生的电子-空穴对若被收集, 收集的电荷大于 SRAM 固有临界电荷, SRAM 将发生单粒子翻转.

本文利用 Monte Carlo 方法, 对入射中子与硅原子反应产生的带电粒子及其相应反冲核在 SRAM 灵敏单元内能量沉积过程进行模拟, 而不模拟相关的电路, 即不需了解详细的电路, 只需估计出灵敏单元的尺寸和 SRAM 的固有临界电荷, 就可对中子引起 SRAM 单粒子翻转过程相关的物理量进行计算, 从而给出详细描述其单粒子翻转内部物理过程的统计信息.

2. 计算模型

在本文的中子引起 SRAM 单粒子翻转过程的模拟中, 着重研究灵敏单元内电离能量沉积的相关物理过程, 而不计及电荷收集过程中的相关效应, 并假设灵敏单元是长方体, 在 SRAM 硅片中均匀分布. 10—20MeV 中子从 SRAM 硅片表面随机入射 (如图 1) 后, 中子与硅原子相互作用, 其中 $\text{Si}^{28}(n, p)\text{Al}^{28}$ 和 $\text{Si}^{28}(n, \alpha)\text{Mg}^{25}$ 在单粒子翻转中起着主要的作用. 具体的计算模型在文献 [11—13] 中有详细的叙述, 此处着重对 SRAM 灵敏单元内的能量沉积相关过程进

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 30175051) 资助的课题.

[†] E-mail: alihua@jnu.edu.cn

行分析.

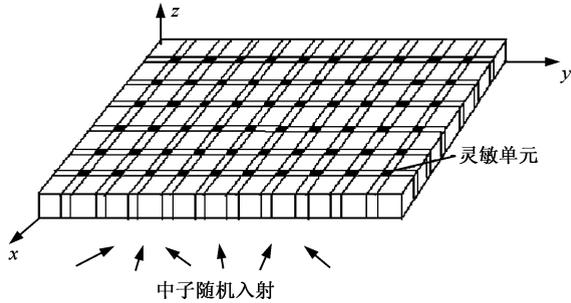


图1 中子从存储器硅片表面随机入射

入射中子在 SRAM 硅片中第 i 个灵敏单元内引起的电离能量沉积 ΔE_i 为

$$\Delta E_i = \begin{cases} \Delta E_p + E_{Al^-} & \text{对于}(n, p)\text{反应,} \\ \Delta E_\alpha + E_{Mg^{2-}} & \text{对于}(n, \alpha)\text{反应,} \end{cases}$$

其中 ΔE_p 为带电粒子质子在第 i 个灵敏单元内的能量沉积, ΔE_α 为带电粒子 α 在第 i 个灵敏单元内的能量沉积, E_{Al^-} 和 $E_{Mg^{2-}}$ 分别为反冲核 Al^- 和 Mg^{2-} 在第 i 个灵敏单元内的能量沉积. 只有当 (n, p) 或 (n, α) 反应在第 i 个灵敏单元内发生时, 在 ΔE_i 中计及反冲核的贡献, 否则 ΔE_i 只包括带电粒子质子或 α 粒子的贡献. 在具体计算中, 入射中子与硅原子反应产生的带电粒子在灵敏单元内的能量沉积由剩余射程法计算, 即带电粒子进入灵敏单元时的能量 (或在灵敏单元内产生时的能量) 减去射出灵敏单元时的能量; 反应产生的反冲核的能量沉积取为其产生时的能量, 沉积能量的位置为其产生的位置. 本文在计算各灵敏单元内的能量沉积时, 对每入射一个中子引起的能量沉积值进行计算, 而非所有入射中子造成的能量沉积的累加值. 此处即为对我们以前相关工作^[11]的改进.

在计算模拟过程中, 首先应用 Monte Carlo 方法, 对入射中子的入射位置及方向、入射中子与硅原子的碰撞位置、碰撞的相互作用类型、以及反应产生的带电粒子出射方向进行随机抽样, 并由动量和能量守恒得到产生的带电粒子及其相应反冲核的能量. 其次应用核物理的知识, 对出射粒子及相应反冲核在灵敏单元内的电离能量沉积进行计算, 比较各灵敏单元内的能量沉积, 当灵敏单元内的最大能量沉积值相当的电荷收集值大于 SRAM 的固有临界电荷时, 该 SRAM 将发生单粒子翻转. 最后对 SRAM 发生单粒子翻转的相关物理量进行计算, 并对所计算

的相关物理量求平均, 得到计算模拟结果.

3. Monte Carlo 计算模拟及结果

利用所编制的 Monte Carlo 计算模拟程序, 进行了如下一系列计算. 在计算中, 10—20MeV 中子从 16K SRAM 硅片表面随机入射, 硅片表面积为 $0.5\text{cm} \times 0.6\text{cm}$, 灵敏单元的面积为 $26.2 \times 10^{-8}\text{cm}^2$, 灵敏单元的深度为 $4\mu\text{m}$, 中子与硅原子反应截面取自 MCNP 程序的 ENDL-85 数据截面库. 这些计算给出了描述 SRAM 单粒子翻转过程中相关物理量的统计计算结果, 从而得到中子引起单粒子翻转的内部物理过程的相关信息, 并得到能量为 10—20MeV 中子引起的 SRAM 单粒子翻转的翻转截面计算值, 为详细研究 SRAM 硅片发生单粒子翻转提供参考数据.

3.1. 反应产物的能量分布及中子引起灵敏单元内能量沉积的相关概率

对临界电荷为 0.05pC 的 16K SRAM 硅片, 10—20MeV 中子从硅片表面随机入射, 利用所编制的 Monte Carlo 模拟程序计算 1000 次单粒子翻转, 得到关于出射粒子及其相应反冲核的平均能量和能量分布、中子引起灵敏单元内能量沉积的相关概率等统计信息. 表 1 给出了 10—20MeV 入射中子产生的出射粒子及其相应反冲核的平均能量, 图 2 给出了 14 和 18MeV 入射中子产生的出射粒子及其相应反冲核的能量分布, 表 2 给出了在单粒子翻转过程中, 能量为 10—20MeV 入射中子引起灵敏单元内有能量沉积的几种相关概率.

表 1 10—20MeV 入射中子产生的出射粒子及其相应反冲核的平均能量

| E_n/MeV | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|--------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| E_p/MeV | 6.11 | 7.96 | 9.82 | 11.72 | 13.56 | 15.40 |
| E_{Al^-}/MeV | 0.56 | 0.71 | 0.85 | 0.95 | 1.12 | 1.26 |
| E_α/MeV | 6.93 | 8.61 | 10.27 | 11.94 | 13.64 | 15.21 |
| $E_{Mg^{2-}}/\text{MeV}$ | 1.45 | 1.77 | 2.10 | 2.43 | 2.73 | 3.16 |

其中 E_n 为入射中子的能量, E_p , E_{Al^-} , E_α 和 $E_{Mg^{2-}}$ 分别是产生的质子及其反冲核 Al^- , α 粒子及其反冲核 Mg^{2-} 的能量.

从表 1 可以看出, 出射粒子及其相应反冲核的平均能量随入射中子能量的增大而增大. 14MeV 的入射中子产生的质子和 α 粒子的能量分别为 9.82 和 10.27MeV, 它们相应的反冲核的能量分别为 0.85 和 2.10MeV. 从图 2 可以看出, 出射粒子及其相应反冲核的能量在一定范围内分布, 对相同能量的入射中子, α 粒子及其相应反冲核能量分布范围较质子

及其相应反冲核的宽 随入射中子能量的增大 ,出射粒子及相应反冲核能量分布范围增宽 ,分布中心的能量增大 .

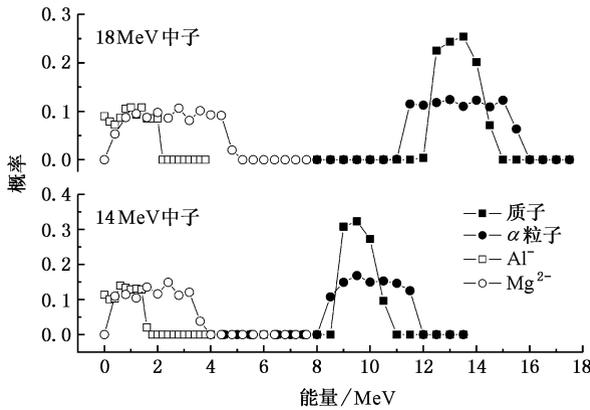


图 2 14 和 18MeV 入射中子产生的出射粒子及相应反冲核的能量分布

表 2 描述单粒子翻转过程的五种概率

| E_n/MeV | $P_E/\%$ | $P_1/\%$ | $P_2/\%$ | $P_3/\%$ | $P_4/\%$ |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 0.29 | 98.9 | 0.869 | 0.192 | 0.038 |
| 12 | 0.26 | 98.8 | 0.956 | 0.162 | 0.081 |
| 14 | 0.25 | 98.6 | 1.194 | 0.094 | 0.094 |
| 16 | 0.19 | 98.5 | 1.269 | 0.122 | 0.092 |
| 18 | 0.15 | 98.3 | 1.420 | 0.212 | 0.049 |
| 20 | 0.08 | 98.2 | 1.497 | 0.229 | 0.106 |

其中 P_E 是一个入射中子能在灵敏单元内引起能量沉积的概率 . 当一个入射中子在灵敏单元内引起了能量沉积 , 则只在一个、同时在二个、三个、四个及四个以上灵敏单元内有能量沉积的概率分别为 P_1, P_2, P_3 和 P_4 .

表 3 14MeV 中子引起单粒子翻转时 翻转的灵敏单元内能量沉积值(DE)及其相关量

| Q_c/pC | 中子注量/ m^{-2} | N_{sv} | SV | DE/MeV | Q_i/pC | RT | $P(n, \alpha)\%$ |
|-----------------|------------------------|----------|-------------|--------|-----------------|----------------|------------------|
| 0.05 | 3.008×10^{12} | 8 | (89 ,79) | 1.71 | 0.075 | (n α) | 85 |
| | | 10 | (41 ,116) | 2.26 | 0.101 | (n α) | |
| | | 4 | (48 ,96) | 2.48 | 0.110 | (n α) | |
| | | 11 | (62 ,107) | 2.96 | 0.131 | (n α) | |
| 0.10 | 5.800×10^{12} | 18 | (62 ,53) | 2.35 | 0.104 | (n α) | 100 |
| | | 17 | (13 ,98) | 2.48 | 0.110 | (n α) | |
| | | 206 | (114 ,99) | 3.40 | 0.151 | (n α) | |
| 0.15 | 7.424×10^{13} | 210 | (34 ,106) | 3.73 | 0.166 | (n α) | 100 |
| | | 189 | (20 ,26) | 3.59 | 0.159 | (n α) | |

其中 N_{sv} 是翻转发生时 有能量沉积的灵敏单元个数 , SV 是发生翻转的灵敏单元位置 , Q_i 是 SV 中 DE 值相应的电荷收集值 , RT 是引起该翻转的反应类型 , $P(n, \alpha)$ 是在 1000 次单粒子翻转模拟中 (n α) 反应引起翻转的概率 .

从表 3 可以看出 , 存储器发生单粒子翻转时 , 随固有临界电荷值 Q_c 的增大 , 翻转的平均中子注量增大 , 在翻转平均中子注量误差 5% 范围内的入射中子注量下 , 灵敏单元内有能量沉积的单元数 N_{sv} 增多 , 发生翻转的灵敏单元位置 SV 是随机的 , 翻转

从表 2 可以看出 , 10—20MeV 的入射中子能在灵敏单元内引起能量沉积的概率很小 , 不到 0.3% ; 若一个入射中子在灵敏单元内引起了能量沉积 , 其主要是只在一个灵敏单元内有能量沉积 , 其概率大于 98% , 同时在二个灵敏单元内有能量沉积的概率较小 , 小于 1.5% , 同时在三个灵敏单元、四个及四个以上的灵敏单元内有能量沉积的概率则更小 . 从表 2 还可以看出 , 随 10—20MeV 入射中子能量的增大 , 入射中子能在灵敏单元内引起能量沉积的概率减小 , 若一个入射中子在灵敏单元内引起了能量沉积 , 其只在一个灵敏单元内有能量沉积的概率也随入射中子能量的增大而减小 , 而同时在两个灵敏单元内有能量沉积的概率则增大 .

3.2. 14MeV 中子引起单粒子翻转时灵敏单元内能量沉积的相关量

对临界电荷为 0.05—0.15pC 的 16K SRAM 硅片 , 14MeV 中子从硅片表面随机入射 , 利用所编制的 Monte Carlo 模拟程序计算 1000 次翻转 , 先分别得到发生单粒子翻转时所需的平均中子入射注量 , 再对平均注量 5% 误差范围内的中子入射注量引起的三次单粒子翻转进行记录 , 得到发生单粒子翻转时灵敏单元内有能量沉积的单元个数、翻转的灵敏单元的位置、翻转的灵敏单元内的能量沉积及其相应的电荷值、引起该单粒子翻转的反应类型、以及该类反应在 1000 次单粒子翻转模拟中引起翻转的概率等结果 , 结果列于表 3 .

的灵敏单元内的能量沉积值 DE 增大 , 与能量沉积值相应的电荷收集值 Q_i 大于固有临界电荷值 Q_c , 引起该灵敏单元翻转的反应 RT 都是 (n α) 反应 . 从表 3 还可以看出 , 随固有临界电荷值的增大 (n α) 反应引起单粒子翻转的概率 $P(n, \alpha)$ 增大至 100% .

由此说明 14MeV 中子引起的单粒子翻转中,对大于 1.0pC 的固有临界电荷值 (n, α) 反应起决定性作用。

3.3. 10—20MeV 中子引起的 16K SRAM 单粒子翻转平均截面

对临界电荷为 0.05—0.15pC 的 16K SRAM 硅片,10—20MeV 中子从硅片表面随机入射,利用所编制的 Monte Carlo 程序模拟 1000 次翻转(对临界电荷为 0.15pC,入射中子能量为 10—12MeV 的模拟,由于计算时间太长只进行了 10 次翻转模拟),得到单粒子翻转的中子入射平均注量(图 3),以及单粒子翻转平均截面(图 4)。

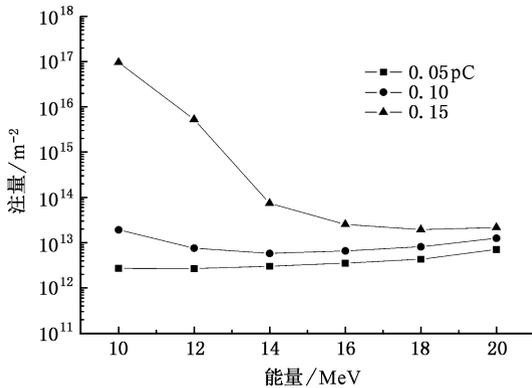


图 3 SRAM 发生单粒子翻转时的中子入射平均注量

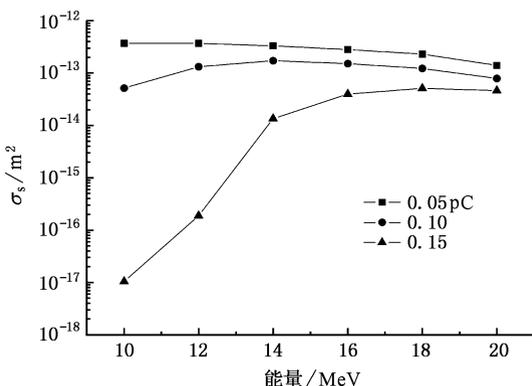


图 4 SRAM 发生单粒子翻转时的平均翻转截面

从图 3 可以看出,单粒子翻转发生时,入射能量为 10—20MeV 的中子注量量级大多为 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 。其中 14MeV 中子注量量级主要为 10^{12} m^{-2} ,这与文献 2 的实验结果相一致,由此说明本文采用的中子引起单粒子翻转的模拟方法可行,所编制的 Monte Carlo 模拟计算程序得到的计算结果是合理的。

从图 4 可以看出,对于固有临界电荷为 0.05, 0.10 和 0.15pC 的 16K SRAM 硅片,14MeV 中子引起的单粒子翻转截面分别为 3.17×10^{-13} , 1.58×10^{-13} 和 $1.30 \times 10^{-14} \text{ m}^2$,由此可知,14MeV 中子的单粒子翻转截面的量级为 $10^{-13} \sim 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{bit}$,此结果与文献 8 的实验结果在量级上相一致。从图 4 还可以看出,10—20MeV 的中子引起单粒子翻转截面的量级大多在 $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ m}^2$ 之间;随固有临界电荷的增大,单粒子翻转截面减小;随入射中子能量的增大,固有临界电荷为 0.05pC 时,单粒子翻转截面稍有减小,0.10pC 时翻转截面先稍增大,再稍减小,0.15pC 时翻转截面增大。结合图 2、表 1 和表 2 的结果可以看出,随 10—20MeV 入射中子能量的增大,固有临界电荷为 0.05pC 时,影响单粒子翻转的主要因素是入射中子能在灵敏单元内引起电离能量沉积的概率;固有临界电荷为 0.10pC、中子入射能量小于 14MeV 时,其主要因素是出射粒子及其相应反冲核的能量,当中子入射能量大于 14MeV 时,其主要因素是入射中子能在灵敏单元内引起电离能量沉积的概率;固有临界电荷为 0.15pC 时,其主要因素是出射粒子及其相应反冲核的能量。

4. 结果讨论

本文在 Monte Carlo 计算模拟中,灵敏单元内的能量沉积分为两部分进行计算:一部分为反应产生的出射粒子经过灵敏单元时能量沉积的计算,此部分用剩余射程法进行计算;另一部分为反冲核在灵敏单元内能量沉积的计算,对此部分的计算作了一定的简化,即若中子与硅原子的反应在灵敏单元内发生,该灵敏单元内的能量沉积计及反冲核的能量沉积,此能量沉积为反冲核产生时的能量,否则,不计及反冲核在灵敏单元内的能量沉积。

在本文的计算中,将灵敏单元内的能量沉积均视为电离能量沉积,为了了解出射粒子及其相应反冲核的能量沉积中电离能量沉积所占比例,利用 TRIM 程序进行了相关计算,计算结果列于表 4。

从表 4 可以看出,由 (n, p) 和 (n, α) 反应产生的 10MeV 质子和 α 粒子的射程分别是几百和几十微米,它们相应反冲核的能量为几 MeV 时,射程为几微米。由此可知,10MeV 出射粒子的射程远大于灵敏单元的边尺度,在本文的模拟中,出射粒子质子和 α 粒子在灵敏单元内的能量沉积利用剩余射程法计算

是合理的,而反冲核的射程小于灵敏单元边长的尺度,但量级相当,其能量沉积计算未计及其移动的距离对计算结果会引起一些误差.从表 4 还可以看出,质子和 α 粒子能量沉积 99% 以上是电离能量沉积,它们相应的反冲核能量沉积大多 ($> 73\%$) 为电离能

量沉积,且随反冲核能量的增大所占比例增大.由此可知,在本文的计算中,出射粒子的能量沉积即为电离能量沉积是合理的,而将反冲核的电离能量沉积认为是其产生时的能量对计算结果会带来一些较小的误差.

表 4 在固体硅中,一定能量的出射粒子质子、 α 粒子及它们相应反冲核的射程、它们引起的电离能量沉积、产生声子的能量沉积、以及造成位移的能量沉积值

| 次级反应产物 | 能量 /MeV | 平均射程 / μm | 电离能量沉积 /MeV(%) | 产生声子的能量沉积 /keV | 位移能量沉积 /keV |
|------------------|------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| 质子 | 10 | 698.67 | 9.96(99.6) | 4.0 | 1.3 |
| α 粒子 | 10 | 66.75 | 9.95(99.5) | 12.0 | 0.4 |
| | 0.5 | 0.86 | 0.368(73.6) | 121.1 | 5.0 |
| Al^- | 1.0 | 1.5 | 0.831(83.1) | 152.2 | 6.3 |
| | 2.0 | 2.1 | 1.785(89.3) | 172.9 | 7.1 |
| | 0.5 | 0.95 | 0.372(74.4) | 112.1 | 4.6 |
| Mg^{2-} | 1.0 | 1.5 | 0.846(84.6) | 137.7 | 5.7 |
| | 2.0 | 2.2 | 1.814(90.7) | 153.9 | 6.4 |
| | 4.0 | 3.2 | 3.781(94.5) | 167.2 | 7.0 |

从本文的计算结果与文献 [2, 8] 的实验结果比较可知, 14MeV 中子引起单粒子翻转的中子平均注量和平均翻转截面的计算结果与实验结果在量级

上相一致.由此说明本文的计算模拟结果虽然存在一定的误差,但对单粒子翻转截面计算结果的量级没有影响,这些误差是可以接受的.

- [1] Ziegler J L, Lanford W A 1979 *Science* **206** 776
- [2] Guenzer C S, Wolicki E A, Allas R G 1979 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **26** 5048
- [3] Zhang Q X, Hou M D, Liu J et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 566 (in Chinese) [张庆祥、侯明东、刘杰等 2004 *物理学报* **53** 566]
- [4] Bradford J N 1980 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **27** 1480
- [5] Letaw J R, Normand E 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1500
- [6] Normand E, Stapor W J, McNulty P et al 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1457
- [7] Price W E, Nichols D K, Soliman K A 1980 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **27** 1506
- [8] Normand E 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2904

- [9] Abbrescia M, Colaleo A, Iaselli G et al 2002 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **484** 494
- [10] Huhtinen M, Faccio F 2000 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **450** 155
- [11] Li H, Nui S L, Li Y C, Li G Z 1997 *Chin. J. Comp. Phys.* **14** 333 (in Chinese) [李华、牛胜利、李原春、李国政 1997 *计算物理* **14** 333]
- [12] Li H 1999 *Chin. J. Comp. Phys.* **16** 467 (in Chinese) [李华 1999 *计算物理* **16** 467]
- [13] Li H, Chen S B 2002 *Chin. J. Comp. Phys.* **19** 168 (in Chinese) [李华、陈世彬 2002 *计算物理* **19** 168]

Monte Carlo simulation of the SRAM single event upset^{*}

Li Hua[†]

(*Department of Physics , Jinan University , Guangzhou 510632 , China*)

(Received 5 July 2005 ; revised manuscript received 4 December 2005)

Abstract

The process of deposited energy in sensitive volumes in a static random access memory (SRAM) chip induced by 10—20MeV neutrons is simulated using the Monte Carlo method. In the simulation , the physical parameters related to the single event upset (SEU) of the SRAM chip are calculated. The results provide detailed statistical data for the SEU process induced by 10—20MeV incident neutrons , and reference information for the deface reinforcement of the SRAM chip.

Keywords : SRAM Single event upset , Monte Carlo simulation , deposited energy

PACC : 6180 , 0250 , 2970G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10175051).

[†] E-mail : lihua@jnu.edu.cn