

# 10—20MeV 中子引起单粒子翻转 能量沉积统计分析\*

李华<sup>1)</sup>

(暨南大学物理系 广州 510632)

**摘要** 基于 Monte Carlo 计算模拟, 对 10—20MeV 中子引起存储器单粒子翻转能量沉积进行了统计分析, 为了解单粒子翻转随机过程提供能量沉积统计信息.

**关键词** 能量沉积 单粒子翻转 Monte Carlo 模拟

## 1 引言

工作在辐射环境中的高密度存储器会发生单粒子效应<sup>[1, 2]</sup>. 由于高密度存储器被广泛应用于地球轨道飞行器和空间探测器上, 因此有必要对存储器发生的单粒子翻转(SEU)过程进行详细研究. 利用 Monte Carlo 方法可对中子引起存储器 SEU 进行一些相关研究<sup>[3—8]</sup>, 但对 SEU 的关键过程(灵敏单元中能量沉积随机过程)的分析描述还做得不够. 本文基于已有的 Monte Carlo 模拟程序, 对 10—20MeV 中子引起存储器 SEU 过程进行计算模拟, 进而对存储器灵敏区中的能量沉积进行分析, 为了解 SEU 随机过程提供详细的能量沉积统计信息.

10—20MeV 中子引起存储器 SEU 物理过程可如下描述: 中子随机射入存储器硅片后, 中子与硅原子可能发生核反应, 产生质子或  $\alpha$  粒子以及他们相应的反冲核. 产生的带电粒子射程较长, 它们在经过存储器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, 在这些电离能量沉积的路径上有大量的电子-空穴对产生. 在存储器灵敏区中产生的电子-空穴对若被收集, 收集的电荷大于存储器的固有临界电荷, 存储器将发生 SEU. 在此过程中, 灵敏单元中电离能量沉积值是引起 SEU 的关键.

## 2 计算模型

基于已有的 Monte Carlo 计算模型<sup>[5—8]</sup>, 在中子引起存储器 SEU 过程的模拟中, 假设灵敏单元是长方体, 均匀分布于存储器硅片中, 10—20MeV 中子从存储器表面随机入射, 中子与硅原子相互作用中, 只考虑在 SEU 中起着主要作用的两个反应道:  $\text{Si}^{28}(\text{n}, \text{p})\text{Al}^{28}$  和  $\text{Si}^{28}(\text{n}, \alpha)\text{Mg}^{25}$ .

SEU 的发生具有随机性, 其中最为主要的是灵敏单元内的能量沉积具有随机性. 存储器硅片中第  $i$  ( $1 \leq i \leq 128 \times 128$ ) 个灵敏单元中电离能量沉积  $\Delta E_i$  为

$$\Delta E_i = \begin{cases} \Delta E_p + E_{\text{Al}^{27-}} & \text{对于}(\text{n}, \text{p})\text{反应} \\ \Delta E_\alpha + E_{\text{Mg}^{24-}} & \text{对于}(\text{n}, \alpha)\text{反应} \end{cases},$$

其中  $\Delta E_p$  和  $\Delta E_\alpha$  分别为质子和  $\alpha$  在第  $i$  个灵敏单元中的能量沉积,  $E_{\text{Al}^{27-}}$  和  $E_{\text{Mg}^{24-}}$  分别为反冲核  $\text{Al}^{27-}$  和  $\text{Mg}^{24-}$  在第  $i$  个灵敏单元中的能量沉积. 只有当反应  $(\text{n}, \text{p})$  或  $(\text{n}, \alpha)$  在第  $i$  个灵敏单元内发生时,  $\Delta E_i$  计及反冲核的贡献, 否则只计及质子或  $\alpha$  粒子的贡献.

本文在中子引起存储器 SEU 的计算模拟中, 每模拟入射一个中子, 加入此中子在灵敏单元中引起的能量沉积值和相应灵敏单元位置的记录, 得到当 SEU 发生时, 存储器内经历过能量沉积的灵敏单元位置及其内的能量沉积值、翻转的灵敏单元位置及其内的能量

2006 - 04 - 30 收稿

\* 国家自然科学基金项目(10175051)资助

1) E-mail: tlihua@jnu.edu.cn

沉积值、模拟的入射中子数目、以及 SEU 截面值的记录。

### 3 模拟计算结果

利用已有的 Monte Carlo 计算模拟程序，在 SGI2200 工作站上进行一系列模拟计算。计算中，存储器硅片表面积为  $0.5\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ ， $128 \times 128$  个灵敏单元在硅片中均匀分布，灵敏单元的面积  $2.62 \times 10^{-7}\text{cm}^2$ ，灵敏单元的深度为  $4\mu\text{m}$ ，中子与硅原子相互作用截面取自 MCNP 程序的 ENDL-85 数据库，存储器硅片临界电荷取  $0.05\text{pC}$ 。

首先，分别对  $10^7$  个 10—20MeV 中子从 16K 存储器硅片表面随机入射进行计算模拟。图 1 是存储器内灵敏单元中能量沉积值的分布图。可以看出： $10^7$  个 10—20MeV 中子在灵敏单元内引起的能量沉积值分布在 0—5MeV 之间，入射中子的能量越大，此分布区域越宽。还可以看出：由于入射中子能量的不同， $10^7$  个中子在存储器灵敏单元内能引起能量沉积的灵敏单元个数不同，入射中子能量分别为 10, 14 和 18MeV (增大) 时，有能量沉积的灵敏单元个数相应为 26460, 22669 和 12631 (减小)。

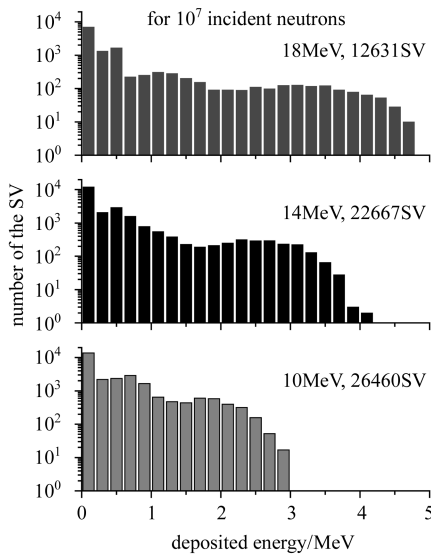


图 1 灵敏单元中能量沉积值分布

其次，对 10—20MeV 中子引起 16K 存储器 SEU 进行了 10000 次翻转的计算模拟。表 1 给出了基于 10000 次翻转的 SEU 相关物理量计算模拟结果：中子与硅原子  $(n, \alpha)$  反应引起翻转的几率  $P(n, \alpha)$ 、发生翻转的灵敏单元中能量沉积的平均值  $\Delta E$ 、每次翻转时灵敏单元中能量沉积值大于零的灵敏单元个数平均值

$N_{sv}$ 、每次翻转时入射中子个数平均值  $N_n$ 、以及存储器 SEU 截面的平均值  $\sigma_s$ 。可以看出：中子与硅原子  $(n, \alpha)$  反应引起翻转的几率  $P(n, \alpha)$  随入射中子能量增大而减小，但  $(n, \alpha)$  反应在 10—20MeV 中子引起 16K 存储器 SEU 中仍是主要因素 ( $P(n, \alpha) \geq 65\%$ )。

基于 10000 次 SEU 的计算模拟，得到发生翻转的灵敏单元中能量沉积分布 (图 2)。从图 2 可以看出：随入射中子能量的增大，引起灵敏单元发生翻转的能量沉积分布范围增大；但从表 1 知，发生翻转的灵敏单元中能量沉积的平均值  $\Delta E$  没有规律性变化。

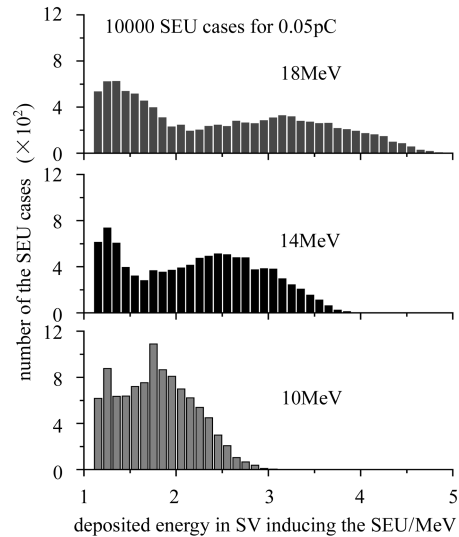


图 2 发生翻转的灵敏单元中能量沉积分布

表 1 基于 10000 次翻转的临界电荷为 0.05pC 的存储器 SEU 相关物理量计算模拟结果

energy of incident neutrons/MeV	$P(n, \alpha)$ (%)	$\Delta E/\text{MeV}$	$N_{sv}$	$N_n$	cross section/ ( $\times 10^{-9}\text{cm}^2$ )
10	100	2.19	8.1	3071	3.610
12	96	1.37	7.6	3294	3.627
14	83	2.39	7.6	3370	3.294
16	76	1.84	6.4	3869	2.862
18	66	3.99	6.0	4807	2.366
20	65	3.82	5.7	8125	1.439

基于 10000 次 SEU 的计算模拟，得到每次翻转发生时，能量沉积值大于零的灵敏单元个数分布 (图 3)、以及所需入射的中子数目分布 (图 4)。从图 3 可以看出：随入射中子能量增大，每次翻转发生时，能量沉积值大于零的灵敏单元个数趋于减小，其平均值略有减小 (表 1 中的  $N_{sv}$  略有减小)。从图 4 可以看出：随入射中子能量增大，每次翻转发生时，所需入射中子个数趋于增大，其平均也增大 (表 1 中的  $N_n$  增大)。

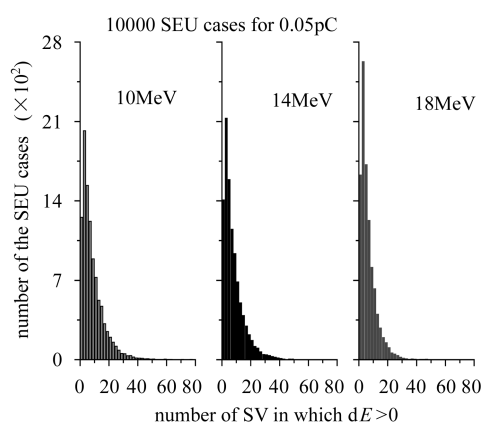


图3 SEU发生时能量沉积的灵敏单元个数分布

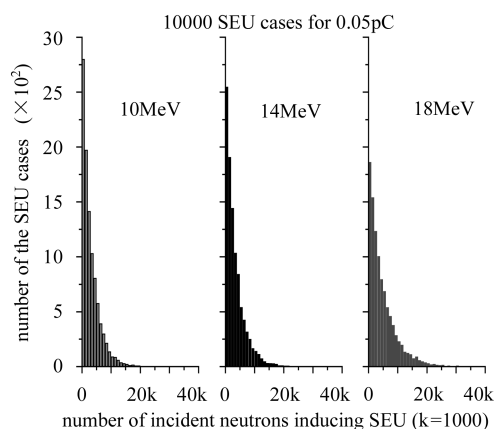


图4 SEU发生时所需入射的中子数目分布

基于10000次SEU的计算模拟,得到了每次翻转发生时,存储器SEU的翻转截面值.图5给出了10000次SEU模拟得到的翻转截面分布.可以看出:16K存储器SEU截面值的量级主要为 $10^{-10}$ — $10^{-9}$ cm<sup>2</sup>,其截

面值的分布服从指数正态分布;随入射中子能量增大,翻转截面趋于减小,与表1给出的翻转截面的平均值的变化趋势一致.

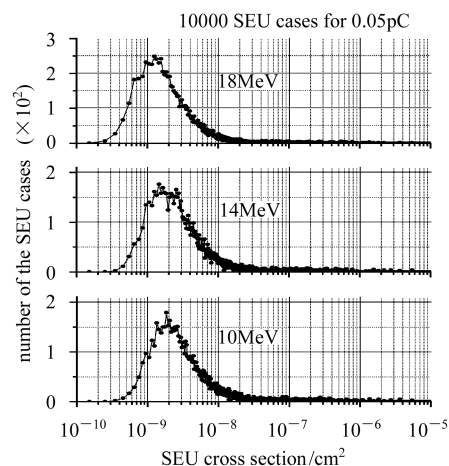


图5 SEU计算模拟得到的翻转截面分布

## 4 结论

基于10—20MeV中子引起16K存储器SEU的Monte Carlo模拟,对存储器灵敏单元内能量沉积相关随机过程的统计分析可知:灵敏单元内的能量沉积值分布在0—5MeV之间;入射中子能量越大,灵敏单元内能量沉积值分布区域越宽,每次翻转发生时,能量沉积值大于零的灵敏单元个数趋于减小,同时所需入射中子个数趋于增大;16K存储器SEU截面的量级主要为 $10^{-10}$ — $10^{-9}$ cm<sup>2</sup>,并服从指数正态分布.这些结果为了解10—20MeV中子引起存储器SEU随机过程提供了详细的相关信息.

## 参考文献(References)

- Ziegler J L, Lanford W A. Science, 1979, **206**: 776
- Guenzer C S, Wolicki E A, Allas R G. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, **26**: 5048
- Huhtinen M, Faccio F. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, **A450**: 155
- Palau J M, Wrobel R, Castellani-Coulie K et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2002, **49**: 3075
- LI Hua, NIU Sheng-Li, LI Yuan-Chun et al. Chinese Journal of Computational Physics, 1997, **14**: 333(in Chinese)  
(李华, 牛胜利, 李原春等. 计算物理, 1997, **14**: 333)
- LI Hua. Chinese Journal of Computational Physics, 1999, **16**: 467(in Chinese)  
(李华. 计算物理, 1999, **16**: 467)
- LI Hua, CHEN Shi-Bin. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, **19**: 168(in Chinese)  
(李华, 陈世彬. 计算物理, 2002, **19**: 168)
- LI H, DENG J Y, CHANG D M. Radiation Measurements, 2005, **39**(4): 401

# Statistic Analysis of the Deposited Energy in Single Event Upset Induced by 10—20MeV Neutrons<sup>\*</sup>

LI Hua<sup>1)</sup>

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

**Abstract** Based on Monte Carlo simulations, the deposited energies in the single event upset induced by 10—20MeV neutrons in SRAM silicon chip are been statistically analysed. It can provide statistic information about the deposited energy for understanding the random process of the single event upset.

**Key words** deposited energy, single event upset, Monte Carlo simulation

---

Received 30 April 2006

<sup>\*</sup> Supported by NSFC (10175051)

<sup>1)</sup> E-mail: tlihua@jnu.edu.cn