

文章编号: 1007-4627(2006)01-0046-05

中子引起单粒子翻转过程中能量沉积统计分析*

李 华

(暨南大学物理系, 广东 广州 510632)

摘 要: 利用 Monte Carlo 方法, 对 14 MeV 中子引起存储器单粒子翻转过程进行了计算模拟, 从而对引起单粒子翻转的关键因素——存储器灵敏区中的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了详细的能量沉积统计信息。

关键词: 能量沉积; 单粒子翻转; Monte Carlo 模拟

中图分类号: O571; O59 **文献标识码:** A

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^[1, 2]。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, 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。存储器 SEU 可由高能粒子直接引起, 也可由高能粒子间接引起。中子引起存储器 SEU 属于后者。中子引起存储器 SEU 的研究已有很多^[3-10], 其中利用 Monte Carlo 方法对其进行研究能给出 SEU 过程的详细信息。我们已利用 Monte Carlo 方法对中子引起存储器 SEU 进行了一些相关研究^[11-13], 但对 SEU 的关键过程(灵敏单元中能量沉积随机过程)的分析描述还不够, 本文基于已有的 Monte Carlo 模拟程序, 对 14 MeV 中子引起存储器 SEU 过程进行计算模拟, 从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。

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 α 粒子以及它们相应的反冲核。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, 因此, 有必要对能量沉积过程进行细致的计算分析。

本文利用 Monte Carlo 方法, 对核反应产生的带电粒子及其相应反冲核在存储器灵敏单元中能量沉积过程进行模拟, 而不模拟相关电路。模拟中估计出灵敏单元尺寸和存储器固有临界电荷, 即可对中子引起存储器 SEU 的关键过程——能量沉积过程进行计算分析, 从而给出详细描述 SEU 过程的统计信息。

2 计算模型

基于已有的 Monte Carlo 计算模型^[11-13], 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。14 MeV 中子从存储器硅片表面随机入射后, 在与硅原子相互作用中, 主要考虑在 SEU 中起着重要作用的两个反应道: $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ 和 $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$ 。图 1 给出了中子随机射向存储器硅片表面示意图。

由于 SEU 的发生具有随机性, 要深入了解其内部物理过程, 应对能表示其内部物理过程的相关物理量进行分析, 其中最为主要的是具有随机性的灵敏单元内的能量沉积过程的统计分析。本文着重论述灵敏单元中电离能量沉积的物理过程, 而不计

收稿日期: 2005-07-07; 修改日期: 2005-08-26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175051)

作者简介: 李 华(1964-), 女(汉族), 广东梅县人, 博士, 研究员, 从事辐射效应计算模拟等方面的研究工作;

E-mail: tlihua@jnu.edu.cn

及电荷收集过程中的相关效应。

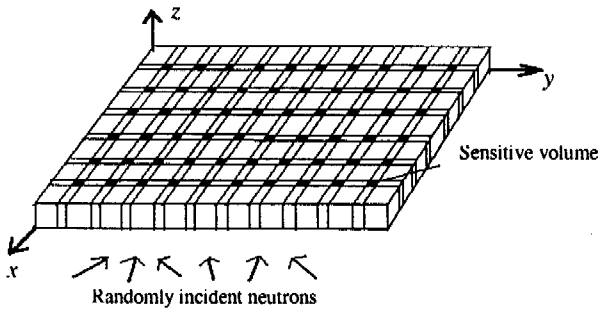


图 1 中子随机射向存储器硅片表面示意图

存储器硅片中第 i 个灵敏单元中电离能量沉积 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 为质子在第 i 个灵敏单元中的能量沉积, ΔE_α 为 α 在第 i 个灵敏单元中的能量沉积, E_{Al^-} 和 $E_{Mg^{2-}}$ 分别为反冲核 Al^- 和 Mg^{2-} 在第 i 个灵敏单元中的能量沉积。只有当反应 (n, p) 或 (n, α) 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 只包括质子或 α 粒子的贡献。

本文在中子引起存储器 SEU 的计算模拟中, 在原有程序的基础上, 每模拟入射 1 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。由此可得到当 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沉积值、模拟的入射中子数目, 以及 SEU 截面值的记录, 从而得到与 SEU 能量沉积相关物理量的统计信息, 用以对中子引起存储器 SEU 中能量沉积过程进行分析。

3 Monte Carlo 模拟计算及结果

利用已有的 Monte Carlo 计算模拟程序, 在 SGI2200 工作站上进行了一系列模拟计算。计算中, 14 MeV 中子从 16 K 存储器硅片表面随机入射, 存储器硅片表面积为 $0.5 \text{ cm} \times 0.6 \text{ cm}$, 128×128 个灵敏单元在硅片中均匀分布, 灵敏单元的面积为 $2.62 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$, 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 数据截面库, 存储器硅片临界电荷分别取 0.05, 0.10 和

0.15 pC。

首先, 模拟 10^7 个 14 MeV 中子从 16 K 存储器硅片表面随机入射。图 2 给出了存储器硅片内灵敏单元中的能量沉积三维分布图。从图中可以看出,

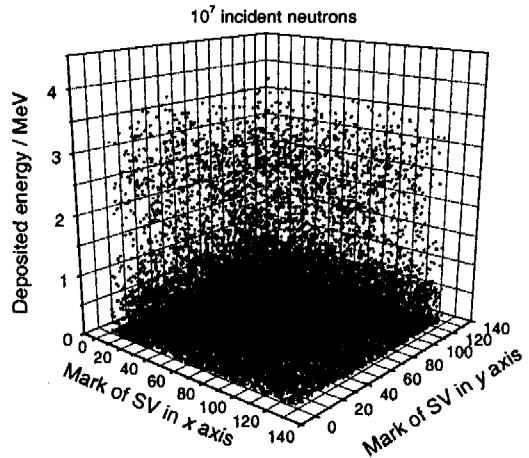


图 2 存储器硅片内灵敏单元中的能量沉积三维分布图

灵敏单元内的能量沉积值是随机分布的, 分布在 0—4.5 MeV 之间。图 3 给出了存储器硅片内灵敏单元中的能量沉积值的几率分布。从图中可以看出, 10^7 个 14 MeV 中子在灵敏单元内引起的能量沉

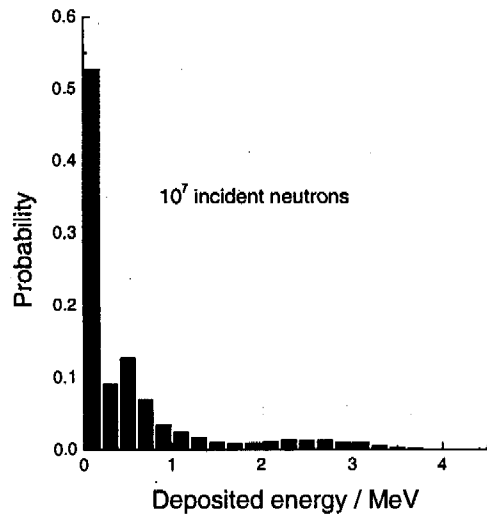


图 3 存储器硅片内灵敏单元中能量沉积值的几率分布

积 50% 以上是在小于 0.2 MeV 范围内, 而且其几率分布在 0.5 和 2.5 MeV 处还有峰值出现。结合在该计算模拟中得到的 14 MeV 中子与硅原子发生 (n, p) 和 (n, α) 反应产生的质子、 α 粒子及其相应反冲核能量的几率分布(见图 4)可知, 灵敏单元内的能量沉积 50% 以上是由质子或 α 粒子穿过灵敏

单元而引起的, 0.5 MeV 处的峰值是由于灵敏单元内的能量沉积计及了反冲核 Al^{2-} 或较小能量的 Mg^{2-} 引起的能量沉积, 而 2.5 MeV 处的峰值是计及了反冲核 Mg^{2-} 引起的能量沉积。

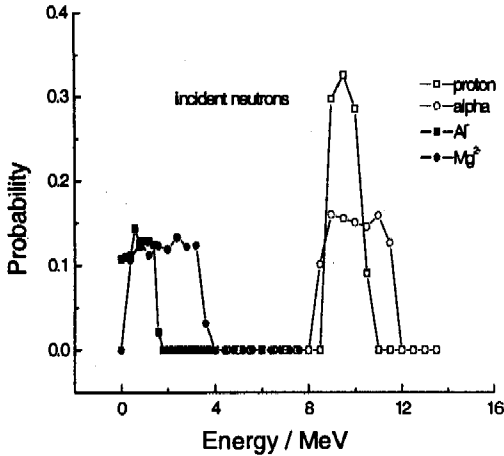


图 4 14 MeV 中子与硅原子发生 (n, p) 和 (n, α) 反应产生的质子、 α 粒子及其相应反冲核的能量几率分布

其次, 对 14 MeV 中子引起 16 K 存储器硅片 SEU 进行了 10 000 次翻转的计算模拟。表 1 给出了其相关物理量计算模拟结果: 发生翻转的灵敏单元中能量沉积的平均值 ΔE 、中子与硅原子 (n, α) 反应引起翻转的几率 $P(n, \alpha)$ 、每次翻转时灵敏单元中经历了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 以及硅片 SEU 截面的平均值 σ_s 。

基于 10 000 次 SEU 的计算模拟, 得到发生翻转的灵敏单元中能量沉积值与引起翻转的入射中子数的关系(如图 5 所示), 以及发生翻转的灵敏单元中能量沉积几率分布(如图 6 所示)。从图 5 可以看出: 临界电荷分别为 0.05, 0.10 和 0.15 pC 时, 灵敏单元中能量沉积大于 1.125, 2.25 和 3.375 MeV 将引起存储器 SEU, 并且这些能量沉积在小于 4.5 MeV 范围内分布, 其能量沉积的平均值分别为 2.39, 2.37 和 3.50 MeV (见表 1); 引起存储器 SEU 所需的人射中子数分别在小于 4×10^4 , 8×10^4 和 9×10^5 范围内分布。从图 6 可以看出: 临界电荷为 0.05 pC 时, 存储器 SEU 的灵敏单元中能量沉积有两个峰, 峰值分别在 1.3 和 2.5 MeV 处, 表明 SEU 既由 (n, p) 反应引起, 也由 (n, α) 反应引起, 并且后者引起的比例更高; 临界电荷为 0.10 和 0.15 pC 时, 存储器 SEU 的灵敏单元中能量沉积只

有一个峰, 表明 SEU 只由 (n, α) 反应引起。这些结果与表 1 中 $P(n, \alpha)$ 分别为 83%, 100% 和 100% 的结果一致。

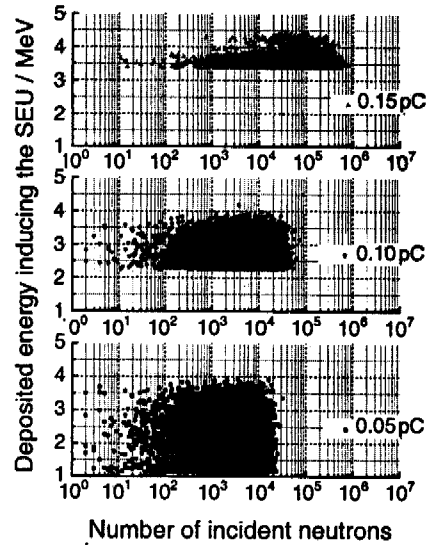


图 5 翻转的灵敏单元中能量沉积值与引起翻转的入射中子数的关系

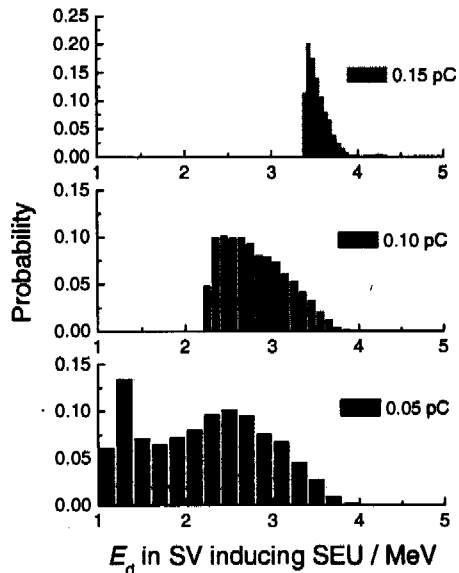


图 6 翻转的灵敏单元中能量沉积几率分布

表 1 基于 10 000 次翻转的 SEU 相关物理量统计结果*

Q_c / pC	$\Delta E /$ MeV	$P(n, \alpha)$ (%)	N_{sv}	N_n	$\sigma_s /$ $cm^2 (10^{-9})$
0.05	2.39	83	7.6	3 370	3.294
0.10	2.37	100	15.4	6 874	1.617
0.15	3.50	100	184.0	82 599	0.134

* 相关参量见文中所述。

为更详细地了解 SEU 发生时存储器内灵敏单

元内经历的能量沉积，基于 10 000 次 SEU 的计算模拟，得到翻转发生时能量沉积值大于零的灵敏单元个数分布。图 7 给出了灵敏单元个数的几率分布。可以看出：随存储器临界电荷值的增大，翻转发生时，经历了能量沉积值大于零的灵敏单元的个数增大；其几率分布半高处所对应的灵敏单元个数与表 1 中的灵敏单元个数的平均值 $N_{sv}=7.6, 15.4$ 和 184.0 接近。

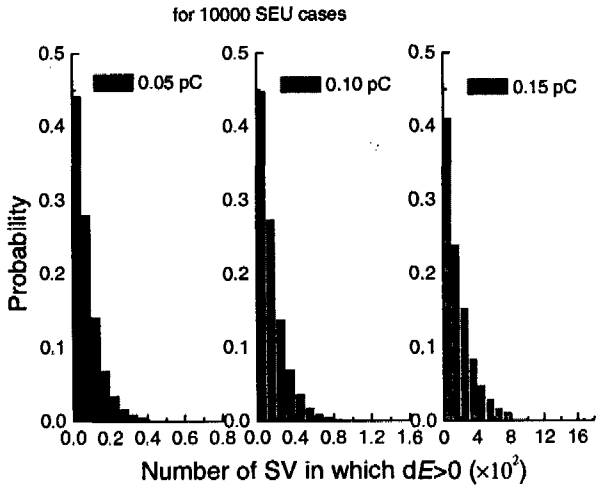


图 7 SEU 发生时经历了能量沉积值大于零的灵敏单元个数的几率分布

为更详细地了解 SEU 的随机性，基于 10 000 次 SEU 的计算模拟，得到了每次翻转发生时所需入射的中子数目及相应的 SEU 截面。图 8 给出了每次 SEU 发生时所需入射的中子数目几率分布。

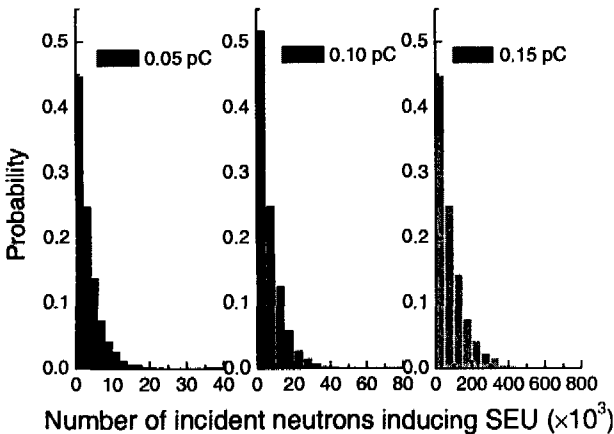


图 8 每次 SEU 所需入射的中子数目几率分布

从图中可以看出：随存储器临界电荷值的增大，每次翻转发生时，所需入射的中子数目增大；几率分布半高处所对应的入射中子数目与表 1 中的入射中

子数目的平均值 $N_n=3\ 370, 6\ 874$ 和 $82\ 599$ 接近。图 9 给出了 10 000 次 SEU 模拟得到的翻转截面分布。由图可以看出：随存储器临界电荷值的增大，存储器 SEU 截面减小；存储器 SEU 截面值在跨越两个数量级的范围内分布，分布半高处所对应 SEU 截面值与表 1 中 SEU 截面的平均值 $\sigma_s=3.29 \times 10^{-9}, 1.62 \times 10^{-9}$ 和 $1.34 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ 接近。

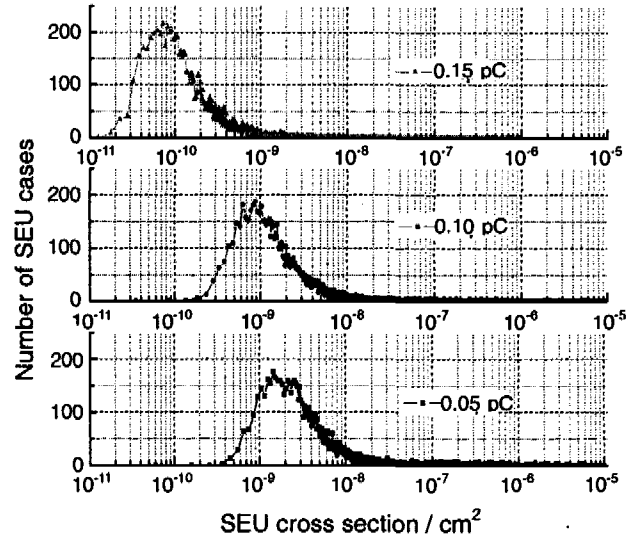


图 9 存储器 SEU 10 000 次模拟得到的翻转截面分布

4 结果讨论

从 14 MeV 中子引起 16 K 存储器 SEU 的 10 000 次翻转计算模拟的统计结果(表 1)可知，当临界电荷分别为 0.05, 0.10 和 0.15 pC 时，14 MeV 中子引起 16 K 存储器 SEU 截面的平均值分别为 $\sigma_s=3.29 \times 10^{-9}, 1.62 \times 10^{-9}$ 和 $1.34 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ ，由此推出 14 MeV 中子引起 SEU 截面为 $2.01 \times 10^{-13} \sim 8.18 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。在 Normand 的工作中^[7]，14 MeV 中子引起存储器 SEU 截面实验测量值和计算值都为几倍于 $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。此结果与我们的结果相一致，由此说明我们所编制的 Monte Carlo 模拟计算程序得到的计算结果合理。另外，从图 9 可以看出，翻转截面值是在其平均值上下 1 个数量级范围内分布的。由此，在比较存储器 SEU 截面值时，当翻转截面值与平均值在数量级上一致即可认为合理。

从表 1 和图 5、图 6 可知，当存储器发生 SEU 时，翻转的灵敏单元中，能量沉积值在大于临界沉积能量值 ($Q_c \times 22.5 \text{ MeV}$) 的一定范围内分布。随

Q_c 的增大, 翻转所需的人射中子个数增大。

从表 1 和图 7—图 9 可知, 每次 SEU 发生时, 对临界电荷 0.05 和 0.10 pC, 以及 0.10 和 0.15 pC, N_{sv} 的比值(分别为 2.03 和 11.95)与 N_n 的比值(分别为 2.04 和 12.02)大约相等, 即与 σ_s 比值的倒数大约相等。由此可知, 灵敏单元中能量沉积过

程与存储器 SEU 截面直接相关。

通过利用 Monte Carlo 方法, 对存储器 SEU 进行计算模拟, 可获得存储器灵敏区中能量沉积随机过程的相关信息, 为了解 14 MeV 中子引起存储器 SEU 随机过程提供详细的能量沉积的统计信息。

参 考 文 献:

- [1] Ziegler J L, Lanford W A. *Science*, 1979, **206**: 776.
 [2] Guenzer C S, Wolicki E A, Allas R G. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1979, **26**: 5 048.
 [3] Bradford J N. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1980, **27**: 1 480.
 [4] Letaw J R, Normand E. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, **38**: 1 500.
 [5] Normand E, Stapor W J, McNulty P, *et al.* *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, **38**: 1 457.
 [6] Price W E, Nichols D K, Soliman K A. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1980, **27**: 1 506.
 [7] Normand E. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, **45**: 2 904.
 [8] Abbrescia M, Colaleo A, Iaselli G, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2002, **A484**: 494.
 [9] Huhtinen M, Faccio F. *Nucl Instr and Meth*, 2000, **A450**: 155.
 [10] Palau J M, Wrobel R, Castellani-Coulie K, *et al.* *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, **49**: 3 075.
 [11] 李 华, 牛胜利, 李原春等. *计算物理*, 1997, **14**: 333.
 [12] 李 华. *计算物理*, 1999, **16**: 467.
 [13] 李 华, 陈世彬. *计算物理*, 2002, **19**: 168.

Statistic Analysis of Deposited Energy in Single Event Upset Induced by Neutrons*

LI Hua

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

Abstract: The process of the single event upset induced by 14 MeV neutrons in SRAM silicon chip is simulated by using a Monte Carlo method. The deposited energies in sensitive volumes in the chip, which is an important factor in the single event upset, are statistically analysed. The statistic information about the deposited energies is provided for understanding the detailed random process of the single event upset.

Key words: deposited energy; single event upset; Monte Carlo simulation

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10175051)