

SRAM 单元中子 单粒子翻转效应的 Geant4 模拟

郭晓强, 郭红霞, 王桂珍, 林东生, 陈伟, 白小燕, 杨善潮, 刘岩

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:应用 Geant4 工具, 构造了不同特征尺寸的 SRAM 单元几何模型及单粒子翻转截面计算模型, 分析了敏感体积和临界电荷对低能中子单粒子翻转效应的影响趋势, 计算了反应堆裂变中子谱辐射环境下, 不同特征尺寸 SRAM 的中子单粒子翻转截面, 认为小尺寸 SRAM 器件的低能中子单粒子翻转效应更为严重。

关键词:中子; 单粒子翻转; Geant4; 特征尺寸; 临界电荷

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2010)03-0362-06

Simulations of Single-Event Upset in SRAMs Induced by Neutrons With Geant4

GUO Xiao-qiang, GUO Hong-xia, WANG Gui-zhen, LIN Dong-sheng,
CHEN Wei, BAI Xiao-yan, YANG Shan-chao, LIU Yan
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The sensitivity of SRAMs to single-event upsets induced by neutrons with decreasing feature sizes was investigated using the Monte-Carlo code Geant4. Their device architecture and single-event upset cross section computation approach were presented. The single-event upset cross sections were analyzed for mono-energetic neutron and neutrons of fission spectrum of a reactor and discussed on the basis of different parameters such as the sensitive volume, the critical charge and the incident neutron energy. Small-size SRAM devices are more sensitive than large-size devices on single-event upset effect induced by low-energy neutron.

Key words: neutron; single-event upset; Geant4; sensitive volume; critical charge

工作中子辐射环境中的随机静态存储器 (SRAM) 会产生中子单粒子效应^[1-2]。随着特征尺寸的不断减小, 其对能量较低的入射中子

导致的单粒子效应的敏感性也随之发生改变^[2]。一方面是等比例缩小技术的应用减小了单元电路的体积, 降低了中子在单元中的能量

沉积截面,却增加了单粒子多位翻转(MBU)的可能性;另一方面是工作电压的降低和工作频率的提高,使得存储在单元节点上的电荷减小,增大了器件单粒子效应的敏感性。国内外对中子单粒子效应的理论研究较多,但对低能中子特别是反应堆裂变谱中子导致的单粒子效应研究的相关文献报道很少。

本工作应用 Geant4 粒子运输软件包,建立 SRAM 单元的几何结构模型和翻转截面计算模型^[3-5],对能量介于 0.1~20 MeV 之间的快中子在 SRAM 单元中的能量沉积过程进行 Monte-Carlo 模拟。从特征尺寸与临界电荷两个方面,分析不同特征尺寸 SRAM 单元在快中子辐射环境下的中子单粒子翻转(SEU)效应,并计算特征尺寸为 0.13~0.60 μm 的 SRAM 单元在反应堆裂变中子谱辐射环境下的中子单粒子翻转截面。

1 Geant4 模拟计算

中子入射到器件中,与器件材料相互作用,发生弹性散射、非弹性散射、辐射俘获和裂变反应^[1],产生次级带电粒子。这些次级带电粒子在器件内部的输运过程中会在其径迹附近产生电离能量沉积。电离能量沉积生成大量电子-空穴对,电子-空穴对再被存储单元的空间电荷区所收集,当收集到的电荷达到导致单元逻辑状态翻转所需的最小电荷时,该单元的存储状态便会发生翻转,而这个空间电荷区即为敏感体积,最小电荷即为临界电荷^[6-7]。

对SRAM器件中子单粒子翻转效应的模

拟应包含 3 方面内容:1) 建立 SRAM 单元的几何结构模型,这是进行粒子输运模拟的基础;2) 建立粒子输运模型,以模拟中子与器件材料相互作用以及在器件敏感节点内部产生能量沉积的过程;3) 建立 SRAM 单元的单粒子翻转截面计算模型,以模拟能量沉积到电子-空穴对的生成进而产生 SEU 过程。

其中,粒子输运模型主要由 Geant4 粒子输运软件包提供的物理模型实现。

1.1 几何结构模型

为研究不同特征尺寸 SRAM 单元的低能中子单粒子翻转效应敏感性,参考器件版图设计的 λ 法则,将器件的几何结构用特征尺寸参数化,详细的几何模型参数列于表 1。

表 1 参数化几何模型
Table 1 Parameterized geometry model

名称	与特征尺寸 fs 的比例
敏感体积	3.5×2.0×2.8
单元面积	14.5×17.0

当 SRAM 器件特征尺寸缩小后,常需采用多层金属布线结构来应对复杂的电气连接。因此,在建立 SRAM 器件的几何模型时,根据器件工艺和 Monte-Carlo 模拟的特点,采用堆栈式几何结构来模拟多层金属布线的效应;敏感体积由 Si 构成,位于堆栈结构的正下方。同时采用矩阵式的单元布局。完整的器件几何模型如图 1 所示。面中子源位于器件的顶部,沿垂直于器件表面的方向入射。

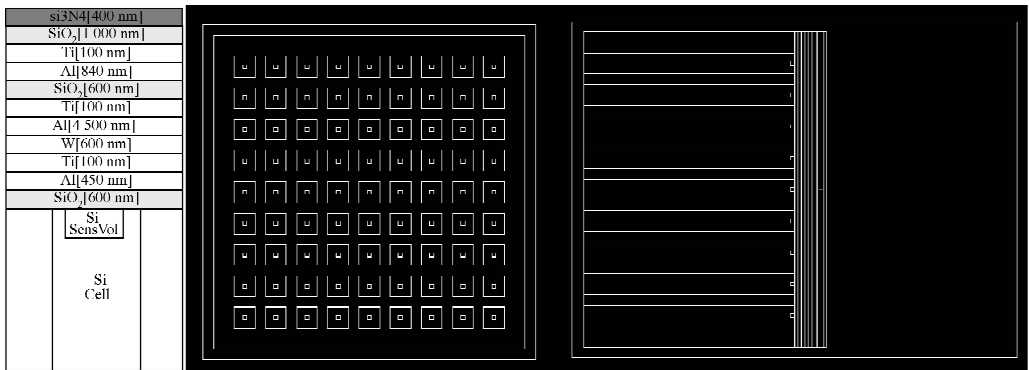


图 1 模拟采用的 9×9 bits SRAM 器件几何模型

Fig. 1 9×9 bits SRAM cells architecture for simulation

1.2 翻转截面计算模型

设模型包含 k 个敏感体积, 假设在面积为 S 的 SRAM 单元上的入射中子数为 N , 产生了 U 计数的 m 位翻转, 记为 U_m 。则器件的中子单粒子多位翻转截面 $\sigma_m(\text{cm}^2)$ 为:

$$\sigma_m = \frac{SU_m}{N}$$

设第 i 个能量为 E_0 的入射中子在所有敏感体积 V_1, V_2, \dots, V_k 内产生的最大的 m 个能量沉积分别为 $E_{d,i1}, \dots, E_{d,im}$, 记为向量 $\mathbf{E}_{d,i}$ 。如果对于向量 $\mathbf{E}_{d,i}$ 中的任意元素 $E_{d,ij}$, 均有 $E_{d,ij} \geq E_{th}$ 成立, 则产生 1 次 m 位翻转。即:

$$\delta(\mathbf{E}_{d,i}) = \prod_{j=1}^m \delta(E_{d,ij}) = \begin{cases} 0 & E_{d,ij} < E_{th} (j = 1, \dots, m) \\ 1 & E_{d,ij} \geq E_{th} (j = 1, \dots, m) \end{cases}$$

其中, 临界能量 E_{th} 可由临界电荷和 SRAM 单元敏感体积材料所决定。以 Si 基 SRAM 单元为例, 每产生 1 个电子-空穴对, 平均需要 3.6 eV 的能量沉积, 所以 E_{th} 可表示为:

$$E_{th} = 0.02247Q_c$$

其中: 临界能量 E_{th} 的单位为 MeV; Q_c 为临界电荷, fC。

根据 Monte-Carlo 计算方法, 很容易计算得到能量为 E_0 的中子在敏感体积 V_1, \dots, V_m 内分别产生 $E_{d,i1}, \dots, E_{d,im}$ 的能量沉积的概率为 $\sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i})$, 则该中子对 m 位翻转计数的贡献 $U_m(E_0, i)$ 可表示为:

$$U_m(E_0, i) = \sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i}) \cdot \delta(\mathbf{E}_{d,i})$$

那么, N 个能量为 E_0 的入射中子产生的 m 位翻转计数 U_m 可表示为:

$$U_m(E_0) = \sum_{i=1}^N \sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i}) \cdot \delta(\mathbf{E}_{d,i})$$

代入 $\delta(x)$ 函数, U_m 可简化为:

$$U_m(E_0) = \sum_{\substack{i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, m \\ E_{d,ij} \geq E_{th}}} \sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i})$$

因此, 中子单粒子多位翻转截面可写为:

$$\sigma_m(E_0) = \frac{S}{N} \sum_{\substack{i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, m \\ E_{d,ij} \geq E_{th}}} \sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i})$$

单粒子翻转 (SEU) 截面即一位翻转截面。

即 $m=1$, 可得:

$$\sigma_m(E_0) = \sigma_{\text{seu}}(E_0) = \frac{S}{N} \sum_{i=1, \dots, N} \sigma_{\text{prod}}(E_0, \mathbf{E}_{d,i})$$

其中, $E_{d,i}$ 为第 i 个能量为 E_0 的中子在某个敏感体积内产生的能量沉积。

单粒子多位翻转 (MBU) 截面即两位和两位以上翻转截面。即 $m=2$, 可得:

$$\sigma_m(E_0) = \sigma_{\text{mbu}}(E_0) = \frac{S}{N} \sum_{i=1, \dots, N}^{E_{d,i} \geq E_{th}} \sigma_{\text{prod}}(E_0, E_{d,i1}, E_{d,i2})$$

其中, $E_{d,i1}$ 和 $E_{d,i2}$ 分别为第 i 个能量为 E_0 的中子在所有敏感体积内最大的两个能量沉积。

以此类推, 可得到更为详细的多位翻转截面数据。

1.3 计算结果

1) 临界电荷

临界电荷代表着 SRAM 单元状态发生改变所需的最小电荷量, 它在一定程度上表征着 SRAM 单元对入射粒子产生的能量沉积的敏感性。SRAM 单元在不同临界电荷下的 SEU 翻转截面如图 2 所示。

从图 2 可看出: 临界电荷 Q_c 越大, SEU 截面越小, 且 SEU 截面减小的趋势远大于 Q_c 增大的趋势。对于 0.13 μm 工艺 SRAM 单元, 临界电荷从 2 fC 变化到 8 fC 时, Q_c 增大了 4 倍; 相应地 1 MeV 中子导致的 SEU 截面从 $1.05 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 减小到 $3.97 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, 截面降低了约 26.5 倍。也即采取增大临界电荷的方法可极大提高 SRAM 器件的抗单粒子翻转效应的性能。

当 Q_c 减小时, 翻转率曲线随着入射中子能量的降低有上翘的趋势, 也即低临界电荷器件对低能中子更加敏感。分析产生能量沉积的次级粒子, 发现产生的 ^{16}O 反冲核的贡献在低能区增大较快。图 3 示出 1 MeV 和 2 MeV 中子入射到 0.18 μm 工艺 SRAM 单元上产生的次级粒子对单元 SEU 截面的贡献, 设该 SRAM 单元的临界电荷为 3 fC, 则 1 MeV 中子产生的 ^{16}O 反冲核对 SEU 的贡献为 65.2%, 比 2 MeV 的 30.8% 高出 2.12 倍, 而 5 MeV 时该值为 19.3%。

出现 ^{16}O 反冲核对 SEU 截面的贡献增大的原因可从低能中子与 ^{16}O 元素的弹性散射截面的变化得到解释。Geant4 提供的截面库 (图 4) 中, ^{16}O 与 1 MeV 中子的弹性散射截面为 $8.154 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$, 大于 ^{28}Si 的弹性散射截

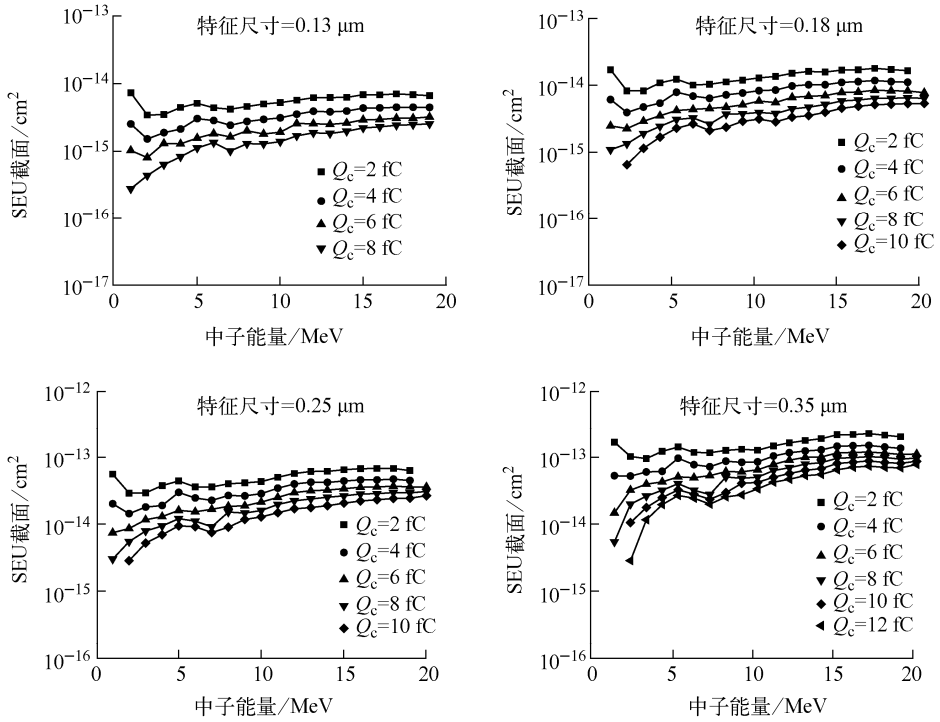


图 2 单能中子入射时 SRAM 单元在不同临界电荷条件下的单粒子翻转截面

Fig. 2 SEU cross sections of SRAM cell at different critical charge irradiated by mono-energy neutrons

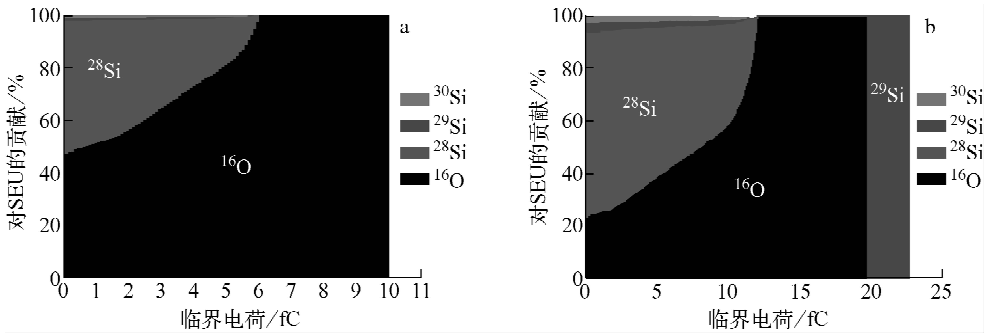


图 3 能量为 1 MeV(a)和 2 MeV(b)的入射中子产生的次级粒子对 SEU 的贡献比例

Fig. 3 Contribution of secondary ions to SEU irradiated by 1 MeV (a) and 2 MeV (b) neutrons

面 $4.681 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$, 因此 ^{16}O (n, n) 截面更占优; 随着入射中子能量的逐渐降低, 弹性散射截面还会有所升高。同时, 对于 SiO_2 层, O 原子数量为 Si 原子数量的 1 倍, 也增大了反应的概率; 由于核的质量数的差异, ^{16}O (n, n) 反应产生 ^{16}O 反冲核的能量高于 ^{28}Si (n, n) 反应产生 ^{28}Si 反冲核的能量, 能产生更大的能量沉积。由于以上因素的存在, 低能段中子单粒子翻转效应中, 氧元素的贡献较为突出。

2) 特征尺寸

为分析特征尺寸对截面数据的影响, 考查

了不同特征尺寸的 SRAM 单元的电荷沉积分布曲线(图 5)。

从图 5 不难看出: 特征尺寸越大, 中子在单元敏感体积内沉积能量的概率亦越大。中子在敏感体积内产生的能量沉积存在阈值, 且该阈值随特征尺寸的增大而增大。当产生的能量沉积较小时, 如 1 MeV 中子入射在 0.13、0.18、0.25、0.35 μm 工艺 SRAM 单元中产生的能量沉积为 100 keV 时, 将其截面以特征尺寸的 3 次方进行归一化后分别为 3.934、3.891、3.745、3.850 m^{-1} , 可看出, 能量沉积的概率与

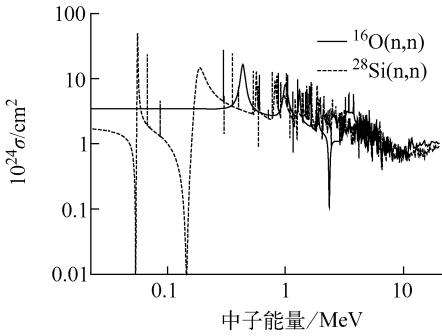


图4 Geant4 截面库中 ^{16}O 与 ^{28}Si 的中子弹性散射截面

Fig. 4 Cross section of ^{16}O and ^{28}Si for neutron elastic scattering in Geant4 database

特征尺寸的3次方几乎成比例,也即相同中子入射条件下,能量沉积概率与敏感体积成准线性关系。当能量沉积处在能量沉积阈值附近时,不同特征尺寸SRAM单元的能量沉积概率差异较大,已不存在准线性关系。

注意到中子的穿透能力较强,则大量中子在器件材料中产生的平均能量沉积体密度在较大范围内(相对于器件的几何尺寸)是相对均匀的。因此,中子在单元敏感体积内产生能量沉积的概率与敏感体积的大小成准线性关系便不

难理解。同样地,平均能量沉积体密度与SRAM单元有限的敏感体积共同决定了在统计意义上敏感体积内必然存在能量沉积阈值。当入射中子能量增大时,产生的次级带电粒子的能量将增大,其平均能量沉积体密度也随之增大,因此,随着入射中子能量的不断增大,SRAM单元的电荷沉积分布曲线会向上平移,且对应的最大能量沉积阈值也会有不同程度的增大。

由于单粒子翻转效应考虑的是单个径迹产生的电荷沉积,因此,需分析产生电荷沉积的次级带电粒子在单元敏感体积内的径迹长度的差异。当敏感体积增大时,单个径迹产生较大能量沉积的概率会明显降低,即中子在不同特征尺寸SRAM单元的敏感体积内产生较大能量沉积的概率的差异会明显增大。

3) SRAM在反应堆中子辐射环境中的单粒子翻转截面

应用已建立的Geant4程序,模拟了特征尺寸为 $0.13\sim 0.60\ \mu\text{m}$ 的SRAM单元在反应堆裂变中子谱辐射环境下的中子单粒子翻转效应(图6)。从图6可看出,随着SRAM器件特征尺寸的减小,反应堆中子辐射导致的中子单粒子翻转效应的敏感性逐渐增大。

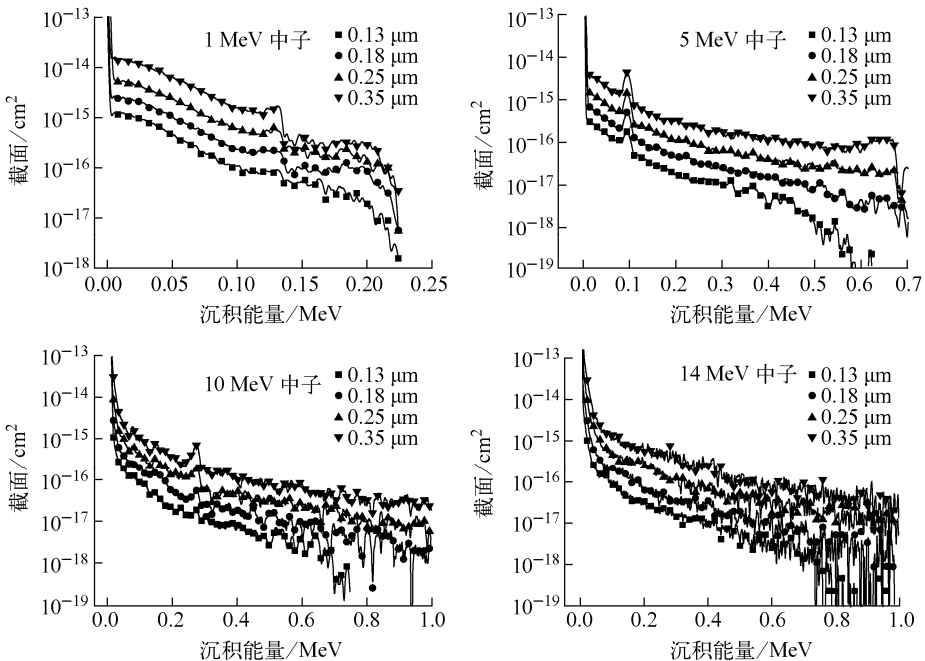


图5 特征尺寸对能量沉积分布曲线的影响

Fig. 5 Distribution of energy deposition at different feature size

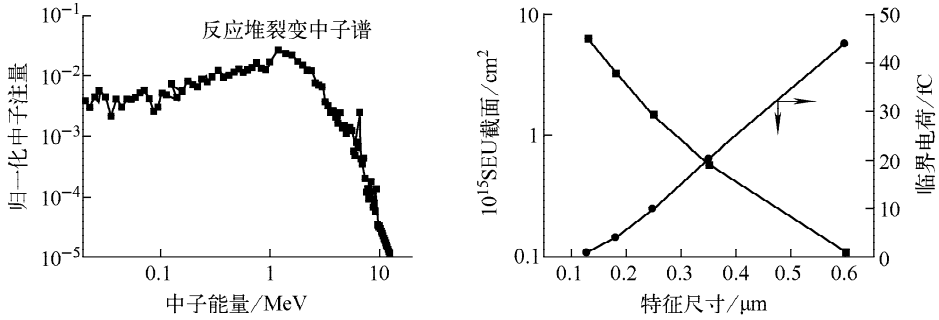


图 6 不同特征尺寸 SRAM 在反应堆裂变中子谱环境中的 SEU 截面

Fig. 6 Calculated SEU section of SRAM at different feature size in fission neutron spectrum of reactor

2 结论

对于低能中子导致的 SRAM 器件单粒子翻转效应,低 Z 元素特别是 O 元素与中子的弹性散射能产生较高能量的反冲核,并在器件的敏感体内产生较大的能量沉积,是低能中子单粒子翻转效应产生的重要机制。

随着 SRAM 器件特征尺寸的不断减小,其对反应堆裂变中子谱辐射导致的单粒子翻转效应的敏感性却呈增加的趋势。其中,临界电荷的减小加剧了 SRAM 单元单粒子翻转效应的敏感性,是导致 SEU 截面升高的主导原因。与大尺寸 SRAM 器件相比,小尺寸器件的低能中子单粒子翻转效应更重要。

参考文献:

[1] BAGGIO J, LAMBERT D, FERLET-CAVROIS V, et al. Single event upsets induced by 1-10 MeV neutrons in static-RAMs using mono-energetic neutron sources[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54(6): 2 149-2 155.

[2] ARMANI J M, SIMON G, POIROT P. Low-energy neutron sensitivity of recent generation SRAMs[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(5): 2 811-2 816.

[3] LAMBERT D, BAGGIO J, HUBERT G, et al. Neutron-induced SEU in SRAMs: Simulations

with n-Si and n-O interactions[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52(6): 2 332-2 339.

[4] WROBEL F, PALAU J M, CALVET M C, et al. Contribution of SiO₂ in neutron-induced SEU in SRAMs[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(6): 2 055-2 059.

[5] LAMBERT D, BAGGIO J, FERLET-CAVROIS V, et al. Neutron-induced SEU in bulk SRAMs in terrestrial environment: Simulations and experiments[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(6): 3 435-3 441.

[6] 杨海亮,李国政,李原春,等. 质子和中子的单粒子效应及其等效关系理论模拟[J]. 原子能科学技术,2001,35(6):490-495.

YANG Hailiang, LI Guozheng, LI Yuanchun, et al. A Monte-Carlo simulation of equivalence of single event upset induced by neutrons and protons[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(6): 490-495(in Chinese).

[7] 贺朝会,陈晓华,李国政,等. 质子单粒子翻转截面计算方法[J]. 中国空间科学技术,2000,5:10-16.

HE Chaohui, CHEN Xiaohua, LI Guozheng, et al. Calculation method for proton single event upset cross section[J]. Chinese Space Science and Technology, 2000, 5: 10-16(in Chinese).