

文章编号: 1007-4627(2012)04-0419-06

Geant4 模拟 δ 电子对单粒子翻转的影响

刘建德^{1,2}, 孙友梅¹, 刘杰¹, 侯明东¹, 张战刚^{1,2}, 段敬来¹, 姚会军¹, 翟鹏飞¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用 Geant4 蒙特卡洛程序包, 基于 RPP (Rectangular Parallelepiped Volume) 模型构建 SRAM 器件单元的灵敏体积, 编写了重离子在器件材料中的输运程序和单粒子翻转截面计算方法, 得到了简化器件结构的单粒子翻转截面 σ 与线性能量转移 LET 的关系曲线, 计算得到的翻转 LET 阈值和饱和截面与实验结果基本一致。模拟获得了 LET 值为 $99.69 \text{ MeV}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg})$ 的 Bi 离子及 LET 值为 $69 \text{ MeV}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg})$ 的 Bi 离子和 Xe 离子在器件材料中产生的 δ 电子分布图像, 讨论了 δ 电子分布对翻转截面的影响。计算了灵敏体积中能量沉积与 δ 电子分布的关系, 认为 δ 电子分布对单粒子效应的影响随着器件的特征尺寸减小将更加严重。

关键词: Geant4; RPP 模型; 灵敏体积; 单粒子翻转; δ 电子

中图分类号: TN386.1 **文献标志码:** A

1 引言

随着半导体技术的发展, 微电子器件的特征尺寸越来越小, 存储电荷的能力也在减小, 对空间辐射环境中的单个粒子的辐照效应变得更加敏感^[1-2]。单粒子效应成为影响航天器使用寿命和可靠性的主要因素之一。地面加速器模拟实验是评估单粒子效应最有效的手段^[3], 然而, 地面加速器模拟实验存在着费用较高、实验时间有限等局限性, 且不能反映器件中电荷的传输和收集机制。所以, 单粒子效应的计算机模拟, 不仅成为地面加速器实验的补充和空间翻转率预测的主要手段, 也成为器件早期设计阶段抗辐射加固依据的来源^[4]。

单粒子效应的计算机模拟, 主要有单粒子效应的器件数值模拟和空间翻转率预测两个方面。器件数值模拟主要是通过高能粒子输运程序包和半导体器件仿真软件联合实现, 如 Vanderbilt 大学开发的 MRED 程序^[5], 就是 Geant4 和 TCAD 的结合。单粒子效应计算机模拟的另一个主要方面是利用愈加成熟的空间环境模型与软件技术对器件在辐射空间中单粒子翻转率的预测。Pickel^[6]用矩形六面体

(RPP)描述器件灵敏体积的工作为空间预测重离子引起的单粒子翻转率奠定了基础。Petersen 等^[7]给出了一个计算和解释 SEU 测试数据的方法, 讨论了包含在重离子截面曲线中器件翻转率的有关信息^[8]。他们认为器件的一些几何因素影响对地面测试数据的解释和空间翻转率的计算。当前, 几乎所有的单粒子翻转率预估程序: CREME, CRIER, SPACE RADIATION 和 CUPID 等都建立在 RPP 模型上, RPP 模型是单粒子效应分析和空间翻转率预测的基础。

本工作的重点是利用 Geant4 程序包^[9], 基于 RPP 模型^[10], 结合重离子单粒子效应实验数据构造简化的 SRAM 结构单元的灵敏体积, 编写重离子输运程序和单粒子翻转截面计算流程, 计算单粒子翻转截面与线性能量转移的关系曲线。探讨重离子产生的 δ 电子空间分布对单粒子效应的影响。

2 SRAM 结构单元的构造

AT60142F SRAM 是 Atmel 公司的 $0.25 \mu\text{m}$ 工艺的 6 管存储单元低能耗 4 Mbit CMOS SRAM。

收稿日期: 2012-02-23; 修改日期: 2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11179003, 10975164, 10805062, 11005134); 中国科学院西部之光人才培养计划(Y050010XB0)

作者简介: 刘建德(1983—), 男, 甘肃榆中人, 硕士生, 从事单粒子效应计算机模拟研究, E-mail: liujiande@impcas.ac.cn

通信作者: 孙友梅, E-mail: ymsun@impcas.ac.cn

欧洲空间局在比利时的 HIF (The Heavy ion Irradiation Facility) 以及在芬兰的 RADEF (The Radiation Effects Facility) 上用 9.3 MeV/u 的 N, Ne, Si, Ar, Fe, Kr 和 Xe 离子, 测试了不同入射角 LET 值下 AT60142F SRAM 的单粒子翻转截面^[11], 通过 Weibull 函数拟合得到这个器件的单粒子翻转阈值为 1.5 MeV/(cm⁻² · mg), 饱和截面为 $\sigma_{\text{sat}} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。

根据加速器实验测得的翻转截面参数可以估算器件的灵敏体积尺寸。基于 RPP 模型, 根据饱和和翻转截面 σ_{sat} 和翻转阈值 LET_{th} , AT60142F SRAM 器件的灵敏体积尺寸为

$$a = b = \sqrt{\sigma_{\text{sat}}}, \quad c = \frac{E_c}{\rho \cdot \text{LET}_{\text{th}}}, \quad (1)$$

式中: a, b 和 c 为灵敏体积的长、宽和深度; ρ 为器件灵敏体积材料的密度。得到 $a = b = 3.16 \mu\text{m}$, 而器件灵敏体积的深度 c 并不能直接得到, 还要通过其他方式^[12-13] 或者器件模拟软件确定灵敏体积深度的大小。根据已有的 AT60142F SRAM 的研究^[11, 14], 选取单粒子翻转的临界能量 E_c 为 0.69 MeV, 得到 $c = 2 \mu\text{m}$ 。

在 Geant4 程序中构造 SRAM 器件几何模型时, 根据器件工艺和蒙特卡洛模拟的特点, 采用堆栈式几何结构来模拟多层金属布线, 灵敏体积由硅

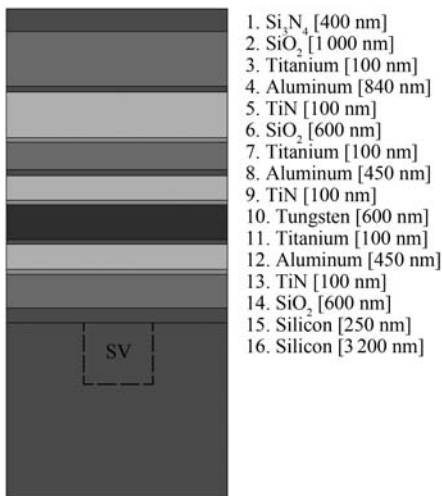


图 1 构造的 SRAM 结构单元

材料构成, 位于堆栈结构的正下方, 是 $3.16 \mu\text{m} \times 3.16 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的长方体, 如图 1 中虚线所示。图 1 中的器件结构, 参考了 Christina 文章中的 SRAM 结构单元^[15]。

3 Geant4 计算过程

利用 Geant4 编写随机重离子源, 从图 1 所示器件顶部垂直于器件表面向下入射, 离子进入器件的位置由下式决定:

$$x = \xi_1 x_0, \quad y = \xi_2 y_0, \quad (2)$$

其中: x_0 和 y_0 为 SRAM 结构单元的横向尺寸; ξ_1 和 ξ_2 为 $[0, 1]$ 内的均匀分布随机数。

荷能粒子进入半导体器件, 主要通过直接电离和核反应产物的电离过程引起单粒子效应。本工作主要考虑重离子的直接电离过程。重离子在器件材料中通过电离过程沉积能量, 产生电子-空穴对。电子-空穴对通过输运过程, 最终被敏感节点所收集。如果收集的电荷 Q 大于临界电荷 Q_c , 就发生单粒子翻转。临界电荷 Q_c 是器件的一个重要参数, 其大小与器件的掺杂浓度、工作电压、温度及灵敏区的表面积有关。器件的灵敏区一般为硅材料, 在硅中产生一对电子-空穴对, 需要 3.6 eV 的能量。因此, 临界能量 E_c 为

$$E_c (\text{MeV}) = 22.5 Q_c (\text{pc}). \quad (3)$$

Geant4 程序中模拟重离子在灵敏体积中沉积的能量, 如果大于临界能量, 则发生单粒子翻转, 单粒子翻转截面由下式得到:

$$\sigma = \frac{n}{\phi} = \frac{nS}{N}, \quad (4)$$

式中: σ 为翻转截面; n 为发生单粒子翻转的事件数; ϕ 为粒子注量; S 为器件单元的表面积, N 为入射离子总数。

4 计算结果与分析

在 Geant4 程序中选用不同能量的 C, Ne, Ar, Kr, Xe, Bi 和 U 离子在器件结构的表面随机位置向下入射, 选用的离子能量 E 和相应地在器件表面的 LET 值如表 1 所示。LET 值是由 SRIM 程序计算得到的在硅材料中的值。

考虑计算时间和计算机能力, 选取入射的重离子数 N 为 40 000 个, 在灵敏体积中沉积的能量大于临界能量的事件数为 n , 得到单粒子翻转截面 σ 和线性能量转移 LET 值的关系如图 2 所示。Geant4

表 1 Geant4 程序中选用的重离子和重离子参数*

| C ion | | Ne ion | | Ar ion | | Kr ion | | Xe ion | | Bi ion | | U ion | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET | <i>E</i> | LET |
| 0.1 | 1.46 | 0.60 | 1.47 | 5 | 1.67 | 10 | 6.56 | 20 | 12.4 | 30 | 28.4 | 7 | 80.6 |
| 0.097 | 1.47 | 0.50 | 1.67 | 4.5 | 1.80 | 5 | 10.6 | 10 | 19.5 | 10 | 52.5 | 2.5 | 111 |
| 0.096 | 1.48 | 0.40 | 2.00 | 4 | 1.96 | 1 | 28.9 | 6 | 27.3 | 5.5 | 69.0 | 1.5 | 119 |
| 0.095 | 1.49 | 0.27 | 2.70 | 3.7 | 2.05 | 0.5 | 37.3 | 3 | 41.2 | 1 | 99.7 | | |
| 0.091 | 1.53 | 0.08 | 6.13 | 2 | 3.29 | 0.2 | 40.9 | 1 | 63.5 | | | | |
| 0.09 | 1.55 | 0.05 | 7.49 | 1 | 5.38 | | | 0.4 | 69.0 | | | | |
| 0.08 | 1.73 | | | 0.5 | 8.53 | | | | | | | | |
| 0.04 | 2.77 | | | 0.25 | 12.4 | | | | | | | | |
| 0.012 | 4.48 | | | 0.13 | 17.2 | | | | | | | | |

* *E* 的单位为 GeV, LET 的单位为 MeV/(cm⁻²·mg)。

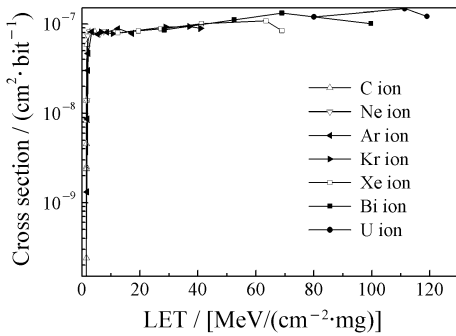


图 2 Geant4 模拟得到的 SRAM 器件翻转截面与 LET 值的关系

模拟得到的单粒子翻转阈值为 1.47 MeV/(cm⁻²·mg), 饱和截面为 $\sigma_{sat} = 0.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 程序模拟的结果与实验数据拟合的翻转阈值 1.5 MeV/(cm⁻²·mg), 饱和截面 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 符合。程序中使用了单一的简化器件结构单元, 且没有考虑与核反应有关的物理过程及多位翻转的影响, 但模拟结果与实验基本相符, 说明程序中编写的单粒子翻转的主要机理是正确的, 构造的器件结构能反映离子与器件材料的主要相互作用过程。

从图 2 可以看出, Bi 离子 LET 值为 69 MeV/(cm⁻²·mg) 对应的翻转截面大于 Bi 离子 LET 为 99.69 MeV/(cm⁻²·mg) 时对应的翻转截面。同样, Xe 离子 LET 为 63.46 MeV/(cm⁻²·mg) 对应的翻转截面也大于 Xe 离子 LET 值 69 MeV/(cm⁻²·mg) 对应的翻转截面, U 离子的也出现了类似的规律, 即同种离子当 LET 值大于一定数值后, LET 值大的翻转截面反而变小。离子在器件材料中通过

电离过程产生 δ 电子, δ 电子产生的多少及其空间分布不仅与 LET 值有关, 而且与离子的种类和能量有关。图 3 给出了用 Geant4 模拟得到的重离子从右至左进入器件、与器件材料相互作用产生的 δ 电子空间分布图像。图 3(a) 是能量为 1 GeV、LET 为 99.69 MeV/(cm⁻²·mg) 的 Bi 离子在器件中产生的 δ 电子分布, 图 3(b) 是能量为 5.5 GeV、LET 值是 69 MeV/(cm⁻²·mg) 的 Bi 产生的 δ 电子分布, 图 3(c) 是能量为 0.4 GeV、LET 值为 69 MeV/(cm⁻²·mg) 的 Xe 离子在器件材料中产生的 δ 电子分布。图 3(a) 与图 3(b) 相比较, 可看出图 3(b) 中的 δ 电子在空间分布范围更大。正是由于同一种离子较小的 LET 对应着更大的离子能量值, 导致了具有一定密度的 δ 电子在空间更大范围分布, 使得图 2 中较小 LET 值的 Bi 和 Xe 离子的翻转截面大于同种离子较大 LET 值对应的翻转截面。所以, 离子的 LET 大于一定值后, 相对于 LET 的影响, 离子能量的影响就显现出来了, LET 值小而能量大的离子的翻转截面大于了 LET 值大而能量小的同种离子的翻转截面。

单粒子效应实验中, 一般认为具有相同 LET 值的离子在器件中引起的效应是相同的, 但图 2 的模拟结果可以明显观察到, 5.5 GeV 的 Bi 离子与 0.4 GeV 的 Xe 离子在硅材料中具有相等的 LET 值, 均为 69 MeV/(cm⁻²·mg), 但对应着不同的翻转截面。在图 3(b) 和图 3(c) 中, 两种离子最大的差别就是在器件结构中产生的 δ 电子空间分布不同, 5.5 GeV 的 Bi 离子产生的 δ 电子在空间的分布更

广，而 0.4 GeV 的 Xe 离子产生的 δ 电子分布却非常局域化。当重离子径迹在灵敏体积之外时，5.5 GeV 的 Bi 离子产生的大范围 δ 电子分布还能够在灵敏体积中沉积大于临界能量的能量，而相同 LET

值的 Xe 离子的这种影响要小许多。可见，LET 值相同但能量相异的不同种类的离子，由于产生的 δ 电子在空间分布范围的不同，对单粒子翻转的影响也不同。

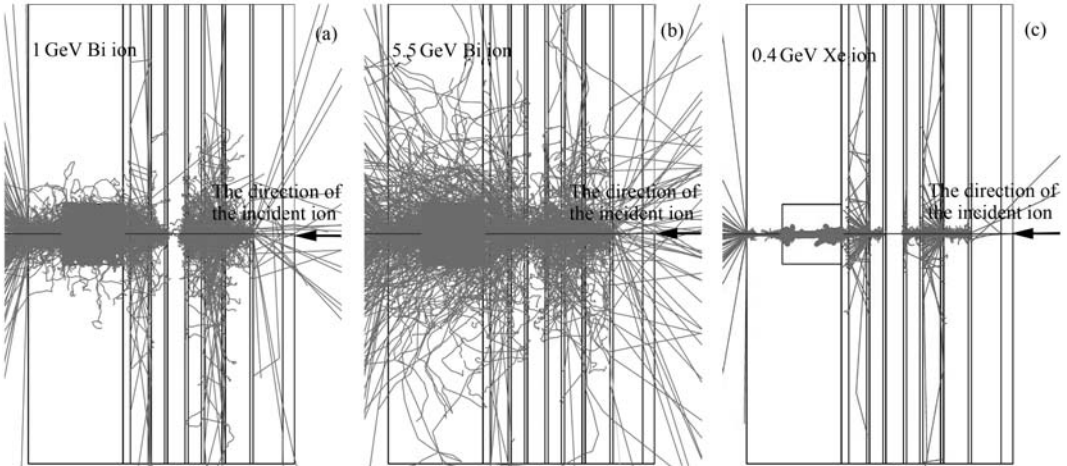


图 3 Geant4 模拟的重离子在器件单元中产生的 δ 电子分布图像

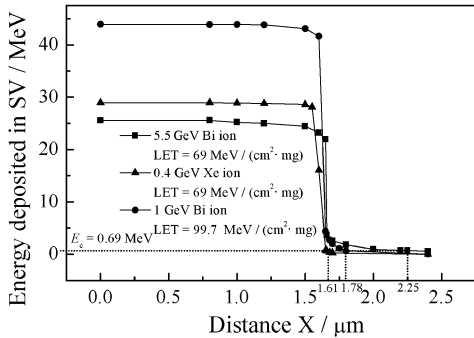


图 4 灵敏体积中能量沉积随灵敏体积中心到重离子径迹距离变化的曲线

为了定量分析 δ 电子分布对于单粒子效应的影响，在 Geant4 程序中计算了离子在器件灵敏体积内的能量沉积与离子入射位置的关系。定义灵敏体积中心到重离子径迹的距离为 X ，表示离子入射位置的不同。灵敏体积中的能量沉积随 X 的变化如图 4 所示。当 X 在一定的范围内，灵敏体积中沉积的能量大于临界能量 $E_c = 0.69$ MeV 时，对翻转截面有贡献。为了讨论方便，引入与器件工艺尺寸有关的参数 I ，表示器件灵敏体积横向尺寸的一半：

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\text{sat}}} \quad (5)$$

对于图 1 构造的器件，灵敏体积的横向尺寸为 $3.16 \mu\text{m}$ ，所以 $I = 1.58 \mu\text{m}$ 。

离子入射器件的位置距器件中心的距离 $X < I$ 时，如图 4 中 X 从 0 到 $1.58 \mu\text{m}$ 范围内，表示离子能够完全进入灵敏体积，离子的大部分能量沉积于灵敏体积内，所以 LET 值大的 1 GeV 的 Bi 离子在灵敏体积中沉积的能量（约 43 MeV）要比 LET 值为 $69 \text{ MeV}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg})$ 的 Bi 和 Xe 离子沉积的能量大。而对于 LET 值为 $69 \text{ MeV}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg})$ 的 Bi 离子与 Xe 离子，从图 4 中可看出，Bi 离子在灵敏体积中沉积的能量要比 Xe 离子沉积的小，这主要也是来源于两种离子产生的 δ 电子空间分布范围不同。图 3(b) 中 5.5 GeV 的 Bi 离子产生的 δ 电子在空间的分布范围大，使得一部分 δ 电子分布在灵敏体积之外，所以在灵敏体积中沉积的能量小，而图 3(c) 中 0.4 GeV 的 Xe 离子产生的 δ 电子全部分布在灵敏体积内，有更多的能量沉积在灵敏体积中。当离子入射器件的位置距器件中心的距离 $X > I$ 时，即图 4 中 $X > 1.58 \mu\text{m}$ ，表示重离子的径迹不在灵敏体积之内。此时，能量不同的重离子产生的 δ 电子空间分布对单粒子翻转的影响将更加明显，图 4 中灵敏体积的横向尺寸从 I 扩大到了临界能量 $E_c = 0.69$ MeV 对应的 X 值。定义 η 为 δ 电子空间分布引起的等效灵敏体积横向尺寸增大的百分数，可由下式计算：

$$\eta = \frac{X_c - I}{I} \times 100\%, \quad (6)$$

X_c 为临界能量 E_c 对应的 X 值。翻转截面的等效增大用 η' 表示:

$$\eta' = \frac{(2X_c)^2 - (2I)^2}{(2I)^2} \times 100\% \quad (7)$$

根据图4中数据计算整理如表2。

表2 重离子在器件材料中产生的 δ 电子空间分布对翻转截面的影响

| Ion | E/GeV | $\text{LET}/[\text{MeV}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{mg1})]$ | $I/\mu\text{m}$ | $X_c/\mu\text{m}$ | $\eta/\%$ | $\eta'/\%$ |
|-----|----------------|---|-----------------|-------------------|-----------|------------|
| Bi | 1 | 99.7 | 1.58 | 1.78 | 12.7 | 26.9 |
| Bi | 5.5 | 69 | 1.58 | 2.25 | 42.4 | 102.7 |
| Xe | 0.4 | 69 | 1.58 | 1.61 | 1.9 | 3.8 |

从表2可看出, 5.5 GeV的Bi离子产生的 δ 电子的大范围分布使得灵敏体积的横向面积增大了1倍, 图2中Geant4模拟得到的5.5 GeV的Bi离子的翻转截面约为 $1.7 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{bit}$, 约是翻转截面 $0.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{bit}$ 的2倍, 与这个结论是相对应的。而0.4 GeV的Xe离子产生的 δ 电子的局域化分布引起截面的变化却很小。所以, 对于相同LET值的重离子, 能量高的离子产生的 δ 电子在空间的分布范围变大, 引起翻转截面的增大。随着离子质量的增高, 能量的增加, δ 电子空间分布的影响将更加严重。

综上所述, 不论是不同能量的同一种离子, 还是相同LET值的不同种类的离子, 在器件中产生 δ 电子分布的差异是非常大的。随着器件特征尺寸的减小, δ 电子空间分布对于单粒子效应的影响将变得愈发严重。本工作中, 器件灵敏体积的尺寸在微米量级($I=1.58 \mu\text{m}$), 重离子在器件材料中产生 δ 电子的横向分布也在微米量级, 当器件的特征尺寸达到几十纳米时, 由于 δ 电子的横向分布还在微米量级, 由 η 的表达式可看出, δ 电子分布的影响将急剧增大, 甚至 δ 电子在空间的大范围分布会引起器件的多位翻转^[16], 离子种类和能量引起的 δ 电子在空间的不同分布, 是影响器件单粒子效应实验结果的重要因素之一。

5 结论

本文利用Geant4程序包, 基于RPP模型构造了器件的灵敏体积。模拟得到的单粒子翻转阈值和饱和翻转截面与加速器实验测试的数据符合。模拟研究了不同能量和不同LET值的同种离子以及相同LET值不同能量的不同种类离子产生的 δ 电子空间分布对于单粒子翻转截面的影响, 讨论了LET值作为单一的单粒子效应评估参数的局限性。随着器件特征尺寸的减小, 在器件单粒子效应敏感性评估中, 不仅要考虑LET值, 还应考虑离子的种类和能量不同引起的 δ 电子空间分布不同的影响。

参考文献(References):

- [1] BINDER D, SMITH E C, HOLMAN A B. IEEE Trans Nucl Sci, 1975, **22**(6): 2675.
- [2] PICKEL J C, BLANDFORD J T, IEEE Trans Nucl Sci, 1978, **25**(6): 1166.
- [3] HOU Mingdong, ZHEN Honglou, ZHANG Qingxiang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2000, **17**(3): 165(in Chinese). (侯明东, 甄红楼, 张庆祥, 等. 原子核物理评论, 2000, **17**(3): 165.)
- [4] SLAWOSZ U, GILLES G, PHILIPPE R, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2011, **58**(6): 2652.
- [5] KEVIN M W, ROBERT A W, BRIAN D S, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2007, **54**(4): 898.
- [6] PICKEL J C. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, **43**(2): 483.
- [7] PETERSEN E L, PICKEL J C, ADAMS J H, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1992, **39**(6): 1577.
- [8] PETERSEN E L. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, **43**(3): 952.
- [9] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2006, **53**(1): 270.
- [10] ROBERT A W, ROBERT A R, KEVIN M W, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2009, **56**(6): 3098.
- [11] HARBOE-SØRENSEN R, POIVEY C, GUERRE F X, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2008, **5**(6): 3082.
- [12] INGUIMBERT C, DUZELLIER S, ECOFFET R, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2000, **47**(3): 51.
- [13] ROTH D R, MCNULTY P J, ABDELKADER W G, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1993, **40**(6): 1721.
- [14] KEATING A. Mars Radiation Environment and Effects on EEE Components[D]. Lisbon: Universidade Técnica da Lisboa, 2008: 5-15.
- [15] HOWE C L, WELLER R A, REED R A, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2005, **52**(6): 2182.

Impact of Delta-electrons on Single-event Upsets with Geant4 Simulation

LIU Jian-de^{1, 2}, SUN You-mei¹, LIU Jie¹, HOU Ming-dong¹, ZHANG Zhan-gang^{1, 2},
DUAN Jing-lai¹, YAO Hui-jun¹, ZHAI Peng-fei¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In this paper, the sensitive volume of SRAMs was constructed based on RPP(Rectangular Parallelepiped Volume) model using the Monte-Carlo code Geant4. The interactions of heavy ion with materials and the SEU(Single Event Upset) cross section calculation method were presented in the program. The SEU cross-section curves with the linear energy deposition were obtained. The SEU threshold value and saturation cross section were consistent with the testing data with heavy ions beam. The δ -electrons distribution were different in the device material, which were generated by Bi ion with LETs of 99.67 MeV/($\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg}$) and Bi ion, Xe ion with LETs of 69 MeV/($\text{cm}^{-2} \cdot \text{mg}$). These results indicate δ -electrons distribution impacts on the SEU cross section. According to the relation of energy deposition in the sensitive volume, the δ -electrons distribution have more and more important effect on the Single Event Effect with reducing the feature size of semiconductor devices.

Key words: Geant4; RPP model; sensitive volume; single event upset; δ -electrons

Received date: 23 Feb. 2012; **Revised date:** 13 Mar. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11179003, 10975164, 10805062, 11005134); Western Program of Chinese Academy of Sciences(Y050010XB0)

Corresponding author: SUN You-mei, E-mail: ymsun@impcas.ac.cn