文章编号: 1007-4627(2014) 01-0081-05

重离子产生 δ 电子对 SRAM 单粒子翻转的影响

习 凯[1, 2], 刘 杰[1], 张战刚[1, 2], 耿 超[1, 2], 刘建德[1], 古 松[1, 2], 刘天奇[1, 2], 侯明东[1], 孙友梅[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着微电子器件集成度增加, 由入射离子在器件灵敏区内引起的 δ 电子分布对器件单粒子效应的影响越来越显著; 尤其是它极易引发多位翻转, 严重影响设计加固的有效性。首先利用蒙特卡罗软件包 Geant4 模拟得到重离子在器件灵敏区内产生的 δ 电子分布, 分析得出以下规律: 入射离子单核能越高, 其产生 δ 电子分布的径向范围越大; 单核能相同的不同种离子, 原子序数越大其产生的 δ 电子密度越大。其次, 通过模拟一款 45 nm 静态随机存储器的单粒子翻转效应, 说明 δ 电子和灵敏区分布共同影响器件的多位翻转。当器件灵敏区间距一定时, 多位翻转率随入射离子能量的升高先上升后下降; 在多位翻转率峰值和布喇格峰之间, 多位翻转率随入射离子线性能量传输 (LET) 值的升高而降低, 在该区域两侧多位翻转率随离子 LET 值的升高而升高。

关键词: 单粒子效应; δ电子分布; 多位翻转; Geant4

中图分类号: TN386.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.081

1 引言

一个高能带电粒子穿过微电子器件灵敏区时沉积能量会产生电荷, 如果有足够量的电荷被收集, 器件的逻辑状态会发生改变,这种效应叫做单粒子翻转效应。若单个离子入射致使两个或多个灵敏单元同时翻转, 则称其为多位翻转。对单粒子翻转最敏感的器件为静态随机存储器 (SRAM) 等利用双稳态进行工作的存储器, 随着集成度提高, SRAM 器件的临界电荷已降至低于 1 fC, 只需数千个电子就可导致其翻转[1]。通常利用设计加固技术可大大减小单粒子翻转对器件的危害, 但多位翻转的存在会严重破坏设计加固的有效性[2−3]。产生多位翻转的原因大致可分为 4 类: (1) 质子、中子等高能粒子与器件材料发生核反应, 产生的次级粒子可能同时打在多个灵敏单元上, 造成多位翻转[4−5], 如 Clemens 等[5]人的模拟工作显示, 器件中钨金属材料的存在使发生五位或更多位翻转的概率显著增加; (2) 当倾角入射时, 离子可能依次穿过多个灵敏区, 沉积足够的电荷造成多位翻转[6]; (3) 体硅工艺器件中存在的双极放大效应可导致多位翻转的发生[7−9]; (4) 一个入射离子在器件中电离产生的 δ 电子足够覆盖多个灵敏单元, 当这些灵敏单元收集了足够量的电荷时, 器件也会发生多位翻转。随着器件灵敏体积减小、临界电荷降低, δ 电子分布引起的多位翻转现象越来越明显, 并逐渐引起人们的高度重视。然而以往的加速器及计算机模拟工作往往不能将其与其它导致多位翻转的因素分离, 故不能明确地给出电子分布对器件多位翻转的影响。本文首先利用计算机模拟的方法得到入射重离子在器件灵敏区中产生 δ 电子的分布规律, 然后屏蔽其他因素作用, 最后讨论该分布对器件多位翻转的影响。

2 重离子产生 δ 电子的径向分布

2.1 方法简介

重离子在器件灵敏区中产生电荷的径向分布信息由 Geant4(9.4 版) 软件模拟得出。在模拟过程中, 将器件灵敏区抽象成厚度为 150 nm 的硅质长方体, 硅

收稿日期: 2013-03-24;　**修改日期:** 2013-04-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11179003, 10975164, 10805062, 11005134)
作者简介: 习凯(1986–), 男, 河北石家庄人, 硕士, 从事单粒子效应计算机模拟方面的研究; E-mail: xikai@impcas.ac.cn
通信作者: 刘杰, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn。

http://www.npr.ac.cn

体表面为正方形且其面积足够大，使离子产生的电子不会在径向上溢出灵敏区。离子总是在灵敏区上表面中心垂直入射，物理过程只考虑电磁相互作用并选用 Geant4 软件中的 Livermore 低能物理模型。

入射离子穿过器件灵敏区与硅材料发生电磁相互作用，产生高能次级电子，次级电子在运动过程也可沉积能量引起电离，当次级电子不能在硅中前进 1 nm 时则停止。由于入射离子产生的 δ 电子分布沿径向对称，故认为它是一个以入射离子径迹芯为中心轴，最大半径为 $R_{\max}$ 的圆柱体，$R_{\max}$ 取圆柱体包含 99.999% 的 δ 电子时的半径。用沉积电荷量 Q 和电子密度 ρ 表征单个入射离子在器件灵敏区内产生的 δ 电子分布 (取 10 000 个入射离子的平均值)。Q 为入射离子在以径迹芯为中心轴半径为 r 的圆柱体内产生的电子的总电荷量; 电子-空穴对密度 ρ 为

$$\rho=\frac{E}{I_0}\cdot\frac{1}{v}\ ,$$

其中：v 为电子分布径向半径 r 处圆筒的体积; E 为入射离子在体积 v 内沉积的能量; I_0=3.6 eV 为在硅中产生一个电子-空穴对所需的平均能量。

2.2 重离子产生的 δ 电子分布规律

2.2.1 相同 LET 值离子产生的 δ 电子分布

首先研究相同线性能量传输 (LET) 值不同离子产生的 δ 电子分布。在硅中 ^{209}Bi 离子的 LET 值随其能量 E_i 的变化关系如图 1 所示，曲线的峰值点称为布喇格峰 (Bragg peak)。模拟选用能量分别为 44 MeV、20 GeV 的 ^{209}Bi 离子和 140 MeV 的 ^{56}Fe 离子，它们都具有 29 MeV · cm^2/mg 左右的LET值。其中，44 MeV 和 20 GeV的 Bi 离子分别处在布喇格峰的左右两侧，记为低能 Bi 离子和高能 Bi 离子。

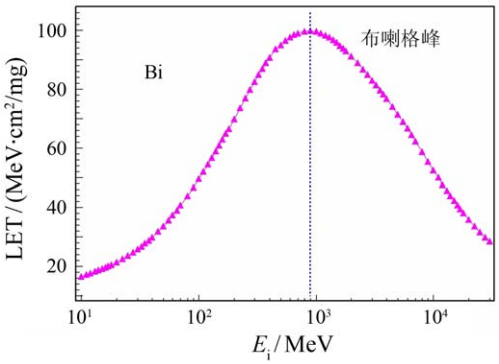

图 1 (在线彩图) 硅中 Bi 离子 LET 值与其入射能量 E_i 的变化关系

图 2 给出了离子在灵敏区内沉积的电荷量沿径向的变化关系，如 Fe 离子沉积在以其径迹芯为中心轴半径为 10 nm 圆柱内的电荷量约为 32 fC。从图 2 可看出，由于 LET 值相近，它们沉积的总电荷量基本一致，但这些电荷量沿径向的分布不同。低能 Bi 离子沉积的电荷被限制在 2 nm 以内; 而 Fe 离子沉积的电荷分布半径已超过 100 nm；高能 Bi 离子产生电荷的影响范围比 Fe 离子还要大。这说明相同 LET 的不同种类的离子在器件灵敏区中会产生不同的 δ 电子分布，离子能量越低，产生的电子越靠近其径迹芯。

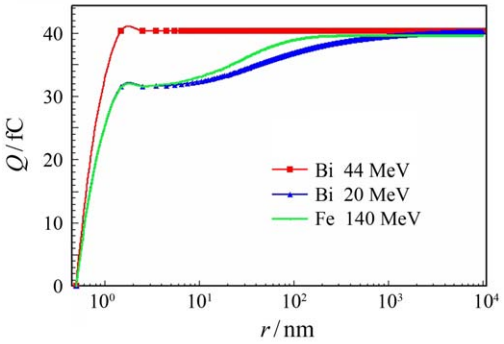

图 2 (在线彩图) 不同种类、能量的离子沉积的电荷量沿径向的变化关系

2.2.2 δ 电子径向分布规律

为研究重离子产生的电荷分布随离子种类、能量的变化关系，选用能量分别为 10 MeV/u 和 20 MeV/u 的 Ar，Kr，Xe 离子分别进行模拟。离子参数及模拟得到 δ 电子分布的 $R_{\max}$ 如表 1 所示。

表 1 离子参数及 δ 电子分布的 $R_{\max}$

离子种类	单核能/(MeV/u)	LET/(MeV·cm^2/mg)	$R_{\max}$/μm
Ar	10	9.73	4.024
Kr	10	31.26	3.933
Xe	10	57.53	3.943
Ar	20	6.27	9.577
Kr	20	21.60	9.647
Xe	20	44.20	9.684

图 3(a) 与图 3(b) 分别为 10 MeV/u 和 20 MeV/u 的 Ar，Kr，Xe 离子在灵敏区内沉积的电子密度沿径向的变化关系。由图 3 和表 1 可以得到如下规律：

首先，相同单核能的不同离子产生 δ 电子分布

http://www.npr.ac.cn

的 R_{max} 基本相同，而且，单核能越高δ电子分布半径越大。表1最后一列给出δ电子分布的 R_{max}，能量为10 MeV/u的Ar，Kr，Xe离子产生电子分布的半径约为4 μm，而20 MeV/u的3种离子产生的电子分布半径已达到10 μm。这是因为δ电子分布的 R_{max} 与离子传递给电子的最大能量成正比，而入射离子的单核能越大传递给电子的最大能量越高。

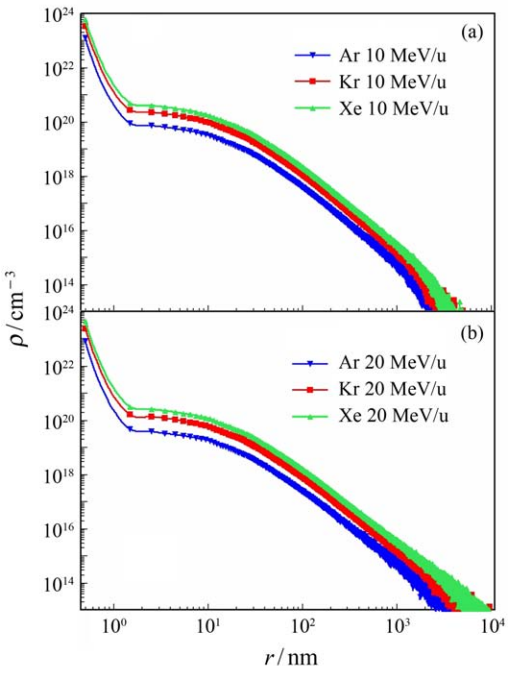

图 3　(在线彩图)不同种类和能量的离子产生的δ电子分布

(a) 10 MeV/u的3种离子产生的电子密度沿径向的变化关系；(b) 20 MeV/u的3种离子产生的电子密度沿径向的变化关系。

其次，图3显示在单核能相同的情况下，重离子原子序数越大其产生的电子密度越大。这是由于具有相同单核能的不同种类离子，原子序数越大其LET值越大(表1)，它在灵敏区内沉积的能量也越高; 离子在相同大小的分布区域内沉积能量越高产生的电子密度越大。

所以，入射离子的单核能决定了其在灵敏区内产生δ电子的范围，单核能相同时原子序数决定了分布的电子密度。

3　δ电子分布对器件多位翻转的影响

为研究δ电子分布对微电子器件多位翻转的影响，利用Geant4软件将典型的45 nm SOI SRAM抽象成具有一定有效灵敏体积的简化器件进行单粒子翻转的计算机模拟。模拟过程中器件工作在2种模式下，分别为Blanket(Bk)模式和Checkerboard(Cb)模式。在2种工作模式下器件具有相同大小的灵敏体积(0.5 μm×0.1 μm×0.05 μm)和临界电荷(0.4 fC)，但工作在Cb模式下时，器件灵敏体积之间的距离为100 nm，是Bk模式下的3倍。模拟过程不考虑电荷扩散，沉积在灵敏区内的电荷全部被收集，沉积在灵敏体积外的电荷则不被收集; 入射方式采用垂直于器件表面的背入射，不考虑金属布线层的影响。

选用能量从17 MeV～27.5 GeV，LET值从10～70 MeV·cm^2/mg变化的Xe离子。用多位翻转率 P(多位翻转个数与总翻转数的比值)来描述器件工作在2种模式下对多位翻转的敏感程度。

图4给出了器件分别工作在不同模式下 P 随Xe离子LET值的变化关系。所有数据点都取自布喇格峰的右侧。图中Cb模式下LET值为40 MeV·cm^2/mg的点的数据与文献[10]中的实验数据吻合; 相应Bk模式下的 P 值比实验测量值低，原因是本文不考虑灵敏单元间的电荷扩散，真实器件工作在Bk模式下灵敏区之间存在电荷扩散效应，对其多位翻转有一部分贡献。由图4可见，在任意LET值点，器件工作在Bk模式下的 P 值都比工作在Cb模式下高。这是因为在Bk模式下，器件各灵敏区之间的距离较小，入射离子产生的电子同时覆盖2个灵敏区并引发多位翻转的概率较大。

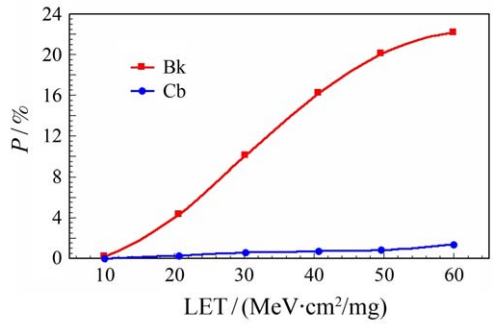

图 4　(在线彩图) 器件分别工作在Bk和Cb模式下多位翻转率随LET值的变化关系

图5是器件工作在Bk模式下时，P 随入射离子LET的变化关系。图中箭头指向点的LET值为离子能量处在布喇格峰时的LET值。圆点和方块分别为入射离子能量处于布喇格峰左侧(低能区)和右侧(高能区)时 P 随离子LET值的变化关系。图5显示，能量

http://www.npr.ac.cn

值处于布喇格峰两边的Xe离子虽然具有相同的LET值，但它们引起的P值并不相同，高能区离子能产生更多的多位翻转，这是由于它们产生了不同的δ电子分布(图2)。高能区曲线的末端还显示，随着离子LET值增加P反而降低了。

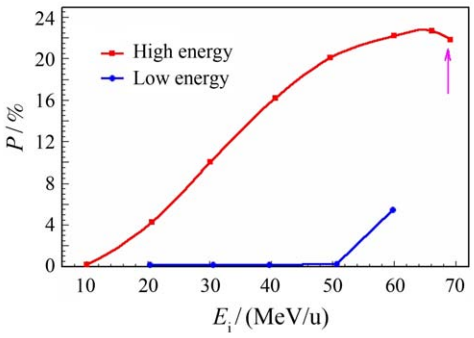

图 5　(在线彩图) 相同LET不同能量的Xe离子引起的多位翻转率

图6为图5中的数据以入射离子单核能为横坐标的分布情况，箭头指向的点为入射离子能量处在布喇格峰值点时的P值。随着入射离子能量的升高，P先上升后下降，P值最大时离子能量的大小与器件结构有关。在本文考虑的情况下，P的峰值点出现在布喇格峰偏右的位置。当器件灵敏区间距一定时，δ电子分布的半径和电子密度共同决定P值的大小。在P峰值点左侧影响器件多位翻转的因素主要为δ电子分布的半径，而右侧的影响因素主要为分布的电子密度。当入射离子能量低于1 MeV/u时，虽然δ电子密度足够大，但由于离子单核能低δ电子分布的半径很小，多数情况下不足以覆盖2个灵敏单元，故器件的P值很低。随着离子单核能增加，δ电子分布范围扩大，P相应升高。当能量升高到P峰值点右侧时，δ电子的分布范围已足够大，但此时离子的LET值随能量的升高而降低，分布的电子密度下降，器件的P值随之下降。所以在P峰值和布喇格峰之间P随入射离子LET值的升高而降低，在该区域两侧P随离子LET值的升高而升高。还可得出，用低能重离子对器件进行测试倾向于隐藏多位翻转的危害性。

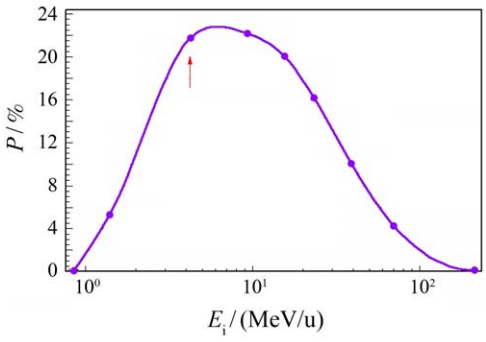

图 6　(在线彩图) 器件多位翻转率随入射Xe离子能量的变化关系

4　结论

利用Geant4软件模拟的方法得到了重离子在灵敏区内产生δ电子分布的规律并研究了其对微电子器件单粒子翻转效应的影响。结果表明，入射离子单核能越高，产生δ电子分布的径向范围越大; 单核能相同的不同种类离子原子序数越大其产生的电子密度越大。δ电子分布和器件结构共同影响单粒子翻转。器件各灵敏区间距越小多位翻转率越高，多位翻转率随入射离子能量的升高会产生一个峰值点。在该峰值点与布喇格峰之间多位翻转率随离子LET值升高而降低; 在其他区域多位翻转率随LET值的升高而升高。多位翻转峰值的位置不仅取决于器件结构，而且与入射离子产生的δ电子分布有关。该峰值代表了δ电子对器件多位翻转的最大影响。

随着微电子器件灵敏体积越来越小，重离子产生δ电子分布对单粒子效应的影响越来越显著。在以后的工作中，计划将Geant4软件模拟得到的电子分布与TCAD等微电子器件仿真软件结合，可以更精确地对纳米器件在空间环境中的单粒子效应敏感性进行预测。

参考文献:

[1] HEIDEL D F, RODBELL K P, OLDIGES P, *et al.* IEEE Trans Nuc Sci，2006，**53**(6): 3512.

[2] HANDS A, MORRIS P, RYDEN K, *et al.* IEEE Trans Nuc Sci, 2012, **59**(6): 2824.

[3] CANNON E H, GORDON M S, HEIDEL D F, *et al.* IEEE 46th Annual International Reliability Physics Symposium[C]. Phoenix: Arizona, 2008: 195.

[4] RECH P, GALLIERE J M, GIRARD R, *et al.* IEEE Trans Nuc Sci, 2012, **59** (4): 893.

[5] CLEMENS M A, SIERAWSKI B D, WARREN K M, *et al.* IEEE Trans Nuc Sci, 2011, **58**(6): 2591.

[6] CHATTERJEE I, BHUVA B L, SCHRIMPF R D, *et al.* IEEE International Reliability Physics Symposium[C].

http://www.npr.ac.cn

California: Garden Grove, 2012, **5**: 31.

[7] LIU B W, CHEN J J, CHEN S M, *et al.* Acta Phys Sin, 2012, **61**: 096102. (in Chinese)
(刘必慰, 陈建军, 陈书明, 等. 物理学报, 2012, **61**: 096102.)

[8] IBE E, CHUNG S, WEN S J, *et al.* IEEE Custom Integrated Circuits Conference[C]. California: San Jose, 2006: 437.

[9] GUO H X, LUO Y H, YAO Z B, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**: 1498. (in Chinese)
(郭红霞, 罗尹虹, 姚志斌, 等. 原子能科学技术, 2010, **44**: 1498.)

[10] HEIDEL D F, MARSHELL P W, PELLISH J A, *et al.* IEEE Trans Nuc Sci, 2009, **56**(6): 3499.

Simulation of δ-electron Effect on Single Event Upsets in SRAMs

XI Kai[1, 2], LIU Jie[1], ZHANG Zhangang[1,2], GENG Chao[1, 2], LIU Jiande[1], GU Song[1, 2], LIU Tianqi[1, 2], HOU Mingdong[1], SUN Youmei[1]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the size of the transistor sensitive volume is decreased with the technology generation, the radial distribution of δ-electrons around the ion path has become more and more important to SEE(Single Event Effects) in semiconductor devices. Because it tends to, by causing MBU(Multiple-bit Upsets), invalidate error correcting codes which allow the device to work properly even when errors occur. In this work, Geant4 toolkit was used to simulate the radial ionization profile of heavy ions with different parameters. From the simulation, the certain rules were deduced: the higher the ion energy per nucleon, the wider the radial ionization track; for an identical energy per nucleon, the heavier the ion, the higher the electron density in track core. Then by simulating SEU(Single Event Upsets) of a 45 nm static random access memory (SRAM), effects of ion track structure on its MBU were illustrated. The maximum value of the MBU probability is determined not only by the structure of the device but also by the distribution of the δ-electrons generated by the incident ion. For ion energies between the top of the curve and the Bragg Peak, the MBU probability of the device decreases with the increasing LET values. For other ion energies, the probability increases as LET increasing.

Key words: single event effect; radial ionization profile; multiple bit upset; Geant4

Received date: 24 Mar. 2013;　**Revised date:** 10 Apr. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11179003,10975164,10805062,11005134)

Corresponding author: LIU Jie, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn.

http://www.npr.ac.cn