

文章编号: 2095-4980(2015)06-0976-04

静态存储器中子单粒子翻转截面的预测模型

解 磊¹, 周婉婷²

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2.电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 中子是近地空间和核爆的主要辐射源之一, 中子二次反应诱发的单粒子效应极大地影响了电子元器件的可靠性。本文针对商用体硅工艺静态存储器(SRAM)单元提出了一种中子饱和翻转截面预测模型。通过一个电路级的仿真模型, 对应于辐射作用距离的线性电荷沉积(LET)效应可以通过基于 SPICE 仿真曲线来表现, 进而用来预测翻转截面。该方法简单有效, 预测结果与 130 nm 体硅工艺的中子实验结果吻合。

关键词: 中子; 单粒子翻转; 饱和翻转截面; 线性电荷沉积; 静态存储器

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0976

Neutron induced single event upset cross section predictive modeling for SRAM

XIE Lei¹, ZHOU Wanting²

(1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2.Reserach Institute of Electronic Science and Technology, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Neutron is the predominant radiation source in terrestrial cosmic rays and nuclear explosion. Neutron can indirectly induce single event effect by secondary reaction, which will significantly reduce the reliability of electronic components. A neutron saturated cross section prediction model is proposed for a Static Random Access Memory(SRAM) cell designed by commercial Si technology. Through a circuit-level simulation model, the radiation effects can be shown as the SPICE-simulated curves of Linear Energy Transfer(LET) versus the corresponding affected distances, which are used for upset cross section prediction. The proposed method is simple and effective. Its calculated results are in good agreement with experimentally measured results reported for SRAM fabricated in 130 nm bulk silicon process.

Key words: neutron; single event upset; saturated cross section; Linear Energy Transfer; Static Random Access Memory

中子是空间环境和核爆中主要的辐照源之一, 虽然中子入射硅材料无法直接沉积电荷, 但是中子会与硅发生核反应, 从而产生二次带电粒子, 这些粒子在经过的路径上再沉积电荷, 从而诱发单粒子效应(Single Event Effect, SEE), 150 MeV 中子产生的反冲重离子(氮到硅)的 LET 为 $1.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}\sim 14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ [1-3]。在深亚微米工艺下, 由于工作电压的降低、器件节点关键电荷的减小, 传统存储器单元的 6T 单元结构对于中子引入的单粒子翻转非常敏感。这种敏感性可以通过单粒子翻转截面来表征, 而单粒子翻转截面一般通过不同能量的中子试验来获得。随着能量的增大, 翻转截面增大到一定程度时不再增加, 当中子能量达到 150 MeV 左右, 这时的截面达到饱和翻转截面(saturated cross section)。

针对超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)中中子引入的单粒子现象, 许多学者已经做了大量的研究工作。本文提出了一种基于器件物理的中子引入的单粒子翻转截面的预测模型, 该模型通过器件物理来模拟辐照效应, 利用版图和工艺参数来预测中子引入的单粒子饱和翻转截面。在该模型的预测中采用标准 SPICE 程序预测重离子 $LET=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时的翻转截面, 然后利用重离子 $LET=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时的翻转截面进行中子引入的单粒子饱和翻转截面的预测。该方法简单高效, 测试实例表明在 130 nm 体硅工艺下, 预测的中子引入的单粒子饱和翻转截面和实际测试的饱和翻转截面一致。该模型对于快速预测环境中中子对于

收稿日期: 2014-09-01; 修回日期: 2014-12-08

集成电路的器件的影响具有非常重要的意义。

1 单粒子效应模拟

当宇宙射线穿透硅材料会产生大量空穴电子对(Electron-Hole Pairs, EHPs), 如果这些 EHPs 在晶体管的漏极附近, 则会通过漂移和扩散运动被漏极收集。传统电路级仿真只考虑了反向 PN 结的收集电荷, 而带电粒子的注入是遍及整个电路的, 相同能量的粒子于不同位置注入对于敏感节点的影响是不一样的。在以前的研究^[4]中, 从器件物理出发考虑了注入点到反向 PN 结的注入距离对于电流的影响, 推导出了一维电流注入模型。然而, 随着特征尺寸减小, 带电粒子入射进入硅材料时, 沉积电荷会被多个敏感点收集引起电荷共享。本文中考虑了在小尺寸工艺下电荷共享对于电荷收集的影响, 进一步完善得到基于距离的一维电流注入模型。

1.1 基于距离的一维电流模型

为了模拟辐射对于电路的影响, 目前通用方法是采用双指数电流源作为单粒子等效模型, 如下式所示:

$$I = \frac{Q}{\tau_\alpha - \tau_\beta} (e^{-t/\tau_\alpha} - e^{-t/\tau_\beta}) \quad (1)$$

式中: Q 是敏感点收集电荷; τ_α 和 τ_β 分别是下降时间和上升时间。

研究表明^[5], 带电粒子的注入点与反向 PN 结之间的距离对于反向结的注入电流有很大的影响, 在前文的研究中引入距离对于电流模型的影响, 则双指数模型^[4]进而表示为:

$$I_{n,p} = \frac{9Q}{8\tau_\alpha} (e^{-t/\tau_\alpha} - e^{-9t/\tau_\alpha}) \quad (2)$$

τ_α 由注入距离和工艺本身决定:

$$\tau_\alpha = \frac{4d_s^2}{\pi^2 D_{n,p}} \quad (3)$$

式中: $D_{n,p}$ 分别是 PMOS 和 NMOS 中的少数载流子扩散率, 对于 130 nm 工艺 $D_n=12 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p=3 \text{ cm}^2/\text{s}$; d_s 是带电粒子击中位置到反向 PN 结距离, 单位为 μm 。在式(2)中的收集电荷 Q , 通常用 LET (单位: $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$) 和电荷收集深度 l (单位 μm) 的乘积表示:

$$Q = 10 \times LET \times l \quad (4)$$

对于 130 nm 工艺, 文献[6-7]研究表明有效收集深度 l 为 $1 \mu\text{m}$, 式(4)可以简化为:

$$Q = 10 \times LET \quad (5)$$

研究表明^[8], 对于 PMOS, 电荷共享的机理是双极效应(bipolar effect); 而 NMOS 电荷共享的主要机理是电荷扩散。由于电荷扩散相对慢且影响较小, 这里只考虑双极放大对于电流的影响, 式(2)中引入双极放大参数 $\beta_{n,p}$ 则可以表达为:

$$I_{n,p} = \frac{9\beta_{n,p}Q}{8\tau_\alpha} (e^{-t/\tau_\alpha} - e^{-9t/\tau_\alpha}) \quad (6)$$

通过文献[9-10]中 3D TCAD 仿真结果, 在 130 nm NMOS 双极效应不严重时选取系数 $\beta_p=1$, 而 PMOS 选取 $\beta_n=2$ 。

1.2 静态存储器结构和等效单粒子模型

静态随机存储器(SRAM)是集成电路中使用率最高的存储器件, 在各种结构中, 六管存储结构是目前最常用的 SRAM 结构, 其结构如图 1 所示。它采用 6 个晶体管(T1,T2,T3,T4,T5 和 T6), 其中 T1~T4 构成 2 个对称的反相器用以保持状态, T5 和 T6 是传输管。因为 T1 和 T4、T3 和 T2 均为对称结构, 在任一时刻均只有 1 个 NMOS 管和 PMOS 管处于关闭状态。不失一般性, 这里选取 T1 和 T4 作为敏感管进行分析。当 T1,T4 处于关闭状态, 存在一个反向 PN 结, 即是关闭 MOS 管的敏感区。如果有一个高能粒子入射到该区域, 并且沉淀足够多的电荷, 则 SRAM 会从状态 1

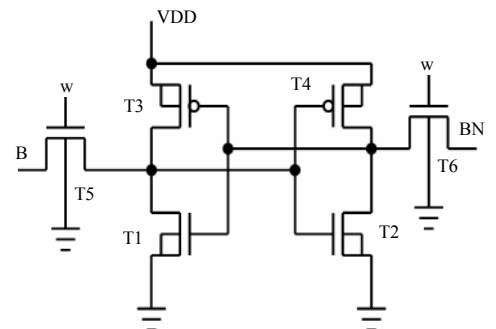


Fig.1 Circuit diagram of a 6T SRAM cell
图 1 6 管 SRAM 电路图

跳变到状态 0，即发生单粒子翻转。

分析如图 1 所示的 6 管锁存单元的 SEU 敏感性时，式(6)用来模拟反向 PN 结处的注入电流。对于图 1 中的 T1 使用 I_p 模拟的电流，T4 使用 I_n 模拟的电流。通过 SPICE 仿真，可以获得不同 LET 所能影响最大的影响距离 d_s ，如图 2 所示，NMOS 的阈值为 $2 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 。

LET 与 d_s 将被用来预测中子引入的单粒子饱和和翻转截面的预测。在获得 SRAM 的翻转阈值后，可以通过之前的重离子引入的翻转截面预测模型^[4,11]得到预测结果。从图 3 可知，预测结果与激光的测试结果基本一致。预测出的重离子 $\text{LET}=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时的翻转截面将作为器件的“敏感区”底面积被用来预测中子引入的单粒子饱和和翻转截面的预测。

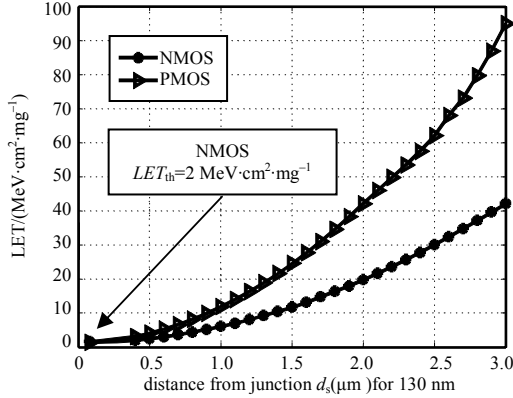


Fig.2 SPICE-simulated curves of LET vs the affected distances for NMOS and PMOS fabricated in 130 nm process

图 2 130 nm 工艺下 NMOS 和 PMOS 的电路仿真 LET 与影响距离关系

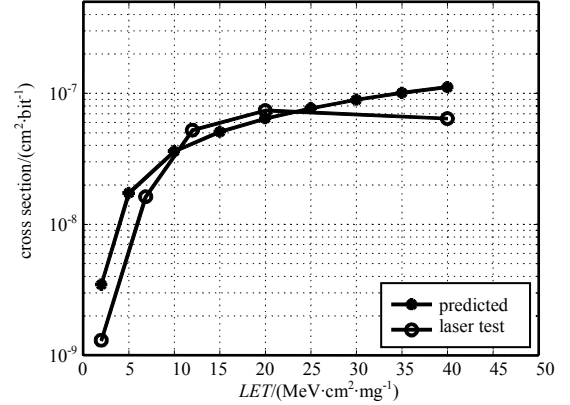


Fig.3 Cross section prediction for 130 nm technology node
图 3 130 nm 翻转截面预测结果

1.3 中子引入的单粒子饱和和翻转截面预测模型

研究显示，中子与质子在反应原理相差不大^[11]，这里引入文献之前对质子的翻转截面预测模型^[12]并针对中子做以下合理假设：

- 1) 150 MeV 中子在硅中的反应截面大约为 $\sigma = 0.4 \text{ barn}$ ；
- 2) 二次粒子在硅或者二氧化硅中穿行距离 R_2 为 $10 \mu\text{m}$ ；
- 3) 二次粒子将在钝化层中穿行距离 R_1 为 $5 \mu\text{m}$ ；
- 4) 反冲重离子具有等方向、等角度分布；
- 5) 如果二次粒子击中存储器单元的“敏感区”，将会发生翻转。

直接预测中子引入的单粒子饱和和翻转截面的方法是计算中子与硅反应产生的反冲重离子击中存储器单元的“敏感区”并发生翻转时所有翻转截面的总和，因此有：

$$\sigma_n = p \times V_n \times N \times \sigma \quad (7)$$

式中： p 为中子与硅产生的二次重离子击中“敏感区”的概率； V_n 为重离子产生并能击中“敏感区”的区域； N 为硅的浓度； σ 为中子与硅的反应截面。在本文中 V_n 包括 4 部分： V_{direct} , $V_{\text{indirect},1}$, $V_{\text{indirect},2}$, $V_{\text{indirect},3}$ ，如图 4 所示，计算化简后有^[11-12]：

$$\sigma_n = \sigma_{\text{direct}} + \sigma_{\text{indirect},1} + \sigma_{\text{indirect},2} + \sigma_{\text{indirect},3} \approx \pi a^2 N_1 \sigma d_s + a N_1 \sigma d_s^2 \ln\left(\frac{R_1}{a}\right) + \frac{\pi a^2}{2} N_2 \times \sigma \times (R_1 + R_2 - 2a) \quad (8)$$

式中： πa^2 为预测的 $\text{LET}=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时重离子的翻转截面； N_1 为硅的浓度 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ； N_2 等效为钝化层硅的浓度 $2.3 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ； d_s 为源区的厚度，这里选取 $0.1 \mu\text{m}$ ； σ 为中子与硅的反应截面。

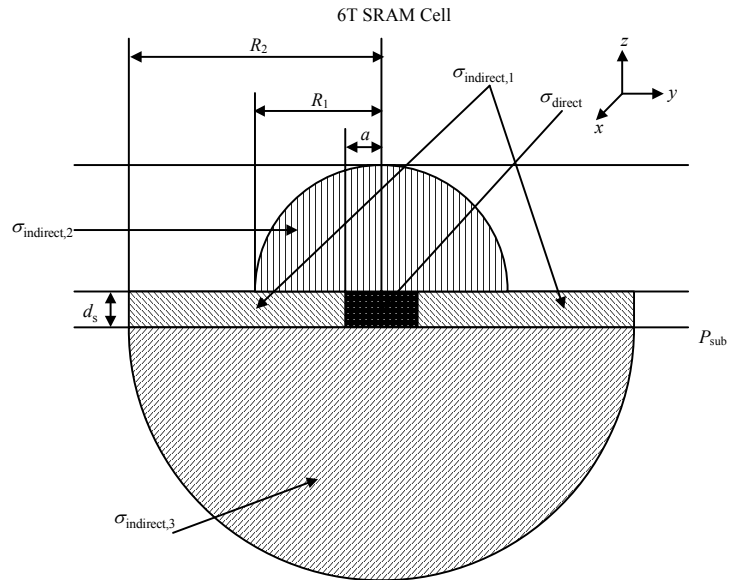


Fig.4 Modeling for proton induced single event upset cross section prediction
图 4 中子引入的翻转截面的模型图

由图 3 知, 130 nm 体硅 SRAM 单元重离子 $LET=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时预测的翻转截面为 $5\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 即 $\pi a^2 \approx 5\times 10^{-8} \text{ cm}^2$ 。由式(7)计算得中子引入的单粒子饱和翻转截面 $\sigma_n \approx 8.2\times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。预测结果与中子试验测试结果 $1\times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}^{[12]}$ 差距不大。

2 结论

本文提出了一种针对体硅工艺下 6T SRAM 中子引入的单粒子饱和翻转截面的预测模型。该模型首先计算出 $LET=14 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 时的重离子翻转截面, 将其作为器件的敏感区底面积, 继而针对中子与硅的反应特性提出了中子引入的单粒子饱和截面预测模型。该模型简单高效, 在 130 nm 体硅工艺下, 预测的中子引入的单粒子饱和翻转截面和中子实验数据差距不大, 从而证明了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] Ziegler J F. Handbook of Stopping Cross-sections for Energetic Ions in All Elements[M]. New York:Pergamon, 1980.
- [2] Vial C,Palau J M,Gasiot J,et al. A new approach for the prediction of the neutron-induced SEU rate[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998,45(6):2915–2920.
- [3] Truscott P,Dyer C,Frydland A,et al. Neutron energy-deposition spectra measurements, and comparisons with GEANT4 predictions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(4):1883–1889.
- [4] LI Lei,ZHOU Wanting,LIU Huihua. A physics-based engineering approach to predict the cross section for advanced SRAMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012,59(6):3265–3271.
- [5] Kauppila J S,Haefner T D,Ball D R,et al. Circuit-level layout-aware single-event sensitive-area analysis of 40-nm bulk CMOS flip-flops using compact modeling[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011,58(6):2680–2686.
- [6] Amusan O A,Witulski,Massengill A F,et al. Charge collection and charge sharing in a 130 nm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3253–3258.
- [7] Tipton A D,Pellish J A,Reed R A,et al. Multiple-bit upset in 130 nm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3259–3264.
- [8] Warren K M. Sensitive volume models for single event upset analysis and rate prediction for space, atmospheric, and terrestrial radiation environments[D]. Nashville,Tennessee,USA:Vanderbilt University, 2010.
- [9] ZHOU Wanting,HU Jianhao,LI Lei. Prediction of low-LET ion induced single event upset cross sections for advanced SRAM[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2013,50(10):979–987.
- [10] 杨海亮,李国政,姜景和,等. 质子和中子的单粒子效应等效性实验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2002,22(2):158–116. (YANG Hailiang,LI Guozheng,JIANG Jinghe,et al. Experimental studies on equivalency of single event effect induced by protons and neutrons[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002,22(2):158–116.)
- [11] LI Lei,ZHOU Wanting,LIU Huihua. Proton induced single event upset cross section prediction for 0.15 μm six-transistor silicon-on-insulator static random access memories[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2012,49(4):450–456.
- [12] Lambert D,Desnoyers F,Thouvenot D. Investigation of neutron and proton SEU cross-sections on SRAMs between a few MeV and 50 MeV[C]// IEEE Radiation Effects Data Workshop. Bruges:IEEE, 2009:148–154.

作者简介:



解 磊(1977–), 男, 江苏省徐州市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为抗辐射集成电路设计.email:xielei0510@sina.com.

周婉婷(1982–), 女, 四川省雅安市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为单粒子效应分析.