

静态随机存储器单粒子翻转效应三维数值模拟

张科营[†] 郭红霞 罗尹虹 何宝平 姚志斌 张凤祁 王园明

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2009 年 1 月 5 日收到, 2009 年 4 月 18 日收到修改稿)

针对特征尺寸为 $1.5 \mu\text{m}$ 的国产静态随机存储器 (SRAM), 构建了三维 SRAM 存储单元模型, 并对重离子引起的 SRAM 单粒子翻转效应进行了数值模拟. 计算并分析了单粒子引起的单粒子翻转和电荷收集的物理图像, 得到了 SRAM 器件的单粒子翻转截面曲线. 单粒子翻转的数值模拟结果与重离子微束、重离子宽束实验结果比较一致, 表明所建立的三维器件模型可以用来研究 SRAM 器件的单粒子翻转效应.

关键词: 三维数值模拟, 单粒子翻转, 微束, 宽束

PACC: 8750G, 7340Q

1. 引言

随着半导体工艺向深亚微米、超深亚微米方向发展, 电子元器件的单粒子效应更加严重. 国内用于单粒子效应研究和抗单粒子能力考核的重离子加速器主要是中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器, 该重离子加速器线性能量传输 (LET) 值范围有待扩展, 不能很好保证用户的束流. 单粒子效应的三维数值模拟可以有效地弥补我国重离子加速器的不足, 国外已经通过三维数值模拟计算了静态随存储器 (SRAM) 器件单粒子翻转截面^[1], 这表明 SRAM 单粒子翻转效应的三维数值模拟可以在一定程度上弥补国内重离子加速器单粒子模拟实验的不足.

本文建立了国产 SRAM 的三维器件模型, 计算得到了单粒子翻转截面曲线. 通过 SRAM 单粒子翻转效应数值模拟, 掌握了 SRAM 三维存储单元建模的关键技术, 建立了理论与实验相结合的单粒子翻转性能评估方法.

2. 数值模拟技术

2.1. 器件工艺

本文中实验和模拟的对象为中国电子科技集团公司第四十七研究所研制的 2 kbit SRAM, 该器件采

用 $1.5 \mu\text{m}$ 硅栅互补型金属氧化物半导体 (CMOS) 加固工艺设计, 采用双层金属布线, 其芯片尺寸为 $6.350 \text{ mm} \times 6.440 \text{ mm}$. 图 1 是 2 kbit SRAM 存储单元示意图. 该 SRAM 的电源电压为 4.8 V , 采用双阱工艺, n 型外延层厚度为 $4 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$, n 阱和 p 阱的掺杂浓度分别为 $1.7 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, $1.1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, n 沟道和 p 沟道金属氧化物半导体 (MOS) 晶体管的栅氧层厚度分别为 24 和 20 nm .

西北核技术研究所针对该器件进行了单粒子微束^[2]和宽束实验, 得到该器件单粒子翻转的物理图像、单粒子翻转截面曲线, 如图 2 所示.

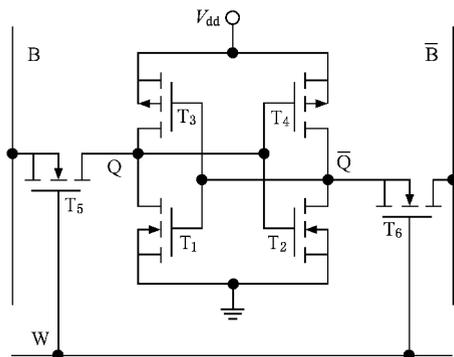


图 1 SRAM 单元电路

2.2. 数值模拟方法

建立 SRAM 单元完整的三维器件模型是准确研究 SRAM 单粒子翻转效应的重要手段^[3], 但是由于

[†] E-mail: keyingzhang2006@yahoo.cn

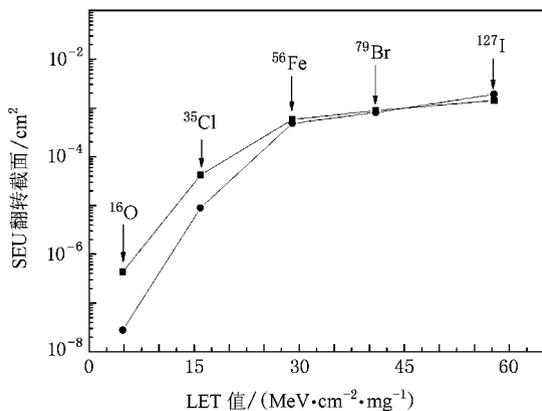


图2 实验得到的 2 kbit SRAM 翻转截面曲线

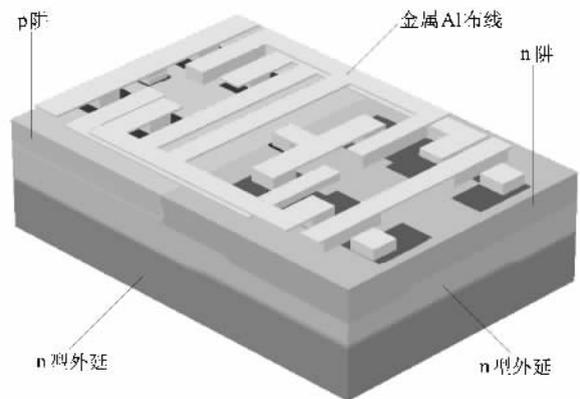


图4 SRAM 单元三维模型

数值算法和计算机工作速度的限制,利用 SRAM 单元的三维器件模型来研究单粒子翻转现象是非常困难的.

三维器件-电路混合模拟可以用来判断单粒子翻转 LET 阈值.在这些仿真计算中首先要根据经验判断出最敏感的区域(通常为 MOS 晶体管的反偏漏区)采用该方法计算出的 LET 阈值也能与实验结果较好地符合^[4].但是这种混合模拟无法模拟不同注入位置的单粒子翻转效应,只有采用全三维的数值模拟才能够模拟器件的灵敏区域的面积,并进而得到器件的单粒子翻转截面.本文采用计算机辅助设计技术(TCAD)构建了三维六管 SRAM 单元,图 3 是 2 kbit SRAM 单元的版图,外围的细线表示存储单元有源区的边界.该六管 SRAM 单元采用 n 型外延,在本存储单元中下拉 nMOS 和传输 nMOS 晶体管共用一个漏区. SRAM 的存储阵列就是由这样的单元并列组合而成的.

图 4 是利用 TACD 中的半导体工艺模拟工具生

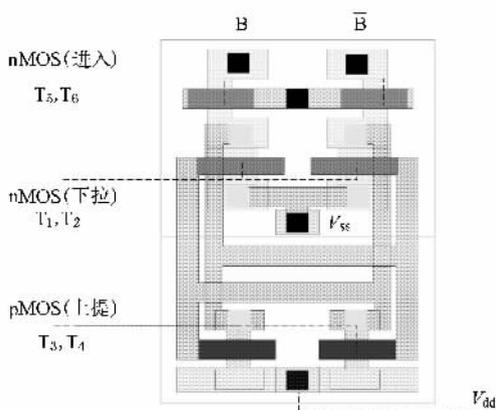


图3 2 kbit SRAM 存储单元的版图

成的六管三维 SRAM 单元,存储单元的面积为 $25 \mu\text{m} \times 37 \mu\text{m}$, SRAM 三维单元是按照图 2 所示的版图采用器件实际工艺参数生成的.在对 SRAM 的单粒子翻转进行计算时,载流子浓度采用 Fermi 分布,载流子浓度物理模型考虑了高掺杂半导体的禁带变窄^[5],非平衡载流子产生-复合物理模型考虑了载流子浓度对寿命影响的 Shockley 间接复合、辐射复合、俄歇复合,载流子迁移率物理模型考虑了电离杂质散射、表面散射、载流子之间散射.模拟的基本过程如下:首先不考虑产生、复合项,求得稳态解.然后在稳态解的基础上考虑单粒子注入影响,即模拟计算中加入产生、复合项,求得瞬态解,得到粒子注入后产生的电流脉冲及电压随时间的变化过程.

本文采用三维模拟计算出某一粒子注入下 SRAM 单元单粒子翻转灵敏区域的物理图像,改变注入粒子的 LET 并重复以上过程,就可以得到单元灵敏区域的面积随粒子 LET 变化的曲线,即该 SRAM 的单粒子翻转截面曲线.

3. 单粒子翻转物理图像

单粒子翻转物理图像是指受重离子撞击后引起 SRAM 存储单元发生翻转的区域,即单粒子翻转的灵敏区域.研究单粒子翻转的物理图像可以得出器件的布线、尺寸、材料和工艺等参数与重离子产生的单粒子翻转的定量关系,从而为制备抗单粒子辐射能力强的集成电路提供重要的“逐点”信息^[6].

图 5 显示的是不同 LET 值的粒子注入下的单粒子翻转区域.对于 LET 值为 $5 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ nMOS 反偏漏结的中心是 SRAM 单元内单粒子翻转的灵敏区域.随着 LET 值的增加,单粒子翻转灵敏区域的面积

积逐渐增大.在 LET 值达到 $10 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ 时 pMOS 的反偏漏结也成为单粒子翻转的灵敏区域.

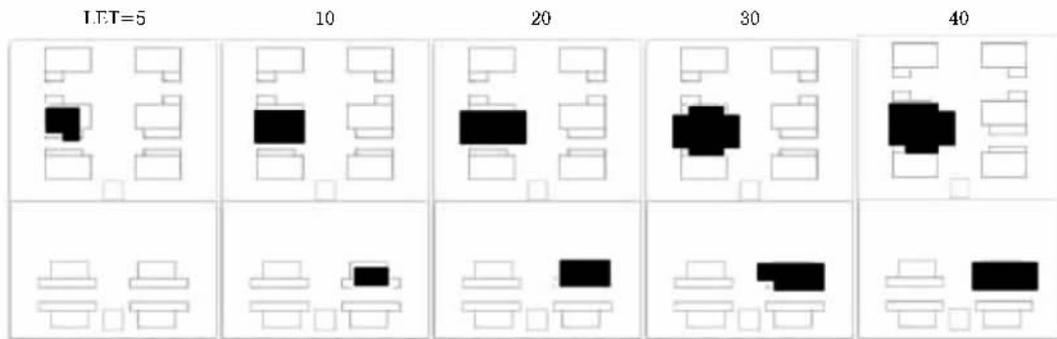


图 5 不同 LET 值(单位: $\text{MeV cm}^2/\text{mg}$)的重离子注入下的单粒子翻转灵敏区域

重离子微束实验选用 Br 离子作为入射粒子, Br 离子能量 145 MeV , 其 LET 值为 $41 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$, 这个能量的 Br 离子引起的单粒子翻转截面接近饱和(如图 2 所示), 选用它作为入射粒子, 可以保证粒子对器件不同敏感区域的入射都能够诱发单粒子翻转事件. SRAM 重离子微束试验得到单元翻转截面, 如图 6 所示.

仿真结果和实验结果一致表明:截止 nMOS 和 pMOS 的漏区是单粒子翻转的灵敏区域, 这是因为截止管的漏区存在反偏 p-n 结, 空间电荷区的强电场使得等离子体的电子空穴对迅速分离, 在漏极产生了脉冲电流, 改变了器件逻辑状态. nMOS 和 pMOS 的反偏漏区对单粒子翻转的敏感程度不同, 截止 nMOS 漏区是单粒子翻转最敏感的区域, 这是因为电子的迁移率要远大于空穴, nMOS 漏极的负向脉冲电流要大于 pMOS 漏极的正向脉冲电流. nMOS 单粒子翻转敏感区的面积比漏区本身要大, 这是由于敏感反偏结附近碰撞产生的电荷扩散也被反偏漏结收集.

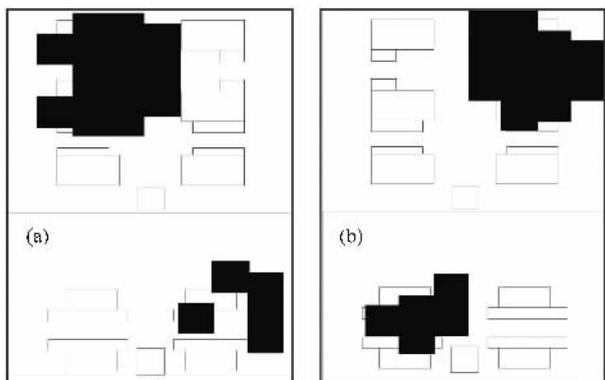


图 6 重离子加速器实验得到 SRAM 存储单元翻转截面 (a) $0 \rightarrow 0$ 的翻转截面 (b) $0 \rightarrow 1$ 的翻转截面

4. 电荷收集物理图像

电荷收集物理图像是指遭受重离子撞击后引起器件功耗电流明显增大的区域, 即电荷收集灵敏区域. 单粒子翻转物理图像直接得到器件遭受重离子撞击后易发生单粒子翻转的敏感区域, 但无法获取引起翻转的潜在电荷收集过程的相关信息, 通过分析电荷收集灵敏区域可以获得电荷收集与撞击位置的相关性. 结合电荷收集物理图像与单粒子翻转物理图像, 可以深入分析对单粒子效应敏感的区域及其损伤机理^[7].

将 LET 值为 $60 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ 的粒子注入到图 7 所示的位置, 对电源 V_{DD} 端的脉冲电流进行积分可以

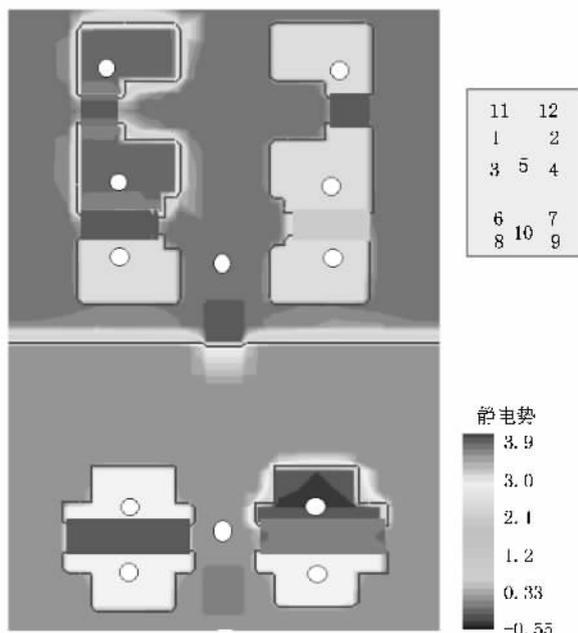


图 7 电荷收集模拟中的注入位置

得到不同注入位置下的电荷收集总量,如表 1 所列。
在这 12 个注入位置中,仅有位置 1,7 两个位置

引起了 SRAM 单元的翻转,但是却有 8 个位置引起的 V_{DD} 电荷收集量在 10^{-13} C 量级内。

表 1 不同注入位置下 V_{SS} 或 V_{DD} 电荷收集及翻转情况

注入位置	名称	偏置状况/V	收集电荷量/C	是否引起翻转
1	T1, T5 晶体管漏结	4.8	7.69×10^{-13}	是
2	T2, T6 晶体管漏结	0.0	4.64×10^{-13}	否
3	T1 晶体管源结	0.0	3.03×10^{-13}	否
4	T2 晶体管源结	0.0	4.10×10^{-13}	否
5	p 阱	0.0	1.04×10^{-13}	否
6	T3 晶体管漏结	4.8	1.38×10^{-15}	否
7	T4 晶体管漏结	0.0	1.32×10^{-13}	是
8	T3 晶体管源结	4.8	3.89×10^{-15}	否
9	T4 晶体管源结	4.8	1.12×10^{-14}	否
10	n 阱	4.8	1.76×10^{-14}	否
11	T5 晶体管源结	4.8	1.62×10^{-13}	否
12	T6 晶体管源结	0.0	7.98×10^{-14}	否

注入位置 1 为截止 nMOS 晶体管的漏区,当粒子注入到这个位置时 n^+ 漏区与 p 阱组成的反偏 p-n 会引起电荷收集,发生单粒子翻转。当粒子注入到位置 2 时,漏区与 n 阱的电位不完全一致,会引起一定量的电荷收集,但是这种电荷收集会使得该漏区电位进一步降低,不会引起 SRAM 单元翻转。位置 3,4 为 nMOS 源区,粒子注入到这两个位置时,源区与 V_{SS} 电压短路,不会引起单元逻辑翻转。当粒子注入到位置 5 时,阱-外延-衬底的结构存在反偏 p-n 结,粒子注入会引起电荷收集,但不会引起单粒子翻转。位置 6 为导通 pMOS 晶体管的漏区,当粒子注入到这个位置时会引起一定量的电荷收集,但是这种电荷收集会使得该漏区电位进一步降低,不会引起 SRAM 单元翻转。位置 7 为截止 pMOS 晶体管的漏区,当粒子注入到这个位置时 p^+ 漏区和 n 阱组成的反偏 p-n 结会引起电荷收集,发生单粒子翻转。位置 8 和 9 为 SRAM 单元内 pMOS 晶体管的源区,当粒子注入到这两个位置时不会引起电荷大量收集,不会引起单粒子翻转。当粒子注入到位置 10 时,不存在反偏的 p-n 结,不会引起电荷收集成像和单粒子翻转。由于存在反偏 p-n 结,粒子注入到位置 11 会引起一定量的电荷收集,但是不会产生单粒子翻转。位

置 12 的粒子不会对单粒子翻转产生贡献。

5. 翻转截面曲线

翻转截面曲线是指器件的单粒子翻转截面 σ 随 LET 变化的曲线,它用来表征器件抗单粒子翻转能力^[8],同时单粒子翻转截面曲线是采用 Monte Carlo 类方法预估轨道翻转截面的重要输入参数^[9],因此器件的翻转截面曲线是评估器件抗单粒子翻转性能的重要依据。

三维数值模拟可以直接计算重离子引起的翻转

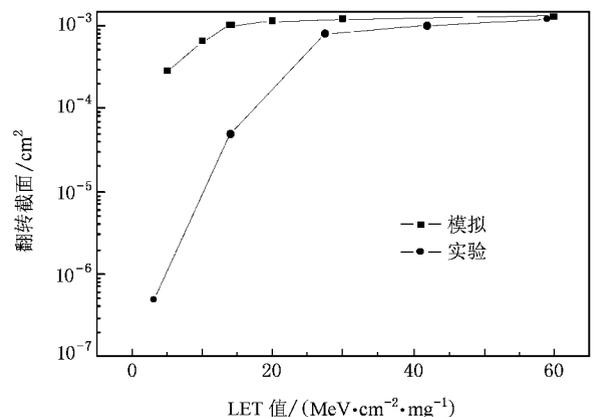


图 8 实验和数值计算得到的 2 kbit SRAM 翻转截面曲线

截面. 翻转截面的物理含义是指单粒子翻转灵敏区域的面积, 因此将翻转灵敏区域的面积乘以存储单元的个数就可以得到该 LET 值粒子注入下 SRAM 器件的翻转截面.

翻转截面曲线一般是通过重离子宽束实验而获得的. 利用 HI-13 串列加速器宽束开展了对 2 kbit SRAM 的单粒子效应试验, 共选用了 5 种不同能量、不同 LET 值的重离子, 获得了器件的单粒子翻转截面与 LET 值之间的关系曲线, 如图 2 所示. 图 8 是数值计算得到的 2 kbit SRAM 翻转截面曲线.

从图 8 可以看出, 在 SRAM 的翻转截面饱和区域(LET 值大于 $30 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$), 重离子加速器试验结果与数值计算结果比较一致, 两种翻转截面的差异小于 20%. 这就表明通过三维数值计算在一定程度上可以弥补实验的不足, 可以准确计算高 LET 值的重离子引起的翻转截面. 对于 LET 值较小的粒子, 实验和仿真结果相差较大, 国外文献也存在这样的问题. 采用数值模拟方法不适用于用来评估低能重离子引起的单粒子翻转效应, 具体的原因有待进一步研究.

6. 结 论

本文利用三维数值模拟计算并分析了国产 2 kbit SRAM 器件的单粒子翻转与电荷收集的物理图像, 将计算结果与实验结果对比, 表明了采用三维数值模拟可以准确模拟 SRAM 器件的单粒子翻转效应. 计算了 2 kbit SRAM 器件的翻转截面曲线, 在高 LET 阈值区域数值计算可以得到准确的翻转截面, 弥补了重离子加速器单粒子翻转实验的不足, 初步建立了模拟实验与数值计算相结合的存储器抗单粒子翻转性能的评估方法.

目前集成电路工艺已经深入到了超深亚微米. 相对于大尺寸器件, 超深亚微米器件的电源电压、节点电容减小, 超深亚微米 CMOS SRAM 单粒子翻转效应的灵敏度增加^[10]. 超深亚微米器件三维数值模拟不仅可以评估超深亚微米器件的单粒子效应, 可以研究复杂工艺下半导体器件的单粒子效应敏感区域和敏感路径, 为宇航级集成电路的设计和制造提供理论支持.

- [1] Dodd P E, Shaneyfelt M R, Horn K M, Walsh D S, Hash G L, Hill T A, Draper B L, Schwank J R, Sexton F W, Winokur P S 2001 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **48** 1893
- [2] Sexton F W, Corbett W T, Treece R K, Hass K J, Hughes K L, Axness C L, Hash G L, Shaneyfelt M R, Wunsch T F 1991 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **43** 1521
- [3] Roche P, Palau J M, Belhaddad K, Bruguier G, Ecoffet R, Gasiot J 1998 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **45** 2534
- [4] Detcherry C, Dachs C, Lorfevre E, Sudre C, Bruguier G, Gasiot J, Palau J M, Ecoffet R 1997 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **44** 2266
- [5] Woodruff R L, Rudeck P J 1993 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **40** 1795
- [6] Metzger S, Dreute J, Heinrich W, Rocher H 1994 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **41** 589
- [7] Sexton F W, Horn K M, Doyle B L, Laird J S, Cholewa M, Saint A, Legge G J F 1993 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **40** 1787
- [8] Zhang Q X, Hou M D, Liu J, Jin Y F, Zhu Z Y, Sun Y M 2004 *Acta Phys. Sin.* **43** 566 (in Chinese) [张庆祥、侯明东、刘杰、金运范、朱智勇、孙友梅 2004 *物理学报* **43** 566]
- [9] Warren K M, Weller R A, Sierawski B D, Reed R A, Mendenhall M H, Schrimpf R D, Massengill L W, Porter M E, Wilkinson J D, Label K A, Adams J H 2007 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **54** 898
- [10] Amusan O A, Witulski A F, Massengill L W, Bhuvu B L, Fleming P R, Alles Michael L, Sternberg A L, Black J D, Schrimpf R D 2006 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **53** 3253

Three-dimensional numerical simulation of single event upset effects in static random access memory

Zhang Ke-Ying[†] Guo Hong-Xia Luo Yin-Hong He Bao-Ping Yao Zhi-Bin Zhang Feng-Qi Wang Yuan-Ming

(*Northwest Institution of Nuclear Technology ,Xi'an 710024 ,China*)

(Received 5 January 2009 ; revised manuscript received 18 April 2009)

Abstract

Three-Dimensional model of static random access memory (SRAM) six-transistor cell is generated by three dimensional process simulator FLOOPS , and device simulator DESSIS is used to simulate the single-event upset effect in SRAM. Single-event upset and charge collecting maps are calculated directly from 3-D simulations. Single event upset maps and cross-section curves obtained from numerical simulation show excellent agreement with broad beam cross section curves and micro-beam upset images for 2 kbit hardened SRAM. It indicates that the three-dimensional model could be used to research the single event upsets in SRAM.

Keywords : three-dimensional numerical simulation , single event upset , micro-beam , broad beam

PACC : 8750G , 7340Q

[†] E-mail : keyingzhang2006@yahoo.cn