

文章编号: 1672-2892(2011)06-0774-04

SOI CMOS SRAM 单元单粒子翻转效应的模拟

李振涛¹, 于芳^{1,2}, 刘忠立^{1,2}, 赵凯^{1,2}, 高见头^{1,2}, 杨波^{1,2}, 李宁^{1,2}

(1.中国科学院 半导体研究所, 北京 100083; 2.传感器技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为简单快速模拟静态随机存储器(SRAM)的单粒子效应, 在二维器件数值模拟的基础上, 以经典的双指数模型为原型, 通过数值拟合得到了单粒子效应瞬态电流脉冲的表达式, 考虑晶体管偏压对瞬态电流的影响, 得到修正的瞬态电流表达式, 将其带入电路模拟软件 HSPICE 中进行 SRAM 存储单元单粒子翻转效应的电路模拟, 通过与实际单粒子实验结果的对比, 验证了这种模拟方法的实用性。

关键词: 单粒子翻转; 双指数模型; 器件模拟; 部分耗尽绝缘体上硅; 静态随机存储器
中图分类号: TN386; TP333.8 **文献标识码:** A

Circuit simulation of SEU for SOI CMOS SRAM cells

LI Zhen-tao¹, YU Fang^{1,2}, LIU Zhong-li^{1,2}, ZHAO Kai^{1,2}, GAO Jian-tou^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, LI Ning^{1,2}

(1.Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory of Transducer Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: For the purpose of simulating the Single Event Upset(SEU) of a Static Random Access Memory(SRAM) cell fast and simply, a classical double exponential expression of a transient current pulse in a single event effect is confirmed by numerical optimization of results from 2-D device numerical simulation. An amended equation that gives the relationship between transistor bias voltage and transient current is derived by theoretical analysis. This equation can be used to simulate the SEU of a SRAM cell in the circuit simulation tool HSPICE. Finally, the practicability of this method is verified by the comparison with the result of SEU experiment.

Key words: Single Event Upset; double exponential model; circuit simulation; partially depleted Silicon On Insulator; Static Random Access Memory

静态随机存储器(SRAM)是航天器电子系统中的关键元器件, 也是对单粒子事件敏感的主要器件之一。使用SOI(Silicon On Insulator)工艺的SRAM相比传统体硅SRAM具有更好的抗SEU能力。但是采用“设计—制造—实验”的过程验证芯片产品代价昂贵, 而且1次反复的设计周期很长, 因此针对电路辐射效应的计算机模拟分析技术得到了越来越广泛的重视^[1]。当前国内外普遍使用的是半导体器件的数值模拟方法, 但对于规模稍大的电路, 建模及数值求解往往会花费大量的时间, 而且所得结果常常不收敛。在集成电路的设计过程中, 使用SPICE(Simulation program with integrated circuit emphasis)软件进行电路行为级的仿真可以很快得到电路的各种信息, 因而成为工业和科研中进行集成电路设计的重要工具^[2]。本文采用器件的二维数值模拟, 得到器件对单粒子效应的响应, 利用双指数瞬态电流脉冲模型将单粒子引起的电流脉冲代入电路模拟软件, 得到电路级的单粒子效应响应, 同时满足精确度和时间消耗上的要求。通过与实际芯片辐照实验的结果对比, 验证了一种能够模拟大规模电路单粒子效应的方法。

1 理论模型

高能粒子射入MOS(Metal Oxide Semiconductor)晶体管的沟道区, 电离产生大量的电子—空穴对, 在外加电场作用下进行漂移运动, 导致电子和空穴分别被漏极和源极收集, 产生瞬时电流脉冲, 使器件产生软错误。由于漏斗区内电子—空穴对的漂移对器件单粒子翻转的贡献很小, 因此只分析电子空穴对在空间电荷区的漂移过程^[3]。

经过一定的简化和近似, 可以得到电流脉冲的解析模型^[4]:

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: I_0 为脉冲的峰值电流; $1/\alpha$ 为电荷收集的时间常数; $1/\beta$ 为初始化建立粒子轨迹的时间常数。

在一个CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)反向器中, 当输出为高电平时, 若高能粒子射入处于关态的n管的沟道区, 由于源漏之间存在电压, 电离出的电子、空穴在电场的作用下形成电流脉冲, 通过解析计算得到 I_0 的表达式为:

$$I_0 = \frac{LET}{3.6} \frac{q^2 \mu_n N_A}{\varepsilon} x_p \quad (2)$$

式中: LET (Linear Energy Transfer)为入射粒子的线性能量传输值; q 为电子电荷量; μ_n 为电子的迁移率; N_A 为沟道掺杂浓度; ε 为硅的介电常数; x_p 为沟道一侧空间电荷区的宽度。对于单边突变结有:

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_A}}(V_d + V) \quad (3)$$

式中: V 为外加偏置电压; V_d 为内建电势差。

在整个SEU事件中, 敏感节点的偏压 V 与电流脉冲 $I(t)$ 是负反馈的关系。瞬态电流脉冲导致敏感节点电压大幅度下降, 源漏之间电势差变小, 使 $x_p, I(t)$ 也随之减小, 电压下降得越来越慢, 最终电子、空穴完全被源漏吸收, 电流变为零, 为了表征节点电压和瞬态电流之间的关系, 将原公式改写成:

$$I(t, V) = f(LET) \sqrt{\frac{V_d + V}{V_d + V_{\max}}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4)$$

式中: $V_{\max}$ 为电源电压; $f(LET)$ 为在n管漏极接电源时拟合得到的峰值电流关于 LET 的函数。式(4)能更加准确地描述SRAM六管单元中, SEU事件引起脉冲电流^[2]。

文献[4]给出了双指数杰西模型的推导过程, 也给出了 I_0 和 α 的解析表达式。考虑粒子入射轨迹的初始化和热电子的激发过程, 由原来的单指数形式加入 β 所在的1项变为经典的双指数模型, 因此对于常数 β 并没有给出解析表示, 只是提到 $1/\beta$ 所代表的物理意义。

I_0, α 和 β 本身受工艺参数的影响很大, 而且不同工艺尺寸也面临着不同的问题, 需要考虑不同的效应, 这就决定了一种工艺尺寸下适用的参数值一般不适用于其他工艺产品。

2 单粒子效应的数值模拟与数值拟合

使用0.8 μm SOI CMOS器件参数, 利用二维半导体器件模拟软件Medici对一个n型的SOI MOSFET进行单粒子效应的模拟计算。将n管漏极与电源相连, 模拟得到漏极电压恒为 $V_{\max}$ 时的瞬态电流脉冲 $I(t, V_{\max})$ 。

在进行单粒子效应的数值模拟时, 物理模型应该考虑载流子浓度对寿命影响的SRH(Shockley Read Hall)复合、俄歇复合、载流子之间散射、迁移率随掺杂浓度的变化以及禁带变窄等方面对器件内部载流子分布和运输的影响。通过泊松方程、载流子连续性方程、载流子输运方程联立对器件内部的电位和载流子浓度进行数值求解。

数值模拟的基本过程是: 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的影响, 即在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^[5]。

因为当前绝大多数器件的单粒子翻转阈值 LET 都落在1 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \sim 80 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 的范围内, 而SOI工艺本身对SEU不敏感, 器件翻转阈值较体硅器件高, 故模拟使用 LET 值: 20 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$; 40 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$; 60 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$; 70 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$; 80 $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 的粒子作为入射粒子, 得到不同 LET 值下漏极瞬态电流脉冲, 如图1所示。

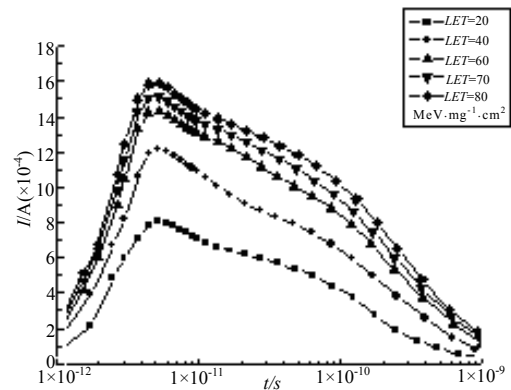


Fig.1 Variation curves of drain current with time under different LET
图1 不同 LET 下漏极电流随时间变化曲线

模拟得到不同LET对应下的峰值电流 $f(LET)$: $f(20)=0.807\ 5\ \text{mA}$; $f(40)=1.216\ 6\ \text{mA}$; $f(60)=1.431\ \text{mA}$; $f(70)=1.514\ \text{mA}$; $f(80)=1.592\ 5\ \text{mA}$ 。

因为单粒子事件触发的瞬态电流脉冲事件很短,所以在单个器件组成的电路中宽度对产生的瞬态电流脉冲影响不大,所以尽管通过Medici得到的其实是单位宽度的电流,但是可以直接认为其就是器件内部的瞬态电流。

使用Matlab的cftool工具拟合函数:

$$I(t) = f(LET)(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5)$$

确定 $\alpha=2\times 10^9$, $\beta=1.9\times 10^{12}$ 。

3 SOI CMOS SRAM单元的电路模拟与混合模拟

SRAM6管单元的存储核心由2个互相反接的反相器组成,是SEU翻转最典型的部分,是抗辐射集成电路中抗单粒子性能方面的瓶颈^[6]。

使用HSPICE软件可以对 $0.8\ \mu\text{m}$ SOI CMOS SRAM的一个基本存储单元进行单粒子翻转效应的电路模拟,采用一个加在敏感节点和地之间的电流源来模拟高能粒子射入敏感区域后产生的瞬时电流,见图2。

瞬时电流源表达式如下:

$$I(t, V_B) = f(LET) \sqrt{\frac{V_d + V_B}{V_d + V_{\max}}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

将此方程带入HSPICE网表中,可以模拟得到不同LET情况下B点的电压变化,见图3。

可以看到,在LET值为 $60\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 的时候,单元未发生翻转;但是在 $70\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 轰击的时候,发生了偏转。说明翻转阈值在 $60\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2\sim 70\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 之间。

模拟中使用的是进行过版图寄生参数提取的SRAM存储单元网表,使用中国电子科技集团第58所提供的 $0.8\ \mu\text{m}$ PD SOI工艺模型。相比于直接进行大规模器件仿真,这种方法在时间消耗上有绝对的优势,又因为采用相关的器件模型,在精确度上也有一定的保证。

4 单粒子的辐照实验

CS58-128RH是一款由我所自主研发、具有完全知识产权的SRAM电路,采用完全定制的层次化设计方法,芯片规模达到100万门晶体管。芯片的加工在中国电子科技集团第58所进行,采用 $0.8\ \mu\text{m}$ 辐射加固的CMOS/SOI工艺,5英寸SIMOX SOI基片,顶层硅膜厚度约 $0.3\ \mu\text{m}$,器件间为浅槽隔离,3层金属布线。

利用原子能研究院的串列加速器进行单粒子摸底实验^[7],首先将SRAM写入55H和AAH交叉的测试图形,在辐照过程中一直对SRAM内容进行回读比较。实验中采用 $^{35}\text{Cl}^{11+}$, $^{63}\text{Cu}^{13+}$, I粒子,能量为: $138\ \text{MeV}$, $161\ \text{MeV}$, $280\ \text{MeV}$; LET值为: $13.9\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$, $33.4\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$, $61.8\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$, 均未发现单元翻转,较体硅器件在抗辐射方面有明显优势^[8]。

接着进行了单粒子实验,在LET值为 $73\ \text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 出现单粒子翻转事件,实际辐照实验的结果与模拟的结果吻合。

5 结论

本文采用改进过的描述单粒子效应瞬态脉冲的双指数模型,引入了电流脉冲和偏压关系的公式,并以该模型

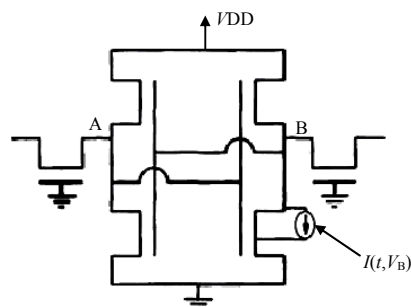


Fig.2 Sketch map of the SEU circuit simulation for SRAM cell
图2 SRAM 6管单元电路单粒子翻转模拟示意图

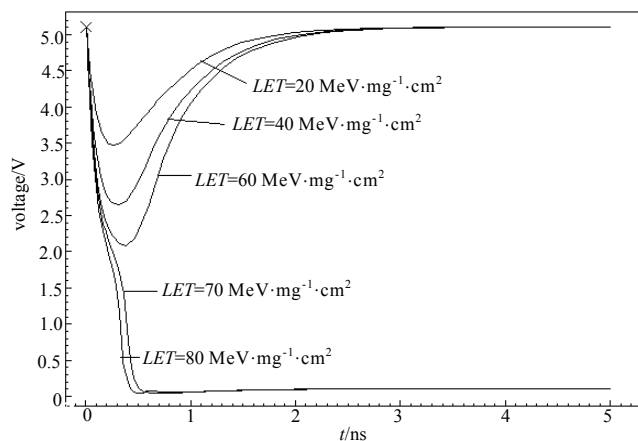


Fig.3 Voltage curves of the storage node B in SRAM cell after being struck under different LET

图3 不同LET下SRAM单元存储节点B受轰击后的电压曲线

为基础对二维器件数值模拟的数据进行拟合,将此模型引入电路级模拟,在单粒子效应的模拟方面,在可接受的时间及复杂度条件下,有较高的精确度。与单粒子辐照实验的结果比较,模拟的结果与实验结果吻合。这种方法可以快速评估相同工艺下不同结构电路抗辐照的性能,在芯片制造前可以给出阈值LET的近似值,而且此方法并不局限于SRAM6管单元的模拟,除了可以模拟各种加固结构的SRAM单元,还可用于组合逻辑以及时序逻辑电路,在依靠设计实现抗辐射方面具有实际意义。

模拟方法的准确性与工艺的稳定性关系很大,模拟的结果虽不能完全替代地面和空间实验,但是可以在设计之初对结构做出有效评估,有很大的实用价值。

参考文献:

- [1] 郭红霞. 集成电路电离辐射效应数值模拟及X射线剂量增强效应的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2002. (GUO Hongxia. Numerical simulation of ionizing radiation effects and study on the X-rays dose enhancement for integrated circuit[D]. Xi'an: Xidian University, 2002.)
- [2] 刘征,孙永节,李少青,等. SRAM 单元单粒子翻转效应的电路模拟[J]. 半导体学报, 2007,28(1):138-141. (LIU Zheng, SUN Yongjie, LI Shaoqing, et al. Circuit Simulation of SEU for SRAM Cells[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007,28(1): 138-141.)
- [3] Dodd P E, Sexton F W. Critical Charge Concepts for CMOS SRAMs[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1995,42(6):1764-1771.
- [4] Messenger G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks[J]. IEEE Trans. Nuclear Science, 1982,29(6): 2024-2031.
- [5] 贺威. CMOS/SOI 器件和电路的电离辐射效应模拟及实验[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006. (HE Wei. Simulation and Experiment of Radiation Effect of CMOS/SOI Devices and Circuits[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006.)
- [6] 贺朝会,李国政,罗晋生. CMOS SRAM 单粒子翻转效应的解析分析[J]. 半导体学报, 2000,21(2):174-178. (HE Chaohui, LI Guozheng, LUO Jingsheng. Analysis of single event upset in CMOS SRAMs[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000,21(2):174-178.)
- [7] 赵凯,高见头,杨波,等. 用 SOI 技术提高 CMOS SRAM 的抗单粒子翻转能力[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):91-95. (ZHAO Kai, GAO Jiantou, YANG Bo, et al. Improve SRAM SEU resistance with SOI CMOS technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(1):91-95.)
- [8] 周开明,谢泽元,杨有莉. 瞬时辐射对 80C31 单片机性能的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2006,26(6):981-984. (ZHOU Kaiming, XIE Zeyuan, YANG Youli. Influence of transient radiation for the behavior of the 80C31 single-chip Microcontrollers[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006,26(6):981-984.)

作者简介:



李振涛(1984-),男,山东泰安人,在读硕士研究生,主要研究方向为 SOI 器件的辐照模拟, email: lizhentao@red.semi.ac.cn.

刘忠立(1940-),男,武汉市人,研究员,半导体技术专家,我国抗辐射 SOI/SOS CMOS 集成电路奠基人之一,现从事半导体器件、电路研究。

高见头(1982-),男,辽宁黑山人,本科,工程师,现从事特种 IC 测试工作。

于芳(1960-),女,北京市人,博士生导师,研究员,半导体技术专家,现从事特种半导体器件级电路重大项目技术研究。

赵凯(1981-),男,山东茌平人,博士,助理研究员,现从事特种微电子元器件、结构化 ASIC 的设计研发工作。

杨波(1978-),男,湖南岳阳人,博士,助理研究员,现从事特种 IC 应用研究。

李宁(1977-),男,湖南邵东人,本科,工程师,现从事特种 IC 研发工作。