

## 基于全物理模型的模块级 SRAM 的 SEU 仿真方法

彭惠薪, 刘琳, 郑宏超, 于春青

(北京微电子技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 随着科学技术的发展和工艺尺寸的降低, 单元器件的尺寸逐渐减小, 使得单粒子电荷共享和单粒子翻转等效应日益严重, 增加了抗辐射加固模块级 SRAM 设计难度, 因此需要一套更为完备的仿真方法对模块级 SRAM 的单粒子效应敏感性进行预估, 为电路加固设计提供依据和建议。基于模块级 SRAM 的单元结构和电路版图, 利用 Cogenda 软件构建了模块级 SRAM 单粒子翻转效应仿真方法, 对其敏感性进行分析, 获得其单粒子翻转 LET 阈值, 并与重离子实验结果进行对比, 仿真误差为 13.3%。

**关键词:** 存储器; 单粒子翻转; 抗辐照; 敏感性分析

中图分类号: TP302.8

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200002

中文引用格式: 彭惠薪, 刘琳, 郑宏超, 等. 基于全物理模型的模块级 SRAM 的 SEU 仿真方法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 51-54.

英文引用格式: Peng Huixin, Liu Lin, Zheng Hongchao, et al. The SEU simulation of module-level SRAM based on full physical model[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 51-54.

## The SEU simulation of module-level SRAM based on full physical model

Peng Huixin, Liu Lin, Zheng Hongchao, Yu Chunqing

(Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** With the development of technology and the decrease of the process size, the scale of the single memory cell becomes smaller, causing the charge sharing and the SEU more serious, and increasing the difficulty of radiation harden design. Therefore, the accurate simulation for estimating the SEU of module level SRAM is needed to provide basis and guidance for radiation harden design. This paper summarizes the structure and the layout of SRAM, proposes a simulation of the SEU of module level SRAM using Cogenda for sensitivity analysis and the SEU LET threshold estimate. Comparison between the simulation and the heavy ion tests shows that the difference is about 13.3%.

**Key words:** SRAM; single event upset; radiation harden; sensitivity analysis

## 0 引言

随着数字电路工艺的不断发展和单元器件的尺寸逐渐缩短, 使得单粒子电荷共享和单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU) 等效应日益严重<sup>[1-2]</sup>, 增加了抗辐射加固模块设计难度, 因此需要设计者结合版图和模块级 SRAM 的电路结构, 在电路面积和性能两方面进行优化。优化后模块级 SRAM 电路的单粒子效应翻转阈值, 需要通过建模和仿真来预估。现有的仿真方式主要有双指数电流注入、分段式电流源辐射仿真等<sup>[3]</sup>, 由于两者仿真结果差异较大, 很难形成共识。因此需要提出一种共性的辐射效应仿真方法和步骤, 在模块设计完成后进行完整的辐射效应仿真, 以完善现有的模块级数字化设计流程。

为了保证电路的抗辐射能力, 抗辐射加固的模块级电路设计流程中, 需要对模块级电路的加固设计进行评估。评价的关键点在于电路结构敏感点分析及电路敏感

性仿真<sup>[4-6]</sup>。模块级 SRAM 电路敏感节点与其电路结构相关, 通过分析其受辐照后存储单元发生翻转效应的内部机理, 可以确定一个或多个敏感节点的位置。而模块级 SRAM 电路的敏感性则需通过仿真, 模拟各个节点在受到重离子辐照后的电荷收集情况, 并通过引起翻转的重离子 LET 值及翻转的次数对加固设计的好坏进行预估评价。

本文提出一种研究模块级 SRAM 电路单粒子翻转的仿真方法。首先根据模块级 SRAM 电路结构, 并对其敏感节点进行分析, 根据分析结果, 建立包含敏感节点的三维物理模型, 并确定粒子样本的入射位置。同时, 进行粒子输运与能量沉积模拟, 利用包含敏感节点的三维物理模型和粒子输运与能量沉积模拟联合仿真的方法, 进行模块级 SRAM 电路单粒子翻转的仿真研究。最后对整个模块级 SRAM 电路区域进行多次单粒子事件的扫描仿真, 用来估算出存储单元电路的 SEU 敏感截面。

# 微电子技术 Microelectronic Technology

## 1 模块级 SRAM 结构及敏感节点分析

### 1.1 抗辐照模块级 SRAM 结构

构建模块级 SRAM 前,需要明确其所选用的抗辐射加固电路结构。模块级 SRAM 抗辐照加固方法一般有电阻电容加固、工艺加固和设计加固三种方法。综合考虑加固设计后的 SRAM 单元的读写性能和抗辐照性能,大多数工程师会选择利用设计加固的方法去提高 SRAM 器件的抗辐照性能。目前,应用于 SRAM 的抗辐照加固技术主要有三模冗余加固技术(Triple Module Redundancy, TMR)和电路加固技术(Radiation Harden By Design, RHBD)。其中,电路加固技术是利用增加晶体管来使存储电路具备冗余节点,并在器件发生单粒子翻转错误时,通过冗余节点反馈来恢复正常数据输出。本文将以 DICE 结构的模块级 SRAM 为例,依照所提出的仿真方法,对其抗单粒子翻转性能进行评估。

抗辐照模块级 SRAM 的电路原理如图 1 所示,为典型的 DICE 结构,其中共包含 12 个 MOS 晶体管,具有 4 个节点的冗余结构,不管是存储节点还是冗余节点的状态都会由邻近的 2 个节点决定。

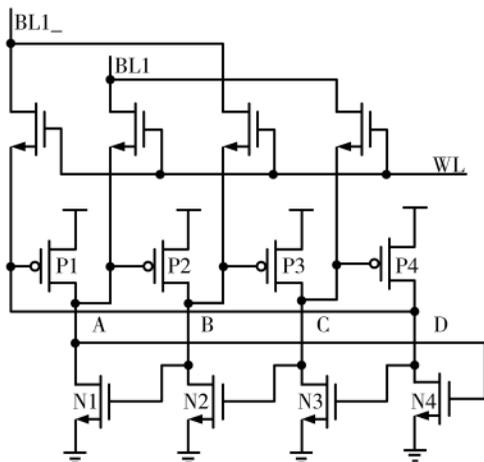


图 1 存储单元 DICE 结构

### 1.2 存储单元敏感节点分析

当目标单元 DICE 的存储状态为(A, B, C, D)=(1, 0, 1, 0),重离子入射位置为靠近 NMOS 管 N3 的漏区(存储节点 C)时,存储节点 C 的电位由“1”翻转向“0”。由图 1 可知,节点 C 翻转到“0”,会开启晶体管 P4,电源 VDD 开始通过晶体管 P4 向节点 D 充电,因此节点 D 的电位开始由“0”向“1”翻转。节点 C 翻转到“0”,会使晶体管 N2 关断。节点 D 翻转到“1”,会使晶体管 P1 关断。结合本就关断的晶体管 N1 和 P2,节点 A 和 B 处于浮置状态,应该维持原来的数据,此情况下目标单元 DICE 的敏感节点对是:(N3, N1)和(N3, P2)。当重离子入射位置为靠近 NMOS 管 N1 的漏区(存储节点 A),节点 A 翻转到“0”,会开启晶体管 P2,电源 VDD 开始通过晶体管 P2 向节点 B 充电,因此节点 B 的电位开始由“0”向“1”翻转。节点

A 翻转到“0”,会使晶体管 N4 关断。节点 B 翻转到“1”,会使晶体管 P3 关断,此情况下目标单元 DICE 的敏感节点对是:(N1, N3)和(N1, P4)。在对模块级 SRAM 进行三维建模时,应包括上述敏感节点,并通过仿真敏感节点受辐照时电荷浓度随时间变化的情况,分析真正诱发器件翻转的敏感节点,并统计翻转次数。

## 2 单粒子翻转敏感性的仿真流程

本文提出的仿真流程是基于 Cogenda 软件的全物理仿真,仿真流程如图 2 所示。全物理仿真对高能粒子在器件中传输过程有细致清晰的认识,能够明确引发单粒子翻转效应的粒子种类、粒子能量和入射角度。此外,全物理仿真对载流子的传输过程也可以进行模拟,帮助确定器件结构中的敏感节点。基于以上两点,全物理仿真能够更好地对目标器件的抗单粒子翻转效应的性能进行评估,为加固设计优化方向提供依据,节约开发的成本与时间。

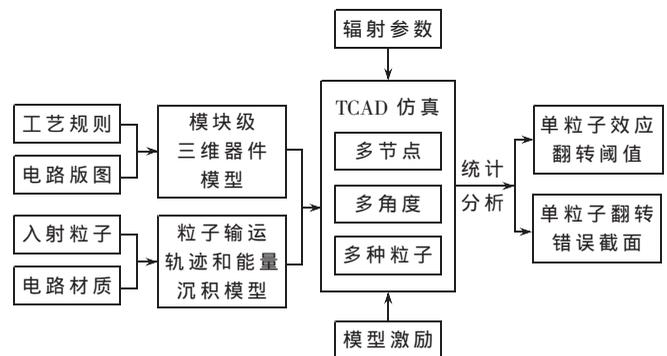


图 2 仿真流程

首先,从电路的设计版图出发,根据工艺规则脚本,结合模块电路辐射效应敏感区域的几何结构、杂质分布等工艺信息建立模块级三维器件模型。三维器件模型不仅需要真实反映器件的版图设计、导线和介质层厚度、有源区掺杂浓度等工艺信息,而且应根据模块级电路的单粒子敏感节点分析结果,将电路中与敏感节点相关的所有器件包含在内。

其次,结合电路材质中的器件结构与材料成分特征,分析其内部载流子在受到辐照时的分布状态和运动轨迹,建立入射粒子在目标材料中的粒子运输轨迹和能量沉积模型。利用 GSeat、Genius 等软件可以计算粒子运输轨迹和能量沉积。

再次,利用包含敏感节点的模块级电路模型和粒子运输轨迹与能量沉积模型,开展模块级电路单粒子翻转联合仿真,得到单粒子翻转错误截面及单粒子翻转效应阈值。

最后,对 TCAD 的器件模型进行三维混合模拟仿真时,可以改变粒子种类、能量等辐射参数,来进行不同条件下的单粒子翻转效应模拟。此外,在模块电路各个节点上进行不同粒子辐照,实现多样本重离子事件的扫描

# 微电子技术 Microelectronic Technology

仿真,并对仿真结果中各个粒子的单粒子效应结果进行统计分析,得到单粒子翻转错误截面,绘制单粒子翻转威布尔曲线,获得整个模块电路或敏感区域的单粒子翻转 LET 阈值,对模块电路的抗单粒子翻转性能进行评估。

## 3 全物理过程仿真建模

### 3.1 模块级 SRAM 的三维建模

模块级 SRAM 的三维建模需要根据目标电路的存储单元版图,结合金属厚度及金属层数,此外,三维器件的模型还需根据器件的具体工艺参数,反映其有源区掺杂浓度等信息。图 3 所示为以一种 65 nm 工艺下的一款存储器电路存储单元电路为例构建的模块级 SRAM 三维模型,按照解剖中获得的各层金属厚度,建立了 6 层金属模型,用于全物理模型仿真。

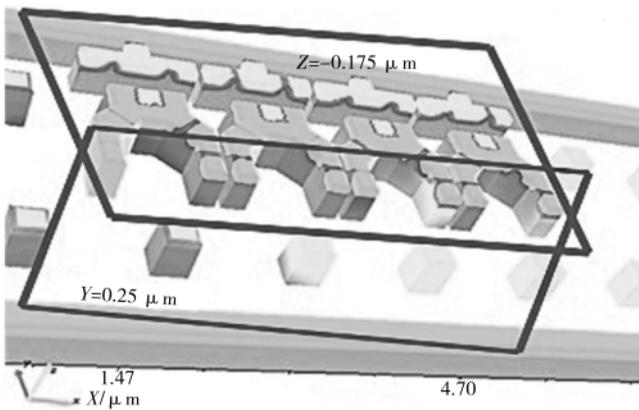


图 3 模块级 SRAM 三维器件模型

模块级 SRAM 器件的三维模型需反映电路的真实结构,并包含电路结构中的所有敏感节点,用以在后续的仿真中观测各个节点电荷收集状况,以及其随时间变化的载流子浓度分布。此外,所建立的三维模型还可以对特定的敏感节点截面进行切割,帮助设计者进一步找出敏感节点发生翻转的内部机理,保证仿真测试的准确性和完整性。

### 3.2 高能粒子运输模型

利用 GSeat 仿真软件构建基于蒙特卡洛的高能粒子运输模型,计算高能粒子在半导体期间的轨迹和能量沉淀。Gseat 数据库中包含重离子、质子、中子、电子、光子等粒子的电轨作用和强相互作用(核反应)模型,并且包含用于评估罕见事件反应截面的偏置选项。

### 3.3 辐射效应全物理过程

对半导体器件在各种辐射效应下全物理过程进行仿真,计算得到器件在各种辐射效应下的电流、电压变化波形以及电荷收集情况,对器件单粒子翻转效应的机制进行分析。根据目标电路的结构,确立一个或多个敏感节点,再结合电路的版图,确立重离子的入射位置。建立垂直入射的粒子样本,确定粒子的类型、能量及粒子数,最后计算模块级 SRAM 中电势和载流子浓度在粒子轰击后的演化,运算得到器件在辐照效应作用下的电

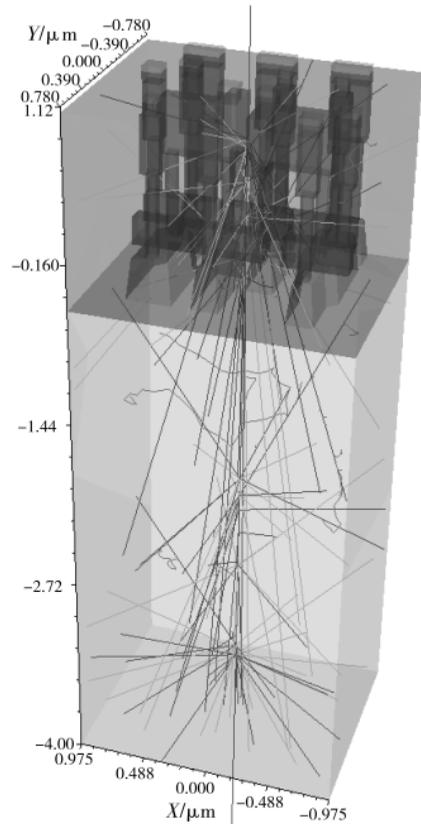


图 4 入射粒子与物理材料反应的模拟仿真

流、电压变化波形以及电荷收集情况。

### 3.4 半导体器件单粒子翻转效应截面估算

利用 runSEU 软件可以对半导体电路电离效应界面进行统计估算,runSEU 按照用户指定的辐射环境产生粒子样本,并调用 GSeat 和 Genius 等软件计算样本中各个粒子的单粒子效应,最后给出半导体器件单粒子效应反应截面的统计结果。仿真软件将仿真得到的版图平面划分为网格,重粒子分别入射到电路的每个小正方形中。之后对器件的电荷收集情况进行仿真,对器件的翻转截面进行统计估算,估算公式为:

$$\sigma = \frac{N_i}{N_{tot}} A$$

其中, $\sigma$  表示翻转截面 ( $\text{cm}^2$ ), $N_i$  表示翻转事件数, $N_{tot}$  表示全部事件数, $A$  表示电路面积 ( $\text{cm}^2$ )。runSEU 对单粒子事件反应截面的仿真精度,与重离子试验结果相比,相对误差在 20%~30% 之间。

## 4 结果与分析

### 4.1 仿真结果

对研究的目标存储单元,进行了能量为 385MeV 的 Bi 粒子、能量为 210MeV 的 Ge 粒子、能量为 175MeV 的 Ti 粒子和能量为 160MeV 的 Cl 粒子四种入射粒子(每种入射粒子均为 100 样本)分别引起存储单元发生单粒子翻转的仿真。根据存储单元的仿真数据,得到器件单粒子翻转阈值。

## 4.2 重离子试验结果

在真空辐照环境中,用重离子加速器产生的粒子对实验样品芯片进行单粒子效应试验,获取目标器件的单粒子翻转效应敏感性。在重离子辐照时,由FPGA为目标器件所有地址写入固定数据“55”,并进行实时回读,若读取的某个地址的数据与“55”不同,则认为器件发生单粒子翻转,错误数加1,通过串口发回错误地址、错误数据及错误总数。试验中选用Ge、Ti、Cl、Bi四种离子对器件进行辐照,所选重离子参数如表1所示,试验得到的单粒子翻转截面与仿真得到的单粒子翻转界面与LET之间的关系如图5所示。

表1 试验用重离子能量及其LET值

离子	能量/MeV	LET值/(MeV·cm <sup>2</sup> /mg)	射程/μm	加速器名称
Cl	155	13.2	44.3	
Ti	150	22.5	31.0	HI-13
Ge	210	37.3	30.5	
Ta	1 400.8	81.4	83.3	HIRFL

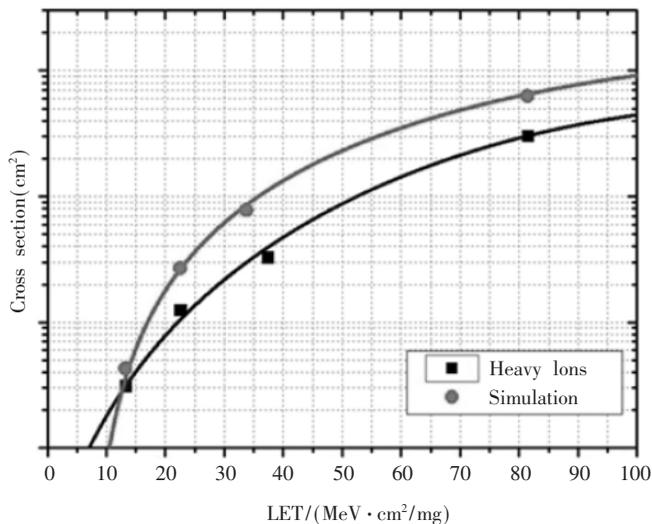


图5 65 nm 存储器单粒子效应错误截面图

图5所示为仿真得到的单粒子翻转效应饱和截面和重离子试验得到的单粒子翻转效应饱和截面,取饱和截面的10%对应的LET作为器件的翻转阈值。仿真误差约为13.3%。造成误差的原因可能为:

(1)模块级SRAM三维单元的版图设计与实际电路存在偏差。在进行存储单元仿真建模时,主要根据器件的版图来进行设计,但是也需要根据TCAD的仿真需要进行调整,比如增添位单元有源区结构,增添邻近单元的阱接触结构,加大某方向阱的范围等。

(2)仿真用重离子参数与试验用重离子参数存在偏差。仿真用重离子参数来源于仿真软件的数据库,而重离子试验中重离子参数需要根据试验现场的具体情况进行调整,而且由于实际参试电路存在表面结构,有效LET与表面LET存在偏差。

## 5 结论

本文提出了一种针对模块级SRAM电路进行的单粒子翻转效应的仿真方法。结合模块级SRAM的电路结构,构建包含敏感节点的三维模型,分析其内部发生单粒子翻转效应的机理,结合粒子输运轨迹与能量沉积模型进行全物理仿真,并利用Cogenda软件建立了全物理仿真模型,建立入射重离子样本,对器件的单粒子翻转阈值进行仿真评估。将仿真评估得到的结果与重离子试验得到单粒子翻转阈值进行比较,仿真误差为13.3%,重离子实验结果支持模块级SRAM单粒子翻转仿真结果。

## 参考文献

- [1] DODD P E, SHANEYFELT M R, FELIX A J, et al. Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3278-3284.
- [2] 肖松松. 65 nm 体硅 CMOS 工艺下 SRAM 单元抗辐照加固方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [3] MESSENGER G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 2024-2031.
- [4] 沈婧, 薛海卫. 基于 DICE 结构的 SRAM 抗辐照加固设计[J]. 电子与封装, 2016, 16(3): 26-30.
- [5] 郑宏超, 岳素格, 董潘. 微处理器高低速模式下的单粒子功能错误分析[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(7): 18-21.
- [6] 段青亚, 黄土坦, 辛明瑞. 空间单粒子故障容错设计验证技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(11): 38-41.

(收稿日期: 2020-01-01)

## 作者简介:

彭惠薪(1991-),女,工程师,主要研究方向:抗辐照加固验证技术、嵌入式测试系统。

刘琳(1983-),女,高级工程师,主要研究方向:抗辐照加固验证技术、嵌入式测试系统。

郑宏超(1983-),男,高级工程师。主要研究方向:抗辐照加固验证技术、嵌入式测试系统。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所