

一种基于 Weibull 函数的单粒子注入脉冲模型

王 佩, 李 磊

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 610054)

摘 要: 单粒子效应是当前集成电路抗辐射加固的研究重点之一. 根据空间辐射粒子特点, 提出一种基于 Weibull 函数的单粒子注入脉冲模型, 该模型利用 Weibull 函数对瞬时脉冲直接进行电路级描述. 实验证明, 该模型与传统器件级电流注入脉冲模型的 SER 统计数据拟合度高达 98.41%, 同时可将电路模拟时间缩短 3 个数量级, 在高速超大规模集成电路的单粒子效应研究中, 具有明显的模拟速度优势, 为深亚微米级的抗辐射加固研究提供了坚实的理论基础.

关键词: 单粒子效应; 抗辐射加固; Weibull 函数; 注入脉冲模型

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0061-04

Particle-Injected Model Based on Weibull Function

WANG Pei, LI Lei

(Research Institute of Electronic Science and Technology,
Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Single-Event Effect (SEE) is a hot research area in Integrate Circuits radiation hardening today. This paper put forward a particle-injected model based on Weibull function which characterized transient pulse directly. The experiment result proved that the precision of Weibull model come up to 98.41% compare with the current-pulse model, and it can improve simulation computer speed of circuits 3 orders. The model proposed in this paper has strong referenced value to study radiation hardened in VLSI circuits.

Key words: SEE; radiation hardening; Weibull function; particle-injected model

1 引言

随着我国航天事业的飞速发展, 电子设备已广泛应用于人造卫星等空间领域. 由于空间环境中存在着大量的高能带电粒子, 极易使电子器件受到辐射从而产生单粒子效应^[1], 导致电子设备无法正常工作, 严重影响到设备的可靠性.

对于单粒子效应的研究, 国内目前普遍使用的是基于器件级的数值模拟方法, 即对器件建立物理模型, 对其抽象得到相应的数学表述, 再加入由瞬时脉冲表述的单粒子注入模型, 求解得到器件的辐射特性, 进而提出抗辐射加固的设计方案. 该方法能够模拟出器件在辐射条件下的性能, 但需要经过多次的仿真和迭代, 因此所需时间较长.

本文从单粒子效应的产生机理出发, 根据空间辐射粒子的特点, 提出一种基于 Weibull 函数的单粒子注入脉冲模型, 与器件级注入脉冲模型相比, Weibull 函数注入脉冲模型将单粒子注入模拟途径从器件级抽象到电路级, 从而使单粒子效应的模拟速度大幅度提高, 这对超大规模集成电路的抗辐射加固研究, 提供了可靠的理论支撑.

2 单粒子效应

单粒子效应是指空间辐射中的大量高能带电粒子通过辐射穿透到电路芯片的内部, 并在穿透路径上发生电离, 电路的节点可能会吸收电离产生的电子或空穴, 改变原来自身的电平, 致使电子器件受到不同程度的破坏. 随着工艺线宽的逐渐减小, 导致器

件特征尺寸越来越小,工作电压越来越低,临界电荷也越来越小,单粒子效应也越来越容易发生。

随着单粒子效应研究的不断深入,以及被辐射器件中新现象的不断出现,对单粒子效应的分类也越来越细。根据辐射粒子注入脉冲的产生位置及影响,目前已明确的单粒子效应类型如表 1 所示。其中,单粒子注入脉冲在组合逻辑路径上产生并被传播的现象称为 SET;SET 导致的错误逻辑状态被锁存器存储从而发生电平翻转的现象称为 SEU;产生错误的概率则称为 SER(soft error rate)^[2]。

表 1 单粒子效应分类

类型	定义
单粒子翻转 SEU	存储单元逻辑改变
单粒子闭锁 SEL	大电流再生状态
单粒子烧毁 SEB	大电流导致器件烧毁
单粒子栅穿 SEGR	栅介质因大电流击穿
单粒子多位翻转 MBU	一个粒子入射导致多个位的状态改变
单粒子扰动 SED	单元逻辑瞬时改变
单粒子瞬态脉冲 SET	瞬态电流导致错误
单粒子快速反向 SES	NMOS 产生再生状态
单粒子功能中断 SEFI	翻转导致部件出错
单粒子位移损伤 SPDD	位移效应的永久损伤
位硬错误 SHE	位的不可恢复错误

单粒子翻转(soft error upset, SEU)是集成电路中最容易发生的单粒子效应,因此本文将基本逻辑电路为例,在电路敏感节点上分别注入不同的单粒子脉冲模型,并对产生的单粒子翻转(SEU)和错误率(SER)进行模拟计算,通过数值的比较来体现基于 Weibull 函数单粒子注入脉冲模型的优势所在^[3]。

3 单粒子注入脉冲模型

如前所述,目前普遍采用的是用瞬时电流脉冲来描述的器件级注入脉冲模型,先后提出的脉冲建模包括体形脉冲法、偏压迭代法和双指数模拟法。这些方法的缺点在于无法描述脉冲的峰值以及上升下降的平滑趋势,因此往往会低估真实脉冲的高度^[3]。器件级的瞬时电流脉冲模型表达式如下^[4]:

$$I(t) = \frac{2Q_0}{\tau\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{\tau}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

式中, Q_0 是注入的电荷量,根据空间辐射粒子特性,电荷量取经验值为 70 ~ 150fc,超过 150fc 的不在单

粒子效应讨论范围之内^[5]; τ 是与电荷累积过程有关的时间常数,也是 CMOS 器件自身的工艺特性, τ 越大,说明电荷重组所需的时间越长, τ 越小,说明电荷会迅速重组,能够在很短时间就产生一个电流脉冲,在本文采用的 SMIC13 工艺中,参数取值约为 25 ~ 35ps,且值随着特征尺寸的降低而减小^[6]。

从式(1)可以看出,在一定的工艺特性下(即工艺参数 τ 一定),瞬时电流脉冲模型的波形只依赖于注入电荷量,这使得注入脉冲波形的变化趋势无法精确地描述出来,此外,由于波形的特征参数需要通过一系列的计算才能得出,因此严重影响了电路运算速度。

4 Weibull 脉冲模型

为了改进瞬时电流脉冲注入模型,本文提出了基于 Weibull 函数的电路级单粒子注入模型。这种方法能够直接利用 Weibull 函数的特征参数来描述脉冲波形,不但能够精确地表述脉冲波形的特征,还节省了大量的计算时间,使电路速度得到极大的提高。

Weibull 函数是一种较为完善的分布,在拟合随机数据时,有很大的灵活性,对于不同形状的频率分布有很强的适应性。当形状参数取不同值时,它可以等效或接近于其他一些常用分布,因此,Weibull 分布能够很好地描述发生在电路中多样且复杂的随机波形。单粒子效应是随机效应,因此针对单粒子注入脉冲的特点,将采用三参数的 Weibull 分布模型来近似器件级电流瞬时脉冲波形。

瞬时脉冲波形及其特征参数如图 1 所示,包括高度 H ,面积 A 以及到达顶峰时所占面积 A_p 。对于波形宽度的定义,则有很多种定义标准,在这里将其定义为经验宽度,即 $W = 2A/H$ 。

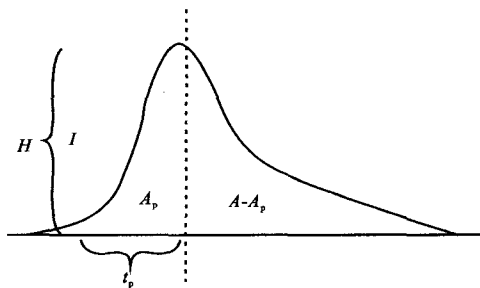


图 1 脉冲波形及特征参数

三参数 Weibull 分布函数的表达式如下:

$$V(t) = a \cdot \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{c-1}{c}} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left\{-\left[\left(\frac{t}{b}\right)^c - \frac{c-1}{c}\right]\right\} \quad (2)$$

式中, $t \geq 0, a > 0, b > 0, c > 1$

Weibull 函数表达式中的特征参数,可以通过电流瞬时脉冲波形的特征参数 H, A, A_p 直接求出:

① 利用最值的思想,对 $V(t)$ 求导,可以得出瞬时脉冲波形的最值,即高度 H . 令

$$\frac{dV(t)}{dt} = 0 \quad (3)$$

可以得到

$$\left(\frac{c-1}{b}\right)\left(\frac{t}{b}\right)^{c-2} = \left(\frac{c}{b}\right)\left(\frac{t}{b}\right)^{2c-2} \quad (4)$$

整理得

$$\frac{t}{b} = \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

从而脉冲波形最值所对应的 t_{peak} , 可以求出

$$t_{peak} = b \cdot \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1}{c}} \quad (6)$$

将其代入式(2), 可以求得脉冲波形的最值:

$$V(t) = a \cdot \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1-c}{c}} \cdot \left[\left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1}{c}}\right]^{c-1} \cdot \exp\left\{-\left[\left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1}{c}}\right]^c - \frac{c-1}{c}\right\} \quad (7)$$

化简得

$$V(t) = H = a \quad (8)$$

② 利用积分思想计算面积 A , 可得出特征参数 P :

$$\begin{cases} A = \int_0^{\infty} V(t) dt = a \cdot \left(\frac{b}{c}\right) \cdot \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1-c}{c}} \cdot \exp\left(\frac{c-1}{c}\right) \\ A_p = \int_0^{t_p} V(t) dt = a \cdot \left(\frac{b}{c}\right) \cdot \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1-c}{c}} \cdot \exp\left(\frac{c-1}{c}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{1-c}{c}\right)\right] \\ P = \frac{A_p}{A} = 1 - \exp\left(\frac{1-c}{c}\right) \end{cases}$$

得到

$$c = \frac{1}{1 + \ln(1-P)} \quad (9)$$

③ 利用式(2)、式(8)、式(9), 联立可以求得

$$b = \frac{A}{H} \cdot (P-1) \cdot \left[\frac{1}{1 + \ln(1-P)}\right] \cdot [\ln(1-P)]^{-\ln(1-P)} \quad (10)$$

由上述计算可以看出, Weibull 模型的三个参数, 可以通过瞬时脉冲波形的特征参数直接算出. 其中, 参数 a 对应于瞬时脉冲波形的峰值高度 H , b 代表脉冲波形宽度的时间参数, c 对应于脉冲波形的

变化趋势. 换句话说, 单粒子注入脉冲可以用 Weibull 函数表达式直接描述, 避免了以往器件级模型的迭代计算, 节省了大量的时间, 极大地提高了运算速度.

5 仿真及结果

以基本逻辑电路为例, 在电路敏感节点上分别加入 Weibull 函数注入脉冲模型和器件级电流注入脉冲模型, 并对由此产生的单粒子翻转现象和错误率进行模拟计算.

首先, 将两种模型描述的瞬时脉冲分别注入图2所示的电路中, 并在 SMIC13 工艺下进行 HSPICE 仿真, 得到两种模型下相应产生的瞬时脉冲波形, 如图3所示. 图3(a)和图3(b)分别是注入电荷量为 70fc 和 150fc 情况下, 两种模型的脉冲波形比较曲线图.

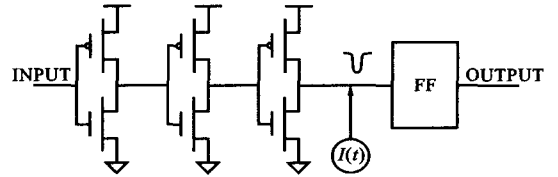


图2 单粒子注入脉冲电路图

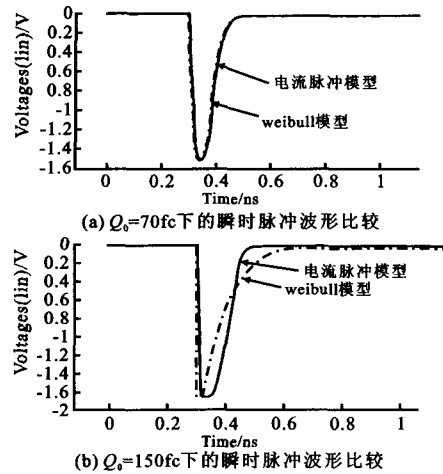


图3 两种模型的瞬时脉冲波形比较

由图3可以看出, 在 SMIC13 工艺条件下, Weibull 模型完全适用于单粒子注入脉冲模型的描述, 此外, 该模型与器件级电流注入脉冲模型的拟合度随注入电荷量的增加而略有降低. 在注入电荷量为 70fc 时, Weibull 模型与电流注入脉冲模型所产生的瞬时脉冲几乎完全一致. 需要说明的是, 这里的注入电荷量只考虑了单粒子效应讨论范围之内的 70~150fc, 同样地, SMIC13 工艺所对应的工艺参数 τ 数仍然取 25~35ps.

当两种模型所描述的瞬时脉冲分别注入到图 2 所示的电路中时,脉冲会影响到电路节点的正常电平,导致输出电平可能发生错误翻转,从而发生单粒子效应.

图 4 是在未采用任何抗辐射加固技术的情况下,对两种模型注入瞬时脉冲所引起出错率(SER)的统计结果比较曲线.图 4(a),(b),(c)分别是工艺参数 τ 为 25ps,30ps,35ps 条件下的 SER 统计数据对比情况,注入电荷量仍取单粒子效应讨论范畴内的 70~150fc,为保证数据比较结果具有相同基准,在两种模型的仿真结果取样中,均选取了 10 个采样点.

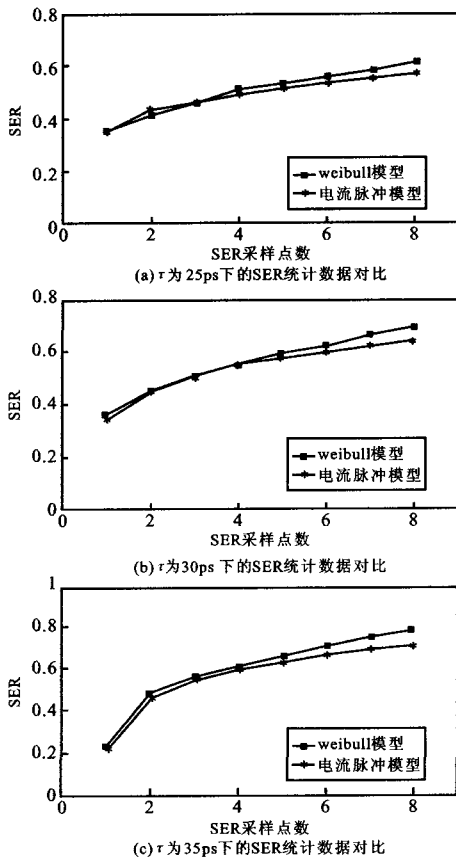


图 4 两种模型的 SER 统计数据对比

由图 4 可以得出,在 SMIC13 工艺下,Weibull 模型与器件级电流注入脉冲模型的 SER 统计数据极度逼近,当工艺参数为 25~35ps 时,两种模型的 SER 统计数据拟合度高达 98.41%~97.38%,即平均残差约为 1.59%~2.58%.由此可以得出,Weibull 模型完全适用于深亚微米级工艺条件下的单粒子效应分析和研究.

此外,在 SER 的模拟运算时间方面,Weibull 函数模型可直接用 MATLAB 进行估算,在参数已知的情况下,只需几秒钟就可描述出注入脉冲波形,与

器件级注入脉冲模型的反复迭代模拟方法相比,提高了约 3 个数量级的模拟运算时间,在超大规模集成电路单粒子效应的模拟应用中,具有极强的效率优势.

6 结束语

文中提出了一种基于 Weibull 函数的电路级单粒子注入脉冲模型,并将该模型与器件级电流注入脉冲模型进行对比.仿真结果表明,在 SMIC13 工艺下,Weibull 模型与电流注入模型产生的瞬时脉冲几乎一致,两种模型的 SER 统计数据拟合度可达到 98.41%,模拟运算时间可提高 3 个数量级.该结论为超大规模集成电路中的单粒子效应分析和抗辐射加固技术研究提供了理论支撑,同时为深亚微米级单粒子注入模型的分析指出了新的研究方向.

参考文献:

- [1] 冯彦君, 华更新, 刘淑芬. 航天电子抗辐射研究综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1072-1076.
- [2] 刘征. 单粒子效应电路模拟方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [3] Alireze Kasnavi, Joddy W Wang, Mahmoud Shahram, et al. Analytical modeling of crosstalk noise waveforms using weibull function[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits And Systems, 2004, 28(8): 142-143.
- [4] Rajeev Rao, Kabiraj Chopra, David T Blaauw. Computing the soft error rate of a combinational logic circuit using parameterized descriptors[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits And Systems, 2007, 26(3): 470-473.
- [5] Premkishore Shivakumar, Michael Kistler, Stephen Keckler, et al. Modeling the effect of technology trends on the soft error rate of combinational logic[C]// Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. USA: Bethesda, 2002: 954-956.
- [6] Peter Hazucha, Christer Svensson. Impact of CMOS technology scaling on the atmospheric neutron soft error rate[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2587-2592.

作者简介:

王佩女, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为微电子学与抗辐射加固技术.

李磊男, (1982-), 博士. 研究方向为微电子学与集成电路设计.