

基于动态局部重配置的 FPGA 抗辐射模拟

刘智斌, 王伶俐, 周学功, 童家榕

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 201203)

摘 要: 提出一种与具体硬件结构无关、基于权重的错误注入模型, 用于准确模拟基于 SRAM 的现场可编程门阵列抗辐射性能。提出基于 JTAG 边界扫描技术和动态局部重配置的错误注入模拟平台。实验结果证明, 由该软件模型和硬件平台组成的错误注入系统具有良好通用性, 能更准确、高效地进行模拟, 且成本较低。

关键词: 现场可编程门阵列; 错误注入模型; 动态局部重配置; JTAG 边界扫描

Radioresistance Emulation of FPGA Based on Dynamic Partial Reconfiguration

LIU Zhi-bin, WANG Ling-li, ZHOU Xue-gong, TONG Jia-rong

(State Key Lab of Application Specific Integrated Circuit & System, Fudan University, Shanghai 201203)

[Abstract] This paper presents a hardware structure-independent weight-based fault injection model for accurate emulation of the radioresistance in the SRAM-based FPGA. Fault injection emulation platform based on Joint Test Action Group(JTAG) boundary scan and dynamic partial reconfiguration is proposed. Experimental results show that fault injection system composed of the software model and the hardware platform has high universal property and is more accurate, efficient and needs lower cost emulation.

[Key words] Field Programmable Gate Arrays(FPGA); fault injection model; dynamic partial reconfiguration; JTAG boundary scan

1 概述

目前主流的通用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)采用 SRAM 可编程单元实现, 各个可编程单元的配置值决定了 FPGA 所实现电路的功能。但高能粒子(如 α 粒子、中子等)会使可编程单元的配置值由于单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)而发生改变, 可能导致电路发生单粒子功能中断(Single Event Functional Interruption, SEFI)。因此, 随着半导体制造工艺进入纳米尺度, FPGA 的可靠性和安全性将面临抗辐射的严峻挑战。

为了评估 FPGA 的抗辐射性能, 研究者提出了许多不同的模拟技术。文献[1]采用的辐射实验模拟方法拥有较高准确性, 但存在高成本和可能损坏待测器件(Device Under Test, DUT)的缺点。文献[2-3]采用错误注入的方法模拟单粒子翻转导致的可编程点配置值改变, 利用错误注入模拟单粒子翻转的方法具有低成本、无害于待测器件、高可控性和利于分析等优点, 被广泛用于研究 FPGA 的抗辐射性能。但已有错误注入系统均采用随机模型进行注入, 且硬件成本较高。

2 错误注入系统

2.1 FPGA 可编程点分类

通用 FPGA 是由可编程逻辑单元块(Configurable Logic Block, CLB)、输入输出单元(Input/Output Block, IOB)以及可编程互连资源组成的重复阵列, 其中包含了大量用于实现电路功能的可编程点。根据对单粒子翻转的敏感程度, 可编程点可分为 4 类^[1]: 查找表(Look Up Table, LUT)中的可编程点, CLB 内部互连中的可编程点, CLB 外部互连中的可编程点以及 IOB 中的可编程点。

2.2 错误注入模型

器件的单粒子翻转横截面(Device Cross Section, DCS)常

用来描述 FPGA 中可编程点对单粒子翻转的敏感程度, 与入射粒子的线性能量传输值(Linear Energy Transfer, LET)相关。DCS 定义为可编程点发生单粒子翻转的数量与粒子流量密度之间的比值。LET 是入射粒子穿过某一确定材料时发生能量传递的量度。在描述电子器件受辐射影响发生单粒子翻转时, 其单位是 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。DCS 与 LET 之间的关系曲线能用威布尔方程进行很好的拟合^[1], 具体表示如下:

$$DCS(LET) = DCS_{sat} \cdot (1 - e^{-\frac{(LET-LET_0)^s}{w}}) \quad (1)$$

其中, DCS_{sat} 为可编程点的 DCS 饱和值; LET_0 为可编程点发生单粒子翻转的 LET 阈值; 常数 w 和 s 与具体器件和具体工艺相关。

文献[1]通过辐射实验证明了 FPGA 中不同种类的可编程点具有不同单粒子翻转敏感性。其中, 查找表中的可编程点最敏感, IOB 中的可编程点则表现出最低的敏感性。其原因是查找表中的可编程点会直接受单粒子翻转的影响, 且可能间接受到器件中其他资源的作用而发生翻转, 例如, 对于用作分布式 RAM 的查找表, 若控制其写使能的资源发生了单粒子翻转, 则会导致查找表的可编程点配置值改变; IOB 中的可编程点则由于受到封装的影响而表现出最低的敏感性。

文献[4]通过辐射实验证明不同种类的可编程点具有不同的单粒子翻转敏感性, 并进一步指出由于物理版图或负载

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(60676020); 上海市浦江人才计划与上海市科委联合基金资助项目(08706200101)

作者简介: 刘智斌(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: FPGA 软件系统开发; 王伶俐, 副教授; 周学功, 助理研究员; 童家榕, 教授、博士生导师

收稿日期: 2010-02-23 **E-mail:** llwang@fudan.edu.cn

电容的不对称性,即使同一种类的可编程点,其发生 $0 \rightarrow 1$ 翻转以及 $1 \rightarrow 0$ 翻转所对应的 DCS 值也是不同的。

因此,采用随机模型的错误注入系统不能反映真实辐射实验的以上特性。本文通过设定 FPGA 中各个可编程点对应的翻转权重,建立基于权重的错误注入模型(Weight Based Fault Injection, WBFI),以准确模拟真实辐射实验的特性。对应于各个可编程点的翻转权重定义如下:

$$W(LET) = DCS(LET) \cdot \sigma \quad (2)$$

其中, $DCS(LET)$ 由式(1)给出;因子 σ 的定义见定义 1。

定义 1(翻转因子 σ) 可编程点发生 $0 \rightarrow 1$ 翻转以及 $1 \rightarrow 0$ 翻转所对应的权重因子。 σ 反映了物理版图以及负载电容的不对称性对可编程点发生翻转的影响。

根据式(2),定义第 i 个可编程点在 WBFI 模型下发生翻转的概率为

$$P_i(LET) = \frac{W_i(LET)}{\sum_{k=\text{FPGA中所有可编程点数}} W_k(LET)} \quad (3)$$

根据所有可编程点具有的翻转概率构建对应于 FPGA 芯片的累计翻转概率映射表。

定义 2(累计翻转概率映射表 $M_{m \times n}$) 由每个可编程点具有的累计翻转概率构成的映射表。 $m \times n$ 表示 FPGA 芯片的可编程点阵列规模。WBFI 模型根据该映射表在错误注入时确定要发生翻转的可编程点。其中,第 i 个可编程点具有的累计翻转概率为

$$P_{sum,i}(LET) = P_{sum,i-1}(LET) + P_i(LET) \quad (4)$$

其中, $0 < i \leq m \times n$; $P_{sum,0} = 0.0$ 。由式(3)和式(4)可知,最后一个可编程点具有的累计翻转概率为 1.0,如图 1 所示。每次错误注入时,通过生成 $(0,1]$ 的随机数 a ,并在已构建的映射表中查找满足 $P_{sum,i-1} < a \leq P_{sum,i}$ 对应的 i 值,就可确定第 i 个可编程点要发生翻转。由于映射表是单调递增的,因此对应每个随机数 $a \in (0,1]$,映射表中有且仅有一个 i 值满足条件。

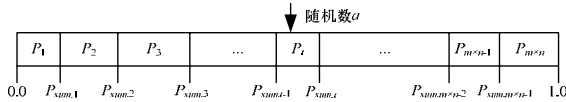


图 1 累计翻转概率映射表

WBFI 模型考虑了不同种类可编程点对单粒子翻转的敏感性,并保证了注入的随机性,因此,能更准确地模拟真实的辐射实验。

2.3 错误注入模拟平台

本文提出的模拟平台利用了 FPGA 具有的动态局部重配置特性,在每次错误注入时,不需要把完整的配置位流下载到芯片中,只要在运行时改变给定可编程点的配置值即可,因此,极大提高了错误注入速度。

该平台通过 IEEE1149.1 标准的 JTAG 边界扫描技术^[5]实现测试向量的输入以及待测器件输出结果的回读,从而验证电路的功能。每次错误注入完成后,先通过串联的边界扫描寄存器(Boundary Scan Register, BSR)将测试向量输入到待测器件作为激励,并控制测试存取端口(Test Access Port, TAP)控制器的状态运转,最后从边界扫描寄存器中回读待测器件的实际输出值到 PC 机与参考输出值进行比较,从而确定发生翻转的可编程点是否对电路功能产生影响。用于 JTAG 的测试向量和电路的参考输出值均可从 ModelSim 对该电路的仿真文件中获得,可以极大降低电路功能的验证难度。

与文献[2]提出的“FLIPPER”和文献[3]提出的“SLAAC-

1V”错误注入系统相比,本文提出的错误注入模拟平台不需要板载 SRAM 存放测试向量和正确参考值,也不需要额外的 2 块 FPGA 芯片用于实现正确设计和结果比较。它利用通用 FPGA 芯片内建的 JTAG 边界扫描技术配合软件程序同时完成测试向量的输入和结果比较 2 项任务。因此,该架构将待测器件、测试向量生成器(Test Pattern Generator, TPG)、正确设计以及结果比较器有机地集成在一块 FPGA 芯片中,能达到更低成本和系统结构更统一的目的,并使错误注入流程的衔接更紧密。

2.4 错误注入软件流程

如图 2 所示,软件程序先根据读入的可编程点信息库和完整配置位流重构 FPGA 可编程点阵列,接着依照 2.2 节介绍的方法建立 WBFI 模型,然后从 ModelSim 仿真结果文件中提取测试向量和输出参考值,并根据输入输出管脚约束映射 JTAG 边界扫描寄存器。

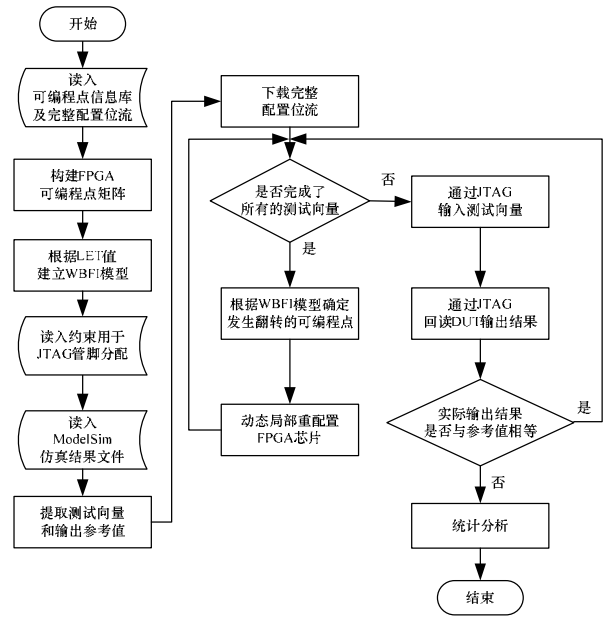


图 2 错误注入软件流程

下载完整配置位流,用于对 FPGA 芯片进行初始化。每次错误注入完成后,完整的测试向量会通过 JTAG 加到 FPGA 中作为激励,并通过 JTAG 回读实际输出结果进行比较。上述步骤循环执行,直到某次注入使电路功能发生错误,即待测器件发生单粒子功能中断为止。为保证每次用于 WBFI 模型的随机数序列不相同,本文以当前系统时间作为序列产生的种子。

3 实验结果

由于 WBFI 模型具有通用性,因此本文以文献[1]和文献[4]在辐射实验下测得的部分数据作为模型参数用于式(2),并根据 2.2 节提出的算法建立错误注入模型。

3.1 WBFI 模型的验证

根据式(1),真实辐射实验测出的是各种可编程点的 DCS 值,而 WBFI 模型统计的是各种可编程点分别翻转的个数,两者单位不同,不具可比性。为验证 WBFI 模型能否准确反映真实辐射实验,本文分别定义 2 个中间量。

定义 3(DCS 比率) 在辐射实验下,种类为 a 的可编程点与种类为 b 的可编程点的 DCS 值之比。

定义 4(翻转比率) 在 WBFI 模型下,对于给定的 LET 值,

种类为 a 的可编程点与种类为 b 的可编程点的翻转个数之比。

DCS 比率与翻转比率均反映了 FPGA 中不同种类可编程点对单粒子翻转的敏感程度之比, 由于两者具有可比性, 因此能用于衡量 WBFi 模型与真实辐射实验的吻合程度。根据定义 3, 做不同种类可编程点之间的 DCS 比率曲线, 如图 3 所示(纵坐标已取自然对数)。为了模拟不同粒子引起的单粒子翻转效应, 本文对 WBFi 模型分别设定不同的 LET 值进行实验, 以统计不同种类可编程点发生翻转的个数 N 。每次实验模拟 10 000 个单粒子翻转引起的可编程点值改变, 结果如表 1 所示。根据定义 4 统计表 1 中的数据, 并以散点图的形式在图 3 中进行描述。由图 3 可知, WBFi 模型下可编程点之间的翻转比率能很好地吻合辐射实验下可编程点之间的 DCS 比率曲线, 证明了该模型能准确地模拟真实辐射实验环境下的错误注入。

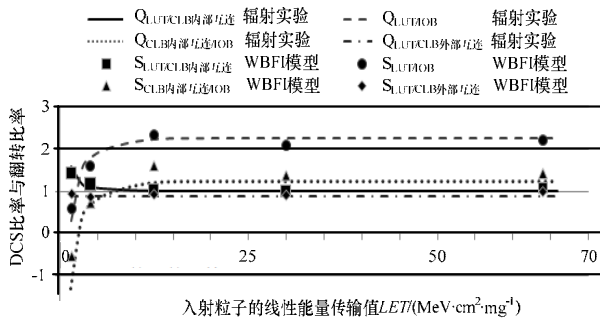


图3 DCS 比率与翻转比率的比较

表1 WBFi 模型的实验结果

LET/((MeV·cm²)·mg⁻¹)	查找表	CLB 内部		IOB 的 N		总 N
	N	互连 N	互连 N			
1.6(^{12}C)	1 307	472	6 894	220		8 893
4.1(^{15}F)	1 230	572	7 014	76		8 892
12.5(^{35}Cl)	1 280	684	6 878	38		8 880
30.0(^{63}Ni)	1 267	688	6 916	48		8 919
64.0(^{127}I)	1 362	694	6 859	46		8 961

表 1 中总 N 小于 10 000 是由于部分翻转发生在芯片没有使用到的可编程点上。

3.2 抗辐射性能模拟实验

复旦大学研发的 FDP 系列 FPGA 芯片 FPGA-2 支持动态局部重配置和 JTAG 边界扫描技术, 能方便地实现本文提出的错误注入模拟平台。因此, 本文利用 FPGA-2 搭建基于 WBFi 模型的错误注入系统, 测试电路板如图 4 所示。

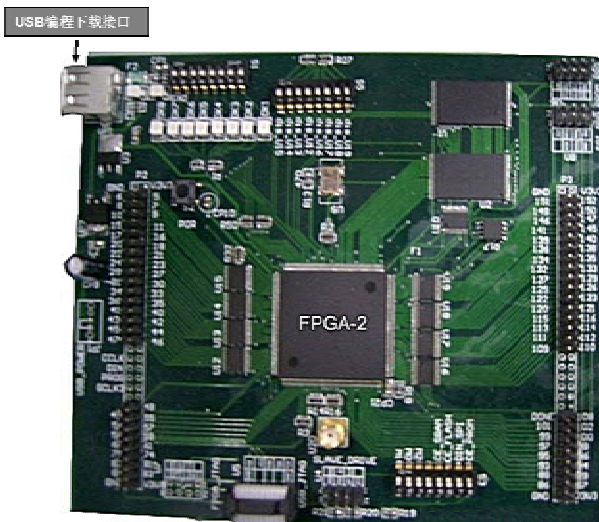


图4 错误注入系统测试电路板

本文使用经过三模冗余(Triple Module Redundancy, TMR)、基于修正布斯编码和华莱士树结构的 18 位非流水线乘法器作为测试电路。三模冗余后的测试电路在 FPGA-2 下的查找表利用率为 91%, 可编程逻辑单元利用率为 99%, IOB 利用率为 50%。其中使用了杨百翰大学提供的开源工具 BL-TMR 对电路进行三模冗余^[6]。

为了评估 WBFi 模型达到的效果, 本文同时采用随机注入模型进行对比。测试电路在 WBFi 模型下和随机注入模型下分别进行了 200 次和 155 次单粒子翻转模拟实验, 分别注入了 55 963 个和 56 198 个错误。软件程序统计了每次发生单粒子功能中断时, 合共注入的错误数量频数分布, 如图 5 所示。图 5 还描述了对应 2 种错误注入模型的累计频率分布曲线和 WBFi 模型相对随机注入模型的频数差值曲线($\Delta f = f_{\text{WBFi}} - f_{\text{随机}}$)。

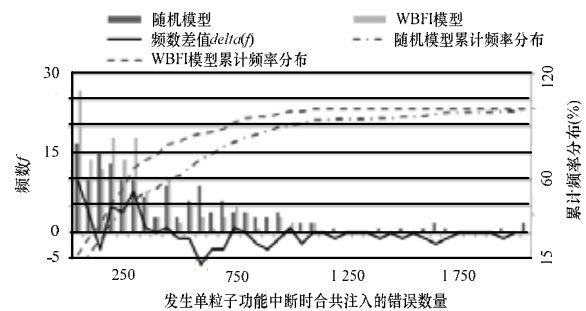


图5 SEU 模拟实验频数分布(LET=1.6 MeV·cm²/mg)

当注入错误数量相同时, WBFi 模型检测到的单粒子功能中断次数比随机模型多 29%。由图 5 中的频数差值曲线可知, 发生单粒子功能中断时, 与随机模型相比, WBFi 模型合共注入错误数量小于 500 的情况发生次数较多($\Delta f > 0$), 而大于 500 的情况发生次数少($\Delta f < 0$)。且从累计频率分布曲线可知, 与随机模型相比, WBFi 模型在注入错误数量较少时检测到单粒子功能中断的概率较大。

由于随机模型下 FPGA 中各个可编程点的翻转概率相同, 因此错误注入时, 不同种类的可编程点发生翻转的数量将正比于该种类可编程点在 FPGA 中的总量。而 WBFi 模型考虑了在给定 LET 值下不同种类的可编程点具有不同的翻转概率, 使查找表和 IOB 中的可编程点发生翻转的数量明显比随机模型多。对于经过三模冗余后的设计, 上述现象将导致 2 种模型检测到的单粒子功能中断次数存在较大差异。因为当单粒子翻转发生在查找表中, 特别是发生在作为表决器的查找表中时, 电路功能容易出现错误。而对于 IOB 紧张而没有对 IOB 使用三模冗余的设计, 单粒子翻转发生在 IOB 中易于造成单粒子功能中断。由于随机模型没有权重设置, 查找表和 IOB 中的可编程点翻转通常较少, 因此测出的 FPGA 抗辐射性能较真实辐射实验乐观, 存在一定误差。而 WBFi 模型解决了该问题, 使错误注入模拟更符合真实辐射实验, 对 FPGA 抗辐射性能的评估也更准确。

4 结束语

本文根据辐射实验的结果, 提出一种基于权重的错误注入模型, 以更准确地模拟 FPGA 的抗辐射性能。该模型不依赖具体硬件结构, 具有很好的通用性。相比文献[2]和文献[3]采用的错误注入系统, 本文提出的错误注入模拟平台充分利用了通用 FPGA 支持的动态局部重配置技术和 JTAG 边界扫描技术, 能以更低的成本实现错误注入。(下转第 226 页)