

半侵入式激光探针装备故障注入技术研究及应用

张西山¹, 马英起², 闫鹏程¹, 连光耀¹, 李会杰¹

(1. 中国人民解放军 32181 部队, 西安 710032;

2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 针对装备大规模集成电路测试性验证与评估需求, 突破传统方式的故障注入难、耗资耗时等限制, 开展半侵入式装备激光探针故障注入技术研究及应用; 首先, 研究了装备传统物理故障注入技术, 分析了脉冲激光瞬态故障注入方式的可行性及作用机理; 然后, 建立了脉冲激光瞬态故障注入的能量传输模型, 提出了基于线性传输和体积传输的脉冲激光能量计算方法; 最后进行了试验验证; 试验表明, 该方法成功实现了典型故障模式的准确复现, 可精确定位芯片内薄弱部位以指导装备优化设计。

关键词: 半侵入式; 激光探针; 故障注入; 装备

Research and Application on Equipment Fault Injection Technology of Semi-invasive Laser probe

ZHANG Xishan¹, MA Yingqi², YAN Pengcheng¹, LIAN Guangyao¹, LI Huijie¹

(1. Unit No. 32181 of PLA, Xi'an 710032, China; 2. National Space Science Center, Beijing 100190, China)

Abstract: To meet the requirements of testability verification and evaluation of equipment integrated circuit, break through the fault injection difficult, cost and time limits, it carried out research and application on equipment fault injection technology of non-invasive laser probe. The first, the equipment traditional physical fault injection technology is studied, the feasibility and mechanism of pulse laser transient fault injection are analyzed; Then, the energy transfer model of pulsed laser transient fault injection was established and the calculation method of pulse laser energy based on linear transmission and volume transmission is presented; Finally, the experimental verification was carried out. The test shows that the method successfully realizes the accurate reproduction of typical fault modes, it can precisely locate the weak spot inside the chip to guide the optimal design of equipment.

Keywords: semi-invasive; laser probe; fault injection; equipment

0 引言

大规模集成电路故障注入主要采用两种方式: 1) 通过修改固件程序, 改变输出信号来模拟故障; 2) 通过应力疲劳试验来造成器件失效, 进而产生故障^[1-2]。通过模拟仅能对已知状态下的故障进行模拟, 故障模拟的主观性强, 难以代表新研系统的客观情况; 疲劳试验则更加接近实际, 能够模拟出新研系统未来使用过程中可能出现的真实故障状态。但是, 疲劳试验不仅所需时间长, 而且对元器件造成的损伤是不可逆的, 也造成了试验成本的提升。基于单粒子效应的非接触式故障注入技术, 利用单个脉冲激光的光致电离机制, 通过控制脉冲激光的能量尺寸和照射区域, 使集成电路芯片的敏感 PN 结发生单粒子现象, 实现特定功能区域的故障注入, 由于能量、区域和时间均精准可控,

且对器件的损伤较小, 故障注入结束后器件功能恢复正常, 可实现多次故障注入、精确定位装备集成电路薄弱部位^[3-5]。因此, 该技术所具有的试验时间短、成本低、可多次复现等优势, 是疲劳试验方法所无法实现的, 故障真实的优势是软件模拟方法所无法达到的。

1 装备传统物理故障注入技术研究

物理故障注入是指按照选定的故障模型, 人为的模拟故障并加载到特定的装备系统中加速系统的失效, 同时, 对注入故障后的系统进行观测和检查分析。电子装备故障注入需覆盖电气、物理、协议 3 个层次, 传统的物理故障注入方法包括外部总线故障注入、基于探针的故障注入、基于转接板的故障注入和拔插式故障注入等, 利用不同方法的独立或组合使用, 覆盖受试产品的全部故障模式。物

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2021-06-16。

作者简介: 张西山(1987-), 男, 河南淮滨人, 博士, 工程师, 主要从事电子装备测试性验证与故障诊断方向的研究。

通讯作者: 马英起(1983-), 男, 山东济南人, 副研究员, 主要从事航天器空间环境效应、激光与器件电路相互作用方向的研究。

引用格式: 张西山, 马英起, 闫鹏程, 等. 半侵入式激光探针装备故障注入技术研究及应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 13-15, 30.

理故障注入的原理如图 1 所示。一个系统由 n 个被测单元组成, 在进行故障注入时, 根据确定的故障样本, 利用故障注入系统模拟故障将故障注入到系统相应部分, 以造成系统的故障, 进而来验证系统的自动测试设备 (ATE) / 机内测试设备 (BITE) 的各项测试性指标。

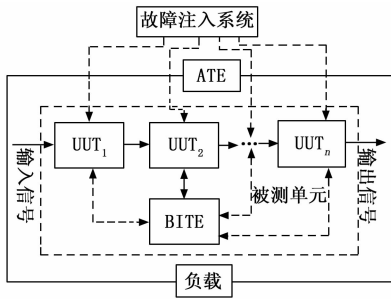


图 1 物理故障注入原理图

传统物理故障技术能够实现电子系统绝大部分故障模式的复现, 但对于集成度较高的 FPGA 等大规模集成电路故障模式复现的效果不佳, 主要原因是 FPGA 集成度高, 内部节点直接访问受限, 物理信号难以有效加载。

2 半侵入式激光探针装备故障注入技术

2.1 半侵入式脉冲激光瞬态故障注入方式的可行性

半侵入式脉冲激光瞬态故障注入方式通过激光模拟单粒子效应来实现。单粒子效应是由高能粒子与半导体材料中的靶原子发生碰撞电离形成电荷密度极高的电离径迹 (大量电子—空穴对), 被器件敏感 PN 结收集, 导致器件工作状态、逻辑状态、输出电平、功能受阻等发生变化或损伤的现象。其中, 产生单粒子效应的关键诱因是高能粒子在器件内部引入了额外的电子—空穴对。传统的单粒子效应模拟源为粒子加速器提供的重离子、质子、中子源等。但这些模拟方法还存在着实验测试资源相对较少、时间花费大、操作繁琐、具有辐射等问题。相比较而言, 激光模拟和重离子模拟在半导体器件输出端能够产生相近的单粒子效应电学特征, 且具有诸多重离子实验无可比拟的优势。

重离子单粒子效应和脉冲激光单粒子效应的微观实质都可分为两个过程: 电荷产生和电荷收集, 两者的物理过程是相同的。脉冲激光能够模拟空间高能粒子在器件中产生单粒子效应, 是由于聚焦后的单个激光脉冲能够通过光致电离的作用机制, 在器件内部产生高电荷密度的电离径迹 (大量额外的电子—空穴对), 被器件敏感 PN 结收集后可产生同高能粒子作用结果相同的单粒子现象^[6-7]。脉冲激光模拟单粒子效应的发生和采用的脉冲激光的波长有关, 必须要满足一定的条件: 1) 光子能量必须要大于被照射材料的禁带宽度, 发生光致电离作用; 2) 激光必须能穿透被照射材料到达敏感区域, 从而诱导单粒子效应的发生。因此, 可通过脉冲激光模拟单粒子效应使集成电路芯片发生故障, 实现故障模式的生成; 同时, 可避免传统物理故障

注入对器件造成的物理损伤。

2.2 半侵入式脉冲激光瞬态故障注入的能量传输模型

对于工艺尺寸大、集成度较低的器件, 可采取脉冲激光正面照射的方法产生单粒子效应。但考虑到脉冲激光很难穿透大多数器件金属布线层的特性, 试验中均采用从器件硅衬底背部进行辐照, 激光耦合传输过程如图 2 所示, 脉冲激光从故障注入装置发出, 光束经过光学系统和器件介质层的两次耦合, 聚焦在敏感区位置, 通过对故障注入器进行调焦操作, 可改变焦面光斑大小和能量分布。主要作用过程是将单个脉宽为皮秒量级、束斑为微米量级的激光脉冲, 等效为单个高能重离子, 通过光致电离作用在半导体材料中产生电子—空穴对, 实现脉冲激光模拟重离子诱发单粒子效应^[8-9]。

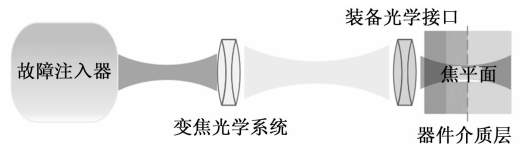


图 2 脉冲激光从器件背部辐照示意图

依据 Beer 定律, 脉冲激光在硅材料中的传输衰减特性, 满足能量随入射深度的变化符合指数衰减规律。因此, 为模拟重离子的单粒子效应, 波长的选择应该使得激光脉冲在半导体材料中有足够的穿透深度, 才能保证有足够的激光能量可达到器件的敏感区附近触发单粒子效应。

2.3 基于线性传输和体积传输的脉冲激光能量计算

LET (linear energy transfer, 线性能量传输) 值是重离子产生单粒子效应的定量描述, 对于激光脉冲, ELET (equivalent linear energy transfer, 等效线性能量传输) 为脉冲激光单粒子效应的定量描述, 是指脉冲激光故障注入试验中, 在试验对象内部灵敏区域内产生的电荷数量能够达到与高能粒子相同的作用结果^[7,10]。

当半导体器件掺杂程度和激光强度都不太高时, 半导体器件对光子的吸收与激光强度呈线性关系。线性吸收机制条件下, 激光脉冲的 ELET 值可表述为:

$$ELET = \frac{\lambda \alpha E_{\text{ion}}}{hc \rho_{\text{ion}}} E_0 \exp(-\alpha x) = \frac{E_{\text{ion}}}{hc} \cdot \frac{\alpha}{\rho} E_0 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

其中: λ 为激光波长, h 为 Planck 常数, c 为光速, α 为硅材料吸收系数, E 为激光的脉冲能量。 E_0 为入射激光脉冲的能量, $E_{\text{ion}} / (hc/\lambda)$ 项为重离子与脉冲激光产生一个电子—空穴对所需能量的比值。

当脉冲激光光斑尺寸与试验对象敏区域尺寸相近甚至超过覆盖的情况下, 再用 ELET 来评价脉冲激光模拟单粒子效应试验测试过程就存在误差。为此, 借鉴线性能量传输计算等效 LET 的方法, 将脉冲激光传输路径中照向试验对象灵敏区域中单位体积内的能量为等效体积能量传输, 定义为:

$$VLET = \frac{dE}{\rho dV} = \frac{ELET}{M_{gd} S_{sv}} \quad (2)$$

其中: S_{sv} 为脉冲激光传输路径中照向试验对象灵敏区域的径向体面积, M_{gd} 为脉冲激光径向向高斯分布的调制因子。在实际计算过程中, 当试验对象灵敏区的面积远远小于脉冲激光径向尺寸时, 可直接通过计算试验对象灵敏区的面积来获得 S_{sv} 值。

3 半侵入式激光探针的典型芯片故障注入试验

3.1 故障注入试验原理

非侵入式激光故障注入试验原理如图 3 所示, 主要包括脉冲激光扫描及测绘控制单元、脉冲激光有效能量计算控制单元、检测系统接口及激光外触发控制单元和试验监控单元等。脉冲激光由激光外触发模块发出, 经过变焦光学系统聚焦成微剂量级光斑照射到待测试器件 (DUT) 内部的有源区, 通过脉冲激光注入量及扫描方式控制模块实现对 DUT 单粒子灵敏单元的高精度扫描。脉冲激光能量由能量调节控制模块进行调节, 并通过试验监控单元进行监测; 光斑位置和测试芯片图像通过高精度成像定位模块成于电脑上。系统集成控制软件完成其它各子系统的实时自动化软件控制, 能高效、可靠地完成器件单粒子效应故障注入试验。

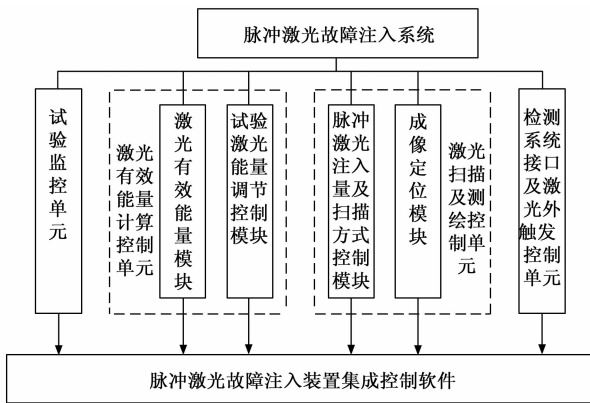


图 3 半侵入式激光探针故障注入系统原理框图

3.2 典型芯片故障注入试验

1) 扫描方法。首先将试验电路板固定于激光脉冲故障注入试验平台上, 通常将试验电路板的长 a 对应 CCD 成像的 Y 轴, 宽 b 对应 CCD 成像的 X 轴, 试验电路板 CCD 成像的左下角作为坐标轴原点, 即扫描起点。进行激光脉冲故障注入试验时, 为使激光覆盖扫描试验电路板, 需将使激光脉冲故障注入试验平台按下述步骤进行周期性的移动, 共移动 $b/10$ 个周期。

(1) 沿 -Y 轴移动距离 $(a+50) \mu\text{m}$; (2) 沿 -X 轴移动 $5 \mu\text{m}$ (X 轴步长); (3) 沿 +Y 轴移动距离 $(a+50) \mu\text{m}$; (4) 沿 -X 轴移动 $5 \mu\text{m}$ 。激光相对三维移动台作反方向运动, 相对扫描方式如图 4 所示。

2) 激光注量。激光注量定为 $4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$, 即单个激光

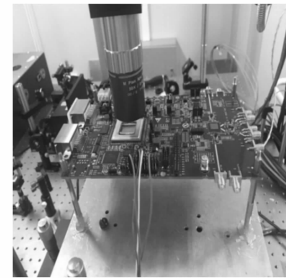
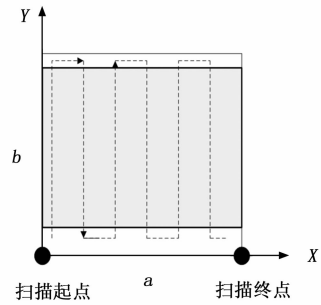


图 4 激光相对扫描方式示意图

的 X 轴和 Y 轴步长都为 $5 \mu\text{m}$, 其中 X 轴步长为直接设定。三维移动台沿 Y 轴是匀速移动, Y 轴步长由激光频率和三维移动台移动速度决定, 设定激光频率为 $1\,000 \text{ Hz}$, 三维移动台移动速度为 $5\,000 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则 Y 轴步长满足 $5 \mu\text{m}$ 要求。激光注量相关参数如表 1 所示。

表 1 激光注量相关参数表

激光频率/Hz	三维移动台		激光注量/ cm^{-2}
	移动速度/ $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	X 轴步长/ μm	
1 000	5 000	5	4×10^6

3) 激光能量。试验采用背面辐照方式。辐照时, 根据激光能量与重离子 LET 值对应关系计算得到扫描初始激光能量设定为 230 pJ (对应 LET 值为 $(10 \pm 2.5) \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$), 激光照射试验对象的能量取值为 $120 \sim 1\,500 \text{ pJ}$ (LET 值为 (5 ± 1.25) 至 $(60 \pm 15.5) \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$)。

4) 单粒子效应判定及处理方法。当试验样品工作时波形出现异常, 可以判定单粒子效应出现。发生单粒子效应时, 等待芯片扫描结束, 试验人员手动给测试电路断电, 同时关闭激光快门, 停止三维移动台的扫描程序。

5) 单粒子效应试验步骤:

(1) 打开脉冲激光器, 设定激光脉冲频率为 $1\,000 \text{ Hz}$, 激光器稳定运行;

(2) 将激光聚焦到器件正面, 测得器件长 a 宽 b , 通过移动三维移动台使激光光斑定位于试验器件显微成像的右下角, 并作为扫描原点;

(3) 试验器件加电, 记录工作电压;

(4) 设定初始激光能量为 120 pJ (对应 LET 值为 $(5 \pm 1.25) \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$), 设定三维移动台按照 (1) 中所述周期移动, 使激光以 $4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 注量覆盖扫描试验器件;

(下转第 30 页)