

一种新的 ESD 防护器件的多脉冲 TLP 仿真方法

丁扣宝, 黄大海

(浙江大学微电子与光电子研究所, 浙江杭州 310027)

摘要: 提出了一种新的集成电路 ESD 防护器件的 TLP 仿真方法, 该方法类似于实际的 TLP 测量过程, 在器件结构上施加一系列电流脉冲, 获得相应的电压-时间曲线。分别截取每个电流脉冲及其电压响应 70%~90% 部分的平均值, 取得的每一对电压和电流平均值作为 $I-t$ 曲线上的一点, 从而得到电流-电压特性曲线。在此基础上, 不仅可得到触发电压 V_{t1} 和维持电压 V_h , 而且可以获取二次击穿电流 I_{t2} 。对 LSCR 的仿真结果表明仿真结果与测试结果符合的很好。

关键词: 静电放电; 仿真; 多脉冲

中图分类号: TN302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)05-1016-03

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.030

A Novel Multi-Pulse TLP Simulation for ESD Protection Device

DING Kou-bao, HUANG Da-hai

(Institute of Microelectronics and Optoelectronics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A novel TLP simulation method for ESD protection device in integrated circuit is proposed, which is similar with the real TLP process. By imposing series of current pulses on the device structure, the corresponding voltage vs. time curves are obtained. The average current value in the range of 70%~90% time for each $I-t$ curve is calculated, and so is the average voltage value, and hence the simulated $I-V$ curve can be obtained, from which not only the trigger voltage and the holding voltage, but also the second breakdown current can be evaluated. The simulation results for LSCR fit well with the test one, from which the validity of this method can be verified.

Key words: ESD(ElectroStatic Discharge); simulation; multi-pulse

1 引言

ESD(ElectroStatic Discharge, 静电放电)失效是影响集成电路芯片可靠性问题的重要因素之一^[1,2], 因此需要设计相应的 ESD 防护器件^[3,4]。高效的设计需要仿真技术的支持^[5,6], 但 ESD 防护器件电流-电压($I-V$)特性的仿真极为困难。

ESD 防护器件 $I-V$ 特性的仿真主要有三种方式: DC 仿真、TLP(Transmission Line Pulse, 传输线脉冲)仿真和混合模式仿真^[7~9]。DC 仿真速度虽快, 但不一定能正确地对 ESD 事件进行仿真。通常的单脉冲 TLP 仿真在待仿真器件上施加单一电流脉冲^[10], 但由于电压过冲效应, 仿真的触发电压(V_{t1})和维持电压(V_h)与测试结果相差较大, 特别是不能正确地对二次击穿电流(I_{t2})进行仿真。混合模式仿真虽比 TLP 复杂, 但也不能提供更多的 $I-V$ 特性信息。

本文提出一种新的 TLP 仿真方法, 它类似于实际 TLP 测量过程, 在待仿真器件上加一系列幅值递增的电流脉冲, 通过瞬态仿真得到一系列的电压响应, 在此基础上获取的 $I-V$ 特性曲线, 能提取 ESD 防护器件的关键参数(如 V_{t1} , V_h 和 I_{t2})。

2 仿真方法

2.1 单脉冲 TLP 仿真

以图 1 所示的 LSCR(Lateral SCR, 横向可控硅)为例说明, 其中 $D1$ 是 $1.5\mu\text{m}$, $D2$ 是 $0.5\mu\text{m}$, $D3$ 是 $0.6\mu\text{m}$, $D4$ 是 $1\mu\text{m}$ 。仿真软件采用 ISE TCAD。各层掺杂浓度分布如表 1 所示。

所加电流脉冲如图 2 所示, 上升沿为 10ns, 持续时间为 100ns, 下降沿为 10ns。在器件两端加上上述波形之后, 通过瞬态仿真可以得到电压响应, 然后将电压和电流绘制成相关曲线。图 3 为 TLP 仿真得到的 $I-V$ 特

性,它与测试结果只是部分吻合,特别是它不能正确地提取 I_2 值.因此单脉冲 TLP 波形瞬态仿真只适用于观察各个关键参量在不同情况下的变化趋势,而不能用于准确评估各个关键参量的数值.

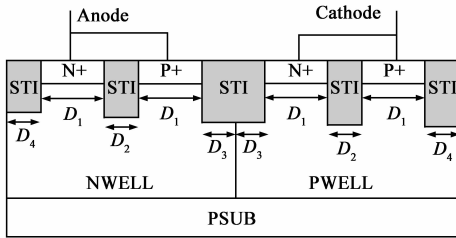


图1 LSCR剖面示意图

表 1 各层掺杂浓度分布

	PSUB	NWELL	PWELL	N +	P +
掺杂浓度 (cm^{-3})	1×10^{15}	3.7×10^{17}	2.6×10^{17}	5.1×10^{20}	2.4×10^{20}

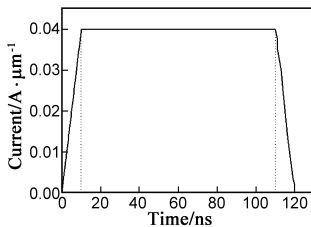


图2 单脉冲TLP瞬态仿真电流波形

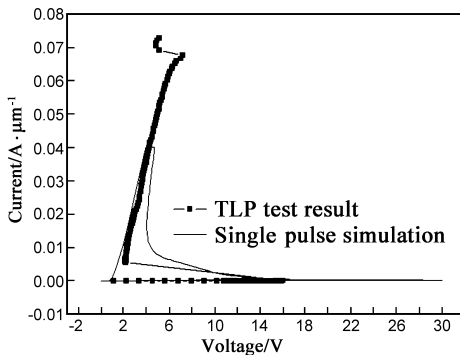


图3 单脉冲TLP瞬态仿真结果与TLP实测结果的对比

2.2 多脉冲 TLP 仿真

完全类似于 TLP 测试的实际过程,待仿真器件两端加一系列具有幅值递增的电流脉冲,上升沿时间为 10ns,持续时间为 100ns,如图 4 所示(SCR 触发时电流大约在 $10^{-4} \text{A}/\mu\text{m}$ 的量级;SCR 回滞到电压最低点的时候,其电流大约在 $10^{-3} \text{A}/\mu\text{m}$ 的量级.因此在仿真触发电压和维持电压时分别施加 $10^{-4} \text{A}/\mu\text{m}$ 量级的电流和 $10^{-3} \text{A}/\mu\text{m}$ 量级的电流).每个电流脉冲下分别通过瞬态仿真得到一系列的电压响应,如图 5 所示.分别截取每个电流脉冲及其电压响应 70% ~ 90% 部分的平均值,取得的每一对电压和电流平均值作为 $I - V$ 曲线上的一点,这一系列点用平滑曲线相连,得到 $I - V$ 曲线,将

其与 TLP 测试结果放在一起,如图 6 所示(“—”以下部分).可见,多脉冲 TLP 波形仿真的触发电压和维持电压分别为 15.69V 和 2.03V, TLP 测试的触发电压和维持电压分别为 16.00V 和 2.16V,误差分别为 1.94% 和 6.02%,结果非常吻合,这表明多脉冲 TLP 波形仿真方式能准确预测器件的触发电压和维持电压.

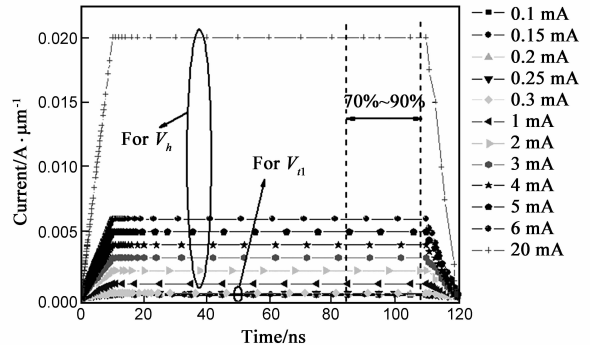


图4 多脉冲TLP瞬态仿真电流波形

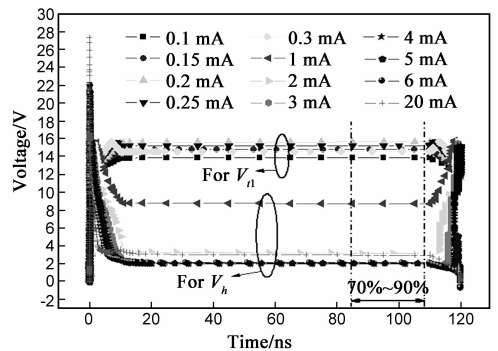


图5 瞬态仿真得到的一系列电压响应

I_2 的提取相对复杂^[2,5]. DC 模拟建立在热平衡方程基础上,但事实上,ESD 事件发生时,是没有热平衡的.因此,DC 模拟对 I_2 不再有效.非平衡仅能通过瞬态模拟实现^[11].

在图 6 基础上,继续在器件两端施加 $0.04 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.05 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.06 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.066 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.068 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.07 \text{A}/\mu\text{m}$ 、 $0.08 \text{A}/\mu\text{m}$ 的电流脉冲,以相同的方式得到 7 个 (I , V) 点,与前面得到的 12 个点一起,绘出完整 $I - V$ 曲

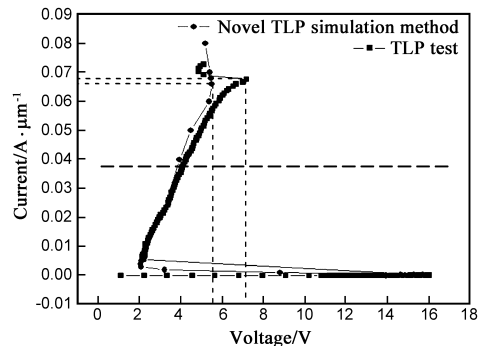


图6 多脉冲TLP波形仿真结果与TLP测试结果的比较

线,如图 6 所示,曲线在电流为 $0.066\text{A}/\mu\text{m}$ 时发生二次回滞,此值即为 I_{t2} ,而测试结果在 $0.068\text{A}/\mu\text{m}$ 时发生二次回滞,误差仅为 2.94% . 此为二次击穿判定方法之一. 表 2 为改变样品尺寸后得到的仿真和测试结果,二者的一致性表明了新方法的有效性.

表 2 LSCR 中 $D1$ 为 $2.5\mu\text{m}$ 时的结果

	触发电压 V_{t1} (V)	维持电压 V_h (V)	二次击穿电流 I_{t2} ($\text{A}/\mu\text{m}$)
仿真值	15.98	2.28	0.072
测试值	16.14	2.47	0.079
误差	0.16(0.99%)	0.19(7.69%)	0.007(8.86%)

3 结论

本文提出了一种新的 TLP 仿真方法,不仅可准确仿真 V_{t1} 和 V_h ,而且也可以仿真 I_{t2} ,而后者是 DC 仿真所不能得到的. 通过在器件结构上施加一系列电流脉冲,可获得相应的电压-时间曲线. 分别截取每个电流脉冲及其电压响应 $70\% \sim 90\%$ 部分的平均值,取得的每一对电压和电流平均值作为 $I-V$ 曲线上的一点,取得的一系列点用平滑曲线相连,得到 $I-V$ 曲线,从该曲线上,不仅可准确仿真 V_{t1} 和 V_h ,而且也可以仿真 I_{t2} . 对 LSCR 的仿真结果表明仿真结果与测试结果符合得很好.

参考文献

- [1] Salcedo J A, et al. TCAD methodology for design of SCR devices for electrostatic discharge (ESD) applications [J]. IEEE Trans on ED, 2007, 54(4): 822 - 832.
- [2] Salamero C, et al. TCAD methodology for ESD robustness prediction of smart power ESD devices [J]. IEEE Trans on DMR, 2006, 6(3): 399 - 407.
- [3] Stricker A D, et al. Characterization and optimization of a bipolar ESD-device by measurements and simulations [J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39(11): 1563 - 1577.
- [4] Jiang L, et al. Simulation models of ESD event in ICs [A]. Proceedings. 6th International Conference on Solid - State and Integrated-Circuit Technology [C]. Shanghai, 2001. Vol. 2, 990 - 993.

- [5] Esmark K. Device simulation of ESD protection elements [D]. Swiss Federal Instituts of Technology, Zurich, 2001.
- [6] Fankhauser B, et al. Using device simulations to optimize ESD protection circuits [A]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Santa Clara, 2004, Vol. 3, 963 - 968.
- [7] Cui Q, et al. Robustness evaluation of ESD protection devices in NEMS using a novel TCAD methodology [A]. 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems [C]. Sanya, 2008, 41 - 44.
- [8] Feng H, et al. A mixed-mode ESD protection circuit simulation-design methodology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(6): 995 - 1006.
- [9] B. Li, et al. An ESD Protection Device Simulation-Design Methodology based on MEDICI [A]. 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology [C]. Shanghai, 2006, 1358 - 1360.
- [10] Wang A Z, et al. A study of NMOS behavior under ESD stress: simulation and characterization [J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6 - 8): 1183 - 1186.
- [11] Fichtner W, et al. TCAD software for ESD on-chip protection design [A]. IEDM Technical Digest International [C]. Washington, 2001. 311 - 314.

作者简介



丁扣宝 男, 1965 年生于江苏东台. 浙江大学微电子与光电子研究所副教授. 研究方向为微电子技术.

E-mail: dingkb@zju.edu.cn

黄大海 男, 1986 年生于浙江温州, 浙江大学微电子学与固体电子学硕士研究生, 现在上海 BCD 工作.