

文章编号: 1001-4322(2009)04-0565-04

集成电路高功率微波易损性预测评估模型*

方进勇^{1,2}, 张治强², 黄文华², 江伟华¹

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 介绍了集成电路高功率微波易损性的基本概念, 给出了利用人工神经网络建立集成电路高功率微波易损性预测评估模型的基本步骤, 通过一个实例, 对预测评估模型的有效性进行了检验。实践表明: 人工神经网络作为一个有效工具, 可以较好地应用到集成电路高功率微波易损性预测评估工作中。

关键词: 高功率微波; 易损性评估模型; 集成电路; 人工神经网络

中图分类号: TN051 **文献标志码:** A

集成电路高功率微波(HPM)易损性效应研究是 HPM 效应研究中一项重要的基础性研究工作^[1-3]。HPM 对集成电路作用基本规律的研究可为电子器件抗 HPM 加固提供必要的技术参考。由于电子设备都是由多个集成电路及分立元件组成的系统, 故集成电路 HPM 易损性规律对电子系统的整体加固也有重要的参考价值。目前, 进行集成电路 HPM 易损性研究的基本方法是微波注入效应实验。在获取一定效应数据后, 有必要对这些效应数据进行分析整理, 探索其中的内在物理规律, 从而对相似的效应事件结果做出预测和评估。一般较常用的数据处理方法是数据拟合法, 这种方法较为简单和直观, 但在数据拟合的过程中可能掺杂过多的人为因素。人工神经网络是当今智能控制领域的热门工具, 它已在智能控制^[4]、模式识别^[5]、信号处理^[6]等多个领域得到广泛应用。本文将人工神经网络, 应用到集成电路 HPM 易损性预测评估模型的建立过程中, 目的在于探索一条新的效应数据处理途径, 提高集成电路 HPM 易损性预测评估的精度。

1 集成电路 HPM 易损性预测评估模型的建立

根据 HPM 脉冲参数及实验条件, 选择微波频率、脉冲重复频率、脉冲宽度、注入功率、反射系数、器件工作电压等作为预测评估模型的输入参量, 确定器件损伤概率为模型的输出参量, 建立如图 1 所示的模型。

在这一模型中, 在同等损伤概率下, 注入功率可能随实验的条件不同而出现差异, 这主要是由于器件在不同实验条件下反射系数会出现变化。因此, 用器件净吸收功率作为模型的直接参量代替注入功率和反射系数较为合适。吸收功率 = 注入功率 × (1 - 反射系数)。这样, 对于固定器件来说, 在其它条件相同时, 同等损伤概率的损伤功率阈值将与实验的注入形式无关。

建立的易损性模型要反映器件损伤概率 F 与吸收功率 P 、微波频率 f 、脉冲宽度 τ 、脉冲重复频率 f_{pps} 及器件工作电压 U_0 的关系, 即

$$F = f(P, f, \tau, f_{pps}, U_0) \quad (1)$$

在其它条件不变的情况下, 理论分析表明^[3]: 损伤概率应随着吸收功率、脉冲宽度、脉冲重复频率及工作电压的增大而增大, 随着微波频率的增大而减小。

图 2 为一组实测的集成电路器件损伤功率阈值分布及器件损伤概率随器件吸收功率变化曲线, 由图 2 可知: 器件损伤功率阈值基本呈正态分布, 且方差很小, 与文献[7]结果一致。

如果认为正态分布的方差可以忽略, 则可以认为器件的损伤概率近似 0/1 分布, 即

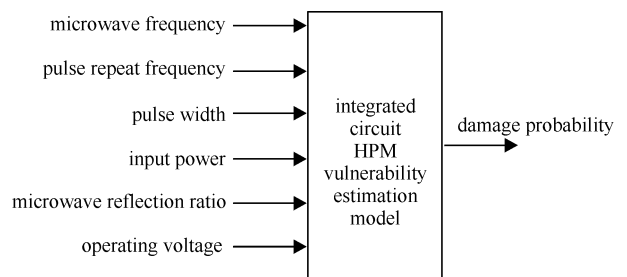


Fig. 1 Structure of the integrated circuit HPM vulnerability estimation model

图 1 集成电路器件 HPM 易损性预测评估模型框图

* 收稿日期: 2008-07-09; 修订日期: 2009-02-12

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 方进勇(1971—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波研究工作; f jy90@sina.com.cn.

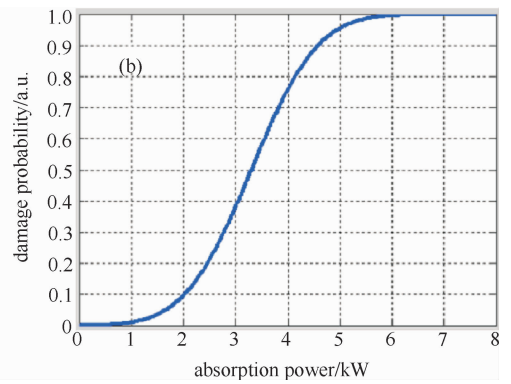
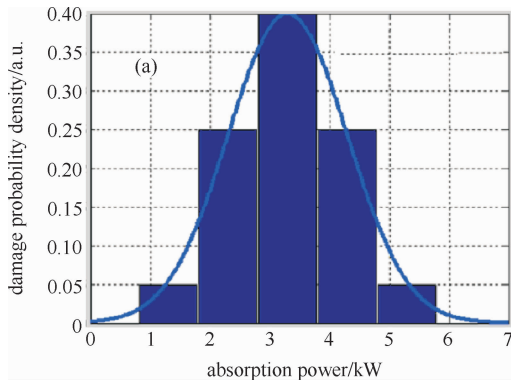


Fig. 2 Damage threshold distribution and the plot of damage probability vs absorption power for an integrated circuit

图 2 集成电路器件损伤功率阈值分布曲线及损伤概率随吸收功率变化曲线示意图

$$F(P) = \begin{cases} 0, & P < P_1 \\ 1, & P \geq P_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_1 是损伤功率阈值，本文设为器件损伤概率 50% 时的吸收功率。本文模型应当反映以下规律：在特定损伤概率下，损伤功率阈值随微波频率增大而增大，随脉冲重复频率、脉冲宽度及工作电压的增大而减小。这个模型是一个非线性系统，可以用神经网络实现。另外，由实验结果可知^[3]：集成电路器件在正常工作电压范围内，加电与不加电时，损伤功率阈值基本一致，即在正常工作电压范围内，器件损伤概率主要由注入微波脉冲参数决定。因此神经网络模型的结构可以简化，图 3 所示为简化的模型。

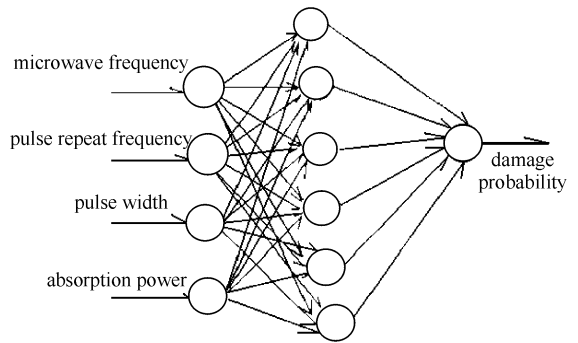


Fig. 3 Sketch map of the integrated circuit HPM vulnerability estimation model based on an artificial neural network

图 3 基于人工神经网络的集成电路器件 HPM 易损性预测评估模型

对于特定的器件，神经网络模型的预测精度是建立在大量的学习样本上，即建立在大量的实验数据基础上。

2 模型检验

通过集成电路微波注入效应实验，我们获取了集成电路 74LS00(GS-GD74LS00-9507)从第 3 管脚注入时的一些效应数据，如表 1 所示。表中对应的每组数据均分别为 10 只器件的微波注入效应实验结果。

对表 1 进行分析，我们探索采用了两种方法建立神经网络。首先是直接将学习样本设为 4 维变量(f, f_{pps}, P)，输出为 1 维变量，建立一个 3 层 BP(back propagation)网络。由于学习样本信息分散性大，神经网络经过较长时间的学习，结果仍与实际差距较大。为此，我们采取了另外一种信息分类处理的方式：将实验样本中的微波频率、脉冲重复频率、脉冲宽度及损伤概率随吸收功率变化信息分别用一个网络来实现。神经网络系统整体框图如图 4 所示。图 4 中的每一个网络都是一个类似于图 5 所示的结构。输入变量为 1 维，中间神经元 12 个，输出变量为 1 维，图中 W_{ij} 为前一层某神经元到后一层某神经元连接的权值。对于整个网络系统，输入变

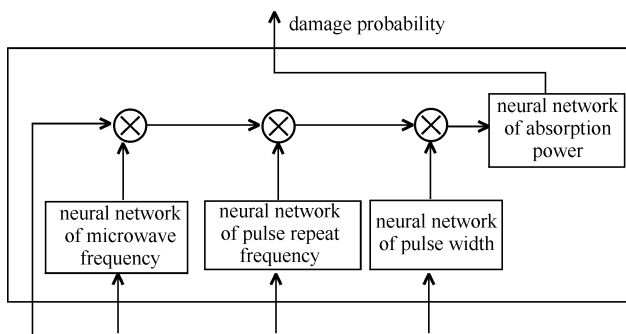


Fig. 4 Real structure of integrated circuit HPM vulnerability estimation model based on several neural networks

图 4 基于人工神经网络的集成电路器件 HPM 易损性预测评估模型框图

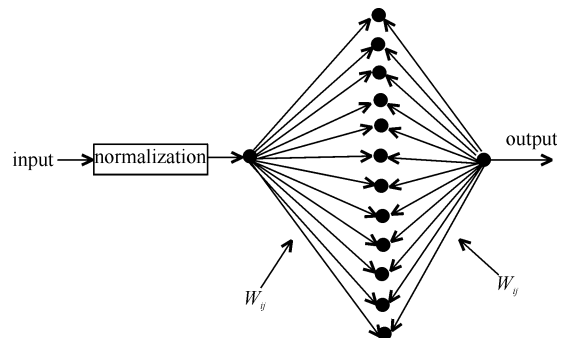


Fig. 5 Structure of the sub-neural network of the model in Fig. 4

图 5 神经网络易损性模型子网络结构示意图

量为 4 维,分别为吸收功率、微波频率、脉冲重复频率、脉冲宽度,输出变量为器件损伤概率,网络训练 2×10^4 次后输出结果与实际效应结果对比如表 2 及表 3 所示,其中 Y_{NN} 为神经网络输出值。

表 1 原始效应实验数据

表 2 总网络输出值与学习样本真实输出值对比表

Table 1 Experimental damage threshold of integrated circuit

No.	input sample				$F(P)$
	f/GHz	f_{pps}/Hz	τ/ns	P/kW	
1	9.4	1	600	5.55	1.0
2	8.9	1 000	1 500	2.17	1.0
3	2.9	50	30	13.50	0.6
4	2.9	50	30	16.10	1.0
5	2.9	50	70	0.43	0.0
6	2.9	50	70	0.79	0.2
7	2.9	50	70	1.38	0.2
8	2.9	50	70	2.23	0.6
9	2.9	50	70	3.66	1.0
10	2.9	50	100	1.38	0.0
11	2.9	50	100	2.23	1.0
12	2.9	50	300	1.10	0.8
13	2.9	50	300	1.83	1.0
14	2.9	50	500	0.40	0.4
15	2.9	50	500	0.69	0.8
16	2.9	50	500	1.12	1.0
17	2.9	10	120	1.66	0.8
18	2.9	10	120	2.46	1.0
19	2.9	10	1 500	0.11	0.4
20	2.9	10	1 500	0.18	1.0

Table 2 Experimental damage threshold of the samples used to train the network vs output of the neural network system

No.	input sample				$F(P)$	Y_{NN}
	f/GHz	f_{pps}/Hz	τ/ns	P/kW		
1	9.4	1	600	5.55	1.0	1.0
2	8.9	1 000	1 500	2.17	1.0	1.0
3	2.9	50	30	13.50	0.6	0.93
4	2.9	50	30	16.10	1.0	0.99
5	2.9	50	70	0.43	0.0	0.01
6	2.9	50	70	0.79	0.2	0.04
7	2.9	50	70	1.38	0.2	0.20
8	2.9	50	70	2.23	0.6	0.62
9	2.9	50	70	3.66	1.0	0.99
10	2.9	50	100	1.38	0.0	0.62
11	2.9	50	100	2.23	1.0	0.98
12	2.9	50	300	1.10	0.8	0.60
13	2.9	50	300	1.83	1.0	0.99
14	2.9	50	500	0.40	0.4	0.16
15	2.9	50	500	0.69	0.8	0.59
16	2.9	50	500	1.12	1.0	0.98
17	2.9	10	120	1.66	0.8	0.90
18	2.9	10	120	2.46	1.0	1.0
19	2.9	10	1 500	0.11	0.4	0.49
20	2.9	10	1 500	0.18	1.0	0.97

对应于非学习样本(检测样本),对比情况如表 3 所示。

表 3 总网络输出值与检测样本真实输出值对比表

由表 2 可知:神经网络系统能够较正确地反映学习样本的真实情况。由表 3 可知:集成电路 HPM 易损性预测评估模型对与学习样本类似的效应事件具有一定的预测能力。

Table 3 Experimental damage threshold of the samples without being trained vs output of the neural network system

No.	input sample				$F(P)$	Y_{NN}
	f/GHz	f_{pps}/Hz	τ/ns	P/kW		
1	9.4	1 500	600	5.55	1.0	1.0
2	2.9	1 000	30	16.10	1.0	1.0
3	4.8	1	600	5.55	1.0	1.0
4	7.4	50	70	3.66	<1.0	0.28
5	2.9	50	50	3.66	<1.0	0.24
6	2.9	50	90	3.66	1.0	1.0
7	2.9	50	70	2.00	0.2~0.6	0.58
8	2.9	50	70	3.00	0.6~1.0	0.92

3 结束语

本文介绍了利用人工神经网络建立集成电路 HPM 易损性预测评估模型的基本过程,并利用一个实例对建立的模型进行了检验。结果表明:人工神经网络方法可以作为 HPM 效应数据处理

的一条新途径。需要强调的是:预测评估模型的预测评估精度与网络学习样本(实验数据)的完备性及精度相关,只有具有较为完善的实验数据,预测评估模型才能从物理本质上反映集成电路器件 HPM 易损性的内在规律^[8];同时,针对某一类器件建立预测评估模型显然是不够的,只有建立起基于概率统计的预测评估系统,才能从根本上对集成电路器件 HPM 易损性物理规律有一个更为全面的预测。

参考文献:

[1] 李平,刘国治,黄文华,等. 半导体器件 HPM 损伤脉宽效应机理分析[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(3): 353-356. (Li Ping, Liu Guozhi, Huang Wenhua, et al. The mechanism of HPM pulse-duration damage effect on semiconductor component. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3): 353-356)

[2] 方进勇,刘国治,李平,等. 高功率微波脉冲宽度效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(5): 639-642. (Fang Jinyong, Liu Guozhi, Li Ping, et al. Experimental study of the high power microwave pulse-width effect. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 639-642)

- [3] 方进勇, 刘国治, 乔登江. 集成电路高功率微波效应手册专辑[J]. 抗核加固, 2002, **19**(2): 1-166. (Fang Jinyong, Liu Guozhi, Qiao Dengjiang. Special edition for the manual of integrated circuit's high power microwave effect. *Kanghe Jiagu*, 2002, **19**(2): 1-166)
- [4] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 5-10. (Yuan Cengren. Theory and application of artificial neural network. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 5-10)
- [5] 赵振宇. 模糊理论和神经网络的基础与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 2-6. (Zhao Zhenyu. Theory and application of neuro-fuzzy. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 2-6)
- [6] 张智星. 神经-模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 10-20. (Zhang Zhixing. Neuro-fuzzy and soft computing. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 10-20)
- [7] 方进勇, 申菊爱, 杨志强, 等. 集成电路器件微波损伤效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 591-594. (Fang Jinyong, Shen Juai, Yang Zhiqiang, et al. Experimental study on microwave vulnerability effect of integrated circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 591-594)
- [8] 方进勇, 王建国, 乔登江. 模糊神经网络系统在微波效应数据处理中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2): 291-294. (Fang Jinyong, Wang Jianguo, Qiao Dengjiang. Applications of neuro-fuzzy system to data processing of microwave effects. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 291-294)

High power microwave vulnerability estimation model of integrated circuit

Fang Jinyong^{1,2}, Zhang Zhiqiang², Huang Wenhua², Jiang Weihua¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

Abstract: The basic concept of the integrated circuit high power microwave(HPM) vulnerability was introduced as well as the main establishment processes of an integrated circuit high power microwave vulnerability estimation model. It is demonstrated by an example that the neural network is an effective method to evaluate high power microwave vulnerability effects of the integrated circuit.

Key words: high power microwave; vulnerability model; integrated circuit; artificial neural network