

· 自动化技术 ·

多重分形谱在集成电路动态电流故障诊断中的应用

张 健, 徐红兵, 王 情

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】系统阐述了多重分形的概念和多重分形谱的小波模极大值计算方法, 提出了一种新的基于动态电流 I_{DDT} 多重分形谱分析的集成电路故障诊断方法。该方法利用多重分形分析方法有效地提取信号的几何结构特征信息, 利用动态电流的多重分形谱分析来进行集成电路的故障诊断。使用Hspice电路仿真验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 故障诊断; Hspice仿真; 多重分形谱; 动态电流

中图分类号 TP407

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.03.014

Application of Multifractal Spectrum to Fault Diagnosis of Integrated Circuits Based on I_{DDT}

ZHANG Jian, XU Hong-bing, and WANG Qing

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract In this paper, the concept of multifractal spectrum and the computational method of wavelet maxima modulus of multifractal spectrum are firstly summarized. Then, a novel fault diagnosis algorithm for bridge faults and open faults of integrated circuits is presented based on the multifractal spectrum of transient power supply current (I_{DDT}). The proposed method explores the multifractal spectrum for achieving characteristics of geometry structure of signals, and utilizes the multifractal spectrum of I_{DDT} for fault diagnoses of integrated circuits. Finally, simulation experiments with Hspice demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words fault diagnosis; Hspice simulation; multifractal spectrum; transient power supply current

在集成电路的故障诊断中, 传统的逻辑功能测试能检测出数字电路的某些故障, 但同时也可能产生逻辑错误。此外, 逻辑测试对于门氧化短路、桥接故障等电路的物理缺陷是无能为力的, 因为这些缺陷可能在测试时不会产生任何逻辑错误, 而在实际使用中才出现故障^[1]。动态电流测试的概念由文献[2]提出, 该方法试图通过分析故障电路和无故障电路在两次稳态电流之间的变化过程中的差异来发现传统电流测试方法不能发现的故障。目前, 已有多种被证明行之有效的电流测试技术^[3-5]。

随着集成电路集成规模的增大, 电路结构也变得更加复杂, 使得集成电路的动态电流波形信号在一定尺度范围内都具有分形特征。利用分形几何理论, 从动态电流波形信号中提取几何结构特征, 为集成电路的故障诊断提供了一种新的思路。

1 多重分形谱及其小波计算方法

多重分形是定义在分形结构上的多个或无穷多

个具有不同奇异度指数 α 的概率的子集构成的非均匀分维分布的集合^[6], 利用谱函数描述了复杂分形体在不同层次中的特征。从几何的角度看, 组成分形集的若干个子集的标度、分形维数都不同。多重分形通过奇异谱函数 $f(\alpha)$ 定量刻画分形体由不同局部条件、或在演化过程中不同层次所导致的概率 P_i 在整个集合上的分布状况, 是对分形结构的复杂程度、不规则程度以及不均匀程度的度量。

1.1 多重分形的理论基础

在考察一个分形对象时, 若选定一个尺度为 r 、中心为 t 的体积元素 $B_t(r)$, 则对象的分形特征可用测度 $\mu(B_t(r))$ 随尺度 r 的变化情况来描述。其中, t 同时具有空间和时间的含义。当 $r \rightarrow 0^+$ 时, 测度 $\mu(B_t(r))$ 的定义为^[7]:

$$\mu(B_t(r)) = \int_{B_t(r)} d\mu(t') \sim r^{D\alpha} \quad (1)$$

同时, 如果 t 给定, 则测度 μ 的局部奇异度 $\alpha(t)$ 满足:

收稿日期: 2009-11-27; 修回日期: 2010-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(61004048); 部级预研基金

作者简介: 张 健(1978-), 男, 博士, 主要从事信号处理与控制方面的研究。

$$\mu(B_i(r)) \sim r^{\alpha(t)} \quad (2)$$

式(2)中的奇异度 $\alpha(t)$ 即为局部Hölder指数, 它反映了测度 μ 在给定 t 处的奇异性强度。 $\alpha(t)$ 越小, 测度 μ 也越小, 对应的奇异性则越强。

根据分形维数的定义, 用尺度为 r 的盒子覆盖测度 μ 的支集, 则盒子的数目 N 与尺度 r 成比例。对于一个给定的 α , 盒子数满足:

$$N_\alpha(r) \sim r^{-f(\alpha)} \quad (3)$$

式中, $f(\alpha)$ 称为奇异谱, 它反映了随着 r 趋近于零时盒子数 $N_\alpha(r)$ 的变化情况, 同时也描述了Hölder指数 $\alpha(t)$ 的统计分布状况。在文献[8]中, $f(\alpha)$ 被定义为当 $r \rightarrow 0^+$ 时, 支集在 t 处的Hausdorff维数:

$$f(\alpha) = d_H \{x \in \text{sup } \mu, \alpha(x) = \alpha\} \quad (4)$$

由式(4), 可以区分两种不同类型的奇异性测度。均匀测度的奇异谱为单独的一个点 $(\alpha_0, f(\alpha_0))$, 表明在当前测度空间中只有一种完全相同的奇异性, 它对应单重分形; 非均匀测度下谱函数 $f(\alpha)$ 通常为一个有限区间 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 的单峰状凸函数, 这种可以表示信号的不同奇异度的情况为多重分形测度。因此, $f(\alpha)$ 称为多重分形的奇异谱, 也称为多重分形谱。

1.2 多重分形谱的小波计算方法

多重分形谱的小波模极大值(wavelet transform modulus maximum, WTMM)计算方法源于配分函数 $Z(q, r)$ 。多重分形测度不仅考察分形体的不同尺度行为, 还考察不同统计时刻 q 的行为。因此, 对测度 μ 的支集的覆盖思想也可应用于不同的时刻, 这样就产生了配分函数的定义^[9]:

$$Z(q, r) = \sum_{i=1}^{N(r)} \mu_i^q(r), \mu_i = \mu(B_i(r)), q \in R \quad (5)$$

$$Z(q, r) \sim r^{\tau(q)} \quad r \rightarrow 0^+ \quad (6)$$

多重分形谱 $f(\alpha)$ 满足:

$$\tau(q) = \min_{\alpha} (q\alpha - f(\alpha)) \quad (7)$$

经过小波变换后的测度 μ_i 可由小波系数的模值表示为:

$$\mu_i(r) \equiv |W_\psi[s](x, a)| \quad (8)$$

式中, $W_\psi[s]$ 为信号 s 在基函数 ψ 下的小波变换; x 为在尺度 a 下的局部极大值对应的位置。由式(8)和式(5)可得到在WTMM方法中的配分函数^[10]为:

$$Z(q, a) = \sum_{\ell \in L(a)} \left(\sup_{(x, a') \in \ell} |W_\psi[s](x, a')|^q \right) \quad (9)$$

式中, $L(a_0)$ 为存在于尺度 a_0 的模极大值线的集合,

包含了所有尺度 $a \leq a_0$ 的模极大值。

由式(9)可以计算出WTMM的玻尔兹曼权^[11]为:

$$\hat{W}_\psi[s](q, \ell, a) = \frac{\left| \sup_{(x, a') \in \ell} W_\psi[s](x, a') \right|^q}{Z(q, a)} \quad (10)$$

玻尔兹曼权在每一条模极大值线上对应式(5)中的测度 μ_i 。综合上面的论述, 进而可以推导出:

$$\alpha(q) = \frac{\sum_{\ell \in L(a)} \ln \left| \sup_{(x, a') \in \ell} W_\psi[s](x, a') \right| \hat{W}_\psi[s](q, \ell, a)}{\ln a} \quad (11)$$

$$f(q) = \frac{\sum_{\ell \in L(a)} \hat{W}_\psi[s](q, \ell, a) \ln \hat{W}_\psi[s](q, \ell, a)}{\ln a} \quad (12)$$

2 电路故障诊断的 I_{DDT} 多重分形分析

2.1 I_{DDT} 信号多重分形谱的计算

多重分形谱的小波变换模极大值计算方法在实际应用中一般要经过信号小波变换, 寻找小波系数模极大值点, 连接各点得到模极大值线, 计算配分函数和计算多重分形谱这样几个步骤。其中, 信号的小波变换是首要的也是最关键的一步, 必须考虑小波基函数的选择、尺度的选取和连续小波系数的计算效率等问题。

通过小波变换进行奇异性检测, 小波基函数的消失矩应当比被检测信号高一阶以上。文献[9]提出可以用高斯函数的各阶导函数作为小波基。这样可以通过求导次数的变化得到期望消失矩的小波基, 且小波基的傅里叶变换还具有简单的数学形式。本文的计算选用Mexican Hat小波基, 它是高斯函数的二阶导数。由于检测得到的动态电流 I_{DDT} 信号通常是有限的离散信号, 尺度的变化也就只需要在有限范围内选择。本文的尺度选择从 $1 \sim N$ 按照对数变化取值, 其中, N 为 I_{DDT} 信号的离散点数。为了提高连续小波系数计算的效率和精度, 采用了先计算 I_{DDT} 信号和小波基函数二者傅里叶变换的乘积再取傅里叶反变换的方法来代替卷积运算。

在 I_{DDT} 信号检测过程中, 由于实际检测装置的限制, 往往会在得到的信号中引入噪声, 而噪声的奇异性经过小波变换后也会通过模极大值表现出来。噪声和信号的幅值差异较大时, 得到的检测信号在应用中才是有效的, 这种情况下反映噪声奇异性的模极大值会和正常信号相差一个数量级以上。

小波阈值去噪方法首先由文献[12]提出, 由于方法简单、计算量小、去噪效果较好, 因此得到了广泛的应用。在小波去噪方法中最重要的问题就是如

何选择阈值函数和阈值,不同的阈值函数体现了对小波系数的不同处理方法。常用的阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数两种,它们的基本思想都是去除小的小波系数,对大的小波系数进行收缩和保留。阈值的选取有很多方法,常见的有VisuShrink阈值、SUREShrink阈值、Minmax阈值、BayesShrink阈值等。

利用小波阈值去噪的思想,对检测信号模极大值点设定阈值门限可以有效地滤除噪声干扰,从而得到有用信号的更精确的模极大值线。通过模极大值线计算各尺度 a 下不同离散时刻 q 对应的配分函数,代入式(11)、式(12)就得到了反映 $f(\alpha)$ 随 α 变化关系的多重分形谱。

2.2 多重分形谱故障诊断算法

集成电路中的桥接故障往往表现为 I_{DDT} 信号中的突变;而开路故障使开路部分不对 I_{DDT} 信号产生影响,会减小信号的奇异性。这些影响都将在 I_{DDT} 信号的多重分形谱中反映出来,因而可以利用多重分形谱的计算来识别电路中的桥接、开路等故障。

为了便于实际中的应用,本文提出如下基于多重分形谱的集成电路故障诊断算法步骤。

1) 对正常电路的动态电流信号按照上文的方法计算得到正常电路的多重分形谱;

2) 根据电路各区域的延时差异对电路进行结构划分,用于故障定位;

3) 通过模拟仿真或实验检测计算出步骤2)中各部分发生桥接、开路故障时动态电流对应的多重分形谱,建立该电路的故障字典;

4) 选择一组测试向量对待测电路进行 I_{DDT} 检测,记录相关数据;

5) 对所记录的动态电流数据进行小波变换,搜索各尺度下动态电流小波系数的模极大值;

6) 根据小波系数模极大值计算多重分形谱,若与步骤1)中正常电路多重分形谱差异较大,确定为电路故障,并通过故障字典确定故障类型及定位故障区域;

7) 检查是否完成所测试向量的检测,若没完成,转至步骤4),若完成,继续下一步;

8) 合并步骤6)记录的所有故障即为待测电路的故障集合;

9) 结束。

上述算法中步骤1)~3)为故障检测前的准备,一般会在电路设计阶段完成。其中故障字典的建立在全

整个诊断的过程中是非常关键的,是故障识别和定位的重要依据,一般可以通过设计存在确定故障的电路以获取测量数据等方法来建立。步骤4)~6)为一组测试向量的检测过程,如果该向量可以有效地激发电路中的故障,那么就可以在步骤6)中识别和定位出被激发的故障。其中步骤5)和步骤6)集中体现了前面讨论的基本原理,是上述故障诊断算法的核心。步骤7)为检测过程中的过程控制语句,用以保证检测的完备性。步骤8)可以得到完成所有向量检测后的待测电路的全部故障集。

3 仿真研究

3.1 仿真工具和MOS模型

仿真采用Synopsys公司的Hspice 2007软件,该软件是IC设计中最常用电路仿真工具,也是目前业界在IC设计中使用最广泛的工具。Hspice软件能提供精确的电路仿真、完整的信号分析、高效的RF电路仿真和基于Verilog-A行为描述电路的仿真等功能,并且能完成业界标准化的规范化整合,全面支持工业标准的BSIM3和BSIM4等MOS模型。

Berkeley Short-Channel IGFET Model 1 (BSIM)系列模型是美国加州大学伯克利分校BSIM开发小组提出的MOS模型,BSIM3是Compact Model Council (CMC)公开发布的第一个标准模型。作为业界的标准,在BSIM3模型的第三个版本BSIM3v3中,引入了平滑曲线功能。该模型既考虑了各种窄沟道和短沟道效应,同时也考虑了垂直方向和横向非均匀掺杂对电压阈值的影响。该模型基本上较全面地考虑了当前工艺水平下主要物理效应的影响。在下面的仿真中,本文应用了由MOSIS网站提供的BSIM3v3模型的参数。

3.2 仿真电路

本文的电路仿真选择了ITC'97基准电路中的连续时间可变状态滤波器^[13],其电路图如图1所示。

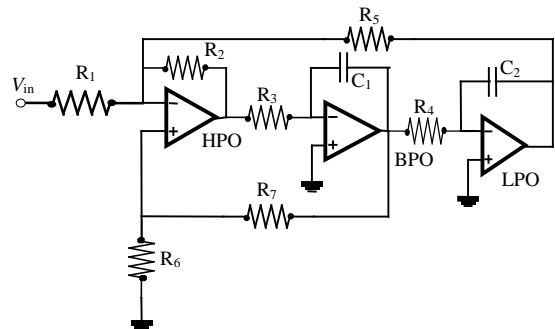


图1 State-Variable滤波器原理图

连续时间可变状态滤波器由3个运算放大器单

息,又能直接反映动态电流的局部奇异性信息,因而可以很好地应用于电路的故障诊断。为了有效地计算出动态电流的多重分形谱,选择小波模极大值方法,避开传统多重分形谱计算方法对计算速度和精度的影响,能够通过小波去噪有效抑制检测噪声对故障诊断结果的影响。

本文的故障诊断算法能够很有效地应用于单故障诊断情况,对于多故障情况则需考虑如何从故障字典中反映多故障在动态电流多重分形谱细节上的差异,因此目前该算法在多故障诊断中的应用还存在一定的局限性。下一步工作将重点研究不同故障类型或同类型不同位置的多故障对动态电流多重分形谱细节特征的影响,确定其对应关系,以便于更好地建立故障字典,进一步提高本文算法的实用性。

参 考 文 献

- [1] 陶丽芳, 马棋, 竺红卫. 集成电路故障诊断方法研究[J]. 计算机与现代化, 2009, 7(5): 26-28.
TAO Li-fang, MA Qi, ZHU Hong-wei. Research on methods of IC faults diagnosis[J]. Computer and Modernization, 2009, 7(5): 26-28.
- [2] MAKKI R, SHYANG-TAI S, NAGLE T. Transient power supply current testing of digital CMOS circuits[C]//International Test Conference Proceedings. [S.l.]: IEEE, 1995: 892-901.
- [3] HSU C L, HO M H, LIN C F. Novel built-in current-sensor-based IDDQ Testing scheme for CMOS integrated circuit[J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7): 2196-2208.
- [4] NIE M W, XU H B, ZHANG J. A new method for IDDT test of CMOS circuits[C]//International Conference on Communications, Circuits and Systems. [S.l.]: [s.n.], 2008: 1200-1203.
- [5] 王情, 徐红兵, 张健. 基于动态电流和小波分析的集成电路故障诊断[J]. 电子测量技术, 2008, 31(10): 128-163.
WANG Qing, XU Hong-bing, ZHANG Jian. Fault diagnosis method in IC chip based on IDDT waveform and wavelet analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(10): 128-163.
- [6] HALSEY T C, JENSEN M H, KADANOFF L P. Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets[J]. Phys Rev A, 1986, 33: 1141-1150.
- [7] AMEEDO A, BACRY E, MUZY J F. The thermodynamics of fractals revisited with wavelets[J]. Physica A, 1995, 213: 232-275.
- [8] RAND D. The singularity spectrum $f(\alpha)$ for cookie-cutters[J]. Ergod Th & Dynam Sys, 1989, 9(3): 527-541.
- [9] MUZY J F, BACRY E, AMEEDO A. The multifractal formalism revisited with wavelets[J]. Int Jnl Bif Chaos, 1994, 4: 245-302.
- [10] MUZY J F, BACRY E, AMEEDO A. Wavelets and multifractal formalism for singular signals: Application to turbulence data[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67: 3515.
- [11] RUSKAI M B, BEYKLIN G. Wavelets and their applications[M]. Boston, USA: Jones and Bartlett, 1992.
- [12] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptive via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81: 425-455.
- [13] KAMINSKA B, ARABI K, BELL I, et al. Analog and mixed-signal benchmark—first release[C]//IEEE International Test Conference. [S.l.]: IEEE, 1990: 183-190.
- [14] AARAJ N, NAZER A, CHEHAB A, et al. Transient current testing of dynamic CMOS circuits[C]//IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT'04). [S.l.]: IEEE, 2004: 231-239.

编辑 漆蓉