

# IC 缺陷轮廓分形维估计的小波方法

孙晓丽<sup>1</sup>, 郝 跃<sup>2</sup>, 宋国乡<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学理学院, 陕西, 西安 710071; 2 西安电子科技大学微电子学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 为了有效的进行集成电路成品率预报和故障分析, 与光刻有关的硅片表面缺陷通常被假定为圆形、椭圆或方形。然而, 真实缺陷的形貌是多种多样的, 它们的形状对集成电路的成品率估计有重要影响。本文讨论了缺陷轮廓所具有的分形特征, 并用小波变换的方法对其分形维数进行了估计, 估计结果与实例的特征相符, 从而为缺陷轮廓的表征和计算机模拟提供了新的特征参数。

**关键词:** IC 缺陷轮廓; 小波变换; 分形维

**中图分类号:** TN 406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 08-1485-03

## Estimating the Fractal Dimension of IC Defect Outline by Wavelet

SUN Xiaoli<sup>1</sup>, HAO Yue<sup>2</sup>, SONG Guoxiang<sup>1</sup>

(1 School of Science, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2 School of Microelectronics, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** For efficient yield prediction and inductive fault analysis of integrated circuits it is usually assumed that defects related to the photolithographic in the wafer surface have the shape of circular discs ellipse or squares. Real defects however exhibit a great variety of different shapes, their shapes usually play an extremely important role in the yield prediction. The fractal characterizations of real defect outlines are discussed and the fractal dimension is estimated by wavelet transform, the result is in agreement with the actual feature. So it provides new feature parameters for the characterization and computer simulation of defect outline.

**Key words** IC defect outline; wavelet transform; fractal dimension

### 1 引言

由于集成电路可制造性和容错设计的需要, 往往需要描述与电路失效有关的缺陷的分布与形貌, 尤其是与光刻有关的硅片表面缺陷的表征<sup>[1]</sup>. 缺陷出现的频率和缺陷粒径分布对电路故障分析是很重要的. 此外, 有关缺陷的统计数据还用于成品率估计<sup>[2]</sup>、制造工艺的优化、测试版图的生成及设计规则的确定. 但是, 为了计算方便, 缺陷轮廓通常被假设为圆形的或正方形的. 然而, 实际的缺陷的形貌是多种多样的. 传统的最大圆模型、最小圆模型及椭圆模型<sup>[3]</sup>均是用欧氏等效轮廓代替缺陷复杂的真实轮廓而进行建模处理的, 虽然经这样的近似处理可大大简化计算, 但在缺陷引起故障概率的预测中会引入很大的误差. 因此, 有必要利用新的方法去研究真实缺陷轮廓的建模问题, 从而也出现了一些新的方法<sup>[4]</sup>. 分形理论是描述不规则几何图形的强有力工具, 该理论可用来有效描述工程中遇到的多种多样的复杂图形<sup>[5]</sup>. 文献[6]提出了缺陷轮廓

具有分形特征, 那么分形特征参数一分形维的准确估计就显得非常重要了. 本文提出一种用小波变换来估计其分形维数的新方法.

本文首先指出了小波与分形的内在联系, 给出用小波变换来估计分形维数的方法, 然后对某一真实缺陷轮廓进行检验, 从而证明了本文方法的有效性.

### 2 小波与分形的多分辨分析

小波与分形分析都是近年来发展起来的非常有用的数学理论. 小波分析是基于簇由母波函数生成的“相似”函数, 即子波而展开的. 由这组相似函数的不同伸缩和平移构成平方可积函数空间  $L^2(\mathbb{R})$  的仿射构架, 甚至是正交基, 从而稳定地逼近任意给定的映射关系. 分形理论是描述具有无规则结构的复杂系统形态的一门新兴边缘学科, 研究的对象主要是一类具有“自相似性”、“自仿射性”的分形体, 其分形度量为维数. 就一条曲线而言, 从一条曲线的局部得到与整条曲线一样的细节, 则该曲线是具有分形特征的.

收稿日期: 2005-05-20 修回日期: 2006-04-05

基金项目: 国家 863 计划 VLSI 重大专项 (No. 2003AA1Z1630)

小波函数的定义使得它一出现就和分形理论有了不解之缘<sup>[7]</sup>. 小波分析总是从远到近观察形体, 具有放大和移位的功能, 与分形的本质—尺度变换是一样的, 所以自小波分析创立以来, 它在分形对象中的应用日益广泛. 小波分析的核心思想就是多分辨分析, 多分辨分析是从远到近观察形体, 首先注意物体最显著的特征—轮廓, 再慢慢注意其结构—线条, 最后逐步观察物体的纹理或细节. 这种识别过程体现了一种从低分辨到高分辨的原理及对目标进行分割的思想. 对分形的观察正是这样, 即通过从大到小的不同尺度变换, 在越来越小的尺度上观察越来越丰富的细节, 这也是从低分辨到高分辨的观察过程.

### 2.1 小波变换

定义 1 如果函数族  $\{\Psi_{k,n}(x)\}$  是  $L^2(R)$  (实数域或内积空间) 中的一个规范正交基, 且

$$\Psi_{k,n}(x) = 2^{k/2} \Psi(2^k x - n) \quad (1)$$

其中  $k, n \in Z$  (整数), 则称函数  $\Psi_{k,n}(x)$  为二进正交小波函数.

定义 2 设  $W_k$  是集合  $\{\Psi_{k,n}(x)\}$  线性张成在  $L^2(R)$  中的闭包.  $L^2(R)$  能分解成  $W_k$  的直和 (用符号 “ $\odot$ ” 表示), 相应的子空间为

$$V_k = \dots \odot W_{k-2} \odot W_{k-1} \quad (2)$$

且令  $\{\Phi_{k,n}(x)\}$  为  $V_k$  中的一个正交基.

对任意函数  $f_{k+1} \in V_{k+1}$ , 存在  $f_k(x) \in V_k$  和  $g_k(x) \in W_k$ , 使得

$$f_{k+1}(x) = g_k(x) + f_k(x) \quad (3)$$

则  $f_k(x)$  和  $g_k(x)$  分别可以唯一表示为:

$$\begin{cases} f_k(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{k,n} \Phi_{k,n}(2^k x - n) \\ g_k(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{k,n} \Psi_{k,n}(2^k x - n) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} c_{k,n} = (f_k, \Phi_{k,n}) \\ d_{k,n} = (g_k, \Psi_{k,n}) \end{cases} \quad (5)$$

由  $\{c_{k+1,n}\}$  求  $\{c_{k,n}\}$  和  $\{d_{k,n}\}$  称为二进小波分解变换; 由  $\{c_{k,n}\}$  和  $\{d_{k,n}\}$  求  $\{c_{k+1,n}\}$  称为二进小波重构变换;  $\{c_{k,n}\}$  与  $\{d_{k,n}\}$  分别称作函数  $f(x)$  的  $k$  尺度逼近谱和小波谱. 本文中  $f(x)$  即为  $\Gamma$  缺陷的轮廓曲线, 试验测量序列取其有限二进制离散形式, 记为:

$$\{f_N(n/2^N)\}$$

式中,  $N, n$  为正整数, 且  $1 \leq n \leq 2^N$ .

采用 Daubechies 的有限紧支撑正交小波基, 对离散序列  $\{f_N(n/2^N)\}$  运用取样函数法<sup>[8]</sup> 可得到初始逼近谱  $\{c_{N,n}\}$ , 通过 Mallat 分解算法<sup>[8]</sup> 便可得到  $k(k=N-1, N-2, \dots, 1)$  尺度上的尺度逼近谱  $\{c_{k,n}\}$  和小波谱  $\{d_{k,n}\}$ .

### 2.2 分形维数的估计

定理<sup>[9]</sup> 对有界连续函数  $f(x) \in L^2(R)$ , 则  $f(x) \in C^a$  的充要条件是  $\{c_{k,n}\}$  的小波变换  $d_{k,n}$  满足不等式:

$$|d_{k,n}| \leq E 2^{k(\alpha+1/2)} \quad (6)$$

式中,  $E$  为常数,  $0 < \alpha < 1$  等号成立时  $\alpha$  为分形系数, 函数  $f(x)$  的分形维数为:

$$D = 2 - \alpha \quad (7)$$

令  $E_{\min} \leq E$ , 对  $d_{k,n}$  取一范数<sup>[10]</sup>, 则式 (6) 变为

$$\sum_{n=1}^{2^k} |d_{k,n}| = E_{\min} 2^{k(\alpha+1/2)} \quad (8)$$

记

$$d_k^* = \frac{\sum_{n=1}^{2^k} |d_{k,n}|}{2^k} \quad (9)$$

对式 (8) 两边取对数, 得:

$$\lg d_k^* = \lg E_{\min} - k(\alpha + 1/2) \quad (10)$$

用最小二乘法求解式 (10) 得到最佳的  $E_{\min}$  和  $\alpha$  值, 从而利用 (7) 式便可得到曲线的分形维数  $D$ .

### 3 缺陷轮廓分形特征检测与分形维估计

图 1 为某一采集到的真实缺陷样本, 图 2 为该缺陷图

片经 photoshop 图像处理软件处理后提取的轮廓图, 它是 BMP 图像格式存储的. 本文以此缺陷为例, 将轮廓曲线表示为易于测量的参数方

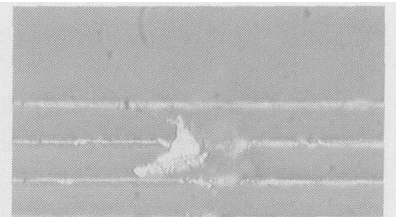


图 1 某一真实缺陷的图片

程形式, 用上述方法测量了其参数曲线的分形维数, 具体方法如下:

(1) 将此轮廓图像转化为二值图像.

(2) 通过细化算法将轮廓曲线细化为一条单像素宽的曲线, 从而较清晰的显示出其拓扑性质.



图 2 处理后得到的缺陷轮廓图

(3) 以轮廓上的某一点为

起始点, 在图像矩阵中追踪轮廓曲线, 如果是轮廓上的点, 就将其坐标记录下来, 这样就可以得到一组数据  $\{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots\}$  (就本文选取的缺陷而言, 记录了从最左端轮廓点起沿着轮廓线转一周回到起始点的共 816 个测量点).

(4) 记图像矩阵的左下方元素为  $(0, 0)$  点, 根据  $\{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots\}$  在矩阵中的位置修改坐标记为  $\{(x'_i, y'_i) | i = 1, 2, \dots\}$ . (就本文的图像而言,  $\{x'_i = y_i - 1, y'_i = 256 - x_i\}$ ).

(5)  $x = \{x'_i\}$  与  $y = \{y'_i\}$  即为所需要的两个测量序列. 然后按照前面所述的方法进行两条曲线的维数估计.

本文运用采集得到的 816 个测量点, 选择 Daubechies 二阶小波, 用小波变换的方法分别估计了两个测量序列所

对应曲线的分形维数. 结果见图 3.

从图 3 的估计结果可以看出, IC 缺陷轮廓上点的横纵坐标构成的序列所对应的两条曲线的小波谱范数都具有很好的线性相关性, 因此缺陷轮廓曲线具有自仿射的分形特征, 从图 3 的估计结果可以得到两条曲线的分形维数分别为:  $D_x = 1.3657$ ,  $D_y = 1.3877$ .

#### 4 结论

本文讨论了 IC 制造过程中真实缺陷轮廓所具有的分形特征, 并用小波变换的方法估计了其分形维数, 从而为缺陷轮廓特征的描述和计算机模拟提供了一种新的方法.

#### 参考文献:

- [1] 赵天绪, 郝跃. 基于关键面积的冗余集成电路成品率分析 [J]. 半导体学报, 2003, 24(5): 544-549  
Zhao Tianxu Hao Yue Analysis of redundant integrated circuit yield based on critical area [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(5): 544-549 (in Chinese)
- [2] 赵天绪, 郝跃. 集成电路局部缺陷模型及其相关的功能成品率分析 [J]. 微电子学, 2001, 31(2): 138-142  
Zhao Tianxu Hao Yue A local defect model of ICs and analysis of its related functional yield [J]. Microelectronics, 2001, 31(2): 138-142 (in Chinese)
- [3] Hess Christopher Strole Albrecht Modeling of real defect outlines for defect size distribution and yield prediction [A]. MG Seigen International Conference on Microelectronic Test Structure [C]. Barcelona IEEE, 1993, 5: 75-81

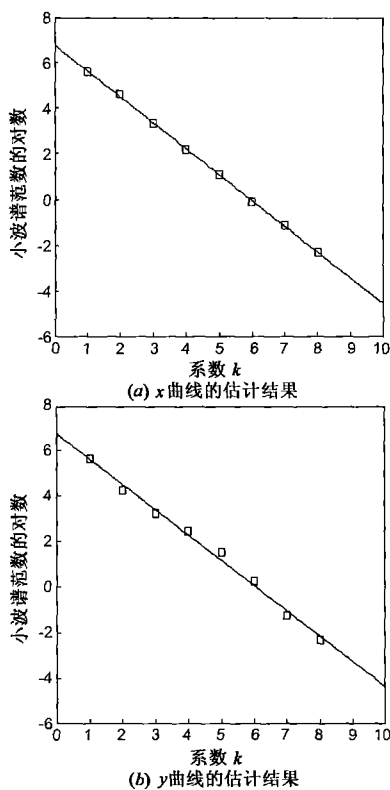
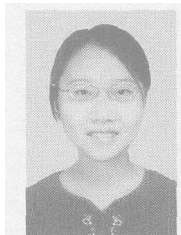


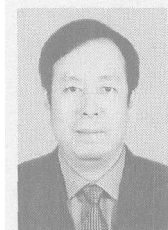
图 3 IC 缺陷轮廓分形维数的估计结果

- [4] 姜晓鸿, 赵天绪, 郝跃, 徐国华. 一种 IC 缺陷轮廓建模的新方法 [J]. 电子学报, 1999, 27(5): 46-48  
Jiang Xiaohong Zhao Tianxu Hao Yue Xu Guohua A new approach to model the IC defect outlines [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(5): 46-48 (in Chinese)
- [5] 肯尼思. 法尔可内. 分形几何: 数学基础及其在应用 [M]. 曾文曲, 等. 译. 沈阳: 东北大学出版社, 1993
- [6] 姜晓鸿, 郝跃, 许冬岗, 徐国华. IC 制造中真实缺陷轮廓的分形特征 [J]. 半导体学报, 1998, 19(2): 123-126  
Jiang Xiaohong Hao Yue Xu Donggang Xu Guohua Fractal characterization of real defect outlines in IC manufacturing process [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(2): 123-126 (in Chinese)
- [7] Wen-Liang Stephane Mallat Characterization of self-similar multifractals with wavelet maxima [J]. Applied and computational harmonic analysis, 1994, 1(3): 316-328
- [8] 程正兴. 小波分析算法及应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999, 64-78
- [9] Massoups P R. Fractal Functions, Fractal Surfaces and Wavelets [M]. New York Academic Press, 1994
- [10] 王安良, 杨春信. 机械加工表面形貌分形特征的计算方法 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(8): 714-718  
Wang Anliang Yang Chunxin A computation method of fractal characterization in machining surface [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(8): 714-718 (in Chinese)

#### 作者简介:



孙晓丽 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为集成电路功能成品率模拟、小波分析及其在应用。  
E-mail: xlsun@mail.xidian.edu.cn



郝跃 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SoC 设计方法、VDSM 小尺寸器件与电路可靠性理论与技术研究等。