

# IC 制造中真实缺陷轮廓的分形特征\*

姜晓鸿 郝 跃 许冬岗 徐国华

(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

**摘要** 为了进行有效的集成电路(IC)成品率预报及故障分析,与光刻有关的硅片表面缺陷通常被假定为圆形的或方形的。然而,真实的缺陷的形貌是多种多样的。本文讨论了缺陷轮廓所具有的分形特征。该结果为硅片表面缺陷的精细表征及其计算机模拟作了有益的探索。

EEACC 1130B, 0240G, 2220C, 2570

## 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。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<sup>[1]</sup>。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<sup>[3]</sup>、测试版图的生成<sup>[4]</sup>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<sup>[5,6]</sup>或正方形的<sup>[7]</sup>。然而,实际的缺陷的形貌是多种多样的,图 1(见图版 I)给出了部分真实缺陷的形貌。传统的最大园模型、最小园模型及文献[8]中提出的椭圆模型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,这是一种改变对象的结构以适应现有处理方法的权宜之策,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<sup>[9]</sup>。因此,我们有必要利用新的方法去研究真实缺陷轮廓的建模问题。

对于天空中变化多端的云彩的轮廓线和犬牙交错的海岸线这类复杂图形的描述问题,用直线段或圆弧进行逼近的传统几何的描述方法应该说与现实是有相当大的差距的。分形理论的出现为我们提供了一个描述不规则几何图形的强有力理论工具,该理论可用来有效地描述自然与工程中遇到的多种多样的复杂图形<sup>[10]</sup>。本文首次将分形理论应用于 IC 制造中真实缺陷轮廓的表征上,得到了较好的效果。

本文首先简要介绍了分形理论中计盒维数及分配维数的概念,然后用例示说明 IC 缺陷的轮廓可用分形维数进行很好地描述,并统计了 IC 冗余物缺陷轮廓的计盒维数及分配维数。

\* 863 高科技项目和军事预研项目资助

姜晓鸿 男,1966 年出生,博士研究生,讲师,目前主要从事集成电路可制造性的研究

郝 跃 男,1958 年出生,教授,博导,从事微电子学与半导体器件的研究

徐国华 男,1937 年出生,教授,博导,从事 SM 及系统工程的研究

1996-12-29 收到,1997-02-28 定稿

的分布,最后给出了本文的结论

## 2 实验结果及讨论

为了分析 IC 制造过程中真实缺陷轮廓的分形特征并考虑到便于用光学方法测量缺陷轮廓的需要,本文针对已很成熟的  $5\mu\text{m}$  工艺设计了一个测试芯片,并由此得到了五百多幅真实缺陷样本(图 1 为其中几个样本),此处我们只考虑了冗余物(extra material)类型的缺陷.经 Photo Styler 图象处理软件进行轮廓提取后得到了一组真实缺陷轮廓图.图 2 和图 3(图 2、图 3 见图版 D)分别为图 1 中的一个缺陷样本图及其经 Photo Styler 处理后提取的轮廓图.

描述分形结构的定量参数是分数维.对于  $R^n$  上任意非空的有界子集  $F$ ,如果在一定的尺度范围内下式近似成立

$$N_\sigma(F) \sim c_1 \sigma^{-d_{\text{box}}(F)} \quad (1)$$

则分形维数  $d_{\text{box}}(F)$  称为  $F$  的计盒维数(Box-counting dimension),其中  $c_1$  为常数; $N_\sigma(F)$  是下列五个数的任一个<sup>[11]</sup>:

- (1) 覆盖  $F$  的半径为  $\sigma$  的最少闭球数;
- (2) 覆盖  $F$  的边长为  $\sigma$  的最少立方体数;
- (3) 与  $F$  相交的  $\sigma$ -网立方体的个数;
- (4) 覆盖  $F$  的直径最大为  $\sigma$  的集的最少个数;
- (5) 球心在  $F$  上,半径为  $\sigma$  的相互不交的球的最多个数.

以上关于  $N_\sigma(F)$  的定义还可以进一步扩大,实际上可以采用一种对每一个特殊问题最合应用的定义.

特别地,如果集  $F$  为一若当(Jordan)曲线,即若  $F$  为连续双射

$$f: [a, b] \rightarrow R^n$$

下,区间  $[a, b]$  的象(我们把注意力限制在非自交连续曲线上),则对  $F$  可定义  $M_\sigma(F)$  为点  $x_0, x_1, \dots, x_m$  的最大数目,其中  $x_0, x_1, \dots, x_m$  是  $F$  上的点且满足  $|x_k - x_{k-1}| = \sigma, k = 1, 2, \dots, m, \sigma > 0$ , 则  $(M_\sigma(F) - 1)\sigma$  可以看成是利用两脚间隔距离为  $\sigma$  的两脚规测量  $F$  所得的“长度”.如果在一定的尺度范围内下式近似成立

$$M_\sigma(F) \sim c_2 \sigma^{-d_{\text{div}}(F)} \quad (2)$$

则分形维数  $d_{\text{div}}(F)$  称为  $F$  的分配维数(Divider dimension),而常数  $c_2$  则看成是该曲线的“ $d_{\text{div}}(F)$ -维长度”.文献中各种海岸线的维数一般是利用分配维数给出的<sup>[10]</sup>,分配维数还被成功地用来描述微细颗粒的轮廓<sup>[12]</sup>.理论上容易证明,曲线的分配维数至少等于其盒维数(假定它们都存在)<sup>[11]</sup>.

对(1)式和(2)式取对数得

$$\log N_\sigma(F) = \log c_1 - d_{\text{box}} \log \sigma \quad (3)$$

$$\log M_\sigma(F) = \log c_2 - d_{\text{div}} \log \sigma \quad (4)$$

从而  $d_{\text{box}}(F)$  和  $d_{\text{div}}(F)$  可利用一个适当范围内的  $\sigma$  值作出的重对数  $(\log N_\sigma(F) - \log \sigma)$  图和  $(\log M_\sigma(F) - \log \sigma)$  图的斜率来估计.在实际应用时,我们只需考虑用任意满足  $\sigma_n = cr^n, 0 < r < 1, c > 0$  的递减序列  $\{\sigma_n\}$  来作重对数图以估计盒维数  $d_{\text{box}}(F)$  及分配维数  $d_{\text{div}}(F)$ , 而估计

结果不受影响<sup>[11]</sup>。图 4 和图 5 (图 4、图 5 见图版 D) 分别为利用该估计方法估计图 3 所示缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  及其分配维数  $d_{\text{div}}$  的结果

在上面估计中,  $\sigma$  的范围为,  $[0.03F_D, 0.3F_D]$ ,  $\sigma_r = cr^n$ ,  $r = 0.7$ ,  $c = 0.3F_D$ ,  $F_D$  为缺陷的最大投影尺寸。由图 4 和图 5 的结果可以看出, 所考虑缺陷的轮廓在上述范围内表现出很好的分形性质, 且  $d_{\text{box}} = 1.13 < 1.17 = d_{\text{div}}$ , 这与理论结果是一致的。经过我们分析, 其它缺陷的轮廓在  $[0.03F_D, 0.3F_D]$  的尺度范围内均表现出了很好的分形性质。用与上面相同的参数, 我们估计出了其它五百多幅缺陷样本轮廓的盒维数及分配维数, 并把两个分形维数的分布分别归结在图 6 和图 7 中。我们多次的实验结果表明, 图 6 及图 7 得到的缺陷轮廓分维数所表现出的相对出现频率与缺陷的大小无关, 该规律具有普遍的意义。

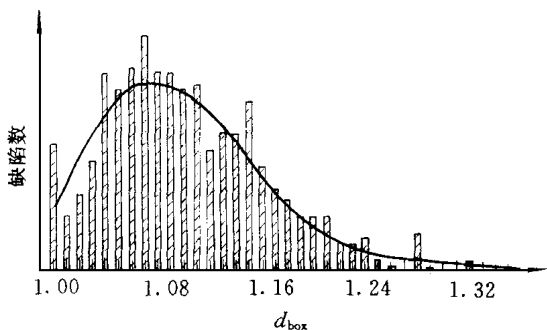


图 6 测试得到的缺陷轮廓盒维数的分布

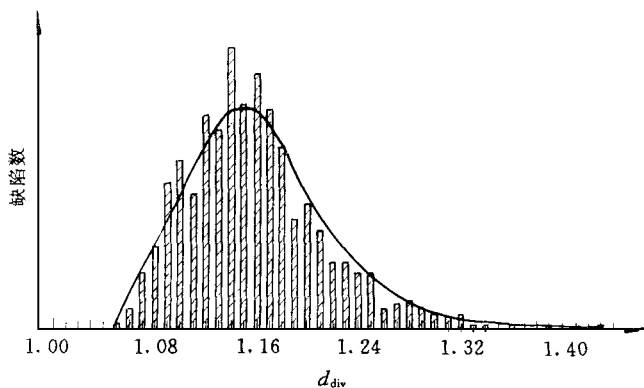


图 7 测试得到的缺陷轮廓分配维数的分布

### 3 结论

本文首次研究了 IC 制造过程中真实缺陷轮廓所具有的分形特征, 从而使 IC 缺陷的表征增加了一个有用的特征量。本文同时统计出了 IC 缺陷轮廓的盒维数和分配维数的分布规律, 该结果将使 IC 制造过程中缺陷的精细表征及其计算机模拟成为可能, 并进而为提高 IC 缺陷所引起故障概率的计算

精度及改善 IC 产品功能成品率的预报精度提供了一条新途径

### 参 考 文 献

- [ 1 ] F. J. Ferguson and J. P. Shen, "Extraction and simulation of realistic CMOS faults using inductive fault analysis", presented at the Internat. Test Conf., 1988
- [ 2 ] A. V. Ferris Prabhu, IEEE J. Solid-State Circuits, 1985, **SC20**(4): 874~ 878
- [ 3 ] W. Lukaszek, W. Yarbrough, T. Walker and J. Meindl, Solid State Technol., 1986, **29**(3): 87~ 93
- [ 4 ] G. Spiegel and A. P. Stroele, "Optimization of deterministic test sets using an estimation of product quality", presented at the Asian Test Symp., Beijing, China, Nov. 1993
- [ 5 ] W. Maly, Proc. IEEE, 1990, **78**(2): 356~ 392
- [ 6 ] T. L. Michalka, R. C. Varshney and J. D. Meindl, IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, 1990, **3**(3): 116~ 127.

- [ 7 ] J. P. de Gyvez and D. Chennian, IEEE Trans Computer-Aided Design, 1992, 11(5): 638~ 658
- [ 8 ] Christopher Hess and Albrecht Strole, "Modeling of real defect outlines for defect size distribution and yield prediction", Proc IEEE Int Conference on Microelectronic Test Structures, vol 6, March 1993
- [ 9 ] 姜晓鸿,郝跃,等, IC 制造中的真实缺陷轮廓表征方法研究,电子学报(待发表).
- [ 10 ] 林鸿溢,等,分形论-奇异性探索,北京:北京理工大学出版社,1992
- [ 11 ] 肯尼思·法尔可内著,曾文曲等译,分形几何-数学基础及其应用,东北大学出版社(1993).
- [ 12 ] B. H. Kaye 著,徐新阳等译,分形漫步,东北大学出版社(1994).

## Fractal Characterization of Real Defects Outlines in IC Manufacturing Process

Jiang Xiaohong, Hao Yue, Xu Donggang and Xu Guohua

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071)

Received 29 December 1996, revised manuscript received 28 February 1997

**Abstract** For efficient yield prediction and inductive fault analysis of integrated circuits (IC), it is usually assumed that defects related to the photolithographic of wafer surface have the shape of circular discs or squares. Real defects, however, exhibit a great variety of different shapes. The fractal characterizations of real defect outlines are discussed. The results obtained in this paper will be useful for a fine characterization and computer simulation of the defects on wafer.

EEACC 1130B, 0240G, 2220C, 2570



图 1 真实缺陷形貌

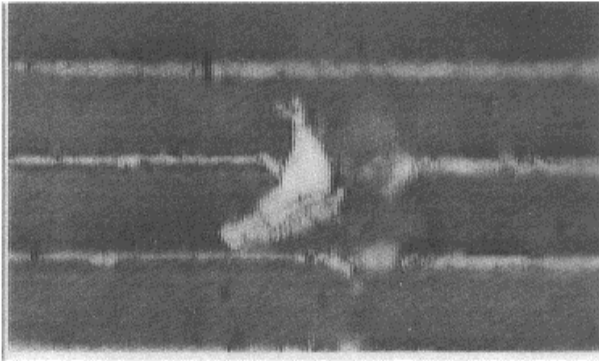


图 2 某真实缺陷图样

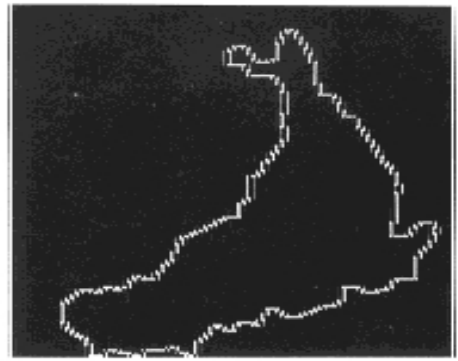


图 3 提取的图 2 缺陷的轮廓

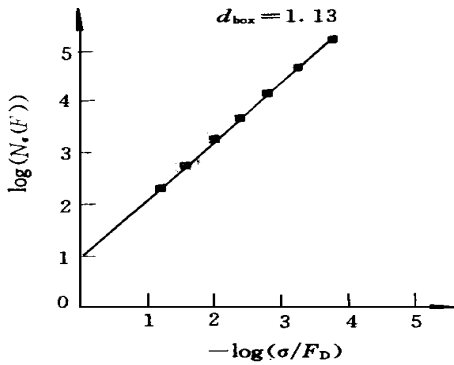


图 4 图 3 缺陷轮廓计盒维数的重对数图  
计盒维数的估计值为图中直线的斜率  $d_{\text{box}} = 1.13$

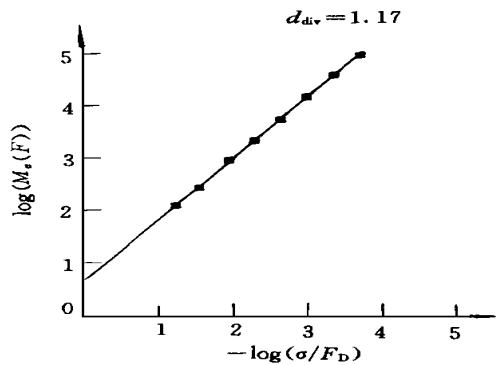


图 5 图 3 缺陷轮廓分配维数的重对数图  
分配维数的估计值为图中直线的斜率  $d_{\text{div}} = 1.17$