

# IC 缺陷轮廓的盒维数及其方向的分布特征\*

姜晓鸿 郝 跃 徐国华

(西安电子科技大学微电子研究所 西安 710071)

**摘要** 为了对 IC 进行有效的成品率预报及故障分析, 硅片表面与光刻有关的缺陷通常被假设为圆形的或方形的, 然而, 真实缺陷的形貌是多种多样的。本文对真实缺陷轮廓的盒维数及其描述真实缺陷方向的最小尺寸的方向角  $\theta_{\min}$  的分布进行了检验。本文得到的结论有助于实现对硅片表面缺陷的精细表征及其计算机模拟。

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>。但是, 为了计算方便, 缺陷轮廓通常被假设为圆形的<sup>[2]</sup>、正方形的<sup>[3]</sup>或椭圆形的<sup>[4]</sup>, 然而, 实际的缺陷的形貌是多种多样的。传统的缺陷模型就其本质而言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>[5]</sup>。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。

真实缺陷的轮廓与天空中变化多端云彩的轮廓线及犬牙交错的海岸线有很多相似之处, 对于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>[6]</sup>。已有的结果表明, IC 制造中真实缺陷的轮廓可用分形维数进行有效的表征<sup>[7]</sup>。本文对 IC 制

\* 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

1997-06-01 收到, 1997-08-01 定稿

造中真实缺陷轮廓的分形维数-计盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布及其刻划真实缺陷方向的最小尺寸的方向角  $\theta_{\text{min}}$  的分布进行了分析和检验 本文得到的结论对实现硅片表面真实缺陷的精细表征及提高 IC 故障的预报精度是有益的

## 2 $d_{\text{box}}$ 及 $\theta_{\text{min}}$ 的分布特征

为叙述方便, 首先引入真实缺陷的方向尺寸及  $\theta_{\text{min}}$  的定义

定义 1(真实缺陷的方向尺寸及  $\theta_{\text{min}}$ ) 对于一真实缺陷, 将沿与参考方向的夹角为  $\theta$  的方向上的两条平行线在保证与该缺陷相切的前提下所能达到的最大间距称为该缺陷在此方向上的尺寸, 且记该缺陷在此方向上的尺寸为  $d(\theta)$ . 记  $d_{\text{min}}$  为该缺陷在所有方向上尺寸的最小值, 且记  $\theta_{\text{min}}$  为对应  $d_{\text{min}}$  的角度 (参看图 1).

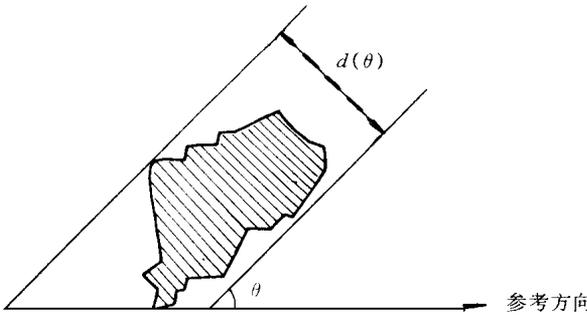


图 1 定义 1 的示意图

由此定义可知, 一缺陷引起故障的概率完全由其方向尺寸  $d(\theta)$  所决定<sup>[4]</sup>.

为了检验 IC 制造过程中真实缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  及其  $\theta_{\text{min}}$  的分布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 565 幅冗余物缺陷 (extra material defect) 样本及 253 幅丢失物缺陷 (missing material defect) 样本, 经图象处理软件 Photo Styler 进行轮廓提取后得到了这些真实缺陷的轮廓图

用于分布函数拟合检验的常用方法有皮尔逊 (Pearson) -  $\chi^2$  检验及柯尔莫哥洛夫 (Kolmogorov) 检验, 但 Kolmogorov 检验要比 Pearson -  $\chi^2$  检验更为精细一些 本文用精细的 Kolmogorov 检验对真实缺陷轮廓的计盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布及方向角  $\theta_{\text{min}}$  进行拟合检验

### 2.1 缺陷轮廓计盒维数的分布的拟合检验

记冗余物缺陷轮廓计盒维数  $d_{\text{box}}$  为一随机变量  $X$ , 而  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  为从小到大排列的  $X$  的观测值 (此处  $n = 565$ ). 令:  $F(x)$  为  $X$  的真实的但未知的分布函数,  $F_0(x)$  为某个指定的分布函数表达式 我们希望考虑下述的假设检验问题:

$$H_0: F(x) = F_0(x) \qquad H_1: F(x) \neq F_0(x)$$

令

$$D_n = \sup_{x_k^* < x < x_{k+1}^*} |F_n^*(x) - F_0(x)| \tag{1}$$

此处  $F_n^*(x)$  为  $X$  的总体子样  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  所定义的经验分布函数

$$F_n^*(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1^* \\ \frac{k}{n}, & x_k^* < x < x_{k+1}^*, \quad k = 1, \dots, n-1 \\ 1, & x > x_n^* \end{cases} \tag{2}$$

给定显著性水平  $\alpha$ , 应选择临界值  $u_\alpha$  使得

$$\lim_n P \left\{ D_n > \frac{u_\alpha}{\sqrt{n}} \right\} = \alpha \tag{3}$$

记  $D_n(\alpha) = u_\alpha / \sqrt{n}$ , 称  $D_n(\alpha)$  为统计量  $D_n$  对应于  $\alpha$  的临界值的近似值. 当利用(1)式计算的统计量  $D_n$  的数值大于  $D_n(\alpha)$  的近似值时, 则在显著性水平  $\alpha$  下否定原假设  $H_0$ .

假设  $F_0(x)$  为韦布(Weibull)分布的分布函数  $W(x_0, m)$ , 即  $X$  的概率密度函数  $f(x)$  由下式给出

$$f(x) = \begin{cases} \frac{m}{x_0} (x - 1)^{m-1} e^{-\frac{(x-1)^m}{x_0}}, & x \geq 1 \\ 0, & x < 1 \end{cases} \tag{4}$$

其中  $x_0 > 0, m > 0$ , 为未知参数. 对韦布分布而言, 参数  $x_0$  和  $m$  的极大值估计为

$$\hat{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - 1)^m \tag{5}$$

而  $\hat{m}$  由下列方程确定

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i^* - 1)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - 1)^m \ln(x_i^* - 1)} \tag{6}$$

方程(5)和(6)的解的一个估计值为

$$\hat{m} = 1.7, \quad \hat{x}_0 = 0.026 \tag{7}$$

从而  $F_0(x)$  可被看作为韦布分布  $W(0.026, 1.7)$  的分布函数. 在实际中, 由(1)式计算统计量  $D_n$  的数值等价于按下面的(8)和(9)式进行计算<sup>[8]</sup>

$$D_n = \max_{1 \leq k \leq n} \{d_k^{(1)}, d_k^{(2)}\} \tag{8}$$

其中

$$\begin{aligned} d_k^{(1)} &= |F_n^*(x_k) - F_0(x_k)|, \\ d_k^{(2)} &= |F_n^*(x_{k+1}^*) - F_0(x_k)|, \\ k &= 1, \dots, n \end{aligned} \tag{9}$$

将  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  的数值列在表 1 的第 1 列与第 2 列中. 由这两列的数值, 利用(2)式计算得到的经验分布函数  $F_n^*(x_k^*)$  的数值列在第 3 列中. 又由第 1 列与第 2 列的数值, 利用韦布分布函数  $W(0.026, 1.7)$  求出的  $F_0(x_k^*)$  的数值列在第 4 列. 由  $F_n^*(x_k^*)$  及  $F_0(x_k^*)$  的数值求出  $d_k^{(1)}$  和  $d_k^{(2)}$  的数值, 分别列在第 5 列及第 6 列中. 由(8)式可确定  $D_n$  的数值为 0.043, 用“ $\Delta$ ”标上记号.

给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 那对应  $n =$

表 1

$x_i^*$	频数	$F_n^*(x_i^*)$	$F_0(x_k^*)$	$d_k^{(1)}$	$d_k^{(2)}$
1.00	23	0.000	0.000	0.000	0.040
1.01	10	0.040	0.015	0.025	$\Delta$ 0.043
1.02	14	0.058	0.049	0.009	0.033
1.03	20	0.083	0.095	0.012	0.022
1.04	36	0.118	0.151	0.032	0.031
1.05	33	0.182	0.213	0.030	0.027
1.06	37	0.240	0.278	0.038	0.027
1.07	43	0.306	0.346	0.039	0.036
1.08	36	0.382	0.413	0.030	0.032
1.09	36	0.446	0.478	0.032	0.031
1.10	33	0.509	0.541	0.031	0.027
1.11	34	0.568	0.599	0.031	0.028
1.12	22	0.628	0.654	0.025	0.013
1.13	25	0.667	0.703	0.036	0.007
1.14	25	0.711	0.748	0.036	0.007
1.15	31	0.755	0.788	0.032	0.022
1.16	19	0.810	0.823	0.012	0.021
1.17	15	0.844	0.853	0.009	0.017
1.18	13	0.870	0.879	0.008	0.014
1.19	10	0.893	0.901	0.007	0.009
1.20	10	0.911	0.920	0.008	0.008
1.21	10	0.929	0.936	0.006	0.010
1.22	5	0.946	0.948	0.002	0.006
1.23	5	0.955	0.959	0.003	0.004
1.24	6	0.964	0.968	0.003	0.006
1.25	2	0.975	0.975	0.000	0.003
1.26	1	0.978	0.980	0.002	0.000
1.28	7	0.980	0.988	0.008	0.004
1.29	1	0.992	0.991	0.001	0.003
1.32	2	0.994	0.996	0.001	0.001
1.35	1	0.998	0.998	0.000	0.001

565 的  $D_n(\alpha)$  的值为

$$D_{565}(0.05) = \frac{1.36}{\sqrt{565}} = 0.057 \quad (10)$$

由于  $D_n = \max_{1 \leq k \leq 565} \{d_k^{(1)}, d_k^{(2)}\} = 0.043 < 0.057$ , 所以不否定  $H_0$ , 即可认为冗余物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  服从韦布分布  $W(0.026, 1.7)$ , 其概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1.7}{0.026} (x-1)^{0.7} e^{-\frac{(x-1)^{1.7}}{0.026}}, & x \geq 1 \\ 0, & x < 1 \end{cases} \quad (11)$$

图 2 给出了测试得到的及检验得到的冗余物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布。用完全相同的检验方法对丢失物缺陷轮廓盒维数  $d_{\text{box}}$  的检验结果表面: 丢失物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  服从韦布分布  $W(0.0056, 2.5)$ , 其概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2.5}{0.0056} (x-1)^{1.5} e^{-\frac{(x-1)^{2.5}}{0.0056}}, & x \geq 1 \\ 0, & x < 1 \end{cases} \quad (12)$$

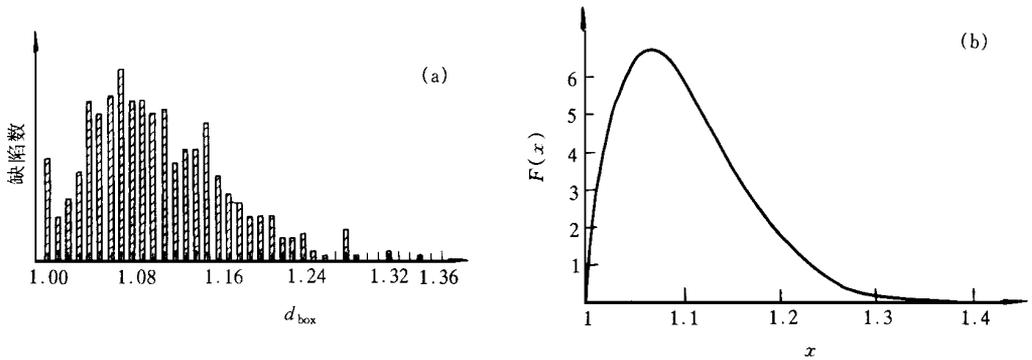


图 2 冗余物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布

(a) 测量得到的分布; (b) 检验得到的分布

图 3 给出了测试得到的及检验得到的丢失物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布

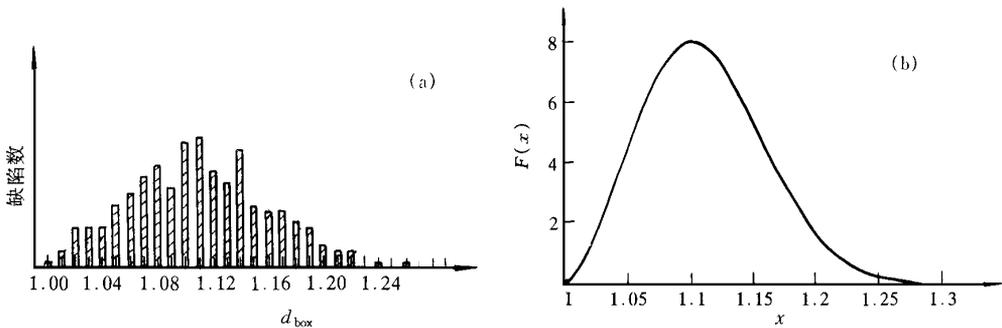


图 3 丢失物缺陷轮廓的盒维数  $d_{\text{box}}$  的分布

(a) 测量得到的分布; (b) 检验得到的分布

### 2.2 $\theta_{in}$ 分布的拟合检验

在现有的文献中,刻划真实缺陷方向的方向角  $\theta_{in}$  被假定是在  $[0, \pi]$  上是服从均匀分布的<sup>[4]</sup>。本文统计得到了这 565 个冗余物缺陷的方向角  $\theta_{in}$  的分布图(见图 4)。采用 Kolmogorov 检验方法对  $\theta_{in}$  的分布进行检验的结果表明,  $\theta_{in}$  在  $[0, \pi]$  上服从均匀分布的假设与实测数据有较大的偏差。为了得到  $\theta_{in}$  在  $[0, \pi]$  上的真实分布,根据图 4 中测试得到  $\theta_{in}$  的分布趋势,本文构造出了如下的  $\theta_{in}$  的概率密度函数

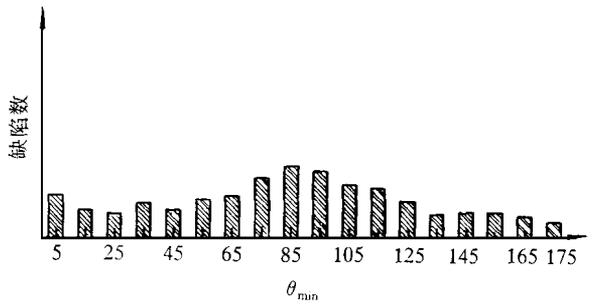


图 4 测试得到的冗余物缺陷方向角  $\theta_{in}$  的分布

$$f(\mu, x_0, h, x) = \begin{cases} \frac{h}{\mu}x + x_0 & 0 \leq x \leq \mu \\ -\frac{h}{\mu}x + x_0 + 2h & \mu \leq x \leq 2\mu \end{cases} \quad (13)$$

式中  $h > 0, x_0 > 0, \mu > 0, \mu(h + 2x_0) = 1$ 。式中参数的一个估计值为:  $\mu = \pi/2, h = 0.4011, x_0 = 0.1146$ 。与上面的检验方法相同,当分布函数  $F_0(x)$  的概率密度函数为  $f(\pi/2, 0.1146, 0.4011, x)$  时,有

$$D_n = \max_{1 \leq k \leq 565} \{d_k^{(1)}, d_k^{(2)}\} = 0.050 < 0.057 = D_{565}(0.05)$$

所以可认为  $\theta_{in}$  的概率密度函数为  $f(\pi/2, 0.1146, 0.4011, x)$ 。

### 3 结论

本文对 IC 制造中的冗余物缺陷及丢失物缺陷轮廓的计盒维数的分布及描述缺陷方向的最小尺寸的方向角  $\theta_{in}$  的分布进行了检验,结果表明:无论是冗余物缺陷还是丢失物缺陷的轮廓的计盒维数均服从韦布分布,只是参数有所差别;关于  $\theta_{in}$  服从均匀分布的假设与实测数据有较大的偏差,但  $\theta_{in}$  的分布可用本文提出的分布规律进行很好地表征。本文得到的结果使 IC 制造中真实缺陷的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] W. Maly, Proc. IEEE, 1990, 78(2): 356 ~ 392.  
 [3] J. P. de Gyvez and D. Chennian, IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1992, 11(5): 638 ~ 658.  
 [4] Christopher Hess and Albrecht Strole, Proc. IEEE Int. Conference on Microelectronics Test Structures, Vol. 6, March 1993.  
 [5] 姜晓鸿,郝跃,徐国华,电子学报, 1998, 26(2): 11~ 14.

- [ 6 ] 林鸿溢, 等, 分形论-奇异性探索, 北京: 北京理工大学出版社, 1992
- [ 7 ] 姜晓鸿, 郝跃, 许冬岗, 等, 半导体学报, 1998, 19(2): 123
- [ 8 ] 中山大学数学力学系编, 概率论及数理统计, 北京: 高等教育出版社, 1985

## D istribution Characterizations of Box-Counting Dimension and Orientation of IC Defect Outlines

Jiang Xiaohong, Hao Yue, Xu Guohua

(Microelectronics Institute, Xidian Univ., Xi'an 710071)

Received 1 June 1997, revised manuscript received 1 August 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 distributions of real defect's box-counting dimension and real defect's orientation defined as the angle  $\theta_{in}$  where the defect reaches its minimum extension are tested. The conclusion obtained in this paper lay the foundation for the fine characterization and computer simulation of real defects related to the photolithographic of wafer surface.

**EEACC:** 1130B, 0240G, 2220C, 2570