

真实缺陷的矩形模型及其关键面积计算

王俊平^{1,2}, 郝 跃¹

(1. 西安电子科技大学微电子研究所, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 在集成电路(IC)中,为了进行有效的成品率估计和故障分析,与光刻有关的缺陷形状通常假设为圆模型。然而,真实缺陷的形状多种多样。本文提出一种真实缺陷的矩形模型及与之相关的关键面积计算模型,该模型既考虑了真实缺陷的形状又考虑了 IC 版图布线的特点。在缺陷引起故障概率预测方面,仿真结果表明新模型比圆模型更接近真实缺陷引起的故障概率。

关键词: 真实缺陷; 缺陷的矩形模型; 关键面积模型; 成品率

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 11-1974-04

Rectangular Defect Model and Critical Area Computation of Real Defect Outlines in VLSI

WANG Jun-ping^{1,2}, HAO Yue¹

(1. Research Inst. of Microelectronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In integrated circuits, the defects associated with photolithography will generally be assumed to take the shape of circular discs in order to perform the efficient estimation of yield and fault analysis. However, real defects exhibit a great variety of shapes. This paper provides a rectangular model of real defects and the model of computing the critical area involved, which take the shape of real defects as well as the features of the layout routing into account. In the aspect of the prediction of fault probability, the simulation results show that the new model may predict the fault probability caused by real defects more accurately than the circular model does.

Key words: real defect; rectangular defect model; critical area model; yield

1 引言

IC 制造中电路规模的增加和器件特征尺寸的缩小,使产品成品率成为一个重要问题^[1,2],它直接与 IC 工业发展息息相关。很长一段时间里,硅片上的微小颗粒缺陷成为 IC 制造中影响成品率的一个主要障碍,由此影响成品率问题占总成品率的 70% 以上。研究布线中的多余物和丢失物缺陷(多余物缺陷是指引起电路短路的缺陷,丢失物缺陷是指引起电路开路的缺陷)模型可解决微小颗粒缺陷对 IC 的影响。在缺陷模型的研究上,通常把缺陷轮廓假设为圆形^[3]。该过程虽然简单,但在缺陷引起故障概率(归一化关键面积)及成品率的预测方面会引入很大误差^[4]。实际缺陷的形貌是多种多样的,图 1 给出了一幅真实缺陷的形貌图。

本文提出一种真实缺陷的矩形缺陷模型及相关的关键面积计算模型,该模型既考虑了真实缺陷的形状又考虑了 IC 版图的特点。与真实缺陷引起的故障概率比较,仿真结果表明本模型优于圆模型。

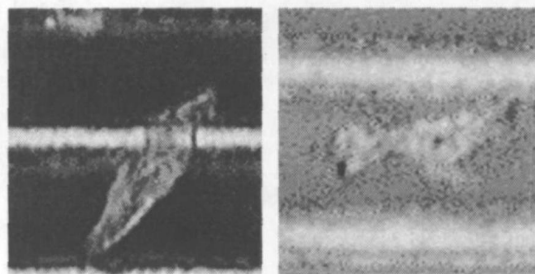


图 1 真实缺陷图

2 真实缺陷的矩形模型及其关键面积计算

IC 制造过程中有很多因素可以产生缺陷,其中与单个工艺层有关的对电路结构产生显著影响的主要有两种,分别是导体多余物缺陷和导体丢失物缺陷,相应地它们的关键面积分别为短路关键面积和开路关键面积。

现有的缺陷轮廓模型均是用圆形缺陷代替真实缺陷,只是确定该圆形缺陷的直径不同而已。常用的圆模型有最大圆

最小圆模型:圆直径定义为真实缺陷的最大投影尺寸 d_{max} 及最小投影尺寸 d_{min} ,如图 2(a),(b)中的圆形轮廓均为相应真实缺陷的最大圆模型;平均圆模型:圆直径 d_a 定义为真实缺陷在不同方向上的投影尺寸的平均值;椭圆等效圆模型:圆直径 d_c 定义为: $d_c = (1/2) \sqrt{d_{max} * d_{min} + d_{max} * d_{min} / (d_{max} + d_{min})}$.

一般情况下用于版图设计的布线是互相垂直的,因此由缺陷引起的短路或开路故障的分析,可归结为缺陷在布线单元上所占范围的度量.据此,本文提出了真实缺陷的矩形模型.

定义 1 (真实缺陷的最小外接矩形) 对于一真实缺陷,沿布线单元上的水平布线方向平行的两条直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的长度,记为 H ;沿布线单元上垂直布线方向平行的两条直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的宽度,记为 B .则长为 H 宽为 B 的矩形称为缺陷的最小外接矩形,如图 2(c).那么,真实缺陷的矩形模型定义为该真实缺陷的最小外接矩形.

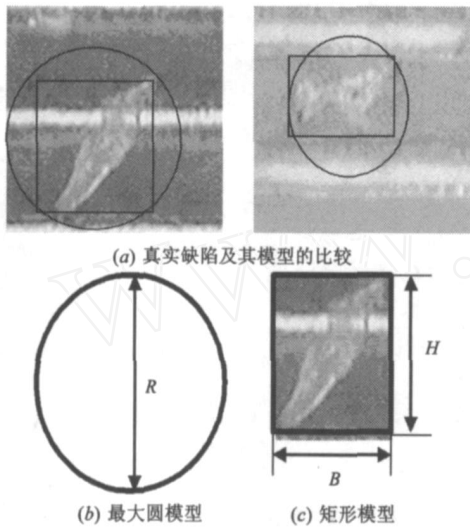


图 2 缺陷及其轮廓模型

缺陷引起的故障概率可通过与之相关的关键面积来表征,本文以下论述基于真实缺陷的矩形模型的关键面积计算模型.

短路关键面积定义为集成电路芯片上出现多余物缺陷时必定引起导体线条短路的特殊区域面积.由于矩形缺陷模型在水平及垂直方向上的尺寸不同,因而其不同方向的导体

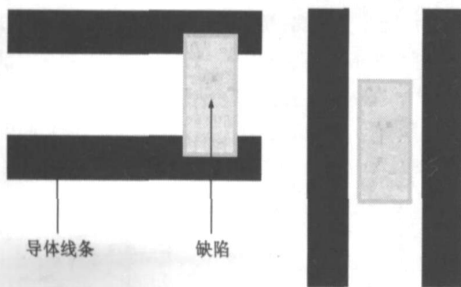


图 3 布线方向与矩形缺陷引起的故障

线条上引起的故障概率不同.如图 3(a)的矩形模型引起水平方向导体线条短路,但不会引起图 3(b)的垂直方向导体线条短路.

定义 2 (矩形模型引起水平布线导体线条短路的关键面积) 对两个水平布线的导体线条来说,能够使长为 H 宽为 B 的矩形多余物缺陷导致短路故障的关键区域如图 4 中虚线阴影区域所示,该区域的面积就是这两个线条的短路关键面积.

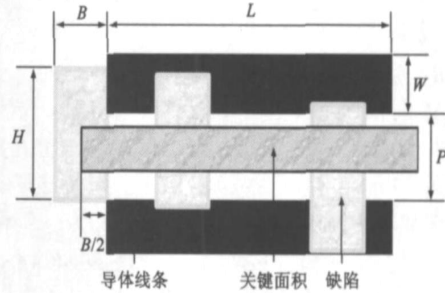


图 4 水平导体线条上的矩形缺陷关键面积

长为 H 宽为 B 的矩形缺陷其中心落在阴影区域所示的关键区域中必定导致两个导体线条连通.其短路关键面积 $A_{short}^{hc}(H, B)$ 为:

$$A_{short}^{hc}(H, B) = \begin{cases} 0, & 0 < H < P \\ (H - P)L + (H - P)B, & P < H < W + 2P \\ (P + W)L, & H > W + 2P \end{cases} \quad (1)$$

其中 L, W, P 分别为具有两条布线单元的导体线条的长度、宽度及两线条间的距离, H, B 分别为矩形缺陷的长度及宽度.

定义 3 (矩形模型引起垂直布线的导体线条短路的关键面积) 对两个垂直布线的导体线条来说,能够使长为 H 宽为 B 的矩形多余物缺陷导致短路故障的关键区域就是这两个导体线条的短路关键面积.其短路关键面积 $A_{short}^{vc}(H, B)$ 为:

$$A_{short}^{vc}(H, B) = \begin{cases} 0, & 0 < B < P \\ (B - P)L + (B - P)H, & P < B < W + 2P \\ (P + W)L, & H > W + 2P \end{cases} \quad (2)$$

其中 L, W, P 分别为导体线条的长度、宽度及两线条间的距离, H, B 分别为矩形缺陷的长度及宽度.

类似地,通过定义 4 和定义 5 分别推导出矩形缺陷引起水平布线导体线条开路和引起垂直布线导体线条开路的关键面积计算模型.

定义 4 (矩形模型引起水平布线的导体线条开路的关键面积) 对一条水平布线的导体线条来说,能够使长为 H 宽为 B 的矩形丢失物缺陷导致开路故障的关键区域如图 5 中虚线阴影区域所示,该区域的面积就是该导体线条的开路关键面积.其开路关键面积 $A_{open}^{hc}(H, B)$ 为:

$$A_{open}^{hc}(H, B) = \begin{cases} 0, & 0 < H < P \\ (H - W)L + (H - W)B, & W < H < P + 2W \\ (P + W)L, & H > P + 2W \end{cases} \quad (3)$$

其中 L, W, P 分别为导体线条的长度、宽度及两线条间的距离, H, B 分别为矩形缺陷的长度及宽度.

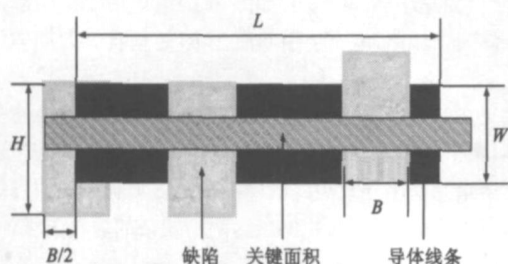


图 5 矩形模型在水平导体上的开路关键面积

定义 5 (矩形模型引起垂直布线导体线条开路的关键面积)对一条垂直布线的导体线条来说,能够使长为 H 宽为 B 的矩形丢失物缺陷导致开路故障的关键区域就是该导体线条的开路关键面积. 其开路关键面积 $A_{open}^{vc}(H, B)$ 为:

$$A_{open}^{vc}(H, B) = \begin{cases} 0, & 0 < B < P \\ (B - W)L + (B - W)H, & W < B < P + 2W \\ (P + W)L, & H > P + 2W \end{cases} \quad (4)$$

其中 L, W, P 分别为导体线条的长度、宽度及两线条间的距离, H, B 分别为真实缺陷的矩形模型的长度及宽度.

3 仿真结果及分析

为了分析缺陷的矩形模型与圆模型之间的差别,从而比较现有的圆模型与矩形模型引起故障的误差情况,本文对双桥测试结构采集到的多余物真实缺陷样本,采用文[5]的方法得到一组真实的缺陷轮廓, (如图 6 是随机抽出的不同粒径的真实缺陷轮廓). 基于真实的缺陷轮廓本文设计了提取矩形模型和圆模型参数的算法如图 7 所示. 由算法可见无论从时间复杂度还是空间复杂度上矩形模型参数提取比圆模型参数提取更加简单,该算法的一组运算结果如表 1 所示. 接着本文利



图 6 真实缺陷轮廓

表 1 圆及矩形模型的真实缺陷尺寸(圆为直径、矩形为高宽,单位 e)

缺陷模型	05	5004	5002	341	8029	8009	3007
最大圆	105	126	156	159	230	231	711
平均圆	87	107	107	109	158	204	529
最小圆	63	84	32	39	63	160	248
椭圆	80	101	61	70	109	190	393
矩形高 H	63	111	149	133	185	225	249
矩形宽 B	99	107	64	99	146	161	711

用矩形模型的关键面积计算模型和圆模型的关键面积计算模型在图 4 的布线单元上(导体线条个数为 2,其中 $w = 30e, p = 90e, L = 560e$, e 表示工艺的最小特征尺寸单位,取为 $10^{-1}\mu m$) 获得其短路故障概率(开路故障概率的分析与其类似). 同时,利用 Monte-Carlo 方法得到真实缺陷轮廓在同样布线单元上的关键面积作为各模型比较标准,其比较结果如表 2 和图 8

所示.

表 2 各模型及真实缺陷的故障概率(关键面积/布线单元面积)

缺陷模型	05	5004	5002	341	8029	8009	3007	平均尺寸
最小圆	0.000	0.050	0.000	0.000	0.000	0.6417	1.000	0.2417
最大圆	0.175	0.39167	0.64167	0.725	1.000	1.000	1.000	0.7048
真实值	0.000	0.1917	0.5666	0.4416	0.8417	1.000	1.000	0.5574
平均圆	0.089	0.2356	0.2936	0.3220	0.6116	0.9538	1.000	0.5009
椭圆	0.000	0.0917	0.000	0.000	0.1583	0.8333	1.000	0.2976
矩形	0.000	0.2084	0.5479	0.4217	0.9981	1.000	1.000	0.5599

表 2 可知,矩形模型引起的故障概率 0.560 最接近于真实缺陷引起的故障概率 0.557. 同时由图 8 可见,缺陷粒径尺寸较大(大于 $711e$) 或较小(小于 $105e$) 时,圆模型与矩形模型估计的故障概率基本相等,分别为 1 和 0;而当缺陷粒径尺寸位于中间范围($105e - 711e$) 时,矩形模型估计的故障概率比圆模型更接近于真实值. 由缺陷粒径分布可知,大粒径和小粒径缺陷数远小于中间粒径缺陷数,从而表明矩形模型比圆模型更精确.

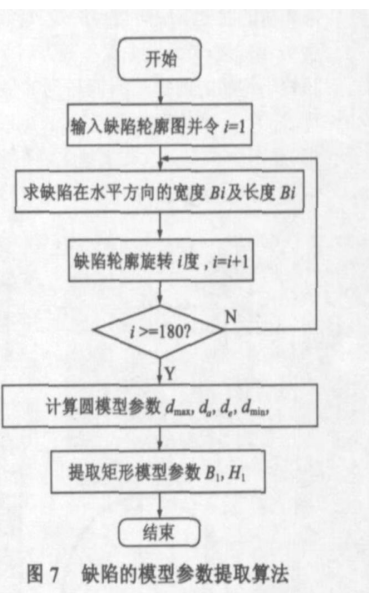


图 7 缺陷的模型参数提取算法

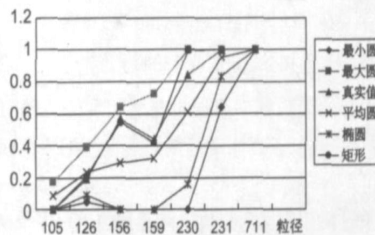


图 8 各模型与真实缺陷的故障概率比较

另外,本文从实际测到的 385 幅缺陷样本随机抽取了 23 幅,发现最大圆模型轮廓、最小圆模型轮廓、平均圆模型轮廓、及矩形模型轮廓的故障误判分别为 4、9、2 和 0. 其中测试版图布线为梳状和蛇状. 值得指出的,缺陷引起的故障概率估计不仅与缺陷模型有关,而且与版图布线形状有关. 本文提出的缺陷矩形模型对垂直和水平布线版图极其有效,对随机形状布线版图的故障概率预报方法,作者将另文叙述.

4 结论

缺陷模型是故障分析及成品率估计的基础,本文分析了缺陷的各种圆模型及其误差,提出了一种新的真实缺陷的矩形模型及关键面积计算模型,比较了新模型与真实缺陷及其

圆模型引起的故障概率,仿真结果表明新模型不仅其特征参数提取方法简单而且在故障概率的预测方面比圆模型更加接近于真实缺陷引起的故障概率。

参考文献:

- [1] J P De Gyvez, D Chennian. IC defect sensitivity for footprint-type spot defects [J]. IEEE Trans. Computer-Aided design, 1992, 11(5): 638 - 658.
- [2] 郝跃. 集成电路制造动力学理论与方法[M]. 北京: 河北教育出版社, 1995: 132 - 138.
- [3] L Peters. Analyzing Probe Yield Sensitivity to IC Design, Semiconductor Int [J]. 1999, 22(5): 48 - 49.
- [4] Stephen A Campbell. The science and engineering of microelectronic fabrication [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 559 -

578.

- [5] 王俊平, 郝跃. 基于 LS 空间的 IC 真实缺陷图像的分割 [J]. 电子学报, 2005, 33(5): 954 - 956.
Wang Junping, Hao Yue. Segmentation of IC Real Defect Color Images Based on an LS Space [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 954 - 956. (in Chinese)

作者简介:

王俊平 女, 1964 年生, 副教授, 博士, 目前研究方向为: 集成电路可制造性设计, 集成电路成品率模型与优化设计.

E-mail: jpwang@mail.xidian.edu.cn

郝跃 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 副校长, 主要研究领域为新型宽禁带半导体材料与器件, 集成电路可制造性和可靠性理论与设计以及新型半导体器件与电路.

www.cnki.net