

椭圆缺陷轮廓的成品率估计

王俊平^{1,2}, 郝跃¹, 张卓奎³,
任春丽³, 李康¹, 方建平¹

(1. 西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 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; 3. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 现有成品率及关键面积估计模型中, 假定缺陷轮廓为圆, 而 70% 的实际缺陷轮廓接近于椭圆. 提出了椭圆缺陷轮廓的成品率模型, 该模型与圆模型相比更具有一般性, 而圆模型轮廓的成品率模型仅为新模型的特例. 比较了新模型与真实缺陷及其圆模型引起的成品率损失, 表明新模型在成品率估计方面更加精确.

关键词: 真实缺陷; 椭圆缺陷模型; 关键面积; 成品率模型

中图分类号: TN43 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2006)03-0433-05

Estimation of yield associated with elliptical defect

WANG Jun-ping^{1,2}, HAO Yue¹, ZHANG Zhuo-kui³,
Ren Chun-li³, LI Kang¹, FANG Jian-ping¹

(1. Ministry of Edu. Key Lab. of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. School of Telecommunication Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 3. School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: In integrated circuits, the defects associated with photolithography are assumed to be the shape of circular discs in order to perform the estimation of yield and fault analysis. However, the shape of 70% real defects approximates elliptical shapes. This paper provides a yield model caused by elliptical defects. The model is more general than that of the circular defect as the model is only an instance of the new model. A comparison result between the two models in experiment shows that the new model may predict the yield caused by real defects more accurately than the circular model does, which is of significance for the prediction and improvement of the yield.

Key Words: real defect; elliptical defect model; critical area; yield modeling

成品率估计可用于产品控制、材料管理、产品及时交货及计划工具的操作, 它也是企业从标准产品生产(如存储器)进化到 ASIC 和 SOC 产品生产的焦点, 同时还可用来改进比预期成品率低得多的设计、确定新器件成本及所需资源^[1]. 对成熟的工艺线, 在芯片研制及批量生产之前, 通过成品率估计, 采取措施(包括改变版图形状、设计规则、工艺条件等)可使成品率达到最大^[2].

缺陷对成品率一直有很大影响, 当今纳米工艺设计对缺陷的敏感度也在持续增加^[3]. 在典型的 CMOS 工艺中, 缺陷导致电学故障是成品率的最大损失因素之一. 现有的成品率估计模型均假定缺陷为圆形轮廓^[4~6], 而研究表明, 真实缺陷按形状可分为如图 1 所示的 3 种类型^[7], 其中 0-型缺陷占总缺陷数的 23%, 1-型缺陷占总缺陷数的 67%, 2-型缺陷占总缺陷数的 10%. 作者实验中发现, 这 3 类缺陷的比例分别为 25.73%, 50.88% 和 23.39%. 不难看出 1-型缺陷的真实形状接近椭圆, 1-型缺陷的等效椭圆形状可通过图像处理技术^[8]获得. 由于

半数以上的真实缺陷轮廓接近于椭圆形状,因此基于圆缺陷模型的成品率估计存在一定误差^[9,10]. 笔者研究基于椭圆缺陷轮廓的成品率模型及模型实用化所需的椭圆缺陷轮廓的关键面积模型.



图 1 真实缺陷形状

1 椭圆缺陷轮廓的成品率模型

通常,基于圆形缺陷的集成电路功能成品率模型可用 Poisson 分布和负二项分布描述为

$$\text{Poisson model} \quad Y_F = \prod_{i=1}^M \exp(-A_i^{(c)} D_i) \quad , \quad (1)$$

$$\text{Negative binomial model} \quad Y_F = \prod_{i=1}^M \left(1 + \frac{D_i A_i^{(c)}}{\alpha_i}\right)^{-\alpha_i} \quad , \quad (2)$$

其中 $A_i^{(c)}$ 是第 i 道工序与缺陷粒径大小和 IC 版图有关的关键面积, D_i 是第 i 道工序的平均缺陷密度. Poisson 模型对成品率估计过高,较精确的负二项分布模型中 α_i 是缺陷成团系数. 上述两模型均用到圆缺陷模型的关键面积 $A_i^{(c)}$.

$$A_i^{(c)} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} A(R) dh(R) \quad , \quad (3)$$

其中 $A(R)$ 是粒径为 R 的缺陷在芯片上的关键面积, $h(R)$ 是该类缺陷的粒径分布函数, R_{\min} 表示最小缺陷粒径, R_{\max} 表示最大缺陷粒径.

设任意椭圆缺陷为 $d(a, b, \theta)$, 椭圆缺陷参数方程为 $x = \alpha_1 \cos t - \beta_1 \sin t, y = \alpha_2 \cos t + \beta_2 \sin t$, 其中 $\alpha_1 = a \cos \theta, \alpha_2 = a \sin \theta, \beta_1 = b \sin \theta, \beta_2 = b \cos \theta, a$ 和 b 分别为椭圆的 2 个主半轴长, θ 为其主轴与 X 轴正向夹角. 基于真实缺陷椭圆轮廓模型, 第 i 道工序与椭圆轮廓缺陷和 IC 版图相关的关键面积式(3)利用 Stieltjes 积分表示为

$$A_i^{(c)} = \int_{A_{\min}}^{A_{\max}} \int_{B_{\min}}^{B_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} A(a, b, \vartheta) dt_1(a) dt_2(b) dt_3(\theta) \quad , \quad (4)$$

其中 A_{\min} 和 B_{\min} 分别为椭圆缺陷的 2 个主半轴长的最小值, A_{\max} 和 B_{\max} 分别为椭圆缺陷的 2 个主半轴长的最大值; θ_{\min} 和 θ_{\max} 分别为其主轴与 X 轴正向夹角的最小值和最大值. $t_1(a)$ 是该类缺陷在主轴 X 上的分布函数, 即 $\int_{A_{\min}}^{A_{\max}} dt_1(a) = 1$. $t_2(b)$ 是该类缺陷在主轴 Y 上的分布函数, 即 $\int_{B_{\min}}^{B_{\max}} dt_2(b) = 1$. $t_3(\theta)$ 是该类缺陷的主轴与 X 轴正向夹角的分布函数, 即 $\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} dt_3(\theta) = 1$. $A(a, b, \theta)$ 是主轴为 a 和 b , 夹角为 θ 的椭圆缺陷在芯片上形成关键面积.

更一般地,若 $F(a, b, \theta)$ 是 a, b, θ 的联合分布函数, 则式(4)可表示为

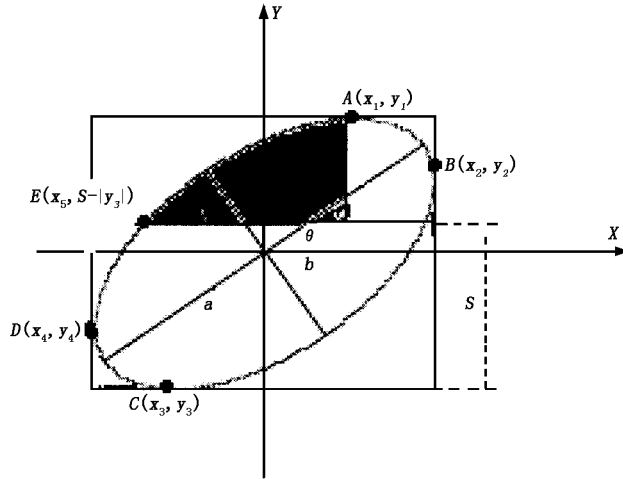
$$A_i^{(c)} = \int_{A_{\min}}^{A_{\max}} \int_{B_{\min}}^{B_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} A(a, b, \vartheta) dF(a, b, \theta) \quad , \quad (5)$$

若 a, b, θ 相互独立, 则 $F(a, b, \theta) = t_1(a) t_2(b) t_3(\theta)$.

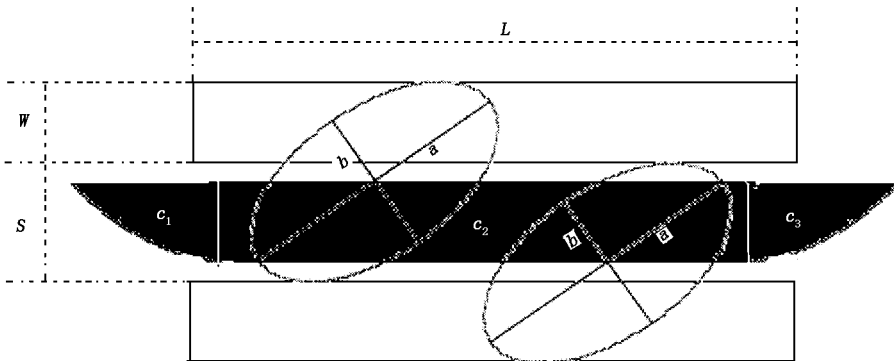
对成熟的工艺线, a, b, θ 相互独立, 所以基于椭圆缺陷的成品率模型应为式(4). 在式(4)中, $t_1(a), t_2(b)$ 和 $t_3(\theta)$ 为确定的分布, 因此椭圆缺陷的关键面积 $A(a, b, \theta)$ 成为求解式(4)的关键. 众所周知, IC 互连层对电路的信号功能起绝对控制作用, 而引起成品率损失的最大因素是互连层上金属线条间的短路. 下面以椭圆

缺陷引起互连层上金属线条间的短路为例给出 $A(a, b, \theta)$ 的计算方法.

设椭圆的外接矩形与椭圆的切点如图 2(a)所示分别为 $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$ 和 $D(x_4, y_4), L, W$ 和 S 分别为两条布线单元导体线条的长度、宽度和条间距(见图 2(b)). 当 $S < y_1 - y_3 < W + 2S$ 时,对两个水平布线的导体线条,椭圆缺陷中心 O 落在图 2(b)所示的 c_1, c_2 和 c_3 黑色区域,导致两个导体线条连通,这 3 个区域的面积就是两个线条的短路关键面积. 其中 c_2 为矩形图形面积, c_1 和 c_3 面积相等,为图 2(a)所示的黑色区域面积.



(a) 椭圆缺陷及关键面积 c_3



(b) 夹角为 θ 的椭圆轮廓导致水平布线导体短路的关键面积

图 2 椭圆缺陷

令图 2(a)中 $E(x_5, S - |y_3|)$ 点对应的参数为 t_1 , A 点对应的参数为 t_2 , 则夹角为 θ 的椭圆缺陷引起水平布线导体短路的关键面积模型 $A_{\text{short}}^{hc}(a, b, \theta)$ 为

$$A_{\text{short}}^{hc}(a, b, \theta) = \begin{cases} 0 & , & 0 \leq y_1 - y_3 \leq S & , \\ c_1 + c_2 + c_3 & , & S < y_1 - y_3 \leq W + 2S & , \\ (S + W)L & , & y_1 - y_3 > W + 2S & . \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$c_2 = (y_1 - y_3 - S) (L - 2(x_2 - x_4)) & , \\ c_1 = c_3 = \frac{\cos(2t_2) - \cos(2t_1)}{4} (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2) - \frac{t_2 - t_1}{2} (\alpha_1 \beta_2 + \beta_1 \alpha_2) + \\ \frac{\sin(2t_2) - \sin(2t_1)}{4} (\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1) & .$$

类似地, 夹角为 θ 的椭圆缺陷引起垂直布线导体短路的关键面积模型 $A_{\text{short}}^{vc}(a, b, \theta)$ 为

$$A_{\text{short}}^{\text{rc}}(a, b, \theta) = \begin{cases} 0 & , & 0 \leq x_1 - x_3 \leq S & , \\ c_1 + c_2 + c_3 & , & S < x_1 - x_3 \leq W + 2S & , \\ (S + W)L & , & x_1 - x_3 > W + 2S & . \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$c_2 = (x_1 - x_3 - S)(L - 2(y_2 - y_4)) & , \\ c_1 = c_3 = \frac{\cos(2t_2) - \cos(2t_1)}{4} (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2) - \frac{t_2 - t_1}{2} (\alpha_1 \beta_2 + \beta_1 \alpha_2) + \\ \frac{\sin(2t_2) - \sin(2t_1)}{4} (\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1) & .$$

则基于真实缺陷椭圆轮廓成品率新模型由式(1),(4),(6),(7)或(2),(4),(6),(7)组成.

2 验证模型

模型验证的目的在于通过实验证实由椭圆形状缺陷引起的成品率损失用椭圆缺陷轮廓成品率模型比用圆缺陷轮廓成品率模型表征更加精确. 对梳状测试结构(图 3)采集到的多余物缺陷样本, 采用文[11~13]的方法得到一组真实的缺陷轮廓, 基于真实的缺陷轮廓提取出缺陷的圆轮廓参数和相应的椭圆轮廓参数. 为了方便计算, 认为缺陷在空间上服从均匀分布, 且椭圆的角度 θ 取值固定, 利用式(1),(4),(6),(7)及圆缺陷的关键面积计算模型在图 3 的布线单元上获得它们的关键面积及成品率, 其中线宽 $S = W = 3e, e = 0.3905 \mu\text{m}, L = 189 \mu\text{m}$, 线根数为 30, 缺陷密度 D 根据实际测试结果取值为 1.9×10^{-6} 个每平方微米.

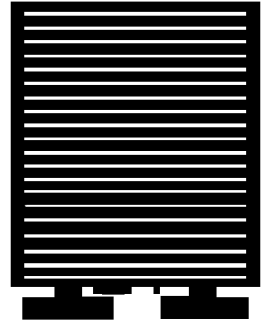


图 3 测试单元版图

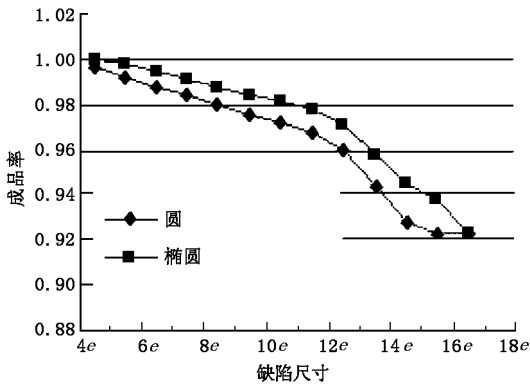


图 4 圆轮廓与椭圆轮廓的成品率

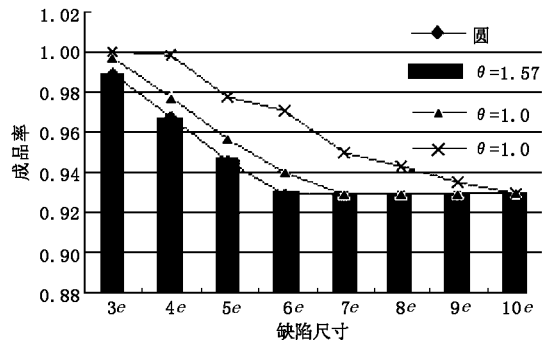


图 5 不同角度的椭圆缺陷与圆缺陷引起的成品率比较

图 4 和图 5 比较了不同尺寸的椭圆缺陷轮廓与相应的最大圆缺陷轮廓对版图 3 的成品率. 图 4 表示圆缺陷轮廓与椭圆缺陷轮廓的成品率比较, 椭圆参数 a 等于圆形缺陷的直径, b 为 $1/(2a), \theta$ 为 1.0 . 由图 4 可看出, 当缺陷最大圆粒径位于 $[0, 4e]$ 时成品率为 1, 原因是缺陷粒径小于线条间距不产生短路故障. 当粒径大于 $16e$ 时, 椭圆模型在 θ 不等于 90° 时的成品率比圆模型高, 其原因是最大圆模型过高地估计了短路故障. 最大圆模型估计的误差与椭圆缺陷的参数有关. 图 5 给出不同 θ 的椭圆缺陷与最大圆缺陷的成品率比较. 特别地, 当 θ 为 90° 时, 如果不考虑椭圆缺陷引起关键面积 c_1 和 c_3 部分, 则椭圆缺陷引起的关键面积及成品率和最大圆引起的关键面积及成品率相等. 上述结果表明圆缺陷成品率只是椭圆缺陷成品率模型的特例. 值得指出的是, 笔者在实验中随机抽取了缺陷样本, 由此缺陷样本采用不同缺陷模型估计的成品率之间差值比椭圆缺陷样本采用不同缺陷模型估计的成品率之间的差值要小. 也就是说, 如果样本取椭圆形状缺陷, 则圆模型与椭圆模型引起的成品率估计误差更大, 表明了椭圆模型的意义.

3 结束语

在 IC 制造中, 精确的成品率模型起着非常重要的作用. 笔者根据半数以上的真实缺陷轮廓为椭圆形状

的特点,提出更具一般性的基于椭圆缺陷轮廓的 IC 成品率新模型. 实验比较了新模型与已有模型引起的成品率损失,结果表明圆缺陷成品率只是椭圆缺陷成品率模型的特例,也表明椭圆缺陷轮廓的成品率模型比圆缺陷轮廓的成品率模型更具有一般性.

参考文献:

- [1] Rencher M. Physical DFY Techniques Improve Yields[EB/OL]. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleIE=18311057>, 2004-02-09.
- [2] 郝 跃. 集成电路制造动力学理论与方法[M]. 石家庄:河北教育出版社,1995.
- [3] Goel H, Dance D. Yield Enhancement Challenges for 90nm and Beyond[A]. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop[C]. Munich; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003. 262-265.
- [4] Jiang Xiaohong, Hao Yue. Equivalent Circular Defect Model of Real Defect Outlines in the IC Manufacturing Process[J]. IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(3): 432-440.
- [5] De Vries D K, Simon P L C. Calibration of Open Interconnect Yield Models, Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems[A]. 18th IEEE International Symposium[C]. Los Alamitos; IEEE Comput Soc, 2003. 26-33.
- [6] Allan G A. Targeted Layout Modification for Semiconductor Yield/Reliability Enhancement[J]. IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing, 2004, 17(4): 573-581.
- [7] Hess C, Weiland L H. Issues on the Size and Outline of Killer Defects and Their Influence on Yield Modeling[A]. IEEE/SEMI ASMC 96 Processings[C]. Cambridge; IEEE, 1996. 423-428.
- [8] 章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [9] Wang Junping, Hao Yue. Yield Modeling Based on Circular Defect Size and a Real Defect Rectangular Degree[A]. ICSICT Proceedings[C]. Beijing; Institute of Electrical and Electronics Engineerings Inc, 2004. 1104-1107.
- [10] 王俊平,郝 跃. 考虑缺陷形状分布的 IC 成品率模型[J]. 半导体学报,2005, 26(5): 1054-1058.
- [11] Wang Junping, Hao Yue, Tie Manxia. Mathematical Morphological Filtering for IC Defect Image[J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(2): 211-214.
- [12] Wang Junping, Hao Yue, Jing Minge. Skeleton Extraction of IC Real Defects Using Morphology[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(2): 206-209.
- [13] 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.

(编辑: 郭 华)

(上接第 432 页)

- [2] Perez J, Catedra M F. RCS of Electrically Large Targets Modelled with NURBS Surfaces[J]. Electronics Letters, 1992, 28(12): 1119-1121.
- [3] Perez J, Catedra M F. Application of Physical Optics to the RCS Computation of Bodies Modeled with NURBS Surfaces [J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 1994, 42(10): 1404-1411.
- [4] Domingo M, Rivas F, Perez J. Computation of the RCS of Complex Bodies Modeled Using NURBS Surfaces[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(6): 36-47.
- [5] Perez J, Saiz J A, Conde O M. Analysis of Antennas on Board Arbitrary Structures Modeled by NURBS Surfaces[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 1997, 45(6): 1045-1053.
- [6] Sefi S. Ray Tracing Tools for High Frequency Electromagnetics Simulations[D]. Sweden; Royal Institute of Technology, 2003.
- [7] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [8] Jones D S, Kline M. Asymptotic Expansion of Multiple Integrals and the Method of Stationary Phase[J]. J Math Phys, 1958, 37(4): 1-28.

(编辑: 郭 华)