

成品率驱动下基于模型的掩模版优化算法

王 眇 蔡懿慈 石 蕊 洪先龙

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要: 提出并实现了以分段分类思想为基础的掩模版优化算法, 它是一种基于模型的光学邻近效应方法。该算法具有矫正精度高、灵活性强和矫正效率较高的特点, 适合于版图中关键图形的矫正。实验表明, 该优化算法可以实现矫正功能并且具有很好的矫正效果。

关键词: 掩模; 光刻; 基于模型的光学邻近矫正

EEACC: 7410D; 5120

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)03-0351-07

1 引言

在芯片特征尺寸越来越小、集成度越来越高、制造工艺越来越复杂的今天, 芯片生产面临着如何保证制造的芯片的性能符合设计需求, 芯片的生产成品率符合生产需求等等新的问题。这些因素导致在物理设计阶段就需要考虑工艺和制造过程对设计的影响^[1]。

光刻过程中由于光波衍射和相邻图形光波之间干涉而使光刻图形与掩模图形产生偏差, 从而导致电路性能和功能发生误差和错误的结果称为光学邻近效应(OPE, optical proximity effect)^[2,3]。在深亚微米工艺下, 由于光刻图形的尺寸已经接近于所用光源的光波波长, 这种光学邻近效应是不可避免的, 因此必须采取相应的措施来尽可能地抑制 OPE, 以保证制造的芯片的性能, 获得满意的成品率。

目前对光学邻近效应的解决方法大致可以分为两类:

第一类方法是在硅片生产阶段, 通过调整光刻工艺参数来消除光学邻近效应。其中, 改变光刻工艺中的光刻波长是最直接最有效的方法。但是, 更新光源的方法对光刻设备要求较高, 会极大地增加产品

成本, 并导致原有生产力的浪费。

第二类方法是在集成电路设计阶段, 通过调整和研究新的物理设计方法来抑制光学邻近效应^[4]。这类方法是对设计阶段的改善, 成本低廉、效果好, 可有效地利用现有的生产力。目前工业界普遍采用的方法是光刻矫正技术(RET, reticle enhancement technology)。光刻矫正技术主要包括光学邻近矫正(OPC, optical proximity correction)、移相掩模版(PSM, phase-shift mask)和辅助图形与伪图形(asist and dummy features)。其中, 光学邻近矫正主要是通过改变原芯片掩模版图形的形状来减小光刻图形的偏差。OPC 通常被分为两大类: 基于规则的方法(rules-based approach)和基于模型的方法(model-based approach)^[5,6]。基于规则的方法^[7~9], 需要事先建立矫正规则数据库, 实际处理中只需通过查找数据库便可以得到矫正数据实现对掩模版图形的矫正。这种方法在处理大规模集成电路芯片时速度快, 但是它的矫正精度不是很高。基于模型的方法, 需要事先选择适当的光学模型, 实际处理中利用光学模型模拟光刻成像的过程, 实现对掩模版图形的矫正。这种方法矫正结果的精确度较高, 需要花费的时间较长, 适合于对版图关键图形的矫正, 被工业界广泛采用^[8]。

王 眇 女, 1978 年出生, 硕士研究生, 从事版图矫正算法研究工作。

蔡懿慈 女, 1960 年出生, 副教授, 从事 VLSI CAD 教学与科研工作。

石 蕊 女, 1977 年出生, 硕士研究生, 从事版图矫正算法研究工作。

本文实现了基于模型的 OPC 纠正算法, 算法采用分段分类的思想进行掩模版的矫正处理, 降低了复杂性, 提高了效率, 并具有较高的矫正精度.

2 基于模型的掩模版矫正系统

基于模型的光学邻近矫正方法流程如图 1 所示. 系统主要包括空间成像模拟方法、评价函数的选择和优化算法部分.

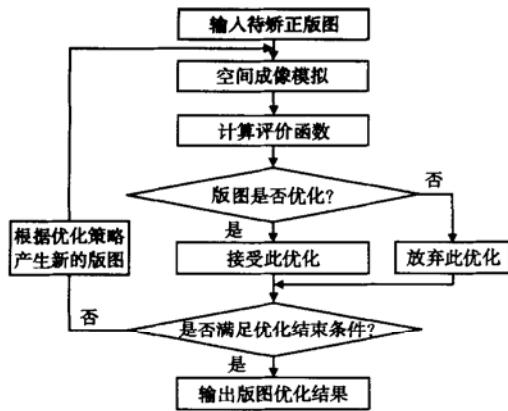


图 1 基于模型的 OPC 流程

Fig. 1 Model-based OPC

空间成像模拟是基于模型方法的基础, 它用光学模型模拟光刻工艺的实际过程, 获得对掩模版图形的光刻成像图形. 本系统中选择 Kernel 组合的光学模型^[10], 对实际光刻中如光刻、光刻胶空间成像、光刻胶刻蚀过程等诸多因素做近似处理, 并能够快速地获得成像图形. 通过工艺实验调整模型中的参数, 确保了模拟具有较高的精度. 评价函数是评价硅片上光刻所得图形与期望图形之间符合程度的重要标准. 本文采用光强梯度评价标准作为评价函数, 它是指选择在硅片上期望图形边界处光刻成像的光强变化梯度值作为评价函数, 保证了图形边界分明.

优化算法是整个基于模型方法的关键部分, 它将调用空间成像模拟和评价函数, 采用一定的策略来对掩模版图形进行调整, 最终得到优化的版图结果. 常用的方法有分支定界整数规划算法^[11]、模拟退火算法^[12]和细菌算法^[13]等. 分支定界整数规划算法将掩模版进行网格划分, 通过确定各个网格的透光情况确定整个掩模版的图形形状, 利用该算法可以得到最优解, 但是所得版图图形可能出现一些离散的情况. 模拟退火算法可以结合不同的掩模版图形调整方法寻找最优解, 但是需要花费较长的时间.

细菌算法相对来说简单易行, 但是由于对掩模版图形调整方案的选取具有很大的贪婪性, 因此最终得到的往往是一个局部最优解. 本文采用基于分类分段的思想对版图图形进行线段划分和分类处理并进行版图优化, 速度快、效果好.

3 基于模型的掩模版优化算法

3.1 掩模版优化算法流程描述

掩模版图形优化算法是基于模型的掩模版矫正系统的核心处理部分. 随着集成电路规模的不断增大和集成电路工艺的不断发展, 要求矫正系统具有足够高的矫正精度和足够快的处理速度, 因此在满足精度要求的前提下, 对掩模版的矫正还需要具有快速处理的功能. 图 2 是基于模型的掩模版优化算法流程示意图.

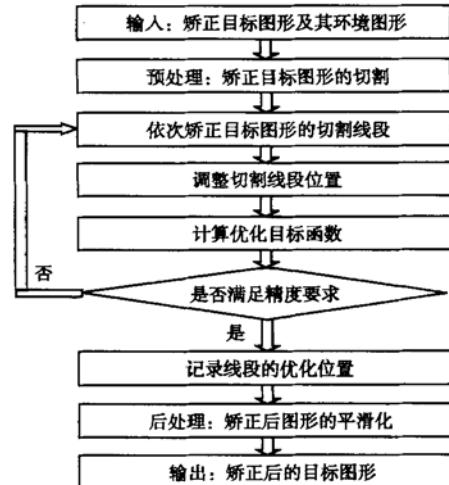


图 2 基于模型的掩模版优化算法流程示意图

Fig. 2 MOPC algorithm description

基于模型的掩模版图形优化的输入包括待矫正的目标图形 (correction target) 和环境图形 (environment features) 序列. 待矫正的目标图形是算法矫正的目标, 它是一个完整的多边形(凸多边形或凹多边形). 环境图形是对矫正目标图形产生光学邻近效应的周围图形. 定义变量 AMBIT 表示需要考虑的光学邻近效应影响范围, 那么环境图形序列就是将矫正目标图形轮廓线向外膨胀 AMBIT 的距离后包含或者相交的图形序列. AMBIT 的数值与光刻工艺参数以及矫正精度要求相关. 图 3 是输入的矫正目标图形及其环境图形的示意图. 掩模版图形矫

正直接以多边形的形式输出矫正后的图形。

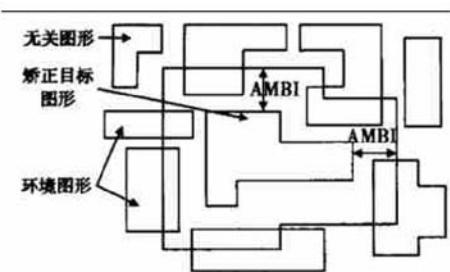


图 3 矫正目标图形及其环境图形的示意图

Fig. 3 Input correction target and the environment features Mask features correction outputs the corrected features in the form of polygon.

3.2 分段分类优化算法实现

分段分类算法的思想是将矫正目标图形的边界切割为小线段, 每条线段根据其位置的不同标记为不同的类型。矫正过程将以小线段作为处理的基本单位, 对不同类型的线段采用不同的矫正策略和矫正目标。切割处理使矫正的对象更加明确、单一, 避免了对目标图形进行整体优化时情况过于复杂的问题。

3.2.1 预处理: 矫正目标图形的切割

根据光学邻近效应的类型和边界在图形中所处位置的特点, 线段的类型主要分为线边(Edge)、线端(Line-end)和拐角(Corner)三种。由于线段在图形中的方位将影响矫正中对线段调整的策略, 因此每种类型又细化为若干子类型。线边分为上下左右4种子类型, 描述其在矫正图形中上下左右四种不同方位。线端包括凸起和凹陷两种情况, 每种情况又有上下左右四种不同朝向, 因此线端分为8种子类型。拐角包括外角和内角两种情况, 每种情况有左下、左上、右下和右上四种不同朝向, 此外每条线段仅仅是拐角的一条前边或者后边, 因此拐角分为16种子类型。图4是切割目标图形的示意图。图形切割后线段的长度与线段的类型、矫正精度的要求相关。

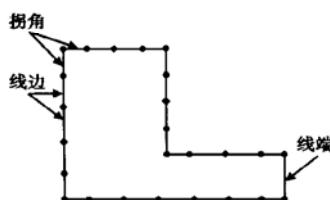


图 4 矫正目标图形切割示意图

Fig. 4 Schematic of cutting of the correction target

3.2.2 矫正目标图形的优化策略

切割所得的线段是矫正处理的基本单位, 矫正过程将沿目标图形边界的顺时针方向依次处理各条线段, 根据线段类型的不同和成像图形的特点选择不同的移动方向循环步进。在循环矫正过程中, 根据优化策略不断地形成版图图形的新解, 新解搜索的方向是成像特点决定的某一优化方向, 在此优化方向上贪婪地搜索满足精度要求的优化解。根据集成电路的实际性能要求和精度要求, 适当地选择图形矫正的目标函数及其迭代优化的终止条件。由于制造掩模版过程的限制, 掩模版图形需要位于网格线上, 因此线段的移动量应为最小掩模版网格尺寸的整数倍。

(1) 线边类型线段的优化策略

图5是暗版和亮版上线边类型的线段移动策略示意图, 主要通过线段的整体移动来进行优化。

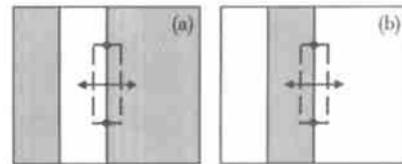


图 5 线边类型线段移动策略示意图 (a) 暗版; (b) 亮版

Fig. 5 Removal strategy of the edge on the dark mask

(2) 拐角类型线段的优化策略

拐角类型的线段优化策略采用阶整体移动。图6是内角和外角处拐角类型的线段移动策略的示意图。

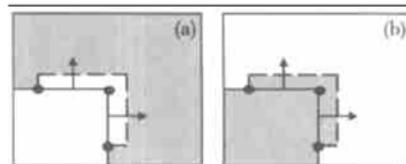


图 6 拐角类型线段移动策略示意图 (a) 暗版外角; (b) 暗版内角

Fig. 6 Removal strategy of the full rank to perform the correction operation

(3) 线端类型线段的优化策略

图7是凸起和凹陷的线端类型线段及其相邻拐角类型线段的移动策略示意图。由于与线端类型线段相邻的肯定是拐角类型的线段, 而且对它们的矫正是互相关联的, 因此对三条线段的矫正同时进行, 主要通过线段的整体移动来进行优化。

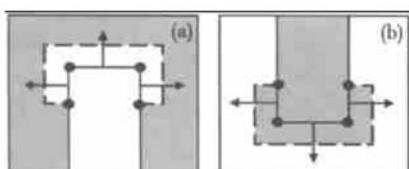


图 7 线端类型线段移动策略示意图 (a) 暗版凸起线端; (b) 暗版凹陷线端

Fig. 7 Strategy for the heave-type line, the hollow-type line, and the neighboring corner-type line

3.2.3 矫正图形的优化目标

图形矫正的目标函数是对优化结果的评判标准, 它说明了对图形进行矫正的效果。由于光学邻近矫正的目标是尽量减小硅片上光刻成像图形与预期图形之间的偏差与变形, 因此矫正的目标函数应该可以代表图形的差异程度。

采用光学邻近矫正方法对掩模版进行图形矫正, 减小成像图形的变形, 其最终目的是要确保硅片上实现的集成电路性能与设计相吻合, 确保芯片生产具有较高的成品率。因此, 实际应用中并不需要耗费大量的时间使成像图形与预期图形完全重合, 而且从光刻过程的物理数学原理出发, 这种完全重合是不可能实现的。所以可以根据集成电路的实际性能要求和精度要求, 适当地选择图形矫正的目标函数及其迭代优化的终止条件。

(1) 线边类型线段的优化目标

对线边类型线段的矫正主要实现对成像图形边界位置的控制, 使之与预期图形边界的间距满足精度要求。在掩模版图形中, 这种边界的控制对宽度较小的线条尤为重要, 通过矫正线条边界, 可以保证多晶硅层晶体管栅极线条的宽长比, 避免金属层连线线条的短路与断路。图 8 是矫正线边类型线段的优化目标示意图。



图 8 线边类型线段优化目标示意图

Fig. 8 Optimization target of the edge-width-type line

由于已经将目标图形边界进行了切割, 限定了线边类型线段的长度, 因此线段作为一个整体处理, 选择线段中点对应的成像点与预期点之间的距离作

为目标函数。

(2) 拐角类型线段的优化目标

对拐角类型线段的矫正主要减小成像图形中拐角的弧度, 使之与预期图形拐角的贴近程度满足精度要求。在掩模版图形中, 这种对拐角圆化的控制对宽度较小的线条拐弯尤为重要。在电路设计中, 为了在满足晶体管栅极线条的宽长比数值前提下减小芯片面积, 多晶硅层栅极线条图形经常会出现折叠拐弯, 同样为了在有限芯片面积上布通金属互连线, 金属层连线线条图形也经常会出现折叠拐弯。所以通过矫正拐角, 可以有效地提高电路性能。

图 9(a) 是对拐角矫正后成像图形与预期图形关系的示意图。从图中可以清楚看出, 矫正后成像图形更接近预期图形拐角的顶点, 但同时成像图形在拐角两侧将超出预期图形。图 9(b) 是这两个参量变化关系曲线。在对拐角的矫正中, 这两个参量是相关的。

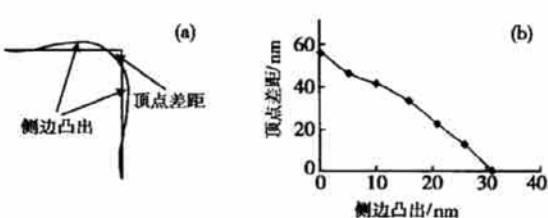


图 9 (a) 拐角矫正后成像图形与预期图形关系; (b) 顶点差距与侧边凸出关系曲线

Fig. 9 Target function of the corner correction
(a) Imaging features after corner correction and the expected features; (b) Relation between two parameters

因此, 矫正拐角类型线段的目标函数有两种选择: 顶点距离和侧边距离。图 10 是矫正拐角类型线段的优化目标示意图。顶点距离选择沿角平分线方向的成像点与顶点之间的距离作为目标函数。侧边

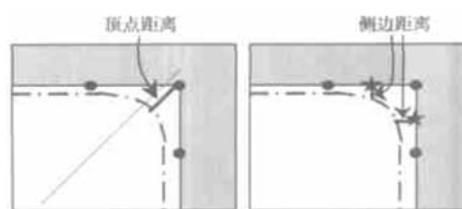


图 10 拐角类型线段优化目标示意图

Fig. 10 Correction of the corner-type line

距离选择两侧边线段中点对应的成像点与预期点之间的距离和作为目标函数。

(3) 线端类型线段的优化目标

对线端类型线段的矫正主要解决宽度较小的线条变短的问题,使线条的长度满足精度要求。在掩模版图形中,多晶硅层晶体管栅极线条的露头,金属层连线线条顶端与通孔的套准等情况都对线条顶端的变形有严格的要求。通过对线端的矫正,可以有效控制线条变短,保证了物理设计在工艺制造中的正确性。图 11 是矫正线端类型的线段的优化目标示意图。

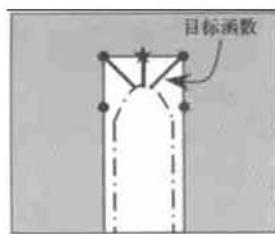


图 11 线端类型线段优化目标示意图

Fig. 11 Optimization target of the line-end-type line

由于矫正线端类型的线段同时需要矫正相连接的两条拐角类型的线段,因此目标函数中包含了对线条长度和对拐角弧度的考虑。但是,对线端的矫正主要目标应集中在调整线条长度方面,因此可以在一定程度上放松对拐角弧度矫正的精度。目标函数为线端中点对应的成像点与预期点之间的距离、相连两拐角平分线方向的成像点与拐角顶点之间的距离三个数值的和。

3.2.4 后处理: 矫正后图形的平滑化

经过基于模型的掩模版矫正处理后,图形的边界将变成起伏交错的阶梯状,图形的顶点数目将增加几倍甚至几十倍。图 12 是一个矫正后图形的示意图。矫正前的目标图形仅有 6 个顶点,矫正后顶点数目膨胀为 54 个。

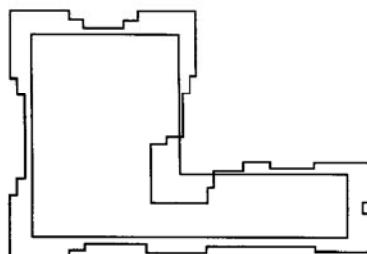


图 12 矫正后未进行平滑化图形的示意图

Fig. 12 Schematic before smooth operation

由此可见,矫正不可避免地增加了对矫正后图形描述的空间复杂度及其他相关处理的复杂度,而且给描述和制造掩模版也带来了很多困难。因此在后处理中,将对矫正后的目标图形边界进行平滑化处理,也就是消除可以忽略不计的细微起伏,尽可能地降低不必要的复杂性。矫正后图形的这种平滑化处理在对精度影响不大的前提下,将大大降低后续描述和处理的复杂度。图 13 是图 12 图形经过平滑化处理后的示意图,平滑化处理后图形的顶点数目减少。

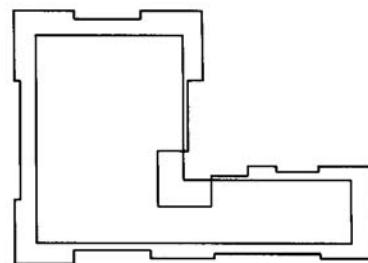


图 13 平滑化处理后图形的示意图

Fig. 13 Schematic after smooth operation

4 实验结果及结论

上述基于模型的掩模版优化算法已在 UNIX 工作站上用 C 语言实现,输入掩模版图形即可以得到矫正后的相应图形,利用光学模拟可以获得硅片上成像图形,从而判别矫正的效果。

下面列举了对一些典型图形矫正的结果,光刻工艺的参数条件是光刻光波波长为 248nm, 数值孔

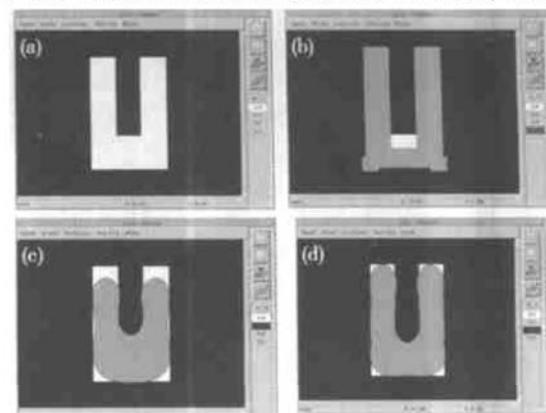


图 14 线端图形矫正实验结果示意图 (a) 矫正目标图形; (b) 矫正后图形; (c) 矫正前成像图形; (d) 矫正后成像图形

Fig. 14 Experimental results for the line-end-type
(a) Target before correction; (b) Target after correction;
(c) Imaging before correction; (d) Imaging after correction

径为 0.5, 聚焦深度为 0, 光波部分相干度为 0.7, 芯片的最小线宽为 $0.18\mu\text{m}$. 在图 14, 15, 16 三组图形中 (a) 是原设计的版图图形, (b) 是矫正后的版图图形, (c) 是矫正前的成像图形, (d) 是矫正后的成像图形. 从图上可以明显看出, 矫正后的成像图形比矫正前的成像图形在矫正部位有了明显的改善.

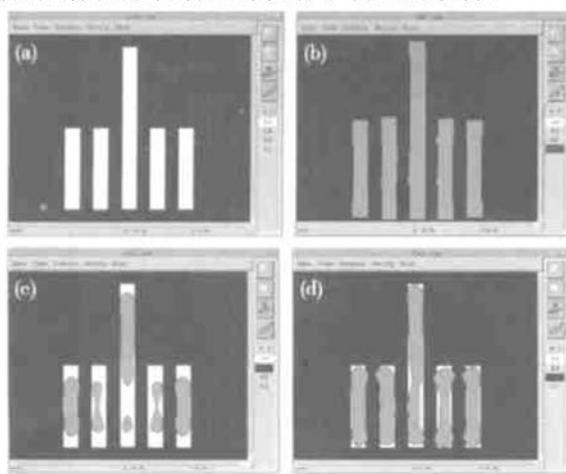


图 15 线条图形矫正实验结果示意图 (a) 矫正目标图形; (b) 矫正后图形; (c) 矫正前成像图形; (d) 矫正后图形

Fig. 15 Experimental results for the line-type (a) Target before correction; (b) Target after correction; (c) Imaging before correction; (d) Target after correction

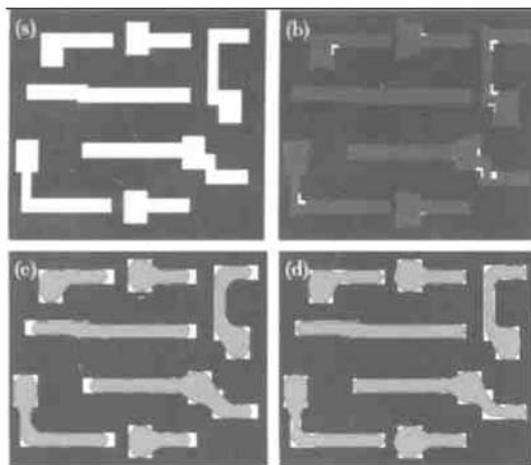


图 16 多晶硅层实验结果示意图 (a) 矫正目标图形; (b) 矫正后图形; (c) 矫正前成像图形; (d) 矫正后成像图形

Fig. 16 Experimental results for poly (a) Target before correction; (b) Target after correction; (c) Imaging before correction; (d) Imaging after correction

实验表明, 基于模型的掩模版矫正系统对集成电路的矫正具有精度高和可控性强的优点. 通过输入参数, 用户可以控制矫正结果的精度, 矫正结果的精度越高, 需要花费的处理时间也就越长.

参考文献

- [1] Chen J F, Laidig T, Wampler K E, et al. Practical method for full-chip optical proximity correction. SPIE, 1997, 3051: 790
- [2] Kahng A B, Pati Y C. Sub wavelength optical lithography: challenges and impact on physical design. IEEE International Symposium on Physical Design, 1999: 774
- [3] Dolainsky D, Maurer W. Application of a simple resist model to fast optical proximity correction. SPIE, 1997, 3051: 774
- [4] Otto O W, Henderson R C. Integrating proximity effects corrections with photo mask data preparation. SPIE, 1995, 2440: 184
- [5] Otto O W, Garofalo J G, Low K K, et al. Automated optical proximity correction—A rule-based approach. SPIE, 1994, 2197: 278
- [6] Shioiri S, Tanabe H. Fast optical proximity correction: analytical method. SPIE, 1995, 2440: 261
- [7] Shi Rui, Cai Yici, Hong Xianlong, et al. The selection and creation of the rules in rules-based optical proximity correction. Proceedings of the 4th International Conference on ASIC, 2001: 50
- [8] Shi Rui, Cai Yici, Hong Xianlong, et al. Important works about rules in rules-based optical proximity correction. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(7): 701
- [9] Yang Changqi, Hong Xianlong, Wu Weimin, et al. An object-based approach to optical proximity correction. Proceedings of the 4th International Conference on ASIC, 2001: 54
- [10] Chen Zhijin, Shi Zheng, Wang Guoxiong, et al. A new method of 2D contour extraction for fast simulation of photolithographic process. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(7): 766 (in Chinese) [陈志锦, 史峥, 王国雄, 等. 一种快速光刻模拟中二维成像轮廓提取的新方法. 半导体学报, 2002, 23(7): 766]
- [11] Liu Yong, Zakhor A, Zuniga M A. Computer-aided phase shift mask design with reduced complexity. IEEE Trans Semicond Manuf, 1996, 9(2): 170
- [12] Liu H Y, Linard K, Wang Y T, et al. The application of alternating phase-shifting masks to 140nm gate patterning (II): mask design and manufacturing tolerances. SPIE, 1998, 3334: 2

An Algorithm for Yield Driven Correction of Layout

Wang Yang, Cai Yici, Shi Rui and Hong Xianlong

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The layout correction and optimization algorithm are presented based on the model-based OPC. The algorithm has such merits as high accuracy of correction, high adaptability, and high efficiency, which make it very appropriate to be used in critical features on layout. Tests show this algorithm can successfully deal with correction and with good correction result.

Key words: layout; optical lithography; model-based OPC

EEACC: 7410D; 5120

Article ID: 0253-4177(2004)03-0351-07

Wang Yang female, was born in 1978, master candidate. Her research interests focus on OPC algorithms.

Cai Yici female, was born in 1960, associate professor. Her research interests focus on VSLI layout.

Shi Rui female, was born in 1977, master candidate. Her research interests focus on OPC algorithms.