

# 优化的基于模型的光学邻近矫正算法\*

蔡懿慈 王 旻 周 强 洪先龙

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种新的优化的基于模型的光学邻近矫正算法,该算法充分考虑了图形内部及图形之间的光学邻近影响,实现了线段切割和移动步长的自适应性,提高了系统的矫正精度及矫正速度,实验结果表明该算法是有效的。

**关键词:** 光刻; 光学邻近效应; 基于模型的光学邻近矫正

EEACC: 2570 CCACC: 7410D

中图分类号: TN405. 97 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)03-0601-05

## 1 引言

随着集成电路设计的高速发展,如何缩小版图图形光刻以后的变形和偏差,抑制光学邻近效应的负面作用,进而提高芯片生产的成品率,对芯片制造业的发展起着关键的作用. 针对该问题,目前工业界常采用的解决办法是:在集成电路设计阶段对版图进行光学邻近矫正(OPC:optical proximity correction)、移相掩膜版(PSM:phase-shift mask)和加入辅助图形与伪图形(assist and dummy features)<sup>[1]</sup>,尽可能有效地利用现有的生产能力,来提高产品成品率,获得最大的经济效益. 现阶段工业界普遍采用的光学邻近矫正主要是通过改变原芯片掩膜版图形的形状来减小光刻图形的偏差. 光学邻近矫正主要有两种方法<sup>[2]</sup>,一种是基于模型的光学邻近矫正方法,另一种是基于规则的光学邻近矫正方法. 基于规则的光学邻近矫正方法<sup>[3]</sup>,具有矫正速度快的特点,但是矫正精度不高. 基于模型的光学邻近矫正方法<sup>[4]</sup>,在矫正过程中需要利用事先建立的光学模型来模拟光刻成像过程,因此在时间上要付出一定的代价,但可以保证高的矫正精度,尤其适用于对版图关键部位的矫正,因此被工业界广泛应用.

曾经有文献提出<sup>[5,6]</sup>:通过预先移动原有图形的边来改变图形的形状和大小以进行光学补偿. 这

种方法是基于模型的光学邻近矫正,具有一定的精确性,但由于矫正措施太过单一,不能适用于图形形状复杂的实际版图的处理. 文献[7]中也提出了一种基于像素点阵的方法:把掩膜版图图形分解成像素点阵,根据像素光波衍射后所在的位置,通过模拟退火等优化方法来确定像素的最终位置,从而确定掩膜版的图形形状. 这种方法要计算大量像素点的光强值,因此时间和空间代价都非常高,不适合作为实际应用的方法.

文献[4]中提出了一种以分段分类思想为基础的基于模型的光学邻近矫正算法,这个算法建立了典型的光学矫正模型,在一定程度上考虑了环境图形对目标图形的光学邻近影响,对版图邻近效应的矫正有一定效果. 但是该算法存在两个问题,一是对环境图形与目标图形之间的光学邻近影响考虑不全面,对系统的矫正精度有一定影响;二是算法采用单一步长,限制了系统的矫正效率. 本文提出并实现了一种充分考虑图形内部及图形之间光学邻近影响、具有自适应移动步长的基于模型的光学邻近矫正算法,实验结果表明,该算法具有高矫正精度及矫正速度.

## 2 系统描述

基于模型的光学邻近矫正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三个部

\*国家自然科学基金资助项目(批准号:90307017)

蔡懿慈 女,1960 年出生,副教授,主要从事 VLSI 版图理论和算法研究.

王 旻 女,1979 年出生,硕士研究生,目前从事 VLSI 版图矫正方法研究.

周 强 男,1961 年出生,副教授,主要从事 VLSI 版图理论和算法研究.

2004-03-29 收到,2004-07-13 定稿

分<sup>[4]</sup>.

优化算法部分是整个矫正系统的关键部分,它将调用空间成像模拟和评价函数,采用一定的矫正策略对版图图形的形状进行调整,最终得到优化的版图结果.图 1 是优化的基于模型的光学邻近矫正算法流程示意图.该算法的输入为矫正目标图形及其环境图形,在经过预处理、矫正处理及后处理后,系统输出矫正后的目标图形.

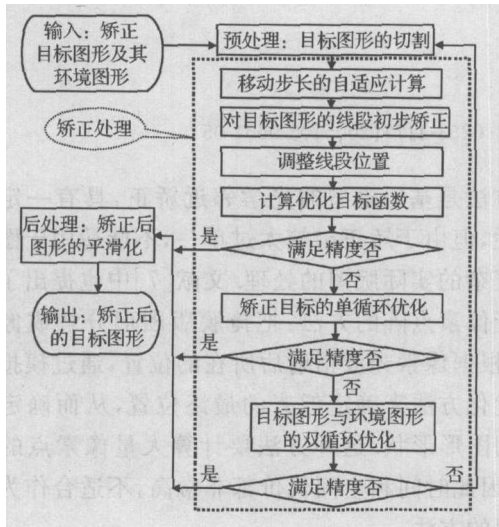


图 1 优化的基于模型的邻近矫正算法流程示意图

Fig. 1 Flow chart of the optimization algorithm for model-based OPC

在预处理部分,首先将目标图形进行切割,然后将切割所得的小线段分类,分为线段、线端和拐角,使得矫正的目标明确.在矫正处理部分,对矫正目标进行移动步长自适应的初步矫正、目标图形的单循环优化和目标图形与环境图形的双循环优化,提高了系统的速度和精度.在后处理部分,平滑化矫正后的目标图形,通过减少矫正后目标图形的顶点数目,降低后续数据描述和处理的复杂度.

### 3 算法描述

#### 3.1 移动步长的自适应

文献[4]中的矫正算法,在预处理阶段以单一的步长将矫正目标图形的边界切割为小线段,切割结果是否合理,对矫正结果速度和精度有很大影响.这种采用单一步长的线段切割方法显然是不够合理的.

在矫正过程中,对目标图形的矫正主要是通过

相应线段的移动来实现的,其中移动步长的选择是关键.文献[4]中采用了线段的移动量为一定值的方法,显然是不够灵活的,更重要的是影响系统的矫正效率和矫正结果的精度.

本文所提出的优化算法解决了这两个问题,一是在预处理阶段根据待矫正版图图形最小线宽以及光刻波长,来确定该目标图形所要采取的切割步长.依据光学和有限元原理,在图形的最小线宽小于光刻波长的情况下,采用最小线宽的五分之一作为切割的基础步长;反之,在图形的最小线宽大于光刻波长的情况下,采用光刻波长的五分之一作为切割的基础步长,以保证所得小线段的完整性,便于系统光学模拟器的数值计算.切割步长则采用对基本步长的加权计算得到,如待矫正的目标图形权重为 1,环境图形权重为 2.

二是在对目标图形的矫正过程中,采用自适应的移动步长来对每一个目标线段进行矫正.对已完成切割并被标记成线段、线端或拐角类型的目标线段,在矫正中进行整体移动时,选择线段中点对应的成像点与预期点之间的距离作为初次的移动步长,如图 2 所示.在未达到优化目标之前的第  $N$  次循环矫正中( $N > 1$ ),采用  $N - 1$  次循环结果中的该目标线段中点对应的成像点与预期点之间的距离,作为第  $N$  次循环矫正中的移动步长,这样更有利于逼近优化目标.

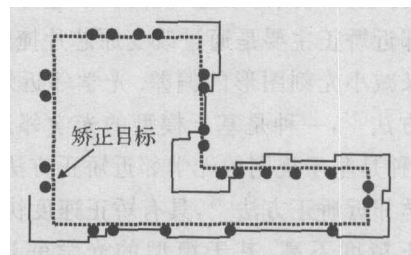


图 2 图形的单循环优化示意图

Fig. 2 Diagram showing single loop optimization for target feature

#### 3.2 目标图形线段的单循环优化

在矫正算法中,以切割线段作为矫正处理的基本单位,矫正过程沿目标图形边界的顺时针方向依次处理各条线段,通过迭代分别获得每条线段的优化位置.

如图 2 中所示,实线部分为已矫正后的图形线段位置,虚线为原有的目标图形线段位置.在对目标图形中的某个小线段进行矫正时,由于所有线段均

属于同一图形,彼此都相距不远,特别是相邻接的线段,矫正前后线段位置的变化对下一线段的光学邻近影响是不同的,从而矫正结果也不同.文献[4]在矫正中始终采用最初的原始线段作为环境,而忽略已矫正后线段位置的变化,造成矫正结果的不精确.

本文在矫正中取其他线段矫正后的新位置作为当前矫正线段的环境线段,充分考虑了由于环境线段变化带来的矫正精度问题,由此通过若干次的循环矫正,最后得到更加准确的矫正结果,循环次数可以根据矫正精度的要求而定.

在线段循环矫正中我们采用了目标点与预期点之间均方差  $e(i, j)$  作为线段优化的目标函数:

$$e(i, j) = \int [I(x, y) - I(x, y)]^2 dx dy, \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N$

其中  $I(x, y)$  表示小线段目标点;  $I(x, y)$  表示小线段的预期点.

为了提高矫正的效率,在线段循环优化矫正中,我们以分级的目标函数作为迭代终止的条件.最初的循环中,采用比较宽容的目标函数,然后逐次提高目标函数的精度要求,直至满足给定的矫正精度循环终止.

### 3.3 目标图形与环境图形的循环优化

环境图形是目标图形周围对其产生严重光学邻近影响的图形,因此在矫正目标图形的过程中,始终需要考虑环境图形来模拟目标图形的光刻成像.对掩膜版上每一个图形的矫正是顺序进行的,根据光学邻近效应的原理可知,先矫正的图形由于其各边线段的位置已经发生变化,它对后续图形矫正会产生与矫正前不同的光学邻近影响,如果不加以考虑仍然用矫正前的图形作为环境图形,将使矫正精度降低.同时由于矫正图形的顺序不同,会使矫正的最终结果不同.

图 3 是一组待矫正图形.虚线图形为输入的原始图形,左下角实线图形是已矫正后的图形,其他为未矫正的图形.在进行当前目标图形的矫正中,对于左下角的图形是采用矫正前的图形,还是用矫正后的图形将对矫正结果精度产生不可忽视的影响.文献[4]的算法在对目标图形的矫正处理过程忽略了环境图形矫正后的影响.

本文考虑环境图形矫正结果对目标图形的影响,采用两种策略提高矫正精度.

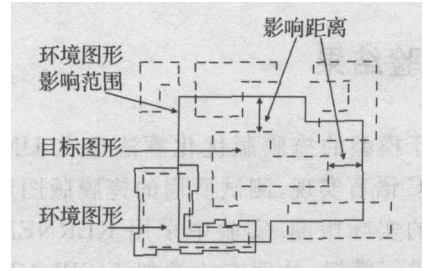


图 3 目标图形与环境图形双循环优化示意图

Fig. 3 Diagram of dual loop optimization between target feature and environment feature

首先,随机选择组中的一个未矫正图形作为矫正的目标图形,其他图形作为其环境图形,对该图形进行矫正,对于已矫正的环境图形均采用其矫正后的图形位置.

第二,为了减小矫正结果对矫正图形顺序的依赖性,采用了目标图形和环境图形循环优化的策略.在用上述方法对一组图形进行矫正后,再进行若干次迭代优化矫正,每次矫正采用不同的图形顺序.目标图形与环境图形之间循环优化的目标函数为:目标图形矫正后成像所得图形与预期图形之间不重合部分的面积与预期图形的比值,称为偏差度,如公式(2)所示,偏差度越小说明矫正结果越好.

$$\text{偏差度} = \frac{\text{成像图形与预期图形不重合部分的面积}}{\text{预期图形的面积}} \quad (2)$$

图 4 是本算法与文献[4]矫正结果的比较,其中(a)为原始版图图形,(b)为未知矫正的成像图像,(c)为文献[4]矫正后的图形,(d)为文献[4]矫正后成像图形,(e)为本文矫正图形,(f)为本文矫正后成像图形.从图中可以看出,本文目标图形成像的效果得到了明显的改善.

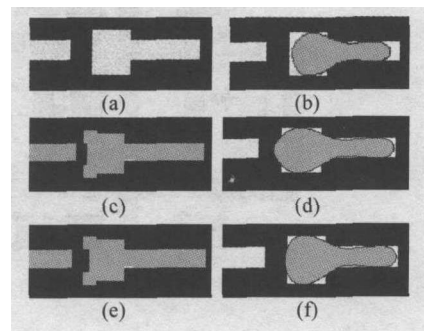


图 4 目标图形与环境图形的双循环优化的矫正

Fig. 4 Influence of the double loop optimization to the correction

## 4 实验结果

基于模型的掩膜版优化算法已在 UNIX 工作站上用 C 语言实现,测试所用的掩膜版图形均来自工业界的实际版图.实验中采用 KERNEL 光学模拟器<sup>[8]</sup>进行模拟,处理方法类似于 SPLAT<sup>[9]</sup>,其稳定的性能可以保证模拟的可靠性.

下面列举了对一些图形矫正的结果,光刻工艺

参数是光刻光波波长 248nm,数值孔径 0.5,聚焦深度 0.0,光波部分相干度 0.7,芯片的最小线宽 0.18 $\mu\text{m}$ .

与文献[4]中所提出的算法结果比较如表 1 所示.可以看出,本文在矫正时间基本没有增加的情况下,矫正精度有了明显提高.图 5 是一组图形的矫正结果比较,其中图 5(d)为两种算法矫正结果的比较,其中深色线条为文献[4]矫正后的结果,浅色线条为本算法矫正后的结果.

表 1 本文算法与文献[4]算法结果比较

Table 1 Comparison of results obtained by our algorithm and the algorithm in Ref. [4]

| 测试例子 | 矫正后成像图形的线端平均误差<br>/ $\mu\text{m}$ |       |      | 矫正后成像图形的线宽平均误差<br>/ $\mu\text{m}$ |       |      | 矫正后成像图形的拐角平均误差<br>/ $\mu\text{m}$ |       |      | 运行时间<br>/s |      |
|------|-----------------------------------|-------|------|-----------------------------------|-------|------|-----------------------------------|-------|------|------------|------|
|      | [4]的算法                            | 本文算法  | 改进 % | [4]的算法                            | 本文算法  | 改进 % | [4]的算法                            | 本文算法  | 改进 % | [4]的算法     | 本文算法 |
| C1   | 0.015                             | 0.005 | 66.7 | 0.010                             | 0.008 | 20.0 | 0.036                             | 0.024 | 33.3 | 0.03       | 0.03 |
| C2   | 0.015                             | 0.006 | 60.0 | 0.012                             | 0.009 | 25.0 | 0.032                             | 0.023 | 28.1 | 0.22       | 0.23 |
| C3   | 0.016                             | 0.004 | 75.0 | 0.012                             | 0.010 | 16.7 | 0.030                             | 0.022 | 26.7 | 0.13       | 0.13 |
| C4   | 0.018                             | 0.005 | 72.2 | 0.011                             | 0.008 | 27.3 | 0.029                             | 0.021 | 27.6 | 0.17       | 0.18 |
| C5   | 0.012                             | 0.003 | 75.0 | 0.013                             | 0.010 | 23.1 | 0.026                             | 0.022 | 15.4 | 0.09       | 0.09 |

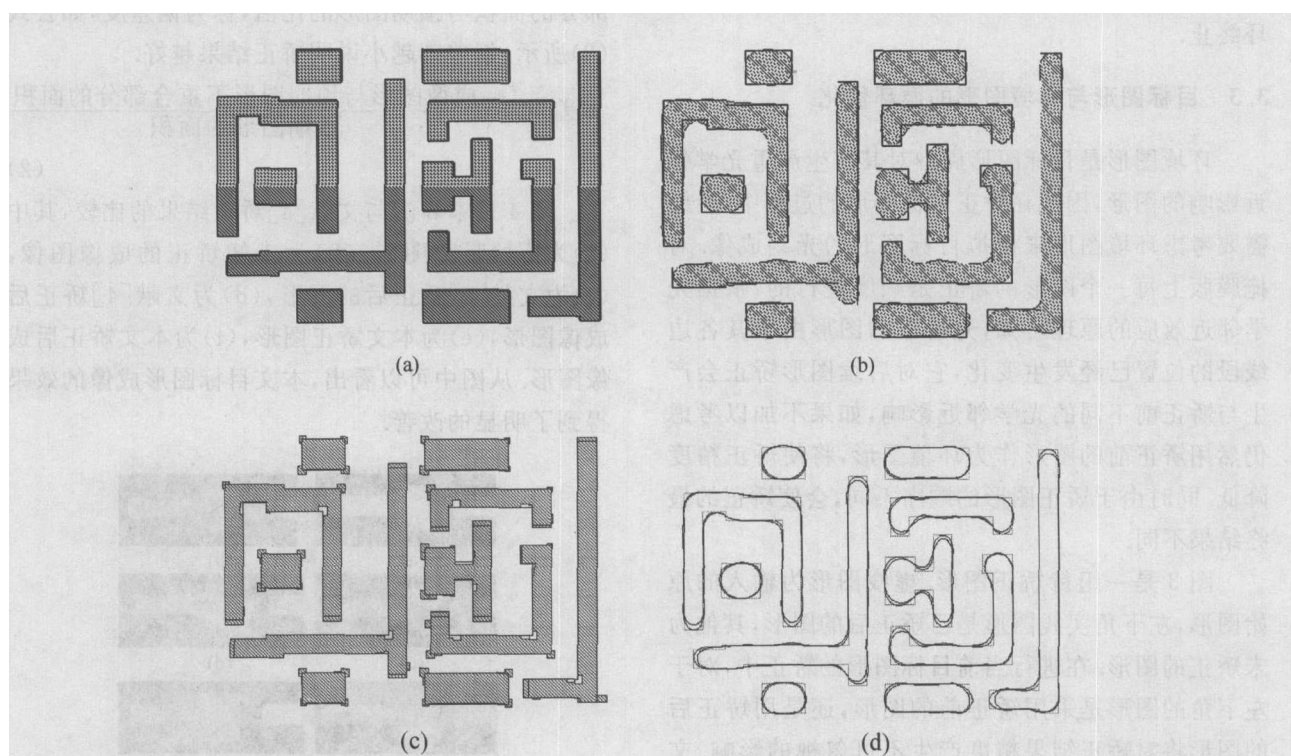


图 5 (a) 待矫正目标图形;(b) 矫正后成像图形;(c) 矫正后版图图形;(d) 与文献[4]算法矫正后成像图形比较

Fig. 5 (a) Target before correction;(b) Imaging after correction;(c) Layout after correction;(d) Comparison with the corrected image which uses the algorithm in Ref. [4]

## 5 结论

本文提出并实现了一种考虑图形矫正顺序对矫正精度的影响、具有自适应切割和移动步长基于模型的光学邻近矫正算法。通过初始化中自适应步长的切割方法,对目标图形采用初步矫正、目标图形的线段循环优化和目标图形与环境图形的循环优化,以及矫正中采用移动步长的自适应的方法,在获得高的矫正精度的同时提高了系统矫正的效率,是一种具有高精度高速度的基于模型的光学邻近矫正算法。

### 参考文献

- [ 1 ] Otto O W , Henderson R C . Integrating proximity effects corrections with photo mask data preparation . SPIE , 1995 , 2440 : 184
- [ 2 ] Otto O W , Garofalo J G , Low K K , et al . Automated optical proximity correction : A rule-based approach . SPIE , 1994 , 2197 : 278
- [ 3 ] Shi Rui , Cai Yici , Hong Xianlong , et al . The selection and creation of the rules in rules-based optical proximity correction . The 4th International Conference on ASIC , Shanghai , 2001 : 50
- [ 4 ] Wang Yang , Cai Yici , Hong Xianlong , et al . The algorithms for yield driven correction of layout . Chinese Journal of Semiconductors , 2004 , 25 ( 3 ) : 351 ( in Chinese ) [ 王阳 , 蔡懿慈 , 洪先龙 , 等 . 成品率驱动下基于模型的掩膜版优化算法 . 半导体学报 , 2004 , 25 ( 3 ) : 351 ]
- [ 5 ] Cobb N , Zakhor A . Fast , low-complexity mask design . SPIE , 1995 , 2440 : 313
- [ 6 ] Shioiri S , Tanabe H . Fast optical proximity correction : analytical method . SPIE , 1995 , 2440 : 261
- [ 7 ] Liu Yong , Zakhor A . Binary and phase shifting mask design for optical lithography . IEEE Trans Semicond Manuf , 1992 , 5 ( 2 ) : 138
- [ 8 ] 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 ]
- [ 9 ] Electronics Research Laboratory , University of California Berkeley . User 's Guide for SPLAT Version 5.0

## Optimization Algorithm for Model-Based Optical Proximity Correction \*

Cai Yici , Wang Yang , Zhou Qiang , and Hong Xianlong

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

**Abstract :** The optimization algorithm considering the surrounding feature influences is presented. The algorithm implements the single-loop optimization for the target feature and the dual-loop optimization between the target features and the surrounding features by using the self-adaptive step cutting and moving strategy. The experiments show that this algorithm can achieve much improvement in correction precision and efficiency.

**Key words :** optical lithography ; OPE ; model-based OPC

**EEACC :** 2570      **CCACC :** 7410D

**Article ID :** 0253-4177 (2005)03-0601-05

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90307017)

Cai Yici female , was born in 1960 , associate professor . Her research interests include VLSI layout .

Wang Yang female , was born in 1979 , graduate student . Her research interests include OPC algorithms .

Zhou Qiang male , was born in 1961 , associate professor . His research interests include VLSI layout .

Received 29 March 2004 , revised manuscript received 13 July 2004