

文章编号: 0253-2239(2010)06-1667-06

一种新的带有线段与控制点映射模型的 光学邻近校正技术

杨祎巍 史 峥

(浙江大学超大规模集成电路设计研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要 在基于光刻模型的光学邻近校正(MB-OPC)中,线段与控制点的映射关系是影响校正结果的一个重要因素。现有的线段与控制点的映射关系均是基于规则的,或者是精度较差的一对一映射关系,或者是计算速度较慢的全对一映射关系。提出了一种新的带有线段与控制点映射模型的光学邻近校正技术,其映射模型是根据光强梯度推导出的特征区域,线段与控制点的映射关系可以是一对一的,也可以是多对一的,且该映射关系在校正过程中对所有的控制点均适用,无需重复计算。实验结果表明,带有映射模型的 MB-OPC 结果的边放置误差(EPE)的方差改善显著,且运行时间无显著增加。

关键词 成像系统; 光刻; 光学邻近校正; 映射模型

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1667

A New Optical Proximity Correction with Mapping Model between Segments and Control Sites

Yang Yiwei Shi Zheng

(Institute of Very-Large-Scale-Integrated-Circuits Design, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The mapping between segments and control sites is an important factor that influences the correction result of model-based optical proximity correction (MB-OPC). The existing mapping schemes are rule-based and it is either the inaccurate one-to-one mapping or the time-consuming all-to-one mapping. A new MB-OPC with model-based mapping between segments and control sites is proposed. The mapping model is a characteristic area derived from gradient of intensity, and it can be a one-to-one mapping or a multiple-to-one mapping. The mapping can be applied to all the control sites in MB-OPC, and there is no need to recalculate repeatedly. The experimental results show that the variance of edge placement error (EPE) of MB-OPC with model-based mapping is significantly improved and the run time is not significantly increased.

Key words imaging systems; lithography; optical proximity correction (OPC); mapping model

1 引 言

光刻是集成电路生产中十分重要的一步工艺,负责将掩模上的图形转移到硅片上。随着工艺不断地进步,光刻过程中由光的干涉衍射现象造成的图形失真已经严重地影响了产品的电气特性及其成品率。因此,各种改善工艺的措施^[1~3]及分辨率增强技术^[4,5]被提出并应用于集成电路生产中。光学邻近校正是十分重要的一种分辨率增强技术,广泛的

应用于集成电路生产中,从宏观上它可以分为切分和校正两个步骤。在切分步骤中,版图上多边形的边被切分成线段,每一条线段上有一个控制点。在校正步骤中,线段沿其法向方向移动并使得其对应控制点的光强达到阈值。光学邻近校正的精度与两步骤均有关系。目前线段与控制点的映射关系有两类:一是传统光学邻近校正技术^[6],在该技术中线段与控制点是一对一的映射关系,为了使控制点的光

收稿日期: 2009-06-25; 收到修改稿日期: 2009-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(60720106003)资助课题。

作者简介: 杨祎巍(1982—),男,博士研究生,主要从事集成电路可制造性方面的研究。E-mail: yangyw@vlsi.zju.edu.cn

导师简介: 史峥(1967—),男,博士,副教授,主要从事集成电路设计自动化方面的研究。E-mail: shiz@vlsi.zju.edu.cn

强达到阈值,只移动控制点所在的线段;然而,由于收敛性问题^[7],传统光学邻近校正已逐渐不能满足生产要求。另一技术是矩阵式光学邻近校正,其中线段与控制点是全对一的关系,通过移动以控制点为中心的某一范围内的所有线段来调整一个控制点处的光强,虽然精确,但因其速度慢,并未广泛应用^[8,9]。

为了提高光学邻近校正的质量,本文提出一种带有线段与控制点映射模型的光学邻近校正技术,映射模型由特征区域组成,并且可以很好地与现有的光学邻近校正技术融合。

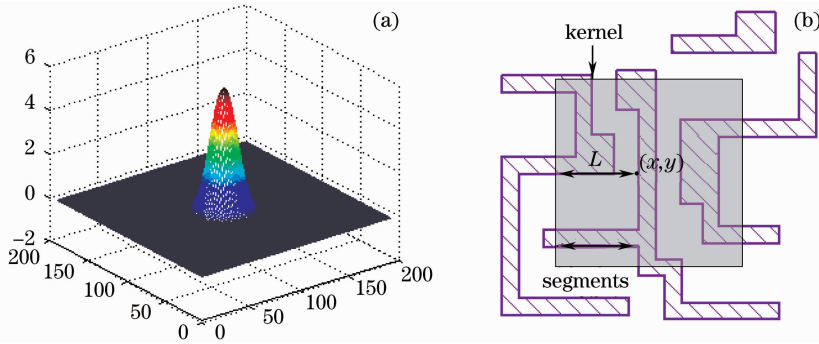


图1 一个典型的卷积核(a)与卷积核范围(b)

Fig. 1 A typical convolution kernel (a) and kernel ambit area (b) in intensity calculation

2.1 光学邻近校正的数学描述

在基于光刻模型的光学邻近校正中,多边形的边在校正前被切分成线段,因此(1)式可以化为

$$I(x, y; s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_i \lambda_i |\Phi_i \otimes \mathbf{m}|^2, \quad (2)$$

式中 s_i 是第 i 个线段的偏移量, (x, y) 是控制点。

光学邻近校正的目标为通过改变线段的偏移量 s_i 使每一个控制点处的光强达到阈值:

$$\begin{cases} I(x_1, y_1; s_1, s_2, \dots, s_n) = T_1, \\ \dots \\ I(x_n, y_n; s_1, s_2, \dots, s_n) = T_n. \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x_i, y_i) 是第 i 个控制点, T_i 是第 i 个控制点的阈值。对于常数阈值光刻胶模型来说^[6,11],所有的 T_i 均是同样的值;对于变阈值光刻胶模型来说^[11,12],阈值 T_i 是空间光强性质的函数,如光强值,斜率等。这样,光学邻近校正问题就化为求解(3)式的解 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 。

2.2 映射模型的推导

在传统光学邻近校正中,(3)式可简化为

$$\begin{cases} I(x_1, y_1; s_1) = T_1, \\ \dots \\ I(x_n, y_n; s_n) = T_n. \end{cases} \quad (4)$$

从(4)式可以看出,为了使控制点光强达到阈值而

2 带有映射模型的光学邻近校正

光刻系统是部分相干光成像系统,根据霍普金斯成像公式,光刻模型可以用一组完全相干成像系统的加权(SOCS)来描述^[10]:

$$I(x, y; \mathbf{m}) = \sum_i \lambda_i |\Phi_i \otimes \mathbf{m}|^2 \quad (1)$$

式中 λ_i 是第 i 个奇异值, Φ_i 是第 i 个卷积核, \mathbf{m} 是在以 (x, y) 为中心 L 为半径的卷积核范围内的多边形, \otimes 是卷积操作。在掩膜环境 \mathbf{m} 下,点 (x, y) 的光强可以用(1)式计算,如图1所示。

移动的线段的数量降为了1。这种线段与控制点之间简单的对应关系在早期的光刻生产中是可行的。

在矩阵式光学邻近校正中,版图被分成若干区域,对每一个区域,雅可比迭代法被用来直接求解(3)式^[8]。迭代中雅可比矩阵需要重新计算,因而矩阵式光学邻近校正速度慢。

提出了一种新的带有线段与控制点映射模型的光学邻近校正技术。该映射模型由表征映射关系的特征区域组成,并且这种映射关系在光学邻近校正前就已经确定,在校正过程中不需要重新计算。

模型推导如下。假设 \mathbf{m} 由矩阵来描述,那么光强关于矩阵中每一个元素 m_{pq} 导数的矩阵形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \partial I(x, y; \mathbf{m}) / \partial \mathbf{m} = \\ &= \sum_i \{ C_{i, \text{real}} \odot \text{rot180}[\text{Re}(\Phi_i)] + \\ &C_{i, \text{image}} \odot \text{rot180}[\text{Im}(\Phi_i)] \}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $C_{i, \text{real}} = 2\lambda_i [\text{Re}(\Phi_i) \otimes \mathbf{m}]$, $C_{i, \text{image}} = 2\lambda_i [\text{Im}(\Phi_i) \otimes \mathbf{m}]$, \odot 表示两个矩阵对应元素相乘,函数 $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部,函数 $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部,函数 $\text{rot180}(\cdot)$ 表示将矩阵旋转 180° 。梯度 \mathbf{G} 中的元素绝对值越大表明对应 \mathbf{m} 中的元素改变光强的能力越大。使用二分法来求解出矩阵 $|\mathbf{G}|$ 的水平截面 $\mathbf{m}_{\text{section}}$

$$\sum_i \lambda_i |\Phi_i \otimes m_{\text{section}}|^2 = aT, \quad (6)$$

式中 a 是一个调整特征区域的系数。

特征区域即为映射模型,它对应较大的梯度绝对值,具有较强的能力改变光强,该区域内涉及到的线段均需要优先移动来调整控制点处的光强。如果 $a = I_{\text{max}}/T$,那么特征区域将是整个卷积核范围,该范围内的所有的线段均被涉及到,此时即为矩阵式光学邻近校正;如果 $a = 1$,特征区域对应的光强为阈值。一般来说,特征区域内不一定恰有线段,因此取 $a = 1.2$ 扩大特征区域从而留有余量。特征区域是由 $|G|$ 的水平截面构成,因此连通的特征区域所对应的 G 值具有相同的符号,如图 2 所示,特征区域的符号为所对应的 G 的符号。在校正过程中,特征区域的符号与线段的移动方向有关,如果符号为正,则线段向内移动是减弱光强;如果符号为负,则线段向外移动是减弱光强。注意到 G 与控制点有关,对于不同的控制点, G 会不同,需要重新计算。

图 3 是圆盘照明和圆环照明所对应的特征区域。其中圆盘照明参数如下:波长 248 nm,数值孔径 0.68,直径 0.756,离焦 -127 nm;圆环照明参数如下:波长 193 nm,数值孔径 0.76,内径 0.8,外径 0.92。对于圆盘照明,特征区域是一个近似的圆盘,在集成电路特征尺寸较大时,特征区域中只有一个

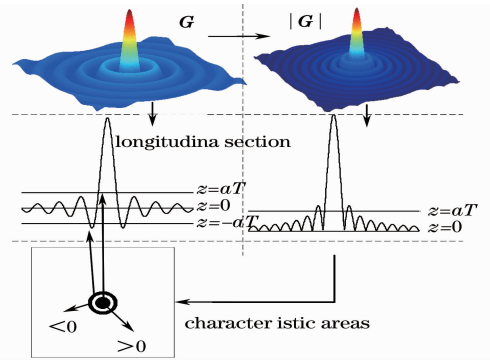


图 2 特征区域示意图。特征区域从矩阵 $|G|$ 中推导出,特征区域的符号由 G 决定

Fig. 2 Schematic of the signs of characteristic areas. The characteristic areas are derived from matrix $|G|$ and the signs of the characteristic areas are determined by matrix G

线段,如图 4(a)所示,因此基于光刻模型的传统光学邻近校正在这种情况下可以正常的工作。对于环形照明,特征区域是一个近似的圆盘和一个近似的圆环,如图 4(b)所示,有多个线段在特征区域内,此时,线段与控制点一对一的映射已经不再精确,特征区域内所有涉及到的线段均需要移动来调整位于中心的控制点的光强。实际应用中,不友好的切分会使得无法判断有些线段是否需要移动,此时仅移动控制点所在线段以及可以确定需要移动的线段。

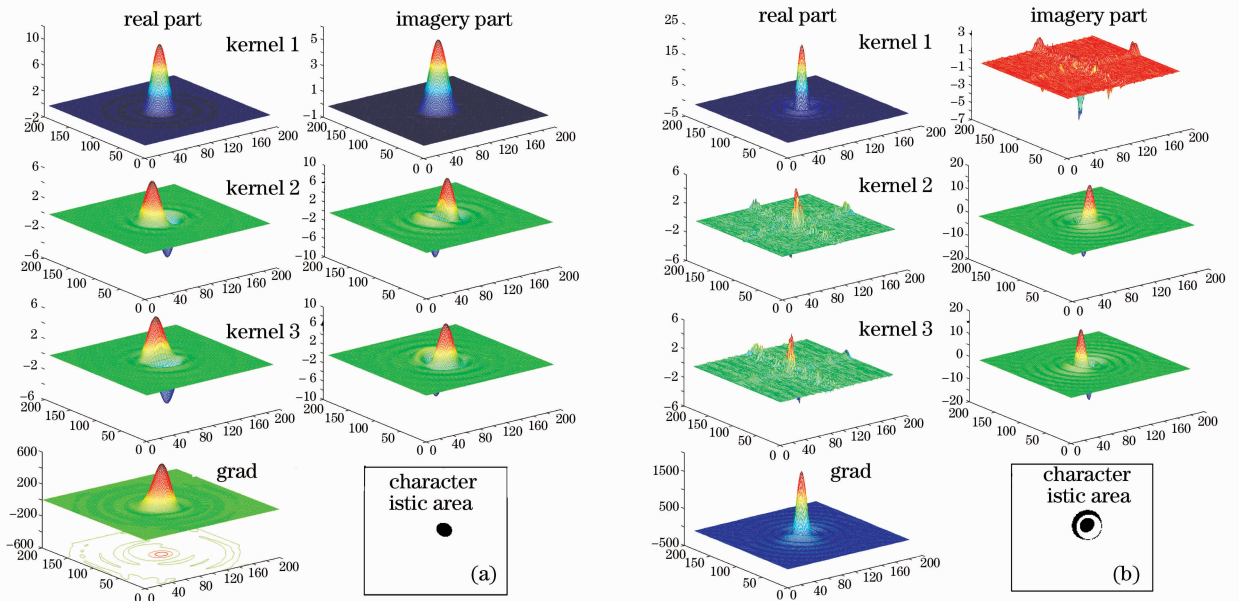


图 3 (a)圆盘照明和(b)圆环照明下光刻模型的前三个卷积核、对应的梯度及特征区域

Fig. 3 The first three kernels of (a) conventional illumination and (b) annular illumination lithography model separately and the corresponding gradient G and characteristic area

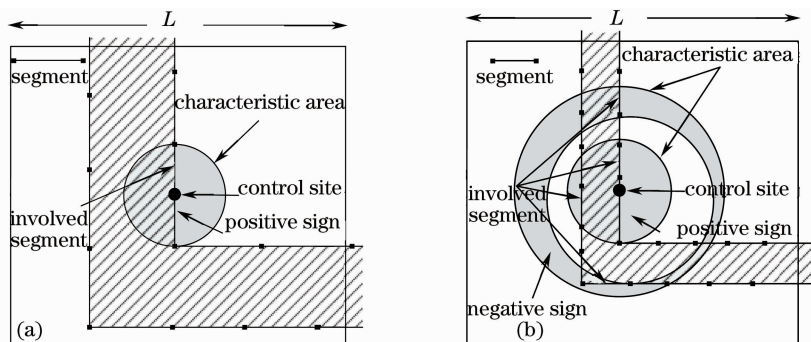


图 4 (a)圆盘照明及(b)圆环照明条件下的映射示意图

Fig. 4 Schematic of mapping under (a) conventional illumination and (b) annular illumination

2.3 加速方法

从(5)式可以看出, \mathbf{G} 是卷积核实部和虚部的加权和。对于 SOCS 系统, 通常前几个卷积核即占据了光强的 90% 以上, 因此在计算 \mathbf{G} 时并不需要所有的卷积核参与运算。表 1 是一个卷积核权重的例子。在实际计算中, 一般只选取第一个卷积核用于计算 \mathbf{G} 。

表 1 卷积核和精度的一个例子

Table 1 An example of kernel and precision

Singular value	Convolution kernel	Similarity
35.1722	1	84.6274
9.81302	2	97.8023
9.81302	3	98.3632
...
0.662804	13	99.8796

在复杂照明情况下, 如环形照明、四极照明等, 卷积核的实部和虚部会相差多个数量级, 数值较小的部分可以忽略。如图 3(b) 所示, 第一个卷积核的虚部, 第二, 三个卷积核的实部均在 10^{-15} 数量级上, 同时第一个卷积核的实部, 第二, 三个卷积核的虚部在 1 的数量级上, 这样, 卷积核在 10^{-15} 数量级的部分在计算 \mathbf{G} 时可以忽略。

对于不同的控制点, (5) 式中的系数 $C_{i, \text{real}}$ 和 $C_{i, \text{image}}$ 会不同, 这使得 \mathbf{G} 需要重新计算。然而, 当只有一个卷积核参与计算 \mathbf{G} 时, 系数对特征区域的影响并不大, 因此特征区域可提前计算, 并且在校正每个控制点光强时重复使用。有时候为了提高精度, 希望使用多于一个的卷积核来计算特征区域, 此时可以先假设系数 $C_{i, \text{real}}$ 和 $C_{i, \text{image}}$ 均为正, 然后根据求解出来的特征区域来验证 $C_{i, \text{real}}$ 和 $C_{i, \text{image}}$ 是否确实为正, 如果验证结果与假设一致, 则所求得特征区域有效; 否则, 需要减少卷积的数量。

2.4 带有线段与控制点映射模型的光学邻近校正流程

在线段与控制点的映射关系确定后, 进入校正

部分。其校正流程图如图 5 所示。

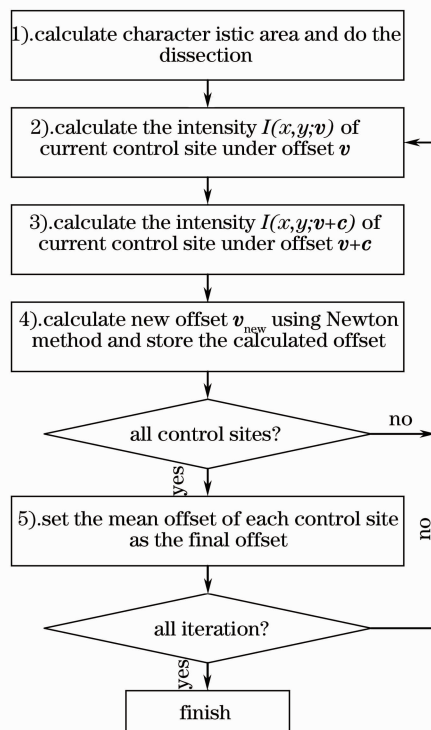


图 5 使用映射模型的校正流程图

Fig. 5 Correction flow chart with mapping model

步骤 2) 中, 根据特征区域确定当前控制点所涉及到的线段, 并计算在偏移量 v 的情况下当前控制点的光强, 偏移量 $v = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ 是所涉及的 n 个线段的偏移量组成的向量; 步骤 3) 中, 将 v 改变固定数值 c , 重新计算控制点光强, 其中 $c = [+/-c_1, +/-c_2, \dots, +/-c_n]$, $+$ 表示线段向外移动, $-$ 表示线段向内移动; 步骤 5) 中, 计算每个线段的偏移量的平均值作为最终偏移量。

3 实验结果与比较

实验使用的是 90 nm 的版图, 光刻模型参数如下: 波长 193 nm, 数值孔径 0.8, 内径外径分别为 0.56

和 0.8 的环形照明。基于光刻模型的传统光学邻近校正,带有映射模型的光学邻近校正和矩阵式光学邻近校正这三种光学邻近校正的比较结果如下。

图 6(a)所示的是该三种光学邻近校正的运行速度的比较,带有映射模型的光学邻近校正的运行时间比矩阵式的光学邻近校正的少 66%,而只比传统光学邻近校正的运行时间多 5%。图 6(b)是该三

种光学邻近校正残差分布图,带有映射模型的光学邻近校正结果残差的方差比传统的光学邻近校正的大 60%,只比矩阵式光学邻近校正的小 3.5%。

图 7(a)所示的是带有映射模型的光学邻近校正中校正循环的示意图。可以看出,随着循环的进行,线段没有出现震荡现象,收敛较好。图 7(b)是最终的仿真轮廓与目标版图的对比,结果较理想。

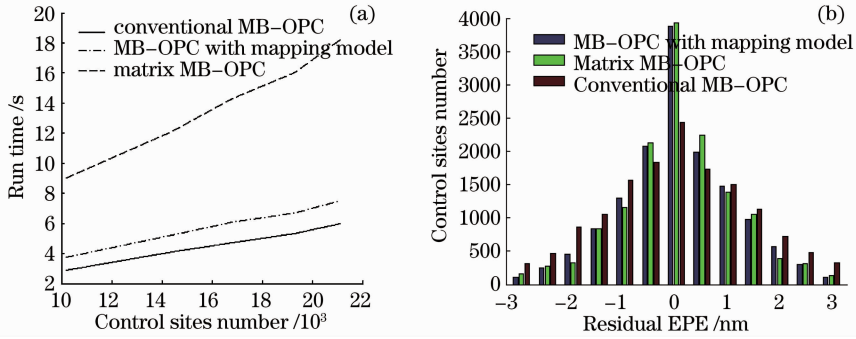


图 6 三种光学邻近校正的运行时间(a)及结果边放置误差的分布图(b)

Fig. 6 Run time (a) and residual EPE distribution (b) of conventional MB-OPC, MB-OPC with mapping model and matrix MB-OPC

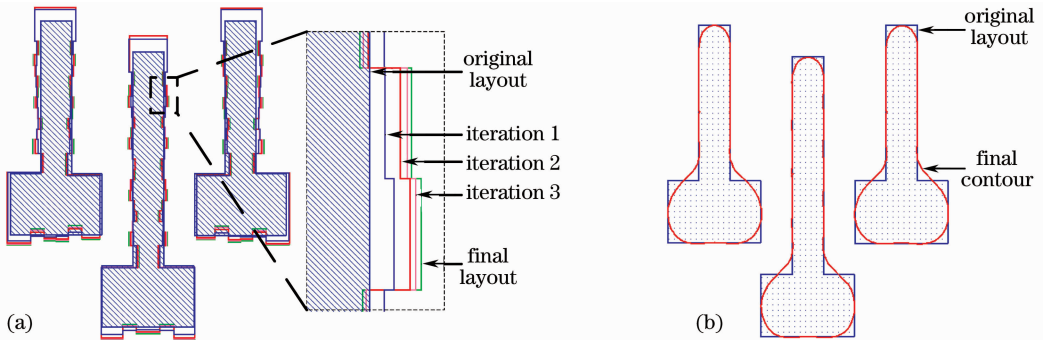


图 7 带有映射模型的光学邻近校正的一个例子:校正过程(a)及最终结果(b)

Fig. 7 An example of the iterations (a) and final results (b) in MB-OPC with mapping model

以上实验结果表明,带有映射模型的光学邻近校正不仅结果质量较好,而且运行速度没明显延长。本文的部分成果在光学邻近校正软件 ZOPC 中实现,并成功用于某 162 nm 工艺的生产线。

4 结 论

提出了一种新的带有映射模型的光学邻近校正技术,使得线段与控制点的对应关系可以在校正前确定,且在校正过程中保持不变。该技术不仅极大地提高了精度,而且保持了较快的运行速度。实验结果证明带有映射模型的光学邻近校正比传统光学邻近校正质量好,且运行速度相当;比矩阵式光学邻近校正运行速度快,且质量相当。

参 考 文 献

1 Haiyan Qin, Xuan Li, Su Shen. Novel optical lithography using

silver superlens [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 149~151

2 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of double bottom antireflective coating for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 472~477

周 远, 李艳秋. 高数值孔径光刻成像中双层底层抗反膜的优化 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 472~477

3 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Bulk effects in hyper-numerical aperture optical lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1091~1095

周 远, 李艳秋. 高数值孔径光学光刻成像中的体效应 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1091~1095

4 Sun Zhiyuan, Li Yanqiu. Spatial frequency analysis of resolution enhancement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1758~1764

孙知渊, 李艳秋. 分辨率增强技术的频谱分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1758~1764

5 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Liu Yongzhi. Improving the profiles of imaging patterns by optimizing mask in DMD-based maskless photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 794~798

郭小伟, 杜惊雷, 刘永智. 优化掩模分布改善数字光刻图形轮廓 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 794~798

- 6 N. B. Cobb. Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing [D]. CA: University of California Berkeley, 1998
- 7 M. Bahnas, M. Al-Imam, T. Tawfik. Toward fast OPC convergence: advanced analysis for OPC Iterations and simulation environment [C]. *SPIE*, 2008, **7122**: 712248
- 8 Ye Chen, Kechih Wu, Zheng Shi *et al.*. A feasible model-based OPC algorithm using jacobian matrix of intensity distribution functions [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 65204C
- 9 N. B. Cobb, Y. Granik, model-based OPC using the MEEF matrix [C]. *SPIE*, 2002; **4889**: 1281~1292
- 10 N. Cobb, A. Zakhor. A mathematical and CAD framework for proximity correction [C]. *SPIE*, 1996. **2726**: 208~222
- 11 W. C. Huang, C. H. Lin, C. C. Kuo *et al.*. Two threshold resist model for optical proximity correction [C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 1536~1543
- 12 J. Randall, K. Ronse, T. Marschner *et al.*. Variable threshold resist models for lithography simulation [C]. *SPIE*, 1999, **3679**: 176~182