

# 适用于超深亚微米光刻仿真的建模和优化<sup>\*</sup>

沈珊瑚<sup>†</sup> 史 峥 谢春蕾 严晓浪

(浙江大学超大规模集成电路研究所, 杭州 310027)

**摘要:** 提出了一种新颖的利用版图轮廓的超深亚微米光刻工艺建模流程. 该流程采用的方法主要包括: 首先将代表纯光学模型的传输交叉系数矩阵通过圆极化采样正交投影成更小规模的矩阵, 同时用该组相同的极化采样基表示掩模图形; 然后用目标电路版图的严格 3D 仿真结果或其 SEM 轮廓图对该新系统进行半经验化的校正. 在模型校正过程中引入了基于遗传算法的全局优化算法. 实验结果显示, 该方法能够快速有效地模拟用传统方法不能准确模拟的超深亚微米新出现的一些畸变效应. 由于最终的模型是用一批卷积核的形式表示, 建成的模型能够满足光学邻近校正对准确性和快速性的要求.

**关键词:** 光刻建模; 版图轮廓; 圆极化采样; 遗传算法; 光学邻近校正

EEACC: 2550G

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)08-1320-05

## 1 引言

集成电路正在继续沿着摩尔定律向高集成度化和小型化发展. 器件的最小线宽和最小间距变得越来越小. 当曝光线条的特征尺寸 (critical dimension, CD) 接近曝光系统的理论分辨极限时, 在硅圆片表面将产生明显的畸变, 即所谓的光学邻近效应 (optical proximity effect, OPE)<sup>[1]</sup>. 这使得在原有的光刻设备上刻蚀亚波长图形线条将变得非常困难. 为了克服这种畸变效应, 工业界和学术界已经提出了各种各样的分辨率增强方法. 光学邻近校正 (optical proximity correction, OPC) 就是应用最广泛、最重要的一种. 它的基本做法是预先改变掩模图形的形状来补偿由于光学衍射和工艺的非线性所引起的失真, 最终使硅圆片上的实际光刻图形尽可能与原设计的电路版图的图形保持一致. 在大规模集成电路制造的光刻工艺中, 传统的邻近校正做法是采用基于规则的方法, 但由于图形的特征尺寸正在进一步向超深亚微米靠近, 特别针对目前已有的 130, 90 甚至是 45nm 工艺技术节点, 基于模型的光学邻近校正已经变得越来越重要. 由于这种方法能够保证足够的精度, 从而显著提高芯片生产的成品率, 它已经被应用在超深亚微米多个版图层上.

目前应用于光学邻近校正的模型主要由两大部分构成: 纯光学模型和表征掩模制造以及光刻胶曝光、显影和蚀刻等步骤的工艺模型<sup>[2]</sup>. 前者普遍是以

Hopkins 方程为框架, 将主要光学参数, 如波长、数值孔径、相干系数等用来作为系统调节的参数, 模型比较成熟. 而后者由于实际工艺的复杂性, 物理和化学参数众多, 目前应用于大规模电路版图仿真的这类模型主要还是采用经验或半经验的方式进行校准. 模型误差一般用测试版图经制造后的实测 CD 值和仿真 CD 值之间的误差来表示. 模型的好坏是影响光学邻近校正结果的一个重要因素. 工艺模型部分一直没有一个系统性的解决方案, 普遍的做法是只利用不同  $\sigma$  值的高斯核卷积的方法来对工艺变化, 如光刻胶的扩散、Micro-loading 效应等做出经验性的修正<sup>[3]</sup>. 但是对于在超深亚微米甚至是亚 100nm 时出现的新的畸变效应, 应用现有的方法难以进行系统性的校准, 即使可以通过回归搜索得到一个较精确的模型, 需要的校准时间也很长. 因此本文在研究已有方法的基础上, 提出了一种新颖的利用版图轮廓的快速准确的光刻工艺建模流程. 该流程适用于超深亚微米光刻制造建模.

## 2 模型

### 2.1 光刻系统和掩模的圆采样表示

光刻成像模拟问题实际上是一种部分相干光在带像差的成像系统中的投影成像问题. Hopkins 公式通常被用来计算在给定光学系统条件下的掩模的二维光学成像结果. 其表达式如下<sup>[4]</sup>:

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 90207002)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: shensh@vlsi.zju.edu.cn

2007-02-01 收到, 2007-04-22 定稿

$$I(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(f' + f, g' + g, f'', g'') \times F(f' + f, g' + g) \times F^*(f'', g'') df' dg' \quad (1)$$

$$T(f', g'; f'', g'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(f, g) \times K(f + f', g + g') \times K^*(f + f'', g + g'') df dg \quad (2)$$

其中  $T(f', g'; f'', g'')$  表示光学系统的透射交叉系数 (transmission cross-coefficient, TCC) 矩阵, 它是一个与待曝光掩模形状完全无关的四维函数, 描述了从光源到像平面中包括照明系统和成像系统在内的整个光学系统的作用, 由于实际的成像系统都是带宽有限的, 所以 TCC 矩阵是有限大小的;  $F(f, g)$  是掩模的傅里叶变换;  $J(f, g)$  是光源互强度函数;  $K(f, g)$  是成像系统的频率响应函数. Hopkins 方程显示光刻机系统是一种双线性系统, 其本质上是非线性的.

对于一个典型的光刻系统 (如光源波长 193nm, 圆形照明, 数值孔径 0.7, 相干系数 0.6), 它的 TCC 矩阵的大小可达  $841 \times 841$ . 文献[5]提出了一种用半定规划直接求解 TCC 矩阵最优解的方法, 但是即使加了一些降低求解维数的约束, 由于实际矩阵尺寸过大, 求该最优解仍比较费时. 本文中, 为了减小光学系统矩阵的大小, 以便能够用后面的全局优化对模型进行校正, 我们这里采用了类似模型减秩<sup>[6]</sup>的方法, 用类贝塞尔函数 (也叫圆采样函数) 对该 TCC 矩阵重新采样. 该圆采样定理是由 Gammo<sup>[7]</sup>首先提出的. 定界有限的二维平面的波幅可以表示为:

$$f(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_s f_n(\lambda_{ns}/k\alpha) \exp(in\varphi) C_{ns}(k\alpha\rho) \quad (3)$$

其中

$$C_{ns}(k\alpha\rho) = (2\lambda_{ns}/J'_n(\lambda_{ns})) \times J_n(k\alpha\rho) / ((k\alpha\rho)^2 - \lambda_{ns}^2) \quad (4)$$

这里  $J_n$  和  $J'_n$  分别是  $n$  阶贝塞尔函数和它的导数;  $\lambda_{ns}$  是  $n$  阶贝塞尔函数的第  $s$  个零点. 图 1 是零阶贝塞尔采样函数基的前 6 个函数的形状. 从图中可以看出, 该采样函数满足在采样点上的幅度为 1. 公式 (4) 中的参数  $\alpha$  表示光学系统的最高频率, 合理的采样要求所选的一组采样函数的最大采样点在  $\alpha$  值内.

当把 (4) 式应用于原始的光刻系统矩阵 TCC 和掩模时, (1) 式可以表示成 (5) 式的形式:

$$I(x = 0, y = 0) = [s(1), \dots, s(n)] \times \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots \\ C_{21} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \times [s(1), \dots, s(n)]^H \quad (5)$$

式中 点光强是在掩模图形正中心 ( $x = 0, y = 0$ ) 计算;  $H$  表示共轭转置;  $s(i), i = 1, 2, \dots, n$ , 是应用 (4)

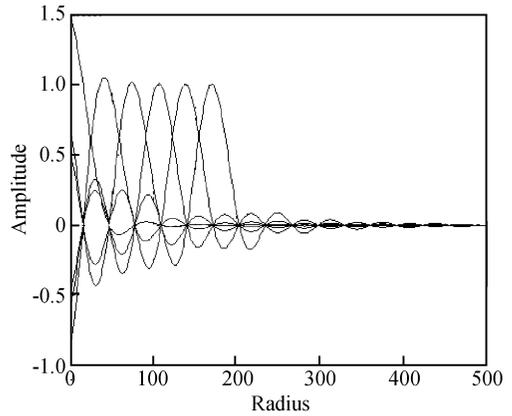


图 1 前 6 个零阶圆采样函数

Fig.1 First six order 0 circular sampling functions

式后的掩模采样系数. 如果掩模可以表示为  $\text{Mask} = \sum_i s(i) C_{ns}(k\alpha\lambda_{ns}) e^{jn\theta}$ , 由于  $C_{ns}(k\alpha\lambda_{ns}) e^{jn\theta}$  满足正交性, 故  $s(i)$  可由 (6) 式计算:

$$s(i) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \text{Mask} \times C_{ns}(k\alpha\lambda_{ns}) e^{-jn\theta} d\theta \quad (6)$$

掩模采样的示意方法见图 2. 传统的应用傅里叶变换的方法是假设在一定矩形区域内的图形, 对中心点的光强计算有贡献, 为了使频域离散化, 认为该矩形区域在空间上是周期重复的. 但是在采用了圆采样以后, 假设是在指定光强计算半径 (ambit) 圆周内的图形对中心点的光强计算有贡献, 而在该半径以外的图形对中心点光强计算的影响可以忽略. 如果版图图形与某一半径的采样函数相交, 则相交圆弧内的部分 (即  $\theta_1$  和  $\theta_2$  对应部分) 经公式 (6) 转化成相应的掩模系数. 例如, 对于边长大于 Ambit 的方形版图, 如果用图 1 中的 6 个零阶采样基表示, 它的前 6 个采样系数为 1. 在实际的建模过程中, 由

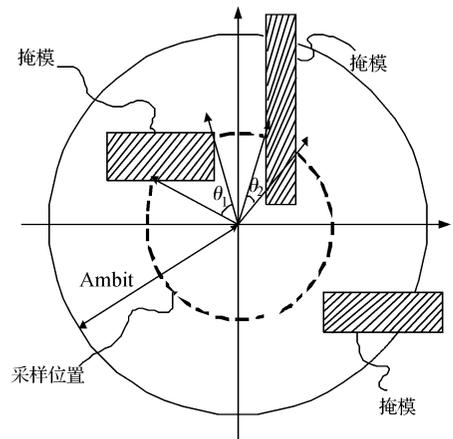


图 2 掩模圆采样的示意图

Fig.2 Sketch map of circular sampling for mask pattern

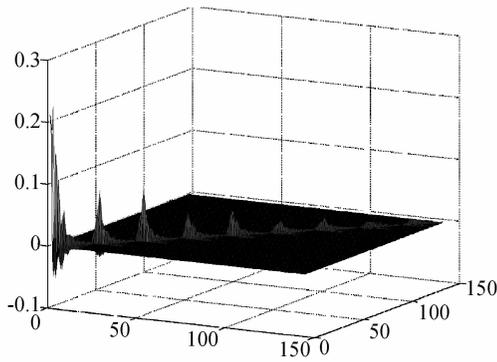


图 3 144×144 的 BTCC 矩阵(实部)  
Fig. 3 144×144 BTCC matrix(real part)

于需要采样的掩模系数有限,所以一次计算后的系数可以通过建表来存储.上述变换得到的 $[C_m]$ 矩阵与原始的 TCC 矩阵类似,只是该矩阵的正交基是公式(4)的圆采样函数,而原始的 TCC 是傅里叶基.为简单起见,我们把该 $[C_m]$ 矩阵称为 BTCC 矩阵.

## 2.2 遗传算法优化 BTCC

前面已经提到,在对实际的工艺进行建模时,需要利用初始的光学模型进行校准.传统的校准方法是调整主要的光学参数,如数值孔径、相干系数等,以及表征工艺变化的参数,如高斯半径 $\sigma$ .由于参数之间的相互影响作用,找到一组最佳的参数组合需要大量的调试时间,而且很有可能获得的是一组局部最优解,而非最佳的全局最优解.通过观察 BTCC 矩阵的元素特性,本文引入了遗传算法来实现对 BTCC 的校正.遗传算法是一类基于随机进化计算的人工智能算法的统称.它在很多领域得到了广泛的应用,如半导体器件建模中,由于其突出的全局寻优能力,在研究和实际应用中备受青睐.最近几年,在电子设计自动化(EDA)领域的关于可制造性问题上,也开始出现遗传算法在光刻模型和光学邻近校正系统中应用的研究报告<sup>[8,9]</sup>.但文献[9]中的方法主要还是在对光刻系统参数进行优化,而本文由于采用了圆采样的方法已经把原始较大的系统缩减为较小系统的实现,所以是应用了有选择地对一些 BTCC 对角线和准对角线上的元素进行直接校正的方法.一个具体实际的 BTCC 矩阵见图 3.

其采样函数基为零阶基 16 个,1 阶到 4 阶各 16 个,分成 cos 和 sin 两种,所以采样函数共有 144 组.从图 3 中可以发现,对于零阶的前几个采样基,其 BTCC 中元素的值相对较大,而 1 到 4 阶的采样值则呈下降趋势.事实上经过正交投影的相似变换后, BTCC 矩阵在非对角块上的元素都接近于零.这个特性大大减少了需要参与优化的元素个数.遗传算法对所选择的对角元素使用了浮点编码,3 个主要

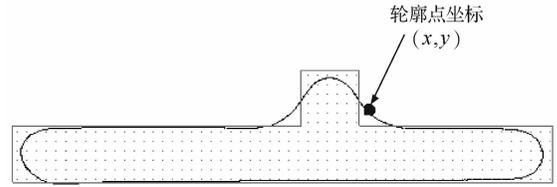


图 4 栅层版图轮廓示意图  
Fig. 4 Illustration of gate-level layout contour

的遗传算子是锦标赛选择法、算术交叉、均匀变异.此外,由于 BTCC 矩阵最终要和掩模系数及其共轭转置相乘,因此在优化元素的选择上,主要是将 BTCC 对角元素按照对应掩模系数值的大小先进行排列,然后其中最大的有限个数的元素参与优化.该模型的评估函数是:

$$F = \sum w_i (CD_m - CD_s)^2 / \sum w_i \quad (7)$$

其中  $CD_m$  表示模拟的 CD 值; $CD_s$  表示目标 CD 值; $w_i$  是每条测量线(gauge)的权重.

(7)式是一大类模型校准方法的评估函数表达式.本文另外使用了利用版图轮廓校正的思想.这里版图轮廓是取代  $CD_s$  来对光刻制造系统进行校准的样本数据.一个电路测试版图可以先直接进行实验性的制造,用一些依据物理第一原理进行仿真的软件(如 SOLID-E)进行一些仿真,然后将得到的仿真数据应用于优化系统中.这种方法和传统的基于 CD 测量的测试版图信息相比,优点在于用很少的图就可以进行仿真,大大减少了花销在 CD 数据测量上的时间,并且可以对一些不对称的图形进行仿真.见图 4 示意图,曲线为原始版图仿真后的轮廓,黑点表示轮廓上的一个坐标点.

图 4 中版图的具体参数为 CD 130nm,光刻系统参数为:光源波长 193nm,圆形照明,数值孔径 0.7,相干系数 0.7.从图 4 可以看出,该版图在头端和拐角的地方有明显的圆化.基于版图轮廓的方法是把轮廓点上的坐标作为输入,目标是使如下(8)式的值达到最小.

$$F = \sum w_i (I_i - I_{\text{mean}})^2 / \sum w_i \quad (8)$$

其中  $I_i$  是轮廓点的光强; $I_{\text{mean}}$  是总的轮廓点光强的平均值.如果采用常数阈值模型,它可以表示该阈值值,比如 0.3(假设全透掩模的光强归一化为 1).由于各坐标点对模型精度的影响是不一样的,所以可以在优化时对每一个坐标点施加相应的权重  $w_i$ ,如由于拐角的地方图形畸变比较大,可以把相应的轮廓点增加权重.

## 3 实验结果与讨论

文中使用 Progen 光刻模拟软件生成参考的光学模型,该模型已经分解为一组共 8 个卷积核表示,

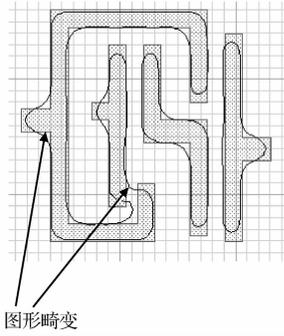


图 5 原始版图及其仿真结果

Fig. 5 Original layout and simulation result

能够充分表示要模拟的实际制造条件,其光学参数为:光源波长 193nm,圆形照明,数值孔径 0.87,相干系数 0.85,放大系数 4.0,光刻胶扩展长度 0.07,折射系数 ( $n_{refrac}$ ) 1.7. Ambient 为 1280nm. 掩模采用亮场掩模 (clear mask). 为模拟实际制造中可能出现的透镜畸变效应,假设透镜有  $x$  方向的倾斜,令 Zernike 系数中的  $Z_2$  为 0.06. 由于实际工艺中,硅片表面不平整,光刻胶厚度不均匀或者调焦误差等,会有离焦现象存在,这里离焦设为 200nm. 这样最终的模型可以表示成:

参考模型 = 矢量光学模型 + 光瞳畸变 + 光刻胶畸变 + 蚀刻扩散

将参考模型载入 Taurus-OPC 版图仿真软件,对一特定的测试版图进行仿真,生成的轮廓如图 5 所示. 由图可以看到,对于特征线宽为 130nm 的栅层,经过制造后生成的图形已经和原始的设计相差很大,特别是距离接近的两个图形间轮廓有粘连,这主要是由于光衍射产生的邻近效应,以及透镜畸变等原因所致. 该版图轮廓总的坐标点数为 532,这些坐标点在图形变化比较大的地方比较密集. 针对这一实际制造系统,我们用本文提出的方法和系统进行模型校准. 假设初始的由 SPLAT 生成的纯光学模型是:圆形照明,光源波长 193nm,数值孔径 0.7,相关系数 0.7. 应用上文所述的方法,一共经过 3 次循环迭代,使用的遗传参数是初始种群数 25,变动范围 40%,交叉概率 0.5,变异概率 0.333,参与优化的元素个数为 40. 每次循环优化使用时间约 360s,如果是基于现有的建模框架,用回归 (Regression) 或样条等优化方式,大概需要半小时甚至更多. 实际的结果还可以有进一步的优化,但是在这样的优化程度上比较好,因为如果再优化,有可能产生过拟合现象. 轮廓点的光强分布见图 6. 与优化前的光强值相比,优化以后的光强分布更集中在阈值 0.36 (图中虚横线) 的  $\pm 0.04$  附近. 比较优化前后的光强可知,优化过程在一定程度上考虑了上述实验条件假设的各项畸变问题.

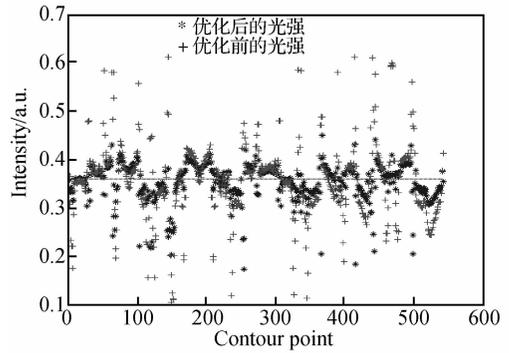


图 6 优化前后的轮廓点光强

Fig. 6 Contour intensity before and after optimization

当使用公式 (6) 的评估函数后,对某一组测试版图用校准前后的模型进行仿真,CD 结果如图 6 和 7 所示,其中 iso line, dense line, pitch line 分别表示单线,等线宽和间距的稠密线及不同线宽间距比的稠密线. 比较两图,图 7 的  $F$  值为  $621.973\text{nm}^2$ ,在 CD 值较小的单线及 pitch 线中,模拟结果误差较大,但系统经过优化以后,从图 8 可见,各个模拟结果误差大大减小,其  $F$  值减小为  $55.2086\text{nm}^2$ .

最终产生的模型是将 BTCC 矩阵经过特征值分解,转化为一组卷积核表示的. 用该组经过优化后的卷积核与某一版图进行快速卷积运算,其结果见图 9,从图中可以看出,该模型在一定程度上准确模拟了参数模型模拟的结果.

## 4 结论

集成电路的最小尺寸和最小间距减小到 180nm 及以下后,光刻过程中出现的一些新的畸变效应对模型的构建和优化提出了新的挑战. 本文首次提出了一种基于圆采样和遗传算法的超深亚微米

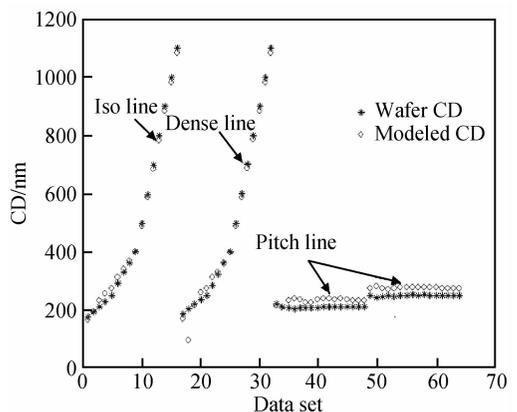


图 7 优化前的 CD 值

Fig. 7 CD value before optimization

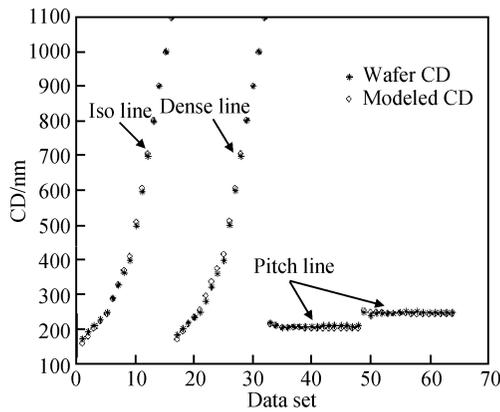


图 8 优化后的 CD 值

Fig. 8 CD value after optimization

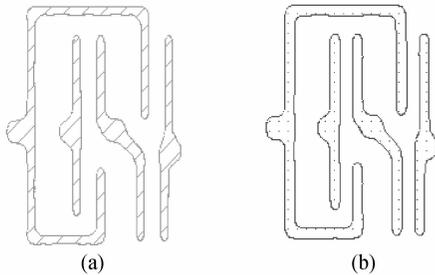


图 9 通过优化后的模型(a)和目标模型(b)仿真后的轮廓  
Fig. 9 Contour simulated by optimized model (a) and target model (b)

快速准确的光刻建模与优化系统. 该方法不需要用户有很多的实际经验, 模型校准过程简单. 实验结果证明该方法在模型校准过程中具有时间短, 精度适

中的特点, 适合在亚 180nm 节点上快速建模. 如文献[10]中指出, 新出现的很多畸变效应依旧可以通过 TCC 矩阵表现, 所以在以后的研究过程中, 可以在遗传算法优化策略上作进一步的改进.

### 参考文献

- [1] Chen Zhijin, Shi Zheng, Wang Guoxiong. 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. 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]
- [2] Adam K, Granik Y, Torres A. Improved modeling performance with an adapted vectorial formulation of the Hopkins imaging equation. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 78
- [3] Lim C T, Temchenko V, Chung W J, et al. Process influence study on optical model generation during model based OPC development. Proceedings of SPIE, 2006, 6155: 615501-1
- [4] Cobb N, Zakhor A, Miloslavsky E. Mathematical and CAD framework for proximity correction. Proceedings of SPIE, 1996, 2726: 208
- [5] <http://www.ee.ucla.edu/~vandenbe/calib.pdf>
- [6] Li Peng, Shi Weiping. Model order reduction of linear networks with massive ports via frequency-dependent port packing. DAC2006, 2006: 267
- [7] Stark H. Sampling theorems in polar coordinates. J Opt Soc Am, 1979, 69(11): 1519
- [8] Matsunawa T, Nosato H, Sakanashi H. The novel approach for optical proximity correction using genetic algorithms. Proceedings of SPIE, 2005, 5992: 599254-1
- [9] Huang W C, Lai C M, Luo B. OPC modeling by genetic algorithm. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 1229
- [10] Rosenbluth A E, Gallatin G, Gordon R L. Fast calculation of images for high numerical aperture lithography. Proceedings of SPIE, 2004, 5377: 615

## New Modeling and Optimization Method Suitable for UDSM Lithography Simulation\*

Shen Shanhu<sup>†</sup>, Shi Zheng, Xie Chunlei, and Yan Xiaolang

(Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper presents a novel UDSM lithography process modeling flow using layout contours. The flow mainly includes the following steps: First the transmission cross coefficient matrix standing for the pure optical lithography model is transformed into a much smaller one by circular sampling, while the mask is represented by the same sampling basis; then the resulting system is calibrated half-empirically with the results of a rigorous 3D simulation of the target design layout or the SEM contours. During the model calibration process, novel genetic algorithms are introduced. The experimental results show that the method takes into account new aberration effects, which cannot be simulated well by the traditional method in the UDSM nodes. Due to the fact that the final model is represented using a series of convolution kernels, the constructed model is able to satisfy the speed and accuracy demands of optical proximity correction tasks.

**Key words:** lithography modeling; layout contour; circular sampling; genetic algorithm; optical proximity correction

**EEACC:** 2550G

**Article ID:** 0253-4177(2007)08-1320-05

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90207002)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: shensh@vlsi.zju.edu.cn

Received 1 February 2007, revised manuscript received 22 April 2007