

# 基于随机并行梯度速降算法的光刻机光源与掩模联合优化方法

李兆泽<sup>1,2</sup> 李思坤<sup>1</sup> 王向朝<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 随着集成电路特征尺寸进入 2Xnm 及以下节点, 光源与掩模联合优化(SMO)成为了拓展 193 nm ArF 浸没式光刻工艺窗口、减小工艺因子的重要分辨率增强技术(RET)之一。提出了一种基于随机并行梯度速降(SPGD)算法的 SMO 方法, 通过随机扰动进行梯度估计, 利用估计梯度来迭代更新光源与掩模, 避免了求解梯度解析表达式的过程, 降低了优化复杂度。对周期接触孔阵列及十字线、密集线三种掩模图形的仿真验证表明, 三种掩模图形误差(PE)值分别降低了 75%、80% 与 70%, 该方法较大程度地提高了光刻成像质量。

**关键词** 光学制造; 光刻; 光源与掩模联合优化; 分辨率增强技术; 工艺窗口

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0911002

## Source and Mask Optimization Using Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm in Optical Lithography

Li Zhaoze<sup>1,2</sup> Li Sikun<sup>1</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China.  
<sup>2</sup> University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** As the critical dimension in integrated circuit fabrication moving toward nodes-2Xnm and below, source and mask optimization (SMO) has been one of the most effective solutions of resolution enhancement techniques (RETs) to extend the process window and decrease process factor of 193 nm ArF lithography. We propose an efficient SMO method based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. The gradients of the objective function are estimated by random disturbance and utilized to guide the optimization, which avoids to calculate the analytic expression of the gradients. The complexity of optimization is reduced. The proposed SMO method is demonstrated using three mask patterns, including a periodic array of contact holes, a cross gate and dense lines. Three kinds of mask pattern error (PE) are reduced by 75%, 80% and 70% respectively. The numerical results show that our method can provide great improvements in printed image quality.

**Key words** optical fabrication; optical lithography; source and mask optimization; resolution enhancement technique; process window

**OCIS codes** 110.1758; 110.3960; 220.3740

## 1 引言

光刻是超大规模集成电路制造的核心技术之

一。光刻分辨率决定了集成电路图形的特征尺寸<sup>[1]</sup>。根据瑞利准则, 光刻分辨率可以表示为  $R =$

收稿日期: 2014-02-02; 收到修改稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61275207, 61205102)

作者简介: 李兆泽(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事高端光刻机分辨率增强技术方面的研究。

E-mail: lizhaozezone@163.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

$k_1\lambda/NA$ , 其中  $\lambda$  为光源波长,  $NA$  为数值孔径,  $k_1$  为工艺因子<sup>[2]</sup>。当曝光波长和数值孔径一定的情况下, 要继续提高光刻分辨率, 必须通过改善光刻胶工艺和采用分辨率增强技术来减小工艺因子。分辨率增强技术包括相移掩模技术、离轴照明技术、光学临近效应校正技术、以及最近几年新发展起来的光源与掩模联合优化技术(SMO)等。光源与掩模联合优化技术同时优化光源照明模式和掩模图形, 和光学临近效应校正技术相比, 它增加了可优化图形的自由度, 具有更强的分辨率增强能力。随着集成电路特征尺寸进入 2Xnm 及以下节点, 传统的 193 nm ArF 浸没式光刻工艺因子逼近衍射极限, 导致可用工艺窗口不断减小, 获得高质量成像越来越困难<sup>[3-6]</sup>。光源与掩模联合优化(SMO)技术成为了拓展浸没式 193 nm ArF 光刻技术工艺窗口, 减小工艺因子  $k_1$  的重要分辨率增强技术(RET)<sup>[7]</sup>。

2001 年, Rosenbluth 等<sup>[8]</sup>首先提出了光源与掩模联合优化(SMO)技术, 结果表明相比于传统的 RET, SMO 能够获得更大的工艺窗口<sup>[8]</sup>。基于此概念 Ma 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于像素点翻转的高计算效率 SMO 方法, Li 等<sup>[10]</sup>随后对该方法进行了研究, 提高了该方法的稳健性。Erdmann 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于二进制编码遗传算法的 SMO 方法, 利用此方法优化过程不需要掌握光刻的先验知识, 能够获得光源与掩模的全局最优解。Yang 等<sup>[12]</sup>提出了基于浮点数编码遗传算法的 SMO 方法, 进一步提升了该 SMO 方法的收敛速度。Tolani 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于水平集算法的 SMO 方法, 保证了光源和掩模的无限可优化自由度。Chang 等<sup>[14-15]</sup>将主成分分析法引入阿贝成像模型中提高了 SMO 算法计算效率。

基于梯度的 SMO 技术是 2010 年以来提出的一种新的 SMO, 由于其方法简单、计算高效、速度快得到了广泛的研究。Peng 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于最速下降算法的 SMO 方法, 并在评价函数中包含进了离焦、光源图形、掩模图形复杂度惩罚项。Jia 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于梯度速降算法的 SMO 方法, 并利用权重因子考察了离焦及曝光剂量对 SMO 的影响。Yu 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于共轭梯度的 SMO 方法, 并且通过对光刻胶模型分段线性化, 使目标函数成为二次函数形式, 从而得到光源优化的全局最优解。然而以上基于梯度的 SMO 方法均需要梯度信息的解析表达式, 当光刻成像模型中包含如三维(3D)厚掩模模型、3D 光刻胶物理模型时, 评价函数

梯度解析表达式将难以求解或者需要简化光刻成像模型、在牺牲模型精度的前提下才可能求解梯度信息的解析表达式。

本文提出了一种基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的 SMO 方法, 以图形误差(PE)为目标函数, 通过随机扰动进行梯度估计, 并利用梯度信息引导整个优化过程, 避免了求解梯度解析表达式, 降低了光源与掩模联合优化的复杂度。选取三种典型的掩模图形包括周期性的接触孔阵列、十字线图形及密集线图形进行了数值仿真, 验证了所提方法的有效性。

## 2 光刻成像模型

### 2.1 傅里叶级数展开模型

光刻成像系统原理如图 1 所示。成像系统由照明光源、掩模、投影物镜、硅片等组成。采用 Köhler 照明方式<sup>[19-20]</sup>, 光源上发出的光通过聚焦透镜 L1 均匀的照射在掩模上, 投影物镜将掩模图形成像在硅片上的光刻胶中。由于投影物镜光瞳大小的限制, 投影物镜像差, 离焦等因素的影响, 光刻胶像相对于掩模图形总是存在一定失真。

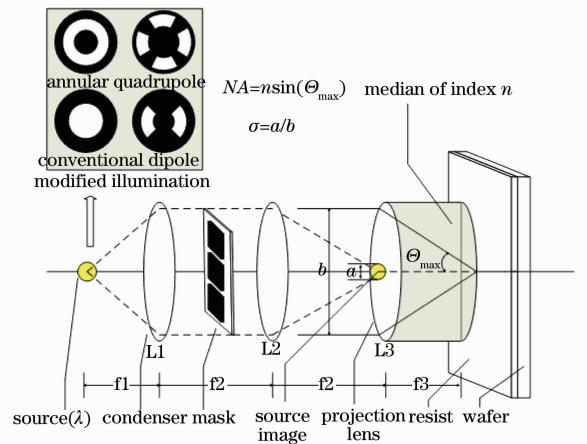


图 1 光刻成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of optical lithography imaging system

根据 Hopkins 光学成像理论, 硅片表面光强分布可以表示为<sup>[20]</sup>

$$I(\mathbf{r}) = \iint M(\mathbf{r}_1) M^*(\mathbf{r}_2) \gamma(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) h(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) h^*(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{r} = (x, y)$ ,  $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1)$ ,  $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2)$  为空间坐标,  $*$  代表复共轭。  $M(\mathbf{r})$  为掩模图形,  $\gamma(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$  为复相干度, 其幅值代表位于  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  处两个点光源发出的光的相互作用程度,  $h(\mathbf{r})$  为光学系统的点扩展函数(PSF)。

(1)式是一个四重积分,对其进行计算需要耗费长时间和大内存空间。为简化计算对其做近似处理,对(1)式进行傅里叶级数展开,建立硅片表面光强分布在离散域中的表达形式。假定掩模分布在一个 $x, y \in [-D/2, D/2]$ 的正方形区域 $A$ 内,因此计算(1)式只需要 $x, y \in [-D/2, D/2]$ 的区域 $A_\gamma$ 内的 $\gamma(\mathbf{r})$ 的值,利用傅里叶级数展开得:

$$\gamma(\mathbf{r}) = \sum_m J_m \exp(j\omega_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

$$J_m = \frac{1}{D^2} \int_{A_\gamma} \gamma(\mathbf{r}) \exp(-j\omega_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (3)$$

式中 $\omega_0 = \pi/D, \mathbf{m} = (m_x, m_y), m_x, m_y$ 为整数, $\cdot$ 为内积操作符, $j$ 为虚数单位, $\gamma(\mathbf{r})$ 是光瞳处光源像的

二维逆傅里叶变换, $J_m$ 为有效光源。将(2)式代入(1)式计算得到掩模空间像:

$$I_a(\mathbf{r}) = \sum_m J_m |M(\mathbf{r}) \otimes h^m(\mathbf{r})|^2, \quad (4)$$

式中:

$$h^m(\mathbf{r}) = h(\mathbf{r}) \exp(j\omega_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{r}), \quad (5)$$

$\otimes$ 为卷积操作符。图2(a)为 $81 \text{ pixel} \times 81 \text{ pixel}$ 像素点的二元掩模,像素点分辨率为 $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ 。采用环形照明光源,波长 $\lambda = 193 \text{ nm}$ ,部分相干因子 $\sigma_{\text{out}} = 0.8, \sigma_{\text{in}} = 0.3$ 。投影系统 $NA = 1.35$ 。经傅里叶级数展开模型计算得到的焦面空间像如图2(b)所示。

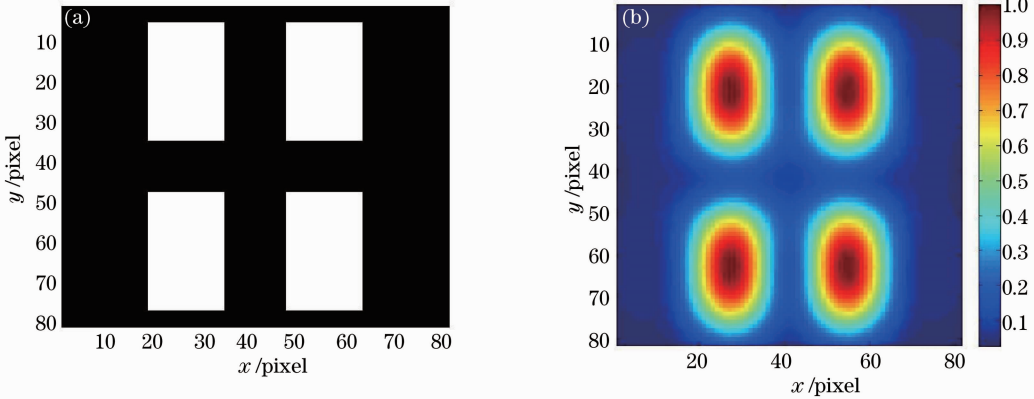


图2 (a)掩模图形;(b)空间像

Fig. 2 (a) Mask pattern; (b) aerial image

(5)式所示的光刻成像模型是建立在理想条件下的:掩模空间像在焦面上,波前为理想球面。然而实际投影系统中总是存在像差,而且成像面存在离焦。因此必须在成像模型中考虑像差与离焦。像差与离焦可以用37阶Zernike多项式表示<sup>[19-20]</sup>:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^{37} c_i F_i(\rho, \theta), \quad (6)$$

式中 $c_i$ 为第 $i$ 项Zernike系数, $F_i(\rho, \theta)$ 为第 $i$ 项Zernike多项式, $\rho = \lambda(f_x^2 + f_y^2)^{1/2}/NA$ , ( $f_x, f_y$ 分别是 $x, y$ 方向的空间频率), $\theta = \arctan(f_x/f_y)$ 。第2,3

项Zernike系数代表波前倾斜,第4项代表离焦。假设 $H_0$ 为光刻机投影物镜系统的理想传递函数,则考虑像差后的传递函数为 $H_0 \exp[j2\pi W(\rho, \theta)]$ ,通过逆傅里叶变换得到PSF为

$$h_a(x, y) = \text{IFT}\{H_0 \exp[j2\pi W(\rho, \theta)]\}. \quad (7)$$

图3(a)为 $c_5 = 0.3\lambda$ 的像散影响下焦面处的掩模空间像;图3(b)为 $c_7 = 0.3\lambda$ 的彗差影响下焦面处的掩模空间像;图3(c)为 $c_9 = 0.3\lambda$ 的球差影响下焦面处的掩模空间像。

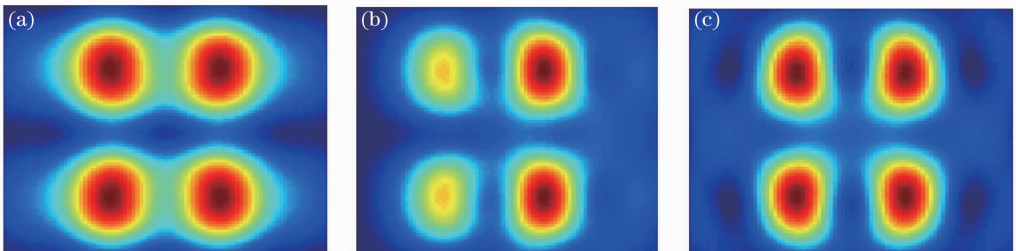


图3 像差影响下的空间像。(a)像散 $c_5 = 0.3$ ; (b)彗差 $c_7 = 0.3$ ; (c)球差 $c_9 = 0.3$

Fig. 3 Aerial image with aberration. (a) Astigmatism  $c_5 = 0.3$ ; (b) coma  $c_7 = 0.3$ ; (c) spherical aberration  $c_9 = 0.3$

将离焦单独处理,离焦系数与真实像空间坐标之间的关系可以表示为<sup>[17]</sup>

$$c_4 = \frac{zNA^2}{4\lambda}, \quad (8)$$

代入(6)式得到离焦项表达式:

$$j2\pi c_4(2\rho^2 - 1) = j\pi \frac{zNA^2}{2\lambda} \left\{ 2 \left[ \left( f_x \frac{\lambda}{NA} \right)^2 + \left( f_y \frac{\lambda}{NA} \right)^2 \right] - 1 \right\}, \quad (9)$$

进一步得到考虑离焦后的 PSF 为

$$h_d(x, y) = \text{IFT} \left\{ H_0 \exp \left\{ j\pi \frac{zNA^2}{2\lambda} \left\{ 2 \left[ \left( f_x \frac{\lambda}{NA} \right)^2 + \left( f_y \frac{\lambda}{NA} \right)^2 \right] - 1 \right\} \right\} \right\}, \quad (10)$$

图 4(a)~(c)分别为离焦 40, 80, 120 nm 时的掩模空间像。

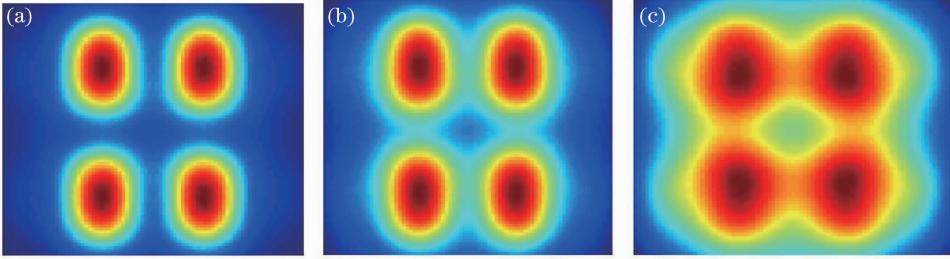


图 4 离焦影响下的空间像。(a)  $z=40$  nm; (b)  $z=80$  nm; (c)  $z=120$  nm

Fig. 4 Aerial image with defocus. (a)  $z=40$  nm; (b)  $z=80$  nm; (c)  $z=120$  nm

此外一般光刻机中使用的是 1:4 缩放比率的投影物镜成像系统。因此进入成像系统与离开成像系统时单位面积上的光强不同,必须做一定的光强校正。光强校正系数可以近似表示为<sup>[13]</sup>

$$R(f_x, f_y) = \left[ 1 - \frac{\lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)}{n} \right]^{-0.25}, \quad (11)$$

光强校正后 PSF 为

$$h_R(x, y) = \text{IFT}[H_0 R(f_x, f_y)]. \quad (12)$$

综合上述像差,离焦,光强校正的影响,得到实际光刻工艺中成像系统传递函数:

$$h(x, y, z) = \text{IFT} \left\{ H_0 R(f_x, f_y) \exp \left\{ j \left[ 2\pi W(\rho, \theta) + \pi \frac{zNA^2}{2\lambda} \left\{ 2 \left[ \left( f_x \frac{\lambda}{NA} \right)^2 + \left( f_y \frac{\lambda}{NA} \right)^2 \right] - 1 \right\} \right] \right\} \right\}, \quad (13)$$

代入(5)式得到掩模图形空间像计算公式:

$$I(x, y, z) = \sum_m J_m | M(x, y) \otimes h(x, y, z) |^2. \quad (14)$$

## 2.2 光刻胶模型

像面处空间像光强分布并不是硅片面上的真正图形。受到光线照射的光刻胶会发生化学反应,曝光部分的显影率会增加(正光刻胶)。只有显影超过一定阈值时才会形成图像。因此光刻胶像是空间像二值化后的结果,为了易于在 SMO 方法中应用,使用 sigmoid 函数<sup>[10-12, 15-17]</sup>来描述光刻胶模型:

$$I_r(x, y, z) = \text{sig}[I_a(x, y, z)] = \frac{1}{1 + \exp\{-a[I_a(x, y, z) - t]\}}, \quad (15)$$

式中  $t$  为与曝光剂量相关的工艺阈值,  $a$  为光刻胶对光照的灵敏度,决定了函数的倾斜度。 $t$  与  $a$  的值的选取对 SMO 是否收敛有直接的影响。图 5(a) 为阈

值  $t = 0.5, a = 30$  与  $t = 0.9, a = 30$  时的 sigmoid 函数;图 5(b) 为阈值  $t = 0.5, a = 50$  与  $t = 0.9, a = 50$  时的 sigmoid 函数。可以看出 sigmoid 函数相当于一个滤波器,其性能由不同的  $t$  与  $a$  的值决定。将(13)式代入(14)式得最终光刻胶像模型:

$$I_r(x, y, z) = \text{sig} \left[ \sum_m J_m | M(x, y) \otimes h(x, y, z) |^2 \right]. \quad (16)$$

## 3 基于 SPGD 算法 SMO

### 3.1 SPGD 算法原理

SPGD 算法<sup>[21-23]</sup>无需求解梯度的解析表达式,适用于高维数控制变量、复杂数学模型系统的最优控制。SPGD 算法的根本基础是 Cauchy 提出的梯度下降算法<sup>[21]</sup>,基本的迭代公式为

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} - \gamma g, \quad (17)$$

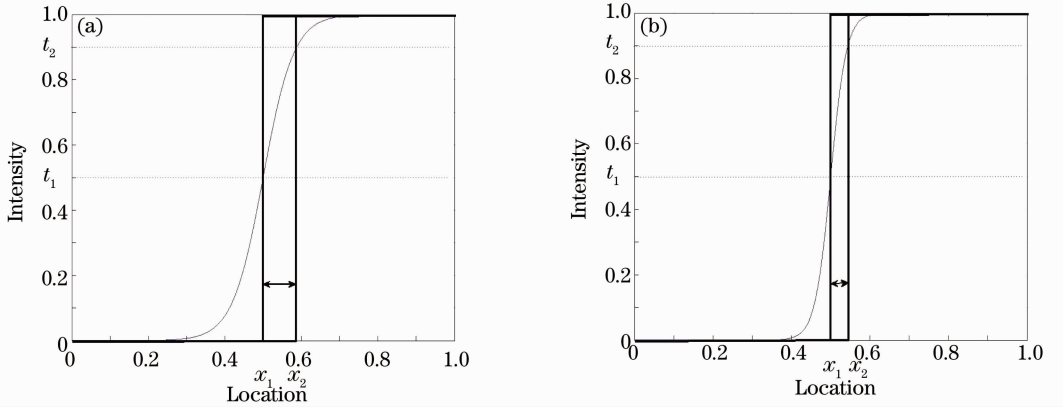

 图 5 Sigmoid 函数。(a)  $a=30$ ；(b)  $a=50$ 

 Fig. 5 Sigmoid function. (a)  $a=30$ ；(b)  $a=50$ 

式中  $u$  为控制变量,  $g$  为目标函数梯度值,  $\gamma$  为步长。SPGD 算法的梯度估计是通过系统性能评价函数  $J$  的所有控制变量  $u$  同时施加随机扰动实现的。具体原理如下<sup>[21]</sup>。

记统计独立、符合伯努利分布且概率各是  $1/2$  的随机扰动  $\delta u_j = \pm \sigma (j = 1, \dots, N)$ ,  $\sigma$  为正实数, 将其同时施加到控制变量向量  $u$  上, 计算系统性能评价函数  $J$  的变化量:

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N), \quad (18)$$

对  $\delta J$  按泰勒级数展开得:

$$\delta J = \sum_{j=1}^N \frac{\partial J}{\partial u_j} \delta u_j + \frac{1}{2} \sum_{j,i} \frac{\partial^2 J}{\partial u_j \partial u_i} \delta u_j \delta u_i + \dots, \quad (19)$$

利用第  $l$  个变量的扰动  $\delta u_l$  和测量值  $\delta J$  计算  $\delta J \delta u_l$  得:

$$\delta J \delta u_l = \frac{\partial J}{\partial u_l} (\delta u_l)^2 + \sum_{j \neq l} \frac{\partial J}{\partial u_j} \delta u_j \delta u_l + \frac{1}{2} \sum_{j,i} \frac{\partial^2 J}{\partial u_j \partial u_i} \delta u_j \delta u_i \delta u_l + \dots, \quad (20)$$

对(20)式两边同时取统计平均, 由于取的随机扰动符合伯努利分布且概率分布各是  $1/2$ , 所以有:

$$\begin{cases} \langle \delta u_j \rangle = 0 \\ \langle \delta u_j \delta u_i \rangle = \sigma^2 \\ \delta_{ij} = \begin{cases} \sigma^2 (i = j) \\ 0 (i \neq j) \end{cases} \\ \langle \delta u_j \delta u_i \delta u_l \rangle = 0 \end{cases} \quad (21)$$

将(21)式代入(20)式得:

$$\delta J \delta u_l / \sigma^2 = \frac{\partial J}{\partial u_l} + O(\sigma^4), \quad (22)$$

显然可以把  $\delta J \delta u_l / \sigma^2$  作为系统评价函数  $J$  的梯度分量  $\delta J / \delta u_l$  的随机近似。最后将(22)式代入(17)式得到 SPGD 算法的优化迭代公式即:

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \gamma \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad (23)$$

式中  $\gamma$  为步长, 一般取经验值,  $\delta u_j$  为加在控制变量上的随机扰动,  $\delta J$  为第  $n$  次迭代时系统性能评价函数的变化量,  $u_j$  为评价函数变量。

### 3.2 基于随机并行梯度速降算法的 SMO

#### 3.2.1 基于像素表示的光源与掩模

近年来基于像素表示的光源与掩模常常被用在 SMO 算法中。像素化光源与掩模定义如下:

$$\begin{cases} J(a, b) \geq 0 \\ M(i, j) \in S \end{cases} \quad (24)$$

其中  $(a, b)$  与  $(i, j)$  为光源与掩模像素位置坐标。  $M$  为掩模透过率函数, 有限实数集合  $S$  决定了掩模透过率的取值范围。例如, 对于二元掩模  $S = \{0, 1\}$ , 对于相移掩模  $S = \{-1, 0, 1\}$ 。  $J$  为光源函数, 以传统圆形照明光源为例:

$$(a\Delta)^2 + (b\Delta)^2 \leq \sigma^2, \quad (25)$$

式中  $\Delta$  为相邻两像素之间的距离,  $\sigma$  为相干因子。为防止透镜损伤, 光源的光强不能过大, 因此光源光强受到一定约束:

$$\max J(a, b) \leq J_{\max}, \quad (26)$$

对光源强度归一化后得:

$$\bar{J}(a, b) = \frac{J(a, b)}{J_{\max}}, \quad (27)$$

因此  $J(a, b)$  在  $[0, 1]$  范围内连续取值。然而优化过程中光源像素取值有可能超过 1, 因此引入如下的参数转换:

$$\bar{J}(a, b) = \frac{1 + \cos[\theta(a, b)]}{2}, \quad (28)$$

其中  $\theta \in (-\infty, \infty)$  待优化的光源变量。以  $\theta$  为优化变量, 将优化变成了一个无约束优化问题。

掩模的像素值一般取两到三个值, 这取决于使用的掩模类型。例如, 对于二元掩模其取值为 0 或 1。这种离散取值使掩模优化成为一个组合优化问题, 因此一般假设掩模在一定范围  $[m_1, m_2]$  内连续取值。

考虑到数学计算及数值实现的相对容易, 针对二元掩模进行优化, 但提出的 SMO 方法同样适用于相移掩模 (PSM) 的优化。对于二元掩模, 其像素值在  $[0, 1]$  范围内, 引入如下的参数转换:

$$V_{PE} = d[I_d(x, y, z), I(x, y, z)] = \| I_d(x, y, z) - I(x, y, z) \|_{\frac{2}{2}} = \| I_d(x, y, z) - \text{sig} \left[ \sum_m J_m |M(x, y) \otimes h(x, y, z)|^2 \right] \|_{\frac{2}{2}}, \quad (30)$$

PE 值越小, 表示输出图形与理想图形的差异越小。由于在完全亮或暗的区域处 PE 值几乎为零, 因此 PE 主要是输出图形与理想图形的边缘误差, 等价于边缘放置误差 (EPE)。最终将优化问题化为

$$F[\bar{J}(a, b), m(i, j)] = \arg \min_{J, m} \| I_d(x, y, z) - \text{sig} \left[ \sum_m J_m(a, b) |M(i, j) \otimes h(x, y, z)|^2 \right] \|_{\frac{2}{2}}, \quad (31)$$

式中  $J_m(a, b) \in [0, 1], M(i, j) \in [0, 1]$ 。

### 3.2.3 基于 SPGD 算法的 SMO 流程

将理想图形作为初始掩模; 将传统的部分相干照明方式, 例如环形照明, 二极照明等作为初始光源; 将图形误差作为系统评价函数; 其值减小的方向为整个优化过程的前进方向。具体的 SMO 优化流程如下:

1) 初始化掩模  $M(i, j) = I_d(x, y)$  与照明光源  $J_m(a, b)$ , 对应掩模和光源的控制变量  $\theta$  和  $\varphi$  的初始值也确定了。选取合适的迭代步长  $\gamma$  及光刻胶模型中的阈值  $t$ 、倾斜度参数  $a$ 。

2) 掩模优化: 第  $k$  次迭代时, 产生随机扰动  $\Delta\varphi^{(k)}(i, j)$  矩阵, 各  $\Delta\varphi(i, j)$  相互独立且满足伯努利分布<sup>[23]</sup>, 即分量幅值相等  $|\Delta\varphi(i, j)| = \delta$ , 且  $P_r[\Delta\varphi(i, j) = \pm\delta] = 0.5$ 。将  $\varphi^{(k-1)} + \Delta\varphi^{(k)}, \varphi^{(k-1)} - \Delta\varphi^{(k)}$  代入 (28) 式分别计算得到  $M_+, M_-$ , 将  $M_+, M_-$  代入 (29) 式分别计算得到  $F_+, F_-$ , 最后根据 (22) 式得到第  $k$  次迭代后掩模控制变量:

$$\varphi^{(k)} = \varphi^{(k-1)} - \gamma\delta F\Delta\varphi = \varphi^{(k-1)} + \gamma(F_+ - F_-)\Delta\varphi, \quad (32)$$

$$M(i, j) = \frac{1 + \cos[\varphi(i, j)]}{2}, \quad (29)$$

其中  $\varphi \in (-\infty, \infty)$  代表  $(i, j)$  处掩模的取值, 以  $\varphi$  为优化的掩模变量, 将优化转化为一个无约束优化问题。

### 3.2.2 评价函数

光源与掩模联合优化技术的目标是通过数学建模和计算设计适当的掩模与照明光源以获得理想成像。评价函数在整个优化方法中有着重要的作用, 设计一个适当的目标函数并结合合适的优化算法, 能够避免优化过程陷入局部极小值、收敛速度慢等问题。优化方法中以图形误差作为评价函数。

根据 (13) 式, 记  $I(x, y)$  为掩模通过光刻投影物镜系统得到的光刻胶图形,  $I_d(x, y)$  为理想图形即初始时的掩模图形, 则输出图形与理想图形之差 PE 为

将  $\varphi^{(k)}$  代入 (28) 式得到更新后的掩模:

$$M^{(k)}(i, j) = \frac{1 + \cos[\varphi^{(k)}(i, j)]}{2}. \quad (33)$$

3) 光源优化: 与掩模优化过程相同, 第  $k$  次迭代时, 产生随机扰动  $\Delta\theta^{(k)}(i, j)$  矩阵, 同样各  $\Delta\theta(i, j)$  相互独立且满足伯努利分布, 将  $\theta^{(k-1)} + \Delta\theta^{(k)}, \theta^{(k-1)} - \Delta\theta^{(k)}$  代入 (28) 式分别计算得到  $J_+, J_-$ , 将  $J_+, J_-$  代入 (29) 式分别计算得到  $F_+, F_-$ , 最后根据 (22) 式得到第  $k$  次迭代后光源控制变量:

$$\theta^{(k)} = \theta^{(k-1)} - \gamma\delta F\Delta\theta = \theta^{(k-1)} + \gamma(F_+ - F_-)\Delta\theta, \quad (34)$$

将  $\theta^{(k)}$  代入 (28) 式得到更新后的光源:

$$\bar{J}^{(k)}(a, b) = \frac{1 + \cos[\theta^{(k)}(a, b)]}{2}. \quad (35)$$

4) 将更新后的掩模  $M^{(k)}$ 、光源  $J^{(k)}$  代入 (29) 式计算 PE, 并判断是否满足结束条件, 如果满足则优化结束; 否则  $k = k + 1$ , 并跳转到第二步。图 6 为整个 SMO 的流程。

## 4 数值仿真实验

为了验证算法的有效性,利用接触孔阵列及十字线这两种常用在静态随机存储器(SRAM)中典型的掩模图形进行了数值仿真实验。如图 7(a)所示,初始光源为二极照明,其内相干因子  $\sigma_{in}=0.3$ ,外相干因子  $\sigma_{out}=0.8$ ,像素化光源由  $31 \times 31$  个点组成。理想接触孔阵列图形如图 7(b)所示,大小为  $81 \text{ pixel} \times 81 \text{ pixel}$  像素点,分辨率为  $6 \text{ nm} \times 6 \text{ nm}$ ,并将其作为初始掩模图形。掩模特征尺寸为  $45 \text{ nm}$ ,光刻机工作波长  $\lambda=193 \text{ nm}$ ,数值孔径  $NA=1.35$ 。光刻胶模型参数  $a=30$ ,阈值  $t=0.3$ 。图 7(c)为在初始光源和掩模图形下所成的空间像,图 7(d)为对应的光刻胶像,优化前的 PE 值为 603.5。

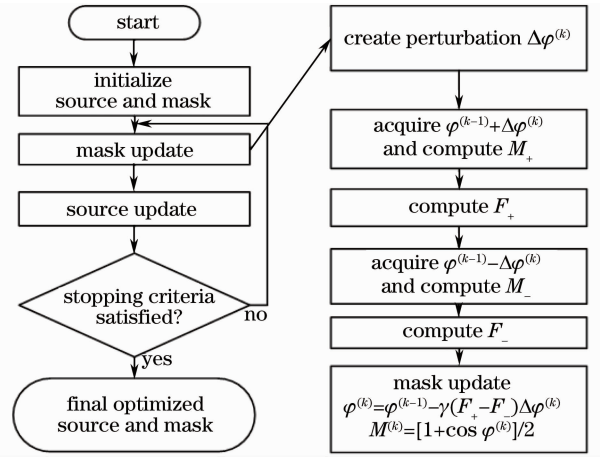


图 6 SMO 优化流程图

Fig. 6 Optimization procedure of SMO

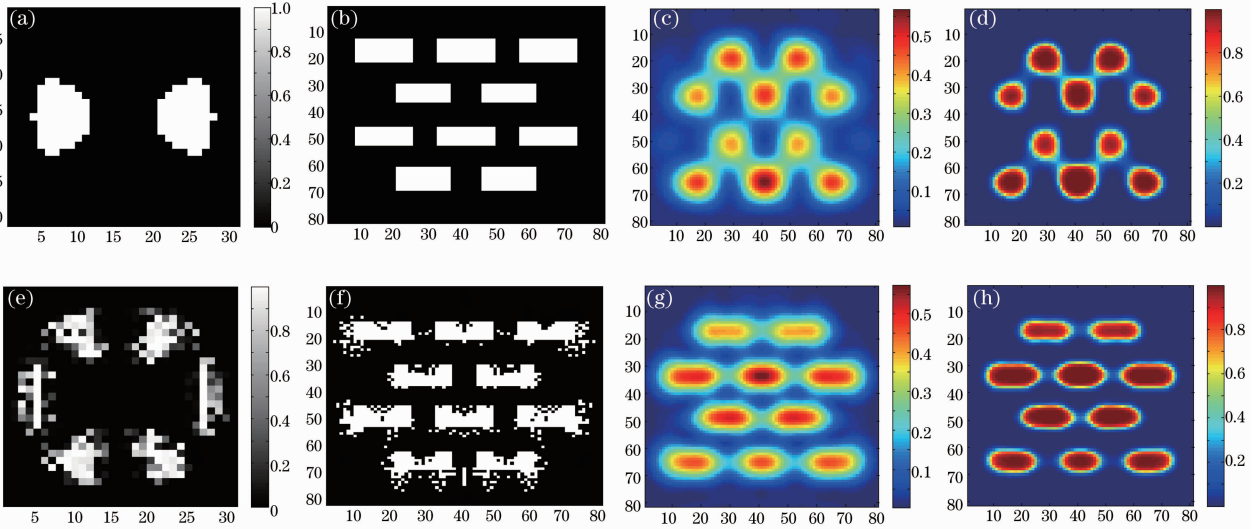


图 7 (a)初始光源;(b)初始接触孔阵列掩模;(c)初始空间像;(d)初始光刻胶像;(e)优化后光源;(f)优化后掩模;(g)优化后空间像;(h)优化后光刻胶像

Fig. 7 (a) Initial source; (b) initial mask; array of contact hole; (c) initial aerial image; (d) initial resist image; (e) optimized source; (f) optimized mask; (g) optimized aerial image; (h) optimized resist image

采用迭代步长  $\gamma=0.1$  和提出的方法进行 SMO。图 7(e),(f)分别为优化后的光源与掩模。图 7(g),(h)为对应空间像及光刻胶像。优化后 PE 值下降到 150.6,降低了 75%。对比图 7(d)和图 7(h)可知,优化后光刻胶像的图像保真度及对比度都有了很大的提升。

图 8 为 SMO 方法的收敛性曲线。由图可知,基于 SPGD 算法的 SMO 收敛性曲线局部有微小的抖动。收敛性与随机扰动值  $\delta u$  有很大关系。 $\delta u$  过大会导致严重的振荡使算法不收敛,而过小则会使收敛速度很慢,因此要选择合适的  $\delta u$ 。这里光源和掩模的  $\delta u$  分别是 0.025 和 0.01。

为了进一步验证提出的 SMO 方法的有效性,

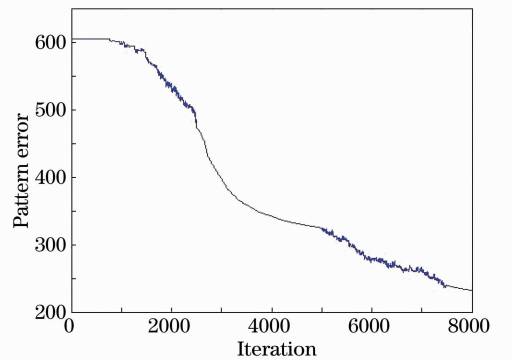


图 8 初始光源为二极照明,初始掩模为触孔阵列时 SMO 算法收敛性

Fig. 8 Convergence of the SMO algorithm when initial source is dipole, initial mast is array of contact hole

再次使用具有十字线结构的复杂掩模图形进行了数值仿真实验。初始掩模图形如图 9(a)所示,大小为  $81 \text{ pixel} \times 81 \text{ pixel}$  像素点,分辨率为  $7 \text{ nm} \times 7 \text{ nm}$ 。掩模特征尺寸为  $42 \text{ nm}$ 。初始光源如图 9(b)所示,其内相干因子  $\sigma_{in}=0.3$ ,外相干因子  $\sigma_{out}=0.8$ ,大小

为  $31 \text{ pixel} \times 31 \text{ pixel}$  个像素点。光刻机工作波长  $\lambda=193 \text{ nm}$ ,数值孔径  $NA=1.35$ 。光刻胶模型参数  $a=25$ ,阈值  $t=0.3$ 。图 9(c)为在初始光源和掩模图形条件下所成的空间像,图 9(d)为对应光刻胶像,优化前 PE 值为 1018.7。

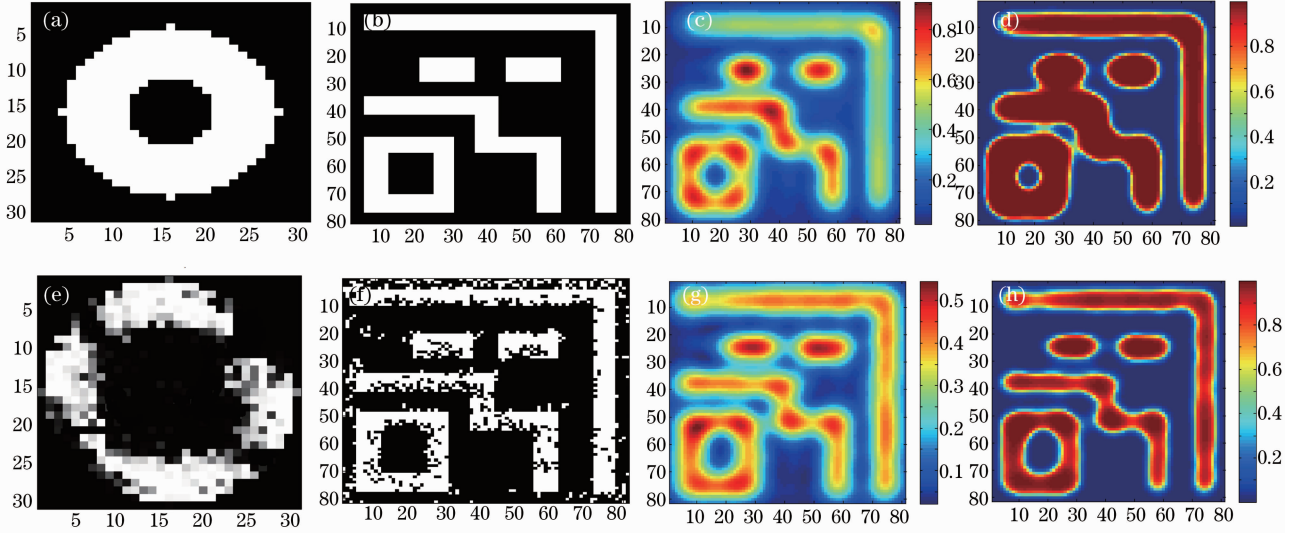


图 9 (a)初始光源;(b)初始掩模;(c)初始空间像;(d)初始光刻胶像;(e)优化后光源;(f)优化后掩模;  
(g)优化后空间像;(h)优化后光刻胶像

Fig. 9 (a) Initial source; (b) initial mask; cross gate; (c) initial aerial image; (d) initial resist image; (e) optimized source; (f) optimized mask; (g) optimized aerial image; (h) optimized resist image

采用迭代步长  $\gamma=0.1$  进行优化。图 9(e), (f) 分别为优化后的光源形状与掩模图形。图 9(g), (h) 为对应空间像及光刻胶像。优化后 PE 值下降到 205,降低了 80%。图 9(d)和图 9(h)的比较说明提出的 SMO 方法对此类复杂掩模设计图形也是有效的,输出的光刻胶像的图像保真度及对比度都有了很大的提升。图 10 为 SMO 方法的收敛性曲线。光源和掩模随机扰动值分别为 0.02 和 0.006。

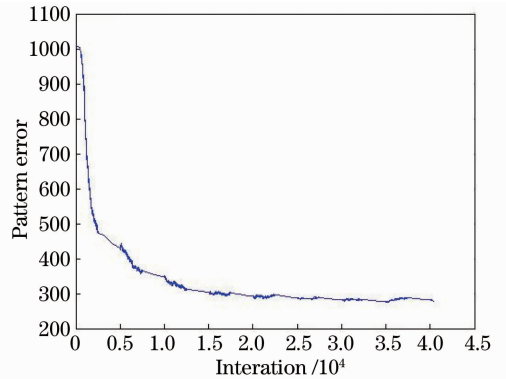


图 10 初始光源为环形照明,初始掩模为十字线时 SMO 算法收敛性

Fig. 10 Convergence of the SMO algorithm when initial source is annular, initial mask is cross gate

利用包含密集线的 L 形图形进一步对算法的有效性进行验证。如图 11(a)所示,初始光源为环形照明,其内相干因子  $\sigma_{in}=0.3$ ,外相干因子  $\sigma_{out}=0.8$ ,像素化光源由  $31 \times 31$  个点组成。L 形密集线图形如图 11(b)所示,大小为  $81 \text{ pixel} \times 81 \text{ pixel}$  像素点,分辨率为  $6 \text{ nm} \times 6 \text{ nm}$ ,并将其作为初始掩模图形。掩模特征尺寸为  $45 \text{ nm}$ ,光刻机工作波长  $\lambda=193 \text{ nm}$ ,数值孔径  $NA=1.35$ 。光刻胶模型参数  $a=30$ ,阈值  $t=0.3$ 。图 11(c)为在初始光源和掩模图形条件下所成的空间像,图 11(d)为对应的光刻胶像,优化前的 PE 值为 1191。设定迭代截止次数为 5000。

为对应空间像及光刻胶像。迭代 5000 次优化后 PE 值下降到 341,降低了 70%。图 11(d)和图 11(h)的比较说明提出的 SMO 方法密集线图形也是有效的,输出的光刻胶像的图像保真度及对比度都有了很大的提升。图 12 为 SMO 方法的收敛性曲线。光源和掩模随机扰动值分别为 0.025 和 0.01。

采用迭代步长  $\gamma=0.1$  进行优化。图 11(e), (f) 分别为优化后的光源形状与掩模图形。图 11(g), (h)



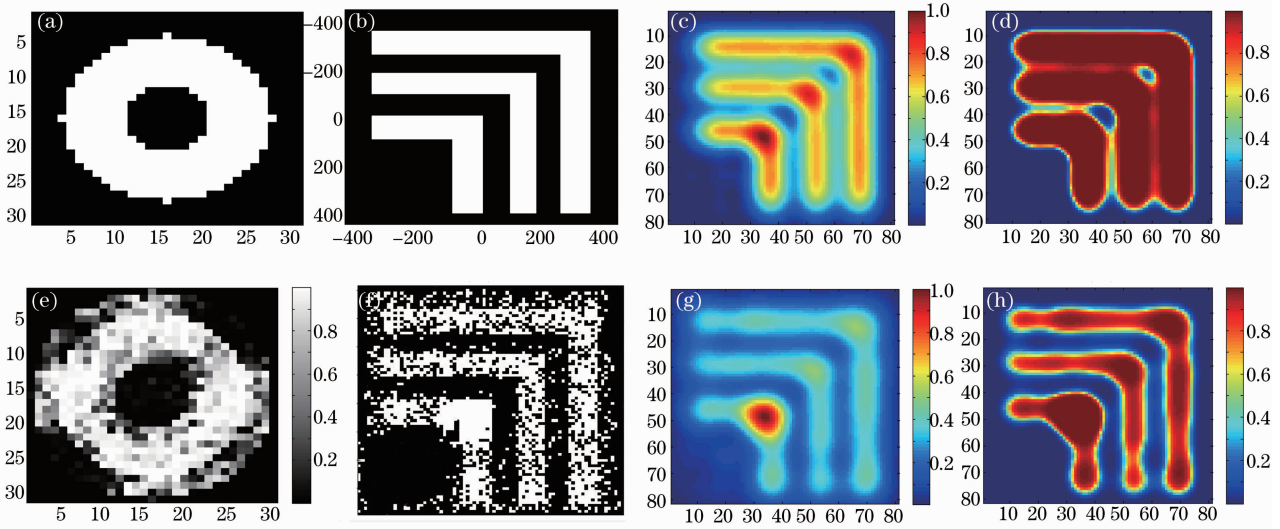


图 11 (a)初始光源；(b)密集线图形掩模；(c)初始空间像；(d)初始光刻胶像；(e)优化后光源；(f)优化后掩模；  
(g)优化后空间像；(h)优化后光刻胶像

Fig. 11 (a) Initial source; (b) initial mask; L dense lines; (c) initial aerial image; (d) initial resist image; (e) optimized source; (f) optimized mask; (g) optimized aerial image; (h) initial resist image

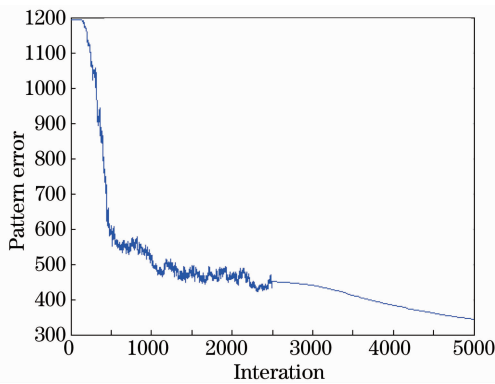


图 12 初始光源为环形照明,初始掩膜为密集线时  
SMO 算法收敛性

Fig. 12 Convergence of the SMO algorithm when initial source is annular, initial mask is dense line

## 5 结 论

提出了一种基于随机并行梯度速降算法的 SMO 方法,避免了求解梯度的解析表达式,降低了光源与掩模联合优化过程的复杂程度。采用接触孔阵列、十字线和 L 形密集线三种典型的掩模图形验证了所提方法的有效性,仿真结果表明使用提出的光源与掩模联合优化技术,三者的图形误差分别降低了 75%、80% 和 70%,有效提高了光刻系统的分辨率。所提方法适用于高维数控制变量、复杂光刻成像模型系统中的光源与掩模优化。

## 参 考 文 献

- 1 A Erdmann, R Farkas, T Fühner, *et al.*. Mask and source optimization for lithographic imaging systems [C]. SPIE, 2003, 5182: 88–102.
- 2 F M Schellenberg. Resolution enhancement technology: the past, the present, and extensions for the future, optical microlithography [C]. SPIE, 2004, 5377: 1–20.
- 3 S Nagahara, K Yoshimochi, H Yamazaki, *et al.*. SMO for 28-nm logic device and beyond: impact of source and mask complexity on lithography performance [C]. SPIE, 2010, 7640: 76401H.
- 4 M Rothschild. A roadmap for optical lithography [J]. Opt Photon News, 2010, 21(6): 26–31.
- 5 K Yoshimochi, S Nagahara, K Takeda, *et al.*. Challenges for low-k1 lithography in logic devices by source mask co-optimization [C]. SPIE, 2010, 7640: 76401K.
- 6 T Matsuda, S Irie, T Shimizu, *et al.*. Mask enhancer technology with source mask optimization (SMO) for 2Xnm-node logic layout gate fabrication [C]. SPIE, 2011, 7973: 797316.
- 7 J C Yu, P C Yu. Gradient-based fast source mask optimization (SMO) [C]. SPIE, 2011, 7973: 797320.
- 8 A E Rosenbluth, S Bukofsky, C Fonseca, *et al.*. Optimum mask and source patterns to print a given shape [J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2002, 1(1): 13–30.
- 9 X Ma, G R Arce. Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography [J]. Opt Express, 2009, 17(7): 5783–5793.
- 10 S K Li, X Z Wang, Y Bu. Robust pixel-based source and mask optimization for inverse lithography [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 285–293.
- 11 A Erdmann, T Fühner, T Schnattinger, *et al.*. Towards automatic mask and source optimization for optical lithography [C]. SPIE, 2004, 5377: 646–657.
- 12 C X Yang, X Z Wang, S K Li, *et al.*. Source mask optimization using real-coded genetic algorithms [C]. SPIE, 2013, 8683: 86831T.
- 13 V Tolani, P Hu, D Peng, *et al.*. Source mask co-optimization

- (SMO) using level set methods [C]. SPIE, 2009, 7488: 74880Y.
- 14 S J Chang, C Chen. Abbe-PCA-SMO: microlithography source and mask optimization based on Abbe-PCA [C]. SPIE, 2009, 7520: 75202G.
- 15 J H Chang, C C Chen. Abbe-PCA-SMO: microlithography source and mask optimization based on Abbe-PCA [C]. SPIE, 2009, 7640: 764026.
- 16 Y Peng, J Zhang, Y Wang, *et al.*. Gradient-based source and mask optimization in optical lithography [J]. IEEE Trans Image Process, 2011, 20(10): 2856–2864.
- 17 N N Jia, E Y Lam. Pixelated source mask optimization for process robustness in optical lithography [J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19384–19398.
- 18 J C Yu, P C Yu, H Yung Chao. Source optimization incorporating margin image average with conjugate gradient method [C]. SPIE, 2012, 8326: 83261W.
- 19 A K Wong. Optical Imaging in Projection Microlithography [M]. Bellingha: SPIE Press, 2005.
- 20 C Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: the Science of Micro-Fabrication [M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2007.
- 21 M A Vorontsov, V P Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. Opt Soc Am A, 1998, 15: 2745–2758.
- 22 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1355–1360.
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1355–1360.
- 23 J C Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. IEEE Trans Automat Contr, 1992, 37(3): 332–341.

栏目编辑: 韩 峰