

基于二次规划的光刻机光源优化方法

闫观勇^{1,2} 李思坤¹ 王向朝^{1,2}

(¹ 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)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种基于二次规划的光刻机光源优化方法。采用空间像与目标像的图形误差为目标函数, 根据空间像强度与不同位置的点光源之间的线性关系, 将光源优化转换成二次规划问题。将掩模图形区域分成限制区域和比较区域, 对限制区域应用约束条件, 对比较区域采用目标函数优化。采用一维孤立空图形和二维接触孔阵列图形对该方法进行验证, 分析光刻胶阈值和离焦量对优化结果的影响。仿真表明, 提出的光源优化方法获得了光源的全局最优解, 提高了光刻成像质量, 增大了工艺窗口。

关键词 光学设计; 光刻; 分辨率增强; 光源掩模优化; 光源优化; 二次规划; 全局最优解

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1022004

Source Optimization Method of Lithography Tools Based on Quadratic Programming

Yan Guanyong^{1,2} Li Sikun¹ Wang Xiangzhao^{1,2}

(¹ *Laboratory of Information Optics and Opt-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In this paper, we propose a source optimization method of lithography tools based on quadratic programming. The fidelity of the aerial image to the mask object pattern is designed as the object function. Then by using the linear relationship between the aerial image and point sources, the source optimization is transformed to a quadratic programming problem. The mask object pattern is divided into a limitation area and a comparison area. The constraint condition is applied in the limitation area and the object function is applied in the comparison area. The one-dimensional (1D) isolated space and two-dimensional (2D) contact hole array patterns are used to validate our method. The impacts of the threshold and focus on the optimization results are studied. According to the simulation results, the global optimization source is obtained by using the proposed method. The image quality is improved and the process window is increased after the source optimization.

Key words optical design; lithography; resolution enhancement; source mask optimization; source optimization; quadratic programming; global convergence

OCIS codes 220.3740; 110.2945; 110.1758

1 引 言

光刻机光源掩模优化(SMO)是 32 nm 及以下技术节点的关键技术^[1]。SMO 的核心技术包括光刻成像模型、优化方法等。对于光刻成像模型,早期

的 SMO 主要使用标量的阿贝方法,透射交叉系数(TCC),以及阿贝主成分分析(PCA)等方法^[2-3]。目前,SMO 中的光刻成像逐步发展到矢量模型^[4-5],并考虑厚掩模的严格电磁场仿真^[6]。为提

收稿日期: 2014-04-22; **收到修改稿日期:** 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61275207,61205102)

作者简介: 闫观勇(1985—),男,博士研究生,主要从事波像差检测技术和光源掩模优化技术方面的研究。

E-mail: ygy9911@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(通信联系人)

高严格电磁场仿真速度,发展了严格电磁场仿真的近似模型^[7]。用于 SMO 的优化方法,主要有梯度法^[8]、共轭梯度法^[9]、水平集法^[10]、增广拉格朗日法^[11]等;优化目标主要包括图形误差、掩模误差增强因子(MEEF)、工艺窗口以及共同工艺窗口等^[8-12]。为了获得全局收敛性,发展出一系列全局优化算法^[13]。为了增加 SMO 的稳健性,研究了像差等参数对 SMO 的影响^[14]。光源优化(SO)是 SMO 中的一个重要部分,目前高端光刻机照明系统中的自由照明也为光源优化提供了条件^[15-19]。相对于 SMO,SO 不需要重新制造掩模,具有成本低,速度快,容易实现等优点,充分发掘了现有光刻机的潜能。光源优化已成为提高光刻成像性能的一个重要方法^[9,20]。

本文提出一种基于二次规划的光刻机光源优化方法。以空间像与目标像的图形误差为目标函数,利用空间像光强与不同位置的点光源的线性关系,将光源优化转换成二次规划问题。通过权重因子将不同焦面的目标函数组成总目标函数。采用典型的一维孤立空图形和二维接触孔阵列图形对本方法进

行验证,研究光刻胶阈值、离焦量等参数对光源优化结果及收敛性的影响。

2 基本原理

2.1 光刻成像模型

图 1 为光刻成像系统示意图^[21]。光源发出的光束均匀照射掩模并发生衍射,衍射光线在投影系统中传播并受到光瞳的限制,最终在像面得到掩模的像。其中,由位于像面的工件台传感器接收到的像是空间像。根据阿贝原理,空间像可以写成不同位置点光源相干照明成像的叠加^[21]:

$$I(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(f, g) I_{\text{coh}}(f, g; x, y, z) df dg, \quad (1)$$

式中 (x, y) 和 (f, g) 分别是像面和瞳面的归一化坐标, f 和 g 的取值范围都是 $-1 \sim 1$, z 表示离焦量, $J(f, g)$ 表示有效光源分布,也是优化的对象, I_{coh} 表示位于坐标 (f, g) 的点光源产生的空间像:

$$I_{\text{coh}}(f, g; x, y, z) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O(f', g') H_0(f + f', g + g') \cdot \exp[ikW(f + f', g + g')] \exp(-i2\pi k_z^l z) \cdot \exp[-i2\pi(xf' + yg')] df' dg' \right|^2, \quad (2)$$

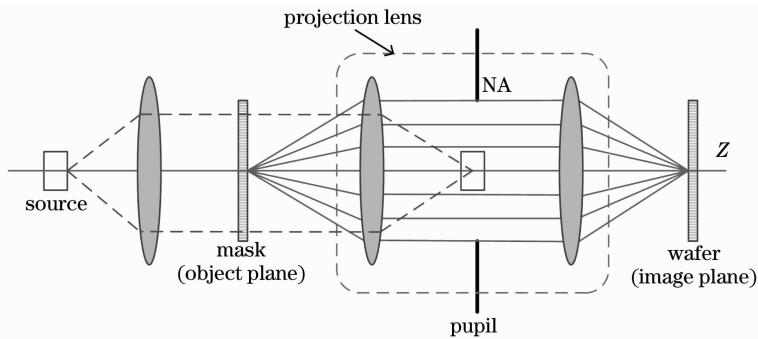


图 1 光刻成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lithography imaging system

式中 O 表示掩模的衍射谱, H_0 表示理想光瞳函数, H_0 在单位圆内为 1, 单位圆外为 0, $k = 2\pi/\lambda$, W 表示波像差, $k_z^l = \sqrt{1 - [(f + f')^2 + (g + g')^2] NA^2} / \lambda$ 表示传播矢量的 z 分量。

SMO 需要对光源离散化。离散化可以按照极坐标的方式进行,也可以按照笛卡尔坐标的方式进行^[12]。在笛卡尔坐标系中对光源离散化,如图 2 所示。单位圆内的点代表需要优化的点光源,每个点

光源的位置都可根据坐标 f 和 g 的值确定。为了计算方便,引入一种新的表示方法:将所有点光源按从左到右,从上到下的顺序逐个排列并编号。通过这种方法将所有点光源构成的数据集由二维矩阵转换成了一维向量。用 s_i 表示第 i 个光源位置的点光源强度, I_{s_i} 表示对应这个点光源的空间像强度,得到用总光源强度归一化的空间像为

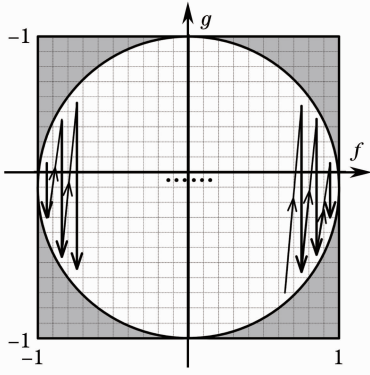


图2 离散点光源及其编号

Fig. 2 Discrete point sources and their numbers

$$I = \sum_{i=1}^M s_i I_{s_i} / \sum_{i=1}^M s_i, \quad (3)$$

式中 M 表示点光源的总数, s_i 的取值范围都在 $0 \sim 1$ 之间:

$$0 \leq s_i \leq 1, \quad (1 \leq i \leq M), \quad (4)$$

为了计算方便,也将离散化的掩模和空间像按照从左到右,从上到下顺序逐个排列并编号,如图3所示。

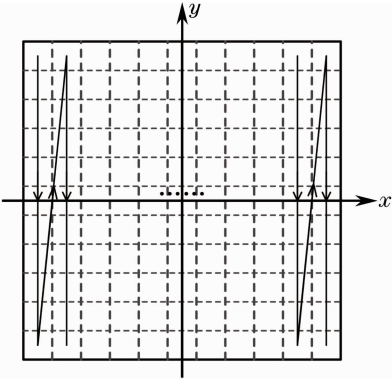


图3 离散化的像点

Fig. 3 Discrete image points

为了保持空间像与点光源的线性关系,引入如下限制条件:

$$\sum_{i=1}^M s_i = 1, \quad (5)$$

此时归一化的空间像满足:

$$I = \sum_{i=1}^M s_i I_{s_i}, \quad (6)$$

上面描述的都是空间像,SMO中还经常用到光刻胶像。光刻胶像是在硅片面上的光刻胶中成的像。光刻胶像与空间像的转换是一个复杂的非线性过程,该过程通常采用阈值模型、乙状函数模型等表示^[2]。与乙状函数模型相比,阈值模型得到的光刻胶像中只有0和1。采用阈值模型,光刻胶像 $I_R(x, y)$ 与空间像 $I(x, y)$ 的关系为

$$I_R(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq t \\ 0, & I(x, y) < t \end{cases}, \quad (7)$$

式中 t 表示光刻胶阈值。

2.2 优化方法

空间像的图形误差定义为空间像与目标像每一点强度的差异的平方和:

$$F = \|I - I_t\|_2 = \sum_{n=1}^N \left(\sum_{i=1}^M s_i I_{s_i}^n - I_t^n \right)^2, \quad (8)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ 表示矩阵的2范数, I 表示空间像, I_t 表示目标像。 $I_{s_i}^n$ 和 I_t^n 分别表示 I_{s_i} 和 I_t 中的第 n 个点, N 是空间像的总点数。引入如下的矢量和矩阵:

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T, \quad \mathbf{I}^{V_n} = [I_{s_1}^n, I_{s_2}^n, \dots, I_{s_M}^n]^T,$$

$$\mathbf{I}_t = [I_t^1, I_t^2, \dots, I_t^N]^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} I_{s_1}^1 & I_{s_1}^2 & \dots & I_{s_1}^N \\ I_{s_2}^1 & I_{s_2}^2 & \dots & I_{s_2}^N \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{s_M}^1 & I_{s_M}^2 & \dots & I_{s_M}^N \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中向量 \mathbf{s} 就是待优化的光源。将(9)式和(10)式代入(8)式中,可以将目标函数写成如下形式:

$$F = \mathbf{s}^T \left[\sum_{n=1}^N \mathbf{I}^{V_n} (\mathbf{I}^{V_n})^T \right] \mathbf{s} - \left[2 \sum_{n=1}^N I_t^n (\mathbf{I}^{V_n})^T \right] \mathbf{s} + \sum_{n=1}^N (I_t^n)^2 = \mathbf{s}^T (\mathbf{T} \cdot \mathbf{T}^T) \mathbf{s} - 2 (\mathbf{T} \cdot \mathbf{I}_t)^T \mathbf{s} + (\mathbf{I}_t)^T \cdot \mathbf{I}_t = \mathbf{s}^T \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{s} + \mathbf{Q}, \quad (11)$$

(11)式符合二次规划问题的形式,因而可以采用二次规划的方法优化光源。而且,由于矩阵 \mathbf{H} 是正定的,上述二次规划得到的光源优化结果是全局最优解^[22]。相对于梯度法,这是该方法的一个突出优点,而与能得到全局最优解的基因算法等启发式优化算法相比,该方法又具有形式简单、容易实现等优点。

为了降低计算量,将空间像图形区域和掩模图

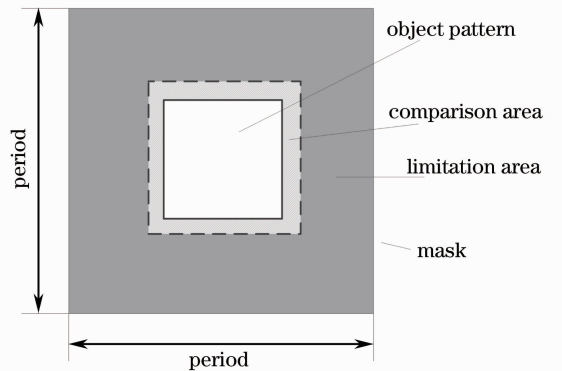


图4 限制区域和比较区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the limitation area and comparison area

形区域都分成限制区域和比较区域两部分。以掩模图形区域为例,如图4所示。其中,比较区域是包围目标像的区域,其边界比目标像范围略大或者相等;限制区域是掩模图形区域内除去比较区域之外的部分。空间像的限制区域和比较区域与掩模对应的区域一致。设定限制区域内的空间像小于光刻胶阈值,并且仅对比较区域应用目标函数。这样抑制了光刻胶像中目标像之外的图形的产生,减少了比较的点数,进一步提高了优化的速度。将矩阵 \mathbf{T} 分成对应比较区域的矩阵 \mathbf{T}_{in} 和对应限制区域的矩阵 \mathbf{T}_{out} 。根据(11)式,比较区域对应的目标函数为

$$\mathbf{F} = \mathbf{s}^T [\mathbf{T}_{in} \cdot (\mathbf{T}_{in})^T] \mathbf{s} - 2(\mathbf{T}_{in} \cdot \mathbf{I}_{in}^T)^T \mathbf{s} + (\mathbf{I}_{in}^T)^T \cdot \mathbf{I}_{in}^T = \mathbf{s}^T \mathbf{H}_{in} \cdot \mathbf{s} - (\mathbf{P}_{in})^T \mathbf{s} + \mathbf{Q}_{in}, \quad (12)$$

(12)式所示的目标函数既适用于最佳焦面,又适用于离焦面。为了增加工艺窗口,对不同焦面的空间像应用上述目标函数,然后使用权重因子将不同焦面的目标函数组合得到一个总目标函数:

$$\mathbf{F} = \sum_{k=1}^K \omega_k F_k = \mathbf{s}^T \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mathbf{H}_{in}^k \right) \mathbf{s} - \left[\sum_{k=1}^K \omega_k (\mathbf{P}_{in}^k)^T \right] \mathbf{s} + K\mathbf{Q}_{in}, \quad (13)$$

式中 F_k 表示第 k 个焦面对应的目标函数, ω_k 表示对应的权重因子, K 表示焦面的总数。为了保证收敛

性,通常仅选取最佳焦面($z = 0$)和两个离焦量相同,正负相反的离焦面进行优化。不同焦面上都使用相同的限制区域和比较区域。

综上所述,将光刻机光源优化转换成的二次规划问题的形式如下所示:

$$\begin{cases} \min: \mathbf{F} = \mathbf{s}^T \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mathbf{H}_{in}^k \right) \mathbf{s} - \left[\sum_{k=1}^K \omega_k (\mathbf{P}_{in}^k)^T \right] \mathbf{s} \\ \text{s. t. : } \sum_{i=1}^M s_i = 1 \quad \mathbf{T}_{out} \cdot \mathbf{s} < t, \quad 1 \leq k \leq K \\ 0 \leq s_i \leq 1, \quad 1 \leq i \leq M \end{cases}, \quad (14)$$

(14)式的目标函数中去掉了仅与目标像有关的常数项 $K\mathbf{Q}_{in}$, s. t. 表示约束条件。由于每个矩阵 \mathbf{H}_{in}^k 都是正定的,每个权重因子 ω_k 都是非负的,根据二次规划的性质可知,上述二次规划问题可以得到光源的全局最优解。

3 仿真分析

3.1 一维孤立空图形

采用一维孤立空图形对提出的光源优化方法进行仿真验证。其中,光刻机工作波长 $\lambda = 193 \text{ nm}$,

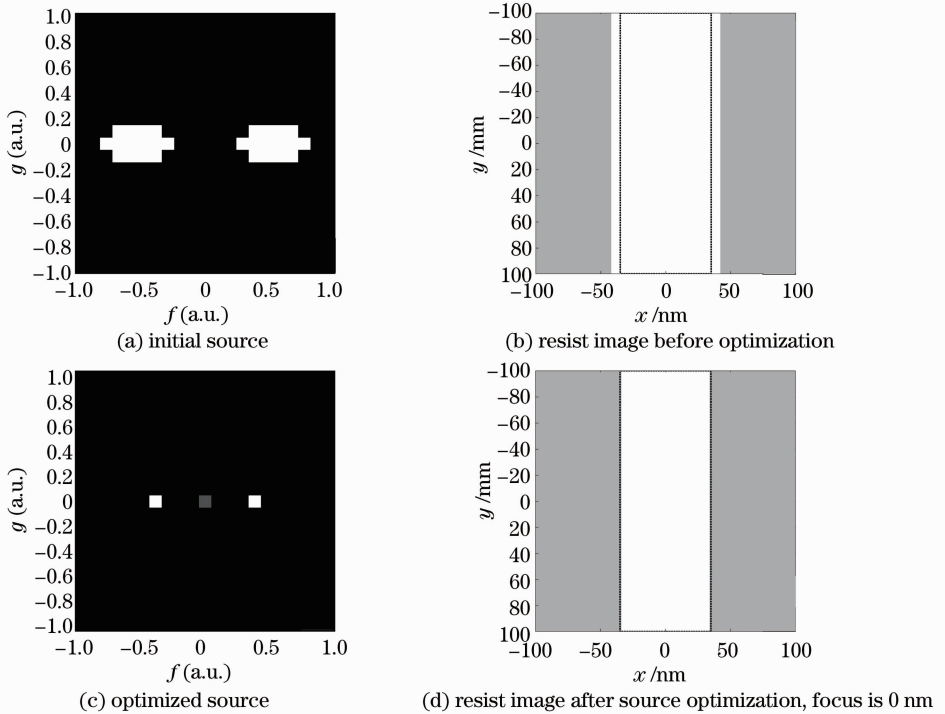


图5 优化前后的光源和光刻胶像

Fig. 5 Sources and resist images before and after optimization

数值孔径 NA 为 0.93。在笛卡尔坐标系中对光源离散化,光源离散点数为 21×21 。掩模和空间像的离散间隔为 4 nm。按照上文描述的方法对离散的光源、掩模、空间像编号,采用光刻仿真软件 PROLITH^[23] 或者 Dr. LiTHO^[24] 得到每个离散的点光源对应的空间像,从而得到矩阵 \mathbf{T} 。将限制区域的边界设定为目标像的边界,根据矩阵 \mathbf{T} 得到 \mathbf{T}_{in} 和 \mathbf{T}_{out} 。光刻胶阈值设置为 $t = 0.3$ 。掩模为宽 70 nm,周期 200 nm 的一维孤立空图形。对光源优化,采用 Matlab 软件的 quadprog 函数求解凸二次规划问题。优化前采用 $\sigma_{out} = 0.8, \sigma_{in} = 0.3$ 的二极照明,优化前的照明和光刻胶像如图 5(a) 和 (b) 所示,优化后的光源和对应的光刻胶像如图 5(c) 和 (d) 所示。

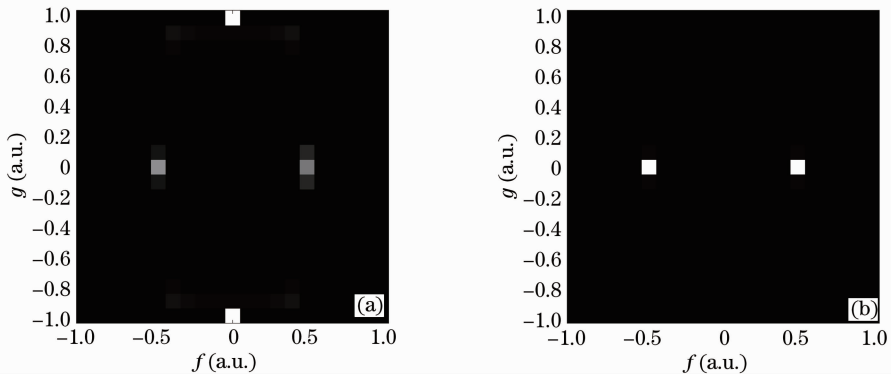


图 6 采用不同权重因子优化后的光源。(a) $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$; (b) $\omega_1 = 0.8, \omega_2 = 1, \omega_3 = 0.8$

Fig. 6 Optimized sources using different weighting factors. (a) $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$; (b) $\omega_1 = 0.8, \omega_2 = 1, \omega_3 = 0.8$

由图 6 可知,权重因子不同时,光源优化结果会有较大的差异。因而,权重因子要根据工艺的要求而调整。

权重因子设置为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$,三个焦面设置为 $Z = (-300 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 300 \text{ nm})$, $Z = (-400 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 400 \text{ nm})$, $Z = (-500 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 500 \text{ nm})$, $Z = (-600 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 600 \text{ nm})$ 时,与上述焦面设置相对应的光源优化结果如图 7(a)~(d) 所示。由图可知,权重因子相同时,选取的焦面位置不同,光源优化结果也会有差异。因而,要针对实际中对光刻工艺窗口的要求,选择合适的焦面。

3.2 二维接触孔阵列图形

采用二维接触孔阵列图形对提出的光源优化方法进行进一步仿真验证。其中,掩模 x 和 y 方向的周期都是 600 nm,目标像是一组大小为 $70 \text{ nm} \times 70 \text{ nm}$ 的方孔,光刻胶阈值设置为 $t = 0.15$,其他条件不变。用光刻仿真软件得到矩阵 \mathbf{T} ,进而得到矩阵 \mathbf{T}_{in} 和矩阵 \mathbf{T}_{out} 。优化前采用 $\sigma_{out} = 0.8, \sigma_{in} = 0.5$

图 5(b) 和 (d) 中的灰色部分表示未曝光的光刻胶,白色部分表示光刻胶像,黑色虚线框表示目标像的边界。图 5(b) 和 (d) 的结果表明:光源优化前,光刻胶像与目标像的 CD 偏差为 18 nm;光源优化后,光刻胶像与目标像的 CD 偏差为 0 nm。可见提出的光源优化方法提高了成像的图形质量。而且本文采用的二次规划方法得到的是光源的全局最优解,避免了初始值对优化过程的影响。

在三个焦面上应用目标函数,使用权重因子将三个焦面的目标函数构成一个总目标函数。三个焦面位置分别为 $-200 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 200 \text{ nm}$ 。权重因子为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$,和权重因子为 $\omega_1 = 0.8, \omega_2 = 1, \omega_3 = 0.8$ 时的优化光源分别如图 6(a) 和 (b) 所示。

的四极照明。优化前的光源和对应的光刻胶像如图 8(a) 和 (b) 所示,优化后的光源和对应的光刻胶像如图 8(c) 和 (d) 所示。

图 8(b) 和 (d) 表明:光源优化前,光刻胶像的中心位置和形状与目标像差异都很大;光源优化后,光刻胶像的中心位置与目标像的中心位置重合,光刻胶像的形状与目标像的形状差异也很小。上述结果表明,所提出的光源优化方法提高了二维接触孔阵列图形成像的质量。

进一步研究了采用上述二维接触孔阵列图形时,焦面位置对光源优化结果的影响。焦面位置设置为 $Z = (-100 \text{ nm}, 0 \text{ nm}, 100 \text{ nm})$,权重因子为 $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 1, \omega_3 = 0.5$ 。优化后的光源和对应的三个焦面的光刻胶像如图 9 所示。图 9 所示的优化光源结果,不同于仅采用焦面目标函数得到的图 8(c) 中的优化光源结果。因而,实际优化中的焦面和权重因子也都需要根据工艺的要求调整。

由于是凸二次规划,最终优化结果不受初始值

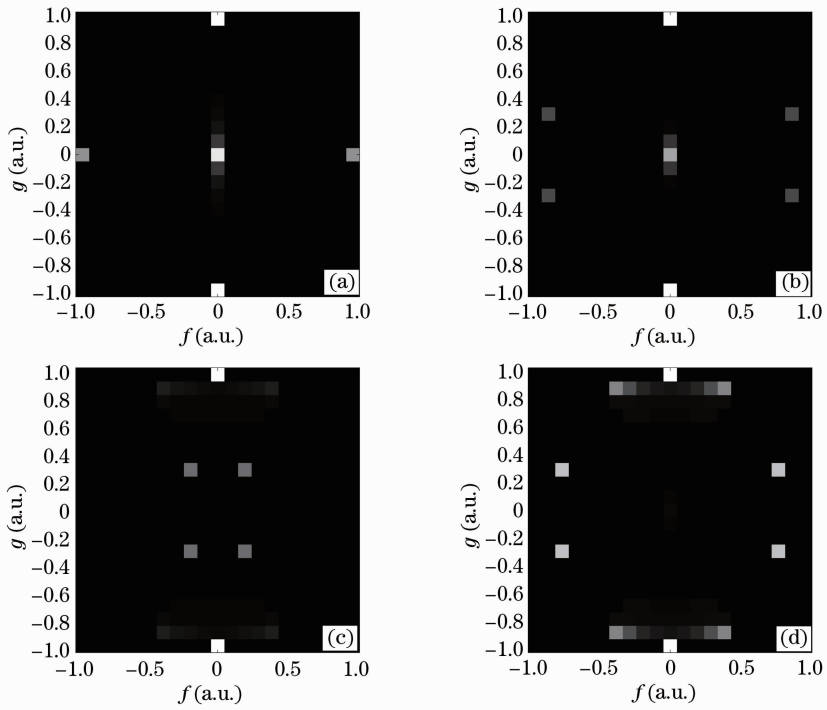


图 7 采用不同焦面设置进行优化后的光源。(a) (-300 nm, 0 nm, 300 nm); (b) (-400 nm, 0 nm, 400 nm);
(c) (-500 nm, 0 nm, 500 nm); (d) (-600 nm, 0 nm, 600 nm)

Fig. 7 Optimized sources using different focus planes. (a) (-300 nm, 0 nm, 300 nm); (b) (-400 nm, 0 nm, 400 nm);
(c) (-500 nm, 0 nm, 500 nm); (d) (-600 nm, 0 nm, 600 nm)

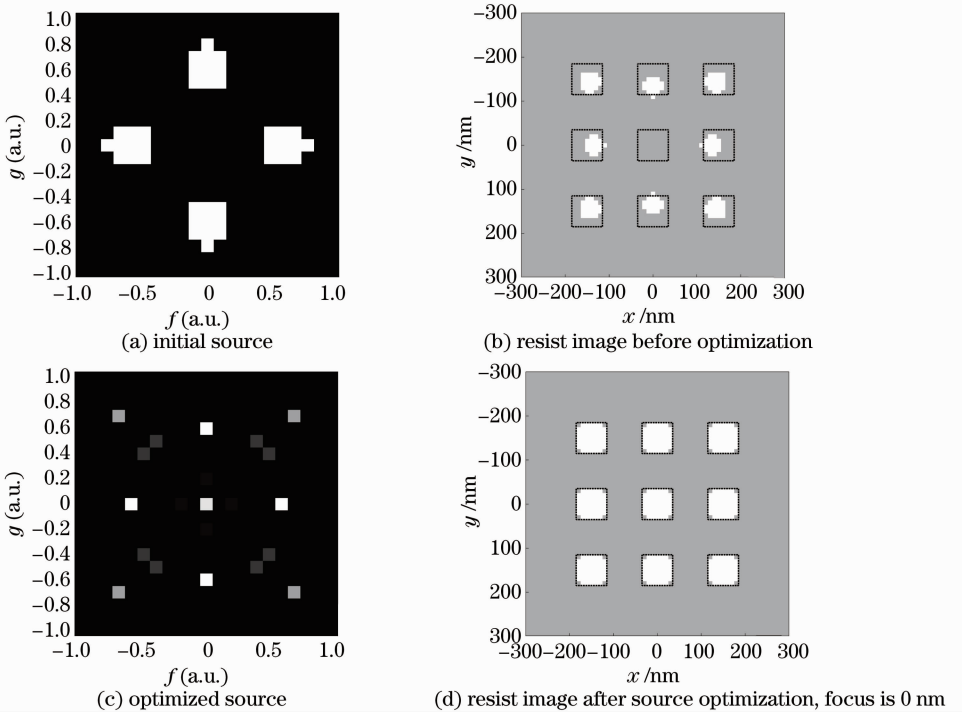


图 8 优化前后的光源和光刻胶像结果

Fig. 8 Sources and resist images before and after optimization

的影响。而收敛速度受离散的点光源数目、掩模周期、掩模形状等因素的影响。掩模分别为图 5 中的一维图形和图 8 中的二维图形时,光源优化收敛性

曲线分别与图 10(a)和(b)对应。由图可知,目标函数数值在前几次迭代中的下降速度很快,而后下降速度变慢。当目标函数值的变化量小于 10^{-8} 时,迭代

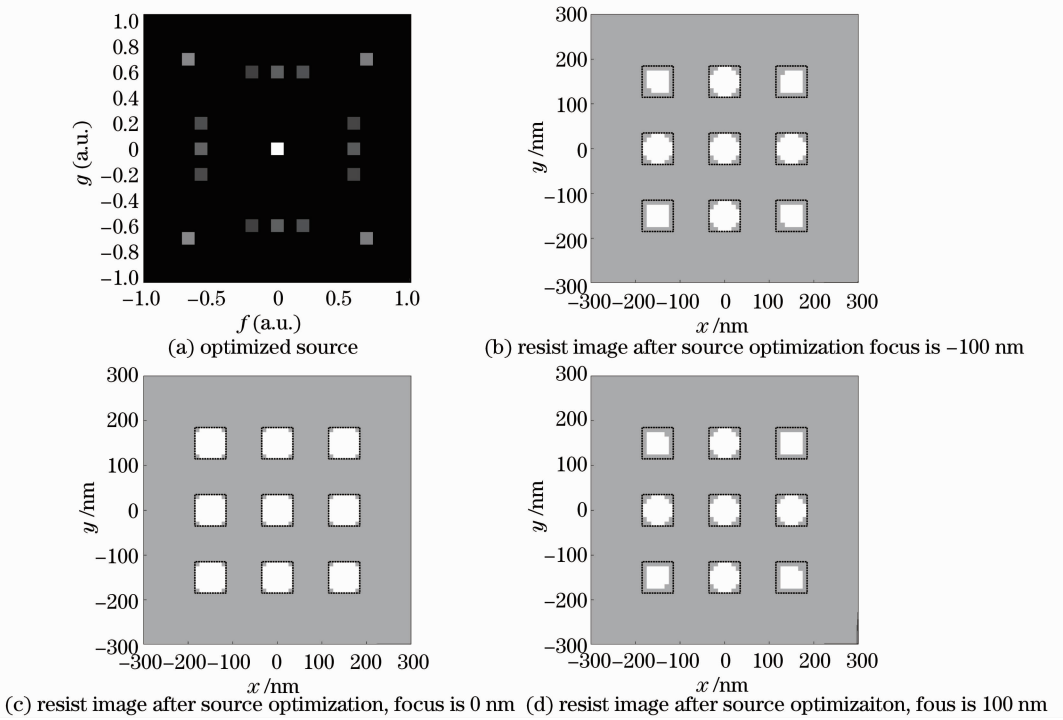


图 9 优化后的光源和不同离焦置的光刻胶像

Fig. 9 Optimized sources and the resist images in different defoci

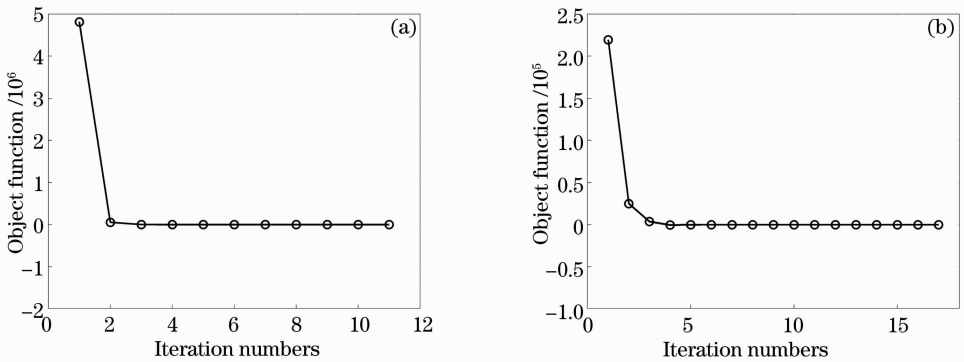


图 10 (a)一维孤立空图形和(b)二维接触孔阵列图形的收敛性曲线

Fig. 10 Convergence curves for (a) 1D pattern and (b) 2D contact hole pattern

过程停止。总迭代次数分别为 11 次和 17 次,在主频为 2.4 GHz,内存为 4 G 的电脑上优化用时分别为 6.7 s 和 15.2 s。上述结果表明该方法具有较快的收敛速度。

4 结 论

以空间像与目标像的图形误差为目标函数,根据空间像与不同位置点光源的线性关系,将光源优化转换为二次规划问题。将掩模图形区域划分为限制区域和比较区域两部分。通过使限制区域的空间像强度小于阈值,并且仅对比较区域采用目标函数优化的方法,避免了光刻胶像中产生目标像外的多余图形,减少了目标函数的计算量,提高了运算速

度。将不同焦面的目标函数通过权重因子组合成总目标函数,使该方法可用于离焦量优化。采用典型的一维孤立空图形和二维接触孔阵列图形对其进行了验证,并分析了光刻胶阈值、离焦量对优化结果的影响。仿真结果表明,提出的光源优化方法,得到了光源的全局最优解,降低了光刻胶图形误差,提高了光刻成像质量,增大了光刻工艺窗口,而且具有较快的收敛速度。虽然采用了标量成像模型,然而由于空间像与光源的线性关系对矢量模型也适用,该方法能方便地扩展到矢量模型。

参 考 文 献

1 David Melville, Alan E Rosenbluth, Kehan Tian, et al..

- Demonstrating the benefits of source-mask optimization and enabling technologies through experiment and simulations [C]. SPIE, 2010, 7640: 764006.
- 2 Jue-Chin Yu, Peichen Yu. Gradient-based fast source mask optimization (SMO) [C]. SPIE, 2011, 7973: 797320.
- 3 Charlie Chung Ping Chen, Ahmet Gurhanli, Tse-Yu Chiang, *et al.*. Abbe singular-value decomposition: compact Abbe's kernel generation for microlithography aerial image simulation using singular-value decomposition method [J]. J Vacuum Science & Technology B, 2008, 26(6): 2322–2330.
- 4 Xu Ma, Yanqiu Li, Xuejia Guo, *et al.*. Robust resolution enhancement optimization methods to process variations based on vector imaging model [C]. SPIE, 2012, 8326: 83262A.
- 5 Dong Lisong, Li Yanqiu, Guo Xuejia. Influence of the axial component of mask diffraction spectrum on lithography imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1111002.
董立松, 李艳秋, 郭学佳. 掩模衍射频谱轴向分量对光刻成像性能的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1111002.
- 6 Andreas Erdmann, Peter Evanschitzky, Peter De Bisschop. Mask and wafer topography effects in immersion lithography [C]. SPIE, 2005, 5754: 383–394.
- 7 Peng Liu, Yu Cao, Luoqi Chen, *et al.*. Fast and accurate 3D mask model for full-chip OPC and verification [C]. SPIE, 2007, 6520: 65200R.
- 8 Jue-Chin Yu, Peichen Yu. Fast converging inverse lithography algorithm incorporating image gradient descent methods [C]. SPIE, 2009, 7520: 75200V.
- 9 Jue-Chin Yu, Peichen Yu, Hsueh-Yung Chao. Source optimization incorporating margin image average with conjugate gradient method [C]. SPIE, 2012, 8326: 83261W.
- 10 Linyong Pang, Guangming Xiao, Vikram Tolani, *et al.*. Considering MEEF in inverse lithography technology (ILT) and source mask optimization (SMO) [C]. SPIE, 2008, 7122: 71221W.
- 11 Jia Li, Shiyuan Liu, Edmund Y Lam. Efficient source and mask optimization with augmented Lagrangian methods in optical lithography [J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8076–8090.
- 12 Tim Fühner, Andreas Erdmann, Sebastian Seifert. Direct optimization approach for lithographic process conditions [J]. J Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2007, 6(3): 031006.
- 13 Chaoxing Yang, Xiangzhao Wang, Sikun Li, *et al.*. Source mask optimization using real-coded genetic algorithms [C]. SPIE, 2013, 8683: 86831T.
- 14 Sikun Li, Xiangzhao Wang, Yang Bu. Robust pixel-based source and mask optimization for inverse lithography [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 45: 285–293.
- 15 Gregory McIntyre, Daniel Corliss, Remco Groenendijk, *et al.*. Qualification, monitoring, and integration into a production environment of the world's first fully programmable illuminator [C]. SPIE, 2011, 7973: 797306.
- 16 Noriyuki Hirayanagi, Yasushi Mizuno, Masakazu Mori, *et al.*. Illumination pupilgram control using an intelligent illuminator [C]. SPIE, 2013, 8683: 86830D.
- 17 Xiao Yanfen, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.*. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0216001.
肖艳芬, 朱菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
- 18 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 19 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111101.
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 高分辨率投影光刻机光瞳整形技术[C]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111101.
- 20 Ryota Matsui, Tomoya Noda, Hajime Aoyama, *et al.*. Global source optimization for MEEF and OPE [C]. SPIE, 2013, 8683: 86830O.
- 21 A K Wong. Optical Imaging in Projection Microlithography [M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- 22 Ni Qin. Optimization Method and Program Design [M]. Beijing: Science Press, 2009.
倪勤. 最优化方法与程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 23 C A Mack. Lithography simulation in semiconductor manufacturing [C]. SPIE, 2005, 5645: 63–83.
- 24 T Fühner, T Schnattinger, G Ardelean, *et al.*. Dr. LiTHO-a development and research lithography simulator [C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.

栏目编辑: 韩峰