

# 基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法

杨朝兴<sup>1,2</sup> 李思坤<sup>1,2</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** 提出了一种基于多染色体遗传算法(GA)的像素化光源掩模优化(SMO)方法。该方法使用多染色体遗传算法,实现了像素化光源和像素化掩模的联合优化。与采用矩形掩模优化的单染色体 GASMO 方法相比,多染色体 GASMO 方法具有更高的优化自由度,可以获得更优的光刻成像质量和更快的优化收敛速度。典型逻辑图形的仿真实验表明,多染色体方法得到的最优光源和最优掩模的适应度值比单染色体方法小 7.6%,提高了光刻成像质量。仿真实验还表明,多染色体方法仅需 132 代进化即可得到适应度值为 5200 的最优解,比单染色体方法少 127 代,加快了优化收敛速度。

**关键词** 成像系统; 光学制造; 光刻; 光源掩模优化; 分辨率增强技术; 遗传算法; 多染色体

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0811001

## Pixelated Source Mask Optimization Based on Multi Chromosome Genetic Algorithm

Yang Chaoxing<sup>1,2</sup> Li Sikun<sup>1,2</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 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A pixelated source mask optimization (SMO) method based on multi chromosome genetic algorithm (GA) is introduced. This method uses multi chromosome genetic algorithm to optimize the pixelated source and pixelated mask simultaneously. In comparison with the single chromosome GASMO method that uses rectilinear mask representation, multi chromosome GASMO method can get high imaging quality and fast convergence speed. Simulation results show that the multi chromosome method can get an optimum solution with the fitness value is 7.6%, which is smaller than that of the single chromosome method. The multi chromosome method only needs 132 generations to converge to an optimal result with the fitness value of 5200, 127 generations less than the single chromosome method, and the optimization convergence speed is accelerated.

**Key words** imaging systems; optical fabrication; optical lithography; source mask optimization; resolution enhancement technology; genetic algorithm; multi chromosome

**OCIS codes** 110.5220; 110.3960; 220.3740

## 1 引 言

光刻是超大规模集成电路制造的关键技术之一<sup>[1]</sup>。光刻分辨率决定集成电路图形的特征尺寸,影响集成电路的性能<sup>[2]</sup>。光源掩模优化方法(SMO)同时优化光源照明模式和掩模图形。与传统分辨率增强技术如光学临近修正技术(OPC)相比,SMO 具有更大的优化自由度,是进一步提高光刻的分辨率和工艺窗口的

**收稿日期:** 2016-02-02; **收到修改稿日期:** 2016-03-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275207,61205102, 61405210,61474129)

**作者简介:** 杨朝兴(1986—),男,博士研究生,主要从事高端光刻机分辨率增强技术方面的研究。

E-mail: yangcoloy@siom.ac.cn

**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)

关键技术之一。

Fühner 等<sup>[3-5]</sup>提出了一种基于遗传算法(GA)的光源掩模优化方法。该方法不需要掌握光刻的先验知识,可以实现全局寻优和并行运算。遗传算子、编码方式、适应度函数和光源掩模描述方式等是影响该方法的优化质量和收敛速度的主要因素。本课题组的 Yang 等<sup>[6-8]</sup>对基于遗传算法的光源掩模优化方法的编码方式、光源描述方式、适应度函数等进行了改进,提高了方法的优化速度。传统的基于遗传算法的光源掩模优化方法采用单染色体编码,对像素或参数描述的光源与矩形描述的掩模进行优化。该方法优化自由度较低,通常用于简单一维图形或特称尺寸较大(100 nm 左右)的二维图形的光源与掩模优化<sup>[4-8]</sup>。基于梯度优化算法的光源掩模优化方法中采用了像素化的光源掩模优化方法<sup>[9-11]</sup>,对像素化光源和像素化掩模进行联合优化,具有更高的优化自由度,可以获得更小特征尺寸的光刻图形和更大的工艺窗口。

本文提出了一种基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法。该方法使用多染色体遗传算法,实现了像素化光源和像素化掩模的联合优化,在保留遗传算法光源掩模优化的优势的同时,提高了优化自由度。使用典型逻辑图形对本方法进行验证,与采用矩形掩模优化的单染色体方法相比,本文方法可以获得更优的光刻成像质量和更快的收敛速度。

## 2 原 理

### 2.1 光刻成像模型

光刻成像系统如图 1 所示<sup>[12]</sup>。光源发出的光通过聚焦透镜后均匀照射掩模并发生衍射。衍射光经过投影物镜系统,最终在硅片上的光刻胶中得到掩模图形的像。根据 Abbe 成像理论,光刻空间像的成像公式为

$$\hat{I}_{\text{aerial}}(\hat{x}, \hat{y}; z) = \iint \tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) \left\{ \left| \iint \tilde{H}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}'; z) \tilde{O}(\hat{f}', \hat{g}') \exp\{-i2\pi[\hat{f}'\hat{x} + \hat{g}'\hat{y}]\} d\hat{f}' d\hat{g}' \right|^2 \right\} d\hat{f} d\hat{g}, \quad (1)$$

式中  $\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g})$  是有效光源,有效光源  $\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g})$  被离散近似为一组点光源  $(\hat{f}, \hat{g})$ ,大括号内部是点光源  $(\hat{f}, \hat{g})$  照明得到的相干空间像,  $\tilde{O}(\hat{f}', \hat{g}')$  是掩模透射频谱,  $\tilde{H}(\hat{f}, \hat{g}; z)$  是离焦量为  $z$  时投影光学元件的传递函数,即

$$\tilde{H}(\hat{f}, \hat{g}; z) = \tilde{H}_0(\hat{f}, \hat{g}; 0) R(\hat{f}, \hat{g}) \exp[+i2\pi\Phi(\hat{\rho}, \hat{\phi})] \exp(-i2\pi k_z^2 z), \quad (2)$$

式中  $\tilde{H}_0(\hat{f}, \hat{g}; 0)$  是焦面的理想光瞳函数,  $R(\hat{f}, \hat{g})$  是强度修正项,指数项  $\exp[+i2\pi\Phi(\hat{\rho}, \hat{\phi})]$  中的光程差  $\Phi$  是

$$\Phi(\hat{\rho}, \hat{\phi}) = \sum_{j=1}^J c_j Z_j(\hat{\rho}, \hat{\phi}), \quad (3)$$

式中  $Z_j$  和  $c_j$  分别是表征投影物镜波像差的泽尼克多项式和泽尼克多项式系数。

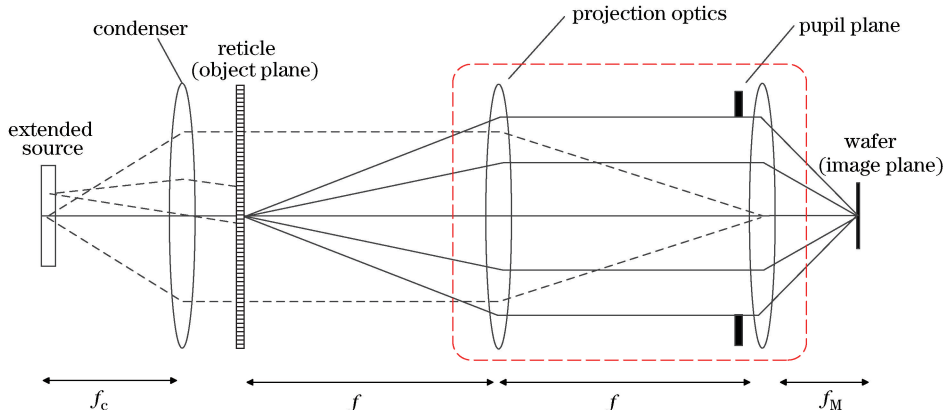


图 1 光刻成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical lithography imaging system

空间像通过曝光、显影、刻蚀等流程最终在光刻胶中形成光刻胶像。采用 Sigmoid 函数描述上述过程，光刻胶像为

$$I_{\text{resist}} = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(I_{\text{aerial}} - t_r)]}, \quad (4)$$

式中  $t_r$  为光刻胶阈值,  $\alpha$  为光刻胶灵敏度。

由于投影物镜光瞳的限制、投影物镜像差、离焦和曝光剂量误差等因素,光刻的空间像或光刻胶像与掩模图形相比总是存在失真的现象。为了获得失真度更小的光刻成像,有必要对光刻像进行评价。常见的评价函数包括对比度、特征尺寸<sup>[13]</sup>、归一化像边缘对数斜率<sup>[14]</sup>、边缘位置误差、边缘强度误差、边缘对比度惩罚<sup>[15]</sup>、工艺窗口<sup>[13]</sup>等。其中图形误差<sup>[16-18]</sup>表示为

$$E_{\text{PE}}(c) = \sum_{x,y} |I_{\text{image}} - I_{\text{target}}|^2, \quad (5)$$

式中  $I_{\text{target}}$  是优化目标成像,  $I_{\text{image}}$  是光刻成像(空间像或光刻胶像),  $c$  是光刻机的工艺条件如离焦量、曝光剂量、像差等。

### 2.2 基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法

基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化流程如图 2 所示。首先初始化种群,随机或者根据经验生成一组初始光源与掩模组合。然后将这些光源和掩模分别编码为光源染色体  $X_{\text{src}}$  和掩模染色体  $X_{\text{msk}}$  作为迭代优化的起点。在遗传算法迭代优化过程中,首先解码遗传个体的染色体,得到光源和掩模图形。然后利用成像函数得到该光源和掩模组合的光刻成像,利用评价函数得到该遗传个体的适应度。然后根据适者生存的原理,采用选择算子筛选出适应度最优的个体,采用交叉算子和变异算子分别得到新的光源染色体  $X_{\text{src\_new}}$  和掩模染色体  $X_{\text{msk\_new}}$ 。重复以上所述的“评价-选择-交叉-变异”循环直到满足停止判据。常用的停止判据有优化停止代数和适应度阈值。基于遗传算法的光源掩模优化方法采用成像函数和评价函数计算个体的适应度,无需计算适应度的梯度或 Hessian 矩阵,因此可以采用更加复杂的成像函数和评价函数。

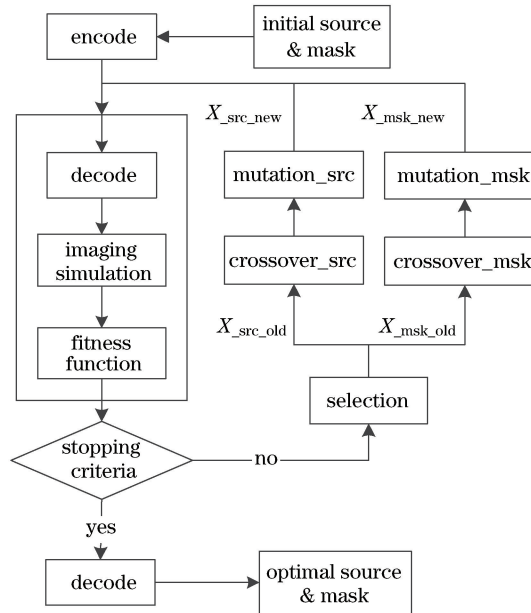


图 2 基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法的流程图

Fig. 2 Flow chart of pixelated source mask optimization method based on multi chromosome genetic algorithm

像素化光源和像素化掩模的编码方式如图 3 所示。其中照明光源被离散化为极坐标网格上的一组点光源<sup>[19]</sup>。为了保证光源对称性,只对第一象限的点光源进行编码,其余象限通过对称操作获得。光源染色体  $X_{\text{src}}$  是一维实数向量

$$\mathbf{X}_{\text{src}} = [g_1 \quad \cdots \quad g_i \quad \cdots \quad g_s], \quad (6)$$

式中  $S$  是原点和第一象限的点光源像素的总数量,  $g_i$  是离散化光源的点光源的强度值。

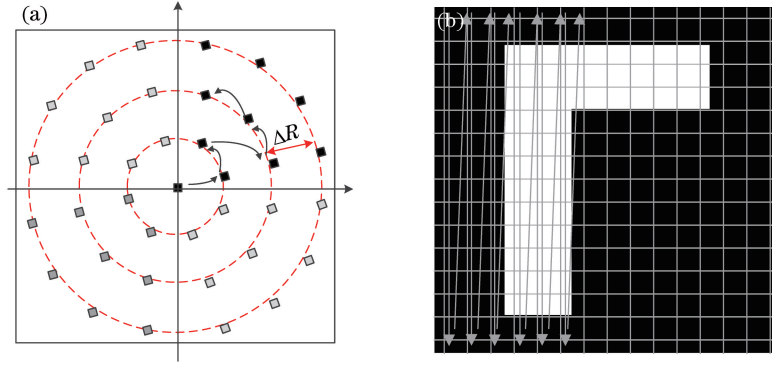


图 3 (a)像素化光源和(b)像素化掩模的编码方式

Fig. 3 Coding scheme of (a) pixelated source and (b) pixelated mask

掩模图形由直角坐标网格上的像素表示。掩模染色体  $\mathbf{X}_{\text{msk}}$  为

$$\mathbf{X}_{\text{msk}} = [m_1 \ \cdots \ m_j \ \cdots \ m_M], \quad (7)$$

式中  $M = N_{\text{row}} \times N_{\text{col}}$  是离散掩模像素的总数量;对于二元掩模或衰减相移掩模,  $m_j = \{0, 1\}$ ,  $\mathbf{X}_{\text{msk}}$  为二进制向量;对于交替相移掩模,  $m_j = \{-1, 0, 1\}$ 。

光源染色体  $\mathbf{X}_{\text{src}}$  是实数向量,二元掩模的掩模染色体  $\mathbf{X}_{\text{msk}}$  是二进制向量。如图 2 所示,在多染色体遗传算法的优化迭代中需要使用相应编码的交叉和变异算子分别更新  $\mathbf{X}_{\text{src}}$  和  $\mathbf{X}_{\text{msk}}$ 。在此采用的二进制编码交叉算子如图 4 所示。

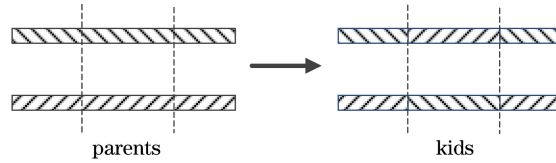


图 4 两点交叉示意图

Fig. 4 Schematic of two-point crossover

采用的实数编码交叉算子为

$$V_{\text{child}} = V_{\text{Parent1}} + V_{\text{rand}} \times V_{\text{Ratio}} \times (V_{\text{Parent2}} - V_{\text{Parent1}}), \quad (8)$$

式中  $V_{\text{Parent}}$  和  $V_{\text{Child}}$  分别是交叉前后的染色体,  $V_{\text{rand}}$  是随机数,  $V_{\text{Ratio}}$  是常数。

变异算子分为两步。首先根据变异率  $V_{\text{mutation\_rate}}$  在染色体向量中随机选取一组变异点,然后改变这些变异点的数值。对于实数编码染色体,使用随机数替代原始数值。对于二进制编码染色体,对变异点二进制数做取反运算得到新数值。

使用的评价函数为

$$y = \omega_1 \tilde{E}_{\text{PE}_R} + \omega_2 \tilde{E}_{\text{PE}_A} + \omega_3 E_{\text{penalty}} + \omega_4 E_{\text{penalty\_DIF}}, \quad (9)$$

式中  $\tilde{E}_{\text{PE}_R}$  和  $\tilde{E}_{\text{PE}_A}$  分别是光刻胶像和空间像的合焦面与离焦面(离焦距离为  $f$ )的平均光刻图形误差,即

$$\tilde{E}_{\text{PE}_R} = \frac{E_{\text{PE}_R}(0) + E_{\text{PE}_R}(f)}{2}, \quad (10)$$

$$\tilde{E}_{\text{PE}_A} = \frac{E_{\text{PE}_A}(0) + E_{\text{PE}_A}(f)}{2}, \quad (11)$$

式中图形误差  $E_{\text{PE}}(f)$  如(5)式所示,  $f = 150 \text{ nm}$ 。  $E_{\text{penalty}}$  和  $E_{\text{penalty\_DIF}}$  是掩模复杂度惩罚因子

$$E_{\text{penalty}} = \sum_{x,y} \left| \frac{\partial^2 I_{\text{target}}}{\partial x \partial y} \right|, \quad (12)$$

$$E_{\text{penalty\_DIF}} = \sum_{x,y} \left| \frac{\partial^2 (I_{\text{target}} - I_{\text{design}})}{\partial x \partial y} \right|, \quad (13)$$

式中  $I_{\text{design}}$  是优化的掩模图形,  $I_{\text{target}}$  是目标图形。

### 3 数值仿真实验

#### 3.1 MCGA SMO 和 SCGAr SMO 的优化性能比对

为了证明基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法(MCGA SMO)与采用矩形掩模优化的单染色体方法(SCGAr SMO)相比,可以获得更优的光刻成像质量和更快的收敛速度,利用典型逻辑电路的掩模图形(图 5)进行了数值仿真实验,对比了 MCGA SMO 和 SCGAr SMO 方法的优化性能。

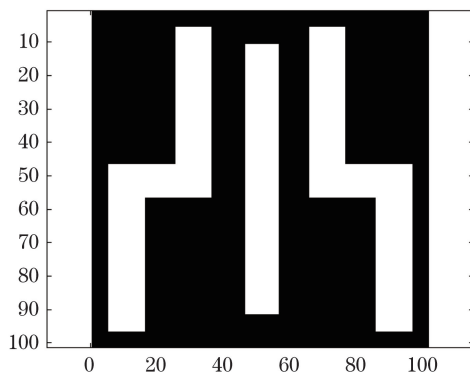


图 5 优化目标图形

Fig. 5 Optimized target pattern

光刻机工作波长  $\lambda = 193 \text{ nm}$ , 数值孔径  $NA = 1.35$ , 折射率为 1.44。光刻胶模型参数  $\alpha = 80$ , 阈值  $t_r = 0.28$ 。掩模特征尺寸为  $50 \text{ nm}$ 。掩模为 6% 衰减相移掩模(attPSM)。掩模图形左右对称, 其中右侧区域的掩模图形由  $M = 51 \times 101 = 5151$  个像素组成。光源图形 XY 对称, 组成光源的离散点光源总数量  $S = 74$ 。SCGAr SMO 的光源编码方式和 MCGA SMO 相同。SCGAr SMO 的掩模编码方式采用矩形掩模描述, 其中掩模右侧区域的图形由 20 个矩形子掩模图形组成<sup>[8]</sup>。

遗传算法的种群规模为 250。初始种群为均匀分布随机数, 即初始光源和掩模为随机生成的照明光源和掩模图形。最小和最大进化代数分别为 300 代和 500 代。当子代的加权适应度减小量小于  $1.0 \times 10^{-12}$  时, 遗传算法停止优化。选择算子是组规模为 4 的锦标赛选择算子。交叉概率为 0.6, 其中实数编码交叉算子如(8)式所示,  $V_{\text{Ratio}} = 0.1$ , 二进制编码的交叉算子为两点交叉。变异算子如 2.2 节所示, 其中实数编码变异率为 0.1, 二进制编码的变异率为 0.01。SCGAr SMO 采用实数编码染色体, 其交叉算子和变异算子与 MCGA SMO 使用的实数编码交叉算子和实数编码变异算子相同。SCGAr SMO 和 MCGA SMO 使用的评价函数如式所示, 其中权重  $w_1 = 1, w_2 = 1, w_3 = 0.01, w_4 = 0.01$ , 离焦量  $f = 150 \text{ nm}$ 。

##### 3.1.1 收敛曲线

使用 MCGA SMO 与 SCGAr SMO 两种方法分别进行了 4 次优化, 其平均收敛曲线如图 6 所示。进化 500 代之后, MCGA SMO 的最小适应度值为 4644.2, SCGAr SMO 的最小适应度值为 5029.4。MCGA SMO 方法得到的最优光源和掩模的适应度值比 SCGAr SMO 方法小 7.6%, 说明 MCGA SMO 的优化光源和掩模的成像质量更好。仿真实验还表明, MCGA SMO 仅需 132 代进化即可得到适应度值为 5200 的解, 而 SCGAr SMO 方法需要进化 259 代, 说明 MCGA SMO 优化速度更快。以上优势主要是因为 MCGA SMO 使用了多染色体遗传算法, 相比 SCGAr SMO 具有更高的优化自由度。MCGA SMO 使用两条染色体分别描述和优化光刻机的照明光源和掩模图形(图 2)。两条染色体之间互不影响。因此 MCGA SMO 可以在使用浮点数编码染色体描述和优化照明光源的同时, 使用二进制编码染色体描述和优化像素化的掩模图形, 从而获得更大的优化自由度。相比之下, SCGAr SMO 只能使用与照明光源相同的浮点数编码染色体描述矩形的掩模图形。此外, MCGA SMO 优化过程中照明光源和掩模图形的更新过程(交叉和变异)是相互独立的, 所以可以根据需要对 MCGA SMO 的光源优化和掩模优化模块分别进行最优化和控制。



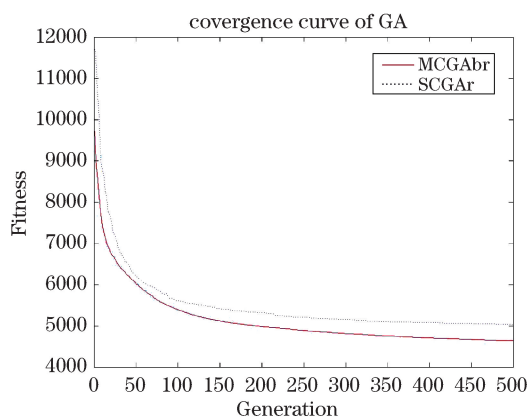


图 6 MCGGA SMO 与 SCGAr SMO 的收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of MCGA SMO and SCGAr SMO

### 3.1.2 优化结果

MCGA SMO 的优化光源和优化掩模如图 7(a)、(b)所示。其中优化光源与二极照明光源的形状相近。这是因为优化目标图形(图 5)在水平方向具有较强的周期性,根据光刻成像原理可知优化光源应当是类二极照明。图 7(a)所示的非圆对称复杂光源形状可以通过基于微反射镜阵列的可编程照明装置得到<sup>[20]</sup>。优化掩模形状与目标图形相近,由大量离散的掩模像素组成。这种像素化的掩模可以用于光刻分辨率增强,但是其制造工艺很复杂,影响实际应用<sup>[21]</sup>。下一步的工作中将会考虑通过引入掩模复杂性约束等方式,在不改变照明光源复杂度的同时降低优化掩模图形的复杂度。优化光源和优化掩模的合焦光刻胶像和离焦光刻胶像(离焦量  $z = 150$  nm),如图 7(c)、(d)所示。

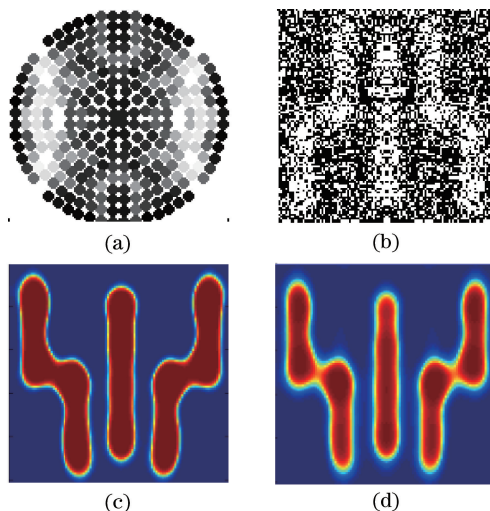


图 7 MCGA SMO 的优化结果。(a)优化光源;(b)优化掩模;(c)合焦面光刻胶像;(d)离焦面光刻胶像

Fig. 7 Optimization results of MCGA SMO. (a) Optimized source; (b) optimized mask;

(c) on-focus resist image; (d) off-focus resist image

### 3.2 不同种群规模下 MCGA SMO 的优化结果

此外还研究了种群规模大小对 MCGA SMO 的影响。当种群规模为 50 时,MCGA SMO 无法得到满足目标图形的优化结果。当种群规模为 150 和 250 时,MCGA SMO 的收敛曲线如图 8 所示。种群规模为 250 的 MCGA SMO 拥有更好的优化成像质量和更快的优化收敛速度。但是这种改进并不明显,而种群规模数量的增加会成倍地增加模拟所需的时间。实际应用时需要权衡优化性能和优化时间的影响,从而设置合适的种群规模。

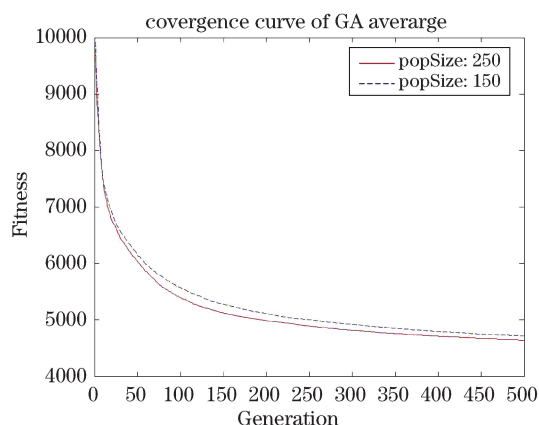


图 8 种群规模为 150 和 250 时 MCGA SMO 的收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves of MCGA SMO with population size of 150 and 250

## 4 结 论

提出了一种基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法。相比采用矩形掩模优化的单染色体方法,本文方法的优化光刻成像质量更好、优化收敛速度更快。仿真实验表明,该方法得到的最优光源和掩模的适应度值比单染色体方法小 7.6%,提高了光刻成像质量。仿真实验还表明,多染色体方法仅需 132 代进化即可得到适应度值为 5200 的最优解,比单染色体方法少 127 代,加快了收敛速度。本文方法可以用于基于复杂光刻成像模型的像素化光源与掩模优化,提高光刻系统分辨率。此外,本文方法还可以根据需要对像素化光源与掩模优化中的光源优化和掩模优化模块分别进行最优化和控制。

## 参 考 文 献

- Roadmap I. International technology roadmap for semiconductors[J]. Executive Summary. Semiconductor Industry Association, 2009.
- Erdmann A, Farkas R, Fuhner T, *et al.* Mask and source optimization for lithographic imaging systems[C]. SPIE, 2003, 5182: 88-102.
- Erdmann A, Fuhner T, Schnattinger T, *et al.* Towards automatic mask and source optimization for optical lithography [C]. SPIE, 2004, 2004: 647.
- Fuhner T, Erdmann A. Improved mask and source representations for automatic optimization of lithographic process conditions using a genetic algorithm[C]. SPIE, 2005, 5754: 415-426.
- Fuhner T, Erdmann A, Schnattinger T. Genetic algorithms for geometry optimization in lithographic imaging systems [C]. SPIE, 2004, 5558: 29-40.
- Yang C, Li S, Wang X. Efficient source mask optimization using multi pole source representation[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(4): 043001.
- Yang C, Wang X, Li S, *et al.* Source mask optimization using real-coded genetic algorithm[C]. SPIE, 2013, 8683: 86831T.
- Yang Chaoxing, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Source mask optimization based on dynamic fitness function[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111006.  
杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于动态适应度函数的光源掩模优化方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111006.
- Li S, Wang X, Bu Y. Robust pixel-based source and mask optimization for inverse lithography[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 285-293.
- Jia N, Lam E Y. Pixelated source mask optimization for process robustness in optical lithography[J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19384-19398.
- Ma X, Arce G R. Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography[J]. Opt Express, 2009, 17(7): 5783-5793.
- Wong A K K. Optical imaging in projection microlithography[C]. SPIE, 2005.

- 13 Fuhner T, Evanschitzky P, Erdmann A. Mutual source, mask, and projector pupil optimization[C]. SPIE, 2012, 8326: 83260I.
- 14 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- 15 Chang J H, Chen C C, Melvin III L S. Hierarchical kernel generation for SMO application[C]. SPIE, 2011, 7973: 797323.
- 16 Li Zhaoze, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911002.  
李兆泽, 李思坤, 王向朝. 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[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911002.
- 17 Peng Y, Zhang J, Wang Y, *et al.* Gradient-based source and mask optimization in optical lithography [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(10): 2856-286.
- 18 Shen Y, Jia N, Wong N, *et al.* Robust level-set-based inverse lithography[J]. Opt Express, 2011, 19(6): 5511-5521.
- 19 Pati Y, Ghazanfarian A A, Pease R F. Exploiting structure in fast aerial image computation for integrated circuit patterns [J]. IEEE Transactions on, Semiconductor Manufacturing, 1997, 10(1): 62-74.
- 20 Xing Shasha, Ran Yinghua, Jiang Haibo, *et al.* Illumination mode conversion system design based on micromirror array in lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1111002.  
邢莎莎, 冉英华, 江海波, 等. 基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1111002.
- 21 Borodovskya Y, Chengb W H, Schenkera R, *et al.* Pixelated phase mask as novel lithography RET[C]. SPIE, 2008, 6924: 69240E.