

极紫外光刻快速掩模优化方法

张子南^{1,2}, 李思坤^{1,2*}, 王向朝^{1,2**}, 成维^{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中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 提出了一种快速的极紫外光刻像素化掩模优化方法。优化过程中采用改进的像素化快速厚掩模模型, 根据掩模像素尺寸设置边界像素上点脉冲的大小。以双重边界演化方法为基础, 在每轮优化时, 根据当前光刻胶轮廓与目标图形轮廓的差异自适应地对优化变量进行初始化, 利用先验信息生成初始个体和种群, 从而提高优化效率。以一维线空图形和二维复杂图形为例进行了仿真验证, 结果表明该方法有效提高了掩模成像仿真精度, 两种二维掩模图形的优化效率得到明显提高。

关键词 衍射; 极紫外光刻; 厚掩模模型; 掩模优化

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1305002

Fast Mask Optimization Method for Extreme Ultraviolet Lithography

Zhang Zinan^{1,2}, Li Sikun^{1,2*}, Wang Xiangzhao^{1,2**}, Cheng Wei^{1,2}¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper proposes a fast pixelated mask optimization method for extreme ultraviolet lithography. An improved fast pixelated thick mask model is utilized in mask optimization. The point pulses on the edge pixels are set according to the mask pixel size. On the basis of the dual edge evolution strategy, the optimization variables are adaptively initialized in each epoch of optimization according to the difference between the current resist pattern contour and the target pattern contour. The optimization efficiency is improved by generating the initial individuals and population using priori information. One-dimensional line-space patterns and two-dimensional complex patterns are used for simulation. Simulation results show that the imaging simulation accuracy is effectively improved. In addition, the optimization efficiency of the two complex patterns is effectively increased by the proposed method.

Key words diffraction; extreme ultraviolet lithography; thick mask model; mask optimization

1 引言

随着摩尔定律的不断延续, 极紫外(EUV)光刻成为了 5 nm 及以下技术节点芯片量产中必不可少的技术之一^[1]。与深紫外光刻类似, 随着电路图形的特征尺寸不断减小, 光学临近效应会显著地降低 EUV 光刻的成像质量, 因此需要掩模优化技术来提高成像保真度^[2]。此外, 由于采用了反射式的掩模和光学系统, EUV 光刻还存在特有的阴影效应和离焦效应等三维掩模效应^[3-4], 这对掩模优化技术提出了更高的要求。

掩模优化技术通过迭代调整掩模图形的形状, 使光刻胶图形尽可能地接近目标图形。在掩模优化技术中, 掩模模型和优化策略是最为关键的两个因素。掩模模型决定了优化过程中成像仿真的精度, 优化策略决定了掩模优化的效率。

与传统的深紫外(DUV)掩模不同, EUV 掩模厚度达到几百纳米, 远大于入射光波长, 传统的薄掩模模型存在很大的计算误差。为了准确计算 EUV 掩模的近场或衍射谱, 需要使用严格电磁场仿真, 如时域有限差分法(FDTD)^[5]、严格耦合波分析(RCWA)^[6]等。然

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-10

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101004-002)

通信作者: *lisikun@siom.ac.cn; **wxz26267@siom.ac.cn

而,严格电磁场仿真的计算速度慢且需要消耗大量的计算资源,不适用于掩模优化等计算光刻技术。因此,研究人员提出了一系列 EUV 光刻快速厚掩模模型来兼顾成像仿真的速度与精度。

应用于 EUV 掩模优化的快速厚掩模模型主要有三类。第一类是基于数据库和查表的模型,包括 ASML 公司提出的 M3D+ 模型^[7]和 Mentor Graphic 公司提出的 edge-DDM 模型^[8]等。这类模型先通过严格电磁场仿真计算不同条件下的边界衍射信号或边界滤波器并将其存储为数据库,对实际掩模图形进行仿真时,将数据库中对应的边界衍射数据叠加到图形边界处。这类模型虽然计算速度快,但需要提前存储大量数据并假定图形的尺寸和入射方向等信息^[9]。第二类是在薄掩模模型的基础上进行阴影效应补偿^[10-11]。该方法在掩模优化阶段采用薄掩模模型加快计算速度,优化结束后采用经验模型对掩模图形尺寸进行校正,从而补偿阴影效应。第三类是基于结构分解(SDM)的快速厚掩模模型^[12-14],将 EUV 掩模分解成吸收层和多层膜两个部分,通过描述光在掩模中的传播计算最终的衍射谱。这类模型的物理意义明确,已成功用于掩模三维效应的理论和仿真分析中^[13]。传统基于 SDM 的模型使用多边形描述掩模图形,并在图形边界处添加点脉冲,然后解析计算吸收层衍射谱。在掩模优化中,一般采用像素化的图形表征方式,因此本课题组对掩模图形进行离散化并进行边缘检测,通过在边界像素上添加点脉冲^[15],实现了像素化 SDM 模型。该方法中的像素尺寸会影响计算精度,因此需要对掩模图形进行上采样以减小计算误差,这导致了成像仿真速度变慢,从而影响掩模优化的速度。

根据采用的算法,EUV 光刻掩模优化主要分为基于梯度算法和基于启发式算法两类。基于梯度算法的掩模优化根据正向光刻模型将待优化的损失函数表示出来,然后推导出损失函数对于掩模的梯度表达式,并利用梯度下降法、共轭梯度法等优化算法迭代计算出最优解^[16-17]。这类方法利用了目标函数的梯度信息,优化速度快。但为了保证 EUV 成像仿真的精度,掩模模型和光刻胶模型往往比较复杂,梯度的求解也越来

越繁琐甚至无法进行解析表示,这时梯度算法的应用受到限制。基于启发式算法的掩模优化对掩模图形进行编码,利用遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)等启发式算法在解空间中寻找最优解^[18-19],优化过程中不需要计算目标函数的梯度信息,这类算法适用于不同的复杂掩模模型和光刻胶模型。然而,启发式算法的优化效率与优化变量的维度有关。当掩模像素数量增大时,编码后的优化变量维度急剧增大,需要扩大种群规模、增加迭代次数才能有较好的优化效果,这会导致优化速度变慢。针对这一问题,本课题组前期对像素化掩模图形进行离散余弦变换(DCT)^[20],通过选取部分低频分量进行优化,在降低优化变量维度的同时提高了优化后掩模的可制造性。然而,这种方法无法在优化时对掩模图形进行直接的控制。本课题组提出了一种基于双重边界演化(DEE)的优化方法^[21],选择图形的边界和边界外层像素进行编码并进行迭代交替优化,这有效降低了优化变量的维度。然而,该方法在每轮优化时对优化变量的初始化没有有效利用先验信息,优化效率依然较低。

本文提出了一种 EUV 光刻快速掩模优化方法。通过对比多边形 SDM 模型(polySDM)和像素化 SDM 模型的公式,得到了二者边界脉冲大小之间的关系。根据像素尺寸设置相应的边界像素点脉冲大小,提高了掩模优化中成像仿真的计算精度。提出了一种改进的双重边界演化(ADEE)方法。在 DEE 方法的基础上,每次优化边界或边界外层像素时,根据光刻胶轮廓与目标图形轮廓的差异自适应设定初始的试探解,充分利用先验知识,以有效提高掩模优化效率。

2 理论模型

2.1 成像模型

极紫外光刻成像系统与掩模结构如图 1 所示。如图 1(a)所示,光源发出的光通过照明系统倾斜照射到掩模上,衍射后部分衍射级次被投影物镜系统收集并参与成像,然后通过显影和刻蚀等步骤完成目标图形从掩模到硅片的转移。

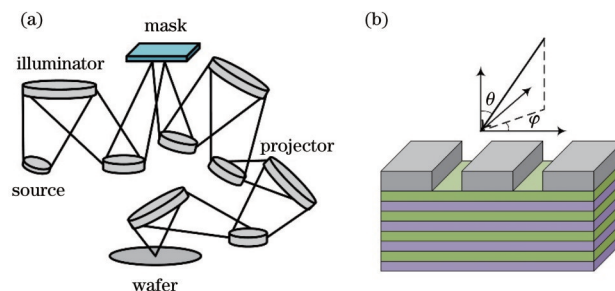


图 1 EUV 光学系统与掩模示意图。(a) EUV 光学系统;(b) EUV 掩模

Fig. 1 Schematic of EUV optics system and mask. (a) EUV optics system; (b) EUV mask

与 DUV 光刻系统类似,EUV 光刻系统是一个部分相干成像系统,空间像分布可以通过 Abbe 成像公式

表示为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\hat{f}, \hat{g}) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') B(\hat{f}', \hat{g}') \exp[-j2\pi(\hat{x}_i \hat{f}' + \hat{y}_i \hat{g}')] df' dg' \right]^2 d\hat{f} d\hat{g}, \quad (1)$$

式中: (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 为像面归一化空间坐标; (\hat{f}, \hat{g}) 为光瞳面归一化空间频率坐标; (\hat{f}', \hat{g}') 为掩模衍射光的归一化空间频率坐标; I 表示空间像强度; S 表示光源强度分布; H 表示投影物镜的传递函数, 可以视为一个低通滤

波器; B 表示入射光通过掩模后的衍射谱。

在掩模优化中, 光源分布和投影物镜保持不变, 为了加快计算, 通常需要调节式(1)中的积分顺序, 提前计算并存储光学系统的交叉传递函数(TCC), 同时将积分运算转化为求和运算, 此时空间像计算公式为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \sum_{\hat{f}'} \sum_{\hat{g}'} \sum_{\hat{f}''} \sum_{\hat{g}''} \text{TCC}(\hat{f}', \hat{g}', \hat{f}'', \hat{g}'') B(\hat{f}', \hat{g}') B^*(\hat{f}'', \hat{g}'') \exp\left\{-j2\pi\left[\hat{x}_i(\hat{f}' - \hat{f}'') + \hat{y}_i(\hat{g}' - \hat{g}'')\right]\right\}, \quad (2)$$

式中: (\hat{f}'', \hat{g}'') 表示衍射光线的归一化空间频率坐标; B^* 表示 B 的复共轭。对 TCC 进行奇异值分解并选取有限项进行叠加, 成像公式为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \sum_{k=1}^K \mu_k \left| \mathcal{F}^{-1}\left\{\Phi_k(\hat{f}', \hat{g}') B(\hat{f}', \hat{g}')\right\}\right|^2, \quad (3)$$

式中: Φ_k 表示 TCC 分解后的第 k 个核函数; μ_k 表示对应的奇异值; K 是分解的截断级次; $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换。

计算出空间像分布后, 可以根据光刻胶模型计算光刻胶图形。本文采用 sigmoid 近似模型来计算光刻胶图形^[22]:

$$I_r = \frac{1}{1 + \exp[-a_r \cdot (I - t_r)]}, \quad (4)$$

式中: t_r 表示光刻胶阈值; a_r 表示光刻胶斜度。

2.2 像素化 SDM 掩模模型

极紫外光刻掩模的结构如图 1(b) 所示, 主要由吸收层和多层膜两部分构成。在之前的工作中^[15], 本课题组提出了一种针对 EUV 像素化掩模的 SDM 厚掩模模型(pxSDM1), 通过描述入射光在 EUV 掩模中的传播过程, 掩模的衍射谱可以表示为

$$B = (\phi_a \odot B_a \odot \phi_b \odot R_m \odot \phi_b) \otimes B_a \odot \phi_b \odot \phi_d, \quad (5)$$

式中: \odot 表示矩阵按元素相乘; \otimes 表示矩阵卷积运算; B 表示掩模的衍射谱矩阵; B_a 表示入射光在吸收层中间的等效位置发生衍射的衍射谱矩阵; R_m 表示多层膜对各级次衍射光的反射率矩阵; ϕ_a 和 ϕ_b 分别表示入射光经过吸收层衍射时的相位传播因子和相位传播矩阵; ϕ_d 表示掩模离焦矩阵, 用来消除像面图形的位置偏移。 B_a 通过点脉冲修正的吸收层模型进行计算:

$$B_a = \mathcal{F}\left\{t_a + (t_b - t_a) \odot M + \delta_e \odot \Lambda(M)\right\}, \quad (6)$$

式中: t_a , t_b 和 δ_e 为厚掩模参数, 通过严格电磁场仿真标定; M 表示掩模图形二值化矩阵; $\Lambda(\cdot)$ 表示边缘检测函数, 用于将掩模图形的边界像素设置为 1, 其他像素设置为 0; $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换(FFT)。

传统的 polySDM 模型通过解析的方法计算边界点脉冲的衍射谱^[14]。然而, 对于像素表征的掩模图形, 只能通过设置边界像素的有效透过率添加点脉冲, 当

像素尺寸较大时, 模型的误差增大。因此 pxSDM1 模型在计算吸收层衍射谱时先对 M 进行上采样, 得到更精细的图形像素化矩阵, 对边缘像素进行检测并添加点脉冲参数, 然后计算图形的傅里叶系数。这样的方法会导致成像计算速度变慢, 同时像素尺寸会影响成像计算的精度。

为了解决这一问题, 需要推导像素化 SDM 模型中边界像素点脉冲大小与像素尺寸的关系。采用物面坐标, 以一维线空图形为例, 不考虑图形的偏移, 通过 polySDM 模型得到的吸收层边界点脉冲的衍射谱^[12]表达式为

$$B_e^{\text{poly}} = \frac{2\delta_e}{p} \cos(\pi md), \quad (7)$$

式中: m 表示衍射级次; p 表示掩模周期; d 表示图形的占空比。对掩模图形进行离散化后, 图形的边缘检测函数可以表示为

$$\Lambda[M(n)] = \begin{cases} 1, & n = \frac{p \pm s}{2\Delta x}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: n 表示掩模像素索引, $n = 0, 1, \dots, N-1$, N 表示像素点数; s 表示图形尺寸; Δx 表示像素尺寸; $d = \frac{s}{p}$, $p = N\Delta x$ 。若在边界像素上添加大小为 δ_e' 的点脉冲, 则此时吸收层边界点脉冲的衍射谱可以通过离散 FFT 计算得到:

$$B_e^{\text{pixel}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \delta_e' \Lambda[M(n)] \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} mn\right) = \frac{2\delta_e'}{N} \cos\left(\pi m \frac{s}{N\Delta x}\right) = \frac{2\delta_e'}{N} \cos(\pi md)。 \quad (9)$$

对比式(7)和式(9)可知, δ_e' 应满足

$$\delta_e' = \frac{\delta_e}{\Delta x}。 \quad (10)$$

此时像素化 SDM 模型计算得到的吸收层边界衍射结果与 polySDM 的结果相同, 且该结果对任意像素点数均成立。

将这种方法记为 pxSDM2 模型, 该模型可以在较少的像素点数条件下实现较高的计算精度。本文以一

维图形为例进行了推导,但所得结论适用于任意掩模图形。需要注意的是,当像素点数变化时,离散误差会导致边界像素位置与真实边界位置之间产生差异,从而产生计算误差,这种误差只能通过设置合适的像素点数来减小。另外,离散FFT与解析FFT的计算结果之间本身也存在一定的差异。

2.3 优化原理

在基于启发式算法的掩模优化中,一般按照对称性对掩模像素进行编码。若掩模图形为任意非对称图形,则意味着所有的掩模像素都要被编码,此时优化变量的维度为掩模像素点数,优化效率较低。在之前的工作中,本课题组提出了一种双重边界演化(DEE)的优化方法,其基本原理如图2所示^[21]。

图2为DEE优化方法示意图。如图2(a)所示,初

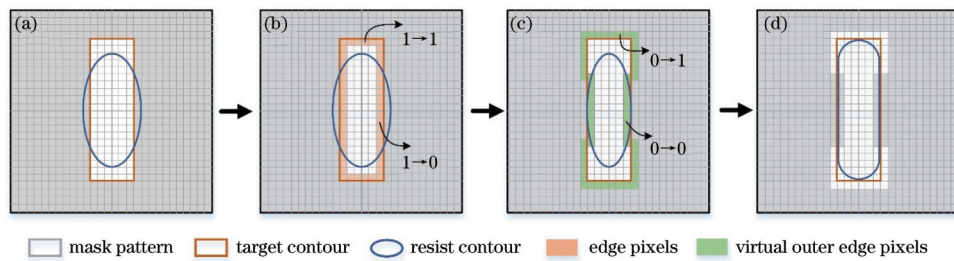


图2 DEE优化方法示意图。(a)初始状态;(b)边界像素优化;(c)边界外层像素优化;(d)优化后状态

Fig. 2 Schematics of DEE optimization method. (a) Initial status; (b) optimization of edge pixels; (c) optimization of outer edge pixels; (d) status after optimization

在实际应用中,边界或边界外层像素值的变化与否是通过优化决定的,优化时的初始解影响优化效率,若初始解设置不当,则需要较多的迭代次数才能得到较好的像素值分布,甚至有可能陷入局部最优解,导致较差的优化效果。在DEE优化方法中,如图3中上方所示的初始化策略,边界像素优化时的初始解是当前图形所有边界像素的编码,即元素全为1的向量,边界

始掩模图形曝光得到的光刻胶图形轮廓与目标图形轮廓之间存在较大差异,在不同位置处存在外扩和内缩异常现象。掩模为二元掩模,像素值为0表示背景像素,像素值为1表示图形像素。首先选择掩模图形边界像素进行编码和优化,这导致内缩异常的边界像素优化中应有趋势保持为图形像素不变,而外扩异常的边界像素优化中应有趋势变为背景像素。然后选择图形边界的外层像素进行编码和优化,这导致内缩异常的边界外层像素优化中应有趋势变为图形像素,而外扩异常的边界外层像素优化中应有趋势保持为背景像素不变。若光刻胶轮廓与目标图形轮廓重合,则相应的边界像素和边界外层像素在优化中的应有趋势均保持不变。通过交替迭代优化边界和边界外层像素,可以有效实现掩模图形的优化。

外层像素优化时的初始解是当前图形所有边界外层像素的编码,即元素全为0的向量,然而这种初始解的设置策略没有充分利用先验信息。事实上,上文中描述的优化中像素值变化趋势是根据光刻成像的原理得到的先验信息或先验知识。根据这个先验信息,如图3中下方的ADEE初始化策略,可以人为将优化变量初始解设置在最优解附近,从而提高优化效率。

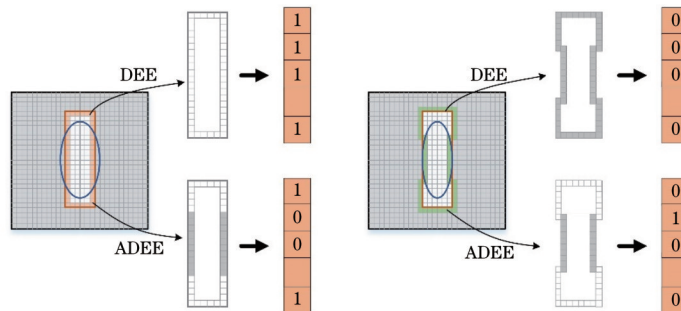


图3 初始化方法对比

Fig. 3 Comparison of initialization methods

确定优化变量初始解时,需要确定目标图形边界像素与光刻胶轮廓像素的位置差异,如图4所示,首先计算当前掩模图形曝光后的光刻胶图形,并检测相应的光刻胶轮廓,将背景区域的像素值设为0,图形区域的像素值设为1,边界处的像素值设为0.5。然后沿着目标图形边界将对应像素提取出来,像素值为0代表

内缩异常,像素值为1代表外扩异常,像素值为0.5代表该位置光刻胶图形边界与目标图形边界重合。由此可以获得当前目标图形每个边界位置处与光刻胶轮廓的位置差异。

接着需要在待优化的当前掩模图形边界像素或边界外层像素与目标图形边界像素之间建立联系。对于

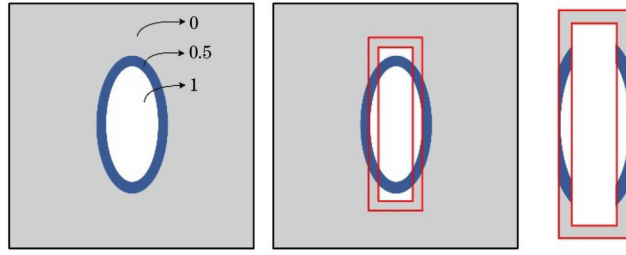


图 4 图形边界各位置处与光刻胶轮廓的差异

Fig. 4 Difference between pattern edges and resist pattern contour at each position

某个待优化的边界像素或边界外层像素,计算并检测与其属于同一个封闭子图形且距离最近的目标图形边界像素。根据之前在目标图形边界得到的该位置处存在的成像异常,利用先验信息对此时待优化的像素进行相应的初始化。需要注意的是,根据光刻系统的特点,掩模图形某个像素的变化会同时影响像面多个像素。因此按照上述方法获得的初始解并不是完全正确的,而是作为一个参考了先验信息的试探解,在优化之初尽可能接近最优解的位置,从而提高优化效率。

整个掩模优化的流程以及优化变量初始化的流程如图 5 所示,在正式优化之前需要先进行厚掩模参数计算以及掩模离焦量优化^[15]。通过调用预计算的厚掩模参数可以提高优化过程中成像仿真的速度,此外,通过线性搜索优化得到的掩模离焦量 Δz^* 可以消除斜入射设置导致的像面图形位置偏移效应。然后循环进行边界和边界外层像素的交替优化,并在优化前采用虚线框内的初始化方法进行种群初始化。

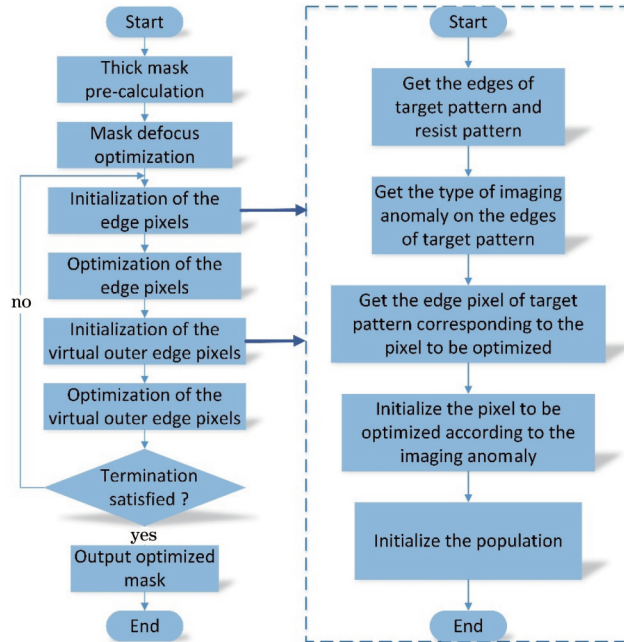


图 5 基于 ADEE 的掩模优化流程

Fig. 5 Flowchart of mask optimization based on ADEE

掩模优化的目标函数定义为光刻胶图形与目标图形的图形误差(PE):

$$F_{PE} = \|I_r - M_T\|_2^2, \quad (11)$$

式中: I_r 表示光刻胶图形的灰度矩阵, M_T 表示目标图形的掩模二值化矩阵, $\|\cdot\|_2$ 表示矩阵的 L_2 范数。定义掩模优化方法的优化效率指标为

$$r_{opt} = \frac{E_{init} - E_{opt}}{t_{opt}}, \quad (12)$$

式中: E_{init} 和 E_{opt} 分别表示优化前和优化后光刻胶图形与目标图形的图形误差; t_{opt} 表示优化所用的时间。

本文所提出的掩模优化方法在优化时可以采用任意启发式算法。SL-PSO 算法是一种简洁高效的粒子群算法^[23], 被证明在高维的掩模优化问题中有较好的优化效果^[15]。因此本文在边界或边界外层像素优化时使用基于 SL-PSO 算法的优化器。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真条件

在本文进行的仿真中,照明光源采用如图 6 所示的环形照明,内、外部分相干因子分别为 0.7 和 0.9,光源光强分布的内外环边缘斜率参数均为 0.03,偏振态

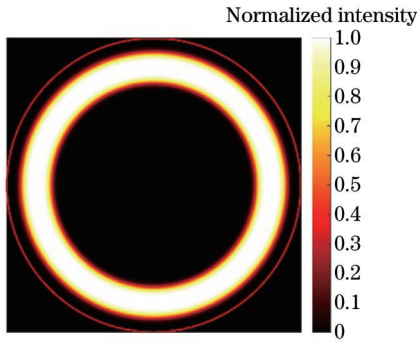


图 6 照明光源

Fig. 6 Illumination source

采用 y 方向偏振。光源的主入射角 θ 为 6° , 方位角 φ 为 0° 。掩模吸收层材料为 TaN, 复折射率为 $0.9238 - 0.0436j$, 厚度为 70 nm , 多层膜为 40 对 Mo/Si 膜, 共 80 层, Mo 的复折射率为 $0.9238 - 0.0064j$, 每层厚度为 2.78 nm , Si 的复折射率为 $0.9990 - 0.0018j$, 每层厚度为 4.17 nm 。标定后的厚掩模参数分别为 $t_a = 0.0762 + 0.2283j$, $t_b = 0.397 - 0.9181j$, $\delta_c = 4.307 + 0.7426j$ 。投影物镜的数值孔径 NA 为 0.33 , 缩小系数 R 为 4 。光刻胶斜度 a_r 为 200 , 阈值 t_r 为 0.3 。不考虑多层膜缺陷、投影物镜像差, 掩模周期和图形尺寸如无特殊说明均采用像面坐标, 且掩模图形均为暗场掩模。仿真使用的硬件为 AMD Ryzen 8 核 3.6 GHz CPU,

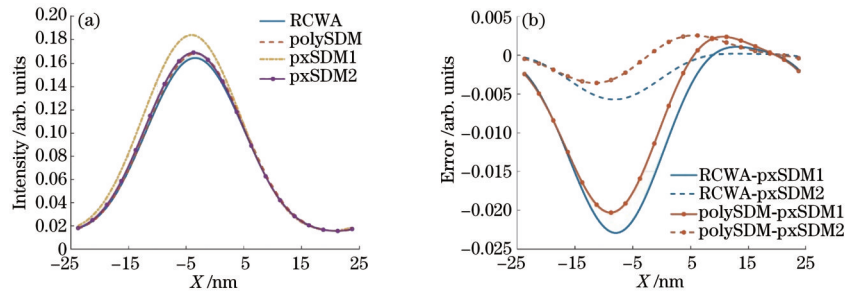


图 7 线空图形的仿真结果。(a) 空间像; (b) pxSDM1 和 pxSDM2 模型的计算误差

Fig. 7 Simulation results of line-space pattern. (a) Aerial image; (b) calculation errors of pxSDM1 and pxSDM2

作为 SDM 模型的像素化版本, pxSDM1 和 pxSDM2 模型的计算结果越接近 polySDM 模型, 说明离散化带来的误差越小。为了分析像素点数对像素化 SDM 模型的影响, 设置线空图形的周期为 32 nm , 线条尺寸为 16 nm , 离散化像素点数从 32 增加到 256, 步长为 4。在每个像素点数条件下, 分别采用 polySDM、pxSDM1 和 pxSDM2 模型计算空间像, 并计算两种像素化 SDM 模型相对于 polySDM 模型的误差。定义两种掩模模型计算结果之间的空间像误差 $E_{\text{image}} = \|I_1 - I_2\|_2^2$, 其中 I_1 和 I_2 分别表示两种模型计算得到的空间像强度矩阵。得到空间像误差随像素点数的变化如图 8 所示。pxSDM2 模型与 polySDM 模型之间的误差始终很小, 且误差随着像素点数的增大缓慢减小。而 pxSDM1 模型的误差先减小后增大, 受像素点数的影响很大。像素点数较多时, 从直观上看边界像素尺

16 GB 内存。

掩模优化流程中双重边界演化的轮次数目为 N_{epoch} , 每轮优化图形边界或边界外层像素时使用的优化器基于 SL-PSO 算法, 优化器的基本可调参数包括最大迭代次数 N_{iter} 和粒子群规模 M_{pop} 。

3.2 像素化 SDM 模型精度分析

为了验证本文所提出的 pxSDM2 模型的计算精度, 本节分别选择 RCWA、polySDM、pxSDM1 和 pxSDM2 模型计算掩模的空间像并进行对比分析。首先选择一维线空图形, 周期为 48 nm , 线条尺寸为 16 nm , 离散化像素点数为 96。由于 2.2 节中的推导采用了物面坐标, 所以在物面 p 为 192 nm , 像素尺寸 Δx 为 2 nm 。采用 4 种模型计算得到掩模的空间像强度分布如图 7(a) 所示, pxSDM2 模型中的点脉冲大小按照式 (10) 计算并将其添加到图形的边界像素。从图中可以看到, polySDM 模型与 RCWA 模型的计算结果之间存在较小的差异, 这是快速厚掩模模型相对于严格电磁场仿真的计算误差。与 pxSDM1 模型相比, pxSDM2 模型计算得到的空间像与 polySDM 和 RCWA 模型的结果更相近。分别计算两种像素化 SDM 模型相对于 polySDM 和 RCWA 模型的计算误差, 如图 7(b) 所示。可以看到, 改进后的 pxSDM2 模型的计算误差远小于 pxSDM1, 这验证了本文所提方法可以有效提高成像仿真的计算精度。

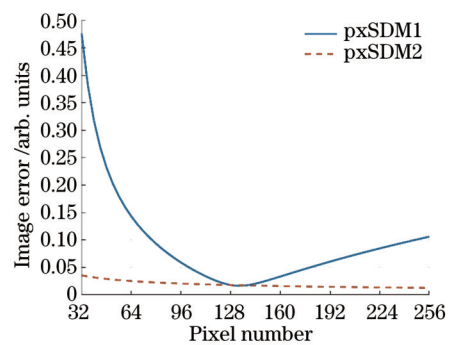


图 8 空间像误差随像素点数的变化

Fig. 8 Variation of aerial image error with pixel number

寸变小, 更接近解析模型中的理想边界, 然而, 由于没有考虑 FFT 归一化的过程, 没有对边界脉冲的大小进行相应的修正, pxSDM1 模型的误差反而缓慢增大。

当像素点数为 128 时,物面的像素尺寸 Δx 为 1 nm,此时 δ_e' 与 δ_e 的值相同,因此两种像素化 SDM 模型的计算误差相同。由此可知,若采用 pxSDM1 模型,则需将掩模图形上采样到物面像素尺寸为 1 nm 左右,这样才能获得较高的计算精度。而 pxSDM2 模型在任意像素点数条件下的计算精度均很高。

3.3 二维图形掩模优化

本节选择两种二维复杂图形来验证所提掩模优化方法的有效性。如图 9(a) 所示,图形 1 为 x/y 对称图形, x 方向和 y 方向的周期均为 405 nm,像素点数均为 201,图形中最小的特征尺寸为 15 nm。如图 9(b) 所示,图形 2 为非对称图形, x 方向的周期为 300 nm,像素点数为 150, y 方向的周期为 358 nm,像素点数为 179,图形中最小的特征尺寸为 16 nm。

为了进一步验证本文所提 pxSDM2 模型对二维掩

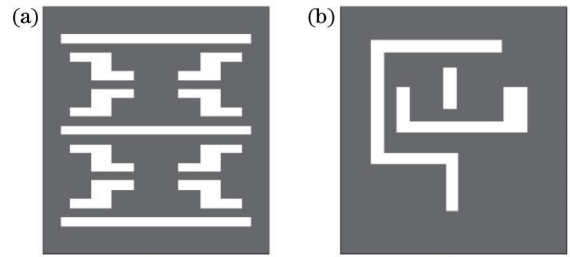


图 9 目标图形。(a) 图形 1; (b) 图形 2

Fig. 9 Target patterns. (a) Pattern 1; (b) pattern 2

模图形的适用性,分别采用 RCWA、pxSDM1 和 pxSDM2 模型计算两种掩模图形的空间像。其中,使用 pxSDM1 模型时,设置图形上采样系数 r_{up} 分别为 1 和 4,仿真结果如图 10 所示。

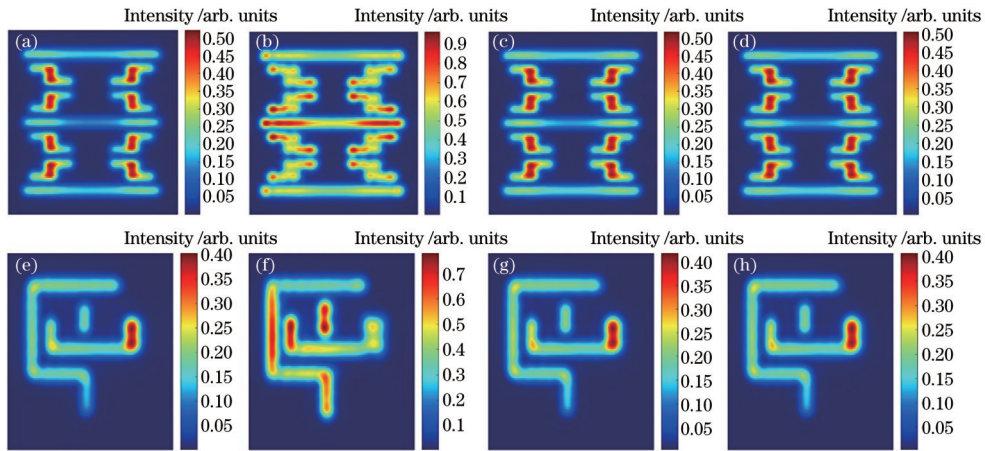


图 10 不同模型计算得到的两个初始掩模图形的空间像。(a)(e) RCWA; (b)(f) 不进行上采样的 pxSDM1 模型; (c)(g) 进行上采样的 pxSDM1 模型; (d)(h) pxSDM2 模型

Fig. 10 Aerial images of two initial mask patterns obtained by different methods. (a)(e) RCWA; (b)(f) pxSDM1 without upsampling; (c)(g) pxSDM1 with upsampling; (d)(h) pxSDM2

如图 10(b) 和图 10(f) 所示,若不对掩模图形进行上采样,pxSDM1 模型计算得到的空间像相对于严格仿真结果存在极大的计算误差。如图 10(c) 和图

(g) 所示,上采样后 pxSDM1 模型的计算误差显著减小。对于两种图形,4 种模型的计算时间 t 和空间像误差 E_{image} 如表 1 所示。

表 1 4 种模型的计算速度和精度

Table 1 Calculation speed and accuracy of four models

Model		RCWA	pxSDM1 without upsampling	pxSDM1 with upsampling	pxSDM2
Pattern 1	t/s	173.61	0.0080	0.0711	0.0078
	E_{image}	—	30.5145	1.6076	0.9790
Pattern 2	t/s	88.37	0.0055	0.0410	0.0034
	E_{image}	—	16.2179	1.0256	0.6554

从表 1 可以看到,通过上采样,pxSDM1 模型的空间像误差大幅减小,但计算时间显著增加。对于两种掩模图形,与使用上采样的 pxSDM1 模型相比,pxSDM2 模型的计算时间分别减少了约 89.03% 和 91.71%,空间像误差分别降低了约 39.10% 和 36.10%。采用 pxSDM2 模型可以在大幅提高成像仿

真速度的同时,减小成像计算误差,因此下文均基于 pxSDM2 模型进行掩模优化。

进行掩模优化时,首先计算两种掩模图形的初始光刻胶图形,并与目标图形轮廓进行对比,如图 11(a) 和图 11(c) 所示,可以看到初始光刻胶图形与目标图形之间存在较大差异,且存在由斜入射导致的图形偏

移。对两种掩模图形优化得到的掩模离焦量 Δz^* 分别为 89 nm 和 165 nm, 通过设置掩模离焦量可以消除图形偏移。计算离焦后两种掩模图形的光刻胶图形, 并

与目标图形轮廓进行对比, 如图 11(b) 和图 11(d) 所示, 可以看到 PE 显著下降, 图形偏移现象基本消除。

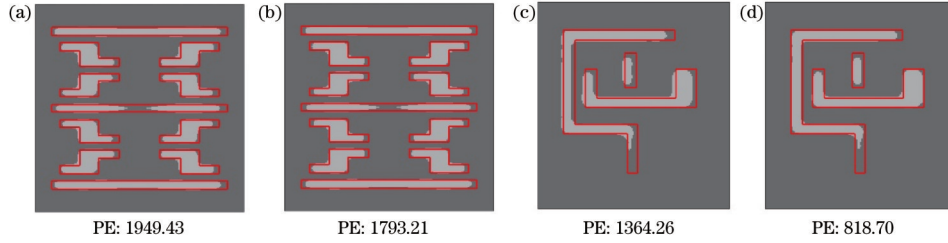


图 11 光刻胶图形与目标图形的对比。(a)(c)初始光刻胶图形;(b)(d)掩模离焦后光刻胶图形

Fig. 11 Comparisons of resist patterns and target patterns. (a)(c) Initial resist patterns; (b)(d) resist patterns after mask defocus

然后分别采用 DEE 和 ADEE 方法进行掩模优化, 采用 DEE 优化方法时, 双重边界演化的轮次数目 N_{epoch} 设置为 4, SL-PSO 优化器的最大迭代次数 N_{iter} 设置为 100, 粒子群规模 M_{pop} 设置为 30。采用 ADEE 优化方法时, N_{epoch} 设置为 3, N_{iter} 设置为 60, M_{pop} 设置为 30。

对于图形 1, 两种方法优化后的掩模图形如图 12 (a) 和图 12(c) 所示。对比两个优化后的掩模图形可以发现, DEE 方法优化得到的掩模图形与初始掩模图形

的差异较小, 这意味着优化并不彻底, 有可能陷入了初始图形附近的局部最优解。尤其在线端和拐角部位, ADEE 方法优化得到的掩模图形更符合优化预期。计算两个优化后掩模图形对应的光刻胶图形, 并与目标图形轮廓进行对比, 如图 12(b) 和图 12(d) 所示, ADEE 方法优化后的 PE 比 DEE 方法下降了约 34.46%。DEE 方法的优化时间为 159.74 s, ADEE 方法的优化时间为 72.30 s, 缩短了约 54.74%。

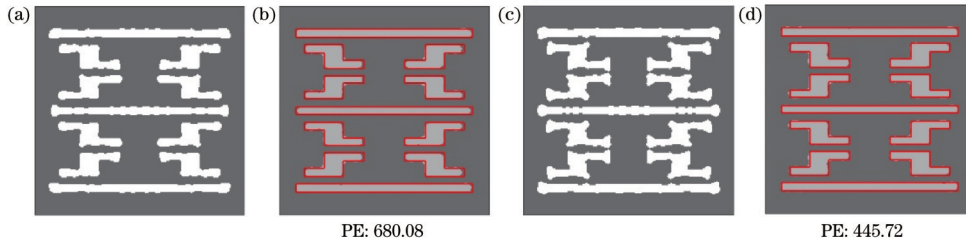


图 12 图形 1 优化后掩模和光刻胶图形。(a)(b) DEE 方法优化结果;(c)(d) ADEE 方法优化结果

Fig. 12 Optimized masks and resist patterns of pattern 1. (a)(b) Optimization results of DEE method; (c)(d) optimization results of ADEE method

对于图形 2, 两种方法优化后的掩模图形如图 13 (a) 和图 13(c) 所示, 计算对应的光刻胶图形, 并与目标图形轮廓进行对比, 如图 13(b) 和图 13(d) 所示。可以看到, 在一些线端位置, DEE 方法优化后的光刻胶图形与目标图形有着明显的差异, 这说明由于没有利用

先验信息, DEE 方法的优化效率较低。此外, DEE 方法的优化时间为 102.51 s, ADEE 方法的优化时间为 46.58 s。与 DEE 方法相比, ADEE 方法优化后的图形误差减小了约 50.79%, 优化时间缩短了约 54.56%。

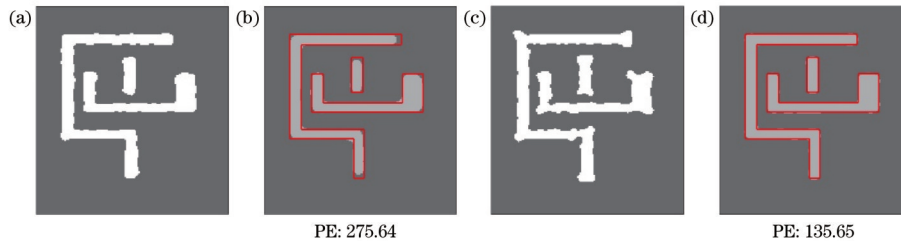


图 13 图形 2 优化后掩模和光刻胶图形。(a)(b) DEE 方法优化结果;(c)(d) ADEE 方法优化结果

Fig. 13 Optimized masks and resist patterns of pattern 2. (a)(b) Optimization results of DEE method; (c)(d) optimization results of ADEE method

针对两种掩模图形, 分别计算两种优化方法的优化效率指标, 如表 2 所示, 计算结果证明, ADEE 方法可以在更短的时间内得到更好的优化效果, 有效提高

了掩模优化效率。

两种掩模优化方法的收敛曲线如图 14 所示, 横坐标代表调用适应度函数的次数 (FE), 纵坐标代表图形

表 2 两种方法的优化效率

Table 2 Optimization efficiency of two methods

Mask Pattern	r_{opt} of DEE / s^{-1}	r_{opt} of ADEE / s^{-1}	Increased percent / %
Pattern 1	7.95	20.80	162
Pattern 2	10.62	26.38	148

误差。可以看到, ADEE 方法的优化效率显著高于

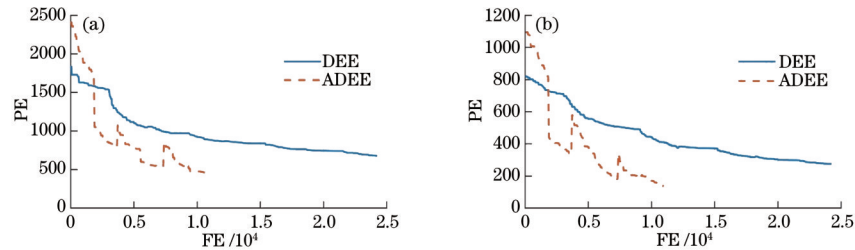


图 14 收敛曲线。(a)图形 1;(b)图形 2

Fig. 14 Convergence curves. (a) Pattern 1; (b) pattern 2

4 结 论

提出了一种针对极紫外光刻的快速掩模优化方法。对一维线空图形和二维复杂图形的空间像的仿真证明, 本文在优化过程中采用的 pxSDM2 模型比 pxSDM1 模型具有更高的仿真精度和更大的仿真速度, 同时不受掩模离散化像素点数的影响。对两个二维掩模图形进行优化, 仿真结果证明本文提出的 ADEE 优化方法通过利用先验信息设置掩模图形边界像素和边界外层像素的初始解, 有效提高了优化效率。在后续的工作中, 如何更合理地设置初始解来避免图形误差产生过大的跳变, 以及如何控制优化中掩模图形的拓扑性质和可制造性是研究的重点。

参 考 文 献

- [1] van Schoot J, Lok S, van Setten E, et al. High-NA EUV lithography exposure tool: advantages and program progress[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11517: 1151712.
- [2] Hooker K, Kuechler B, Kazarian A, et al. ILT optimization of EUV masks for sub-7 nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10446: 1044604.
- [3] Ng P C W, Tsai K Y, Lee Y M, et al. Fully model-based methodology for simultaneous correction of extreme ultraviolet mask shadowing and proximity effects [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2011, 10(1): 013004.
- [4] Erdmann A, Xu D B, Evanschitzky P, et al. Characterization and mitigation of 3D mask effects in extreme ultraviolet lithography[J]. Advanced Optical Technologies, 2017, 6(3/4): 187-201.
- [5] Vial A, Erdmann A, Schmoeller T, et al. Modification of boundaries conditions in the FDTD algorithm for EUV mask modeling[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4754: 890-899.

DEE 方法。对于 ADEE 方法, 在每次进行图形边界像素初始化时, 图形误差会跳变增大, 这与 2.3 节中的分析一致。利用先验信息设置的初始试探解并不能保证比上一轮次的解更优, 但该方法可以调整解的位置, 具有类似于调整优化方向的作用。此外, 采用 ADEE 方法时设置的边界演化轮次数目较少, 这一方面是为了验证优化效率的提高, 另一方面是为了避免掩模图形的拓扑性质发生改变。

- [6] Shao F, Evanschitzky P, Reibold D, et al. Fast rigorous simulation of mask diffraction using the waveguide method with parallelized decomposition technique[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6792: 649206.
- [7] Liu P, Xie X B, Liu W, et al. Fast 3D thick mask model for full-chip EUVL simulations[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 86790W.
- [8] Mailfert J, Zuniga C, Philipsen V, et al. 3D mask modeling for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8322: 832224.
- [9] Lan S, Liu J, Wang Y M, et al. Deep learning assisted fast mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10587: 105870H.
- [10] Song H, Zavyalova L, Su I, et al. Shadowing effect modeling and compensation for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7969: 796910.
- [11] Ma X, Wang Z Q, Chen X B, et al. Gradient-based source mask optimization for extreme ultraviolet lithography[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2019, 5(1): 120-135.
- [12] Cao Y T, Wang X Z, Erdmann A, et al. Analytical model for EUV mask diffraction field calculation[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8171: 81710N.
- [13] Liu X L, Wang X Z, Li S K, et al. Fast rigorous model for mask spectrum simulation and analysis of mask shadowing effects in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9048: 90483E.
- [14] 张恒, 李思坤, 王向朝. 基于改进型结构分解的极紫外光刻掩模衍射谱快速仿真方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0105001.
Zhang H, Li S K, Wang X Z. A rapid simulation method for diffraction spectra of EUV lithography mask based on improved structural decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0105001.
- [15] Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask optimization for extreme-ultraviolet lithography based on thick mask model and social learning particle swarm

- optimization algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5448-5465.
- [16] Granik Y. Fast pixel-based mask optimization for inverse lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2006, 5(4): 043002.
- [17] Lü W, Liu S Y, Xia Q, et al. Level-set-based inverse lithography for mask synthesis using the conjugate gradient and an optimal time step[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2013, 31(4): 041605.
- [18] Erdmann A, Fuehner T, Schnattinger T, et al. Toward automatic mask and source optimization for optical lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 646-657.
- [19] 王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源掩模投影物镜联合优化方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1022001.
- Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask projector optimization method of lithography tools based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1022001.
- [20] Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Pixel-based mask optimization via particle swarm optimization algorithm for inverse lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 97801V.
- [21] Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Fast heuristic-based source mask optimization for EUV lithography using dual edge evolution and partial sampling[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22778-22795.
- [22] Chen G D, Li S K, Wang X Z. Source mask optimization using the covariance matrix adaptation evolution strategy[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33371-33389.
- [23] Cheng R, Jin Y C. A social learning particle swarm optimization algorithm for scalable optimization[J]. *Information Sciences*, 2015, 291: 43-60.