

基于光刻胶三维形貌的光刻多参数联合优化方法

茅言杰^{1,2}, 李思坤^{1,2*}, 王向朝^{1,2**}, 韦亚一³, 陈国栋^{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;

³中国科学院微电子研究所集成电路先导工艺研发中心, 北京 100029

摘要 多参数联合优化是光刻分辨率增强技术的发展方向。提出了一种以光刻胶三维形貌差异为评价目标的光刻多参数联合优化方法。以多个深度位置的光刻胶图形误差为目标函数,对光源、掩模、投影物镜波前、离焦量和曝光剂量进行联合优化,提高了光刻胶图形三维形貌的质量。为获得较高的优化效率,采用自适应差分进化算法实现光源和掩模的优化,并针对其他参数的特点,采用不同优化方法进行优化。对密集线、含有交叉门的复杂掩模图形和静态随机存储器中的典型图形进行了仿真验证,可用焦深的最大值分别达到 237 nm、115 nm 和 144.8 nm,曝光宽容度的最大值分别达到 18.5%、12.4% 和 16.4%。与基于空间像的光源掩模投影物镜联合优化技术相比,所提方法明显扩大了工艺窗口。

关键词 光学制造; 光刻; 分辨率增强技术; 光源掩模优化; 光刻胶

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0422002

Multi-Parameter Joint Optimization for Lithography Based on Photoresist Topography Model

Mao Yanjie^{1,2}, Li Sikun^{1,2*}, Wang Xiangzhao^{1,2**}, Wei Yayi³, Chen Guodong^{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;

³Integrated Circuit Advanced Process R&D Center, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Multi-parameter joint optimization is a trend in lithography resolution enhancement techniques. A multi-parameter joint optimization method for lithography based on the 3D topography difference of photoresist was proposed herein. By using the error of photoresist pattern at multiple depth positions as an objective function, the light source, the mask, the wavefront of the projection objective lens, the defocusing amount, and the exposure dose were jointly optimized, which improved the quality of the 3D topography of photoresist pattern. To obtain higher optimization efficiency, the adaptive differential evolution algorithm was adopted to optimize the light source and the mask, and different optimization methods were employed based on the characteristics of other parameters. The simulation results of dense lines, complex mask patterns with cross gate structure, and typical patterns in the static random access memory show that the maximum possible focal depth is 237 nm, 115 nm, and 144.8 nm, and the maximum exposure latitude is 18.5%, 12.4%, and 16.4%, respectively. Compared with the joint optimization technology of light source mask projection objective lens based on aerial image, the proposed method provides much larger process window.

Key words optical fabrication; lithography; resolution enhancement technique; source mask optimization; photoresist

OCIS codes 220.4610; 220.3740; 110.2945; 110.1758

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-21; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1434100)、国家科技重大专项(2017ZX02101004-002)

* E-mail: lisikun@siom.ac.cn; ** E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

1 引 言

光刻机是极大规模集成电路制造的关键设备^[1]。分辨率是光刻机的关键技术指标之一^[2]。分辨率增强技术(RET)是增强光刻分辨率的重要手段。传统分辨率增强技术包括离轴照明技术、相移掩模和光学邻近效应校正技术等^[2]。这些技术主要针对光源或掩模图形参数进行优化。2001年, Rosenbluth 等^[3]提出了光源与掩模联合优化(SMO)技术,该技术同时优化光刻机照明光源与掩模图形,相比单独优化光源或掩模,提高了优化自由度,获得了更高分辨率和更大工艺窗口(PW)^[2]。2011年,荷兰 ASML 公司提出的 FlexWave 技术,实现了投影物镜波前的精确控制^[4],为投影物镜波前的优化提供了硬件基础。2012年, Fühner 等^[5]提出了基于遗传算法的光源掩模投影物镜联合优化(SMPO)技术。2017年,王磊等^[6]提出了基于粒子群算法的 SMPO,提高了优化速度。SMPO 在 SMO 的基础上增加了投影物镜波前的优化,进一步提高了光刻成像质量。多参数联合优化在具有较高优化自由度的同时综合利用了各种参数对成像质量影响的相互作用,进一步提高了光刻成像质量。光刻分辨率增强技术由单参数独立优化向多参数联合优化的方向发展^[7]。优化效率是影响分辨率增强技术实施效果的重要因素之一。由于多参数联合优化技术需要进行大量成像仿真计算,除了尽量提高仿真模型的速度之外^[8-10],尽量减少优化过程中成像仿真的次数也是提高优化效率的有效方法。优化算法是决定先进分辨率增强技术优化效果与效率的关键因素之一^[11]。已有分辨率增强技术中使用的优化方法主要有水平集法^[12]、共轭梯度法^[13]、遗传算法^[14-15]、粒子群算法^[6]、增广拉格朗日法^[16]等。现有的 SMO、SMPO 等同时优化较多参数的技术一般使用一种算法实现全部参数的优化,未考虑优化变量的特性,优化速度有待提升。

随着图形特征尺寸(CD)的不断减小,曝光剂量、离焦量、负显影以及后烘过程中光酸在垂直方向的扩散都会对光刻胶的表面形貌产生影响并引起明显的光刻胶三维效应,例如顶部光刻胶损失(Top loss)、底部的脚状图形(Bottom footing)等^[17-18]。垂直方向部分光刻胶的缺失导致光刻胶的抗刻蚀能力下降^[19],使得刻蚀后图形 CD 与光刻胶图形 CD 不一致,刻蚀到硅片上的图形特征尺寸均匀性(CDU)降低,甚至产生桥接等缺陷^[18]。在光刻胶显

影后的检查(ADD)阶段无法发现这些问题^[20],通常只有在刻蚀后检查(AEI)时才能发现^[21],但由于已对硅片进行了刻蚀,此时已无法返工。因此分辨率增强技术中需要考虑光刻胶三维形貌的影响。传统的二维光刻胶模型,仅在某一给定深度位置评价光刻胶轮廓的质量,无法表征光刻胶的三维效应,例如仅采用光刻胶底部轮廓时无法表征光刻胶顶部损失^[17]。在先进光刻工艺中,特别是 28 nm 及更高工艺节点^[20],需要使用三维光刻胶模型对光刻胶表面形貌进行仿真,保证三维光刻胶形貌具有较高的质量,避免光刻胶的三维效应降低刻蚀后的 CDU 并引起缺陷。2018年,荷兰 ASML 公司预测 5 nm 及更高节点需要光刻与刻蚀联合优化技术^[22]。

本文提出了一种光刻机多参数联合优化方法。一方面在 SMPO 的基础上增加曝光剂量和优化离焦量,增加优化变量数目,提高优化自由度。另一方面,以多个深度位置的光刻胶图形误差为目标函数,实现对光刻胶三维形貌的优化,提高三维光刻胶形貌的质量。同时,针对各个待优化参数的特点,分别采用差分进化算法、非线性最小二乘算法和一维搜索算法中的二分法对光源、掩模、投影物镜波像差、离焦量、剂量进行迭代优化,提高优化效率。采用典型的线空图形和含有交叉门的复杂掩模图形进行验证。与现有的 SMPO 技术相比,所提方法可获得更优的光刻成像质量及质量更佳的光刻胶三维形貌,减小光刻胶三维效应对后续工艺的影响。

2 光刻成像模型与像质评价方法

浸没式光刻机的成像系统示意图如图 1 所示^[2],光源发出的光通过照明系统被整形调制后均匀照射到掩模上并发生衍射,衍射光通过投影物镜,最终在光刻胶内成像。

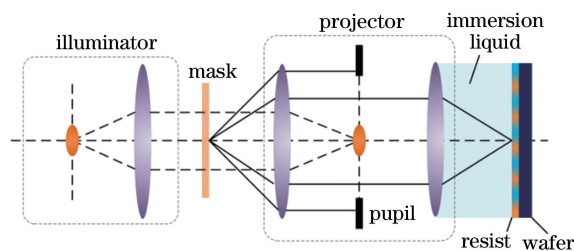


图 1 光刻系统成像示意图

Fig. 1 Schematic of lithographic projection system

根据阿贝成像理论,光刻胶内的光强分布^[2]为

$$I(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} S(f, g) H(f + f', g + g', z_i) H^*(f + f'', g + g'', z_i) \cdot \\ O(f', g') \mathbf{M}(f + f', g + g', z) \mathbf{J}_{\text{Jones}}(f + f', g + g') \mathbf{E}_0 \cdot \\ O^*(f'', g'') \mathbf{M}^*(f + f'', g + g'', z) \mathbf{J}_{\text{Jones}}^*(f + f'', g + g'') \mathbf{E}_0^* \cdot \\ \exp\{-j2\pi[(f' - f'')x + (g' - g'')y]\} df dg df' dg' df'' dg'', \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像平面坐标; z_i 为 z 方向的离焦量; z 为光刻胶内 z 方向的深度; (f, g) , (f', g') 与 (f'', g'') 均为光瞳面归一化坐标; $S(f, g)$ 为有效光源强度分布; $O(f, g)$ 为掩模透射谱; j 为虚数单

位; $*$ 表示复共轭; \mathbf{M} 为投影物镜的传递矩阵, 描述光瞳面和像面电场的转换关系; \mathbf{E}_0 为入射光向量; $\mathbf{J}_{\text{Jones}}$ 为琼斯矩阵, 描述投影物镜的偏振像差; $H(f, g, z_i)$ 为投影物镜的光瞳函数。

$$H(f, g, z_i) = \sqrt{\frac{1 - n_{\text{image}}^2 h \cdot (f^2 + g^2)}{1 - (f^2 + g^2)}} \exp[j2\pi\Phi(f, g)] \exp(-j2\pi k_z z_i) H_0(f, g), \quad (2)$$

式中: n_{image} 为像方折射率; k_z 为波矢量在 z 方向的分量; h 为投影物镜放大倍率; $H_0(f, g)$ 为投影物镜光阑函数; $\Phi(f, g)$ 为波像差。波像差可用泽尼克多项式进行分解^[2]:

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

式中: (ρ, φ) 为直角坐标 (f, g) 对应的极坐标, $\rho = \sqrt{f^2 + g^2}$, $\varphi = \arctan(g/f)$; Z_j 为第 j 阶泽尼克多项式; c_j 为泽尼克系数; J 为泽尼克像差的阶数。对于光刻胶内像, \mathbf{M} 矩阵为

$$\mathbf{M}(f, g) = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{yx} \\ M_{xy} & M_{yy} \\ M_{xz} & M_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\perp} P_{x\perp x} + F_{\parallel}^{xy} P_{x\parallel x} & F_{\perp} P_{y\perp x} + F_{\parallel}^{xy} P_{y\parallel x} \\ F_{\perp} P_{x\perp y} + F_{\parallel}^{xy} P_{x\parallel y} & F_{\perp} P_{y\perp y} + F_{\parallel}^{xy} P_{y\parallel y} \\ F_{\parallel}^z P_{x\parallel z} & F_{\parallel}^z P_{y\parallel z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: P 为光刻胶上方入射光的电场强度, F 为光刻胶透射光电场强度与入射光电场强度的比值。

$$F_{\perp} = \frac{\tau_{\text{Stacks}\perp}}{\tau_{\text{subStacks}\perp}} \{ \exp[jk_z(d-z)] + \rho_{\text{subStacks}\perp} \exp \cdot \\ [-jk_z(d-z)] \}, \quad (5)$$

$$F_{\parallel}^{xy} = \frac{\tau_{\text{Stacks}\parallel}}{\tau_{\text{subStacks}\parallel}} \{ \exp[jk_z(d-z)] - \rho_{\text{subStacks}\parallel} \exp \cdot \\ [-jk_z(d-z)] \}, \quad (6)$$

$$F_{\parallel}^z = \frac{\tau_{\text{Stacks}\parallel}}{\tau_{\text{subStacks}\parallel}} \{ \exp[jk_z(d-z)] + \rho_{\text{subStacks}\parallel} \exp \cdot \\ [-jk_z(d-z)] \}, \quad (7)$$

式中: d 为光刻胶厚度; τ 和 ρ 分别表示膜系的透射

系数和反射系数, 可采用传输矩阵法进行计算^[2]; 下标 Stacks 表示与整个光刻胶堆栈膜系有关的量; 下标 subStacks 表示与光刻胶以下的膜系有关的量; 下标 \perp 和 \parallel 分别表示横电 (TE) 偏振和横磁 (TM) 偏振。

胶内像通过曝光、后烘、显影等流程, 最终形成光刻胶像。为了消除光刻胶内部垂直方向光酸扩散效应的影响, 使光刻胶内不同深度的平面可采用相同的阈值模型进行描述, 采用卷积模型表示上述效应^[19]:

$$q(x, y, z) = I_r(x, y, z) * g(\sigma_z, z), \quad (8)$$

式中: $I_r(x, y, z)$ 为胶内像, 表示曝光期间光刻胶内的光强分布; $q(x, y, z)$ 为光刻胶内光酸的浓度分布; $g(\sigma_z, z)$ 为卷积核函数; 标准差 σ_z 为与扩散长度有关的量。至此, 光刻胶内任意深度的光刻胶轮廓可采用阈值模型进行计算。为了保证优化过程的连续性, 采用 Sigmoid 函数代替阈值模型进行优化^[23-24]:

$$I_{\text{Profile}}(x, y, z) = \text{Sig}[q(x, y, z)] = \frac{1}{1 + \exp\{-\alpha[q(x, y, z) - t_r]\}}, \quad (9)$$

式中: $I_{\text{Profile}}(x, y, z)$ 为光刻胶像, 表示显影后的光刻胶轮廓; t_r 为光刻胶阈值; α 为光刻胶灵敏度, 由光刻胶本身的性质决定。

为了对光刻成像质量进行优化, 需要对光刻胶像进行评价。常见的评价函数有特征尺寸、图形误差 (PE)、边缘位置误差 (EPE)、边缘强度误差 (EIE) 等^[25]。其中, 图形误差^[26]表示为

$$E_{\text{Pattern}} = \| I_{\text{Profile}} - I_{\text{Target}} \|_2^2, \quad (10)$$

式中： I_{Target} 为目标图形。 E_{Pattern} 值越小，表示显影后的光刻胶轮廓与目标图形的差异越小。

3 基于光刻胶三维形貌的多参数联合优化方法

光刻胶三维形貌为光刻过程的最终结果，直接影响后续工艺。为了实现对光刻胶三维形貌的优化，本文采用多个深度的光刻胶像图形误差的和作为评价函数：

$$F = \sum_{z_i=1}^{N_{\text{Profile}}} E_{\text{Pattern}}(z_i) = \sum_{z_i=1}^{N_{\text{Profile}}} \| I_{\text{Profile}}(z_i) - I_{\text{Target}} \|^2, \quad (11)$$

式中： $I_{\text{Profile}}(z_i)$ 为光刻胶内深度为 z_i 的光刻胶像； N_{Profile} 为采样的深度数量。

采用(11)式后，多参数联合优化问题表示为

$$[\rho_{\text{Source}}, \rho_{\text{Mask}}, \rho_{\text{Pupil}}, \rho_{\text{Focus}}, \rho_{\text{Doce}}] = \text{argmin}(F), \quad (12)$$

式中： $\rho_{\text{Source}}, \rho_{\text{Mask}}, \rho_{\text{Pupil}}, \rho_{\text{Focus}}, \rho_{\text{Doce}}$ 分别表示与光源、掩模、投影物镜光瞳、离焦量和剂量相关的光刻

机可调参数。即寻找使得评价函数 F 的最小的可调参数 ρ 。

3.1 优化变量编码方式

光源与掩模均采用像素化方式进行描述。编码方式如图 2 所示，其中照明光源可近似离散化为直角坐标下的一组点光源集合^[27]，编码后的光源向量为

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_{N_{\text{source}}}], \quad (13)$$

式中： s_i 为第 i 个点光源的强度，采用最大值归一化后，点光源强度 $s \in [0, 1]$ 。为了保证光源的对称性，仅对第一象限、 f 轴正半轴、 g 轴正半轴和原点的光源点进行编码，其他象限的光源根据 f 轴和 g 轴对称生成。掩模编码类似，编码后的掩模向量为

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_{N_{\text{mask}}}], \quad (14)$$

式中： m_i 为第 i 个掩模像素的透过率。本文采用自适应差分进化算法(JADE)实现掩模优化。考虑到差分进化算法对连续问题具有好的优化性能，优化变量采用实数表示，在计算评价函数时进行二值化处理。

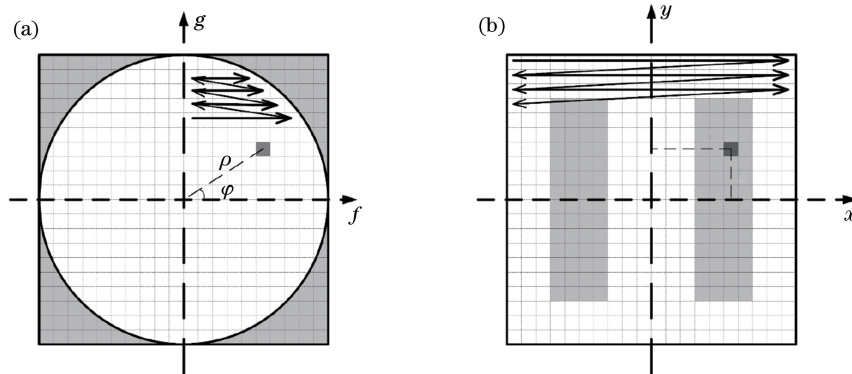


图 2 光源编码与掩模编码。(a)光源编码；(b)掩模编码

Fig. 2 Coding scheme of source and mask. (a) Coding scheme of source; (b) coding scheme of mask

3.2 优化算法与流程

为了最大程度地提高优化效率，在迭代流程中，针对不同优化变量的特性采用不同的优化算法进行优化。光源和掩模的优化变量较多，特别是在全芯片范围内应用时存在海量优化参数。对于先进节点的光刻成像通常采用矢量成像模型，模型复杂。针对这类问题的优化，无需计算梯度信息的启发式算法具有先天的优势。文献[28]的研究表明，与粒子群算法和遗传算法相比，自适应差分进化算法具有收敛速度快，且无需额外参数转换的优势。该算法的主要流程与遗传类似，都包含变异、交叉和选择三部分，其中交叉和选择流程基本一致，JADE 采用的变异算子^[29]为

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + \omega(\mathbf{x}_{\text{beste}} - \mathbf{x}_i) + \omega(\mathbf{x}_{r_1} - \mathbf{x}_{r_2}), \quad (15)$$

式中： \mathbf{x}_i 为种群中第 i 个个体； $\mathbf{x}_{r_1}, \mathbf{x}_{r_2}$ 分别为种群中随机选出的与 \mathbf{x}_i 不同的个体， r 为随机选取的不大于种群规模的正整数； \mathbf{v}_i 为测试向量； $\mathbf{x}_{\text{beste}}$ 为从种群评价函数最小的前 $\epsilon \times 100\%$ 个体中随机选取的个体； ω 为自适应参数，变异算子示意图如图 3 所示。与遗传算法的随机变异相比，差分进化算法采用向量差分的方式计算变异方向，进化方向明确，搜索范围主要集中在当前最优值附近，具有较强的局部搜索能力。此外，JADE 的自适应参数的设计有效提高了差分进化算法的收敛速度，是目前公认的性能较好的差分进化算法^[29]。对于像素化表征的光源掩模优化问题，多数变量在迭代初期即达到最

大值或最小值,后期主要集中在少数变量最优值的搜索,因此采用 JADE 对光源掩模进行优化。剂量和离焦量为单变量,并且在优化范围内局部极小解通常接近全局最优值,为了最大程度地减少成像模型的调用次数,采用线性搜索算法中的二分法进行优化。投影物镜优化中,优化变量为拟合投影物镜波像差的泽尼克多项式系数。为了保证投影物镜光瞳的对称性,仅选取各阶球差作为优化变量。由于变量相对较少(一般少于 20 个),且无快速算法,考虑到(11)式为典型的非线性最小二乘问题,因此采用 Levenberg-Marquardt 算法对波像差进行优化,相比梯度算法和启发式算法,对成像仿真的调用次数更少,成像占用的计算开销减少,优化速度提高。需要说明的是,此处离焦量(初级球差 z_4)虽然也是投影物镜波像差的一部分,但优化范围与其他项差异较大,对成像质量影响较大,因此单独作为调谐参数进行优化。

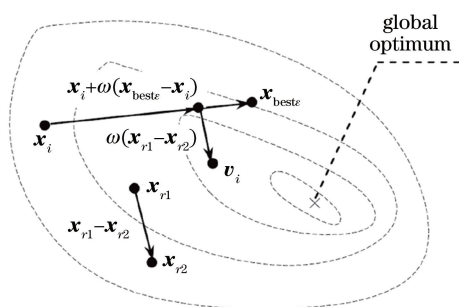


图 3 JADE 变异算子示意图

Fig. 3 Illustration of the JADE mutation strategy

基于光刻胶形貌的多参数联合优化方法流程图如图 4(a)所示。整个优化流程包括成像模型的初始化、优化引擎的初始化、剂量优化、离焦量优化、掩模优化、投影物镜优化和光源优化。首先初始化成像模型,设定光源、掩模、剂量、离焦量和投影物镜波像差参数的初始值。然后设定各参数的优化范围与各优化步骤的停止判据,并分别对光源掩模优化采用的 JADE 算法进行初始化,将成像模型的光源和掩模编码后的向量作为 JADE 的一个个体的初始值,其他个体的值则随机生成。初始化完成后依次进行剂量优化、离焦量优化、掩模优化、投影物镜优化和光源优化,直到满足停止判据。

在剂量、离焦量优化中,首先将成像模型当前的剂量或离焦量值设定为初始值,然后根据参数的优化范围采用二分法迭代计算评价函数最小的参数值,满足停止判据时输出最优值,最后将成像模型的剂量或离焦量参数更新为输出的最优值。

对于投影物镜波前的优化,以当前成像模型的波像差参数为初始值,采用 Levenberg-Marquardt 算法迭代计算最小二乘解,满足停止判据时输出当前最优的波像差值并更新成像模型的波像差参数。

光源和掩模的优化流程如图 4(b)所示。优化开始后依次进行变异、交叉和选择操作,直到满足停止判据,输出最优结果并更新成像模型的光源或掩模参数。选择操作的流程如图 4(c)所示,首先解码生成光源或掩模,然后计算评价函数,最后根据选择算子选取评价函数较小的个体。为了提高优化效率,加快收敛速度,优化开始前直接加载上一轮优化的全部种群状态,优化结束后保存当前的种群状态以备下一轮优化使用。

在参数优化过程中需要反复调用成像模型计算评价函数。评价函数的计算流程如图 4(d)所示。首先设定当前优化参数的值,调用成像模型计算光刻胶内像,然后计算光刻胶轮廓,最后计算评价函数。成像模型不仅用于计算评价函数,也保存着当前优化参数的最优值,因此在完成全部参数的优化后,将当前成像模型的光源、掩模、波像差、离焦量、剂量参数作为优化后的参数输出。

整个优化流程均采用迭代次数或者评价函数阈值作为停止判据,当迭代次数或者评价函数阈值达到设定值时,停止优化。

4 仿真实验

为了验证本文提出的光刻机多参数联合优化方法的有效性,首先采用特征尺寸为 45 nm 的线空掩模图形进行仿真验证。照明光源波长 $\lambda = 193.368$ nm,投影物镜数值孔径为 1.35,浸液折射率设置为 1.44。光刻胶堆栈数据如表 1 所示(n 和 k 分别为材料复折射率的实部与虚部),光刻胶为正胶,底部抗反射层厚度已经过优化,反射率最小。光刻胶模型灵敏度参数 $\alpha = 50$ 。光刻胶阈值 t_r 由光刻胶特性和曝光剂量共同确定。本节通过优化 t_r 实现剂量优化。初始值设为 $t_r = 0.5$,阈值优化范围限制为 $[0.2, 0.8]$ 。初始离焦量为 -50 nm,优化范围为 $-100 \sim 0$ nm。差分进化算法中自适应参数设定为 0.1,最佳个体选取比例为 5%,种群规模为 50。停止判据中光源、掩模、投影物镜、离焦、剂量优化的最大迭代次数依次为 100、100、10、10、10,共计迭代 5 轮,总迭代次数最大值为 1150。掩模图形如图 5(a)所示,特征尺寸为 45 nm,图形实际大小为 $720 \text{ nm} \times 720 \text{ nm}$ 。掩模类型为 6% 的衰减相移掩

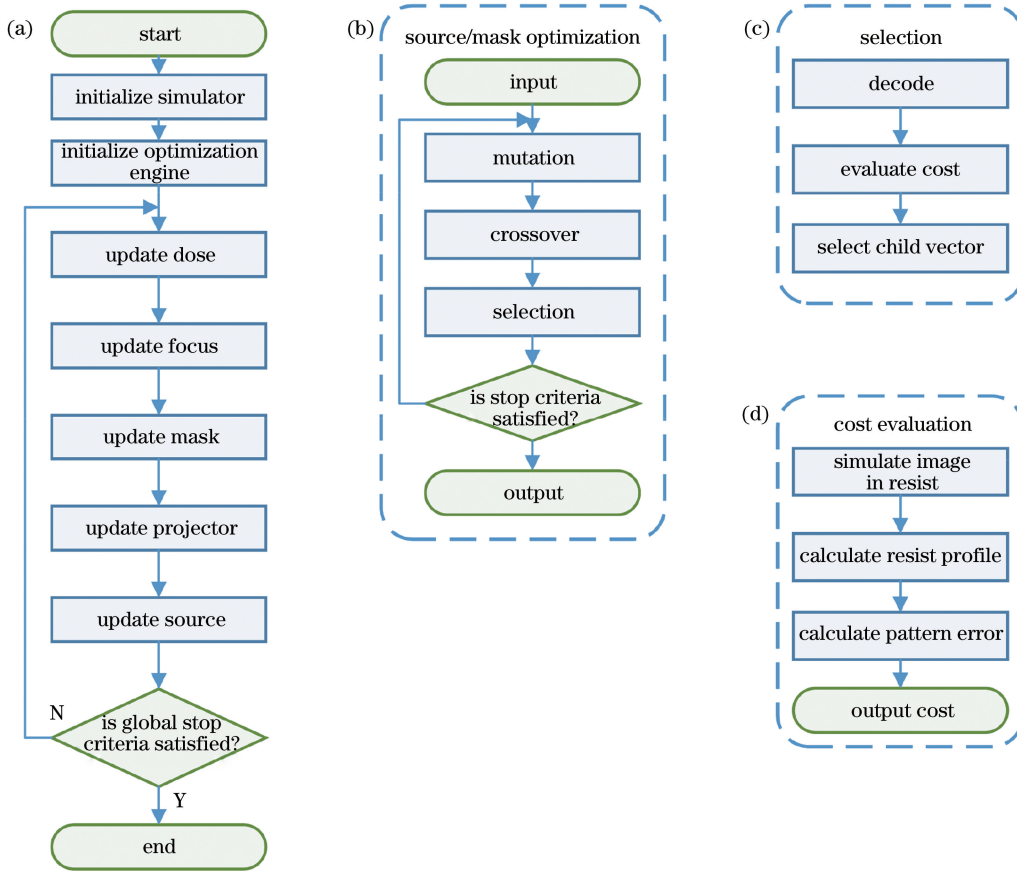


图 4 优化流程图。(a)总流程图;(b)光源掩模优化流程图;(c)选择操作流程图;(d)评价函数计算流程图
Fig. 4 Workflow of proposed method. (a) General flow chart; (b) source or mask optimization; (c) selection operation; (d) evaluation function calculation

模,采样网格为 81×81 。由于掩模关于 x/y 轴对称,仅对第一象限进行编码,其余区域通过对称操作生成。初始光源设为环形照明,内相干因子为 0.6,外相干因子为 0.8。本节仿真中光源均采用切向偏振。光源采样网格为 51×51 。投影物镜优化项为 $z_9, z_{16}, z_{25}, z_{36}$,范围设置为 $[-0.1\lambda, 0.1\lambda]$ 。初始投影物镜光瞳如图 5(c)所示,不含任何波像差。(8)式中核函数 $g(\sigma_z, z)$ 采用高斯函数,设置 $\sigma_z = 20$ nm。目标函数采用光刻胶内高度为 10%、50%、90%三个位置处(即光刻胶内距离底部抗反射层 9.45 nm、47.25 nm、85.05 nm 的 xy 平面内)的光刻胶轮廓的图形误差的和。采用基于最佳焦面空间像(Aerial image, AI)的光源掩模投影物镜联合优化方法(以下简称 SMPO-AI)进行对比。空间像成像模型使用第 2 节中描述的矢量成像模型。光刻胶轮廓及三维形貌的计算采用文献[30]公开的简化显影模型计算。

采用所提方法优化后的掩模图形、照明光源和投影物镜光瞳如图 6 所示,优化后的光刻胶阈值为

0.3867,离焦量为 -67.81 nm。采用 SMPO-AI 优化后的掩模图形、照明光源和投影物镜光瞳如图 7 所示。两种方法生成的照明光源强度分布与二极照明类似,这是由于掩模透过率变化主要发生在水平方向。根据光刻成像基本原理可知,成像质量较高的照明模式应为类二极照明。图 6(a)与图 7(a)为优化后掩模图形,对比两种方法的优化结果,可以看出所提方法优化后的掩模非图形区域特征相对集中,已呈现出亚分辨率辅助图形(SRAF)的特点^[2](例如图 6(a)虚线框中的部分)。

表 1 光刻胶堆栈数据

Table 1 Photoresist stack data

Layer	Medium	n	k	Thickness /nm
1	Resist	1.719	0.3643	94.5
2	SiARC	1.64	0.15	32.0
3	SOC	1.49	0.3	200
4	Substrate	0.883	2.778	$+\infty$

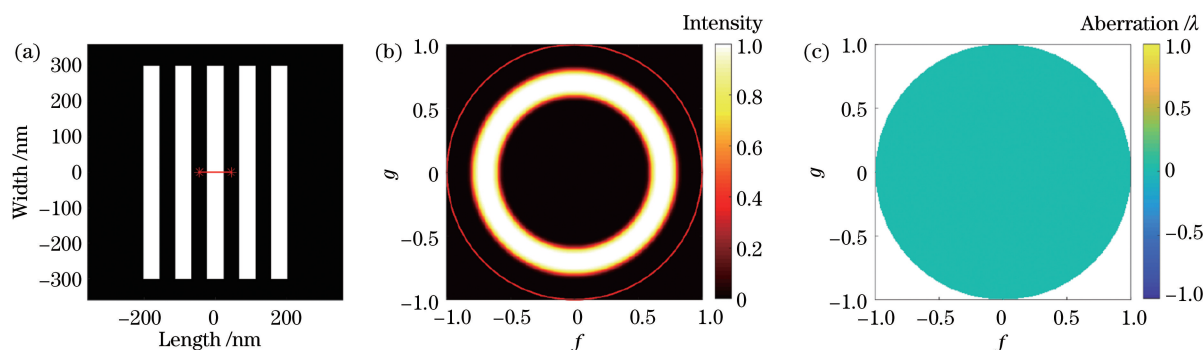


图 5 待优化目标的初始状态。(a)掩模;(b)光源;(c)投影物镜光瞳

Fig. 5 Initial status of objects to be optimized. (a) Mask; (b) source; (c) projector pupil

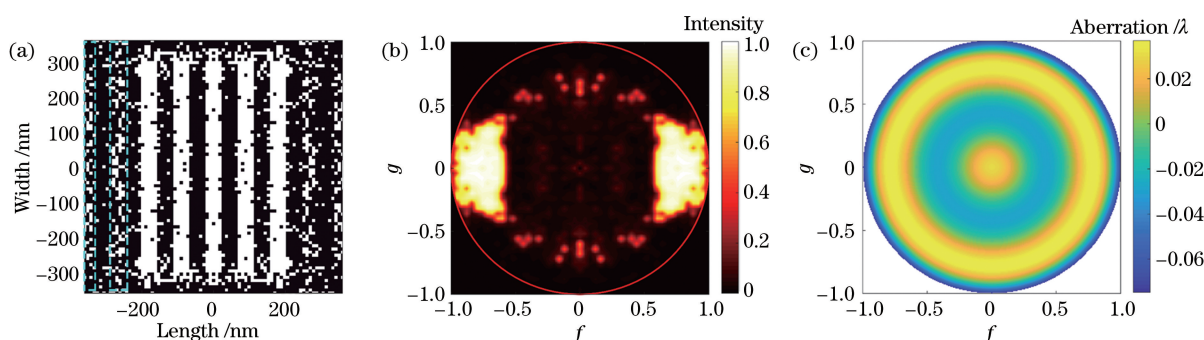


图 6 所提方法优化后的掩模、光源、投影物镜光瞳。(a)掩模;(b)光源;(c)投影物镜光瞳

Fig. 6 Mask, source and projector pupil after optimization by proposed method. (a) Mask; (b) source; (c) projector pupil

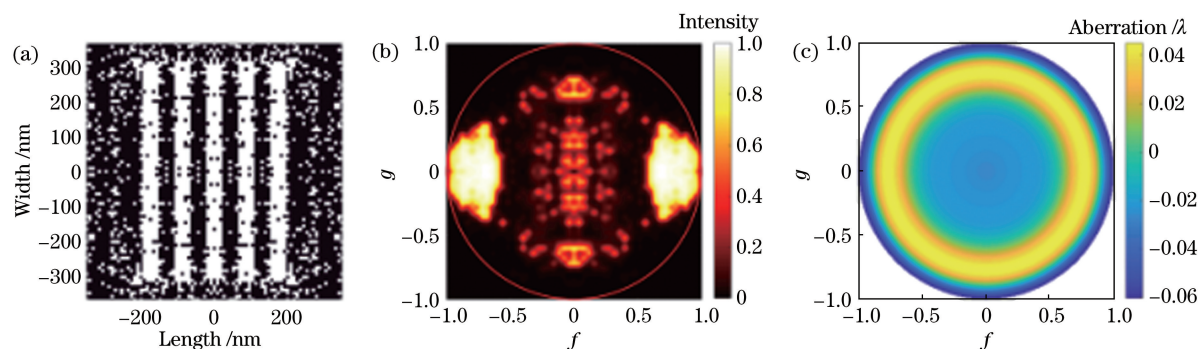


图 7 SMPO-AI 优化后的掩模、光源、投影物镜光瞳。(a)掩模;(b)光源;(c)投影物镜光瞳

Fig. 7 Mask, source, and projector pupil after optimization by SMPO-AI. (a) Mask; (b) source; (c) projector pupil

图 8 和图 9 分别为两种方法优化前后的光刻胶最上层胶内像和光刻胶轮廓。可以看出,优化后光刻胶内像和光刻胶轮廓的质量均有明显提升。图 10 为光刻胶截面的轮廓,可以看出,经两种方法优化后,光刻胶表面轮廓非常相似,但是 SMPO-AI 由于未考虑光刻胶三维效应,随着深度的增大,特征尺寸迅速减小,光刻胶侧壁倾角偏小。而采用本方法优化后,在光刻胶深度范围内,特征尺寸基本一致,侧壁角度较大,三维光刻胶形貌质量更高。

图 11 为两种方法的收敛曲线。优化前 SMPO-AI 和所提方法的评价函数值分别为 516.4 和 1796.4,优化后评价函数分别为 43.9 和 253.2,分别

下降 91.5% 和 85.9%,表明优化后图形误差显著降低,成像质量有了明显的提升。由于所提方法采用三个高度位置的光刻胶图形误差的和为评价函数,因此在相同设置的条件下,评价函数的值约为 SMPO-AI 的三倍。两种方法在迭代初期评价函数均快速下降,随着迭代的进行,下降速度逐渐趋于平缓,到达最大迭代次数时,均趋于收敛。

为了验证所提方法具有较快的收敛速度,采用基于 JADE 的多参数联合优化方法进行对比。对比方法采用 JADE 算法优化全部可调参数。在其他参数设置不变的情况下,两种方法的收敛曲线如图 12 所示。在优化时间为 12000 s 时,基于 JADE 的多

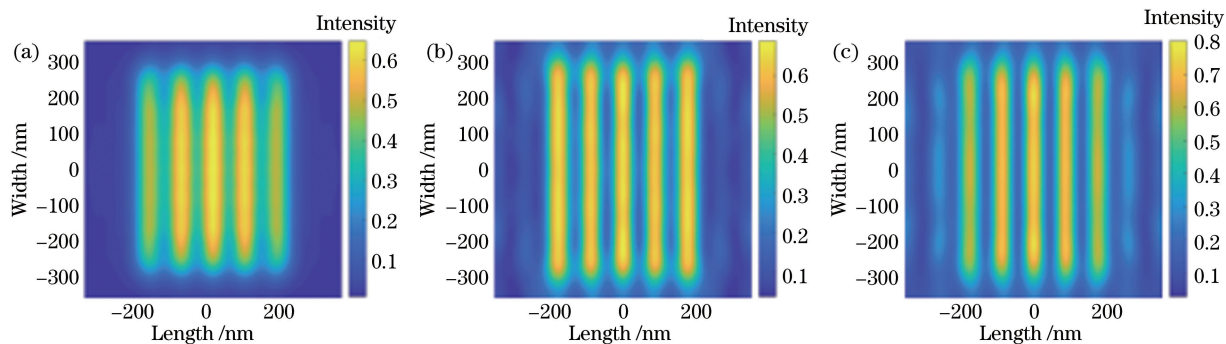


图 8 光刻胶上表面光强分布。(a)优化前;(b) SMPO-AI 优化后;(c)所提方法优化后

Fig. 8 Intensity distributions on photoresist top surface. (a) Before optimization; (b) after optimization by SMPO-AI; (c) after optimization by proposed method

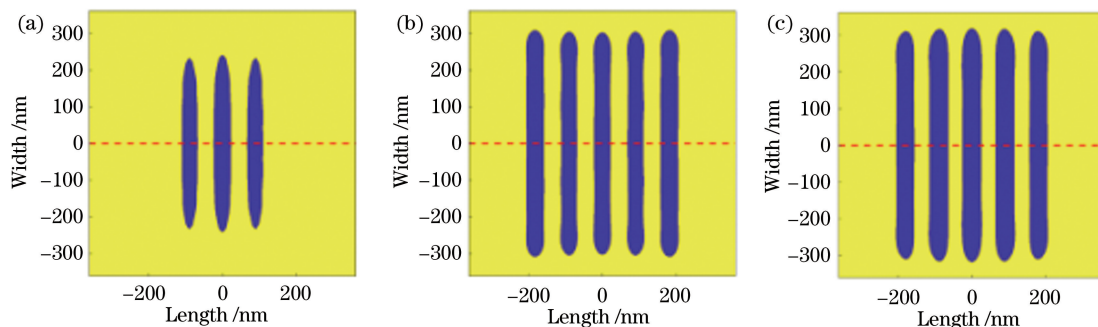


图 9 光刻胶表面轮廓。(a)优化前;(b) SMPO-AI 优化后;(c)所提方法优化后

Fig. 9 Surface profiles of photoresist. (a) Before optimization; (b) after optimization by SMPO-AI; (c) after optimization by proposed method

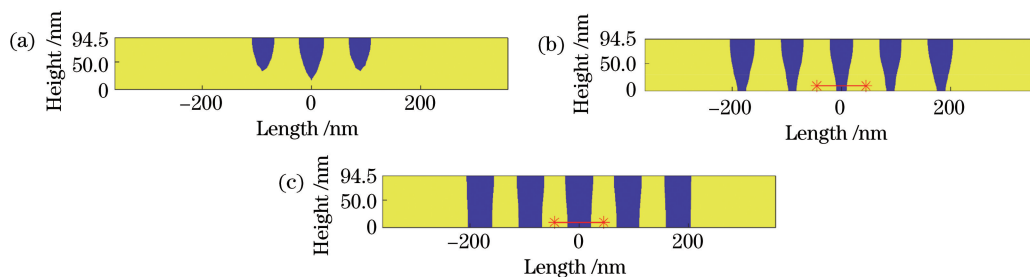


图 10 光刻胶截面轮廓。(a)优化前;(b) SMPO-AI 优化后;(c)所提方法优化后

Fig. 10 Sectional profiles of photoresist. (a) Before optimization; (b) after optimization by SMPO-AI; (c) after optimization by proposed method

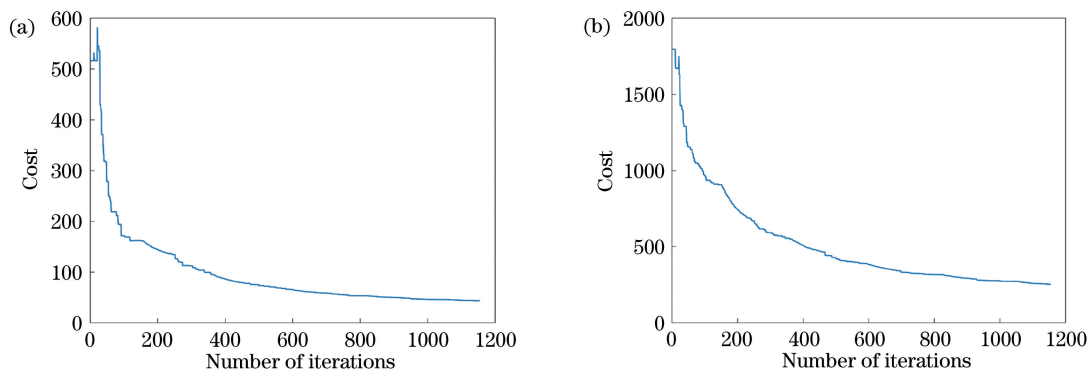


图 11 两种方法的收敛曲线。(a) SMPO-AI;(b)所提方法

Fig. 11 Convergence curves of two methods. (a) SMPO-AI; (b) proposed method

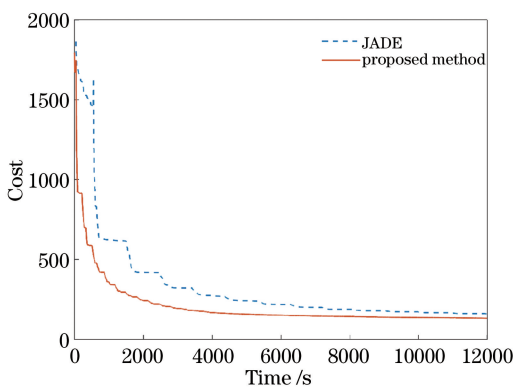


图 12 两种方法的收敛曲线

Fig. 12 Convergence curves of two methods

参数联合优化方法的评价函数为 160.0, 所提方法的评价函数为 132.9。基于 JADE 的联合优化方法到达评价函数为 200 的解的时间为 7197 s, 而所提方法仅需 2846 s, 表明所提方法中采用混合算法的优化速度更快, 优化效率更高。JADE 算法虽然对优化变量较多的光源掩模优化具有收敛速度较快的优点, 但优化方向仍不明确, 在优化变量较少的投影物

镜波前、剂量、离焦时收敛速度较慢。对于物镜波前、剂量、离焦量的优化, 分别采用最小二乘和线性搜索算法具有更高的收敛速度, 并可以有效减少优化过程中进行成像仿真的次数, 提高收敛速度。

为了进一步分析优化结果, 利用图 5(a) 中线段标注位置处(高度为 9.45 nm, 如图 10 中线段所示)进行工艺窗口分析。CD 容限设置为 8% ($45 \text{ nm} \times 8\% = 3.6 \text{ nm}$)。图 13 为优化前后的图形的工艺窗口, 表 2 为优化前后的工艺窗口数据, 其中 DOF 表示焦深, EL 表示曝光宽容度。计算工艺窗口时采用该工艺参数下图形误差最小的光刻胶阈值对应的剂量进行归一化。由图 13 和表 2 可以看出, 两种方法在优化后工艺窗口均显著增大, 采用本文提出的基于光刻胶三维形貌的多参数联合优化方法优化后的最大可用焦深和曝光宽容度分别可达 237 nm 和 18.05%。对比两种方法的优化结果可以看出, 所提方法优化后的参数配置具有更大的工艺窗口, 与基于空间像的 SMPO 相比, 工艺窗口面积增大了 48.1%。

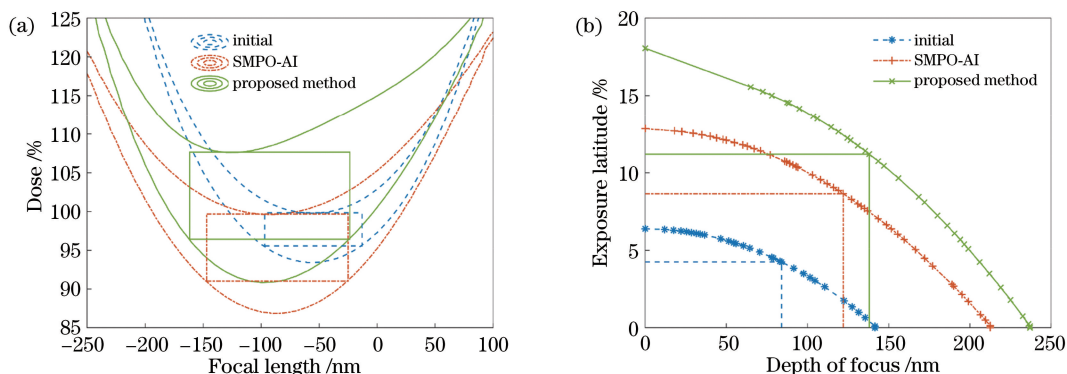


图 13 优化前后的工艺窗口。(a) 工艺窗口; (b) 曝光宽容度随焦深的变化

Fig. 13 Process window before and after optimization. (a) Process window; (b) exposure latitude versus depth of focus

表 2 优化前后的工艺窗口

Table 2 Process window before and after optimization

Process window	Max DOF /nm	Max EL /%	Max PW		PW area /%
			EL /%	DOF /nm	
Initial	141.5	6.4	4.25	84.0	100.0
SMPO-AI	212.5	12.85	8.65	122.0	298.3
Proposed method	237.0	18.05	11.2	138.0	441.7

为了进一步验证所提方法的有效性, 对图 14(a) 所示的含有交叉门的电路的复杂图形进行优化。掩模类型为 6% 的衰减相移掩模, 迭代循环为 10 次, 其他参数不变。优化后的掩模、光源和投影物镜光瞳分别如图 14(b)、(c)、(f) 所示, 优化后的离焦量为 -54.21 nm , 光刻胶阈值为 0.369。图 14(d)、(e) 分别

是优化前后的光刻胶表面轮廓。图 15 为优化前后图 14(d)、(e) 虚线处光刻胶形貌截面图。图形误差从优化前的 1706.6 下降为 203.8, 下降了 88.1%。对比优化前后结果可见优化后光刻胶形貌质量明显提升。优化后光刻胶三维形貌如图 16 所示, 为了清楚地显示三维形貌, 仅画了整个图形的一部分。

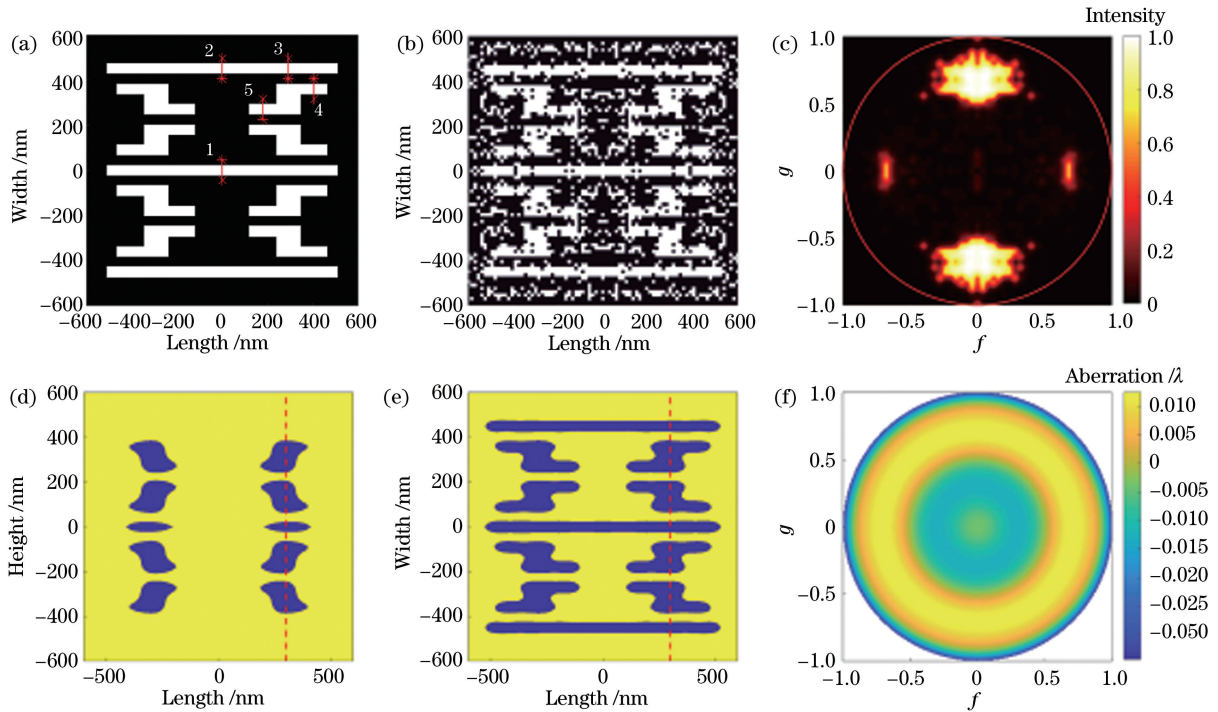


图 14 复杂图形的优化结果。(a)目标图形;(b)优化后掩模图形;(c)优化后光源;(d)优化前光刻胶轮廓;(e)优化后光刻胶轮廓;(f)优化后投影物镜光瞳

Fig. 14 Optimization results of complex pattern. (a) Target pattern; (b) optimized mask; (c) optimized source; profiles of photoresist (d) before optimization and (e) after optimization; (f) optimized projector pupil

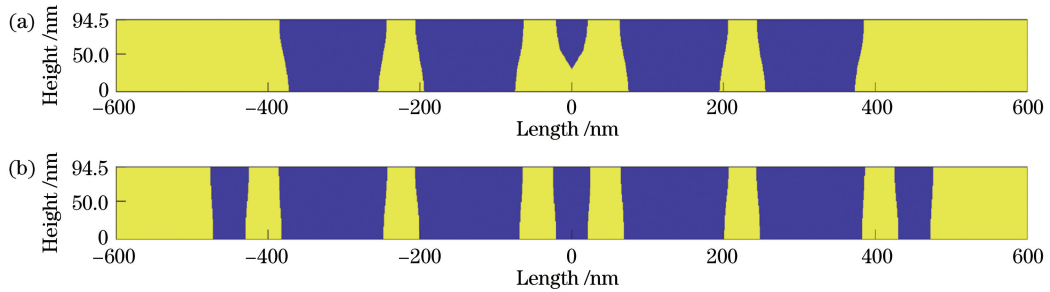


图 15 复杂图形优化前后的光刻胶形貌截面图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 15 Sectional diagrams of photoresist morphology before and after optimization of complex pattern. (a) Before optimization; (b) after optimization

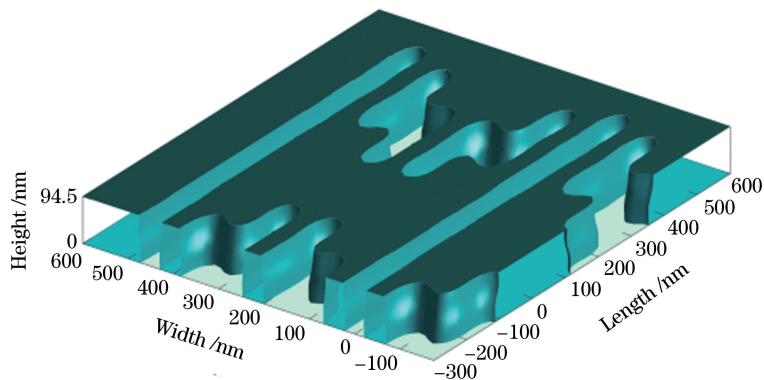


图 16 复杂图形优化后光刻胶形貌

Fig. 16 Photoresist morphology after optimization of complex pattern

对优化后的图形进行重叠工艺窗口分析。利用图 14(a)中 5 条线段标注的位置计算工艺窗口, CD 容限设置为 10% ($45 \text{ nm} \times 10\% = 4.5 \text{ nm}$)。优化前没有重叠工艺窗口。优化后的工艺窗口如图 17 所示, 最大的可用焦深为 115.2 nm, 最大曝光宽容度为 12.36%, 最大工艺窗口的可用焦深和曝光宽容度分别为 67.6 nm 和 8.0%。显然, 所提方法优化后获得了可用工艺窗口。

为了进一步验证所提方法的有效性, 采用静态随机存储器 (SRAM) 中典型掩模图形进行验证, 目标图形如图 18(a) 所示, 图形水平与垂直方向的目标 CD 分别为 100 nm 与 45 nm。掩模类型为

6% 的衰减相移掩模, 迭代循环为 6 次, 其他参数不变。优化后的掩模、光源和投影物镜光瞳分别如图 18(b)、(c)、(f) 所示, 优化后的离焦量为 -81.02 nm , 光刻胶阈值为 0.2。图 18(d)、(e) 分别是优化前后的光刻胶表面轮廓。对优化后的图形进行重叠工艺窗口分析。以图 18(a) 中段线段标注的截面光刻胶厚度 10% 位置计算工艺窗口, CD 容限设置为 10%。优化前没有重叠工艺窗口, 优化后的工艺窗口如图 19 所示, 最大的可用焦深为 144.8 nm, 最大曝光宽容度为 16.4%, 最大工艺窗口的可用焦深和曝光宽容度分别为 84.0 nm 和 10.12%。

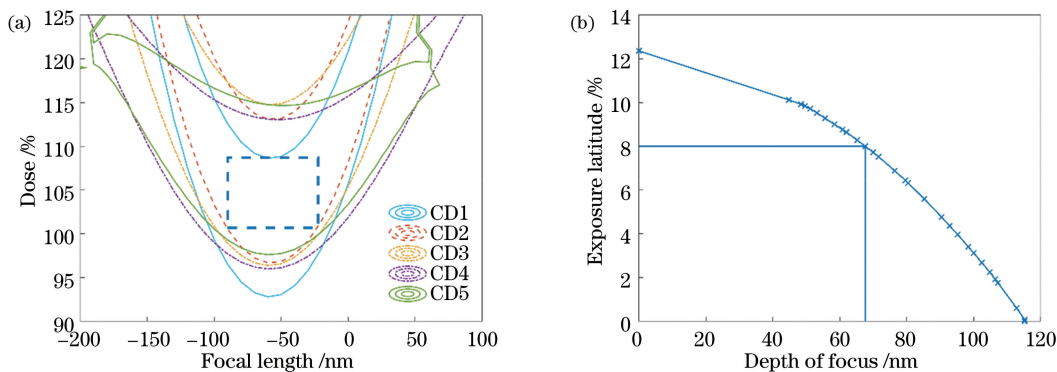


图 17 复杂图形优化后的工艺窗口。(a) 工艺窗口; (b) 曝光宽容度随焦深的变化
Fig. 17 Process window after optimization of complex pattern. (a) Process window; (b) exposure latitude versus depth of focus

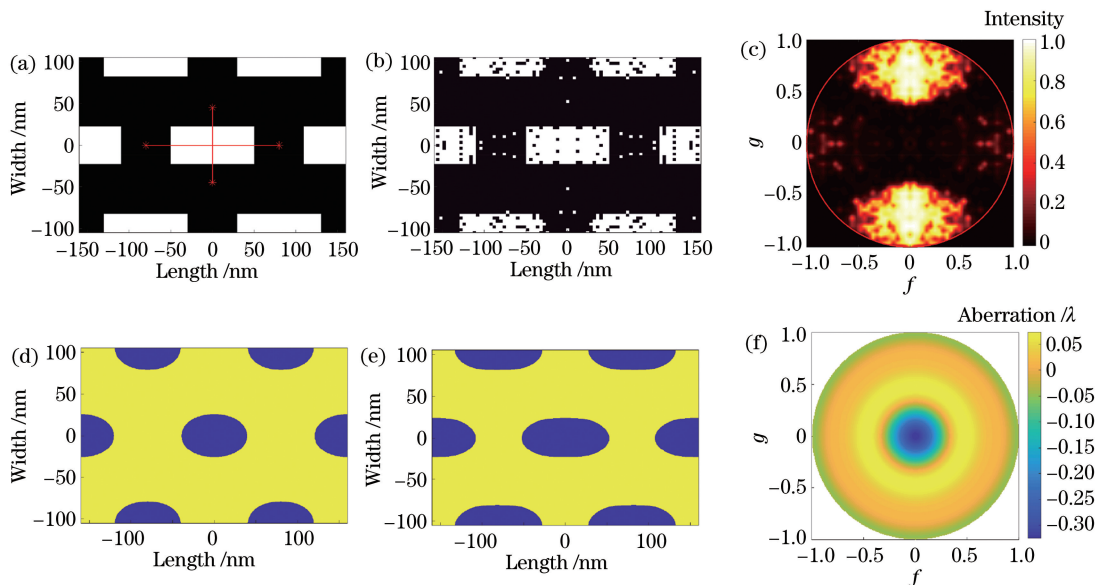


图 18 SRAM 图形的优化结果。(a) 目标图形; (b) 优化后掩模图形; (c) 优化后光源; (d) 优化前光刻胶轮廓; (e) 优化后光刻胶轮廓; (f) 优化后投影物镜光瞳

Fig. 18 Optimization results of SRAM pattern. (a) Target pattern; (b) optimized mask; (c) optimized source; profiles of photoresist (d) before optimization and (e) after optimization; (f) optimized projector pupil

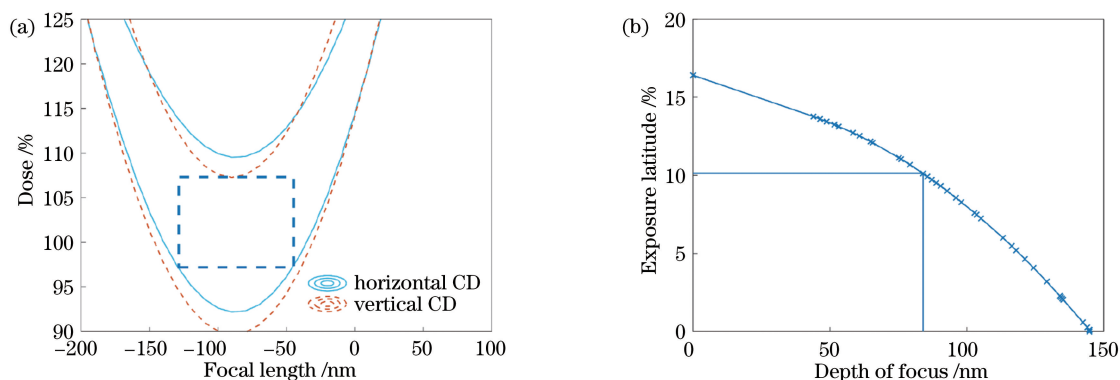


图 19 SRAM 图形优化后的工艺窗口。(a)工艺窗口;(b)曝光宽容度随焦深的变化

Fig. 19 Process window after optimization of SRAM pattern. (a) Process window; (b) exposure latitude versus depth of focus

5 结 论

提出了一种以光刻胶三维形貌差异为评价目标的光刻多参数联合优化方法。以多个深度位置的光刻胶图形误差为目标函数,采用不同算法对光源、掩模、波像差、离焦量和曝光剂量进行联合优化,保证优化后具有较高光刻胶三维形貌质量的同时,具备较快的优化速度。以特征尺寸为 45 nm 的密集线、含有交叉门的复杂掩模图形和静态随机存储器中的典型掩模图形为例进行了仿真验证。优化后可用焦深的最大值分别达到 237 nm、115 nm 和 144.8 nm。曝光宽容度的最大值分别达到 18.5%、12.4% 和 16.4%。与基于空间像的多参数优化方法相比,密集线图形的工艺窗口面积增大了 48%。仿真对比结果还表明该方法有效地提高了优化效率。后续将在优化过程中考虑刻蚀工艺的影响,研究面向 5 nm 及更小工艺节点的光刻刻蚀联合优化技术^[22]。

参 考 文 献

- [1] Semiconductor industry association. International technology roadmap for semiconductors [R]. Washington, DC: SIA, 2015.
- [2] Mack C. Fundamental principles of optical lithography [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [3] Rosenbluth A E, Bukofsky S J, Hibbs M S, et al. Optimum mask and source patterns to print a given shape [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 486-502.
- [4] Staals F, Andryzhyeuskaya A, Bakker H, et al. Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79731G.
- [5] Fühner T, Evanschitzky P, Erdmann A. Mutual source, mask and projector pupil optimization [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 832601.
- [6] 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. 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.
- [7] Fühner T. Artificial evolution for the optimization of lithographic process conditions [D]. Germany: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2013.
- [8] Pomplun J, Zschiedrich L, Burger S, et al. Reduced basis method for source mask optimization [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7823: 78230E.
- [9] Chang J H C, Chen C C P, Melvin L S. Abbe-PCA-SMO: microlithography source and mask optimization based on Abbe-PCA [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764026.
- [10] Mülders T, Domnenko V, Kuchler B, et al. Simultaneous source-mask optimization: a numerical combining method [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7823: 78233X.
- [11] Deng Y F, Zou Y, Yoshimoto K, et al. Considerations in source-mask optimization for logic applications [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401J.
- [12] Pang L Y, Xiao G M, Tolani V, et al. Considering MEEF in inverse lithography technology (ILT) and source mask optimization (SMO) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7122: 71221W.
- [13] Yu J C, Yu P C, Chao H Y. Source optimization incorporating margin image average with conjugate gradient method [J]. Proceedings of SPIE, 2012,

- 8326: 83261W.
- [14] Fuehner T, Erdmann A, Schnattinger T. Genetic algorithms for geometry optimization in lithographic imaging systems [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5558: 29-40.
- [15] Yang C X, Li S K, Wang X. Pixelated source mask optimization based on multi chromosome genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36 (8): 0811001.
杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法 [J]. 光学学报, 2016, 36 (8): 0811001.
- [16] Li J, Liu S Y, Lam E Y. Efficient source and mask optimization with augmented Lagrangian methods in optical lithography [J]. Optics Express, 2013, 21 (7): 8076-8090.
- [17] Finders J. The impact of Mask 3D and Resist 3D effects in optical lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9052: 905205.
- [18] Samy A N, Seltmann R, Kahlenberg F, et al. Role of 3D photo-resist simulation for advanced technology nodes [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831E.
- [19] Zuniga C, Deng Y F. Resist toploss and profile modeling for optical proximity correction applications [J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(4): 043010.
- [20] Fan Y F, Wu C E R, Ren Q, et al. Improving 3D resist profile compact modeling by exploiting 3D resist physical mechanisms [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9052: 90520X.
- [21] Wu C E R, Chang J, Song H, et al. AF printability check with a full-chip 3D resist profile model [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8880: 88802D.
- [22] Cao Y. New trends in computational lithography-data, algorithm and applications [R]. China: IWAPS, 2018.
- [23] Poonawala A, Milanfar P. Mask design for optical microlithography: an inverse imaging problem [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16 (3): 774-788.
- [24] Li S K, Wang X Z, Bu Y. Robust pixel-based source and mask optimization for inverse lithography [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 285-293.
- [25] Peng Y, Zhang J Y, Wang Y, et al. Gradient-based source and mask optimization in optical lithography [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(10): 2856-2864.
- [26] Shen Y J, Jia N N, Wong N, et al. Robust level-set-based inverse lithography [J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5511-5521.
- [27] Pati Y C, 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.
- [28] Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Lithographic tool-matching method based on differential evolution algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (12): 1222002.
茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分进化算法的光刻机匹配方法 [J]. 光学学报, 2019, 39 (12): 1222002.
- [29] Zhang J Q, Sanderson A C. JADE: self-adaptive differential evolution with fast and reliable convergence performance [C]//2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, September 25-28, 2007, Singapore. New York: IEEE, 2007: 2251-2258.
- [30] Liu P, Zhang Z F, Lan S, et al. A full-chip 3D computational lithography framework [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83260A.