

基于差分进化算法的光刻机匹配方法

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

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 提出一种基于差分进化算法和微反射镜阵列(MMA)光源模型的光刻机匹配方法。加入 MMA 光源模型, 利用差分进化算法优化微反射镜光斑分布, 以实现光刻机匹配。与通常用于自由照明系统的光刻机匹配方法相比, 本方法能直接优化 MMA 参数, 有效减小了在 MMA 产生照明光源的过程中出现的匹配误差。以一维线空掩模为匹配目标, 分别对四极照明和自由照明光源进行匹配, 匹配后关键尺寸误差的均方根(RMS)下降了 80% 以上, 与基于遗传算法和粒子群优化算法相比, 本方法的匹配结果更优并具有更快的收敛速度。此外, 本方法还可以有效地控制生成光源的光瞳填充比例, 使匹配前后光源的光瞳填充比例保持一致。

关键词 光学设计; 光学制造; 光刻; 光刻机匹配; 光源优化; 差分进化

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1222002

Lithographic Tool-Matching Method Based on Differential Evolution Algorithm

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

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 Science, Beijing 100029, China

Abstract A lithographic tool-matching method using a differential evolution algorithm and a micro mirror array (MMA) source model is proposed herein. In this method, the MMA source model is added, and the light spots of micro mirrors are optimized by the differential evolution algorithm to achieve lithographic tool-matching. Compared with other matching methods for the freeform illumination system, the proposed method can directly optimize MMA parameters and reduce matching errors in the process of MMA generating light source. A one-dimensional line/space mask is adopted for matching under quasar and freeform illumination. The simulation results show that the root-mean-square of critical dimension error decreases by more than 80% after matching. The proposed method outperforms the matching methods based on the genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm. Further, the convergence is accelerated. Moreover, the proposed method can effectively control the pupil fill ratio and keep it constant before and after matching.

Key words optical design; optical fabrication; lithography; lithographic tool-matching; source optimization; differential evolution

OCIS codes 220.4610; 220.3740; 110.4980

1 引 言

光刻机是极大规模集成电路制造的关键设

备^[1]。光刻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)是增强光刻机分辨率的有效手段, 其中光学邻近效应校正(OPC)、亚

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-23; 录用日期: 2019-08-13

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101004-002)

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

分辨率辅助图形 (SRAF)、光源掩模联合优化 (SMO) 是常用的光刻机分辨率增强技术^[2]。为降低成本、缩短研发周期,在工艺研发阶段,通常只针对一台参考光刻机利用 RET 获得实际生产所需要的掩模图形、照明光源、光刻机参数、工艺参数等配置。完成工艺验证后,将优化后的掩模及对应的工艺参数应用到整个生产过程中^[3]。在实际生产过程中,一种工艺通常由多台甚至是多种型号的光刻机共同参与完成^[4]。不同光刻机的光学临近效应 (OPE) 存在差异,这些差异导致关键尺寸均匀性 (CDU) 降低并使得工艺窗口 (PW) 缩小^[5]。而针对每台光刻机单独应用 RET 成本太高,因此需要对光刻机的曝光系统进行匹配,即通过对光刻机可调参数的微调,保证多台光刻机曝光性能一致。通过光刻机匹配,在使用针对参考光刻机的 RET 方案生成的掩模时,多台光刻机曝光后图形的关键尺寸 (CD) 与参考光刻机保持一致。

光刻机匹配技术分为基于 CD 测量的匹配技术和基于模型的匹配技术^[6]。基于 CD 测量的光刻机匹配技术采用测量的硅片上光刻胶 CD 数据 (临近效应曲线,即线宽随周期变化的曲线) 表征光刻机之间的差异,并计算 CD 对光刻机可调参数的灵敏度及调整值。该技术需要占用较多的光刻机时间和测量时间。基于模型的匹配技术利用光刻机模型与工艺模型计算光刻机差异。He 等^[7] 提出基于光学模型的光刻机匹配技术。基于光学模型的匹配技术利用光刻机光学模型进行可调参数的计算,不需要耗时的 CD 测量,避免了测量噪声和光刻胶模型标定误差对匹配精度的影响,是大规模生产环境中常用的技术。匹配中可调参数项主要包括数值孔径 (NA)、曝光剂量、离焦量、照明光源和波像差,其中照明光源具有较大的优化自由度。基于微反射镜阵列 (MMA) 的光刻照明系统提供了低成本、可编程的自由照明光源,已应用于 ASML 公司 NXT 系列机型中^[8],因此光源优化成为了光刻机匹配的重要技术^[9]。但当现有光源优化技术直接应用于光刻机匹配时,匹配算法输出光源后还需采用镜片分配算法 (MAA) 计算照明系统的参数,该过程会引入额外误差,降低了匹配效果^[10]。此外,匹配算法计算梯度较为困难,高精度的光源模型参数较多,对光源优化算法提出了一定要求。其中基于遗传算法 (GA) 和粒子群优化 (PSO) 算法的光源优化技术^[11-12] 虽然可以直接应用于光刻机匹配,但仍存在优化结果较差或收敛速度较慢的问题。

本文提出一种光刻机匹配方法,采用差分进化 (DE) 算法对基于 MMA 模型的光源进行优化,实现光刻机的匹配。将 MMA 生成过程添加至匹配方法中,通过直接优化 MMA 照明系统参数能有效减小 MMA 产生照明光源的过程导致的匹配误差,提高了光刻机匹配的精度。此外将 DE 算法应用于匹配问题,无需参数转换与编码、计算梯度和海森矩阵,进化方法明确,能进一步改善优化结果,提高收敛速度。本文分别在四极照明和自由照明条件下,针对一维线空图形的匹配进行数值仿真,验证了本文方法的有效性。

2 基本原理

2.1 自由照明光源模型

基于 MMA 的光刻照明系统可以实现自由形式的照明^[13],为进一步提高光刻机分辨率提供了硬件基础。基于 MMA 的照明系统的光源调制原理如图 1 所示。其中 MMA 是含有大量微反射镜的微机电系统 (MEMS) 的器件,每个微反射镜的反射光在照明光瞳面上产生一个光斑,XY 方向的角度可以自由调整,不同的微反射镜产生的光斑相互叠加,通过调整微反射镜的倾角即可实现任意形状的自由照明。

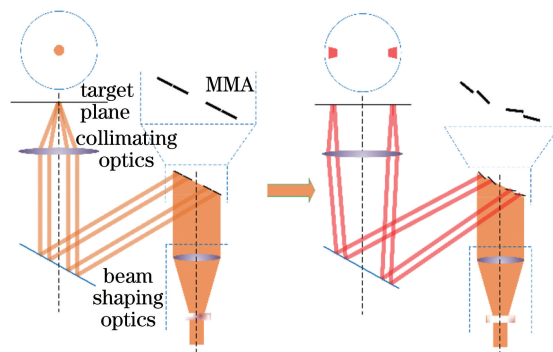


图 1 基于 MMA 的自由照明光源系统示意图

Fig. 1 Schematic of freeform illumination source system based on MMA

基于 MMA 的照明系统光瞳面光强分布可以看作是不同的微反射镜产生的光斑叠加,即

$$S_{\text{MMA}}(f, g) = \sum_{i_{\text{mirror}}}^{N_{\text{mirror}}} I_{i_{\text{mirror}}} \cdot [S_{i_{\text{mirror}}}(f, g) * S_{\text{pot}, i_{\text{mirror}}}(f, g)], \quad (1)$$

式中: (f, g) 为归一化空间频率坐标; N_{mirror} 为微反射镜数量; $I_{i_{\text{mirror}}}$ 为第 i_{mirror} 个微反射镜产生的光强权重; $S_{i_{\text{mirror}}}(f, g)$ 为第 i_{mirror} 个微反射镜产生的理想强度分布; $*$ 为卷积运算。全部微反射镜理想强度分布叠加构成理想光源的强度分布。 $S_{\text{pot}, i_{\text{mirror}}}(f, g)$ 为

第 i_{mirror} 个微反射镜产生的光斑函数,该光斑函数是根据实际光刻机输出光斑的强度分布特征拟合的分布函数,光源形状的影响因素包括微反射镜表面形貌、粗糙度和照明系统等。此外,模型假定不同镜片

反射光之间不会发生干涉,其总光强分布等于不同光斑光强的线性叠加,该假设与实际观察到的光源分布相匹配。图 2 为基于 MMA 的自由照明系统光源模型示意图。

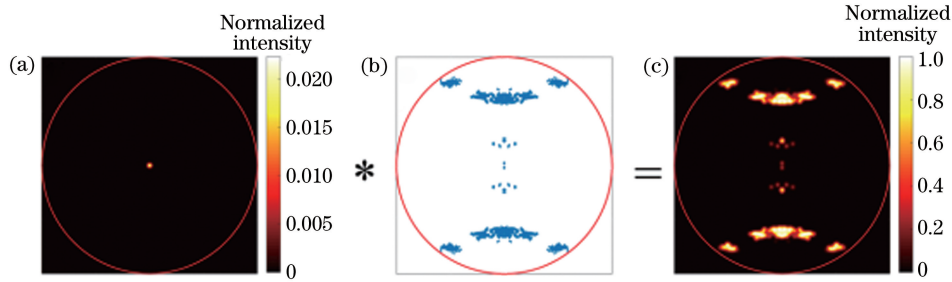


图 2 基于 MMA 的自由照明光源模型示意图。(a)单个微反射镜生成的光斑;(b) MMA 生成的理想光源;(c)目标光源
Fig. 2 Schematic of freeform illumination source model based on MMA. (a) Light spot formed by single micro mirror; (b) ideal source formed by MMA; (c) target source

为防止光学元件损伤,光强应受到一定限制,即

$$S_{\text{MMA}}(f, g) \leq S_{\text{max}}, \quad (2)$$

式中: S_{max} 为最大强度。对光强进行归一化,即

$$\hat{S}_{\text{MMA}}(f, g) = \frac{1}{S_{\text{max}}} \sum_{i_{\text{mirror}}}^{N_{\text{mirror}}} I_{i_{\text{mirror}}} \cdot [S_{i_{\text{mirror}}}(f, g) * S_{\text{pot}, i_{\text{mirror}}}(f, g)], \quad (3)$$

式中: \hat{S}_{MMA} 为归一化光强分布。定义光瞳填充比例(PFR)为

$$R_{\text{PF}} = \frac{\int_P \hat{S}_{\text{MMA}}(f, g) df dg}{\int_P df dg}, \quad (4)$$

式中: P 为有效光瞳,即光瞳面上满足 $f^2 + g^2 \leq 1$ 的区域。将(3)式代入(4)式可得

$$R_{\text{PF}} = \frac{\int_P \sum_{i_{\text{mirror}}}^{N_{\text{mirror}}} I_{i_{\text{mirror}}} \cdot [S_{i_{\text{mirror}}}(f, g) * S_{\text{pot}, i_{\text{mirror}}}(f, g)] df dg}{S_{\text{max}} \int_P df dg}. \quad (5)$$

由于微反射镜反射形成的光斑强度及分布的调制主要通过调整光源激光器及光束整形单元的参数实现,因此对于单个微反射镜,仅改变微反射镜偏转角度时可认为其反射的总光强不变,则有

$$\int_P I_{i_{\text{mirror}}} \cdot S_{i_{\text{mirror}}}(f, g) * S_{\text{pot}, i_{\text{mirror}}}(f, g) df dg = I_{\text{mirror}} C_{i_{\text{mirror}}}, \quad (6)$$

式中: I_{mirror} 为总光强; $C_{i_{\text{mirror}}}$ 为第 i_{mirror} 个微反射镜的光强系数。光瞳填充比例 R_{PF} 可表示为

$$R_{\text{PF}} = \frac{I_{\text{mirror}} \sum_{i_{\text{mirror}}}^{N_{\text{mirror}}} C_{i_{\text{mirror}}}}{S_{\text{max}} \int_P df dg}. \quad (7)$$

(7)式表明, MMA 反射产生的总光强 I_{mirror} 与 PFR 线性相关,因此通过改变激光器及光束整形单元参数来调整 I_{mirror} ,即可有效调整照明系统的 PFR。PFR 较小的光源引起的热像差较大,会降低成像性能;而 PFR 较大的光源通常工艺窗口较小,因此在光刻机匹配中应当对待匹配(TBM)光刻机的 PFR 进行一定的控制^[14]。

对于采用 MMA 的照明系统,为生成指定的光源形状,需要采用镜片分配算法,利用上述模型并根据照明系统光学设计计算每个镜片的倾角。ASML 公司采用随机翻转法生成 MMA 倾角参数^[8],Wei 等^[15]提出基于模拟退火(SA)的镜片分配算法。由于生成的光源与目标光源存在差异,该差异会引入额外的 CD 误差,影响匹配效果,Flagello 等^[10]的研究结果表明,光源的差异与 CD 误差呈正相关。

2.2 差分进化算法

DE 算法由 Storn 等^[16]于 1996 年在电气和电子工程师协会国际进化计算大会上提出,是一种有效的参数全局优化算法。DE 算法的基本流程与 GA 类似,包括种群初始化和迭代进化两部分。初始化完成后,进入迭代流程,迭代流程包括变异、交叉和选择。为提高 DE 算法的性能,研究人员提出了多种自适应 DE 算法,其中由 Zhang 等^[17]提出的一种自适应差分进化算法(JADE)是目前公认的性能较好的 DE 算法, JADE 算法的主要步骤如下。

1) 变异:对于第 w 代种群,从该代种群 $\{\mathbf{x}_{i,w} |$

$i=1,2,\dots,N_{\text{pop}}$ 中通过变异算子生成变异向量 $\mathbf{v}_{i,w}$,其中 \mathbf{x} 为个体对应的向量, N_{pop} 为种群规模, i 为种群个体序号。JADE 算法提出 DE/current-to- p -best/1 的变异算子,即

$$\mathbf{v}_{i,w} = \mathbf{x}_{i,w} + \omega_i (\mathbf{x}_{\text{best},w} - \mathbf{x}_{i,w}) + \omega_i (\mathbf{x}_{r_1,w} - \mathbf{x}_{r_2,w}), \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}_{\text{best},w}$ 为目标函数 $F(\cdot)$ 较小的前 $p \times 100\%$ 的个体中随机选取的个体; r_1 和 r_2 为随机选取的小于等于 N_{pop} 的互不相同的正整数; ω_i 为缩放因子。 ω_i 可表示为

$$\omega_i = \text{randc}(\mu_\omega, 0.1), \quad (9)$$

式中: $\text{randc}(\cdot)$ 为服从柯西分布的随机变量; μ_ω 为控制参数。 $\omega > 1$ 的部分截断置为 1, $\omega < 0$ 的部分重新生成。

2) 交叉: DE 算法采用一种二进制的交叉操作算子生成测试向量 $\mathbf{u}_{i,w}$, 即

$$\mathbf{u}_{j,i,w} = \begin{cases} \mathbf{v}_{j,i,w}, & \text{rand}_j(0,1) \leq C_{R,i} \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ \mathbf{x}_{j,i,w}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $\text{rand}(\cdot)$ 为服从均匀分布的随机变量; $\mathbf{u}_{j,i,w}$ 为向量 $\mathbf{u}_{i,w}$ 的第 j 个数; $j_{\text{rand}} = \text{randint}_t(1, D)$ 为 1 到 D 之间随机生成的整数; $C_{R,i} \in (0, 1]$ 为交叉概率。 $C_{R,i}$ 可表示为

$$C_{R,i} = \text{randn}(\mu_{CR}, 0.1), \quad (11)$$

式中: $\text{randn}(\cdot)$ 为服从正态分布的随机变量; μ_{CR} 为控制参数。交叉概率决定了测试向量从变异向量继承的平均块大小,

3) 选择: 将父向量 $\mathbf{x}_{i,w}$ 和测试向量 $\mathbf{u}_{i,w}$ 中目标函数 $F(\cdot)$ 较优的向量作为下一代种群的个体。对于最小化问题, 最终选取的子代向量为

$$\mathbf{x}_{i,w+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,w}, & F(\mathbf{u}_{i,w}) < F(\mathbf{x}_{i,w}) \\ \mathbf{x}_{i,w}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

并且将该向量作为下一代种群的父向量。如果实验向量 $\mathbf{u}_{i,w}$ 的目标函数优于父向量 $\mathbf{x}_{i,w}$, 则此时称为成功的更新。

算法控制参数 μ_{CR} 和 μ_ω 在每代种群迭代完成后进行更新, 即

$$\mu_{CR,w+1} = (1-c)\mu_{CR,w} + c \cdot \text{mean}_A(S_{CR}), \quad (13)$$

式中: $c \in [0, 1]$ 为常数; $\text{mean}_A(\cdot)$ 为算数平均数; S_{CR} 为该代种群成功更新的向量对应的参数 C_R 的集合; μ_{CR} 的初始值为 0.5。

$$\mu_{\omega,w+1} = (1-c)\mu_{\omega,w} + c \cdot \text{mean}_L(S_\omega), \quad (14)$$

式中: S_ω 为该代种群成功更新的向量对应的参数 ω

的集合; μ_ω 的初值为 0.5。 $\text{mean}_L(\cdot)$ 为 Lehmer 平均数, 即

$$\text{mean}_L(S_\omega) = \frac{\sum_{\omega \in S_\omega} \omega^2}{\sum_{\omega \in S_\omega} \omega}. \quad (15)$$

2.3 基于差分进化算法的光刻机匹配方法

光刻机匹配^[9]定义为

$$\arg \min_p \{F\}, \quad (16)$$

式中: $\arg \min_p \{F\}$ 为优化参数 \mathbf{p} 最小化函数 F 的值; \mathbf{p} 为可调参数向量; F 为匹配目标函数, 描述参考光刻机和待匹配光刻机成像结果的差异。通常 F 为参考光刻机与待匹配光刻机成像 CD 差异的均方根(RMS)值, 即

$$F_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{feature}}} \sum_{j'=1}^{N_{\text{feature}}} [C_{\text{TBM}}^{(j')} - C_{\text{REF}}^{(j')}]^2}. \quad (17)$$

CD 差异的最大值为

$$F_{\text{MAX}} = \max_{j'=1, \dots, N_{\text{feature}}} [C_{\text{TBM}}^{(j')} - C_{\text{REF}}^{(j')}], \quad (18)$$

式中: REF 表示参考光刻机; TBM 表示待匹配光刻机; C_{TBM} 、 C_{REF} 分别为 TBM 光刻机和参考光刻机仿真像 CD 值; N_{feature} 为匹配的目标掩模数量; j' 为掩模序号。

根据 2.1 节所述, MMA 模型的光源可用微反射镜光斑在光瞳的理想强度分布 $S_{i_{\text{mirror}}}(f, g)$ 及其光斑函数描述。若微反射镜反射光的强度分布全采用光斑函数进行描述, 则每个微反射镜的理想强度分布为

$$S_{i_{\text{mirror}}}(f, g) = \begin{cases} 1 & f = f_{i_{\text{mirror}}}, g = g_{i_{\text{mirror}}} \\ 0 & \end{cases}, \quad (19)$$

式中: $f_{i_{\text{mirror}}}$ 、 $g_{i_{\text{mirror}}}$ 分别为第 i_{mirror} 个微反射镜产生的光源点坐标; (f, g) 为归一化空间频率, 该坐标与微反射镜倾角参数一一对应。由于照明光源定义在单位圆内, 约束条件 $f^2 + g^2 \leq 1$ 在优化算法中不便于处理, 因此采用极坐标进行编码, 编码后的参数向量为

$$\mathbf{x} = [\rho_1, \dots, \rho_{i_{\text{mirror}}}, \dots, \rho_{N_{\text{mirror}}}, \varphi_1, \dots, \varphi_{i_{\text{mirror}}}, \dots, \varphi_{N_{\text{mirror}}}, I_{\text{mirror}}], \quad (20)$$

式中: $\rho_{i_{\text{mirror}}} \in [0, 1]$ 、 $\varphi_{i_{\text{mirror}}} \in (-\pi, \pi]$ 分别为第 i_{mirror} 个光源点坐标 $(f_{i_{\text{mirror}}}, g_{i_{\text{mirror}}})$ 对应的极坐标值; I_{mirror} 为(7)式所述单个微反射镜反射光强度的权重。

2.3 节所述的光源模型无法对光瞳范围内光强最大值直接进行限制, 对此本文提出一种惩罚函数项对光强最大值进行限制, 即添加了惩罚函数项的目标函数, 即

$$F_{\text{ext}} = \begin{cases} F, & \max(S_{\text{MMA}}) \leq S_{\text{max}} \\ F \cdot [1 + \max(S_{\text{MMA}})], & \max(S_{\text{MMA}}) > S_{\text{max}} \end{cases}, \quad (21)$$

式中： F 为(17)式或(18)式所述的目标函数，当光源最大值超过 S_{max} 后，惩罚项随光源最大值的增加而迅速增长，因此该项可以有效限制光源的最大值。此外，目标函数中没有需要调整的参数项。

基于 DE 算法的光刻机匹配流程如图 3 所示，首先根据参考光源采用 MAA 计算对应的光源参数，作为某个个体的初始状态，参考光源即参考光刻机的照明光源，通常采用参考光刻机实测照明光瞳作为参考光源；然后随机初始化其他个体的状态，在 DE 算法的内迭代循环中，根据 2.2 节所述对每个个体依次进行变异(8)式、交叉(10)式、选择(12)式操作。在选择操作中需要计算目标函数。首先根据(1)式计算照明光源；然后利用光刻成像模型计算各图形的空间像，并计算空间像的 CD 值；最后根据(21)式计算目标函数。内迭代循环完成后，根据迭代结果，再根据(13)式与(14)式更新控制参数 μ_{CR} 和 μ_w 。重复上述迭代循环直至满足停止判据。常用的停止判据有最大迭代次数和目标函数阈值两种。

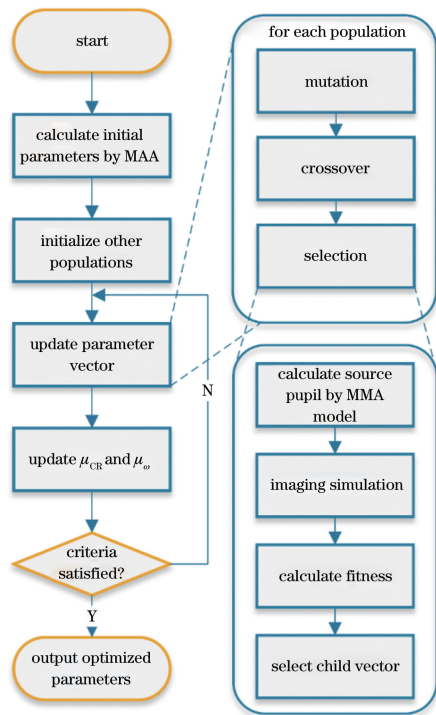


图 3 基于 DE 算法的光刻机匹配流程图
Fig. 3 Matching flowchart of lithography machine based on DE algorithm

3 仿真实验

采用光刻机的临近效应曲线验证本文方法的有效性。光刻模拟结果与光刻机曝光实验的 CD 差异显著小于光刻机差异引起的 CD 差异^[18]，表明经过标定后的光刻模型可用于表达光刻机及光刻工艺，因此本节采用数值模拟计算 TBM 光刻机的光源参数并对结果进行评估。实际匹配流程中需要将生成的 TBM 光刻机光源参数输入光刻机，采用测试掩模进行曝光实验，进一步验证光刻机匹配的结果，典型的光刻机匹配曝光实验流程如参考文献[9]所述。

光刻机的工作波长 $\lambda = 193.368 \text{ nm}$ ，投影物镜放大倍率为 0.25，数值孔径为 1.35，浸液折射率为 1.44。参考光刻机采用图 4(a)所示的四极照明，参考光源内相干因子 $\sigma_{\text{in}} = 0.7$ ，外相干因子 $\sigma_{\text{out}} = 0.9$ ，极张角为 30° ，光源偏振为切向偏振，采用矢量成像模型进行空间像仿真^[19]。照明系统 MMA 微反射镜数量为 4096。为保证光源对称性，仅对其中 $\frac{1}{4}$ 数量的微反射镜进行计算，并将其范围限制在第一象限有效光瞳范围内，其他光源点通过 X 轴和 Y 轴对称获得，实际参与计算的微反射镜数量为 1024。光源采样网格尺寸为 101×101 ，有效采样光源点为 $N_{\text{sample}} = 7841$ ，光源强度最大值 $S_{\text{max}} = 1$ 。

引起光刻机成像差异的因素有激光器光谱带宽、投影物镜波像差、振动、剂量、离焦量、光源形状等^[9]。其中激光器光谱带宽和振动水平在光刻机投入使用已经确定，影响较小且长期稳定性较好，因此在仿真中可忽略其影响。剂量和离焦量的影响同样较小，且可单独进行匹配，仿真中采用最佳焦面的归一化光强进行匹配以排除剂量和离焦量的影响。由于投影物镜设计的差异及热效应等因素的影响，波像差对成像的影响较大^[9,20]。此外，随着光刻机的使用，投影物镜中光学材料的折射率和镀膜厚度会发生变化^[21]，且该现象引起的波像差通常不易补偿。本节仿真通过投影物镜波像差产生光刻机成像之间的差异，用于验证匹配效果。TBM 光刻机投影物镜波像差 Z5-Z37 项在 $[-30\lambda \times 10^{-3}, 30\lambda \times 10^{-3}]$ 内随机生成，投影物镜光瞳相位分布如图 4(b)所示。匹配目标为水平(H)方向和垂直(V)方向的一维“through-pitch”线空图形，如图 4(c)所示，图形 CD 为 45 nm，周期为 120, 140, ..., 1000 nm，掩模类型为二值掩模，匹配方式为空间像，空间像 CD 阈

值 $T=0.3$, 目标函数为由(17)与(21)式组成的 CD 误差 RMS 值。由于光刻机匹配中计算目标函数梯度较为困难, 本节对比方法采用无需计算梯度的基于 GA 与 PSO 光源优化的匹配方法^[11-12], 对比方法首先采用光源优化(SO)计算目标光源, 然后使用 MAA 生成微反射镜参数, 最后以重构光源作为匹配后的光源。三种算法的种群数量均设定为 50, GA、PSO、DE 的最大迭代次数分别为 1000、5000、2000, 不设停止阈值。DE 算法中 $c=0.1, p=0.05$; PSO 算法中最大速度为 1, 学习因子均为 2.05, 惯性权重的最大值与最小值分别为 0.9 与 0.4, 内迭代次数为 25; GA 中, 变异率为 0.02, 交叉概率为 0.6, 使用锦标赛选择机制。算法参数均在常见适用范围内进行了多次调整, 确保达到较好的性能。微反射镜光斑函数采用圆形高斯函数, 即

$$S_{\text{pot}} = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left[-\left(\frac{f^2 + g^2}{2\sigma_r^2}\right)\right], \quad (22)$$

式中: $\sigma_r=0.03$, 实际应用中需要根据光刻机照明系统的设计与实测照明光瞳确定光斑函数的具体形式及参数。MAA 采用文献[15]提出的基于 SA 的镜片分配算法。MMA 重构光源与匹配目标光源的差异采用光源差值的 RMS 进行描述^[10], 即

$$R_{\text{MS}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{sample}}} \cdot \sum_{f,g} [S_{\text{real}}(f,g) - S_{\text{target}}(f,g)]^2}, \quad (23)$$

式中: N_{sample} 为光源采样点的数量; $S_{\text{real}}(f,g)$ 、 $S_{\text{target}}(f,g)$ 分别为实际光源和目标光源强度分布。 I_{mirror} 的范围设定为参考光源的 90%~110%, 即匹配后光源的 PFR 为参考光源的 90%~110%。

采用基于 PSO-SA 的匹配方法生成的光源如图 5 所示, 图 5(a)是通过光源优化生成的光源, 图 5(b)是在图 5(a)基础上采用基于 SA 的 MAA 生成 MMA 参数后重构的光源, 图 5(c)为两者的差异, 光源差异 RMS 值为 0.0259。图 6 为匹配前后的 CD

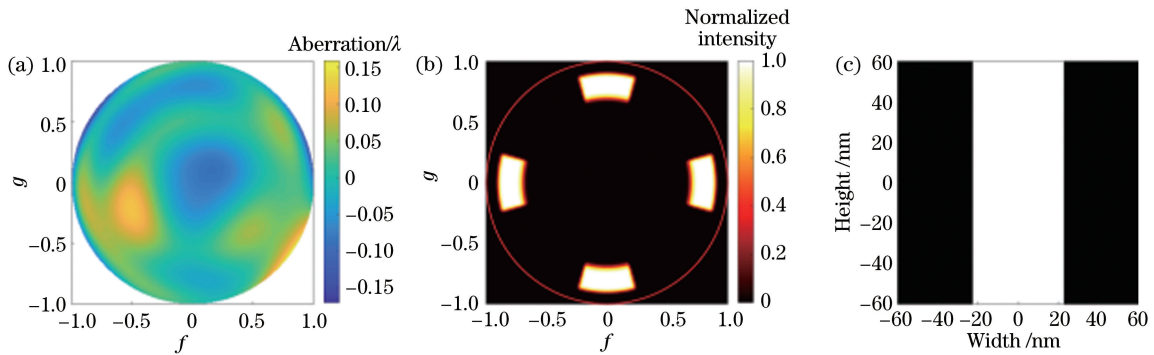


图 4 光刻机匹配的部分设置。(a) TBM 光刻机波像差; (b) 四极照明参考光源; (c) CD 为 45 nm 的一维线空掩模
Fig. 4 Partial settings of lithography matching. (a) Wave aberration of TBM lithography; (b) reference source of quasar illumination; (c) one-dimensional line/space mask with 45 nm CD

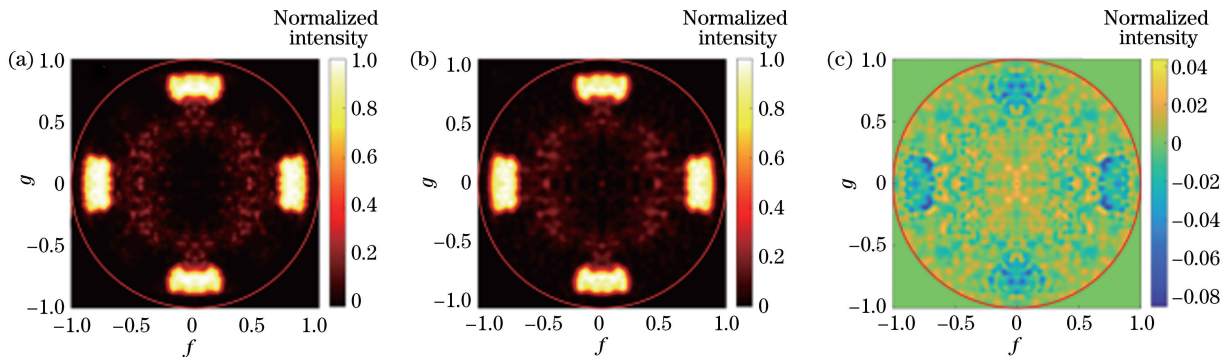


图 5 基于 PSO-SA 的匹配方法匹配后的照明光源。(a) 经光源优化生成的光源; (b) 通过 MAA 生成参数后重构的光源; (c) SO 优化光源和 MAA 生成光源的差异

Fig. 5 Illumination source after matching based on PSO-SA. (a) Source after source optimization; (b) source reconstructed after generating parameters through MAA; (c) difference between SO optimization source and source generated by MAA

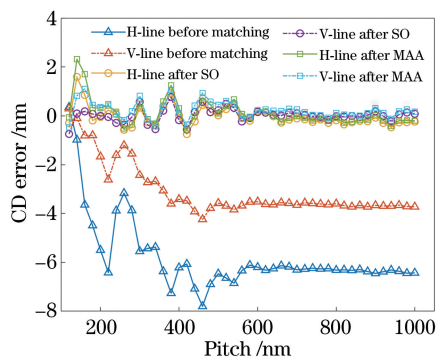


图 6 PSO 优化前后 CD 误差随图形周期的变化曲线
Fig. 6 CD error versus pitch before and after PSO optimization

误差曲线,匹配后参考光刻机与 TBM 光刻机 CD 差异显著下降。结合图 5 与图 6 发现,光源生成的过程引

入了一定的误差,光源优化生成的光源与 MAA 生成的光源的 CD 误差 RMS 分别为 0.354 nm 和 0.491 nm,由 MMA 生成过程引起的误差占总误差的 27.9%。

图 7(a)为基于 GA-SA 的光刻机匹配方法重构后的照明光源,图 7(b)为采用本文匹配方法生成的照明光源,图 7(c)为其对应的 MMA 光源点所对应的中心位置分布。图 8 为匹配前后三种方法对应的 CD 误差值。匹配前 CD 误差的 RMS 值为 4.814 nm,基于 GA-SA 的光刻机匹配方法匹配后 CD 误差的 RMS 值为 1.099 nm,下降 77.2%;基于 PSO-SA 的匹配方法匹配后的 CD 误差的 RMS 值为 0.491 nm,下降 89.8%;采用本文方法匹配后 CD 误差的 RMS 值为 0.271 nm,下降 94.4%,本文方法不引入额外误差,优于其他两种匹配方法。

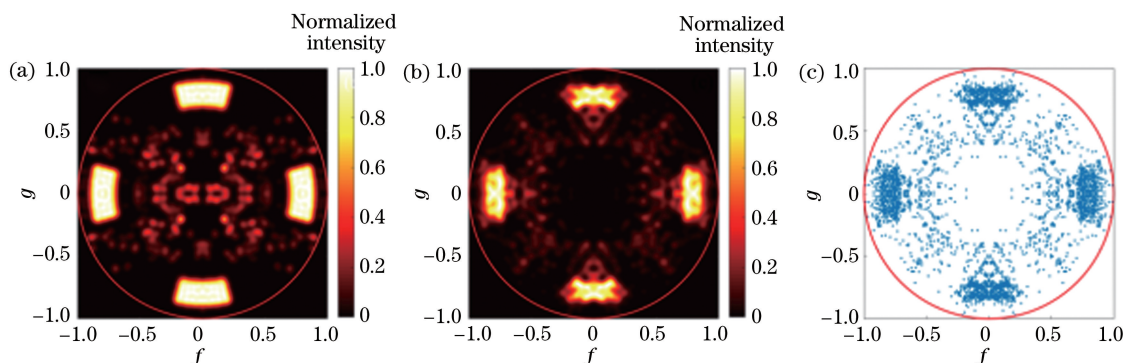


图 7 匹配后的照明光源。(a)基于 GA-SA 匹配后的重构光源;(b)采用本文方法匹配后的光源;(c) MMA 理想光源分布
Fig. 7 Illumination source after matching. (a) Source reconstructed by GA-SA matching; (b) source after matching by proposed method; (c) MMA ideal source distribution

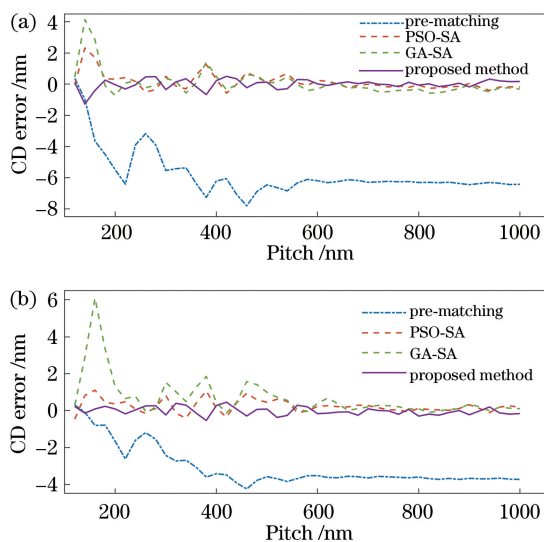


图 8 匹配前后 CD 误差随图形周期的变化。
(a) H 方向;(b) V 方向

Fig. 8 CD error versus pitch before and after matching.

(a) H direction; (b) V direction

由于三种方法具有类似的特性,计算时间主要

取决于目标函数的调用次数,且目标函数中成像仿真开销远大于算法本身,因此采用 CD 误差 RMS 值与评价函数调用次数的关系分析不同方法的性能。三种匹配方法的光源优化部分的收敛曲线如图 9 所示,对比不同方法的收敛曲线,GA 具有较快的收敛速度,但最终结果较差。结合图 4(b)的参考光源和图 7(a)优化后光源可以看出,光源在原有四极照明区域强度分布变化较小,且匹配后的 CD 误差仍然较大,表明 GA 在匹配问题中出现了早熟现象,优化效果有限。基于 PSO-SA 的匹配方法和本文方法都能获得较好的匹配结果,而本文方法的收敛速度要高于基于 PSO-SA 的匹配方法。与 GA 和 PSO 算法相比,一方面 DE 算法应用于光源优化问题时,进化方向相对明确,且不涉及额外的参数转换与编码解码,收敛速度更快且相对稳定;另一方面加入 MMA 模型后的光源参数空间与像素化描述的光源模型参数空间结构不同,导致优化性能存在一定差异。

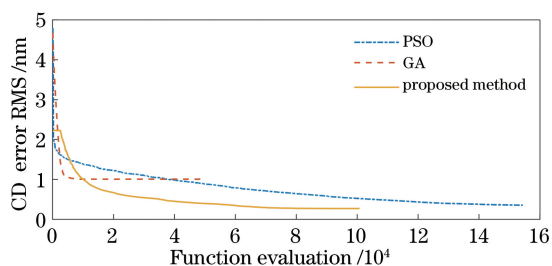


图 9 不同匹配方法的收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves of different matching methods

为进一步验证本文算法的有效性,采用自由照明光源进行验证,参考自由照明光源采用 SMO 生成,如图 10(a)所示。由于光源强度分布主要集中在远离 X 轴的两侧,对应的掩模图形以水平图形为主,因此仅采用一维水平掩模图形进行匹配。模型参数与匹配方法参数同上,GA、PSO 和 DE 的最大迭代次数分别为 1000、8000、3000。图 10 为参考光源及匹配后最终生成的光源,比较图 10(b)~(d)优化后的光源与图 10(a)参考光源,表明匹配后的光

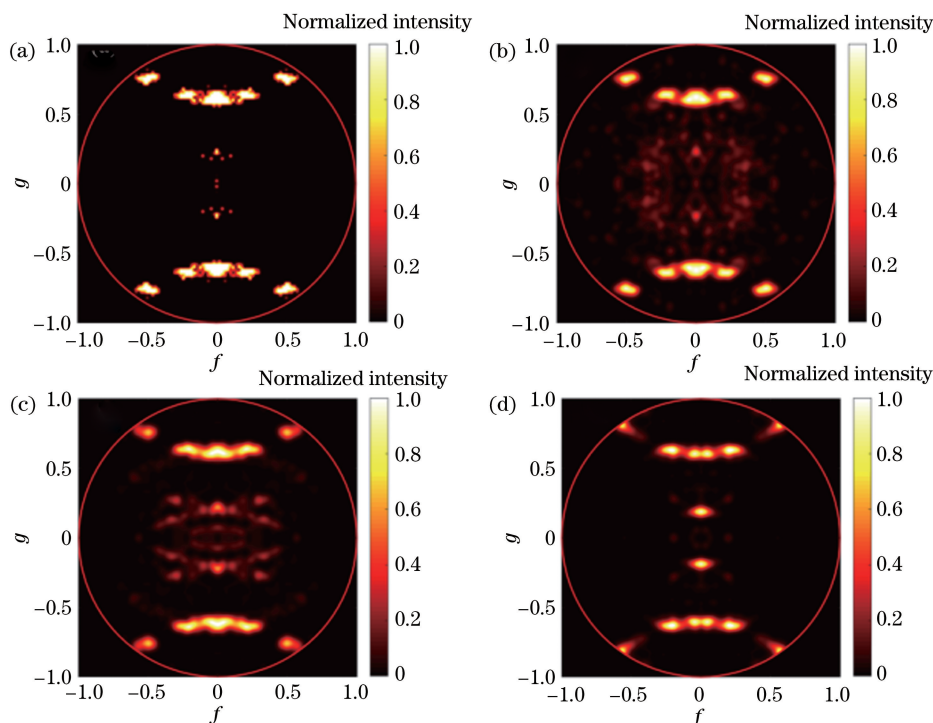


图 10 匹配前后的光源。(a)自由照明参考光源;(b) GA-SA 方法匹配后的光源;(c) PSO-SA 方法匹配后的光源;(d)本方法匹配后的光源

Fig. 10 Sources before and after matching. (a) Reference source of freeform illumination; (b) source after matching by GA-SA; (c) source after matching by PSO-SA; (d) source after matching by proposed method

源分布与参考光源存在一定相似性。

图 11 为匹配前后 CD 误差,匹配前 CD 误差的 RMS 值为 2.011 nm,采用基于 GA-SA 的匹配方法,匹配后的 CD 误差的 RMS 值为 0.985 nm;采用基于 PSO-SA 的匹配方法,匹配后的 CD 误差的 RMS 值为 0.478 nm;采用本文方法匹配后 CD 误差的 RMS 值为 0.329 nm。对比不同方法,基于 PSO-SA 的匹配方法与本文匹配方法明显优于基于 GA-SA 的匹配方法。图 12 为三种方法光源优化部分的收敛曲线,基于 GA 的匹配方法与本文匹配方法在早期都具有较好的收敛速度,但基于 GA 的匹配方法在迭代 500 次左右后收敛速度出现大幅下降,即出现了早熟现象。基于 PSO 的匹配方法虽然也

能得到较好的匹配结果,但在 8000 次迭代后仍然没有完全到达稳态。

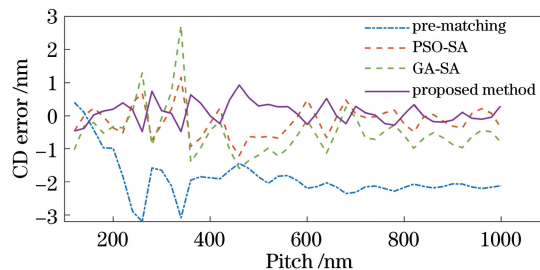


图 11 匹配前后的 CD 误差

Fig. 11 CD error before and after matching

表 1 和表 2 分别为四极照明和自由照明的匹配结果,两种照明条件下匹配前的 CD 误差的 RMS

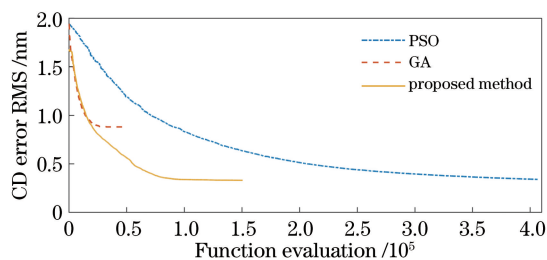


图 12 匹配前后收敛曲线

Fig. 12 Convergence curves before and after matching

值分别为 4.814 nm 和 2.011 nm。对比匹配后的结果可以看到本文方法匹配效果优于基于 PSO-SA 与 GA-SA 的匹配方法。此外,基于 GA-SA 和 PSO-SA 的匹配方法生成光源的 PFR 与参考光源差异较大,可能会影响后续其他参数的优化。本文方法生成的光源与参考光源的 PFR 基本一致,表明本文方法倾向于维持 PFR,这有效地控制了匹配后光源的 PFR。

表 1 四极照明匹配模拟结果

Table 1 Simulation results under quasar illumination matching

Method	CD error		Source error	$R_{PF}/\%$
	after SO / nm	after MAA / nm		
Pre-matching				10.67
PSO-SA	0.354	0.491	0.0259	13.52
GA-SA	1.007	1.099	0.0343	14.82
Proposed method	0.271			10.65

表 2 自由照明匹配模拟结果

Table 2 Simulation results under freeform illumination matching

Method	CD error		Source error	$R_{PF}/\%$
	after SO / nm	after MAA / nm		
Pre-matching				3.65
PSO-SA	0.339	0.478	0.0285	2.85
GA-SA	0.881	0.985	0.0217	6.13
Proposed method	0.329			3.61

4 结 论

提出一种用于含有微反射镜阵列的自由照明系统的光刻机性能匹配方法。与通常用于自由照明系统的光刻机匹配方法相比,本方法能直接优化微反

射镜阵列参数,有效减小了在微反射镜阵列产生照明光源的过程中出现的匹配误差。仿真结果表明,四极照明和自由照明条件下,匹配后一维线空图形的 CD 误差的 RMS 值分别下降了约 90% 与 80%,且在生成照明系统参数时不引入额外误差。与基于遗传算法和粒子群算法光源优化的匹配方法相比,本文方法在获得更好的匹配效果同时,具有较快的收敛速度。此外,采用本文方法匹配后光源的光瞳填充比例与参考光源一致。

参 考 文 献

- [1] Semiconductor industry association. 2015 international technology roadmap for semiconductor (ITRS)[R]. Washington, D.C.: SIA, 2015.
- [2] Mack C. Fundamental principles of optical lithography[M]. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007: 419-449.
- [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] Armellin L P, Torsy A, Hernan K, *et al.* Illumination conditions matching for critical layers manufacturing in a production context [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61543V.
- [5] Socha R, Shao W J, Xie X, *et al.* Improved fab CDU with FlexRay and LithoTuner[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730Q.
- [6] Bekaert J, van Look L, Bisschop P D, *et al.* Experimental proximity matching of ArF scanners [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7140: 714027.
- [7] He Y, Byers E, Light S, *et al.* Simulation-based pattern matching using scanner metrology and design data to reduce reliance on CD metrology [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764014.
- [8] Mulder M, Engelen A, Noordman O, *et al.* Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7520: 75200Y.
- [9] He Y, Serebryakov A, Light S, *et al.* A study on the automation of scanner matching[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86830W.
- [10] Flagello D G, Geh B, Socha R, *et al.* Understanding illumination effects for control of optical proximity effects (OPE) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69241U.
- [11] Fühner T, Erdmann A. Improved mask and source representations for automatic optimization of

- lithographic process conditions using a genetic algorithm [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 415-426.
- [12] Wang L, Li S K, Wang X Z, *et al.* Source optimization using particle swarm optimization algorithm in optical lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422002.
王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源优化方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422002.
- [13] Zimmermann J, Gräupner P, Neumann J T, *et al.* Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764005.
- [14] Lai K, Rosenbluth A E, Bagheri S, *et al.* Experimental result and simulation analysis for the use of pixelated illumination from source mask optimization for 22 nm logic lithography process [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72740A.
- [15] Wei L D, Li Y Q. Hybrid approach for the design of mirror array to produce freeform illumination sources in immersion lithography [J]. Optik, 2014, 125(20): 6166-6171.
- [16] Storn R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, May 20-22, 1996, Nagoya, Japan. New York: IEEE, 1996: 842-844.
- [17] 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.
- [18] Aldana R, Vellanki V, Shao W J, *et al.* Model-based scanner tuning for process optimization [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7985: 79850L.
- [19] Wong A K K. Optical imaging in projection microlithography [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 151-155.
- [20] Beak D H, Shin J H, Park T, *et al.* Scanner-to-scanner CD analysis and control in an HVM environment [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 101470A.
- [21] Liberman V, Rothschild M, Sedlacek J H C, *et al.* Marathon testing of optical materials for 193-nm lithographic applications [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3578: 2-15.