

# 激光与光电子学进展

## 光源掩模联合优化技术研究

廖陆峰<sup>1,2</sup>, 李思坤<sup>1,2</sup>, 张子南<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>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 光刻机是集成电路制造的核心装备,光刻分辨率是光刻机的重要性能指标。作为提高光刻机分辨率的重要手段,分辨率增强技术可以推动芯片向更高集成度发展。光源掩模联合优化(SMO)通过同时优化光源和掩模图形提高光刻分辨率,是 28 nm 及以下技术节点必不可少的分辨率增强技术之一。光源与掩模的准确表征是 SMO 技术的基础,高效的优化算法是对光源和掩模进行优化的核心手段。SMO 技术应用于全芯片的前提是进行关键图形筛选。本文回顾了 SMO 技术的发展历史,并结合本团队对 SMO 技术的研究,介绍了关键图形筛选方法、光源与掩模表征方法和优化算法的基本原理和国内外的研究进展。

**关键词** 光刻; 分辨率增强技术; 光源掩模联合优化

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922010

## Research on Source and Mask Optimization

Liao Lufeng<sup>1,2</sup>, Li Sikun<sup>1,2</sup>, Zhang Zinan<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>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Lithography is the most important equipment in the manufacturing of very large-scale integrated circuits. Resolution is one of the important performance metrics of lithography. As an important means to improve the resolution of lithography, resolution enhancement techniques can promote the development of chips' integration. As one of resolution enhancement techniques, source and mask optimization (SMO) is indispensable in 28 nm technology node and beyond. It improves the resolution by simultaneously optimizing the source and mask. Accurate representation of source and mask is the basis of SMO, and efficient optimization algorithm is the core of SMO. The premise of full chip SMO is critical pattern selection. In this paper, the development history of SMO is reviewed. Combined with the research work of our group, the basic principles and research progress of the critical pattern selection method, source mask representation method, and optimization algorithm are reviewed.

**Key words** lithography; resolution enhancement techniques; source and mask optimization

## 1 引言

光刻机是集成电路制造的核心装备,其作用是

将承载集成电路版图信息的掩模图形以成像的方式转移至硅片面的光刻胶内<sup>[1-3]</sup>。光刻机的技术水平决定了集成电路的集成度,关乎摩尔定律的生命

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-08; 录用日期: 2022-04-11

通信作者: \*wxz26267@siom.ac.cn

力。分辨率是光刻机的三大性能指标之一,影响着集成电路的集成度<sup>[1]</sup>。光刻机分辨率  $R$  由瑞利公式决定,  $R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$ , 其中  $\lambda$  为曝光波长、 $NA$  为投影物镜数值孔径,  $k_1$  为工艺因子<sup>[1]</sup>。

通过缩短曝光波长、增大投影物镜数值孔径和减小工艺因子可以提高光刻机分辨率。随着光刻机技术的发展,光刻机的曝光波长不断缩短,从高压汞灯光源的  $g$  线 (436 nm)、 $i$  线 (365 nm) 发展到 KrF 和 ArF 准分子激光器光源的深紫外波段 (248 nm 和 193 nm), 再到如今的极紫外 (EUV) 波段 (13.5 nm)<sup>[1]</sup>。光刻机投影物镜的数值孔径  $NA$  从 1978 年的 0.28 不断增大到 2004 年的 0.93。通过使用浸液技术,光刻机投影物镜  $NA$  进一步增大到了 1.35<sup>[1]</sup>。此外,多种分辨率增强技术的应用使  $k_1$  因子不断减小,从 1978 年的 0.9 降低到了 2007 年的 0.27<sup>[1]</sup>。

为实现更高的光刻分辨率等性能指标,光刻机软硬件系统不断发展。照明系统由传统照明发展为自由照明。投影物镜由干式发展到浸液式,数值孔径不断增大、像差不断减小。掩模台、工件台、对准、调焦调平等系统不断发展。然而,光刻机系统的更新换代是阶段性的,一种新机型诞生后,其软硬件在较长的一段时间内基本保持不变。在光刻机硬件不变的情况下,曝光波长和数值孔径保持不变,只能通过采用分辨率增强技术来提高光刻分辨率。常见的分辨率增强技术包括离轴照明 (OAI) 技术、相移掩模 (PSM) 技术、光学邻近效应修正 (OPC) 技术和光源掩模联合优化 (SMO) 技术等<sup>[1]</sup>。随着特征尺寸的进一步减小,单独优化光源或掩模已无法满足 28 nm 以下节点集成电路制造的要求。因此,业界提出同时优化照明光源和掩模图形的 SMO 技术,从而进一步提高光刻分辨率,增大工艺窗口。SMO 是实现 28 nm 及更小技术节点集成电路制造的关键分辨率增强技术之一<sup>[1]</sup>。

光刻成像系统是一个衍射受限系统,光学邻近效应会导致目标图形无法高保真度地转移到硅片上。SMO 技术同时优化光源和掩模图形,其工作流程如图 1 所示,优化自由度远高于传统的 OPC 等分辨率增强技术,既能对掩模图形的形状进行优化,也能充分利用离轴照明的特点有效提高光刻分辨率。为了对光源和掩模进行优化,需要建立正向光刻仿真模型。如何对光源形状和掩模图形进行表征是建立正向模型的基础。合适的表征方法可以在保证模型仿真精度的同时降低优化维度,提高优

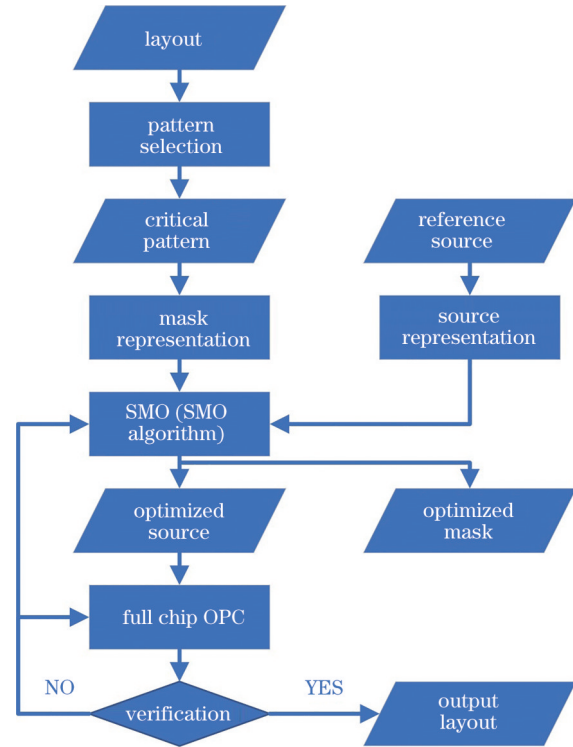


图 1 SMO 流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMO flow

化效率。在正向光刻模型的基础上,SMO 技术通过优化算法来对光源和掩模进行优化。优化算法的性能直接决定 SMO 技术的优化速度和优化效率。SMO 技术最终应用到全芯片时,优化速度是关键指标。直接对全部图形进行 SMO 极为耗时,因此需要采用关键图形筛选技术提前剔除冗余图形,保障 SMO 的优化速度。研究人员在 SMO 光源与掩模的表征方法、SMO 优化策略和 SMO 的应用等方面做了大量研究<sup>[4-25]</sup>。

SMO 技术作为 28 nm 及以下节点集成电路制造的关键技术之一,在国内外得到广泛研究。IBM 公司的 Rosenbluth 等<sup>[26]</sup>在 2001 年首次提出了 SMO 技术。在此基础上,IBM 公司于 2009 年在 SMO 技术中考虑了掩模误差增强因子 (MEEF) 的影响<sup>[27]</sup>,并将 SMO 技术应用于  $2 \times$  nm 节点逻辑图形的制造中<sup>[28-29]</sup>。2011 年,该公司的 Lai 等<sup>[30]</sup>通过并行计算提高了 SMO 技术的优化速度。ASML 公司的 Socha 等<sup>[31]</sup>在 2005 年提出了一种 SMO 技术,对像素化表征的光源和掩模频谱进行联合优化。该团队在 2008 年证明,与分步优化相比,将光源和掩模进行同步优化可以获得更大的工艺窗口<sup>[32]</sup>。2009 年,ASML 公司将 SMO 技术应用于  $2 \times$  nm 节点静态随机存储器 (SRAM) 图形的制造中<sup>[33-34]</sup>。随后,Socha

等<sup>[35]</sup>在 2010 年将掩模设计规则引入 SMO,提出了设计规则-光源-掩模联合优化(DSMO)技术。2014 年,ASML 公司的 Liu 等<sup>[36]</sup>将 SMO 技术应用于 EUV 光刻,实现了 7 nm 图形的光刻,提高了光刻成像质量。Samsung 公司的 Kim 等<sup>[37]</sup>在 2003 年提出了一种 SMO 技术,采用蒙特卡罗方法实现了随机全局优化。2004—2006 年, Mentor 公司的 Granik<sup>[38-40]</sup>对光源优化(SO)技术和基于像素化掩模的掩模优化(MO)技术进行了一系列研究,将 SMO 通过数学方法表示为逆向优化问题,并通过数值优化算法进行优化。2010 年, Synopsys 公司的 Mülders 等<sup>[41-42]</sup>提出了一种基于数值组合方法的 SMO 技术,将光刻成像过程分解为四分之一平面扩展函数的线性组合,从而提高了 SMO 的优化速度。2008 年, Luminescent 公司的 Pang 等<sup>[43]</sup>提出了一种基于水平集的 SMO 技术,并在优化过程中考虑了 MEEF 的影响。2010—2013 年, Gauda 公司、Nikon 公司和 Toshiba 公司分别对 SMO 技术的计算硬件,光刻胶模型和鲁棒性进行了研究,推动了 SMO 技术的发展<sup>[44-46]</sup>。

除了商业公司,高校等研究机构也对 SMO 技术进行了深入研究。德国 Fraunhofer IISB 研究所的 Fühner 和 Erdmann<sup>[47-48]</sup>在 2005 年提出了基于遗传算法(GA)的 SMO 技术,并在 2008 年提出了应用于 EUV 光刻的 SMO 技术<sup>[48]</sup>。随后, Fühner 等<sup>[49]</sup>于 2012 年结合投影物镜的优化,提出了一种光源掩模投影物镜联合优化(SMPO)技术。像素化表征和梯度优化算法是 SMO 技术常用的两种技术,美国 Delaware 大学、香港大学、台湾交通大学和清华大学分别对这两种技术进行了研究,从不同角度提升了 SMO 技术的优化性能<sup>[50-53]</sup>。台湾大学和香港大学分别将 Abbe-PCA 方法和增广拉格朗日法应用于 SMO<sup>[54-55]</sup>,提高了 SMO 的优化速度。香港大学和北京理工大学分别对 SMO 技术的光源表征方法、矢量成像模型和鲁棒性进行了研究,拓展了 SMO 技术的应用范围<sup>[56-58]</sup>。2011 年, Rochester 理工学院的 Sears 等<sup>[59-60]</sup>提出了一种 SMPO 技术,增大了优化自由度,提高了光刻成像质量。

SMO 技术同时对照明光源和掩模图形进行优化,具有更高的优化自由度,可以有效提高光刻分辨率。SMO 技术优化自由度高,具有计算量大、时间成本高的特点。在全芯片 SMO (Full-chip SMO<sup>[61-62]</sup>)应用中,由于芯片版图中包含成千上万

的图形,直接进行 SMO 的时间成本将不可接受。为了平衡优化时间和优化效果,全芯片 SMO 通常分步进行<sup>[62-63]</sup>。首先需要在芯片版图中筛选出少量关键图形,并针对筛选出的关键图形进行 SMO,获得适用于全芯片的优化光源。随后,使用优化光源对全芯片图形进行掩模优化。在全芯片 SMO 应用中,关键图形筛选技术决定着 SMO 获得的照明光源,从而影响最终优化后的工艺窗口。光源与掩模表征方法影响着 SMO 的优化自由度,也是影响优化效率的重要因素。优化算法是对光源和掩模进行优化的核心手段,算法性能直接决定 SMO 的优化效率和优化速度。本文结合本团队的相关研究工作,介绍 SMO 关键图形筛选技术、SMO 的光源与掩模表征方法以及 SMO 优化算法的基本原理和研究进展。

## 2 SMO 关键图形筛选技术

在全芯片 SMO 应用中,首先需要从版图中筛选出用于 SMO 的关键图形。为了保证全芯片 SMO 的速度,筛选出的关键图形数量需要尽量少。同时为了平衡全芯片 SMO 的速度和效果,筛选出的关键图形需要能够代表全部图形的结构特征。关键图形筛选技术影响全芯片 SMO 的优化速度和优化效果,是全芯片 SMO 的关键技术之一。

在全芯片 SMO 应用中,传统的 SMO 关键图形筛选方法是人工筛选,该方法依赖操作者的经验且主观性较强。随着芯片集成度越来越高,芯片版图中包含成千上万的图形,版图的图形数据量高达几百 GB,人工筛选难以满足制造需求。2010 年, IBM 公司提出了在掩模版图中随机筛选 SMO 关键图形的方法<sup>[64]</sup>,该方法通过在版图中随机采样获取关键图形,但该方法获得的图形筛选结果难以保证能够代表全部图形的结构特征。针对上述方法的不足, IBM 和 ASML 于 2011 年分别提出了基于图形聚类的 SMO 关键图形筛选方法<sup>[30]</sup>和基于频谱分析的 SMO 关键图形筛选方法<sup>[61-62]</sup>。

### 2.1 基于图形聚类的关键图形筛选方法

芯片版图包含成千上万的图形,其中存在大量几何结构相似的图形。对相似版图图形进行聚类,代表性图形的集合可以代表版图图形的结构特征。2011 年, IBM 的 Lai 等<sup>[30]</sup>提出了基于图形聚类的 SMO 关键图形筛选方法,该方法工作流程如图 2 所示。首先,该方法从芯片版图中获取大量图形,对其中重复的图形进行剔除减少图形数量。然后,选



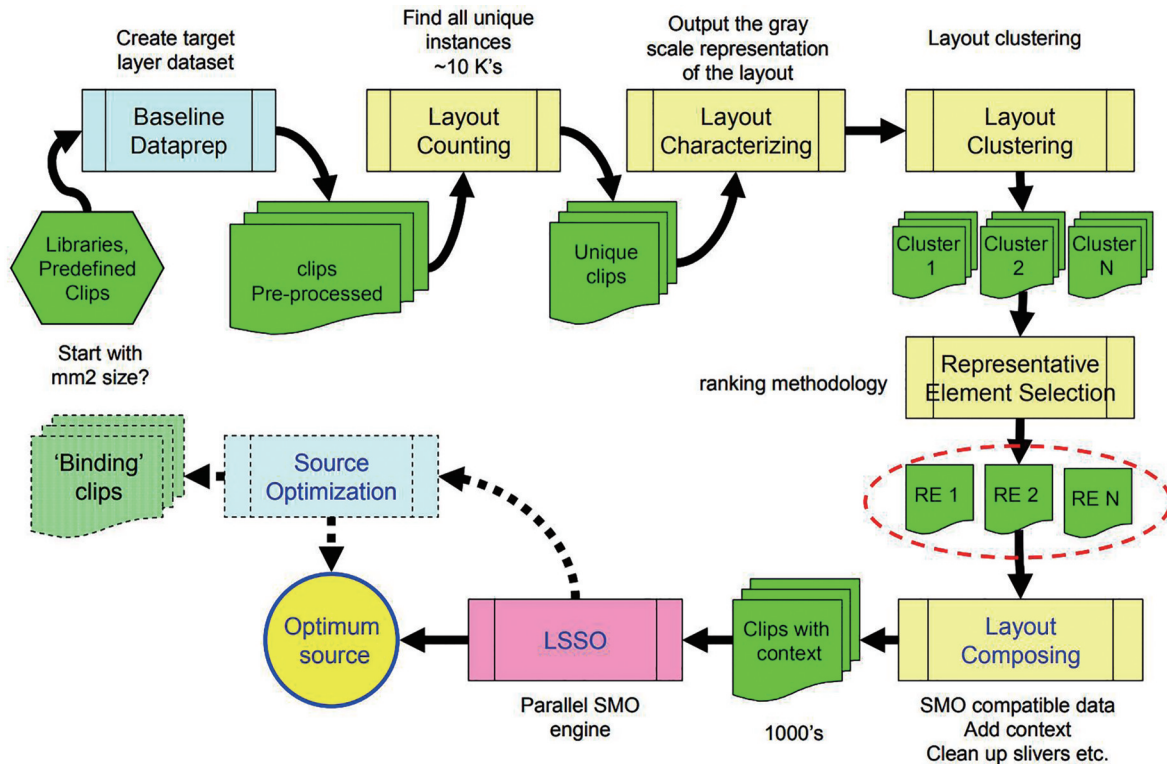


图 2 基于图形聚类的 SMO 关键图形筛选方法工作流程<sup>[30]</sup>

Fig. 2 Workflow of clustering-based critical pattern selection method for SMO<sup>[30]</sup>

取合适的图形表征方式将所有图形映射到特征空间中,在特征空间中对图形进行聚类。在每一类图形中,根据设计的排序方法将图形进行排序,从而挑选出代表性图形作为 SMO 的关键图形。该方法可以有效筛选出芯片版图中几何结构具有代表性的图形进行 SMO。但基于图形聚类的关键图形筛选方法需要预先设定图形聚类的簇数量。

### 2.2 基于频谱分析的关键图形筛选方法

在全芯片 SMO 应用中,通过对筛选出的关键图形进行 SMO 获得适用于全芯片的优化光源。优化光源的强度分布与图形的频谱密切相关。ASML 的 Tsai 等<sup>[61]</sup>提出了基于频谱分析的 SMO 关键图形筛选方法,该方法通过对版图图形频谱分析进行关键图形筛选。首先,该方法计算每个图形的频谱,采用频谱中的主要频率对图形进行表征。然后,根据主要频率的信息设计相应的覆盖规则,采用覆盖规则分析所有图形的主要频率之间的覆盖关系。根据覆盖关系找到所有主要频率中的代表性主要频率,筛选出所有代表性主要频率对应的图形作为 SMO 的关键图形。该方法已经集成到 ASML 的商用计算光刻软件 Tachyon 中。在基于频谱分析的 SMO 关键图形筛选方法中,主要频率的

表征方法、覆盖规则以及图形筛选方法都是影响关键图形筛选结果的重要因素。

主要频率的表征方法是基于频谱分析的 SMO 关键图形筛选方法的基础,影响着主要频率之间的覆盖关系以及关键图形的筛选结果。针对现有方法的主要频率表征方法不能准确表征频率分布的问题,本团队的 Liao 等<sup>[19]</sup>于 2020 年提出了基于频谱多方向宽度信息的 SMO 关键图形筛选技术,该技术通过提取图形的主要频率对图形进行表征,利用主要频率在频谱面投影的位置和八个方向的宽度信息表征主要频率,如图 3(a)所示。基于主要频率的位置和宽度信息,该技术设计了相应的主要频率提取方法、主要频率间的覆盖规则、主要频率分类方法以及关键图形筛选方法。同年,廖陆峰等<sup>[22]</sup>提出了基于频谱轮廓信息的 SMO 关键图形筛选技术,该技术利用主要频率在频谱面投影的位置和投影轮廓信息表征主要频率,如图 3(b)所示。基于主要频率的位置和轮廓信息,设计了相应的覆盖规则对主要频率进行聚类得到主要频率分组,然后根据主要频率分组进行关键图形筛选。采用常见的 SMO 测试图形集和标准单元库产生的测试图形集验证了所提出的两种关键图形筛选技术的有效性。



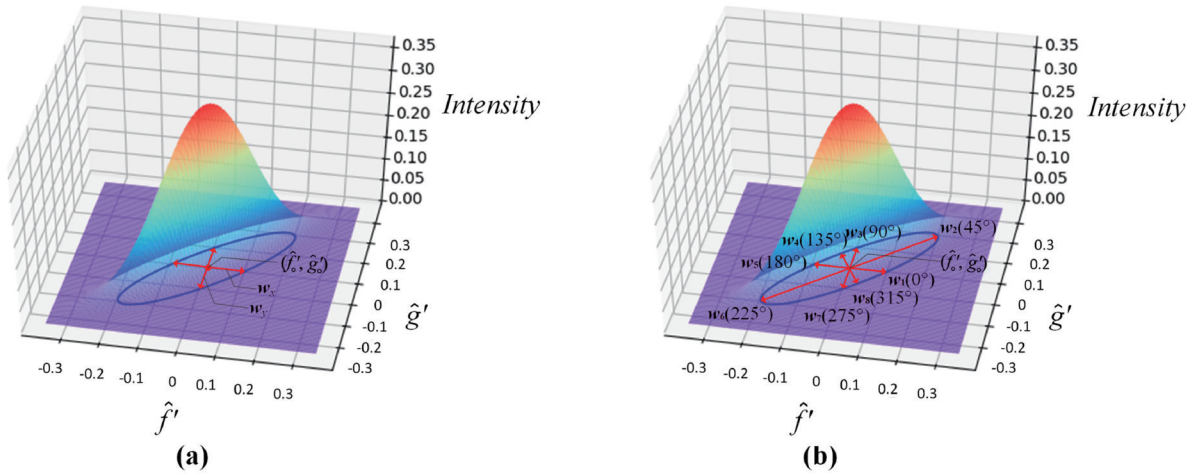


图 3 主要频率的示意图<sup>[19, 22]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of main frequencies<sup>[19, 22]</sup>

采用 ASML 公司商用软件 Tachyon 中的同类技术作为对比,按照业界全芯片 SMO 的实施方法进行了仿真验证。参考技术和测试技术均从测试图形集筛选出相同数量的关键图形。采用筛选出的关键图形分别进行 SMO,获得用于全芯片的优化光

源,利用获得的优化光源分别对全部图形进行 MO。经过上述步骤后,对比分析获得的工艺窗口。结果表明,与 Tachyon 中的同类技术相比,所提出的技术获得的工艺窗口更优,如图 4 所示。所提出的两种关键图形筛选技术可以筛选出更优的关键图形结果。

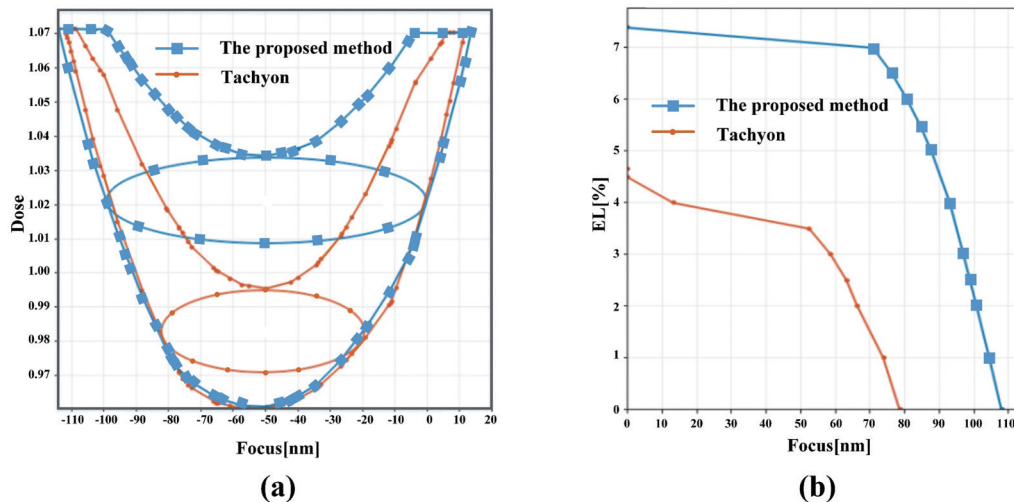


图 4 基于不同关键图形筛选方法获得的工艺窗口对比<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Comparison of process windows based on different critical pattern selection methods<sup>[19]</sup>

在基于频谱分析的 SMO 关键图形筛选方法中,根据覆盖关系确定代表性的主要频率后,存在多组关键图形与之对应。针对现有方法仅获得一组关键图形的问题,本团队的杨欣华等<sup>[25]</sup>提出了一种基于深度优先搜索算法的 SMO 关键图形筛选技术,其关键图形筛选流程如图 5 所示。该技术采用掩模频谱的投影边界以及增长因子表征掩模的衍射频谱特征。该技术设计了基于深度优先搜索算法的关键图形筛选方法,实现了全芯片 SMO 关键

图形筛选。该技术克服了现有技术仅获得一组解的缺点,可以获得所有关键图形组,进而可以对所有解进行对比分析从而得出最优解。采用标准单元库产生的测试图形集验证了该技术的有效性。采用 ASML 公司商用软件 Tachyon 中的同类技术作为对比,按照业界全芯片 SMO 的实施方法进行了仿真验证。仿真结果表明,该技术获得的工艺窗口优于商用软件获得的结果,且该方法可以获得所有的关键图形组,以便筛选出最佳关键图形组。

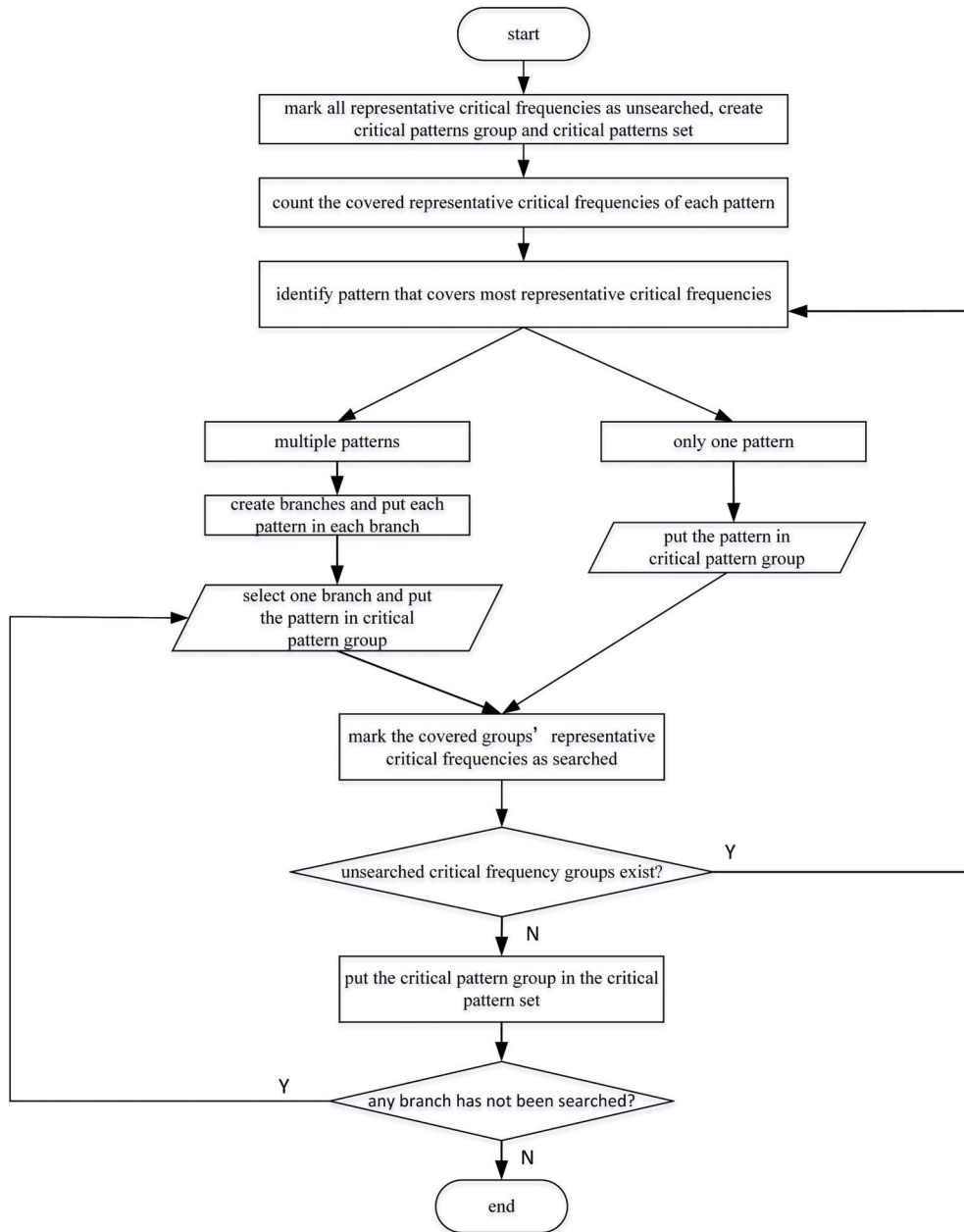


图 5 关键图形筛选流程图<sup>[25]</sup>

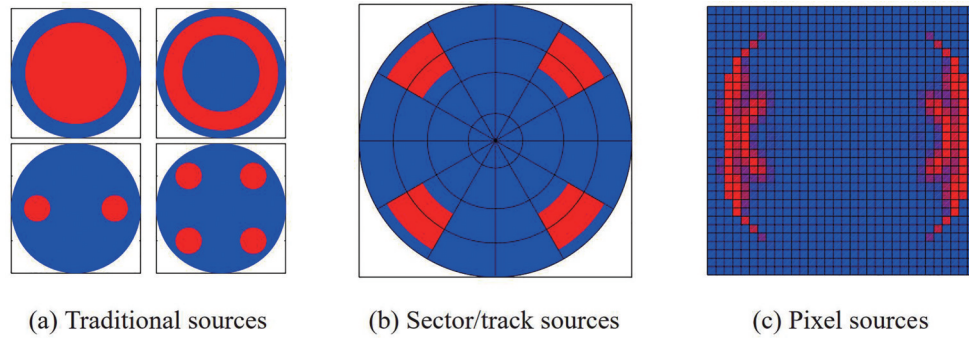
Fig. 5 Flow chart of the critical pattern selection<sup>[25]</sup>

### 3 SMO 的光源与掩模表征方法

在全芯片 SMO 应用中,筛选出 SMO 关键图形之后,将对筛选出的关键图形进行 SMO,获得适用于全芯片的优化光源。SMO 的结果影响着最终获得的工艺窗口。确定光源与掩模表征方法是进行 SMO 的基础。光源与掩模的表征方法决定了 SMO 的优化自由度,影响着 SMO 优化后的光源掩模样式。光源与掩模的表征方法是影响 SMO 性能的重要因素,获得广泛研究<sup>[4, 26, 50, 53, 56, 65]</sup>。

#### 3.1 光源表征方法

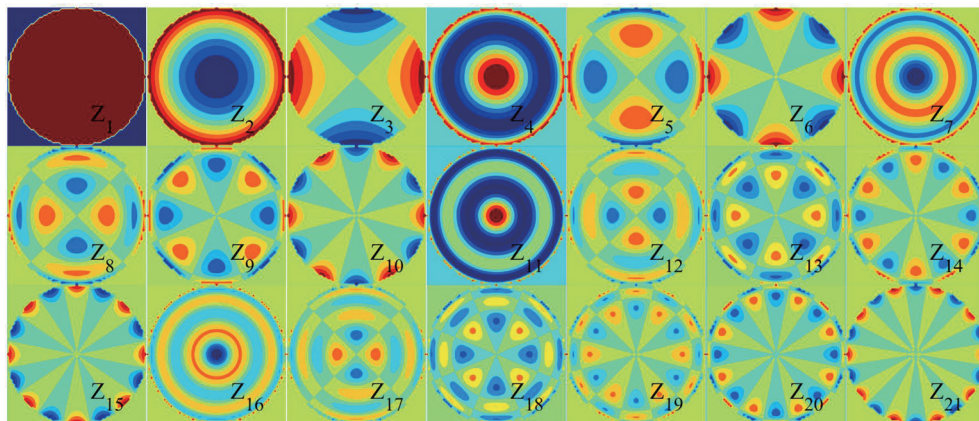
SMO 的光源表征方法决定了优化后获得的光源样式,同时决定了光源的优化自由度,影响着 SMO 的优化效率。常见的光源表征方法分为参数化表征和像素化表征。基于参数化表征的光源如图 6(a)和图 6(b)所示,常见的参数化光源包括圆形光源、环形光源、二极光源、四极光源和扇形光源<sup>[65-66]</sup>等。参数化光源可以通过少量的参数进行光源表征。由于参数数量的限制,参数化光源只能产生少数的定制化光源,存在优化自由度低的问题。人们通过将光源划分为细小的像素可以获得更高的

图 6 常见的光刻光源表征方法<sup>[56]</sup>Fig. 6 Common source representation methods in optical lithography<sup>[56]</sup>

优化自由度。基于像素化表征的光源如图 6(c) 所示,光源由一系列光源像素构成。像素化光源的优化自由度高,在 SMO 中获得广泛的研究<sup>[4, 50, 53]</sup>。

像素化光源具有更高的优化自由度,同时也增加了优化计算量。为了提高光源优化的速度,平衡 SMO 的时间和性能,香港大学 Wu 等<sup>[56]</sup>提出了采用

Zernike 多项式表征光源的 SMO 技术。如图 7 所示,该技术采用前 21 阶 Zernike 多项式表征光源,将光源表示为 21 项 Zernike 多项式的加权叠加。基于 Zernike 多项式表征的光源,其优化的变量对应 Zernike 多项式的系数。该方法减少了光源优化的参数量,提高了优化速度。

图 7 用于表征光源的前 21 阶 Zernike 多项式<sup>[56]</sup>Fig. 7 First 21 Zernike polynomial functions chosen to represent the source patterns<sup>[56]</sup>

像素化光源的光源点数多,在进行 SMO 时优化变量维度高。像素化光源 SMO 技术的计算量大,收敛速度慢。针对该问题,本团队的 Yang 等<sup>[7]</sup>于 2014 年提出了一种基于多极光源表征方法的 SMO 技术。如图 8 所示,该技术采用一系列圆形子光源构成完整的照明光源,每个圆形子光源由中心的极坐标 $(r_c, \theta_c)$ ,半径 $r_s$ 和强度 $g$ 描述。当半径 $r_s$ 足够小时,多极照明光源描述方法可以描述自由形式照明光源。当圆形子光源发生重叠时,重叠区域光源强度为圆形子光源光强之和。该技术将照明光源和掩模图形编码为染色体,采用 GA 算法实现照明光源和掩模图形的联合优化。与像素化光源的 SMO 技术相比,该技术光源优化变量少,优化的

解空间小,减少了搜索最优解的计算量,可以有效提高优化速度。采用像素化光源的 SMO 技术作为对比,验证了该技术的有效性。仿真实验结果表明,在确保优化成像质量相近的情况下,基于多极光源表征方法的 SMO 技术的优化速度比像素化光源的 SMO 技术提高了 7 倍左右。基于多极光源表征方法的 SMO 技术降低了优化变量维度,提高了 SMO 技术的优化速度和优化效率。

像素化光源的 SMO 技术需要对所有光源像素进行优化,存在计算量大、收敛速度慢的问题。实际应用中,SMO 获得的优化光源只有部分光源像素的值不为零,存在稀疏性。针对该问题,本团队的 Chen 等<sup>[20-21]</sup>提出了一种基于合成光源的 SMO 方



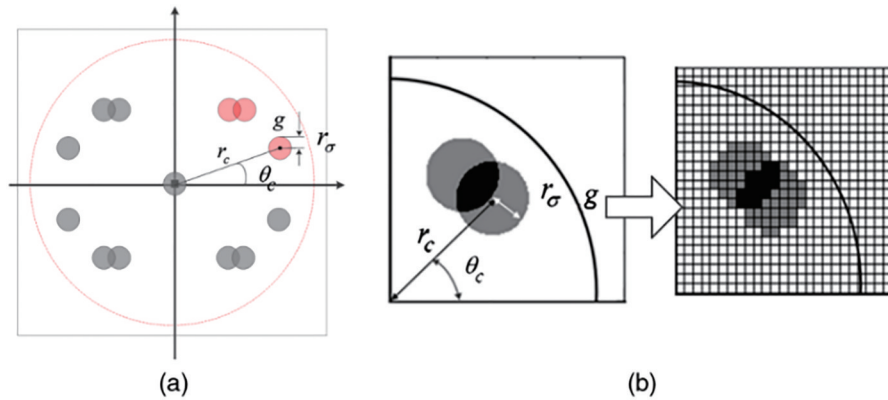


图 8 多极光源示意图。(a)多极光源描述方法;(b)多极光源的直角坐标分解<sup>[7]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of multi-pole light source. (a) Multipole source representation; (b) cartesian discretization of the multipole source<sup>[7]</sup>

法。该方法采用像素化形式表征光源,以像素化形式表征掩模,以图形误差为评价函数,利用基于协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES)的自适应学习机制进行光源掩模的联合优化。与全像素化光源不同,该方法根据光源的稀疏性预设固定数量的光源点,只采用部分数量的光源像素进行优化。进行光源优化时,采用移动预设的光源点位置的方式优化光源的形状。经过优化后,对成像结果有利的光源点位置会形成多个光源点的叠加,从而增强对位置的光源强度,形成一定强度分布的合成光源(图9)。该方法可以有效筛选出光源中有利于提高成像质量的关键照明方向。采用含有交叉门的复杂掩模图形作为测试图形,与全像素化光源的SMO技术进行了对比,在相同的光刻仿真参数与硬件配置下验证了该方法的有效性。结果表明,基于合成光源的SMO方法提高了像素化光源SMO方法的优化性能和收敛效率。

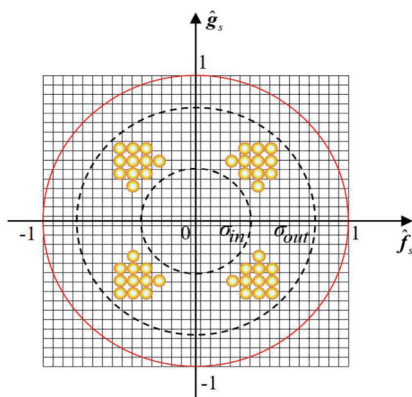


图 9 合成光源示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 9 Schematic of the synthesized source<sup>[21]</sup>

针对像素化光源的SMO技术优化效率低、速度慢的问题,本团队的Zhang等<sup>[23]</sup>提出了一种基于光源部分采样的SMO方法(图10)。该方法采用像素化形式表征光源,以像素化形式表征掩模,以图形误差为评价函数,采用社会学习粒子群(SL-PSO)算法进行光源掩模的联合优化。在优化光源时,利用光源优化后的稀疏特性,通过部分采样选取一定数量的光源点进行优化,并采取一定的编码策略使每个光源点的位置只需一个变量来描述。光源点的位置和强度被分开优化,从而降低了优化时的变量维度,提高了光源优化的效率。采用多种测试图形对该技术的有效性进行了仿真验证,结果表明光源部分采样的SMO方法提高了SMO的优化效率和优化速度。

### 3.2 掩模表征方法

掩模优化是SMO技术的重要组成部分。掩模表征方法决定了SMO掩模的优化自由度,影响着SMO的优化速度和优化效率。常见掩模表征方法主要包括多边形表征<sup>[47, 67-68]</sup>和像素化表征<sup>[4, 50, 53]</sup>两类。

基于多边形表征的掩模将掩模图形表示为多边形组合,采用多边形的参数可以对掩模图形进行描述。如图11所示,该表征方法可以采用多边形的中心坐标、高度和宽度等参数对掩模图形进行表征。在优化过程中,通过对多边形参数进行调整可以实现MO。基于多边形表征的掩模在优化过程中,其优化参数量少,优化的计算量小,但存在优化自由度较低的问题。

为了提高MO优化的自由度,人们通过离散化将掩模图形划分为像素级细小区域,增加了优化自

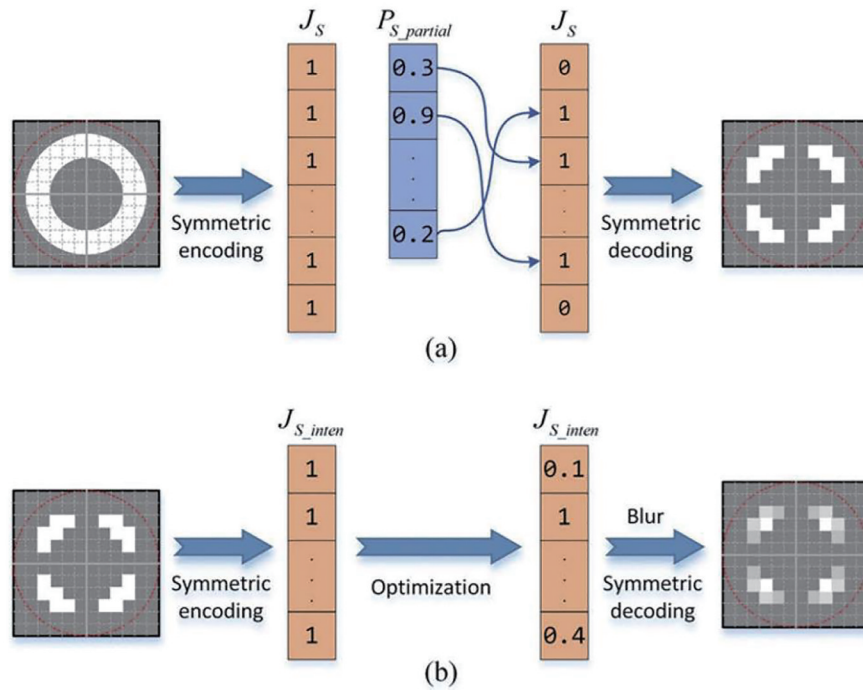


图 10 SO 策略示意图。(a)位置优化;(b)光源强度优化<sup>[23]</sup>

Fig. 10 Schematic of SO strategies. (a) Position optimization; (b) light source intensity optimization<sup>[23]</sup>

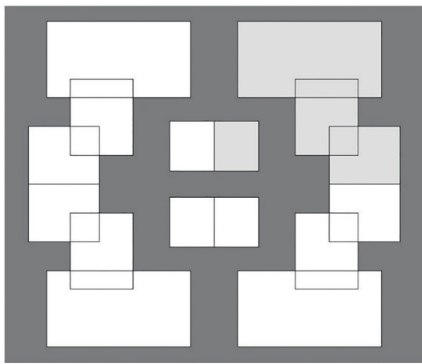


图 11 基于多边形表征的掩模示意图<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Schematic of mask based on polygon representation<sup>[47]</sup>

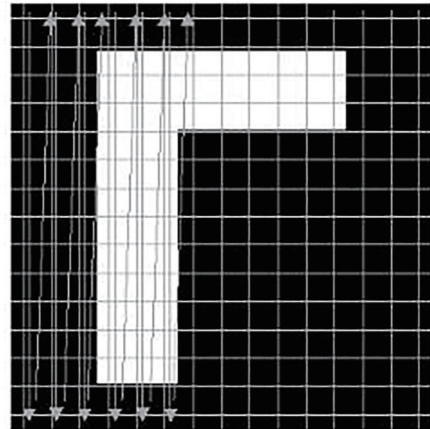


图 12 像素化掩模示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 12 Schematic of pixelated mask<sup>[18]</sup>

由度。基于像素化表征的掩模如图 12 所示,该表征方法采用一系列图形像素表征掩模。像素化掩模具有优化自由度高的优点,在 SMO 应用中获得广泛研究<sup>[4, 21, 23, 50, 53]</sup>。基于像素化掩模的 SMO 技术优化自由度高,但是也带来了计算量大的问题。为了降低基于像素化掩模的 SMO 技术的计算量,ASML 的 Socha 等<sup>[31]</sup>在 2005 年提出了采用部分掩模频谱进行 SMO 的方法。该方法通过计算基于像素表征的掩模的频谱,采用能够进入投影物镜的部分频谱进行 SMO,减少了基于像素化掩模的 SMO 技术的计算量。基于像素化掩模的 SMO 技术的计

算是影响优化速度和优化效率重要因素。

现有的基于像素化掩模的 SMO 技术需要对所有的掩模图形像素进行优化。直接在空域对像素化掩模进行优化,存在优化速度慢的问题。此外,基于像素表征的掩模将掩模图形划分为细小的像素,优化后掩模的可制造性差。针对上述问题,本团队的 Wang 等<sup>[14-15]</sup>提出了一种基于离散余弦变换的 MO 技术。该技术通过离散余弦变换获得掩模的频谱,根据光刻成像系统的低通滤波特性选取掩模频谱的低频部分进行 MO。该技术采用掩模频谱的

低频成分进行编码,以图形误差作为评价函数,采用粒子群算法(PSO)算法进行优化。掩模编码示意图如图 13 所示,根据掩模的对称性可以仅对部分掩模进行编码, $N_m \times N_m$  为需编码的像素数, $N_{DCT}$  为离散余弦变换系数。与基于像素化掩模的 MO 技术相比,该技术提高了优化的速度,同时增强了优化

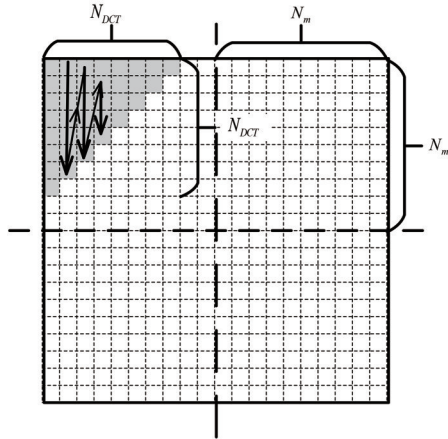


图 13 掩模编码示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of mask encoding<sup>[15]</sup>

后掩模的可制造性。采用密集线掩模图形和含有交叉门的复杂掩模图形作为测试图形,与基于像素

化掩模的 MO 技术进行了对比,仿真验证了该技术的有效性。结果表明,基于离散余弦变换的 MO 技术优化速度更快,获得的掩模的可制造性强。该技术通过选取离散余弦变换后掩模的低频部分作为优化变量进行优化,降低了优化后掩模的复杂度,增强了优化后掩模的可制造性。

基于像素化掩模的 SMO 技术需要对全部掩模像素进行优化,优化变量的维度高,存在计算量大、优化速度慢的问题。针对该问题,本团队的 Zhang 等<sup>[23]</sup>提出了一种基于掩模图形双边演化的 SMO 技术。该技术采用像素化形式表征光源,以像素化形式表征掩模,以图形误差作为评价函数,采用 SL-PSO 算法对光源和掩模进行联合优化。在优化阶段,如图 14 所示,该技术提出了一种双重边界演化策略,将优化变量从图形的所有像素减少为边界像素,极大地降低了变量维度。该技术根据掩模图形边缘轮廓和光刻胶图形边缘轮廓的差异,动态调整掩模图形,从而实现优化。采用多种测试图形验证了该技术的有效性。通过与现有技术对比,结果表明该技术提高了基于像素化掩模的 SMO 技术的优化速度和优化效率。

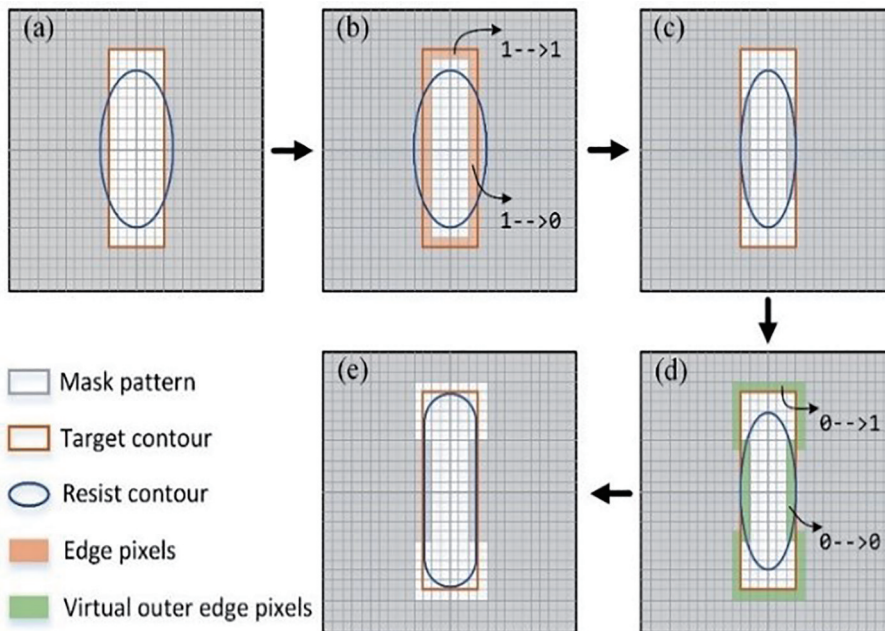


图 14 双边演化方法原理示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of dual edge evolution strategy<sup>[23]</sup>

#### 4 SMO 优化算法

在对光源和掩模进行表征后,SMO 技术采用优

化算法来对光源和掩模进行优化。优化算法是影响 SMO 优化速度和优化效率的重要因素。应用于 SMO 技术的优化算法主要包括梯度算法和启发式算法。



### 4.1 梯度算法

基于梯度算法的SMO技术需要构造可微的目标函数,根据目标函数的梯度信息沿着梯度下降的方向对光源和掩模进行优化。基于梯度算法的SMO技术具有原理清晰、实用性强的特点,得到了广泛研究。为了提高SMO技术的优化速度,人们不断改进应用于SMO的梯度算法。2009年, Ma等<sup>[50]</sup>将梯度下降法应用于SMO。2011年,清华大学的Peng等和台湾交通大学的Yu等<sup>[52-53]</sup>分别提出了基于最速下降法的SMO技术,进一步提高了优化速度。同年,香港大学Jia等<sup>[51]</sup>将共轭梯度法应用于SMO技术,其优化流程如图15所示,优化结果如图16所示。2014年,香港大学Li等<sup>[60]</sup>提出基于增广拉格朗日法的SMO技术,提高优化速度的同时考虑了掩模形貌效应。

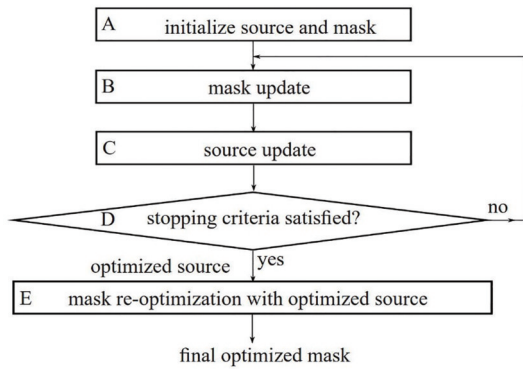


图 15 基于共轭梯度法的SMO流程<sup>[51]</sup>

Fig. 15 Optimization procedure of SMO based on conjugate gradient method<sup>[51]</sup>

现有的基于梯度算法的SMO技术不易获得全

局最优解。针对该问题,本团队的闫观勇<sup>[8-9]</sup>提出了基于二次规划的SO技术。该技术采用像素化形式表征照明光源,以空间像与目标图形的图形误差作为目标函数。通过目标函数对光源的梯度信息对光源进行优化。该技术通过将目标函数构造为二次函数的形式,采用二次规划的方法进行优化,保证了优化结果为全局最优解。该技术构造的目标函数<sup>[8]</sup>表示为

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

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T, I^{V_1} = [I_{s_1}^1, I_{s_2}^1, \dots, I_{s_M}^1]^T,$$

$$I_t = [I_t^1, I_t^2, \dots, I_t^N]^T, \quad (2)$$

$$ISM = \begin{bmatrix} I_{s_1}^1 & I_{s_1}^2 & \dots & I_{s_1}^N \\ I_{s_2}^1 & I_{s_2}^2 & \dots & I_{s_2}^N \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{s_M}^1 & I_{s_M}^2 & \dots & I_{s_M}^N \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $s$  表示待优化的光源变量;  $I^{V_n}$  表示空间像;  $I_t$  表示目标图形;  $I_{s_n}^n$  和  $I_t^n$  分别为  $I_{s_n}$  和  $I_t$  中的第  $n$  个点;  $M$  是光源的总点数;  $N$  是空间像的总点数。采用典型的一维孤立空图形和二维接触孔阵列图形验证了该技术的有效性。进行SO后,两种测试图形的图形误差分别降低了99%和99.87%,有效提高了光刻成像质量。仿真结果表明,基于二次规划的SO技术可以获得光源的全局最优解,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。

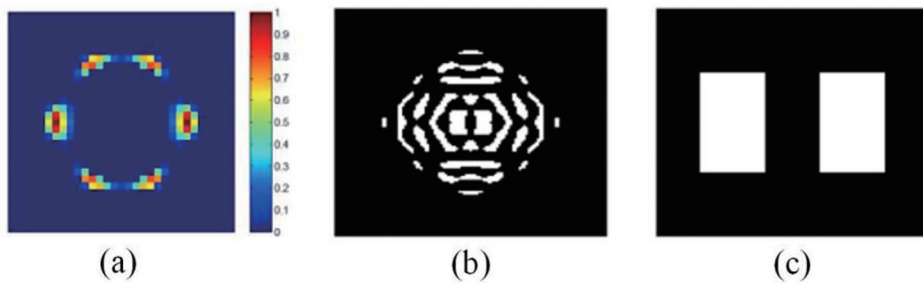


图 16 基于共轭梯度法的SMO结果<sup>[51]</sup>

Fig. 16 Optimization results of SMO based on conjugate gradient method<sup>[51]</sup>

现有的基于梯度算法的SMO技术需要梯度信息的解析表达式。当模型梯度求解复杂度甚至无法解析求解时,梯度算法的应用受到限制。针对该问题,本团队的李兆泽<sup>[10-11]</sup>提出了一种基于

随机并行梯度速降算法的SMO技术。该技术采用像素化形式表征照明光源和掩模图形,以光刻胶像与目标图形的图形误差作为目标函数,采用随机并行梯度速降算法对光源和掩模进行联合优

化。该技术通过随机扰动进行梯度估计,利用估计梯度来迭代更新光源与掩模。与其他基于梯度算法的 SMO 技术相比,该技术避免了求解梯度解析表达式的过程,降低了 SMO 的优化复杂度。基于随机并行梯度速降算法的 SMO 流程如图 17 所示。采用接触孔阵列图形、十字线图形和 L 形密

集线图形三种典型的掩模图形作为测试图形验证了该技术的有效性。进行 SMO 后,三种测试图形的图形误差分别降低了 75%、80% 和 70%,有效提高了光刻成像质量。该技术适用于高维数控制变量、复杂光刻成像模型系统中的光源与掩模优化。

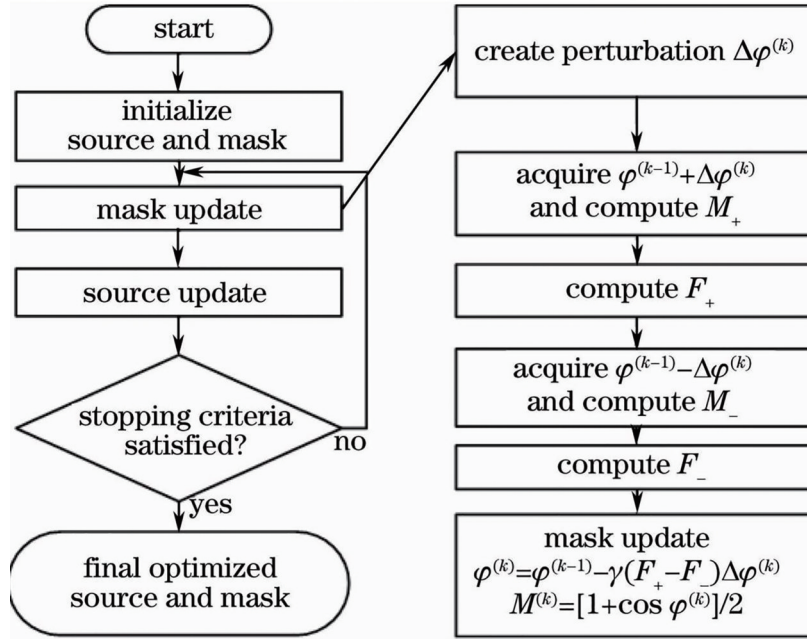


图 17 基于随机并行梯度速降算法的 SMO 流程图<sup>[11]</sup>

Fig. 17 Flow chart of SMO based on stochastic parallel gradient descent algorithm<sup>[11]</sup>

#### 4.2 启发式算法

基于启发式算法的 SMO 技术将优化问题作为黑箱问题进行处理,具有无需先验知识和无需计算梯度的特点。基于启发式算法的 SMO 方法通过采用一定的搜索机制来寻找优化问题的次优解,作为全局最优解的代替方案。德国 Fraunhofer IISB 研究所的 Fühner 等于 2005 年提出了基于遗传算法的 SMO(GA-SMO)技术。在该技术中,优化问题的解的集合称为种群,单独的解称为个体。该技术的优化流程如图 18 所示。首先随机生成一组优化变量的初始解,并将每个个体编码为染色体。根据“适者生存、优胜劣汰”的原则,个体进行迭代进化直至获得足够优秀的近似解。在每一次进化过程中,通过目标函数计算每个个体的适应度值。根据适应度值的大小选择个体,并利用仿照自然界的遗传算子进行交叉和变异,产生新的种群。新种群比前代种群更加适合环境,因此其对应的解更加接近问题的最优解。通过不断迭代使得优化变量逼近最优解,从而

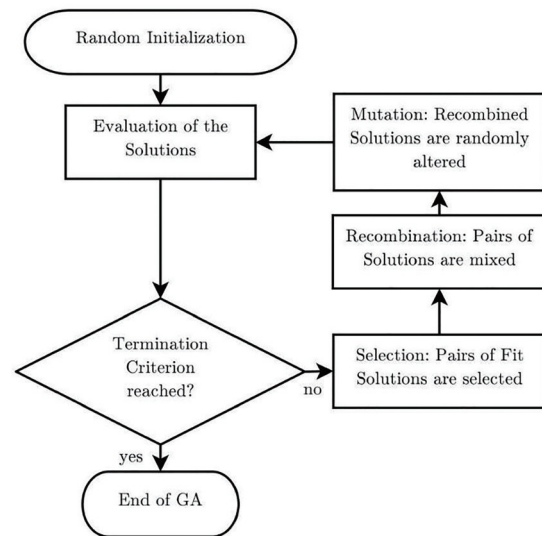


图 18 GA-SMO 技术流程图<sup>[47]</sup>

Fig. 18 Flow chart of GA-SMO<sup>[47]</sup>

实现光源掩模的联合优化。染色体的编码方式、适应度函数(即目标函数)和遗传算子(包含选择、交叉和变异)等都是影响 GA-SMO 技术的重要因素。

传统的 GA-SMO 技术采用二进制编码方式对优化变量进行编码。对优化变量为实数的高维连续优化问题,采用二进制编码得到的染色体长度较长,优化时的搜索空间较大,存在优化速度慢的问题。针对此问题,本团队的 Yang 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于实数编码的 GA-SMO 技术。该技术采用使用实

数字字符串对光刻机的照明光源和掩模图形进行编码,将优化变量编码为 GA 算法中的染色体,采用基于光刻胶像的适应度函数作为目标函数,根据 GA 算法的“适者生存,优胜劣汰”的原则选取适应度较好的个体,从而实现光源和掩模的联合优化。基于实数编码的光源和掩模图形的染色体形式<sup>[5]</sup>为

$$\underbrace{\underbrace{r_1, \theta_1}_{\text{pole 1}} \cdots \underbrace{r_n, \theta_n}_{\text{pole } n}}_{\text{source}}, \underbrace{\underbrace{x_1, y_1, h_1, w_1}_{\text{rectangle 1}} \cdots \underbrace{x_m, y_m, h_m, w_m}_{\text{rectangle } m}}_{\text{mask}}, \quad (4)$$

式中: $(r, \theta)$ 为圆形光源的中心极坐标,每个圆形光源的半径为 $r_s=0.05$ ; $(x, y)$ 为掩模图形的矩形的中心坐标; $h$ 和 $w$ 分别为每个矩形的高度和宽度。基于实数编码的照明光源和掩模图形染色体总长度为 $2n+4m$ 。采用交错接触孔图形、典型逻辑图形作为验证图形,通过与基于二进制编码的 GA-SMO 技术进行比较验证了该技术的有效性。通过仿真实验对比了实数编码方法和二进制编码方法的优化速度和成像质量。结果表明,基于实数编码的 GA-SMO 方法优化收敛速度更快、优化结果成像质量更佳。以交错接触孔作为优化测试图形时,将适应度优化到 6.0 作为目标,基于实数编码的 GA-SMO 技术只需 53.7 代,比基于二进制编码的 GA-SMO 技术减少了 65.5%。基于实数编码的 GA-SMO 技术可以解决基于二进制编码的 GA-SMO 技术的优化速度慢的问题。

适应度函数是影响 GA-SMO 技术的重要因素之一。在实际光刻中,存在曝光剂量误差、离焦、像差、掩模制造误差等工艺条件误差。为了减小这些工艺误差对优化后的光源和掩模的影响,通常将不同工艺条件误差下的适应度函数进行加权。通过对加权适应度函数进行优化,获得对工艺误差不敏感的结果。加权适应度函数的权重需要根据经验或者仿真实验来获得,这增加了基于加权适应度函数的 GA-SMO 技术的优化时间和优化难度。针对该问题,本团队的杨朝兴<sup>[5, 17]</sup>提出了一种基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术。该技术的适应度函数的基本形式<sup>[5]</sup>为

$$F = F(c_v), \quad (5)$$

式中: $F(c_v)$ 表示光刻工艺条件为 $c_v$ 时的适应度函数,光刻工艺条件 $c_v$ 包括离焦量、曝光剂量、像差、掩模误差等。在实际光刻过程中,光刻工艺条件按

照一定的统计分布规律随机变化。基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术按照实际光刻过程的工艺条件的变化规律随机变化,从而降低优化获得的光源和掩模对工艺条件变化的敏感度。基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术增强了优化结果对工艺条件 $c_v$ 的鲁棒性。与基于加权适应度函数的 GA-SMO 技术相比,该技术无需经验或仿真实验来获得适应度函数权重,减少了优化时间。采用经典的逻辑图形的作为测试图形,进行仿真实验验证了该技术的有效性。当曝光剂量误差为 15% 时,采用基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术获得的优化光源和优化掩模的可用焦深达到 200 nm,与基于加权适应度函数的 GA-SMO 技术的获得的结果相近。图 19(a)和图 19(b)分别为两种技术优化后不同焦深的空间像、无曝光剂量误差的光刻胶像和存在曝光剂量误差的光刻胶像。当三阶彗差为 0.1 时,基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术获得的优化光源和优化掩模的可用焦深达到 200 nm。结果表明,基于动态适应度函数的 GA-SMO 技术增强了优化结果对工艺条件的鲁棒性。

传统的 GA-SMO 技术采用多边形表征掩模,采用参数形式或像素形式表征光源。和基于全像素化表征的 SMO 技术相比,传统方法存在优化自由度低、成像质量欠佳的问题。针对此问题,本团队的杨朝兴<sup>[5, 18]</sup>提出了一种基于多染色体的 GA-SMO 技术。该技术采用实数编码的方式对像素化的光源进行编码,采用二进制编码对像素化的二元掩模进行编码,实现了像素化光源和像素化掩模的联合优化。在基于多染色体的 GA-SMO 的优化过程中,分别采用实数编码和二进制编码的交叉与变异算子对光源染色体 $X_{\text{src}}$ 和掩模染色体 $X_{\text{msk}}$ 进行更新。该技术的优化流程如图 20 所示。首先随机生成一组光源和掩模作为初始代,采用实数编码和二进制



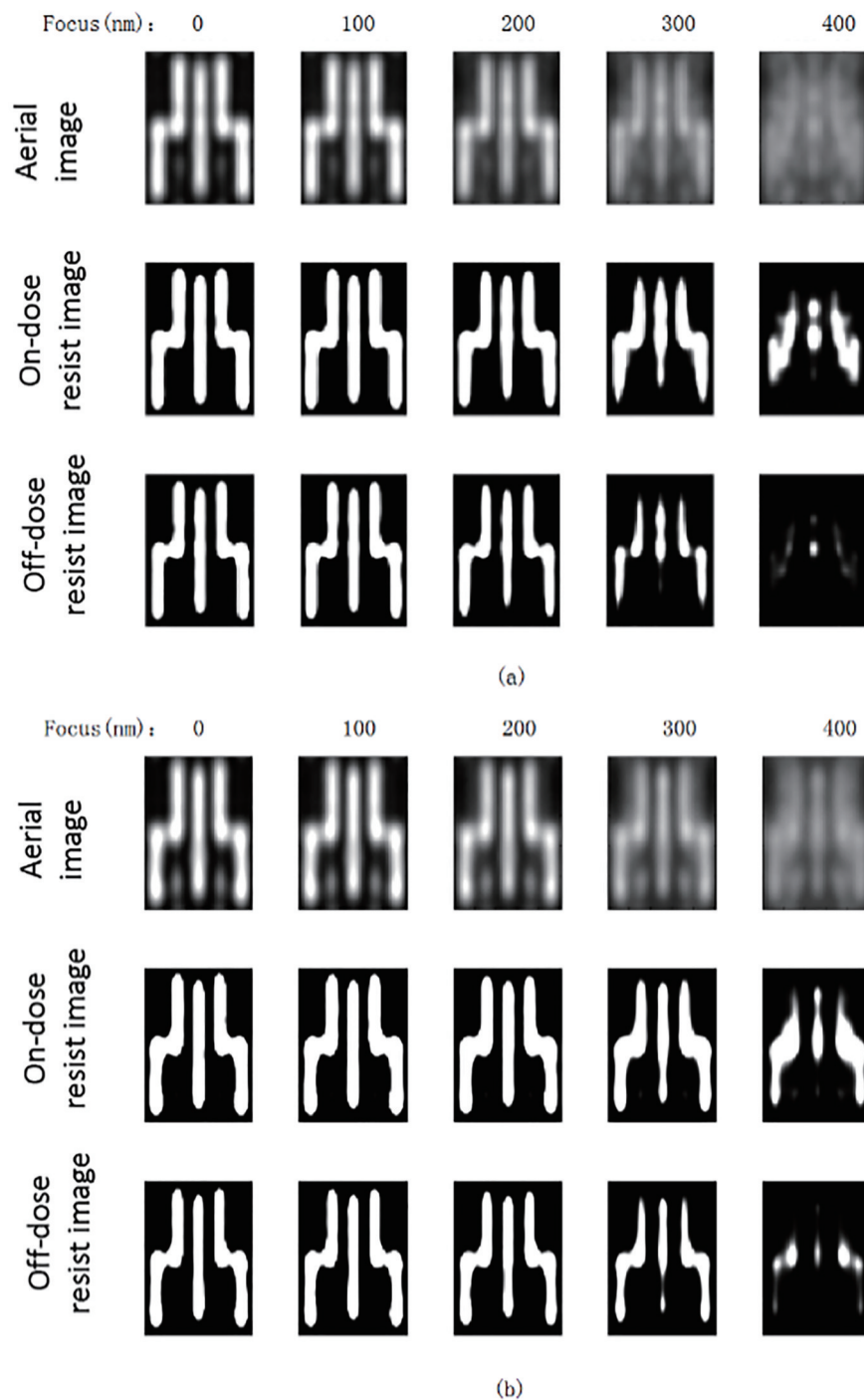
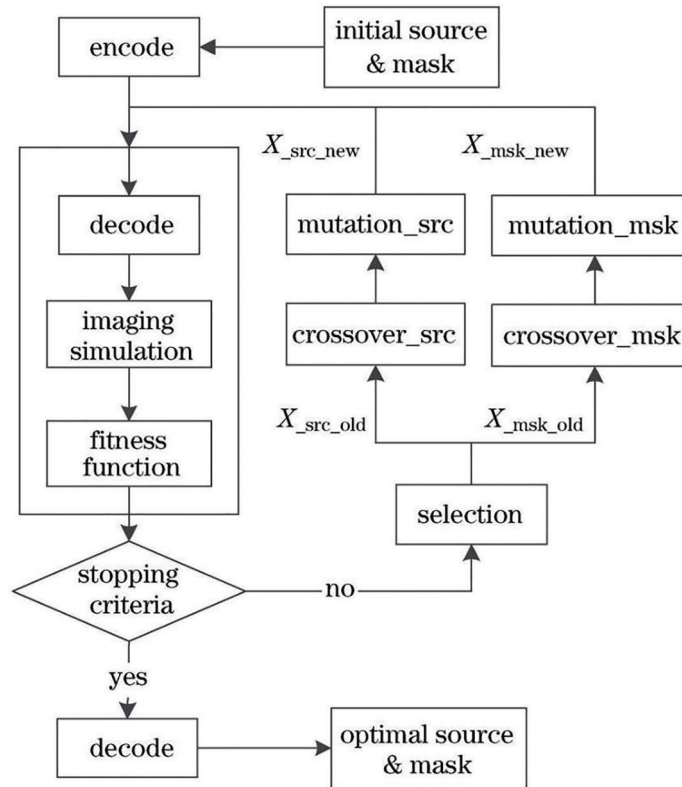


图 19 采用基于加权适应度函数(a)与动态适应度函数(b)的 GA-SMO 技术优化后的空间像、无曝光剂量误差的光刻胶像和存在曝光剂量误差的光刻胶像<sup>[17]</sup>

Fig. 19 Aerial images, resist images without dose error and resist images under dose error after optimization. (a) Weighted fitness method; (b) dynamic fitness method<sup>[17]</sup>

编码的形式分别对光源和掩模进行编码为光源染色体  $X_{src}$  和掩模染色体  $X_{msk}$ 。在迭代过程中,需要对光源染色体  $X_{src}$  和掩模染色体  $X_{msk}$  进行解码获得光源和掩模图形,然后采用光刻成像程序计算对应的光刻结果。根据定义的评价函数对光刻结果进行

评估,从而计算此时光源和掩模图形的适应度。根据 GA 算法的“适者生存,优胜劣汰”原理,在每次迭代中选择适应度较好的个体,使用交叉和变异算子获得更新的光源染色体  $X_{src-new}$  和掩模染色体  $X_{msk-new}$ 。重复循环“评价—选择—交叉—变异”过

图 20 基于多染色体 GA-SMO 技术的流程图<sup>[18]</sup>Fig. 20 Flow chart of source mask optimization method based on multi chromosome genetic algorithm<sup>[18]</sup>

程,直到满足停止条件即可获得优化后的光源和掩模输出。采用仿真实验对该技术的有效性进行了验证。与多边形表征掩模的单染色体 GA-SMO 技术相比,基于多染色体的 GA-SMO 技术获得的优化结果的适应度值更优。以适应度值 5200 作为参考目标,基于多染色体的 GA-SMO 技术仅需 132 代迭代即可完成优化,比基于单染色体的 GA-SMO 技术减少了 127 代。基于多染色体的 GA-SMO 技术有效提升了 GA-SMO 技术的优化速度和优化结果质量。

GA-SMO 技术通过模仿自然进化策略进行优化,优化过程需要的大量光刻仿真计算,存在收敛速度较慢的问题。针对此问题,本团队的 Wang 等<sup>[12-16]</sup>将粒子群(PSO)算法作为优化算法,对基于 PSO 算法的 SO 技术、MO 技术及 SMPO 技术进行了研究。基于 PSO 算法的优化方法将每个解被抽象为解空间的一个粒子,每个粒子具有位置、速度和评价函数确定的适应度值。PSO 算法首先初始化一群随机粒子,然后所有粒子追随当前的最优粒子在解空间搜索,通过迭代寻找最优解。基于 PSO 算法的优化技术采用像素化形式表征光源,以离散余弦变换基表征掩模,以 Zernike 系数表征

的投影物镜,以图形误差作为评价函数,采用 PSO 算法对光源、掩模、投影物镜进行单独或联合优化。基于 PSO 算法的 SMPO 方法的优化流程如图 21 所示,主要由初始化、SO、MO、投影物镜优化和结束条件等部分构成。在初始化阶段,首先对光源、掩模及投影物镜进行初始化,然后将其分别编码为种群中某粒子的位置信息,并随机初始化其速度。然后根据评价函数计算各粒子的适应度值,采用 PSO 算法依次进行 SO、MO、投影物镜优化,直到满足结束条件。采用含有交叉门的复杂掩模图形作为测试图形,分别在标称条件和工艺条件下验证了基于 PSO 算法的 SO 方法、MO 方法及 SMPO 方法的有效性。结果表明,与基于 GA 算法的优化技术和基于梯度算法的优化技术相比,基于 PSO 算法的优化技术具有更佳的优化性能和更快的收敛速度。

传统的基于启发式算法的 SMO 技术在优化阶段缺乏对解搜索空间和搜索步长的控制,难以找出最佳的变量调整方向,存在优化性能和收敛效率存在不足的问题。针对该问题,本团队的 Chen 等<sup>[20-21]</sup>提出了一种基于 CMA-ES 算法的 SMO 技术。该技术采用像素化形式表征光源,以像素化形式表征掩

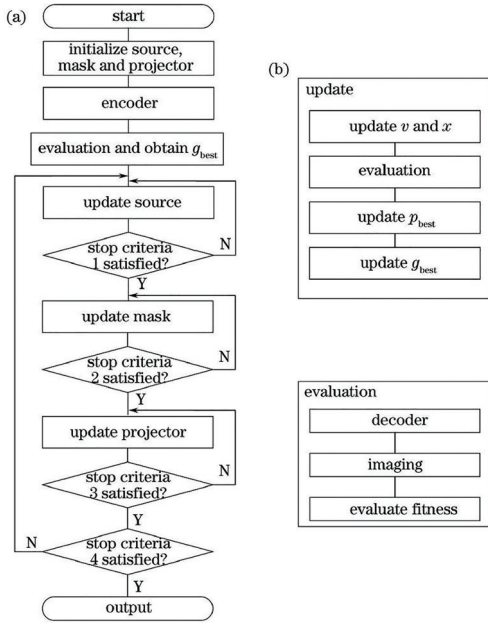


图 21 基于 PSO 算法的 SMPO 流程图<sup>[15-16]</sup>

Fig. 21 Flow charts of SMPO method using PSO algorithm<sup>[15-16]</sup>

模,以图形误差为评价函数,利用 CMA-ES 算法的自适应学习机制,在优化过程中自适应地调整解搜索空间和搜索步长,提高了优化性能和收敛效率。采用含有交叉门的复杂掩模图形作为测试图形,在相同的光刻仿真参数与硬件配置下,与常用的启发式算法的 SMO 技术进行了对比,采用不同的优化算法进行 SMO 获得的结果如图 22 所示,结果表明,该技术提高了 SMO 的优化性能和收敛效率。

针对 EUV 光刻,本团队的 Zhang 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于 SL-PSO 算法的 EUV SMO 技术。该技术采用像素化形式表征光源,采用像素化的基于掩模结构分解法的三维掩模模型进行成像仿真,以图形误差为评价函数,采用 SL-PSO 算法对 EUV 光源和掩模进行联合优化。该技术提高了优化后图形的保真度、优化性能和收敛效率,同时减小了阴影效应带来的影响。采用密集线掩模图形、含有交叉门的复杂掩模图形和直角图形作为测试图形验证了该技术的有效性。使用基于厚掩模模型和 SL-PSO 算

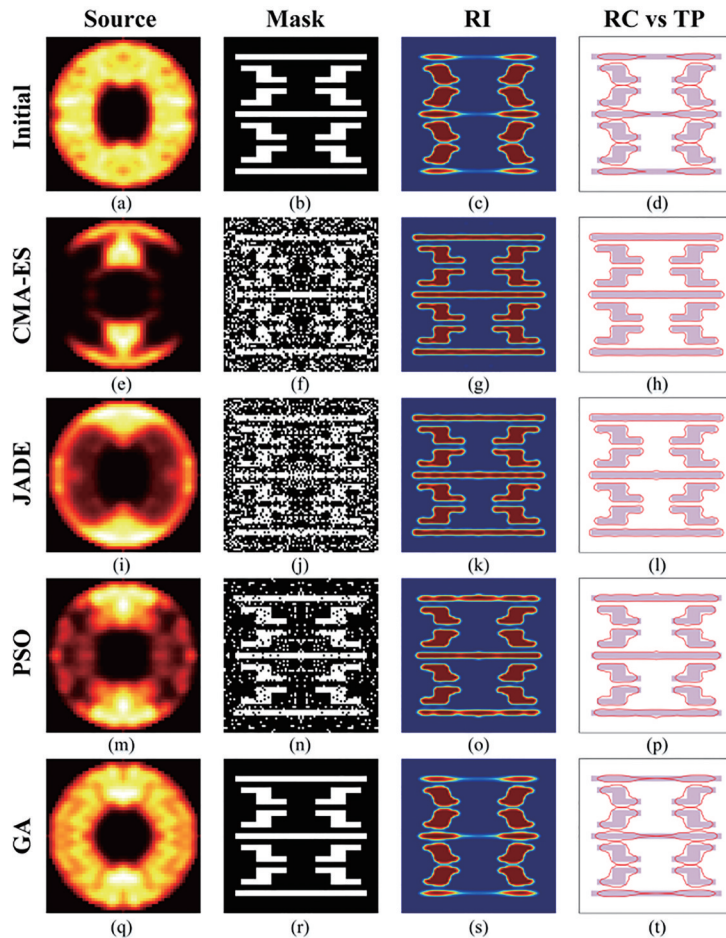


图 22 采用不同优化算法的 SMO 结果<sup>[21]</sup>

Fig. 22 Results of SMO using different optimization algorithms<sup>[21]</sup>



法的 EUV SMO 技术对测试图形优化后,三种测试图形优化结果的图形误差分别降低了 94.7%、76.9% 和 80.6%。结果表明,该技术有效提高了光刻成像质量。如图 23 所示,与常用的启发式算法相比,SL-PSO 算法提高了像素化 SMO 方法的优化性能和收敛效率。

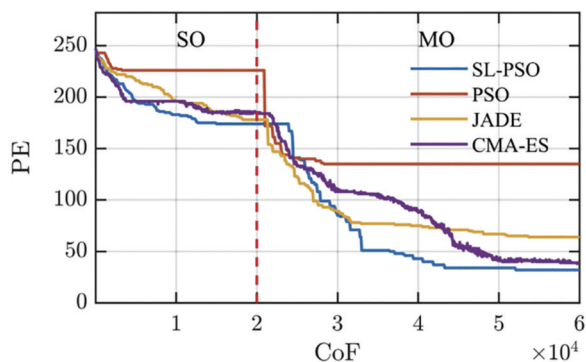


图 23 基于不同优化算法 SMO 收敛曲线<sup>[24]</sup>

Fig. 23 SMO convergence curve based on different optimization algorithms<sup>[24]</sup>

## 5 结束语

光刻分辨率是光刻机的三大性能指标之一,影响着集成电路的集成度。SMO 技术是实现 28 nm 及更小技术节点集成电路制造的关键分辨率增强技术之一,在集成电路制造中得到广泛应用。SMO 技术可以通过同时优化光源和掩模形状提高成像质量,是芯片量产的重要保障。对光源和掩模图形进行简洁准确的表征是 SMO 技术的基础,快速高效的优化算法是寻找最优光源和掩模的核心手段。在全芯片应用中,关键图形筛选是 SMO 技术的前提,决定了 SMO 的运行速度和最终的工艺窗口。本文结合本团队对 SMO 技术的研究,分别介绍了关键图形筛选、光源掩模表征和优化算法这三项 SMO 核心技术的基本原理和国内外的研究进展。

SMO 技术具有计算量大、时间成本高的特点。为了提高全芯片 SMO 的速度,需要在全部掩模图形中筛选出部分关键图形,针对关键图形进行优化得到优化后的光源,并采用优化后的光源对全部图形进行优化。筛选出的关键图形影响着最终优化后的工艺窗口。国内外主流的关键图形筛选方法包括人工筛选法、随机采样法、基于图形聚类的方法方法和基于频谱分析的筛选方法。本团队提出了两种基于频谱分析的筛选方法,分别通过频谱多

方向宽度信息和频谱轮廓信息准确表征了频谱的分布,有效筛选出了关键图形。此外,本团队还将深度优先搜索算法应用于关键图形筛选,可以获得多组关键图形,通过对比得到最优结果。

光源掩模表征是 SMO 的基础,表征方法直接影响 SMO 的优化维度、优化效率和优化结果。为了快速有效地对光源形状进行优化,人们提出了多种光源表征方法,包括参数化表征、像素化表征和 Zernike 多项式表征等方法。本团队对光源的参数化表征和像素化表征进行了研究,分别采用多极光源模型、合成光源模型和部分采样策略,有效降低了参数化光源和像素化光源的优化维度,提高了优化效率。掩模图形的优化是 SMO 技术中最为耗时的步骤之一,为了提高掩模优化效率,人们提出了多种掩模图形表征方法,主要包括多边形表征和像素化表征两类。本团队提出了两种像素化掩模图形表征方法,分别基于离散余弦变换和双重边界演化,有效提高了掩模优化的效率。

SMO 技术采用优化算法搜索最优解,优化算法的性能直接影响 SMO 的优化速度和优化效率。主流的 SMO 优化算法包括梯度算法和启发式算法两类。梯度算法通过正向光刻模型的梯度信息对光源和掩模进行优化,优化效率高但不易找到全局最优解。启发式算法通过各种机制搜索全局最优解,无需复杂的梯度信息和先验知识,但优化效率较低。本团队提出了基于二次规划的优化算法和基于随机并行梯度速降的优化算法,提升了寻找全局最优解的能力。此外本团队对 SMO 的启发式优化算法进行了一系列研究,分别提出了基于遗传算法、粒子群算法、协方差矩阵自适应进化策略和社会学习粒子群算法(SL-PSO)的 SMO 技术,从多个角度提高了启发式优化算法应用于 SMO 时的优化速度和优化效率。

随着芯片制造向更先进技术节点发展,光刻分辨率增强技术的重要性不断提升,SMO 技术的研究将不断拓展。随着光刻分辨率的不断提高,芯片的集成度不断提升,芯片版图中的图形数量不断增加,需要发展更高效的 SMO 关键图形筛选技术,从而平衡全芯片 SMO 的时间和性能。为了提高全芯片 SMO 的效率,光源与掩模表征方法将不断发展,保证优化自由度的同时提高优化速度。SMO 优化算法的研究也将不断发展,提高 SMO 的优化速度和优化效率。SMO 技术也将和设计规则相结合,设计与

工艺的协同优化(DTCO)将进一步提高优化自由度,从而推动芯片制造向更先进技术节点发展。

### 参 考 文 献

- [1] 王向朝,戴凤钊,李思坤,等. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
Wang X Z, Dai F Z, Li S K, et al. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 王向朝,戴凤钊. 光刻机像质检测技术-上册[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Wang X Z, Dai F Z. Image quality measurement techniques for lithographic tools (volume I) [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [3] 王向朝,戴凤钊. 光刻机像质检测技术-下册[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Wang X Z, Dai F Z. Image quality measurement techniques for lithographic tools (volume II) [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [4] 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.
- [5] 杨朝兴. 基于遗传算法的光刻机光源掩模优化技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2016.  
Yang C X. Study on source mask optimization based on genetic algorithm for lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [6] Yang C X, Wang X Z, Li S K, et al. Source mask optimization using real-coded genetic algorithms[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831T.
- [7] Yang C X, Li S K, Wang X Z. Efficient source mask optimization using multipole source representation[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(4): 043001.
- [8] 闫观勇. 光刻机光源掩模优化与波像差检测技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2015.  
Yan G Y. Study on source mask optimization and aberration measurement techniques for lithography tools [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [9] 闫观勇,李思坤,王向朝. 基于二次规划的光刻机光源优化方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022004.  
Yan G Y, Li S K, Wang X Z. Source optimization method of lithography tools based on quadratic programming[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022004.
- [10] 李兆泽. 基于随机并行梯度速降算法的光刻机光源掩模优化技术[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2014.  
Li Z Z. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [11] 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.  
Li Z Z, Li S K, Wang X Z. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911002.
- [12] Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Source optimization using particle swarm optimization algorithm in photolithography[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9426: 94261L.
- [13] Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Pixelated source optimization for optical lithography via particle swarm optimization[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(1): 013506.
- [14] 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.
- [15] 王磊. 基于粒子群算法的光刻机光源掩模投影物镜优化技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
Wang L. Source mask projector optimization using particle swarm optimization algorithm in optical lithography[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [16] 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.
- [17] 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.  
Yang C X, Li S K, Wang X Z. Source mask optimization based on dynamic fitness function[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111006.
- [18] 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): 0111006.

- Yang C X, Li S K, Wang X Z. Pixelated source mask optimization based on multi chromosome genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0811001.
- [19] Liao L F, Li S K, Wang X Z, et al. Critical pattern selection method for full-chip source and mask optimization[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20748-20763.
- [20] 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.
- [21] 陈国栋. 深紫外计算光刻技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2021.  
Chen G D. Study on computational lithography techniques for deep ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [22] 廖陆峰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于衍射谱分析的全芯片光源掩模联合优化关键图形筛选[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2122001.  
Liao L F, Li S K, Wang X Z, et al. Critical pattern selection based on diffraction spectrum analysis for full-chip source mask optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2122001.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 杨欣华, 李思坤, 廖陆峰, 等. 基于深度优先搜索的全芯片光源掩模优化关键图形筛选方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1022002.  
Yang X H, Li S K, Liao L F, et al. Critical pattern selection method based on depth-first search for full-chip source and mask optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1022002.
- [26] 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.
- [27] Hsu S, Li Z P, Chen L Q, et al. Source-mask co-optimization: optimize design for imaging and impact of source complexity on lithography performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7520: 75200D.
- [28] 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.
- [29] Tian K H, Fakhry M, Dave A, et al. Applicability of global source mask optimization to 22/20 nm node and beyond[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 79730C.
- [30] Lai K, Gabrani M, Demaris D, et al. Design specific joint optimization of masks and sources on a very large scale[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 797308.
- [31] Socha R, Shi X L, LeHoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5853: 180-193.
- [32] Hsu S, Chen L Q, Li Z P, et al. An innovative source-mask co-optimization (SMO) method for extending low k1 imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7140: 714010.
- [33] Bekaert J, Laenens B, Verhaegen S, et al. Freeform illumination sources: an experimental study of source-mask optimization for 22-nm SRAM cells[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 764008.
- [34] de Bisschop P, Laenens B, Iwase K, et al. Joint optimization of layout and litho for SRAM and logic towards the 20nm node using 193i[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 79730B.
- [35] Socha R, Jhaveri T, Dusa M, et al. Design compliant source mask optimization (SMO) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7748: 77480T.
- [36] Liu X F, Howell R, Hsu S, et al. EUV source-mask optimization for 7 nm node and beyond[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9048: 90480Q.
- [37] Kim H C, Nam D S, Hwang C, et al. Layer-specific illumination optimization by Monte Carlo method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 244-250.
- [38] Granik Y. Source optimization for image fidelity and throughput[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2004, 3(4): 509-522.
- [39] Granik Y. Solving inverse problems of optical microlithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5754: 506-526.
- [40] Granik Y. Fast pixel-based mask optimization for inverse lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2006, 5(4): 043002.
- [41] Mülders T, Domnenko V, Küchler B, et al. Simultaneous source-mask optimization: a numerical combining method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7823: 78233X.



- [42] Gao W M, Sethi S, Domnenko V, et al. Point-source approach of source-mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7748: 77480U.
- [43] 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.
- [44] Torunoglu I, Elsen E, Karakas A. A GPU-based full-chip source-mask optimization solution[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401L.
- [45] Flagello D, Matsui R, Yano K, et al. The development of a fast physical photoresist model for OPE and SMO applications from an optical engineering perspective[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83260R.
- [46] Hashimoto T, Kai Y, Masukawa K, et al. Robust SMO methodology for exposure tool and mask variations in high volume production[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 868309.
- [47] 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.
- [48] Fühner T, Erdmann A, Evanschitzky P. Simulation-based EUV source and mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7122: 71221Y.
- [49] Fühner T, Evanschitzky P, Erdmann A. Mutual source, mask and projector pupil optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83260I.
- [50] Ma X, Arce G R. Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5783-5793.
- [51] Jia N N, Lam E Y. Pixelated source mask optimization for process robustness in optical lithography[J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19384-19398.
- [52] Yu J C, Yu P C. Gradient-based fast source mask optimization (SMO)[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 797320.
- [53] 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.
- [54] Chang J H C, Chen C C P, Melvin I L S. Abbe-PCA-SMO: microlithography source and mask optimization based on Abbe-PCA[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764026.
- [55] 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.
- [56] Wu X F, Liu S Y, Li J, et al. Efficient source mask optimization with Zernike polynomial functions for source representation[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3924-3937.
- [57] Ma X, Li Y Q, Guo X J, et al. Robust resolution enhancement optimization methods to process variations based on vector imaging model[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83262A.
- [58] Han C Y, Li Y Q, Ma X, et al. Robust hybrid source and mask optimization to lithography source blur and flare[J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5291-5302.
- [59] Sears M K, Fenger G, Mailfert J, et al. Extending SMO into the lens pupil domain[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79731B.
- [60] Li J, Lam E Y. Robust source and mask optimization compensating for mask topography effects in computational lithography[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9471-9485.
- [61] Tsai M C, Hsu S, Chen L Q, et al. Full-chip source and mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730A.
- [62] Zhang D Q, Chua G, Foong Y, et al. Source mask optimization methodology (SMO) and application to real full chip optical proximity correction[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83261V.
- [63] Pei J, Shao F, ElSewefy O, et al. Compatibility of optimized source over design changes in the foundry environment[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831M.
- [64] Melville D, Rosenbluth A E, Tian K H, et al. Demonstrating the benefits of source-mask optimization and enabling technologies through experiment and simulations[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764006.
- [65] Lin B J. Optical lithography: here is why[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- [66] Poonawala A, Stanton W, Sawh C. Source mask optimization for advanced lithography nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401M.
- [67] Kojima Y, Moniwa A, Maruyama T, et al. Novel OPC flow for the trim-mask lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8441: 84410I.
- [68] Wong A K. Resolution enhancement techniques in optical lithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.