

# 激光与光电子学进展

## 先进计算光刻

袁淼, 孙义钰, 李艳秋\*

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 计算光刻是极大规模集成电路(IC)制造的核心技术之一。随着 IC 节点的不断下移,对于工艺的要求越来越严苛。计算光刻技术对推进光刻工艺进步做出了巨大贡献。然而,尽管计算机技术的发展为计算光刻技术的进步提供了有力的支持,但是计算光刻速度和精度之间互制的难题,考虑光刻系统、掩模、工艺误差情况下的计算光刻研究,仍需要学术团队与工业研发团队协同攻关。在简单回顾计算光刻的重要里程碑节点的基础上,重点概述作者团队在“先进计算光刻:快速、高稳定计算光刻”的研究进展,包括矢量计算光刻、快速计算光刻和多目标-高稳定矢量计算光刻。最后,对未来计算光刻技术的发展做出了展望,并期望本文能对我国集成电路领域的研发人员和工程师有所帮助。

**关键词** 光刻; 计算成像; 逆向光刻; 计算光刻; 分辨率增强技术

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922009

## Advanced Computational Lithography

Yuan Miao, Sun Yiyu, Li Yanqiu\*

*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** Computational lithography is a core technology in manufacturing very large-scale integrated circuits (IC). The requirements for the lithography process are increasing rapidly with a decrease in the IC technology node. Computational lithography technology contributes considerably toward several advancements of the lithography process under the limitation of the hardware technology in lithography tools. The development of computer science provides strong support for computational lithography. However, the balance between speed and accuracy of computational lithography and computational lithography research considering lithography systems, masks, and process errors still require the collaboration of academic and industrial research and development teams. Based on a brief review of important milestones in computational lithography, we focused on an overview of the author team's research progress in “advanced computational lithography: fast, robustness computational lithography”, including vectorial computational lithography, fast computational lithography, and multiobjective-robustness computational lithography. Finally, we present the future development of computational lithography technology, and hope that this review will help the researchers and engineers in the IC field.

**Key words** lithography; computational imaging; inverse lithography; computational lithography; resolution enhancement technique

## 1 引言

光刻技术是集成电路(IC)制造的核心技术<sup>[1]</sup>,

光刻技术的发展是推动 IC 乃至整个微电子产业前进的动力和源泉<sup>[2]</sup>。光学光刻是当前 IC 制造主流的光刻技术,其通过投影曝光的方法将掩模版上的

收稿日期: 2022-02-11; 修回日期: 2022-03-02; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(62175014)、国家科技重大专项(2017ZX02101006)

通信作者: \*liyanqiu@bit.edu.cn

集成电路版图转移到硅晶片上。

光刻曝光系统是一个低通滤波的衍射受限系统,根据傅里叶光学原理<sup>[3]</sup>,其成像能力有限。一般地,光刻分辨率可定义为光刻机所能分辨的最小图形尺寸,也称光刻特征尺寸(CD),其表达式<sup>[4-5]</sup>为

$$D_{CD} = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中: $k_1$ 为光刻工艺因子; $\lambda$ 为照明光源波长; $NA$ 为光刻曝光系统的像方数值孔径。

由式(1)可知,提高光刻分辨率的基本思路有三种,分别为缩短照明波长 $\lambda$ 、增大数值孔径 $NA$ 和减小光刻工艺因子 $k_1$ 。光刻机光源波长历经了436 nm、365 nm、248 nm、193 nm直至13.5 nm的逐步缩短过程,目前,国际IC制造采用193 nm和13.5 nm波长的深紫外(DUV)光刻和极紫外光刻(EUV)技术。浸没式光刻机,采用折反式投影物镜结构,DUV光刻物镜的最大 $NA$ 可以达到1.35<sup>[6]</sup>。EUV光刻机采用全反式投影物镜结构,物镜的 $NA$ 可以达到0.55~0.6<sup>[7-10]</sup>。

光刻分辨率增强技术不断延长摩尔定律的生命周期,在光源波长 $\lambda$ 和数值孔径 $NA$ 已经确定的

情况下,通过降低 $k_1$ 因子来进一步提高光刻分辨率。降低 $k_1$ 因子的途径有多种,例如传统光刻分辨率增强技术(RET)中的离轴照明(OAI)、基于规则的临近效应修正(RB-OPC)、相移掩模(PSM),这里传统的RET发挥了重要的作用<sup>[11]</sup>。随着芯片图形越来越复杂、图形结构的尺寸不断缩小,需要对掩模进行更加复杂的修正,基于规则的OPC无法满足更高IC技术节点的高分辨率光刻需求。

为了实现更高分辨率的光刻成像,20世纪80年代,基于模型的光学邻近效应修正(MB-OPC)的相关学术研究,播下了计算光刻的种子<sup>[12-13]</sup>。以MB-OPC为起点发展而来的计算光刻技术,包含MB-OPC、光源掩模协同优化(SMO)、光源掩模偏振协同优化(SMPO)、光源掩模光瞳协同优化(SMPWO)等逆向光刻技术(ILT)<sup>[14-20]</sup>,已经成为支撑光刻技术节点进一步下移的核心技术<sup>[21]</sup>。计算光刻是以硅片上满足IC制造光刻图形结构和精度等为目标,利用光刻成像物理模型,使用合理的优化算法,逆向优化光刻系统中的多维参数,进一步提高光刻分辨率和扩大光刻工艺窗口的分辨率增强技术<sup>[22]</sup>。

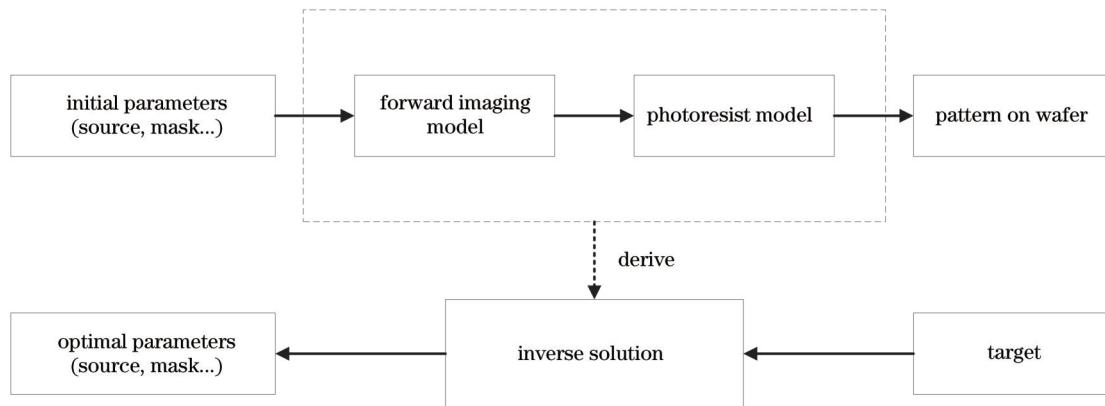


图1 计算光刻的流程

Fig. 1 Flow of computational lithography

本文以计算光刻中的SMO为例,概述计算光刻流程。图1为计算光刻的流程,在建立正向光刻模型后,参考IC制造光刻性能需求,仿真求解满足需求的输入参数。计算光刻的目标:在建立从光源和掩模到晶圆上图案的正向成像模型的情况下,逆向计算出优化后的光源和掩模,多次迭代优化,直到产生最大工艺窗口内,晶圆上的目标图像。我们将光刻的过程写成如下表达式,

$$P = f(X), \quad (2)$$

式中: $P$ 为晶圆上的图案; $f$ 为正向光刻过程算子,表

示正向成像以及在光刻胶中曝光的过程; $X$ 为光刻中参数的集合(包含光源、掩模等)。那么我们需要找到最优的光刻参数,表示为

$$X^* = f^{-1}(P), \quad (3)$$

式中: $f^{-1}$ 是针对掩模的逆向光刻过程算子。

目前,计算光刻算法速度和精度之间的平衡问题,以及光刻系统、掩模、工艺的误差带来的复杂影响,都是计算光刻技术成为可靠产品所必须攻克的难题。更重要的是:计算光刻模型、逆向优化目标函数和算法的合理性及其精度,直接影响计算光刻

的正确性及其工艺优化的迭代周期。最终,影响实际光刻效果甚至产品的可制造性及成本。快速、高稳定计算光刻有助于更好地优化光刻性能,提高先进 IC 工艺迭代的效率和稳定性。我们在简单回顾计算光刻的重要里程碑节点的基础上,重点概述作者团队在“先进计算光刻”的研究进展,包括矢量计算光刻、快速计算光刻和多目标-高稳定矢量计算光刻。最后,介绍了先进计算光刻的发展趋势。

## 2 矢量计算光刻

早期的光刻是非偏振光成像,光刻仿真模型以及计算光刻都是基于标量模型。标量成像模型,在优化过程中仅能考虑电磁场的振幅,而忽略了电磁场矢量特性对光刻成像性能的影响。前人研究表明,对于 NA 近似小于 0.4 的光刻系统,标量成像模型能够满足仿真精度的要求。但对于 NA 大于 0.6 的光刻系统,必须考虑电磁场的矢量特性<sup>[23]</sup>。很多人对矢量模型做出了探索:Flagello<sup>[24-25]</sup>提出的点光源相干照明下的矢量成像模型;Yeung 等<sup>[26]</sup>对传统 Hopkins<sup>[27]</sup>公式进行推广得到的适用于部分相干照明的矢量成像模型和基于 Abbe<sup>[28]</sup>光源积分的部分相干矢量成像模型等<sup>[29]</sup>。这些早期对矢量模型的探索中仍然采用以下近似:1)照明系统对掩模的均匀照明效应表示为不同方向平面波的等强度非相干叠加;2)掩模对照明光波的衍射过程服从基尔霍

夫近似,掩模的衍射近场分布可表示为掩模结构的二维振幅透过率函数;3)掩模和投影物镜不改变光波的偏振态(零偏振效应、零系统误差)。

在大 NA( $>0.9$ )和超大 NA( $>1.0$ )的情况下,照明系统、物镜以及掩模均会产生偏振效应,其光刻成像性能的影响都需要详细的分析<sup>[30-32]</sup>。如果继续采纳前述的部分矢量成像模型,将导致正向光刻仿真分析、逆向计算光刻“优化”的结果,而不是匹配实际光刻系统的最优结果。根据这些非最优结果确定的光源-掩模在实际工艺中难以获得最优光刻性能。作为全矢量光刻成像模型的代表,Evanschitzky 等<sup>[33]</sup>在 2009 年提出基于阿贝成像模型的改进矢量成像模型:即首先将部分相干光源分解成若干个光源的集合;其次利用严格求解麦克斯韦方程组的方法计算三维厚掩模的衍射频谱分布并将其表示成矢量形式;采纳成像系统“黑箱模型”<sup>[3]</sup>,即用“入瞳”和“出瞳”表示成像物镜系统。投影物镜入瞳函数与入瞳面上的掩模衍射频谱分布相乘,得到出瞳面上的电场分布,其中光瞳函数既包括 NA、离焦量、偏振等基本信息,又包括琼斯光瞳形式的偏振像差;紧接着对出瞳面上的函数进行傅里叶逆变换得到点光源照明下,像面的电场强度分布;最后将每个点光源对应的像面处电场强度分布进行叠加,得到整个部分相干光源对应的成像结果,如图 2 所示。

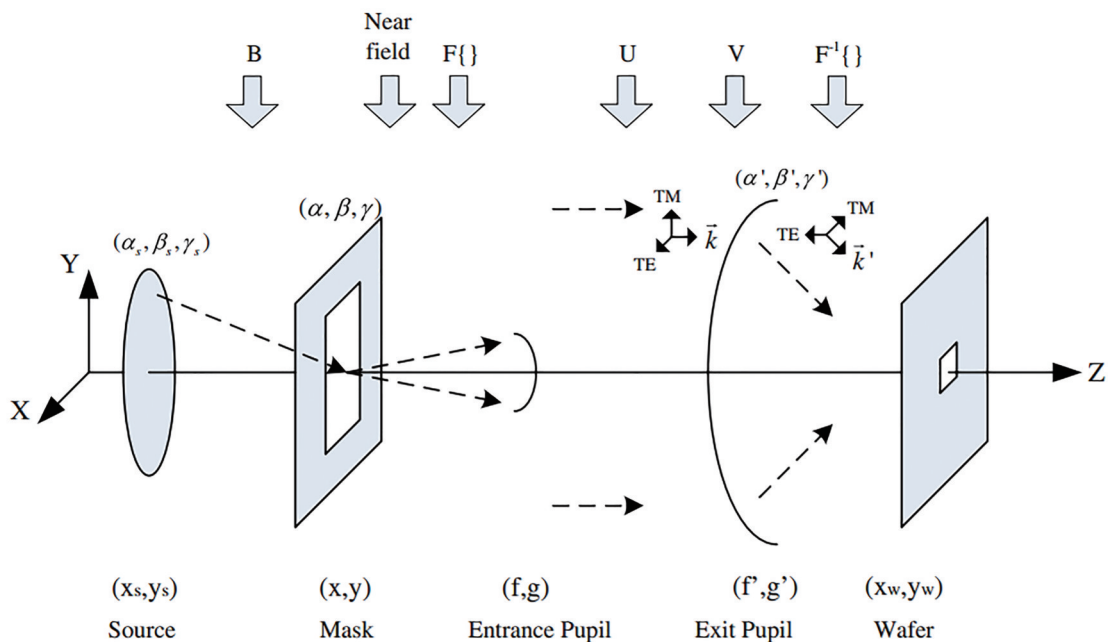


图 2 矢量成像模型示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 2 Imaging formation based on the vector imaging model<sup>[32]</sup>

在矢量成像模型的基础上,计算光刻步入更加精确的“矢量计算光刻”阶段。国内外许多计算光刻的工作在先进节点上取得了不错的进展<sup>[34-39]</sup>。

2011年开始,李艳秋团队建立了严格三维(3D)矢量成像模型的矢量计算光刻,包括全局坐标系下,包含远心误差和3D偏振像差的全光路严格矢量成像模型<sup>[40-41]</sup>,以及基于此成像模型的OPC和光源掩模优化(SMO)研究工作<sup>[16-17, 41-45]</sup>。

如图3及表1所示,李艳秋团队研究了在矢量成像模型下开发基于梯度的像素化OPC和SMO优

化算法:首先,制定了掩模优化框架,其中光学光刻系统的成像过程由一个综合解析矢量成像模型表示;然后,使用基于梯度的算法迭代地优化掩模;最后,提出了一种广义小波惩罚,以在掩模复杂度和图形误差(图形误差是指特定光刻配置和工艺条件下光刻胶中的成像图形与期望图形之间的差值,是一个常用的目标函数)之间保持平衡。所建立的矢量OPC和矢量混合SMO(HSMO)可以有效地增大工艺窗口[工艺窗口图中纵坐标为曝光宽容度(EL),横坐标为焦深(DOF)]。

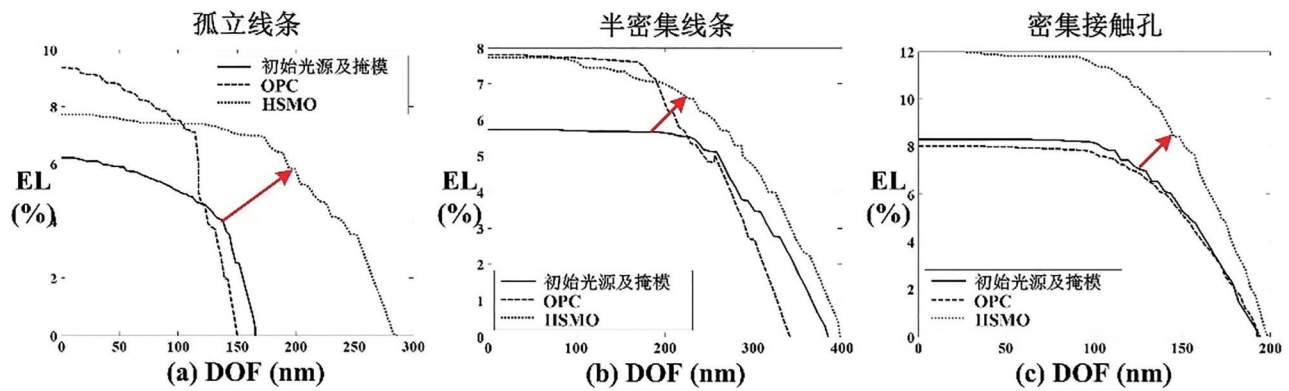


图3 初始光源及掩模、OPC和HSMO算法对应的工艺窗口<sup>[16]</sup>。(a)孤立线条;(b)半密集线条;(c)密集接触孔

Fig. 3 Process window for the initial source and mask, OPC algorithm, and HSMO algorithm<sup>[16]</sup>. (a) Isolate line-space pattern; (b) semi-dense line-space pattern; (c) dense contact holes

表1 在对应EL为3%、5%和8%情况下不同方法的DOF值<sup>[16]</sup>

Table 1 DOF values of different methods at the corresponding EL of 3%, 5%, and 8%<sup>[16]</sup>

EL / %	DOF / nm								
	Isolate line-space pattern			Semi-dense line-space pattern			Dense contact holes		
	Initial algorithm	OPC algorithm	HSMO algorithm	Initial algorithm	OPC algorithm	HSMO algorithm	Initial algorithm	OPC algorithm	HSMO algorithm
3	146	134	257	318	292	342	172	172	185
5	102	118	214	261	257	288	154	151	172
8	0	79	0	0	0	0	104	38	151

除浸没式光刻外,极紫外(EUV)光刻同样需要精准的矢量计算光刻。早期EUV成像模型的发展主要聚焦于对M3D效应<sup>[46-49]</sup>、掩模阴影效应<sup>[50-51]</sup>以及杂散光效应<sup>[52-54]</sup>等进行精确建模。2008年,Fühner等<sup>[55]</sup>提出了一种用于EUV的SMO方法,该方法采用遗传算法(GA)和多目标优化框架对光源和掩模进行了优化。2014年,ASML公司提出了一种针对ASML光刻机NXE:33x0的通用EUV SMO流程<sup>[56]</sup>,该流程应用了由ASML提出的M3D+模型。在2018年,北京理工大学李艳秋团队提出了一种基于梯度的EUV SMO方法<sup>[57]</sup>。2020年,

中国科学院微电子研究所韦亚一团队利用压缩感知理论实现了对EUV光刻照明光源图形的优化<sup>[58]</sup>。2021年,中国科学院上海光学精密机械研究所王向朝团队基于他们提出的结构分解(SDM)模型,采用社会学习粒子群(SL-PSO)算法实现了EUV SMO<sup>[59]</sup>。2021年,Zou等<sup>[60]</sup>提出低曝光阈值敏感度的多目标光源-掩模优化(ELASMO)方法,该方法使用低曝光阈值灵敏度(LRS)罚函数来提高EUV光刻中的曝光裕量,实现高对比度、大工艺窗口的高保真成像,如图4所示。



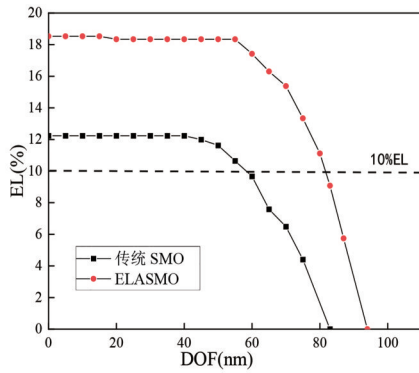


图4 传统SMO和ELASMO方法的工艺窗口对比图<sup>[60]</sup>

Fig. 4 Process window of conventional SMO and the ELASMO<sup>[60]</sup>

### 3 快速计算光刻

计算光刻技术经过多年的发展和验证,无疑可以有效提高光刻成像保真度、增大工艺窗口。然而,计算光刻技术目前的低计算效率限制其只能应用在某些关键热点中,如何将计算光刻技术推广至全芯片应用,成为相关研究人员的重要追求。

2005年,Luminescent Technologies, Inc. 公司利用水平集算法开发了ILT产品<sup>[61]</sup>,并验证ILT方法确实可以产生比OPC方法拥有更大工艺窗口的掩模。并且通过设置不同约束条件,例如保真度、工艺窗口等,产生的掩模也具有实质性差别。之后,他们又验证了ILT方法产生的掩模在空间像成像、光刻胶成像、工艺窗口、亚分辨率辅助图形(SRAF)放置等方面具有独特优势<sup>[62-66]</sup>。2009年,香港大学的Shen等<sup>[67]</sup>将ILT问题建模为扩展的非线性图像恢复问题,然后通过具有有限差分方案的水平集时间相关模型来解决此问题。他们在论文中给出了该问题的明确详细公式和一阶时间和二阶空间精确离散化方案。2011年,他们又通过在目标函数中增加随机工艺条件变化量,将离焦和像差变化信息考虑到ILT中,增强了ILT方法对工艺条件变化的鲁棒性<sup>[68]</sup>。2017年,矢量成像模型被引入水平集算法的ILT中<sup>[69]</sup>。2018年,广东工业大学的Shen<sup>[70]</sup>将窄带水平集算法应用到SMO问题的求解中,通过控制水平集中窄带的宽度降低算法所需的存储空间和运算时间,之后又通过半隐式加性算子分裂方法加速ILT优化<sup>[71-72]</sup>。

2006年,加州大学圣克鲁斯分校的Poonawala等<sup>[73]</sup>提出了一种基于低复杂度模型的快速OPC和PSM的方法,使用了像素化掩模、连续函数公式和

基于梯度的迭代优化技术。连续函数公式允许对梯度进行分析计算,像素化掩模提供了极大的自由度,但也存在掩模复杂难以制造的固有缺点。因此,他们引入了正则化框架提供在ILT解中提升某些理想属性的灵活性。结果表明,上述框架确保估计的掩模只有两个或三个(允许的)透射值,并且相对简单且易于制造。之后,这种方法又被应用于双重曝光技术<sup>[74-75]</sup>。2010年,香港大学的Lam<sup>[76-77]</sup>通过正则化、基于梯度的ILT框架,改善了ILT的掩模可制造性以及对工艺条件变化的鲁棒性。2007年,特拉华大学的Ma和Arce<sup>[78]</sup>通过增加小波罚函数,利用梯度下降算法,实现了提高掩模可制造性的ILT。之后,他们陆续建立了基于相干成像模型和部分相干成像模型的基于梯度下降算法的OPC和SMO方法<sup>[79-83]</sup>。2011年,他们将共轭梯度算法应用的像素化OPC中<sup>[84]</sup>,结果证明可以实现比梯度下降算法更快的收敛速度。2011年,台湾交通大学的Yu等<sup>[85]</sup>利用共轭梯度算法建立了SMO方法,通过仿真实验证明可以获得相比单独优化掩模更好的成像保真度和成像对比度。

2014年起,北京理工大学的Ma等人将压缩感知算法应用到计算光刻中<sup>[86-88]</sup>。他们通过随机采样方法进行稀疏采样,将光源优化(SO)过程建模为一个欠定的线性规划模型,显著降低优化过程中目标函数以及梯度的计算量。此方法也可有效降低光源图形的高频分量,提高光瞳填充率。2018至2019年,非线性压缩感知理论被分别应用到OPC<sup>[89]</sup>和SMO<sup>[90]</sup>中,通过同时对光源和掩模优化过程中的图形进行等间距下采样,将OPC和SMO过程建模为欠定的非线性规划模型,进一步降低优化过程中目标函数以及梯度的计算量。Sun和Li针对非线性压缩感知SMO,提出了一种牛顿-迭代硬阈值(Newton-IHTs)算法,文中给出的数值计算实例表明,与传统的基于梯度的方法和迭代硬阈值(IHTs)的方法相比,该方法能显著加速优化过程9.31倍和7.39倍,如图5所示。图中的图形误差是实际图像与目标图形之间欧拉距离的平方,其数值越小说明成像图形与期望图形越接近。

2019年,Sun等<sup>[91]</sup>又采用贝叶斯压缩感知理论(BCS)建立了逆向光源优化方法(BCS-SO),其中建立了一种轮廓采样(CCS)方法,可以显著降低优化过程中目标函数以及梯度的计算量,之后利用BCS将SO过程表述为一系列加权的 $l_1$ 范数重构模

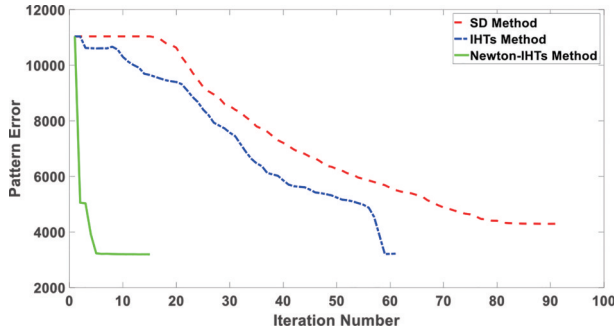


图 5 IHTs SMO 和 Newton-IHTs SMO 的收敛曲线对比<sup>[90]</sup>  
Fig. 5 The convergence curves of IHTs SMO and Newton-IHTs SMO<sup>[90]</sup>

型,可以仅利用极少采样点的情况下实现高成像性能 SO,文中仿真实例证明,CCS-BCS-SO 方法可以将 SO 过程比最陡速降 SO 方法 (SD-SO) 加速 95 倍,并且在类似的运行时间下比 CS-SO 方法提高 16% 的图像保真度。2021 年, Liao 等<sup>[92]</sup>利用压缩感知算法进行了全芯片的多目标自适应 SO (adaptive-MOSO) 研究,通过同时保证每个热点的成像保真度,实现全芯片照明光源光瞳图形的快速优化。如图 6 所示,以 4 个热点图形为例,与初始系统相比,论文中建立的两种 adaptive-MOSO 方法和 mean-MOSO 方法都可以提高成像保真度。Mean-MOSO

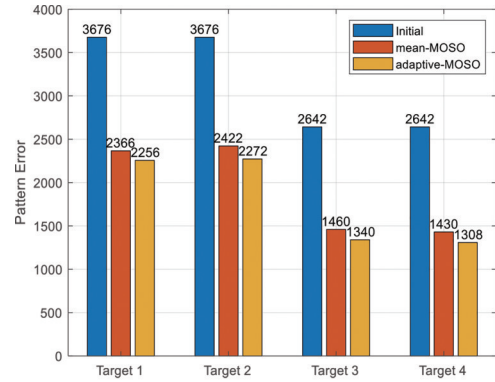


图 6 全芯片 SO 方法仿真的图形误差对比<sup>[92]</sup>  
Fig. 6 Pattern error comparison of full-chip SO method simulation<sup>[92]</sup>

方法可以将平均图形误差降低 39.2%,而 adaptive-MOSO 方法可以将平均图形误差降低 43.2%。

上述介绍的计算光刻专注于先进的 ILT 算法以加速优化,成像模型对计算效率的影响也同样显著。2022 年, Sun 等<sup>[93]</sup>通过逆点扩散函数 (IPSF) 建立了一种基于采样的成像模型,建立了一种独有的、先进的快速 OLT。仿真表明,在所提出模型的帮助下,这种 SMO 方法可以使现有快速算法加速过的 SMO 过程进一步加快 3 倍,仿真结果如图 7 和表 2 所示。

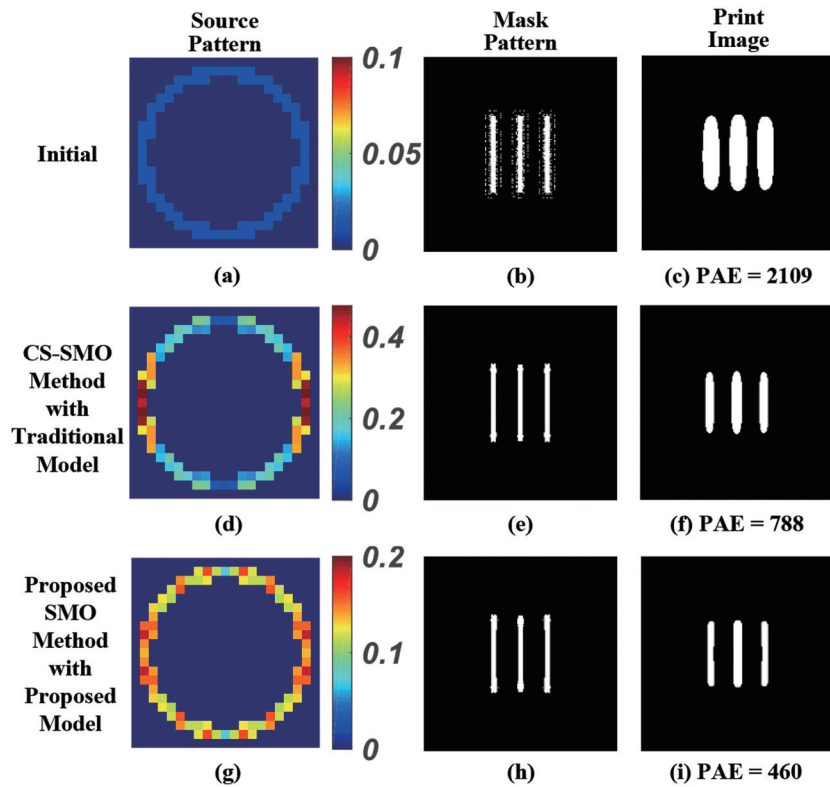


图 7 传统成像模型和 IPSF 模型的 SMO 结果图形误差对比<sup>[93]</sup>  
Fig. 7 Comparison of pattern errors of SMO results between traditional imaging model and IPSF model<sup>[93]</sup>

表 2 传统成像模型和 IPSF 模型的 SMO 结果运行时间对比<sup>[93]</sup>

Table 2 Comparison of running time of SMO results between traditional imaging model and IPSF model<sup>[93]</sup>

SMO method	Iteration time per round /s	Total running time /s
Traditional method	3.16	315.73
Method in Ref. [82]	1.05	92.12

除了利用算法加速计算光刻之外,国内外研究人员也有利用图形处理器(GPU)进行硬件加速方面的探索。2010年,Gauda公司<sup>[94]</sup>提出了一种解决精度、速度和可负担性要求的ILT解决方案,使用GPU以及中央处理器(CPU)作为计算硬件,以实现速度和可负担性的突破性改进,解决了大规模集群的可扩展性问题。2009年,清华大学的Zhang等<sup>[95]</sup>提出了一种称为成本函数减少方法(CFRM)的ILT算法,将ILT中占据大量计算成本的空间像强度计算修改为利用GPU实现,在不相干成像系统和部分相干成像系统中使用不同大小的矩阵证明了GPU实现的可扩展性,与仅在高端CPU上实现的算法相比,性能提升了约15倍。2019年,在半导体存储器件制造应用中,D2S公司的Pang等<sup>[96]</sup>利用GPU加速实现了1天内能够完成计算的全芯片计算光刻。

#### 4 低误差敏感度光源——掩模优化

随着集成电路特征尺寸的不断缩小,工艺容忍度也在不断减小,所以实际光刻系统中的固有误差和不确定误差,包括曝光系统的照明非均匀性、偏振误差、波像差、偏振像差、热像差、杂散光、掩模不确定性误差等<sup>[97-98]</sup>,不应该在实用的计算光刻模型中被忽视。过往的研究表明,光刻性能对实际光刻系统中的误差很敏感<sup>[99-100]</sup>。所以建立高稳定性的计算光刻方法是有必要的。

为了降低系统中的误差对结果的影响,有一些计算光刻的研究通过在目标函数(仅包含图形保真度不包含误差敏感度)中考虑随机误差以减弱随机误差对光刻成像的影响。2014年,香港大学的Li和Lam<sup>[101]</sup>针对掩模形貌效应,建立了高鲁棒性的光源掩模优化方法。台湾交通大学的Su等<sup>[102]</sup>提出了考虑工艺变化的快速光刻掩模优化方法。2016年华中科技大学的Wu等<sup>[103]</sup>在计算光刻中考虑了掩模形状的不确定性。

2015年,北京理工大学的Han等<sup>[104]</sup>在他们的工作中,设置了对光源非均匀性以及Flare的敏感度因

子,实现了低误差敏感度的计算光刻方法。这种通过设置敏感度参数来控制系统中误差的影响的方法也为后来控制其他光刻系统中存在的误差的影响提供了参考。

2017年,Li等<sup>[105]</sup>介绍一种低像差敏感度的SMO方法(LASSMO),降低光刻成像对随机像差的敏感程度,从而提升光刻工艺稳定性。Li等认为大量实际光刻系统误差(光学加工/装调/检测的公差、实际工艺环境的温度变化、工件台振动、掩模加工和检测误差等诸多不确定因素),最终都能以成像光波的波面产生的畸变来反映,因此针对实际光刻系统存在的随机像差,绝大部分误差可以归结为光学系统的随机像差,这些随机像差将会影响光刻成像质量。LASSMO方法的目标是寻找最优的光源图形和掩模图形组合,既能够提高光刻图形保真度,又能够降低光刻成像对随机像差的敏感度。

从其仿真实验的结果(图8)来看,LASSMO方法有效降低了目标像差(图中 $c_8$ 为第8项Zernike多项式的系数,可以一定程度反映球差的大小, $\omega_8$ 为针对 $c_8$ 设置的敏感度因子, $\omega_8=0$ 时可以认为是普通SMO方法)的敏感度,通过调整敏感度因子提高了所获得的光源和掩模最终成像质量。此方法通过对像差的低敏感,从而实现对各类误差(能表征为像差的影响)的低敏感,有效扩大了光刻工艺窗口。

#### 5 高稳定光瞳优化计算光刻

由于严格的厚掩模模型具有非解析性且计算复杂度高的特征,因此早期的SMO方法一般情况下都采用了掩模的基尔霍夫近似。然而,这就会导致优化后的光源和掩模无法补偿厚掩模类像差(TMIA)效应对光刻性能的影响。在本文中,TMIA效应是指厚掩模引起的一些与波像差对光刻成像性能影响相类似的效应。针对45 nm及以下技术节点,掩模尺寸已小于曝光波长,TMIA效应不可忽略<sup>[106-107]</sup>。为了全面深入地了解TMIA效应,Erdmann<sup>[108-110]</sup>通过严格电磁场理论求解厚掩模近场分布的方法,仿真研究了TMIA对光刻性能的影响。仿真结果表明,TMIA能够导致偏振态的改变和焦面-曝光量矩阵(FEM)的严重倾斜(非对称性)。针对不同的掩模周期,FEM倾斜也程度不同,最终导致全芯片的光刻重叠工艺窗口明显减小<sup>[111]</sup>。

ASML公司实现了一种可生成任意光瞳波前



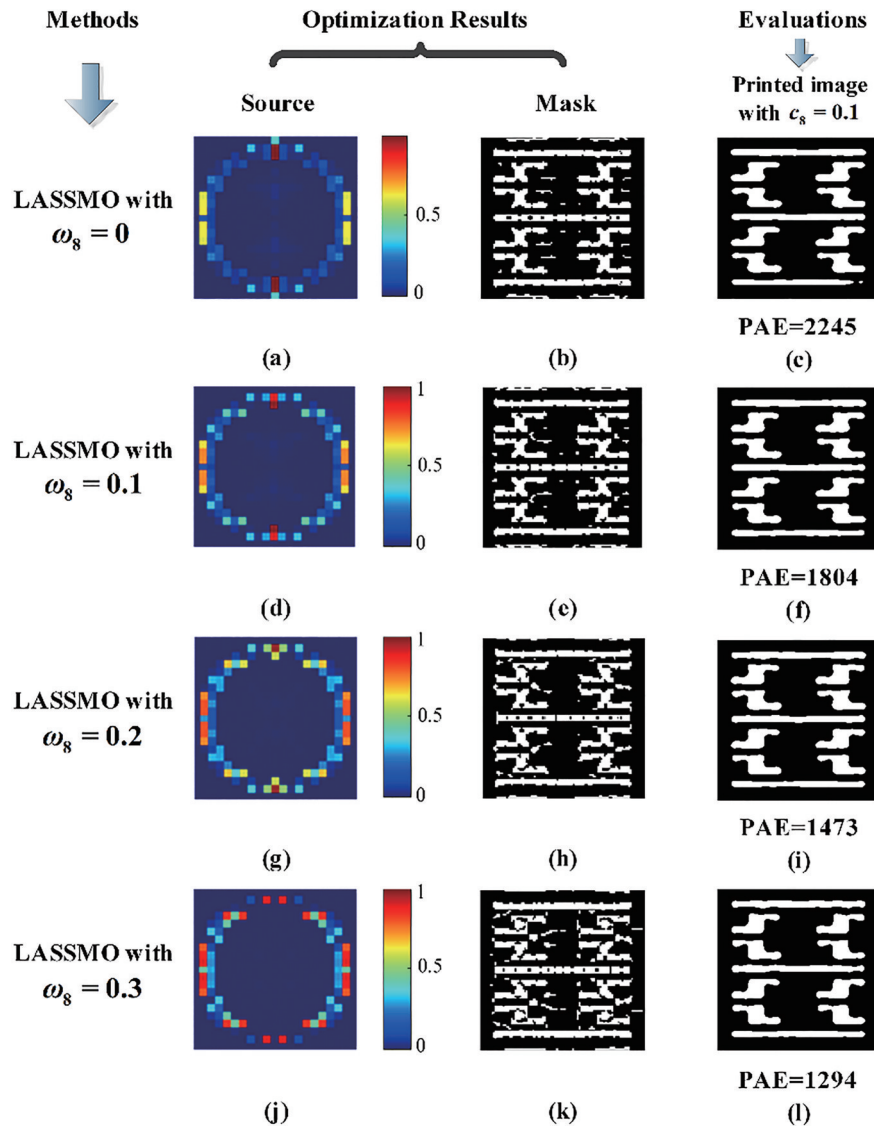


图8 考虑  $c_8$  的 LASSMO 优化结果和评价<sup>[105]</sup>

Fig. 8 Optimization results and evaluations of the proposed LASSMO only considering  $c_8$ <sup>[105]</sup>

的设备(图9),称为FlexWave<sup>[112-113]</sup>。基于FlexWave装置,一种光源-掩模-光瞳波前优化(SMPWO)方法成为可行。

早在20世纪90年代初,光瞳优化的思想已被提出<sup>[114-118]</sup>。1991年,Fukuda<sup>[114]</sup>率先将显微成像中的光瞳滤波思想引入光刻领域,其通过调控光瞳平面不同位置的透过率以提高光刻分辨率和焦深,这是光瞳波前优化(PWO)思想的起源。但是由于技术本身的固有缺陷和设备上的落后,导致这些光瞳优化方法无法得到论证和应用<sup>[11]</sup>。2011年,ASML在光刻机TWINSCAN NXT<sup>TM</sup>:1950i中配置了光瞳波前操纵装置FlexWave,可产生任意形状的光瞳波前,且不会对光刻投影物镜系统带来负面影响<sup>[113]</sup>。利用该装置可以在线补偿光刻投影物镜生产中产

生的热像差等效效应,从而提高光刻套刻精度和焦深(DOF)等性能。基于这种FlexWave装置,Staals等<sup>[113]</sup>提出了采用光瞳波前来补偿TMIA引起的焦面平移和图形偏移误差(PLE)等效应的思想,并仿真论证该方法可以进一步提高光刻工艺窗口。2011~2013年,Sears等<sup>[111, 119-120]</sup>、Fühner等<sup>[121]</sup>和Li等<sup>[101, 122]</sup>基于不同的全局算法提出了多种光源-掩模-光瞳波前优化方法。研究表明,较之SMO方法,SMPWO方法能够有效地补偿TMIA引起的焦面平移和FEM倾斜等现象,从而进一步提升光刻成像性能。

早期的SMPWO方法没有建立光瞳波前和目标函数之间的解析关系模型,因此采用了一些非解析的数学优化算法去求解所提出的SMPWO问题,



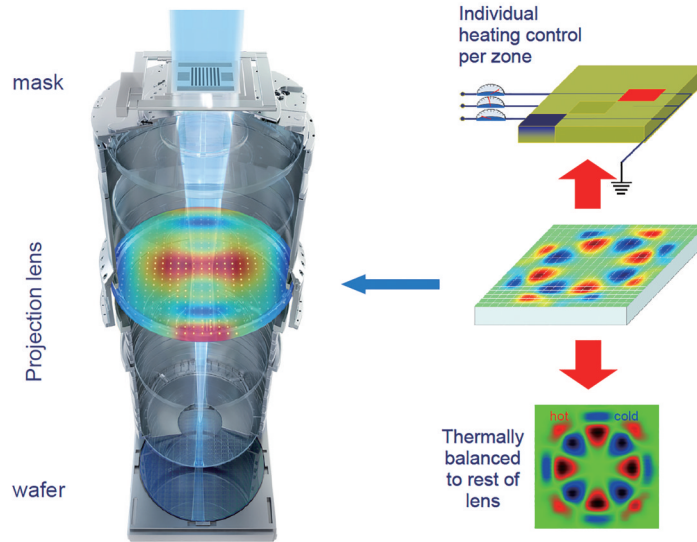


图 9 FlexWave 操纵器的原理<sup>[113]</sup>

Fig. 9 Principle of the FlexWave manipulator<sup>[113]</sup>

进而导致所提的 SMPWO 方法计算复杂度高。为了应对计算复杂度高的问题,2014 年, Han 等<sup>[19]</sup> 基于矢量成像模型,建立了光瞳波前和目标函数之间的联系,从而建立了理想条件下基于梯度的 SMPWO 方法。Han 在他的工作中,基于考虑厚掩模的矢量成像模型,推导出目标函数对光瞳波前中 Zernike 系数的导数。然后通过梯度算法实现光瞳

波前优化。此方法提高了光瞳波前优化的自由度,并能补偿 TMIA 中的非对称像差效应。

如图 10 所示,光波通过厚掩模后,其在物镜光瞳处的波前会产生畸变  $W_{3D}$ 。PWO 方法的主要思想就是通过在物镜光瞳处引入一个附加波前  $W$  来抵消  $W_{3D}$ ,使最终的实际光瞳波前  $W_{act}$  具有优越的光刻成像性能。

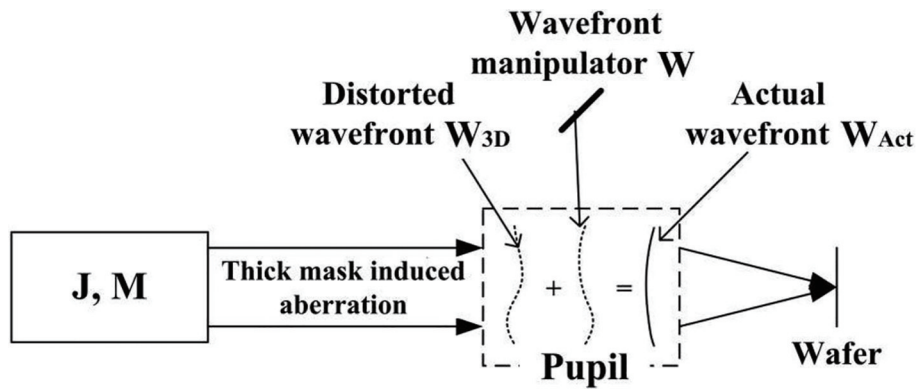


图 10 补偿 TMIA 的 PWO 方法示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of the PWO method to compensate for TMIA<sup>[19]</sup>

2020 年,茅言杰等<sup>[123]</sup>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、光瞳进行联合优化,提高了光刻胶图形三维形貌的质量。

2020 年, Li 在光瞳优化技术上的研究更进一步,他认为 PWO 技术生成的标量光瞳不能有效地补偿光刻系统中存在的偏振像差以及厚掩模的复杂衍射引起的偏振误差。Li 等<sup>[124]</sup>介绍了一种矢量光瞳优化(VPO)方法补偿投影物镜的偏振像差和厚掩

模复杂衍射的偏振效应,进一步提升光刻成像性能。

VPO 的基本思想是利用可调控的矢量光瞳分布函数去补偿投影物镜的偏振像差和厚掩模复杂衍射引起的偏振误差。Li 基于矢量成像理论,在考虑厚掩模偏振效应和光刻物镜偏振像差的情况下,建立了光刻成像与矢量光瞳的解析关系。然后,将光刻成像的图形误差设置为目标函数,利用琼斯光瞳各子光瞳的 Zernike 系数对矢量光瞳进行表征,构造

了 VPO 优化模型。VPO 方法相较于 PWO 方法的本质性提高是图 10 中的标量补偿波面  $W$  [图 11(a)] 被替换为了一个矢量光瞳 [图 11(b)]。矢量光瞳为

琼斯光瞳, 其 8 个子光瞳分别为  $J_{xx\_real}$ 、 $J_{xx\_imag}$ 、 $J_{xy\_real}$ 、 $J_{xy\_imag}$ 、 $J_{yx\_real}$ 、 $J_{yx\_imag}$ 、 $J_{yy\_real}$  和  $J_{yy\_imag}$ 。图中横纵坐标为归一化后的坐标。

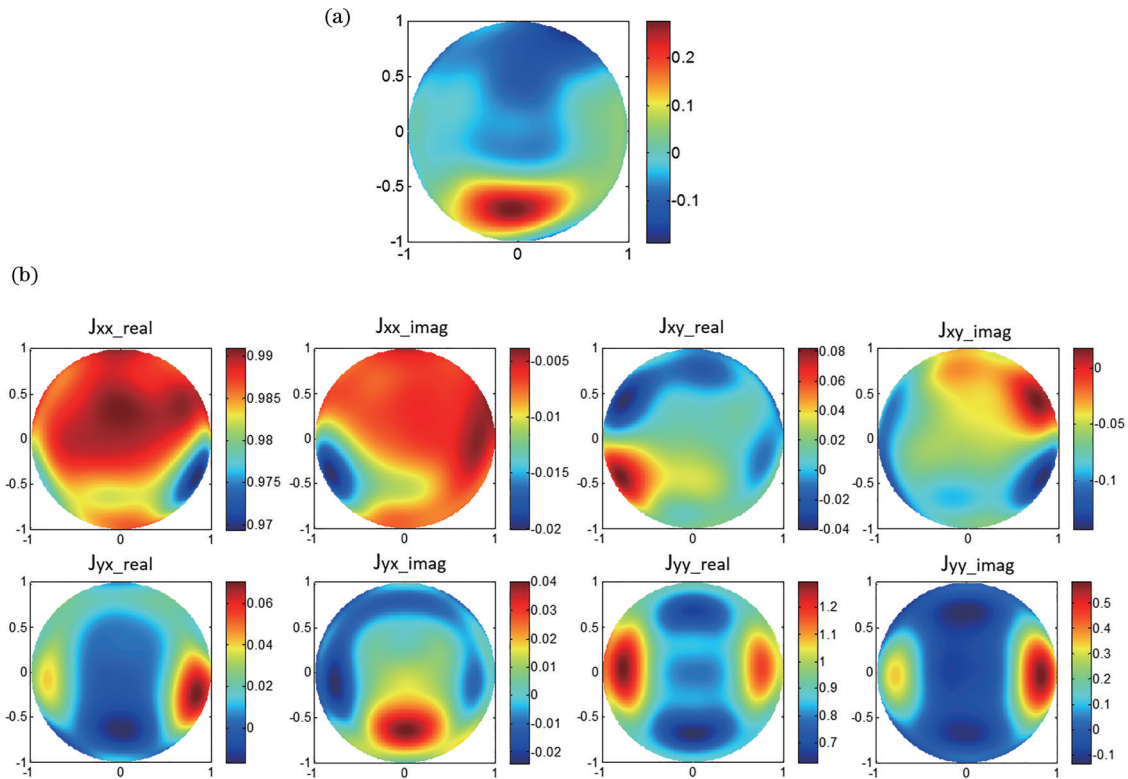


图 11 不同方法中所使用的光瞳<sup>[124]</sup>。(a)PWO 方法的标量光瞳; (b)VPO 方法的矢量光瞳

Fig. 11 Pupil for different methods<sup>[124]</sup>. (a) Scalar pupil for PWO method; (b) vector pupil for VPO method

由于矢量光瞳中包含了更多的可表征偏振调制的优化变量, 因此 VPO 方法极大地拓宽了光瞳优化的自由度, 并且突破了现有 PWO 方法无法补偿偏振误差的缺陷。图 12 展示了在相同条件下 VPO 相较于 PWO, 拥有更出色的优化效果。

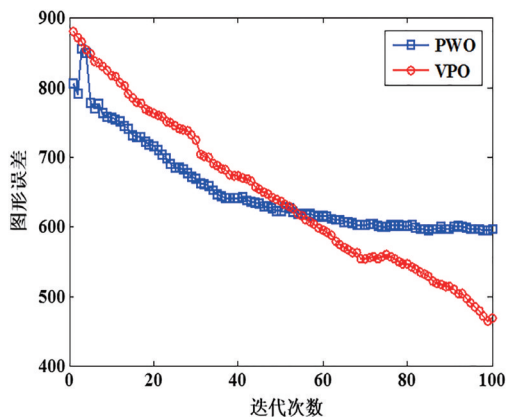


图 12 PWO 方法和 VPO 方法的收敛曲线对比<sup>[124]</sup>

Fig. 12 Convergence curve comparison between PWO method and VPO method<sup>[124]</sup>

## 6 全视场计算光刻

为了保证产率, 要求光刻机的曝光视场尺寸较大 (26 mm × 5.5 mm)。光学设计、加工、装调等因素引起投影物镜的像差在曝光视场内的不均匀分布, 可导致各视场点光刻成像性能不均匀增加, 极大地影响光刻性能, 减小了全视场光刻的工艺窗口。

北京理工大学的 Li 等和 Yuan 等针对全视场的应用场景发展了 SMO、PWO、VPO 等技术, 提出了全视场光源掩模协同优化 (MOSMO) 方法<sup>[125]</sup>、全视场光瞳优化 (MOPWO) 方法<sup>[126]</sup>、全视场矢量光瞳优化 (MOVPO) 方法<sup>[20]</sup>。这些方法相较于其他未考虑视场点因素的计算光刻方法, 能够有效扩大全视场的重叠工艺窗口, 提高全视场光刻成像的均匀性。

全视场方法的关键在于构造能够同时考虑全视场多个视场点处像差的目标函数, 从而全面约束全视场的成像质量。在得到全视场目标函数后, 针对这个新的目标函数优化光源、掩模、光瞳等参量。最终经过迭代优化找出最优参量, 实现对全视场像

差不均匀性的平衡。

图 13 展示了 MOSMO 方法的仿真结果。图中的 F11-SMO 为仅考虑单一视场点的常规 SMO 方法。我们能够明显看出,考虑全视场的 MOSMO 方法显著扩大了全视场重叠工艺窗口,这对于实际光刻生产的良率提高十分有益。其他 MOPWO 及 MOVPO 考虑全视场的方法,也具有提高全视场重叠工艺窗口的效果。

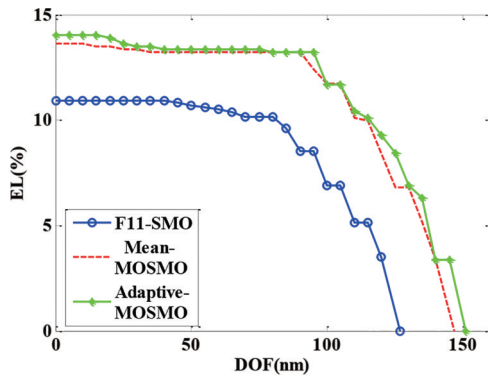


图 13 各 SMO 方法获得的 EL-DOF 曲线对比<sup>[125]</sup>

Fig. 13 Comparison of EL-DOF curves obtained by various SMO methods<sup>[125]</sup>

## 7 结束语

计算光刻领域还有很多值得继续深入研究的工作。当前最先进的工艺节点已全面使用 EUV 光刻机。EUV 光刻系统中,光学镜头吸收 30% 的光波能量,引起照明部件和物镜的热变形,控制和补偿热像差是计算光刻的重要目标之一。NA0.55 EUV 光刻机的反射式的光学系统,其主光线倾斜入射角增大,如果不加控制和补偿,曝光视场内的各区域的像差及光刻成像将会存在更明显的差异。这些问题需要深入研究,建立合理的 EUV 光刻成像模型和相关优化算法,以实现高稳定性的 EUV 计算光刻。

目前,光刻系统中许多工艺参数与评价函数之间的解析表达式还未构建。这限制了梯度优化等算法的应用。如果能够建立工艺参数的解析模型或者寻找合适的快速非梯度优化算法,可以进一步提高相关计算光刻方法的实际应用能力。

曲线掩模也是当前研究的一个热点。得益于掩模制造技术的进步,曲线掩模的制造变得更为简单。根据研究,曲线掩模相较传统掩模拥有诸多优势<sup>[127-130]</sup>。基于曲线掩模的计算光刻技术是未来计

算光刻发展的热点之一。

未来一段时间内,计算光刻技术将还是受到有限的计算速度的掣肘。实现又快又好且能在大规模模版图上应用的计算光刻技术是重要的目标。此外,随着机器学习等理论和算法的发展,许多人在探讨机器学习是否能为计算光刻技术带来新的飞跃<sup>[131-133]</sup>。以及如何保证机器学习在光刻应用上的稳定性也将是一个重要探索方向。

## 参 考 文 献

- [1] Moreau W M. Semiconductor lithography: principles, practices, and materials[M]. New York: Springer, 2012.
- [2] Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [4] Schellenberg F M. A history of resolution enhancement technology[J]. Optical Review, 2005, 12(2): 83-89.
- [5] Levinson H J. Principles of lithography[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [6] Paarhuis B, de Boeij W, Deshpande A, et al. Extending DUV productivity and overlay through joint dry and immersion scanner advancements[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11613: 116130L.
- [7] Kneer B, Migura S, Kaiser W, et al. EUV lithography optics for sub-9 nm resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94221G.
- [8] Migura S, Kneer B, Neumann J T, et al. Anamorphic high-NA EUV lithography optics[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9661: 96610T.
- [9] Liu Y, Li Y Q, Cao Z. Design of anamorphic magnification high-numerical aperture objective for extreme ultraviolet lithography by curvatures combination method[J]. Applied Optics, 2016, 55(18): 4917-4923.
- [10] Hao Q, Yan X, Liu K, et al. Design of an illumination system for high numerical aperture anamorphic extreme ultraviolet projection lithography [J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10982-10996.
- [11] Wong A K. Resolution enhancement techniques in optical lithography[M]. Bellingham: SPIE, 2001.
- [12] Saleh B E A, Sayegh S I. Reduction of errors of microphotographic reproductions by optimal corrections of original masks[J]. Optical Engineering, 1981, 20:



- 781-784.
- [13] Nashold K M, Saleh B E A. Image construction through diffraction-limited high-contrast imaging systems: an iterative approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(5): 635-643.
- [14] Ma X, Li Y Q. Resolution enhancement optimization methods in optical lithography with improved manufacturability[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(2): 023009.
- [15] Ma X, Arce G R. *Computational lithography*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] Ma X, Han C Y, Li Y Q, et al. Hybrid source mask optimization for robust immersion lithography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4200-4211.
- [17] Ma X, Han C Y, Li Y Q, et al. Pixelated source and mask optimization for immersion lithography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 30(1): 112-123.
- [18] Ma X, Dong L S, Han C Y, et al. Gradient-based joint source polarization mask optimization for optical lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(2): 023504.
- [19] Han C Y, Li Y Q, Dong L S, et al. Inverse pupil wavefront optimization for immersion lithography[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6861-6871.
- [20] Yuan M, Sun Y Y, Wei P Z, et al. Vectorial pupil optimization to compensate for a polarization effect at full exposure field in lithography[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(31): 9681-9690.
- [21] Singh V. *Computational lithography: the new enabler of Moore's law*[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6827: 68271Q.
- [22] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Wei Y Y. *Theory and application of advanced lithography for very large scale integrated circuits*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [23] Gallatin G M. High-numerical-aperture scalar imaging[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(28): 4958-4964.
- [24] Flagello D. *High numerical aperture imaging in homogeneous thin films*[D]. Tucson: The University of Arizona, 1993
- [25] Flagello D G, Milster T, Rosenbluth A E. Theory of high-NA imaging in homogeneous thin films[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(1): 53-64.
- [26] Yeung M S, Lee D, Lee R S, et al. Extension of the Hopkins theory of partially coherent imaging to include thin-film interference effects[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1927: 452-463.
- [27] Hopkins H H. On the diffraction theory of optical images[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1953, 217(1130): 408-432.
- [28] Abbe E. Beiträge zur theorie des mikroskops und der mikroskopischen wahrnehmung[J]. *Archiv Für Mikroskopische Anatomie*, 1873, 9(1): 413-468.
- [29] Schlieff R E, Liebchen A, Chen J F. Hopkins versus Abbe': a lithography simulation matching study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4691: 1106-1117.
- [30] Lin B J. Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2004, 3(3): 377-500.
- [31] Totzeck M, Graupner P, Heil T, et al. How to describe polarization influence on imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5754: 23-37.
- [32] Flagello D G, Hansen S, Geh B, et al. Challenges with hyper-NA ( $NA > 1.0$ ) polarized light lithography for sub  $\lambda/4$  resolution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5754: 53-68.
- [33] Evanschitzky P, Erdmann A, Fuehner T. Extended Abbe approach for fast and accurate lithography imaging simulations[M]. Dresden: SPIE, 2009.
- [34] Hansen S G. Source mask polarization optimization [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(3): 033003.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Wu X F, Liu S Y, Lv W, et al. Robust and efficient inverse mask synthesis with basis function representation [J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2014, 31(12): B1-B9.
- [39] Guo M R, Song Z Y, Feng Y B, et al. Efficient source mask optimization method for reduction of computational lithography cycles and enhancement of

- process-window predictability[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(4): 043507.
- [40] Wang J M, Li Y Q. Three-dimensional polarization aberration in hyper-numerical aperture lithography optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8326: 832624.
- [41] Li Y Q, Ma X, Guo X J, et al. Vectorial resolution enhancement: better fidelity for immersion lithography [J]. *SPIE Newsroom*, 2014: 1.
- [42] Ma X, Li Y Q, Dong L S. Mask optimization approaches in optical lithography based on a vector imaging model[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2012, 29(7): 1300-1312.
- [43] Ma X, Li Y Q, Guo X J, et al. Vectorial mask optimization methods for robust optical lithography [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(4): 043008.
- [44] Ma X, Song Z Y, Li Y Q, et al. Block-based mask optimization for optical lithography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3351-3363.
- [45] Guo X J, Li Y Q, Dong L S, et al. Co-optimization of the mask, process, and lithography-tool parameters to extend the process window[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(1): 013015.
- [46] Erdmann A, Evanschitzky P, Neumann J T, et al. Mask-induced best-focus-shifts in DUV and EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9426: 94260H.
- [47] Erdmann A, Fuehner T, Evanschitzky P, et al. Modeling studies on alternative EUV mask concepts for higher NA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86791Q.
- [48] Jo F. The impact of mask 3D and Resist 3D effects in optical lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 905205.
- [49] Sarma C, Graves T, Neisser M, et al. Topographic and other effects on EUV pattern fidelity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 905206.
- [50] McClinton B M, Wallow T, Naulleau P P. Mask shadowing and the line-edge transfer function[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8322: 832221.
- [51] Song H, Zavyalova L, Su I, et al. Shadowing effect modeling and compensation for EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7969: 79691O.
- [52] Shiraishi M, Oshino T, Murakami K, et al. Flare modeling and calculation on EUV optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7636: 763629.
- [53] Zavyalova L, Su I, Jang S, et al. EUV modeling accuracy and integration requirements for the 16 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7636: 763627.
- [54] Zuniga C, Habib M, Word J, et al. EUV flare and proximity modeling and model-based correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7969: 79690T.
- [55] Fühner T, Erdmann A, Evanschitzky P. Simulation-based EUV source and mask optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7122: 71221Y.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Lin J X, Dong L S, Fan T A, et al. Compressive sensing method for EUV source optimization using different bases[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11323: 113232J.
- [59] 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.
- [60] Zou L L, Sun Y Y, Wei P Z, et al. Exposure latitude aware source and mask optimization for extreme ultraviolet lithography[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(30): 9404-9410.
- [61] Balasinski A, Moore A, Shamma N, et al. Inverse lithography technology: verification of SRAM cell pattern[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 599230.
- [62] Ho J, Wang Y, Wu X, et al. Real-world impact of inverse lithography technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 59921Z.
- [63] Hung C Y, Zhang B, Tang D M, et al. First 65 nm tape-out using inverse lithography technology (ILT) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 59921U.
- [64] Liu Y, Abrams D, Pang L Y, et al. Inverse lithography technology principles in practice: unintuitive patterns[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 599231.
- [65] Martin P M, Progler C J, Xiao G, et al. Manufacturability study of masks created by inverse lithography technology (ILT) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 599235.

- [66] Pang L Y, Shamma N, Rissman P, et al. Laser and e-beam mask-to-silicon with inverse lithography technology (ILT) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 599221.
- [67] Shen Y J, Wong N, Lam E Y. Level-set-based inverse lithography for photomask synthesis[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23690-23701.
- [68] Shen Y J, Jia N N, Wong N, et al. Robust level-set-based inverse lithography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5511-5521.
- [69] Shen Y J. Level-set based mask synthesis with a vector imaging model[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21775-21785.
- [70] Shen Y J. Lithographic source and mask optimization with narrow-band level-set method[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10065-10078.
- [71] Shen Y J, Peng F, Zhang Z R. Efficient optical proximity correction based on semi-implicit additive operator splitting[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1520-1528.
- [72] 沈逸江, 王小朋, 周延周, 等. 基于半隐式离散化的局部水平集掩模优化[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0911004.  
Shen Y J, Wang X P, Zhou Y Z, et al. Local level set based mask optimization with semi-implicit discretization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0911004.
- [73] Poonawala A, Milanfar P. OPC and PSM design using inverse lithography: a nonlinear optimization approach[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6154: 61543H.
- [74] Poonawala A, Borodovsky Y, Milanfar P. ILT for double exposure lithography with conventional and novel materials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 65202Q.
- [75] Poonawala A A, Milanfar P. Double-exposure mask synthesis using inverse lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2007, 6(4): 043001.
- [76] Lam E. Regularization in inverse lithography: enhancing manufacturability and robustness to process variations[J]. *ECS Transactions*, 2010, 27(1): 427-432.
- [77] Lam E Y, Wong A K. Computation lithography: virtual reality and virtual virtuality[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12259-12268.
- [78] Ma X, Arce G R. Generalized inverse lithography methods for phase-shifting mask design[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15066-15079.
- [79] Ma X, Arce G. Binary mask optimization for inverse lithography with partially coherent illumination[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2008, 25(12): 2960-2970.
- [80] Ma X, Arce G R. PSM design for inverse lithography with partially coherent illumination[J]. *Optics Express*, 2008, 16(24): 20126-20141.
- [81] Ma X, Arce G R. Binary mask optimization for forward lithography based on the boundary layer model in coherent systems[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26(7): 1687-1695.
- [82] 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.
- [83] Ma X, Arce G R. Binary mask optimization for forward lithography based on boundary layer model in coherent systems: erratum[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2010, 27(1): 82-84.
- [84] Ma X, Arce G R. Pixel-based OPC optimization based on conjugate gradients[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2165-2180.
- [85] Yu J C, Yu P C. Gradient-based fast source mask optimization (SMO)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 797320.
- [86] Song Z Y, Ma X, Gao J, et al. Inverse lithography source optimization via compressive sensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14180-14198.
- [87] Ma X, Shi D X, Wang Z Q, et al. Lithographic source optimization based on adaptive projection compressive sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7131-7149.
- [88] Ma X, Wang Z Q, Lin H J, et al. Optimization of lithography source illumination arrays using diffraction subspaces[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3738-3755.
- [89] Ma X, Wang Z Q, Li Y Q, et al. Fast optical proximity correction method based on nonlinear compressive sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14479-14498.
- [90] Sun Y Y, Sheng N Y, Li T, et al. Fast nonlinear compressive sensing lithographic source and mask optimization method using Newton-IHTs algorithm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2754-2770.



- [91] Sun Y Y, Li Y Q, Li T, et al. Fast lithographic source optimization method of certain contour sampling-Bayesian compressive sensing for high fidelity patterning[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32733-32745.
- [92] Liao G H, Sun Y Y, Wei P Z, et al. Multi-objective adaptive source optimization for full chip[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(9): 2530-2536.
- [93] Sun Y Y, Li Y Q, Liao G H, et al. Sampling-based imaging model for fast source and mask optimization in immersion lithography[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(2): 523-531.
- [94] Torunoglu I, Karakas A, Elsen E, et al. OPC on a single desktop: a GPU-based OPC and verification tool for fabs and designers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7641: 764114.
- [95] Zhang J Y, Deng Y D, Xiong W, et al. GPU-accelerated inverse lithography technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7379: 73790Z.
- [96] Pang L Y, Russell E V, Baggenstoss B, et al. Study of mask and wafer co-design that utilizes a new extreme SIMD approach to computing in memory manufacturing: full-chip curvilinear ILT in a day[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11148: 111480U.
- [97] Jia N N, Yang S H, Kim S, et al. Study of lens heating behavior and thick mask effects with a computational method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 905209.
- [98] Sturtevant J, Tejnil E, Lin T, et al. Impact of 14-nm photomask uncertainties on computational lithography solutions[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2013, 13(1): 011004.
- [99] Landié G, Farys V. Estimate design sensitivity to process variation for the 14 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9781: 97810U.
- [100] Sturtevant J, Buck P, Schulze S, et al. 14-nm photomask simulation sensitivity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9231: 92310I.
- [101] 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.
- [102] Su Y H, Huang Y C, Tsai L C, et al. Fast lithographic mask optimization considering process variation[C]//2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), November 2-6, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 230-237.
- [103] Wu X F, Liu S Y, Erdmann A, et al. Incorporating photomask shape uncertainty in computational lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 97800Q.
- [104] 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.
- [105] Li T, Li Y Q. Lithographic source and mask optimization with low aberration sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2017, 16(6): 1099-1105.
- [106] Bai M, Melvin L S, Yan Q L, et al. Approximation of three dimensional mask effects with two dimensional features[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5751: 446-454.
- [107] Tirapu-Azpiroz J, Burchard P, Yablonovitch E. Boundary layer model to account for thick mask effects in photolithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 1611-1619.
- [108] Erdmann A. Mask modeling in the low  $k_1$  and ultrahigh NA regime: phase and polarization effects (Invited Paper) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5835: 69-81.
- [109] Erdmann A, Evanschitzky P. Rigorous electromagnetic field mask modeling and related lithographic effects in the low  $k_1$  and ultrahigh numerical aperture regime[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2007, 6(3): 031002.
- [110] Erdmann A, Evanschitzky P, Citarella G, et al. Rigorous mask modeling using waveguide and FDTD methods: an assessment for typical hyper-NA imaging problems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6283: 628319.
- [111] Sears M K, Bekaert J, Smith B W. Lens wavefront compensation for 3D photomask effects in subwavelength optical lithography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(3): 314-322.
- [112] Finders J, Dusa M, Mulkens J, et al. Solutions for 22-nm node patterning using ArFi technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 79730U.
- [113] Staals F, Andryzhyieuskaya 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.
- [114] Fukuda H. Spatial filtering for depth of focus and

- resolution enhancement in optical lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1991, 9(6): 3113-3116.
- [115] Chen X N, Shi J P, Luo X G, et al. Study on improvement of resolution in photolithographic patterns with pupil phase-shift filtering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5286: 97-102.
- [116] Fukuda H, Yamanaka R. A new pupil filter for annular illumination in optical lithography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(12B): 4126-4130.
- [117] Kang H, Smith B W. Fabrication of small contact using practical pupil filtering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4000: 1086-1091.
- [118] von Buena R M, Fukuda H, Terasawa T. Effects of radially nonsymmetric pupil filters and multiple-pupil exposure[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2726: 375-385.
- [119] Kemsell Sears M, Bekaert J, Smith B W. Pupil wavefront manipulation for optical nanolithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8326: 832611.
- [120] Kemsell Sears M, Fenger G, Mailfert J, et al. Extending SMO into the lens pupil domain[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 79731B.
- [121] Fühner T, Evanschitzky P, Erdmann A. Mutual source, mask and projector pupil optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8326: 83260I.
- [122] Li J, Lam E Y. Joint optimization of source, mask, and pupil in optical lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 90520S.
- [123] 茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于光刻胶三维形貌的光刻多参数联合优化方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0422002.
- Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Multi-parameter joint optimization for lithography based on photoresist topography model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0422002.
- [124] Li T, Liu Y, Sun Y Y, et al. Vectorial pupil optimization to compensate polarization distortion in immersion lithography system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4412-4425.
- [125] Li T, Sun Y Y, Li E Z, et al. Multi-objective lithographic source mask optimization to reduce the uneven impact of polarization aberration at full exposure field[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15604-15616.
- [126] Li T, Liu Y, Sun Y Y, et al. Multiple-field-point pupil wavefront optimization in computational lithography[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8331-8338.
- [127] Wei A, Guo W, Jiang F, et al. Lithographic benefits and mask manufacturability study of curvilinear masks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10810: 108100P.
- [128] Pang L L, Russell E V, Baggenstoss B, et al. Enabling faster VSB writing of 193i curvilinear ILT masks that improve wafer process windows for advanced memory applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11518: 115180W.
- [129] Pang L Y, Russell E V, Baggenstoss B, et al. Study of mask and wafer co-design that utilizes a new extreme SIMD approach to computing in memory manufacturing: full-chip curvilinear ILT in a day[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11148: 111480U.
- [130] Pang L Y, Ungar J, Bouaricha A, et al. TrueMask® ILT MWCO: full-chip curvilinear ILT in a day and full mask multi-beam and VSB writing in 12 hrs for 193i[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11327: 113270K.
- [131] Su J, Zhang Q, Fong W, et al. Machine learning assisted SRAF placement for full chip[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10451: 104510D.
- [132] Peng L. Mask synthesis using machine learning software and hardware platforms[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11327: 1132707.
- [133] Cecil T, Braam K, Omran A S, et al. Establishing fast, practical, full-chip ILT flows using machine learning[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11327: 1132706.