

激光与光电子学进展

EUV 光刻三维掩模成像研究进展

张子南^{1,2}, 李思坤^{1,2}, 王向朝^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 极紫外(EUV)光刻是目前最先进的光刻技术,是芯片向更高集成度发展的重要保障。高成像质量是确保 EUV 光刻机性能指标的前提,而反射式三维掩模和特殊的光学成像系统给提高成像质量带来了更多挑战。研究三维掩模成像是提高 EUV 光刻成像质量的基础,三维掩模成像模型是重要的研究工具。本文结合本团队在 EUV 光刻三维掩模成像领域的研究,介绍了 EUV 光刻三维掩模成像的基本原理,总结了典型的三维掩模模型,介绍了提高 EUV 光刻三维掩模成像质量相关技术的研究进展,并展望了该领域的发展趋势。

关键词 光刻; 衍射; 极紫外光刻; 三维掩模模型; 成像质量

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922021

Research Progress on the Imaging of Three-Dimensional Mask for Extreme Ultraviolet Lithography

Zhang Zinan^{1,2}, Li Sikun^{1,2}, Wang Xiangzhao^{1,2*}

¹Laboratory of Information Optics and Opt-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Extreme ultraviolet (EUV) lithography is the most advanced lithography technology, and guarantees the development of the chip to higher integration degree. High imaging quality is the premise to ensure the performance of the EUV lithography system, while the reflective three-dimensional (3D) mask and the special imaging optics bring more challenges in improving the imaging quality of EUV lithography. The research of the imaging of 3D mask is the basis to improve the imaging quality, and the 3D mask imaging model is an important research tool. In this paper, combined with the research work of our group, the principle of the imaging of 3D mask for EUV lithography is briefly introduced and the typical 3D mask models are reviewed. Then the researches on the imaging quality of 3D mask for EUV lithography are introduced. Finally, the research tendency of this field is prospected.

Key words lithography; diffraction; extreme ultraviolet lithography; three-dimensional mask model; imaging quality

1 引言

光刻机是影响集成电路图形关键尺寸、集成度以及终端产品性能的关键设备^[1]。随着摩尔定律的

延续,光刻技术扮演着愈发重要的角色,集成电路制造工艺中的光刻成本不断增长^[2-3]。提升光刻分辨率(本文中指密集图形的半周期)是提高集成电路微细化程度的重要手段。对目前主流的投影光

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-03-30; 录用日期: 2022-03-31

通信作者: *wxz26267@siom.ac.cn

刻技术而言,光刻分辨率与曝光波长,投影物镜数值孔径和工艺因子有关。通过减小曝光波长、增大数值孔径以及降低工艺因子等方法可以提高光刻分辨率^[4-6]。随着投影光刻机的发展,曝光波长从 436 nm 减小到 193 nm,数值孔径从 0.28 增大到 1.35。结合多种分辨率增强技术,193 nm 浸液光刻机的单次曝光分辨率可以达到 38 nm^[7]。多重图形技术使 193 nm 浸液光刻机成功应用于 10 nm 甚至 7 nm 技术节点,但也导致光刻成本急剧增加^[7]。作为传统光学投影光刻的延伸,EUV 光刻可以实现更高的分辨率。目前的商用 EUV 光刻机采用 13.5 nm 的曝光波长和 0.33 的数值孔径,单次曝光分辨率达到了 13 nm。在 5 nm 甚至 3 nm 技术节点集成电路的研发和量产中,极紫外(EUV)光刻机发挥着不可或缺的作用^[8]。未来随着数值孔径的进一步增大,EUV 光刻机的分辨率还将进一步提高,从而保障摩尔定律的延续。

EUV 光刻的概念最早可追溯至日本和美国在 20 世纪 80 年代软 X 射线的研究^[9]。第一次软 X 射线缩放光刻成像的结果于 1986 年公开,该技术于 1990 年用于近衍射受限成像,展示出其可用于更小图形特征尺寸芯片制造的潜力。正是由于这一潜力,1997 年在 Intel 的主导下,一个由美国国家实验室、集成电路制造商以及私有商业公司组成的 EUV 有限责任公司(EUV LLC)成立,旨在加速 EUV 光刻研发并实现 EUV 光刻的商业化。2006 年,ASML 公司交付了两台 EUV 样机 ADT,标志着 EUV 光刻机实验室预研阶段的结束^[10]。随后 ASML 公司相继推出了 NXE:3100、NXE:3300 和 NXE:3350 等研发机台。ASML 公司正式推出的第一个 EUV 量产机型是 NXE:3400B,随后于 2019 年推出产率更高的 NXE:3400C 机型。2021 年,ASML 公司交付了目前最先进的 EUV 量产机型 NXE:3600D,并在大力研发采用 0.55 数值孔径的新一代 EUV 光刻机 EXE:5000,其单次曝光分辨率将达到 8 nm^[11]。

无论是深紫外(DUV)光刻机还是 EUV 光刻机,其原理都是以成像的方式将掩模图形转移到硅片上,成像质量的高低直接决定了图形转移的精度,高成像质量是确保光刻机性能指标的前提^[1]。对于 EUV 光刻机而言,其成像质量面临更多的挑战。例如,EUV 光源发出的光倾斜入射到掩模上,其非远心性影响掩模图形成像后的位置^[12];EUV 掩模厚度远大于曝光波长,掩模三维效应会造成衍射

光能量损失,进而影响成像质量^[13];EUV 光刻机采用反射式的成像系统,光线多次反射后会损失很大一部分能量,加上杂散光效应和光刻胶随机效应等现象,成像质量会受到显著影响^[14]。其中,EUV 掩模是影响成像质量的最主要因素之一。由于极紫外光会被大多数材料强烈吸收,因此 EUV 掩模采用反射式设计,主要由多层膜和吸收层组成。多层膜通常包含 40 对 Mo/Si 双层结构共 80 层薄膜以实现极紫外光的高反射率。吸收层通常采用基于 Ta 的材料如 TaN,具有较高的极紫外光吸收率以保障成像对比度^[8]。不考虑衬底,EUV 掩模的厚度可以达到数百纳米,远大于曝光波长。此外极紫外光倾斜入射到掩模上,这会导致一系列三维掩模效应如阴影效应和离焦效应等,进而显著影响成像质量^[8]。

光刻成像仿真是研究 EUV 三维掩模如何影响成像质量的重要手段^[15-17],也是研究如何提高 EUV 光刻成像质量的重要工具^[18-19]。三维掩模成像模型是进行 EUV 光刻成像仿真的基础^[20-24]。基于精确的三维掩模成像模型,可以开展三维掩模效应分析^[25]、掩模结构优化^[26]以及阴影效应补偿等研究^[15]。在光刻机软硬件不变的前提下,提高 EUV 成像质量最重要的方法之一是计算光刻技术,而建立快速准确的三维掩模成像近似模型是计算光刻技术应用于 EUV 光刻的前提^[18-19]。

为了使研究者对 EUV 光刻三维掩模成像的相关研究有全面的了解,本文综述 EUV 光刻三维掩模成像模型及其应用的研究进展。首先介绍光刻成像模型的基本原理,包括 Abbe 成像模型、Hopkins 成像模型以及离轴光源点成像模型。然后总结典型的 EUV 三维掩模仿真模型,分析各模型的优点和不足,并介绍提升三维掩模成像质量相关技术的研究进展。最后总结并展望该领域的发展趋势。

2 EUV 光刻三维掩模成像模型

2.1 EUV 光刻成像模型

EUV 光刻成像系统如图 1^[27]所示,尽管其结构与 DUV 光刻机存在诸多不同,但成像原理与传统光学投影光刻基本相同。光源发出的光束经过照明系统均匀照射到掩模面上发生衍射,衍射光的低频部分进入投影物镜,并会聚到像面形成空间像^[28]。空间像的光场在光刻胶内使光刻胶的物理

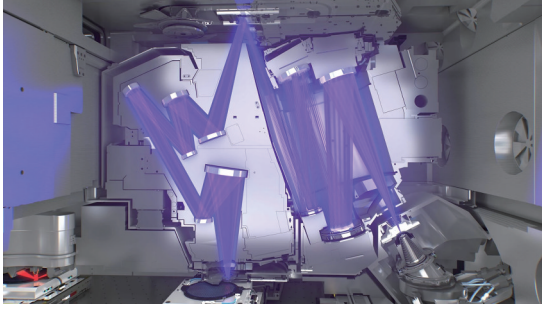


图 1 EUV 光学系统示意图^[27]
Fig. 1 Schematic of EUV optics^[27]

化学性质发生改变,通过显影、刻蚀等步骤实现掩模图形的转移^[29]。本文主要关注空间像模型。

2.1.1 Abbe 成像模型

光刻成像系统采用部分相干照明,照明光源是扩展光源,可以看作由不同位置处的点光源组成。每个点光源为相干照明,在像面形成各自的光场分布。不同的点光源之间完全非相干,各自产生的光场分布之间不发生干涉^[30]。因此在部分相干照明条件下,空间像的总光强分布为每个点光源在像面光强分布的叠加,表达式^[5]为

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

式中: j 是虚数单位; (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 为像面归一化空间坐标; (\hat{f}, \hat{g}) 为光瞳面归一化空间频率坐标; (\hat{f}', \hat{g}') 为掩模衍射光的归一化空间频率坐标; I 表示空间像强度; S 表示有效光源强度分布; H 表示投影物镜的传递函数,可以视为一个低通滤波器; B 表示入射光通过掩模后的衍射谱。这种计算空间像强度分布的方法称为 Abbe 方法,式(1)即为 Abbe 公式。

在成像模型中光源一般用有效光源来描述,以传统的圆形照明为例,定义有效光源半径与物镜光

瞳半径之比为部分相干因子 σ ,则有效光源强度分布 S 的表达式为

$$S(\hat{f}, \hat{g}) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2}}{\sigma}\right) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sigma^2}, & \sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2} \leq \sigma \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

投影物镜的传递函数包含了数值孔径,倾斜因子和波像差等信息,作用是收集掩模衍射光并进行调制。传递函数 H 的表达式为

$$H(\hat{f}, \hat{g}) = \begin{cases} R(\hat{f}, \hat{g}) T(\hat{f}, \hat{g}) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda} W(\hat{f}, \hat{g})\right], & \sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: R 为倾斜因子,作用是使入射和出射的倾斜光束满足能量守恒定律; T 为投影物镜在频域对各级次衍射光的振幅调制; W 为相位调制,即波像差。

在式(1)中,光场是通过标量来描述的。当数值孔径逐渐增大时,必须考虑光的矢量特性,此时的 Abbe 公式^[6]为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\hat{f}, \hat{g}) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{V}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{J}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{V}'^{-1}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{B}(\hat{f}', \hat{g}') \exp[-j2\pi(\hat{x}_i \hat{f}' + \hat{y}_i \hat{g}')] d\hat{f}' d\hat{g}' \right]^2 d\hat{f} d\hat{g}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{V} 和 \mathbf{V}' 是投影物镜出瞳和入瞳处偏振态的变换矩阵; \mathbf{J} 是投影物镜的琼斯光瞳,包含了偏振像差信息; \mathbf{B} 是掩模的矢量衍射谱。

对于光刻成像模型,掩模衍射谱的计算是最重要的步骤之一。对于传统光学投影光刻,当掩模厚度较小,掩模图形尺寸较大时,掩模衍射谱可以采用

薄掩模模型计算,通过傅里叶变换(FFT)得到掩模 Kirchhoff 远场衍射的结果^[31]。当曝光波长和掩模图形尺寸减小时,必须考虑三维掩模带来的厚掩模效应才能准确计算空间像。尤其对于 EUV 光刻,必须采用三维掩模模型来进行光刻成像仿真^[28]。严格意义上讲,扩展光源的每个光源点照射到三维掩模上

产生的衍射谱,除了频率坐标发生移动,其分布也互不相同,因此每个光源点的成像结果都要独立计算。

2.1.2 Hopkins 成像模型

如果忽略每个光源点产生的衍射谱分布的不

同,离轴光源点的衍射谱相对于轴上光源点的衍射谱仅发生频率坐标的移动,即 Hopkins 频移近似,此时 Abbe 公式可以进行简化^[32]。引入交叉传递系数 (TCC),对于标量成像其表达式为

$$\text{TCC}(\hat{f}', \hat{g}'; \hat{f}'', \hat{g}'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\hat{f}, \hat{g}) H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') H^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') d\hat{f} d\hat{g}. \quad (5)$$

此时空间像强度分布的表达式为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{TCC}(\hat{f}', \hat{g}', \hat{f}'', \hat{g}'') B(\hat{f}', \hat{g}') B^*(\hat{f}'', \hat{g}'') \exp\{-j2\pi[\hat{x}_i(\hat{f}' - \hat{f}'') + \hat{y}_i(\hat{g}' - \hat{g}'')]\} d\hat{f}' d\hat{g}' d\hat{f}'' d\hat{g}'', \quad (6)$$

式中: (\hat{f}'', \hat{g}'') 与 (\hat{f}', \hat{g}') 一样表示衍射光线的归一化空间频率坐标; B^* 表示 B 的复共轭。式(6)即为光刻成像中的 Hopkins 成像公式,它将掩模与光学系统(光源和投影物镜)的作用区分开,光学系统在成像中的作用完全由 TCC 描述。TCC 包含 4 个变量,其物理意义可以通过图 2 解释。TCC 作用于掩模衍射谱,表示衍射谱不同级次之间的复共轭乘积在整个空间像频谱中的权重系数。这一权重系数等于在有效光源部分相干因子 σ 限定的范围内将光瞳函数及其复共轭分别平移 $(-\hat{f}', -\hat{g}')$ 和 $(-\hat{f}'', -\hat{g}'')$ 并对重叠部分积分。

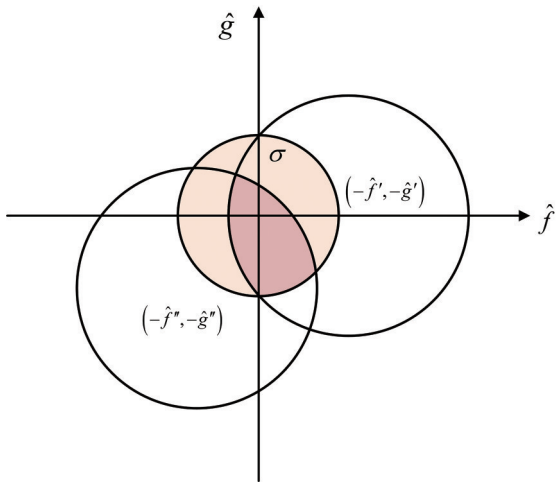


图 2 TCC 示意图

Fig. 2 Schematic of TCC

计算 TCC 的常见方法主要有三类^[33]: 积分算法、解析算法以及基于矩阵的快速算法。其中,积分算法精度最高但较为耗时,基于矩阵的快速算法具有较高的计算效率但计算精度受采样精度影响,解析算法在精度和速度上有较大优势但不适用于任意的光学系统。

为了进一步提高 Hopkins 成像模型的计算效率,可以根据 TCC 矩阵的厄米对称性对其进行奇异值分解(SVD)并截断^[34]

$$\text{TCC}(\hat{f}', \hat{g}', \hat{f}'', \hat{g}'') \approx \sum_k^K \mu_k \Phi_k(\hat{f}', \hat{g}') \Phi_k^*(\hat{f}'', \hat{g}''), \quad (7)$$

式中: μ_k 表示 TCC 的第 k 项特征值; Φ_k 和 Φ_k^* 表示 TCC 的第 k 项特征向量及其复共轭。这样空间像强度分布的表达式可以写为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \sum_k^K \mu_k \left| \mathcal{F}^{-1} \left\{ \Phi_k(\hat{f}', \hat{g}') B(\hat{f}', \hat{g}') \right\} \right|^2, \quad (8)$$

式中: \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换。根据式(8),部分相干成像的空间像强度分布可以看作一系列相干系统成像结果的叠加,即 SOCS (Sum of Coherent Systems) 方法。

除了直接对 TCC 进行奇异值分解,研究者也提出了一系列方法来提高计算速度或精度^[35-37]。对于矢量成像模型,同样可以通过 Hopkins 近似或 SOCS 方法来计算空间像^[38-39]。在光学临近效应修正(OPC)、逆向光刻(ILT)等技术中,光学系统保持不变,而掩模图形不断变化,此时适合采用 Hopkins 成像模型,只需提前计算一次 TCC 或核函数即可。

2.1.3 离轴光源点成像模型

当掩模的三维效应对成像的影响不可忽略时,必须采用三维掩模成像模型计算空间像。此时 Abbe 成像模型和 Hopkins 成像模型依然有效。对于 Abbe 成像模型,每个光源点对应的掩模衍射谱都需要采用三维掩模模型独立计算,速度较慢。而对于 Hopkins 成像模型,只需计算轴上光源点,即有效光源中心点对应的三维掩模衍射谱,没有考虑离轴光源点对应的衍射谱分布,从而产生计算误差。

为了平衡三维掩模成像仿真的计算精度和速度, Pistor^[40]和 Schermer 等^[41]先后提出了基于采样网格的方法。如图 3 所示, 有效光源本身存在一个采样网格用于叠加计算空间像, 为了考虑离轴光源点的三维掩模效应对成像的影响, 该方法对有效光源另外再定义一个采样网格, 对该网格的每个采样点 $(\hat{f}_i^s, \hat{g}_i^s)$ 采用三维掩模模型计算其对应的掩模衍射谱 $B(\hat{f}_i^s, \hat{g}_i^s; \hat{f}', \hat{g}')$ 。对于每个用于计算空间像的光源点 (\hat{f}_i, \hat{g}_i) , 其三维掩模衍射谱可以由附近几个上述采样点的计算结果加权平均并频移得到

$$B(\hat{f}_i, \hat{g}_i; \hat{f}', \hat{g}') = \sum_j \omega_j B[\hat{f}_j^s, \hat{g}_j^s; \hat{f}' - (\hat{f}_i - \hat{f}_j), \hat{g}' - (\hat{g}_i - \hat{g}_j)], \quad (9)$$

式中: ω_j 是权重因子。

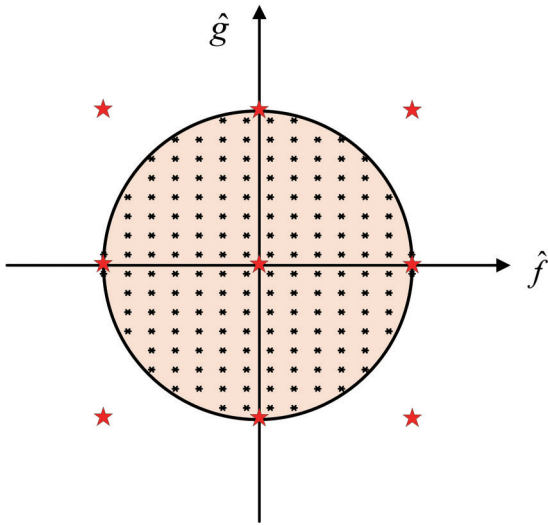


图 3 采样网格法示意图^[41]

Fig. 3 Schematic of sampling grid method^[41]

为了进一步提高计算速度并应用于全芯 OPC 等场景, ASML 公司的 Liu 等^[42]提出了一种考虑离轴光源点三维掩模效应的成像仿真框架, 并采用两种基于 TCC 的方法计算空间像。Mentor Graphics 公司的 Adam 等^[43]提出了一种 HHA (Hybrid Hopkins-Abbe) 的成像模型, 将光源分解为如图 4 所示的几个子区域, 每个子区域选择中心光源点进行三维掩模仿真, 该子区域所有光源点对成像的影响通过 Hopkins 成像模型计算, 不同子区域之间通过 Abbe 成像原理叠加计算最终的空间像。Synopsys 的 Zhang 等^[44]提出了一种三维掩模仿真方法, 通过参数标定等方式对离轴光源点的掩模衍射场进行

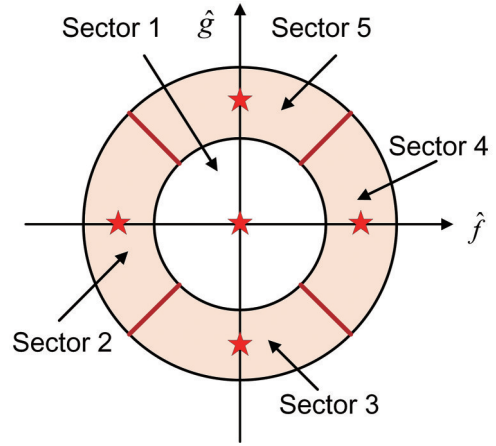


图 4 HHA 模型光源采样方法^[43]

Fig. 4 Source sampling method of HHA model^[43]

建模。此外对于 EUV 光刻三维掩模成像仿真, 还需要考虑掩模离焦和杂散光等因素的影响^[45]。

2.2 EUV 三维掩模模型

在 2.1.3 节所述的三维掩模成像模型中, 掩模衍射谱的计算是最为关键的步骤之一。尤其对于 EUV 光刻, 三维掩模模型直接影响成像模型的计算精度和速度。EUV 三维掩模模型主要分为严格模型和快速模型两种^[28]。严格模型通过严格电磁场仿真的方法求解麦克斯韦方程组, 并得到掩模的衍射场, 这类方法计算精度高, 但极为耗时, 适用于工艺研发或三维掩模效应分析等场景。快速模型通过各种近似方法和假设条件计算掩模衍射谱, 计算速度非常快但存在一定的误差, 适用于 OPC 等计算光刻技术中。本节介绍典型的 EUV 三维掩模模型。

2.2.1 严格仿真模型

严格仿真模型的原理是求解麦克斯韦方程组, 以时域的微分形式为例, 其表达式为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D}(t) = \rho_v(t) \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(t) = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E}(t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(t)}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H}(t) = \mathbf{J}(t) + \frac{\partial \mathbf{D}(t)}{\partial t} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{D} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 分别为电通量密度、电场强度、磁感应强度和磁场强度; ρ_v 、 \mathbf{J} 分别为体电荷密度和电流密度。式(10)结合物质方程、边界条件等约束, 就可以求解出掩模衍射后任意空间位置处的光场分布。严格仿真模型主要应用于光刻工艺仿真^[46], EUV 掩模缺陷仿真^[47]和快速模型标定^[42]等场景。

常见的用于 EUV 三维掩模模型的严格仿真方法主要有时域有限差分 (FDTD) 法^[48-49]、波导 (WG) 法^[50]、严格耦合波分析 (RCWA) 法^[51]、时域伪谱 (PSTD) 法^[52]以及有限元法 (FEM)^[53], 几种方法主要在求解域和离散化方式等方面存在差别。

FDTD 法是经典的严格电磁场仿真方法之一, 该方法将被仿真的物体在空间域划分成离散的 Yee 元胞, 对各元胞采用差分运算替代麦克斯韦方程组中的偏微分运算, 结合照明及边界条件, 按照一定的时间步长迭代求解时域的麦克斯韦方程组, 直至数值解稳定收敛^[54]。自 20 世纪 90 年代以来, FDTD 法先后被 TEMPEST、PROLITHO 以及 Dr. LiTHO 等光刻仿真软件用于求解掩模衍射场的分布。然而 FDTD 法的计算精度由时间和空间离散化程度决定, 为保证较高的计算精度并减小数值色散, FDTD 方法需要耗费大量的计算资源和计算时间。对于 EUV 光刻, 由于曝光波长较短和数值色散的影响, FDTD 法求解 EUV 掩模衍射场的运算量远高于求解 DUV 掩模衍射场时的计算量。研究者提出了将吸收层和多层膜分解开的方法来加快 FDTD 求解 EUV 三维掩模衍射场的计算速度^[55]。此外随着计算机性能和 FDTD 并行计算技术的不断发展, FDTD 法的计算速度也越来越快。

WG 法和 RCWA 法的原理基本相同, 都是基于模式理论和傅里叶展开的计算方法。该类方法将仿真物体划分为具有不同介质区域的多层层状结构, 将不同区域的电磁场及材料电介质系数展开为傅里叶级数, 并结合区域边界条件求解麦克斯韦方程组, 可直接得到仿真物体的远场衍射谱振幅和相位分布^[56]。WG 法和 RCWA 法也已经被 Dr. LiTHO 和 HyperLith 等光刻仿真软件应用于 EUV 三维掩模仿真中。相较于 FDTD 法, 该类方法的计算精度主要取决于傅里叶级数展开的截断级次, 仿真周期性分层介质尤其是 EUV 三维掩模时在计算速度、内存消耗和收敛性等方面具有明显优势^[57]。然而对于具有复杂形貌的结构例如含缺陷的 EUV 掩模, 该类方法需要更精细的多层结构划分和更高的截断级次, 导致计算速度和精度降低。为此, 研究人员提出了一系列方法对 WG 法和 RCWA 法进行改进^[58-59]。

PSTD 法的基本原理与 FDTD 法一致, 二者主要在网格离散化方式等方面存在差异。与 FDTD 法类似, PSTD 法同样将被仿真的物体划分成离散

元胞。FDTD 法中的 Yee 元胞是大小相同的矩形, 而 PSTD 法中的元胞可以具有不同的形状和尺寸。此外, FDTD 法中每个元胞具有唯一的电场值, 而 PSTD 法中元胞的电场值由一系列结点值进行多项式插值得到^[54]。FastLitho 公司的 Yeung 等^[60]将 PSTD 法用于 EUV 三维掩模和多层膜缺陷的仿真中, 并通过改进算法提高仿真速度, 证明了该方法相对于 FDTD 法和 RCWA 法的优势。

FEM 法将被仿真物体划分为离散网格, 并通过变分技术在频域求解麦克斯韦方程。FEM 法常用的网格划分方法是三角网格剖分, 相较于 FDTD 法中的矩形网格, 可以更精确地对任意形貌的结构进行描述。德国的柏林 Zuse 研究所将 FEM 法应用于 EUV 三维掩模仿真^[53], 研究了不同的掩模结构成像特点, 并引入域分解的方法加快了仿真速度。

上述严格仿真模型共同的特点是需要消耗大量的计算资源, 计算速度慢。尽管随着计算机硬件的发展和算法的改进, 严格仿真模型的计算效率不断提高, 但依然不适用于全芯片快速仿真和计算光刻等应用场景, 因此研究人员提出了一系列 EUV 三维掩模快速模型。

2.2.2 边界修正模型

对于三维掩模, 其厚度对衍射结果的影响主要体现在边界上, 因此在传统 Kirchhoff 近似的基础上对掩模图形边界进行修正是一种自然的做法。典型的边界修正模型主要有边界层 (BL) 模型、脉冲修正模型、ASML 公司的 M3D+ 模型以及 Synopsys 公司的 Mask3D OAI 模型。

BL 模型最早由 Tirapu-Azpiroz 等^[61]等于 2003 年提出, 其原理如图 5 所示。该模型基于边界衍射波理论, 在图形边界处增加边界修正图形。通过设置合适的修正图形宽度和复透射系数, 使其衍射谱计算结果与严格仿真结果匹配, 从而补偿薄掩模模型在边界处的计算误差。BL 模型可以用于 DUV 交替相移掩模的快速成像仿真和 OPC 中^[62]。而对于 EUV 三维掩模, 斜入射时掩模图形两边界衍射情况并不相, 因此 Yan^[63]在利用 BL 模型仿真 EUV 三维掩模时对不同边界采用随照明变化的模型参数, 从而提高仿真精度。边界层法物理意义明确, 可用来分析 EUV 掩模边界衍射误差对光刻成像质量的影响, 如掩模边界衍射对离焦效应的影响^[63]。



图 5 BL 模型原理图^[61]

Fig. 5 Principles of BL model^[61]

脉冲修正模型的基本原理与 BL 模型相似。Lam 等^[64]提出在掩模透过率函数中加入对应的边界点脉冲修正函数,从而补偿薄掩模模型在边界处的计算误差。Li 等^[65]将该方法进行扩展,在不同入射角照明条件下,通过严格仿真标定出相应的边界点脉冲修正参数,从而提高斜入射情况下的仿真精度。对于 EUV 三维掩模,本课题组的曹宇婷^[13]提出了基于边界脉冲修正的模型,但由于模型忽略了入射光方向的影响,对垂直方向的线条图形计算误差较大。

ASML 的 Liu 等^[42]提出了一种基于边界滤波器的 M3D 模型,三维掩模的衍射谱结果被分解为薄掩模模型计算结果、水平方向边界衍射谱、垂直方向边界衍射谱以及顶点衍射谱的加权叠加,基本原理如图 6 所示。衍射谱各组成部分的权重系数与入射光方向、衍射级次、掩模材料以及掩模的三维结构

有关,通过严格仿真进行标定^[66]。

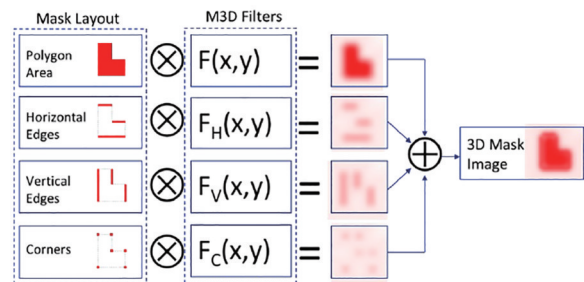


图 6 ASML 公司 M3D 模型原理图^[42]

Fig. 6 Principles of M3D model proposed by ASML^[42]

2013 年, Liu 等^[45]针对 EUV 三维掩模提出了 M3D+ 模型,在不同入射光方向条件下对典型图形通过严格仿真获取边界滤波器的参数,基本原理如图 7 所示。此外 M3D+ 模型还考虑了边界与边界之间衍射的相互作用,进一步提高了模型的仿真精度。

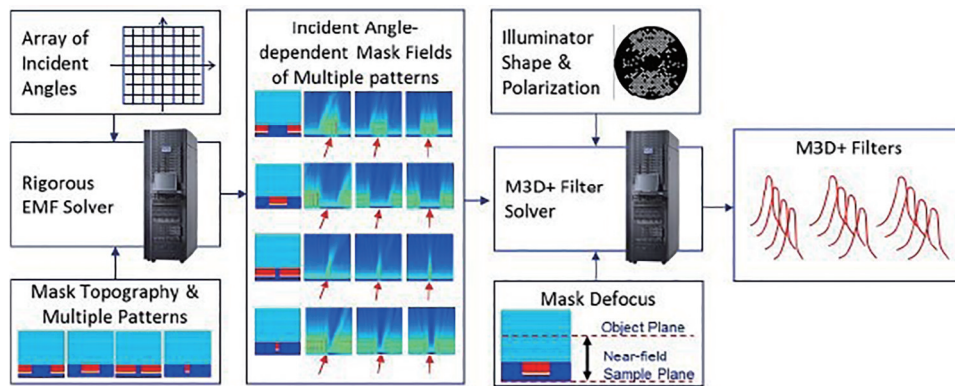


图 7 M3D+ 模型边界滤波器标定方法^[45]

Fig. 7 Calibration method of the boundary filters in M3D+ model^[45]

Synopsys 公司的 Zhang 等^[67]提出了一种 Mask3D OAI 模型,可以快速仿真三维掩模成像。该模型将三维掩模衍射结果分解为薄掩模模型计算结果和三维掩模残差信号的叠加,并根据残差信号提取出相应的边界滤波器^[68]。对任意掩模图形,将边界滤波器与图形边界信号进行卷积可以得

到相应的三维掩模残差信号,其基本原理如图 8 所示。此外,在卷积的过程中根据离轴光源点的入射方向和图形边界的方向对边界滤波器进行相应的调整,可以提高模型的仿真精度。该模型同样适用于 EUV 光刻,并应用于 EUV 光刻的 ILT 技术中^[69]。

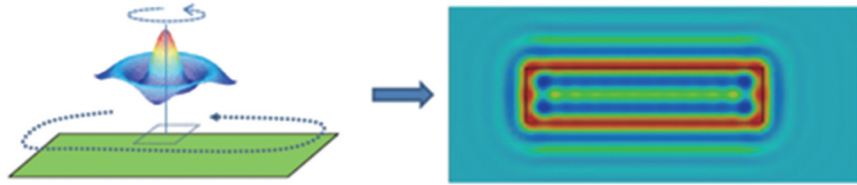


图8 Mask3D OAI模型三维掩模信号计算原理^[67]

Fig. 8 Computation principle of the 3D mask signals in Mask3D OAI model^[67]

基于边界修正的 EUV 光刻三维掩模模型具有直观、容易实现的优点,仿真流程与薄掩模模型差异不大,方便应用于 OPC 等场景。然而其边界修正参数的影响因素众多,当掩模材料或结构改变时需要重新标定。此外,参数标定时使用的典型图形种类有限,在一定程度上限制了边界滤波器方法的应用^[70]。

2.2.3 图形分解模型

与边界修正模型不同,图形分解模型将掩模二维图形分解为一维线条图形,将二维图形对应的三维掩模衍射结果看作 x 方向和 y 方向一维图形的衍射结果相加,并减去重复计算的薄掩模模型结果。其基本原理如图 9^[12]所示。

Adam 等^[71]提出了基于图形分解原理的 DDM (Domain Decomposition Method) 模型,其中一维图形衍射结果采用严格仿真计算,该模型的计算速度远高于直接对二维图形进行严格仿真。随后 Adam 等^[72]又提出了基于图形边界分解的 edge-



图9 图形分解模型原理^[12]

Fig. 9 Principle of the pattern decomposition methods^[12]

DDM 模型,并应用于全芯片仿真。Mailfert 等^[73]将 edge-DDM 模型进行拓展,应用于 EUV 三维掩模的仿真,其基本原理如图 10 所示。edge-DDM 模型在不同偏振和照明角条件下,采用严格仿真预先计算大量二维图形边界的 DDM 信号,并通过查表法提高了模型的计算速度。此外,研究人员还针对图形顶点散射效应、图形边界串扰现象以及非曼哈顿图形等情况进行了改进和优化^[74-76]。edge-DDM 模型已被用于 Mentor 公司的商用软件中。

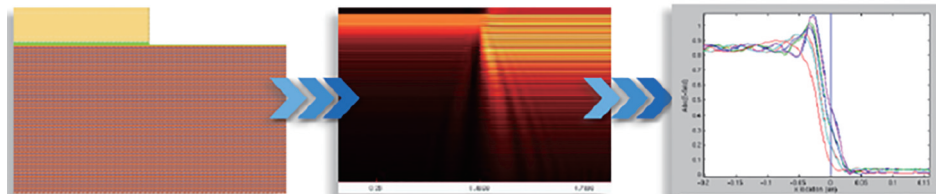


图10 edge-DDM模型原理^[73]

Fig. 10 Principle of edge-DDM model^[73]

Erdmann 等^[77]基于 WG 法严格仿真模型,也采用类似的图形分解策略,建立了 EUV 光刻三维掩模的 QUASI 3D 模型。与 DDM 不同的是,QUASI 3D 模型在频域内对掩模图形各边界进行分解仿真并叠加。该模型在一定误差范围内可以快速、准确地仿真 EUV 光刻三维掩模的衍射谱。此外,Evanschitzky 等^[78]提出了对大面积掩模进行子区域分解并行仿真的方法,进一步通过图形分解的方式提高了模型的仿真速度。

图形分解模型对掩模图形边界处光学衍射、散

射效应的处理与边界修正模型类似,然而对更小的图形尺寸,尤其在复杂偏振、斜入射照明条件下,模型与严格仿真的误差将逐渐增大,且这一误差难以通过简单的校正得以补偿。此外,这类方法难以进行含多层膜缺陷的 EUV 光刻三维掩模衍射仿真。

2.2.4 机器学习和深度学习模型

近年来,随着机器学习和深度学习技术的快速发展,研究人员提出了一系列基于机器学习和深度学习的三维掩模模型^[79-80]。这类模型选取一系列典型的掩模图形作为输入,并通过严格仿真得到相应

的掩模衍射近场或空间像作为输出,通过不同的方法对模型进行训练可以建立掩模图形到衍射近场或空间像的映射。一旦训练完成,模型对三维掩模衍射或成像的计算速度非常快,在全芯片仿真或掩模优化等场景可以发挥重要作用。类似地,这类模型同样可以用于 EUV 光刻三维掩模仿真。

Lin 等^[81]提出了一种基于非参数回归的 EUV 光刻三维掩模模型。该模型首先选取一些具有代表性的掩模图形和光源参考点,通过严格仿真计算得到相应的掩模衍射近场从而建立训练数据库。在仿真阶段,被仿真的掩模图形被分解为一系列不重叠的区域块,每个区域块的衍射近场通过非参数回归和数据融合技术进行计算。最后通过图像拼接和数据拟合方法,将各区域块的结果拼接出总的衍射近场。该模型的计算精度高于传统的 DDM 模型,但计算速度较慢。

Tanabe 等^[82]提出了一种基于卷积神经网络的 EUV 光刻三维掩模模型。该模型将任意光源点照明条件下的 EUV 光刻三维掩模衍射结果分解为与入射方向无关的薄掩模模型计算结果和与入射方向有关的三维衍射信号。将三维衍射信号进行一阶展开,用三个分别代表轴上和轴外三维掩模效应的参数进行描述。将掩模图形作为输入,各个衍射级次对应的三个参数作为输出,对卷积神经网络进行训练。训练好的模型对 EUV 光刻三维掩模衍射谱的计算速度比严格仿真提高了 5000 倍。此外,该模型还结合了 TCC 方法以快速计算 EUV 光刻三维掩模的空间像。

Awad 等^[83]提出了一种基于 pix2pix 条件生成对抗网络的 EUV 光刻三维掩模空间像计算模型。如图 11 所示,该模型基于端到端的思想,在薄掩模模型的空间像和三维掩模的空间像之间建立映射,较为准确地预测了多种掩模三维效应。

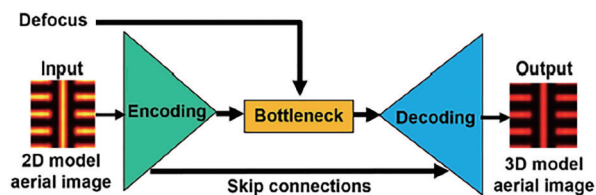


图 11 基于生成对抗网络的 EUV 三维掩模空间像模型^[83]
Fig. 11 EUV 3D mask imaging model based on the GAN^[83]

基于机器学习和深度学习的 EUV 光刻三维掩模模型的优点在于训练完成后的预测速度非常快。

但训练阶段掩模图形的选择以及入射光方向的表征对模型有直接的影响,且作为黑箱模型并没有明确的物理意义,还需要更进一步的研究。

2.2.5 结构分解模型

EUV 光刻掩模按光学特性可分为吸收层和多层膜两个主要部分。其中吸收层对 EUV 光有强吸收作用,上面刻蚀有掩模设计图形,通过吸收层后的衍射光经过多层膜反射,再经过吸收层衍射后最终进入投影物镜系统。由于吸收层和多层膜的光学传播物理过程差异较大,因此按照吸收层、多层膜分解仿真的掩模结构分解模型可较好地实现对含缺陷 EUV 光刻掩模的快速精确仿真。通常可对吸收层、多层膜采用不同的仿真模型,以匹配不同仿真应用需求,达到仿真精度与速度间的较好平衡^[12]。

Clifford 等^[84-85]将边界点脉冲修正的吸收层模型与单平面近似、光线追迹等多层膜模型结合,提出了 RADICAL (Rapid Absorber Defect Interaction Computation for Advanced Lithography) 模型,其原理如图 12 所示。该模型包含吸收层仿真和多层膜仿真两部分,二者通过傅里叶变换连接。此后研究人员又在 RADICAL 模型的基础上进行优化,提出了基于掩模结构分解的 DPS (Defect Printability Simulator) 仿真工具^[65]。在不同入射光方向和吸收层结构条件下对边界修正参数进行优化以提高仿真精度。

本课题组的 Cao 等^[20]提出了 SDM (Structure Decomposition Method) 快速模型,将 EUV 光刻三维掩模分解为吸收层和多层膜两部分分别进行建模。其基本原理如图 13 所示,入射光与掩模的相互作用被分为三个过程:吸收层衍射,多层膜反射和吸收层二次衍射。

SDM 模型将吸收层衍射过程分为三个步骤,首先入射光从吸收层上表面自由传播至位于吸收层中间位置的等效面,入射光复振幅的幅值不变,相位发生改变。入射光在等效面发生衍射,通过点脉冲修正的基尔霍夫薄掩模近似模型计算其衍射谱。最后,各级次衍射光从等效面自由传播至吸收层的下表面,叠加相应的相位改变量。吸收层的衍射谱通过边界脉冲修正模型(EPPM)计算,并添加一段距离的相位传播使相位与严格仿真结果匹配。以一维线空图图形为例,吸收层衍射谱表达式为

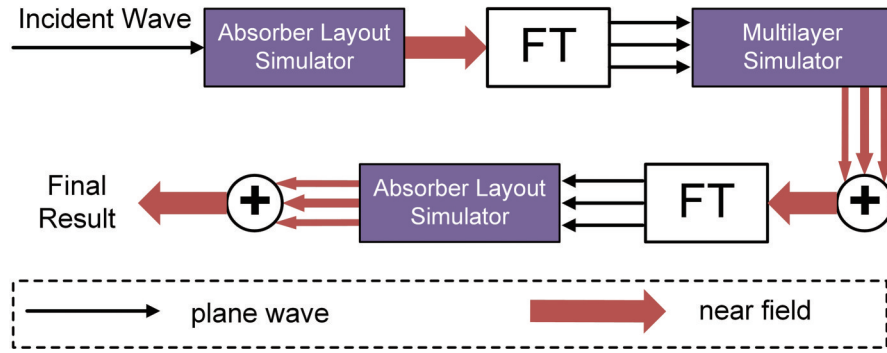


图 12 RADICAL 模型原理图^[84]

Fig. 12 Principle of the RADICAL model^[84]

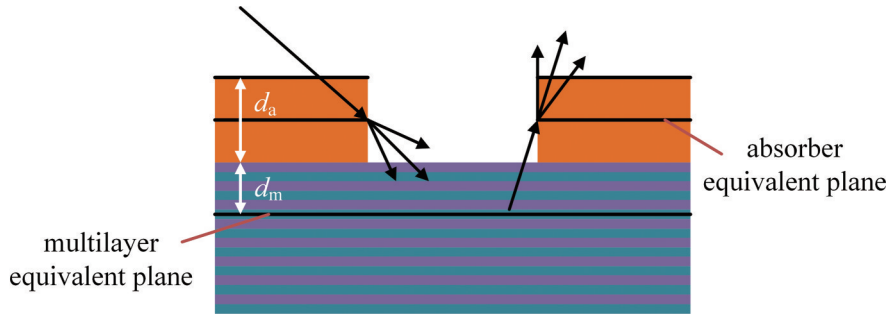


图 13 SDM 模型原理图^[13]

Fig. 13 Principle of the SDM model^[13]

$$B_a = t_a \operatorname{sinc}(m) + (t_b - t_a)d \operatorname{sinc}(md) + \frac{2\delta_e}{p} \cos(\pi md), \quad (11)$$

式中： t_a 、 t_b 和 δ_e 为厚掩模吸收层参数，通过严格仿真标定得到，与吸收层的材料和厚度有关； m 表示衍射级次； p 为掩模物面周期； d 为线空图形的占空比。

在 SDM 模型中多层膜的反射率采用镜面近似进行计算。通过严格仿真可以发现，多层膜反射具有滤波作用，在一定入射角范围内反射率可近似为常数，其他情况下反射率骤减可近似为零。因此可以认为多层膜是位于某等效面上的反射镜，镜面位置由入射光经过多层膜后相位的改变量决定。镜面近似后，多层膜反射率表达式为

$$R_m = r_m \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} 2d_m \cos \gamma_m\right), \quad (12)$$

式中： r_m 为镜面反射系数； λ 为入射光波长； d_m 为镜面位置； γ_m 为入射到多层膜表面第 m 级次衍射光的入射角。镜面反射系数可以在滤波范围内近似为常数，但计算精度较低，因此采用了多项式拟合的方法提高计算精度。

各级次衍射光在吸收层发生第二次衍射时的衍射谱通过霍普金斯频移得到，并叠加形成最终的

掩模衍射谱，表达式为

$$B(\alpha_n, \beta_n) = \int \phi_1(\alpha_i, \beta_i) B_a(\alpha_m - \alpha_i, \beta_m - \beta_i) \phi_2(\alpha_m, \beta_m) R_m(\gamma_m) \times \phi_2(\alpha_m, \beta_m) B_a(\alpha_n - \alpha_m, \beta_n - \beta_m) \phi_2(\alpha_n, \beta_n) d\alpha_m d\beta_m, \quad (13)$$

式中： α_i 和 β_i 为入射光的方向余弦； α_m 和 β_m 为第一次吸收层衍射后第 m 级次衍射光的方向余弦； α_n 和 β_n 为第二次吸收层衍射后第 n 级次衍射光的方向余弦； $\phi_1 = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta \times \frac{1}{2} d_a\right)$ 为入射光从吸收层上表面到吸收层中间位置的相位传播因子， d_a 表示吸收层厚度； $\phi_2 = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos \gamma_m \times \frac{1}{2} d_a\right)$ 为衍射光线从吸收层中间位置到吸收层下表面的相位传播因子。

曹宇婷等^[21]证明了 SDM 模型可以快速准确地对一维线空图形和二维接触孔图形进行仿真，并研究了模型中厚掩模吸收层参数的影响因素。为了进一步提高多层膜模型的计算精度，本课题组的刘晓雷等^[22]提出了一种基于等效膜层法 (ELM) 的多层膜模型，该模型基于菲涅耳公式递推得到多层膜对各方向衍射光的反射率，物理意义明确，计算精

度显著提高。此外,该多层膜模型还适用于含缺陷多层膜的仿真。为了拓展 SDM 模型对任意掩模图形的适用性,本课题组的张恒等^[23]推导了 EPPM 模型在任意曼哈顿掩模图形条件下的表达式,并采用矢量化的方式优化计算过程。此外,张恒等^[24]还优化了含缺陷多层膜模型,采用机器学习等方法提高了模型的计算速度。

对于无多层膜缺陷的 EUV 光刻三维掩模,吸收层模型的计算精度直接影响掩模模型的计算精度。SDM 模型中吸收层的 EPPM 模型具有明确的物理意义,在式(11)中,第一项表示衍射光的背景光强,第二项描述了图形的几何透射波,其频谱幅值为占空比调制的 sinc 函数分布,第三项描述了图形的边界衍射波,在空域内对线空图形两边界处添加点脉冲后,频域内对应的频谱幅值为 cos 函数分布。EPPM 模型对吸收层图形几何透射波和边界衍射波的调制均为复常数调制,在任意入射角条件下,对于任意级次对应的衍射光,模型参数都不改变。因此当入射角增大时,吸收层模型的计算精度会下降,这导致各个方向的衍射光在吸收层发生二次衍射时的计算结果有较大误差。随着掩模图形尺寸不断减小,角度较大的衍射光也具有较高的能量,但较大角度的衍射光不再满足吸收层模型的常数调制规律,且有可能处于 SDM 模型中多层膜的滤波范围之外,这进一步导致掩模衍射谱的计算精度下降。

为了解决这些问题,本课题组的 Zhang 等^[16]提出了一种频域调制的方法。通过构造频域函数来描述在不同入射角条件下吸收层对不同角度衍射光的调制作用,则式(11)改进为

$$B_a = t_a \operatorname{sinc}(m) + (t_b - t_a) F_p(\theta_e, \theta_m) d \operatorname{sinc}(md) + \frac{2\delta_e}{p} G_p(\theta_e, \theta_m) \cos(\pi md), \quad (14)$$

式中: F_p 和 G_p 为特定偏振态下的衍射谱频域调制函数; θ_e 为等效入射角。改进公式的物理意义同样是直观的,其中 sinc 函数和 cos 函数描述了几何透射波和边界衍射波的频谱分布,厚掩模吸收层参数只与吸收层材料和厚度有关,描述了一定厚度的吸收层材料对几何透射波和边界衍射波透过率的调制作用, F_p 和 G_p 只与入射角和衍射角大小有关,描述了吸收层对不同角度的衍射光的调制作用。由于严格仿真本质上是通过一定的策略求解麦克斯韦微分方程,因此频域函数难以用简洁的解析表达式进

行描述。

Zhang 等^[16]给出了频域调制函数的标定方法。一般条件下某一级次的衍射光为几何透射谱与边界衍射谱的叠加,难以独立分析。当占空比为 0.5 时,由于 sinc 函数和 cos 函数的性质,衍射谱的奇数级次为几何透射谱,偶数级次为边界衍射谱。因此,为了将频域函数提取出来,可以在某一掩模周期条件下,将线空图形占空比设置为 0.5,分别采用严格仿真和式(11)计算吸收层衍射谱,提取出其中奇数级次的几何透射谱和偶数级次的边界衍射谱,严格仿真结果与快速仿真结果的比值就是与入射角有关的频域调制函数。

进一步地,Zhang 等选取一系列入射角,分别计算频域函数并存储下来,任意入射角条件下的频域函数可以通过提前存储的数据插值得到。由于频域函数反映了吸收层对各级次衍射光的调制作用,若考虑某一固定衍射角的衍射光,当入射角改变时,从物理直观的角度出发,这种调制作用是连续变化的。此外,该模型同样适用于任意二维曼哈顿掩模图形。相比于 SDM 模型,改进后的模型吸收层衍射谱和掩模衍射谱的计算精度均显著提高。

EUV 光刻三维掩模的设计图形是刻蚀在吸收层上的,理想条件下图形边界处的吸收层侧壁与多层膜表面相互垂直。然而不完美的刻蚀工艺以及重复的掩模清洗工艺会导致吸收层侧壁倾斜,从而对成像质量产生影响^[86-87]。随着掩模图形的特征尺寸不断减小,吸收层侧壁的倾斜成为了一个重要的问题^[88-89]。SDM 模型中吸收层被当成一个整体进行建模,但当吸收层侧壁倾斜时,图形的尺寸在吸收层不同厚度处并不相同,此时将其作为一个整体计算衍射谱会导致计算误差。为了解决这一问题,本课题组的 Zhang 等^[17]提出应对吸收层进行进一步分层。将吸收层分解为多个薄层并计算每个薄层上掩模图形的尺寸,然后通过 EPPM 模型计算单个薄层的衍射谱。各个薄层的衍射谱根据 Hopkins 频移近似在频域内按照空间频率进行叠加。结合基于等效膜层法的多层膜模型,可以快速精确的计算吸收层侧壁倾斜的 EUV 光刻三维掩模衍射谱。

上述 SDM 模型及改进模型都是采用多边形描述掩模图形的,图形的傅里叶变换通过解析方法计算。然而在 ILT 等计算光刻技术中,掩模图形一般采用离散的像素化表征^[90]。针对这一问题,本课题组的 Zhang 等^[18]改进了 SDM 模型中掩模图形的表

征方式,并研究了 SDM 模型的适用性。改进后的式(11)变为

$$B_a = \mathcal{F} \left\{ t_a + (t_b - t_a) \odot \mathbf{M} + \delta_c \odot \Lambda(\mathbf{M}) \right\}, \quad (15)$$

式中: \mathbf{M} 表示掩模图形离散化后的像素矩阵; \odot 表示矩阵按元素相乘; $\Lambda(\cdot)$ 为表示边缘检测函数,作用是将掩模图形的边界像素设置为 1,其他像素设置为 0; $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换,对于像素化掩模采用 FFT 方法实现傅里叶变换。入射光经过吸收层第一次衍射和多层膜反射后的衍射谱可以表示为

$$B_r = \phi_1 \odot B_a \odot \phi_2 \odot R_m, \quad (16)$$

式中: B_a 、 ϕ_2 和 R_m 均通过矩阵来描述。

各级次衍射光线经过多层膜反射后再次通过吸收层发生二次衍射,在频域内按照空间频率相干叠加得到最终的掩模衍射谱,

$$B(i,j) = \sum_p \sum_q B_r(p,q) \phi_2(p,q) B_a(i-p,j-q) \phi_2(i,j), \quad (17)$$

式中: i, j, p, q 为矩阵元素的位置。可以看到,式(17)其实是卷积运算的形式,因此可以改写为

$$B = (B_r \odot \phi_2) \otimes B_a \odot \phi_2, \quad (18)$$

式中: \otimes 表示矩阵卷积。由于 EUV 光刻光源采用斜入射,硅片上的光刻胶图形会产生位置偏移,需要设置掩模离焦量来消除像面图形的位置偏移。当掩模离焦量为 Δz 时,可以计算掩模离焦矩阵 $\phi_d = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos \gamma_m \times \Delta z\right)$ 。综上,掩模衍射谱的表达式为

$$B = (\phi_1 \odot B_a \odot \phi_2 \odot R_m \odot \phi_2) \otimes B_1 \odot \phi_2 \odot \phi_d. \quad (19)$$

在 SDM 模型中,吸收层的点脉冲参数通过解析的方法添加到图形边界并计算衍射谱。然而对于像素化掩模图形,只能通过设置边界像素的有效透过率添加点脉冲,当像素尺寸较大时,模型的误差增大。因此 Zhang 等提出在计算吸收层衍射谱时先对 M 进行上采样得到更精细的图形矩阵,再检测边缘像素并添加点脉冲参数,然后计算傅里叶系数。

EUV 光刻三维掩模的结构分解模型物理意义清晰,计算过程简单,适用于掩模衍射谱快速仿真以及三维掩模效应分析等领域。然而目前的结构分解模型还需要进一步改进仿真流程,以便应用到全芯片仿真等场景中。

3 EUV 光刻三维掩模成像质量

三维掩模成像模型是研究 EUV 光刻三维掩模成像的重要工具。基于严格精确的三维掩模成像模型,可以开展三维掩模效应分析、掩模结构优化以及阴影效应补偿等研究。基于快速准确的近似模型,可以使用光源掩模优化等计算光刻技术来有效提高光刻成像质量。

EUV 光刻三维掩模是反射式掩模,在斜入射条件下会影响成像质量,主要体现在两个方面:阴影效应和离焦效应。阴影效应与入射光方向有关,对成像质量的影响主要是像面图形尺寸偏差和图形位置偏移。离焦效应对成像质量的影响主要是最佳焦面位置随图形周期变化,从而使总的工艺窗口尺寸减小。为了提高成像质量,可以通过优化 EUV 光刻掩模结构和材料来减小三维掩模效应。此外,还可以通过光源掩模优化等计算光刻技术提高 EUV 光刻三维掩模的成像质量^[90]。

3.1 阴影效应

如图 14 所示,在 EUV 光刻成像系统中,入射光方向是变化的,与掩模图形方向以及在扫描狭缝中的位置有关^[91]。在倾斜入射条件下,吸收层图形的左边界和右边界的边界衍射情况并不相同,这使得掩模的衍射近场分布具有不对称性,这种不对称性会导致掩模空间像分布的不对称性,出现与入射光方向有关的图形尺寸偏差和图形位置偏移现象^[64]。

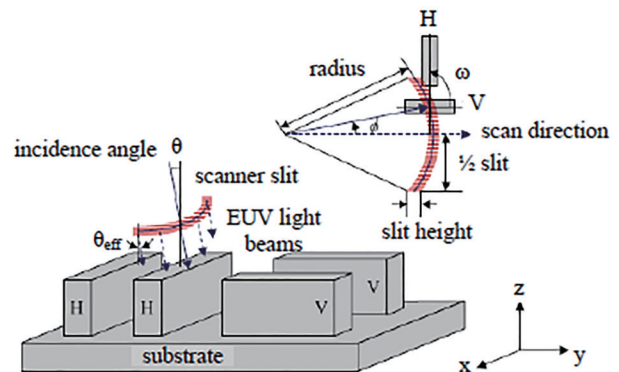


图 14 阴影效应原理^[91]

Fig. 14 Principle of the shadowing effect^[91]

图形尺寸偏差现象是指在恒定阈值条件下,掩模图形的空间像关键尺寸(CD)随入射光方向变化而变化,并且偏离目标值。该现象主要与阴影效应中掩模衍射谱振幅随入射光方向变化有关。倾斜

入射时三维掩模对入射光有遮挡作用,从而造成衍射光总能量减小。为了保证成像质量,消除图形尺寸偏差现象,可以通过校正掩模图形尺寸来对衍射光能量损失进行补偿^[92]。图形位置偏移现象是指在斜入射条件下掩模图形在像面的中心位置发生偏移。该现象主要与阴影效应中掩模衍射谱相位随入射光方向变化有关。通过调整掩模物面离焦量,可以改善该现象^[45]。

研究人员提出了一系列方法来减小阴影效应对成像的影响。Yan^[93]从几何光学的角度出发,推导出了图形尺寸校正量与图形位置偏移量的几何关系式为

$$\Delta w = \frac{2d_a \tan \theta_e}{R_o}, \Delta x = \frac{d_a \tan \theta_e}{R_o}, \quad (20)$$

式中: R_o 为光学系统的放大倍率。该方法虽然简单直观,但误差较大,EUV光刻三维掩模与入射光场间存在复杂的电磁场相互作用,最佳的尺寸校正量与掩模离焦量需要通过严格仿真来计算。

为了更准确地对尺寸校正量和掩模离焦量进行建模,本课题组的曹宇婷等^[25]基于三维掩模SDM模型推导了尺寸校正量和离焦量的解析表达式。掩模的0级衍射光的能量损失被用来估计尺寸校正量的大小,基于SDM模型中的式(11)~(13)并采用一些近似条件,掩模0级衍射光表达式为

$$B_0 = 2r_m \int_0^\alpha \text{sinc}^2\left(\frac{\pi w \delta}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} D \alpha_i \delta\right) d\delta, \quad (21)$$

式中: α 为积分域; $D = d_m + 2d_a$; $\delta = \alpha_m - \alpha_i - \alpha_n/2$; w 为掩模图形尺寸。若掩模图形尺寸校正量 Δw 引起的衍射谱变化与入射光方向余弦为 α_i 时的情况相反,则 Δw 可补偿由入射光方向 α_i 引起的图形尺寸偏差现象,从而减小阴影效应对成像质量的影响,此时 Δw 的表达式为

$$\Delta w = \frac{2D^2 \alpha_i^2 \alpha}{\lambda} - \frac{2\pi^2 D^4 \alpha_i^4 \alpha^3}{9\lambda^3}. \quad (22)$$

图形位置偏移对应掩模衍射谱相位的变化。由傅里叶变换相移定理可知,空域的平移对应于频域的相位线性变化。为此,可将斜入射与正入射时的掩模衍射谱相比较,通过分析衍射谱相位的线性变化来实现对图形位置偏移量的分析。Cao等基于SDM模型推导出图形位置偏移量的表达式为

$$\Delta x = \frac{(d_a + d_m) \alpha_i}{R_o}. \quad (23)$$

可以看到图形位置的偏移与吸收层和多层膜

均有关系。相应地,掩模物面离焦量应为 $\Delta z = d_a + d_m$ 。

Cao等提出的方法可以快速准确地计算图形尺寸校正量,然而当掩模图形尺寸减小时,该方法的计算误差增大。针对这一问题,本课题组的张子南等^[15]提出了一种基于机器学习的方法来预测图形的最佳尺寸校正量,进一步提高了阴影效应的补偿效果。此外为了对任意二维掩模图形进行阴影效应补偿,Song等^[94]提出了一种基于图形边界的阴影效应建模方法,通过模型标定可以准确预测斜入射造成的阴影宽度,并且可以和OPC结合,提高EUV光刻三维掩模的成像质量。

除了校正掩模图形尺寸和设置掩模物面离焦,还可以通过优化掩模结构或吸收层材料来降低阴影效应的影响^[95]。减小吸收层的厚度或改变吸收层侧壁倾角可以改善图形尺寸偏差现象,然而吸收层厚度过小会造成光刻成像对比度下降,需要谨慎选择。吸收层的材料也会影响阴影效应,复折射率 n 值较大的材料所产生的阴影效应更加显著^[93]。

3.2 离焦效应

对于EUV光刻三维掩模,成像时的最佳焦面存在偏移,且偏移量随掩模图形的周期变化而变化^[96]。离焦量的这种性质使得扫描工件台不能同时对不同周期的掩模图形进行焦面调整和补偿,从而影响整个光刻工艺窗口的大小。

离焦效应最早由Krautschik等^[96]提出,他比较了EUV光刻三维掩模和二元掩模在不同周期情况下的泊松曲线,最佳焦面的位置由泊松曲线的极值点决定。对于二元掩模,泊松曲线是对称的,不存在最佳焦面位置偏移现象。但对于EUV光刻三维掩模,复杂的掩模衍射场分布导致了最佳焦面位置偏移和泊松曲线不对称。在此基础上,Yan^[63]对掩模边界衍射场进行了研究,他指出,由入射光与掩模边界衍射光相互作用产生的边界衍射场误差是引起离焦效应的主要原因。

本课题组的Cao等^[26]基于SDM三维掩模模型和Hopkins成像模型,对EUV光刻的离焦效应进行了理论分析。从掩模衍射谱的解析表达式出发,推导了三光束成像时线空图形的最佳焦面位置的计算公式。此外,Cao等^[26]分析讨论了吸收层厚度、材料与离焦效应的关系,为确定掩模吸收层厚度和材料从而减小离焦效应和增大工艺窗口提供了依据。Erdmann等^[97]同样对EUV光刻三维掩模效应进行

了研究,并对 EUV 掩模吸收层的结构和材料优化进行了探索,以降低三维掩模效应,提高 EUV 光刻成像质量。

3.3 光源掩模优化

当光刻机硬件和掩模制造工艺固定的情况下,以计算光刻技术为代表的分辨率增强技术是提高 EUV 光刻成像质量和光刻分辨率的必不可少的关键技术。光源掩模优化(SMO)技术是一种被广泛应用于 22 nm 及以下节点的分辨率增强技术,相比于 OPC 或 ILT,SMO 技术通过同时优化光源形状和掩模图形,极大地提高了优化自由度,可以有效提高成像质量,增大工艺窗口^[98]。对于 EUV 光刻而言,其三维掩模效应是 SMO 技术需要额外考虑的因素。

Fühner 等^[99]提出了一种基于严格仿真的 SMO 技术,通过遗传算法和多目标优化算法,优化参数化的光源和掩模。但该方法只考虑了环形照明光源和线空掩模图形,实际应用受到限制。Liu 等^[100]提出了针对 7 nm 及以下技术节点的 EUV 光刻 SMO 技术,其基本流程如图 15 所示。他们结合 ASML 公司 EUV 光刻机中的 Flex-eye 自由照明技术,提出了 EUV 光刻 SMO 技术的一般性流程,并通过光源非对称优化等方法降低了 flare 和掩模 3D 效应对成像质量的影响。Ma 等^[101]提出了基于梯度算法的 EUV 光刻 SMO 技术,在传统梯度 SMO 技术的基础上,引入额外的阴影效应修正流程来解决 EUV 光刻三维掩模效应对成像的影响。

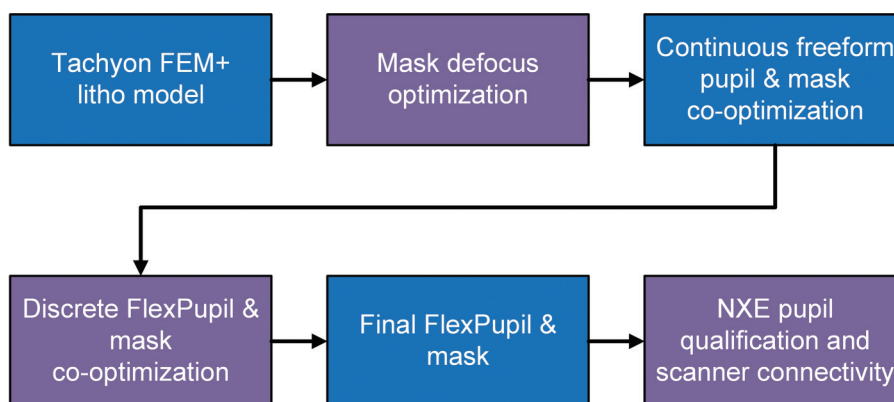


图 15 ASML 公司提出的 EUV 光刻 SMO 流程^[100]

Fig. 15 SMO flow for EUV lithography proposed by ASML^[100]

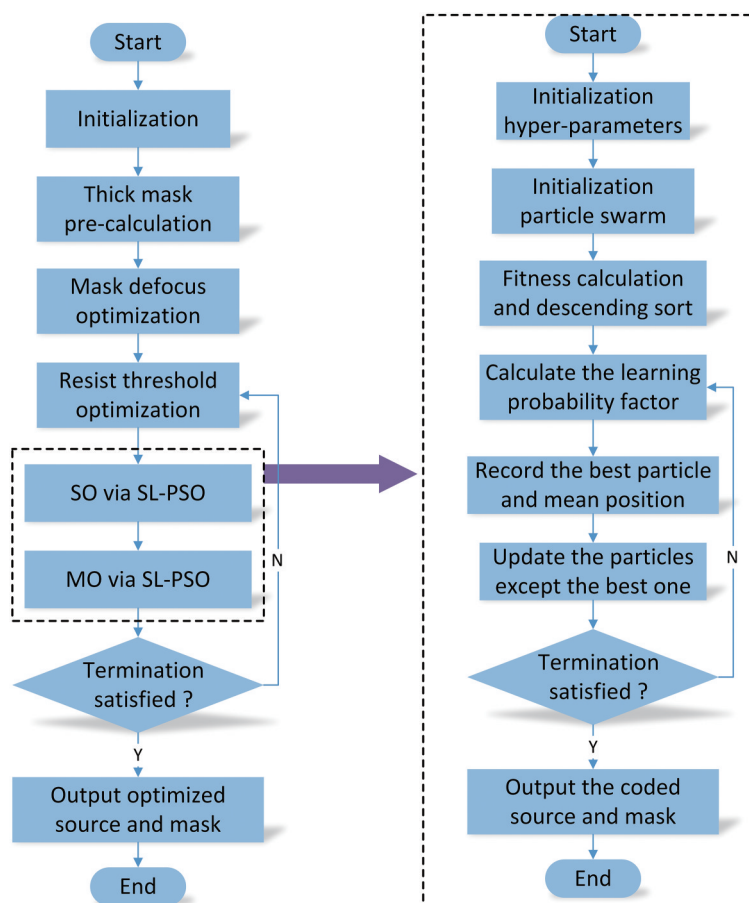
本课题组的 Zhang 等基于像素化 SDM 三维掩模模型,提出了一种基于社会学习粒子群优化(SL-PSO)算法的 EUV 光刻 SMO 方法^[18]。该方法采用 2.2.5 节所述的像素化 SDM 三维掩模模型进行成像仿真,计算精度高于薄掩模模型,同时可以内禀地体现出三维掩模效应对成像质量的影响并进行修正,不需要在优化后引入额外的步骤。同时厚掩模吸收层参数和多层膜反射系数等只需在优化前标定和计算一次,提高了优化过程中成像仿真的速度。该方法根据对称性进行光源和掩模像素矩阵的编码,并采用 SL-PSO 算法进行优化,方法的整体流程如图 16 所示。相较于传统的粒子群优化(PSO)算法,SL-PSO 算法引入了社会学习的机制,优化效率更高。此外,该方法通过引入粒子群初始化参数,进一步提高了优化效率,并且提升了优化后掩模图形的可制造性。

Zhang 等通过仿真从多个角度验证了该 SMO 方法的有效性和优越性。与薄掩模模型相比,该方

法优化后的掩模图形经严格仿真验证具有更高的成像质量。在扫描狭缝不同位置处,该方法均可以有效提高光刻成像质量,降低阴影效应的影响。通过与其他典型的启发式智能优化算法对比,验证了 SL-PSO 算法的优越性。

基于 SL-PSO 算法的 EUV 光刻 SMO 方法不需要计算梯度,适用于复杂掩模模型和光刻胶模型,在对表达式复杂甚至无法求解梯度的目标函数进行优化时具有很大优势。然而启发式智能优化算法的优化效率与问题的规模,与待优化变量的维度有关。当光源采样点和掩模像素数量增大时,编码后的变量维度急剧增大,需要增大种群规模以及迭代次数才能有较好的优化效果。但这会使成像仿真的次数和时间大大增加,导致优化速度极其缓慢。

为了解决这一问题,本课题组的 Zhang 等^[19]提出了一种基于双重边界演化和部分采样编码的 EUV 光刻快速 SMO 方法。该方法适用于任意的智

图 16 基于 SL-PSO 算法的 EUV 光刻 SMO 流程^[18]Fig. 16 SMO flow for EUV lithography based on SL-PSO algorithm^[18]

能优化算法,并采用 SDM 三维掩模模型提高成像仿真的精度,总体的优化流程如图 17 所示。

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。对于辅助图形,采取与光源优化类似的方法,通过部分采样优化辅助图形的像素位置。部分采样编码策略的原理如图 18 所示。

对于主体图形的优化,该方法提出了一种如图 19 所示的双重边界演化策略,将优化变量从图形的所有像素减少为边界像素,极大地减小了变量维度。

图 19(a)是初始掩模图形,目标图形轮廓以及曝光后的光刻胶图形的轮廓。掩模图形像素表示为 1,背景像素表示为 0。可以看到由于光学临近效应,光刻胶图形与目标图形之间有较大差异。与目标图形轮廓相比,光刻胶图形轮廓的上端和下端产

生了内缩,左端和右端产生了外扩,主体图形的优化主要就是解决这两类差异,使光刻胶轮廓与目标图形轮廓尽可能一致。双重边界演化的第一个过程为图形边界优化,如图 19(b)检测出当前掩模图形的边界像素,编码成向量进行优化。可以看到,优化过程中,掩模图形上下两端的边界像素应保持 1 不变,因为他们变成了背景像素,则光刻胶轮廓会进一步内缩;掩模图形左右两端的边界像素应从 1 变为 0,这样能解决光刻胶轮廓的外扩。如图 19(c)所示,经过边界像素的优化,光刻胶轮廓与目标图形轮廓的左右两端重合。双重边界演化的第二个过程为图形外层边界优化。如图 19(d)所示,采取 8 邻域定义像素的连通性,检测包围当前掩模图形边界的虚拟外层边界像素,并编码成向量进行优化,需要注意的是,初始状态下的虚拟外层边界像素均为 0。可以看到,优化过程中,虚拟外层边界左右两端的像素应保持 0 不变,因为他们变成了图形像素,则光刻胶轮廓会产生外扩并偏离目标图形轮廓;虚拟外层边界上下两端的像素应从 0 变为 1,这

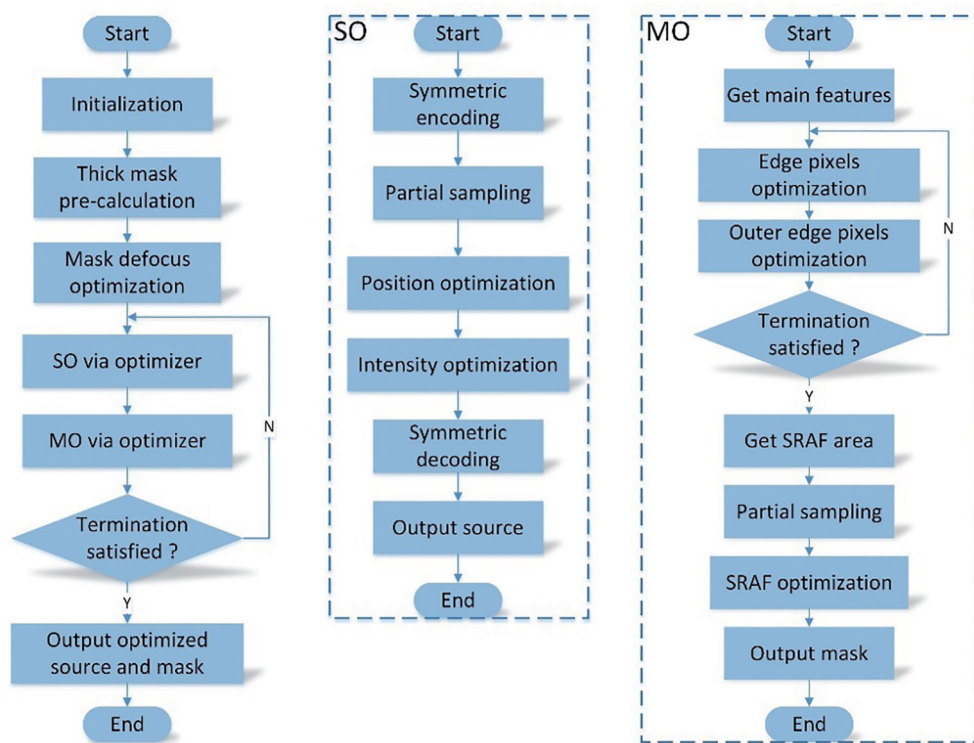


图 17 基于双重边界演化和部分采样的 EUV 光刻 SMO 流程^[19]

Fig. 17 SMO flow for EUV lithography based on dual edge evolution and partial sampling method^[19]

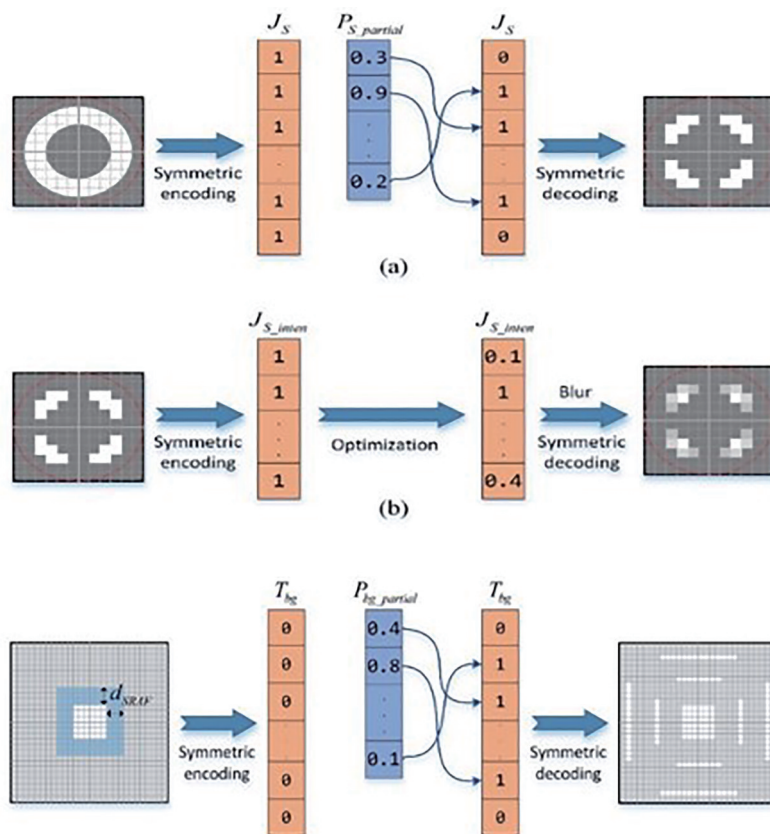
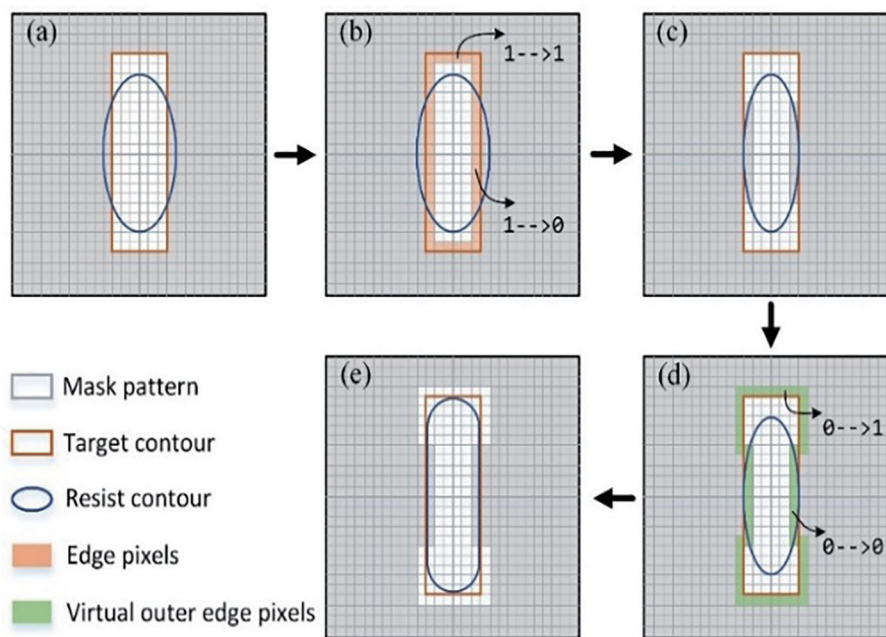


图 18 部分采样方法原理图^[19]

Fig. 18 Principle of the partial sampling method^[19]

图 19 双重边界演化方法原理图^[19]Fig. 19 Principle of the dual edge evolution method^[19]

样能解决光刻胶轮廓的内缩。如图 19(e)所示,经过虚拟外层边界的优化,光刻胶轮廓与目标图形轮廓的上下两端也实现了重合。通过双重边界演化得到的掩模图形,曝光后的光刻胶轮廓与目标图形轮廓的差异大大减小。

该方法通过采用特殊的编码和优化策略,显著提高了 SMO 方法的优化效率和优化速度。Zhang 等还通过仿真验证了该方法可以改善离焦位置处的光刻成像质量,有效增大了焦深。

4 结束语

高成像质量是确保 EUV 光刻机性能指标的前提。三维掩模成像是 EUV 光学系统成像的重要组成部分,作为研究 EUV 光刻三维掩模成像的重要工具,三维掩模成像模型一直是业界研究的热点。基于严格模型可以分析三维掩模结构对 EUV 光刻成像的影响,利用近似模型可以研究提高 EUV 光刻成像质量的计算光刻技术。本文结合本团队在 EUV 光刻三维掩模成像领域的研究工作,介绍了 EUV 光刻成像的基本原理和仿真模型,总结了典型的三维掩模成像模型,并介绍了提升三维掩模成像质量相关技术的研究进展。

EUV 光学系统是一个部分相干成像系统,可以通过 Abbe 成像模型或 Hopkins 成像模型进行仿真建模。EUV 掩模是 EUV 光学成像系统的重要组成

部分,其三维反射式结构会带来显著的三维掩模效应,降低成像质量。为了准确仿真 EUV 光刻三维掩模成像,人们建立了多种三维掩模成像模型,主要包括严格模型和近似模型。常见的近似模型包括边界修正模型、图形分解模型、机器学习和深度学习模型,以及结构分解模型这几类。本团队对结构分解模型进行了一系列研究,建立了具有解析形式的结构分解模型,为三维掩模效应的理论分析提供了工具。针对吸收层仿真精度低、含缺陷多层膜仿真速度慢等问题,采用频域调制、等效多层膜等方法,有效提高了模型的仿真精度和速度。本团队还对像素化表征的掩模图形、侧壁倾斜的掩模结构进行了研究,拓宽了结构分解模型的应用范围。

利用三维掩模成像模型可以分析三维掩模效应对 EUV 光刻成像的影响。作为最主要的三维掩模效应,阴影效应和离焦效应会显著降低成像质量。在系统研究这两种效应的形成原理、表现形式和影响因素的基础上,人们提出了掩模图形尺寸修正、掩模结构优化等多种方法降低两种效应对成像的影响。本团队提出的两种阴影效应补偿方法,分别基于解析模型和机器学习对图形尺寸修正量进行计算,均有效补偿了阴影效应,提高了成像质量。以 SMO 技术为代表的计算光刻技术是提高 EUV 光刻成像质量的一个重要手段。在三维掩模成像近似模型的基础上,人们提出了一系列 EUV SMO

方法,通过同时优化光源和掩模提高成像质量。本团队对 EUV SMO 的成像模型、优化算法、光源掩模表征方式和优化策略进行了系统研究。采用像素化三维掩模成像近似模型提高了成像仿真的精度,并引入高效的智能优化算法提高了优化效率。提出了一种新的光源掩模表征和编码方式,结合边界演化等策略,有效降低了优化维度,提高了 SMO 对大规模优化问题的优化效率。

随着 EUV 光刻技术的发展,三维掩模成像的研究将会持续进行和拓展。新一代 EUV 光刻机采用更高的数值孔径和新的投影物镜结构,投影物镜光瞳中心存在遮挡且在不同方向上具有不同的缩放倍率。此时需要采用改进的投影物镜模型,建立更精确的三维掩模成像模型,进一步分析该条件下三维掩模的成像特点。为了改善三维掩模效应, EUV 光刻三维掩模结构和材料,尤其是 EUV 掩模吸收层的材料和厚度需要将得到进一步优化。 EUV SMO 等计算光刻技术将不断发展,更先进的计算硬件、计算方式以及深度学习等新技术将在计算光刻技术中得到广泛应用,从而更有效、更高效地提高 EUV 光刻成像质量,并应用于全芯片范围。

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 tool (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 tool (volume II)[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [4] 茅言杰. 投影光刻机匹配关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2019.
Mao Y J. Study on key techniques of scanner matching[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [5] 诸波尔. 浸没式光刻机投影物镜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, 2018.
Zhu B E. Study on wavefront aberration measurement for immersion lithographic projection lens[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [6] 孟泽江. 浸没式光刻机投影物镜偏振像差检测技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2019.
Meng Z J. Study on polarization aberration measurement for immersion lithographic projection lens[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [7] 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. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [8] Bakshi V. EUV lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2018.
- [9] Hawryluk A M, Seppala L G. Soft X-ray projection lithography using an X-ray reduction camera[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1988, 6(6): 2162-2166.
- [10] 严涛南. 挽救摩尔定律: ASML 极紫外光(EUV)微影技术量产的开发历程[EB/OL]. (2021-2-15)[2021-12-31]. <https://technews.tw/2021/02/15/euv-mass-production-of-lithography-technology/>.
Yan T N. Saving Moore's law: the development process of mass production of ASML extreme ultraviolet (EUV) lithography technology[EB/OL]. (2021-2-15)[2021-12-31]. <https://technews.tw/2021/02/15/euv-mass-production-of-lithography-technology/>.
- [11] van Schoot J, Lok S, van Setten E, et al. High-NA EUV lithography exposure tool: advantages and program progress[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11517: 1151712.
- [12] 张恒. 三维极紫外光刻掩模建模及缺陷补偿技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2019.
Zhang H. Study on three-dimensional mask modeling and defect compensation method in extreme ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [13] 曹宇婷. 极紫外投影光刻掩模衍射简化模型及其应用[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所,

- 2012.
- Cao Y T. Simplified mask diffraction model and its application in extreme-ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [14] 刘晓雷. 极紫外光刻掩模建模与缺陷补偿方法研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2015.
- Liu X L. Study on mask modeling and defect compensation method in extreme ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [15] 张子南, 李思坤, 王向朝, 等. 极紫外光刻掩模阴影效应补偿方法: CN111045289B[P]. 2021-07-06.
- Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Compensation method for shadow effect of extreme ultraviolet lithography mask: CN111045289B[P]. 2021-07-06.
- [16] Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Fast rigorous mask model for extreme ultraviolet lithography[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(24): 7376-7389.
- [17] Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Fast mask model for extreme ultraviolet lithography with a slanted absorber sidewall[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(20): 5776-5782.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Cao Y T, Wang X Z, Erdmann A, et al. Analytical model for EUV mask diffraction field calculation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8171: 81710N.
- [21] 曹宇婷, 王向朝, 步扬. 极紫外投影光刻接触孔掩模的快速仿真计算 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0705001.
- Cao Y T, Wang X Z, Bu Y. Fast simulation method for contact hole mask in extreme-ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0705001.
- [22] 刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 基于等效膜层法的极紫外光刻含缺陷掩模多层膜仿真模型 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0622005.
- Liu X L, Li S K, Wang X Z. Simulation model based on equivalent layer method for defective mask multilayer in extremeultra violet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0622005.
- [23] 张恒, 李思坤, 王向朝. 基于改进型结构分解的极紫外光刻掩模衍射谱快速仿真方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0105001.
- Zhang H, Li S K, Wang X Z. A rapid simulation method for diffraction spectra of EUV lithography mask based on improved structural decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0105001.
- [24] 张恒, 李思坤, 王向朝, 等. 基于机器学习校正的极紫外光刻含缺陷掩模仿真方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1222002.
- Zhang H, Li S K, Wang X Z, et al. 3D rigorous simulation of defective masks used for EUV lithography via machine learning-based calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1222002.
- [25] 曹宇婷, 王向朝, 步扬, 等. 极紫外投影光刻掩模阴影效应分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0805001.
- Cao Y T, Wang X Z, Bu Y, et al. Analysis of mask shadowing effects in extreme-ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0805001.
- [26] Cao Y T, Wang X Z, Tu Y Y, et al. Impact of mask absorber thickness on the focus shift effect in extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2012, 30(3): 031602.
- [27] ASML[EB/OL]. [2021-12-31]. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>.
- [28] Erdmann A. Optical and EUV lithography: a modeling perspective[M]. Bellingham: SPIE Press, 2021.
- [29] Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [30] Levinson H. Principles of lithography[M]. 3rd ed. Bellingham: SPIE, 2010.
- [31] Yu S S, Yen A. Optical physics for nanolithography [M]. Bellingham: SPIE, 2018.
- [32] Wong A K. Optical imaging in projection microlithography[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [33] Wu X F, Liu S Y, Liu W, et al. Comparison of three TCC calculation algorithms for partially coherent imaging simulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7544: 75440Z.
- [34] Cobb N. Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1998.

- [35] Yamazoe K. Computation theory of partially coherent imaging by stacked pupil shift matrix[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2008, 25(12): 3111-3119.
- [36] Gong P, Liu S Y, Lv W, et al. Fast aerial image simulations for partially coherent systems by transmission cross coefficient decomposition with analytical kernels[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2012, 30(6): 06FG03.
- [37] Rosenbluth A E. Decomposition of the TCC using non-coherent kernels for faster calculation of lithographic images[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10147: 101470P.
- [38] Adam K, Granik Y, Torres A, et al. Improved modeling performance with an adapted vectorial formulation of the Hopkins imaging equation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 78-91.
- [39] Hafeman S, Neureuther A R. Simulation of imaging and stray light effects in immersion lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 700-712.
- [40] Pistor T. *Electromagnetic simulation and modeling with applications in lithography*[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2001.
- [41] Schermer J, Evanschitzky P, Erdmann A. Rigorous mask modeling beyond the Hopkins approach[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6281: 62810A.
- [42] Liu P, Cao Y, Chen L Q, et al. Fast and accurate 3D mask model for full-chip OPC and verification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 65200R.
- [43] Adam K, Lam M C. Hybrid Hopkins-Abbe method for modeling oblique angle mask effects in OPC[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6924: 69241E.
- [44] Zhang H B, Yan Q L, Zhang L, et al. Efficient full-chip mask 3D model for off-axis illumination[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8880: 888023.
- [45] Liu P, Xie X B, Liu W, et al. Fast 3D thick mask model for full-chip EUVL simulations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86790W.
- [46] Rahimi Z, Erdmann A, Evanschitzky P, et al. Rigorous EMF simulation of absorber shape variations and their impact on lithographic processes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7545: 75450C.
- [47] Deng Y F, Pistor T V, Neureuther A R. Models for characterizing the printability of buried EUV defects [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4343: 551-558.
- [48] Gordon R L, Mack C A. Mask topography simulation for EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3676: 283-297.
- [49] Deng Y F, la Fontaine B M, Levinson H J, et al. Rigorous EM simulation of the influence of the structure of mask patterns on EUVL imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5037: 302-313.
- [50] Zhu Z R, Lucas K, Cobb J L, et al. Rigorous EUV mask simulator using 2D and 3D waveguide methods [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5037: 494-503.
- [51] Schiavone P, Granet G, Robic J Y. Rigorous electromagnetic simulation of EUV masks: influence of the absorber properties[J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57/58: 497-503.
- [52] Yeung M S. A next-generation EMF simulator for EUV lithography based on the pseudo-spectral time-domain method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8322: 83220D.
- [53] Pomplun J, Burger S, Schmidt F, et al. Rigorous FEM simulation of EUV masks: influence of shape and material parameters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6349: 63493D.
- [54] Taflove A, Oskooi A, Johnson S, et al. *Advances in FDTD computational electrodynamics*[M]. London: Artech House, 2013.
- [55] Vial A, Erdmann A, Schmoeller T, et al. Modification of boundaries conditions in the FDTD algorithm for EUV mask modeling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4754: 890-899.
- [56] Moharam M G, Gaylord T K, Pommet D A, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [57] 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.
- [58] Evanschitzky P, Shao F, Erdmann A, et al. Simulation of larger mask areas using the waveguide method with fast decomposition technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6730: 67301P.
- [59] Shao F, Evanschitzky P, Reibold D, et al. Fast rigorous simulation of mask diffraction using the waveguide method with parallelized decomposition technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6792: 679206.
- [60] Yeung M, Barouch E. A very fast and accurate

- rigorous EMF simulator for EUVL masks based on the pseudo-spectral time-domain method[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8701: 870113.
- [61] 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.
- [62] 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, 2009, 26(7): 1687-1695.
- [63] Yan P Y. Understanding Bossung curve asymmetry and focus shift effect in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4562: 279-287.
- [64] Lam M C, Neureuther A R. Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6349: 63492H.
- [65] Li Y, Peng D P, Satake M, et al. A fast approach to model EUV mask 3D and shadowing effects[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8352: 835207.
- [66] Liu P, Zhang Z F, Lan S, et al. A full-chip 3D computational lithography framework[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83260A.
- [67] Zhang H B, Yan Q L, Croffie E, et al. An accurate ILT-enabling full-chip mask 3D model for all-angle patterns[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8880: 88800G.
- [68] Zhang H B, Yan Q L, Wei D, et al. A pattern- and optics-independent compact model of Mask3D under off-axis illumination with significant efficiency and accuracy improvements[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9426: 94260Q.
- [69] Hooker K, Kuechler B, Kazarian A, et al. ILT optimization of EUV masks for sub-7 nm lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10446: 1044604.
- [70] Lan S, Liu J, Wang Y M, et al. Deep learning assisted fast mask optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10587: 105870H.
- [71] Adam K, Neureuther A R. Algorithmic implementations of domain decomposition methods for the diffraction simulation of advanced photomasks[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4691: 107-124.
- [72] Adam K, Neureuther A R. Methodology for accurate and rapid simulation of large arbitrary 2D layouts of advanced photomasks[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4562: 1051-1067.
- [73] Mailfert J, Zuniga C, Philipsen V, et al. 3D mask modeling for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8322: 832224.
- [74] Adam K. Modeling of electromagnetic effects from mask topography at full-chip scale[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 498-505.
- [75] Lam M C, Adam K, Fryer D, et al. Accurate 3DEMF mask model for full-chip simulation[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831D.
- [76] Lam M, Clifford C H, Oliver M, et al. Accurate, full chip 3D electromagnetic field model for non-Manhattan mask corners[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9426: 94260P.
- [77] Erdmann A, Kalus C K, Schmoeller T, et al. Efficient simulation of light diffraction from three-dimensional EUV masks using field decomposition techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 482-493.
- [78] Evanschitzky P, Erdmann A. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6533: 65330Y.
- [79] Ma X, Zhao X J, Wang Z Q, et al. Fast lithography aerial image calculation method based on machine learning[J]. Applied Optics, 2017, 56(23): 6485-6495.
- [80] Zepka A, Aliyeva S, Kulkarni P, et al. Mask modeling using a deep learning approach[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11148: 111480A.
- [81] Lin J X, Dong L S, Fan T A, et al. Fast extreme ultraviolet lithography mask near-field calculation method based on machine learning[J]. Applied Optics, 2020, 59(9): 2829-2838.
- [82] Tanabe H, Sato S, Takahashi A. Fast 3D lithography simulation by convolutional neural network [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11614: 116140M.
- [83] Awad A, Brendel P, Evanschitzky P, et al. Accurate prediction of EUV lithographic images and 3D mask effects using generative networks[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2021, 20(4): 043201.
- [84] Clifford C H, Neureuther A R. Fast three-dimensional simulation of buried EUV mask defect interaction with absorber features[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6730: 67301S.
- [85] Clifford C H, Neureuther A R. Smoothing based fast model for images of isolated buried EUV multilayer defects[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6921: 692119.
- [86] Ko K H, Moon Y, Jeong C, et al. Influence of a non-ideal sidewall angle of extreme ultra-violet mask

- absorber for $1\times$ -nm patterning in isomorphic and anamorphic lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2017, 181: 1-9.
- [87] Rastegar A, House M, Kadaksham A J. Cleaning challenges of EUV mask substrates, blanks, and patterned mask[J]. *ECS Transactions*, 2011, 41(5): 139-146.
- [88] Lee S, Lee J, Ban S, et al. A technique for the non-destructive EUV mask sidewall angle measurement using scanning electron microscope[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, 13(12): 8032-8035.
- [89] Jang I Y, Huh S M, Moon S Y, et al. Control of the sidewall angle of an absorber stack using the Faraday cage system for the change of pattern printability in EUVL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7122: 712228.
- [90] Ma X, Arce G R. *Computational lithography*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [91] Ng P C W, Tsai K Y, Lee Y M, et al. Fully model-based methodology for simultaneous correction of extreme ultraviolet mask shadowing and proximity effects[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(1): 013004.
- [92] Sugawara M, Nishiyama I, Takai M. Mask pattern correction by energy loss compensation in extreme ultraviolet lithography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(7B): 5467-5473.
- [93] Yan P Y. Impact of EUVL mask buffer and absorber material properties on mask quality and performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4688: 150-160.
- [94] Song H, Zavyalova L, Su I, et al. Shadowing effect modeling and compensation for EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7969: 79691O.
- [95] Besacier M, Schiavone P. Shadowing effect minimization in EUV mask by modeling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5446: 849-859.
- [96] Krautschik C G, Ito M, Nishiyama I, et al. Impact of the EUV mask phase response on the asymmetry of Bossung curves as predicted by rigorous EUV mask simulations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4343: 392-401.
- [97] Erdmann A, Evanschitzky P, Mesilhy H, et al. Attenuated PSM for EUV: can they mitigate 3D mask effects? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 1058312.
- [98] Rosenbluth A E, Melville D O, Tian K H, et al. Intensive optimization of masks and sources for 22 nm lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7274: 727409.
- [99] Fühner T, Erdmann A, Evanschitzky P. Simulation-based EUV source and mask optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7122: 71221Y.
- [100] 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.
- [101] 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.