

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

张恒^{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, 北京 100049

摘要 对极紫外光刻掩模的吸收层和多层膜分别建模, 将二者组合以实现具有复杂图形分布的掩模衍射谱的快速精确仿真。对存在图形偏移的吸收层, 采用扩展的边界脉冲修正法进行仿真。对无缺陷及含缺陷的多层膜, 分别采用等效膜层法和基于单平面近似的方法进行仿真。采用等效膜层法修正单平面近似法中的平面镜反射系数, 提高了大角度(大于 10°)入射下的含缺陷多层膜的仿真精度。采用张量积、矢量化并发计算提高了仿真速度。对无缺陷掩模的图形关键尺寸仿真表明, 改进方法与严格仿真的误差在 0.4 nm 以内, 仿真精度与速度均优于所对比的域分解方法。对含缺陷掩模, 改进方法可准确仿真图形关键尺寸随吸收层偏移的变化, 与严格仿真相比, 对周期为 240 nm 的掩模, 在 0.6 nm 仿真误差下, 仿真速度提升了 150 倍。

关键词 衍射; 极紫外光刻; 掩模衍射谱仿真; 结构分解法; 掩模优化; 缺陷补偿

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0105001

A Rapid Simulation Method for Diffraction Spectra of EUV Lithography Mask Based on Improved Structural Decomposition

Zhang Heng^{1,2}, Li Sikun^{1,2}, Wang Xiangzhao^{1,2}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Fast and accurate diffraction simulation for extreme-ultraviolet lithography mask with complex patterns is achieved via combination of the expanded absorber model and optimized multilayer film model. The modified thin-mask absorber model is expanded to enable simulation of absorber shifting. Equivalent-layer model and single-surface approximation model are adapted for defective and defect-free multilayer film simulation respectively. For incident angle larger than 10° , the simulation accuracy of the defective multilayer film is improved when the ideal reflection of single surface is modified with the equivalent-layer model. Simulation speed is enhanced by concurrent computing tensor product and vectorization concurrency. For defect-free mask with different simulation parameters, the modified method achieves better simulation accuracy and speed (critical dimension errors within 0.4 nm compared with the rigorous method) than the domain decomposition method. For defective mask, the critical dimension change versus absorber shifting is accurately simulated by the modified method, and the simulation errors are within 0.6 nm (compared with rigorous method) for a mask of 240 nm pitch while the modified method is 150 times faster than the rigorous method.

Key words diffraction; extreme-ultraviolet lithography; mask diffraction simulation; structure decomposition; mask optimization; defect compensation

OCIS codes 050.1755; 340.7480; 220.3740; 050.1940

收稿日期: 2017-06-28; 收到修改稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61474129)、上海市自然科学基金资助项目(17ZR1434100)

作者简介: 张恒(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事极紫外光刻掩模衍射谱仿真及掩模缺陷补偿技术方面的研究。

E-mail: zhangheng@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术和高端光刻机技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)目前已被用于下一代先进半导体的制造研发中^[1],随着光源功率、系统可用率等的提高,极紫外光刻机有望用于 7 nm 等节点的芯片量产^[2]。EUVL 掩模中的缺陷会降低成像质量,是影响 EUVL 产率的重要问题之一。由于目前尚无法实现无缺陷掩模的大批量制备,因此通常采取缺陷修复、补偿等方式降低或消除掩模缺陷对成像的影响^[3]。对位于掩模内部难以通过物理手段修复的缺陷,可采取掩模吸收层图形修正、掩模吸收层图形偏移等方式进行补偿^[3-4]。此外,随着光刻节点的缩小,即使是无缺陷影响的掩模,图形邻近效应导致的成像偏差(掩模设计图形与实际成像图形存在偏差)亦不容忽视,对此可采取光学邻近效应校正(OPC)或光源掩模优化(SMO)等技术进行优化补偿^[5-6]。缺陷补偿与掩模优化,皆需通过大量掩模成像仿真以得到优化补偿参数,验证优化补偿结果。因此,研究精确快速的掩模仿真模型,对分析掩模成像问题、优化光刻工艺参数具有重要意义^[7]。

EUVL 掩模衍射谱仿真(以下简称为掩模仿真)是掩模成像仿真的重要组成部分,可分为严格电磁场仿真方法和快速仿真方法两大类。严格电磁场仿真方法通过求解麦克斯韦方程获得掩模衍射光的电磁场分布,仿真精度较高,但需耗费大量仿真内存和时间,难以满足大面积三维掩模衍射谱快速仿真的需求^[8]。快速仿真方法采用一定的近似模型或分解策略,以提高掩模仿真速度。如基于对掩模几何图形的分解,域分解法将三维掩模仿真分解为多个二维掩模严格仿真结果的叠加,仿真精度较高,且大幅提升了仿真速度^[9-10]。但这类方法均基于严格仿真,不能得到吸收层或掩模衍射谱的解析表达式,且由于其分解特性,难以实现含缺陷掩模的高精度仿真。掩模结构分解法对组成掩模的吸收层和多层膜分别建模,是常见的可快速准确地实现无缺陷掩模仿真与含缺陷掩模仿真的方法^[8]。基于边界衍射理论的边界脉冲修正^[11]和边界图形修正^[12]等薄掩模近似模型,可快速准确地仿真吸收层衍射谱。本课题组提出一种频域边界脉冲修正薄掩模近似法(以下简称为边界脉冲修正法),通过严格仿真得到边界脉冲修正参数,具有较好的仿真精度和速度,同时可得到掩模衍射谱的解析表达式^[8]。然而,该方法目前仅适用于掩模图形(线、空、方孔等)位于仿真区域

中心的掩模,这限制了其在复杂掩模图形仿真中的应用,尤其是通过吸收层图形偏移补偿缺陷的应用。对多层膜仿真,采用全部膜层逐层逐点计算的光线追迹法^[13]以及基于菲涅耳公式递推计算的方法^[14-15],仿真精度较高,但仿真速度较慢。以单一平面拟合多层膜反射特性的(无缺陷)理想平面镜近似方法^[8]、(含缺陷)单平面近似(SSA)方法及其改进模型^[16-18]仿真速度较快,然而 SSA 改进模型仅考虑了缺陷对多层膜衍射谱相位的影响,忽略了对衍射谱振幅的影响。本课题组针对这一问题,通过严格仿真拟合得到了基底缺陷高度对多层膜衍射谱振幅的影响,从而提高了模型精度。当入射角 θ_{in} 较大($\theta_{in} > 10^\circ$)时,该方法中的理想平面镜近似失效,仿真精度将大幅降低^[19-20]。而对掩模图形尺寸较小的节点(如 7 nm 以下),EUVL 需进一步采用具有大数值孔径的投影物镜系统或离轴照明以提高分辨率^[21],这对大入射角时模型的仿真精度提出了较高的要求。此外,上述吸收层边界脉冲修正法、多层膜等效膜层法及基于单平面近似的简化方法对衍射谱各级次顺序逐级计算,效率较低,不利于衍射级次较多的三维大面积掩模,尤其是含缺陷掩模的快速优化补偿。

针对上述问题,本文基于掩模结构分解法,对吸收层边界脉冲修正法进行扩展,以得到不同掩模吸收层图形偏移时任意图形尺寸下掩模吸收层的衍射谱及其解析表达式。对无缺陷多层膜仿真,采用基于菲涅耳公式递推的等效膜层法;对含缺陷多层膜的单平面近似仿真,通过等效膜层法计算入射角大于 10° 时的理想平面镜反射系数,以提高模型仿真精度。对吸收层仿真采用张量积计算,并将多层膜对各衍射级次的逐一计算优化为矢量化并发计算,以提高仿真速度。本文结合改进型吸收层和多层膜模型,在无缺陷情况及含缺陷情况下,快速精确地实现不同吸收层图形分布 EUVL 的掩模仿真。

2 理论模型

2.1 掩模结构分解法

典型的 EUVL 三维掩模主要由吸收层、多层膜和基底三部分构成,其结构如图 1 所示。吸收层材料通常为 TaN,对极紫外光具有较强的吸收。在吸收层上刻蚀开孔,由此构成掩模图形。多层膜通常由 40 层 Mo/Si 双层膜构成,对极紫外光具有较高反射率,当多层膜存在缺陷时,反射率降低。基底为

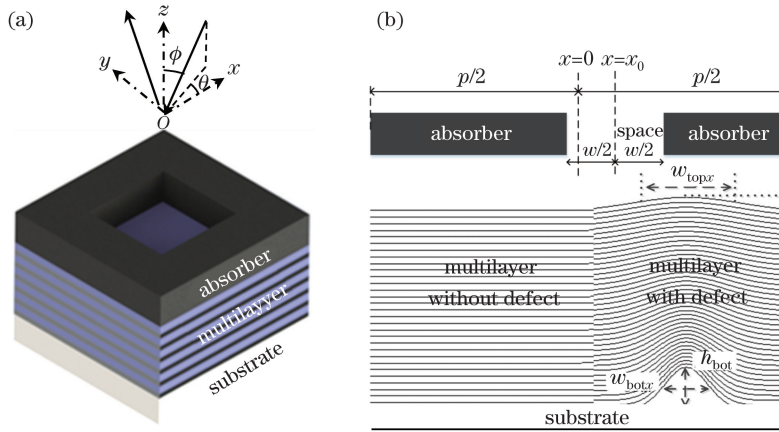


图 1 EUVL 三维掩模示意图。(a)三维视图;(b)侧截面图

Fig. 1 Schematic of EUVL 3D mask. (a) 3D view; (b) side section view

SiO₂ 融石英玻璃。极紫外入射光波长为 13.5 nm, 其与 z 轴的夹角为入射角, 入射光在 xOy 平面上的投影与 x 轴的夹角为方位角。

如图 2 所示, 极紫外光入射到掩模, 经吸收层衍射后的各级衍射光进入多层膜, 经多层膜反射的各级次光再次进入吸收层, 发生衍射后被光刻投影物镜系统接收并成像。据此可根据光在不同介质中的传播特性, 对掩模吸收层、多层膜分别建模并予以结合, 以实现整体掩模衍射谱的仿真。

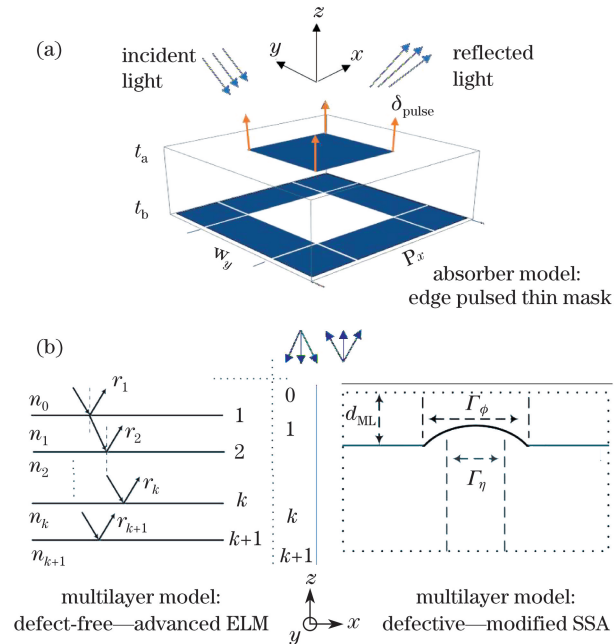


图 2 掩模仿真模型示意图。(a)吸收层模型;(b)多层膜模型

Fig. 2 Schematic of mask simulation model.

(a) Absorber model; (b) multilayer film model

2.2 掩模吸收层模型-扩展型边界脉冲修正法

根据边界衍射理论, 光经过衍射孔或障碍物时, 可由入射波和边界衍射波来表达衍射效应。

据此, 课题组早期提出的边界脉冲修正模型的解析表达式仅限于占空比为 0.5、掩模吸收层图形中心与仿真区域中心重合的掩模^[8]。如图 1(b)所示, 占空比 $d = w/p$, 吸收层图形中心位置在 x 方向存在位移 x_0 时, 二维掩模的等效透过率函数 $t'_{2D}(x)$ 应扩展为

$$t'_{2D}(x) = t_a + (t_b - t_a) \text{rect}\left(\frac{x - x_0}{w}\right) + A \exp(i\phi_A) \delta\left(x - x_0 - \frac{w}{2}\right) + A \exp(i\phi_A) \delta\left(x - x_0 + \frac{w}{2}\right), \quad (1)$$

式中 $t_a, t_b, A \exp(i\phi_A)$ 为模型参数, 由严格仿真匹配求得, 即通过严格仿真得到 0 级、1 级、2 级衍射谱 $b_0 \sim b_2$; w 为掩模图形特征尺寸; $\text{rect}[(x - x_0)/w]$ 为代表吸收层图形的矩形函数, 其定义为

$$\text{rect}\left(\frac{x - x_0}{w}\right) = \begin{cases} 1, & -\frac{w}{2} < x - x_0 < \frac{w}{2} \\ 0, & \left(-\frac{p}{2} < x - x_0 < -\frac{w}{2}\right) \cup \left(\frac{w}{2} < x - x_0 < \frac{p}{2}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 p 为掩模图形周期。

二维掩模对应的衍射谱函数为

$$b'_m = (t_b - t_a) d \text{sinc}(md) \exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p}\right) + t_a \text{sinc} m \exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p}\right) + \frac{2A \exp(i\phi_A)}{p} \cos(\pi m d) \exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p}\right). \quad (3)$$

衍射谱 $b_0 \sim b_2$ 根据 (3) 式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 1 & 2/p \\ d \operatorname{sinc} d \exp\left(-\frac{i2\pi x_0}{p}\right) & 0 & 2\cos(\pi d) \exp\left(-\frac{i2\pi x_0}{p}\right)/p \\ d \operatorname{sinc}(2d) \exp\left(-\frac{i4\pi x_0}{p}\right) & 0 & 2\cos(2\pi d) \exp\left(-\frac{i4\pi x_0}{p}\right)/p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_b - t_a \\ t_a \\ A \exp(i\phi_A) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

通过求解系数矩阵的逆矩阵,可得到模型参数 $t_a, t_b, A \exp(i\phi_A)$ 的值。将上述计算扩展应用于三维矩形掩模,则其等效透过率函数 $t_{3D}(x, y)$ 为

$$\begin{aligned} t_{3D}(x, y) = & t_a + (t_b - t_a) \operatorname{rect}\left(\frac{x - x_0}{w_x}, \frac{y - y_0}{w_y}\right) + \\ & \Delta_{\text{TE}} \left[\delta\left(x - x_0 - \frac{w_x}{2}\right) + \right. \\ & \left. \delta\left(x - x_0 + \frac{w_x}{2}\right) \right] \operatorname{rect}\left(\frac{y - y_0}{w_y}\right) + \\ & \Delta_{\text{TM}} \left[\delta\left(y - y_0 - \frac{w_y}{2}\right) + \right. \\ & \left. \delta\left(y - y_0 + \frac{w_y}{2}\right) \right] \operatorname{rect}\left(\frac{x - x_0}{w_x}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $\Delta_{\text{TE}}, \Delta_{\text{TM}}$ 为对应两方向的边界脉冲修正系数 (δ_{pulse}), 模型参数仍可由二维掩模严格仿真匹配求得^[8]。对复杂掩模图形,其衍射谱可视为组成该图形的不同子矩形图形衍射谱的叠加。此外,研究表明,对三维矩形图形掩模,除存在矩形边界线处的衍射波外,还存在图形拐角点的散射、衍射^[9],为此引入角点脉冲修正函数 $4\Delta_{\text{TE}}\Delta_{\text{TM}}\cos(\pi md)\cos(\pi nd)$, 同时将衍射谱的逐级计算优化为张量积计算,得到衍射谱公式为

$$\begin{aligned} b_{mn} = & t_a \left[\exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p_x}\right) \operatorname{sinc} m \right] \otimes \\ & \left[\exp\left(-\frac{i2\pi n y_0}{p_y}\right) \operatorname{sinc} n \right] + \\ & (t_b - t_a) \left\{ \exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p_x}\right) [d_x \operatorname{sinc}(m d_x) + \right. \\ & \left. 2\Delta_{\text{TE}} d_x \cos(\pi m d_x)] \right\} \otimes \\ & \left\{ \exp\left(-\frac{i2\pi m x_0}{p_x}\right) [d_y \operatorname{sinc}(n d_y) + \right. \\ & \left. 2\Delta_{\text{TM}} d_y \cos(\pi n d_y)] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

式中 \otimes 为张量积(又称外积)符号。

2.3 掩模多层膜模型

2.3.1 无缺陷等效膜层模型

EUVL 掩模多层膜主要由 Mo 和 Si 两种不同

介质交替堆叠构成。光在其中的传播、反射,可根据菲涅耳公式进行递推计算。如图 2(b) 中无缺陷多层膜模型所示,等效膜层法(ELM)^[15] 从与基底相邻的第 k 层开始计算,则基底、第 k 层和第 $k-1$ 层构成一个单层膜。同理,将基底和第 n 层等效为一层,则该层与第 $k-1$ 层和第 $k-2$ 层构成一个单层膜。重复该过程,递推计算直到第 1 层,从而得到整个多层膜的复反射系数。

如图 3 所示,将等效膜层法的计算方式进行了优化。原计算方法对入射到多层膜的各级衍射光循环进行遍历,逐级采用等效膜层法计算多层膜对该级次的反射率,下一级次的计算需等前一级次的计算完成,因此为顺序计算。新的计算方法将各级次组成衍射谱矩阵,对矩阵整体采用矢量化的等效膜层法计算其反射矩阵,以实现对各级次衍射谱的矢量化并发计算,从而提高计算效率。该方法适用于衍射级次较多,且多层膜与各级次反射计算互不相关的情况。

2.3.2 含缺陷改进型单平面近似模型

如图 2(b) 所示,对含缺陷多层膜,缺陷形态参数 Δ 可表示为

$$\Delta = (h_{\text{top}}, w_{\text{top}}; h_{\text{bot}}, w_{\text{bot}}), \quad (7)$$

式中 h_{top} 为表面缺陷高度, w_{top} 为表面缺陷半峰全宽, h_{bot} 为基底缺陷高度, w_{bot} 为基底缺陷半峰全宽。

对含缺陷二维多层膜,基于单平面近似的简化模型^[19] 以反射系数振幅衰减 $\eta(x, \Delta)$ 表示缺陷对多层膜反射光振幅的影响,以相位突变 $\Phi(x, \Delta)$ 表示缺陷对多层膜反射光相位的影响,从而得到含缺陷多层膜反射系数 $\tilde{r}_{\text{ML}}(x, \Delta)$ 计算公式为

$$\tilde{r}_{\text{ML}}(x, \Delta) = \eta(x, \Delta) \exp[j\Phi(x, \Delta)] r_{\text{ML}}, \quad (8)$$

式中 r_{ML} 为理想多层膜等效平面镜反射系数,原模型将其取为定值 0.855。根据多层膜反射特性,当入射角 θ_{in} 为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,这一假设可认为有效;然而当入射角 $\theta_{\text{in}} > 10^\circ$ 时,反射系数会发生衰减^[22]。因此,采用 2.3.1 节等效膜层法计算对入射角 $\theta_{\text{in}} > 10^\circ$ 的理想多层膜的振幅衰减系数,以提高模型准确度。

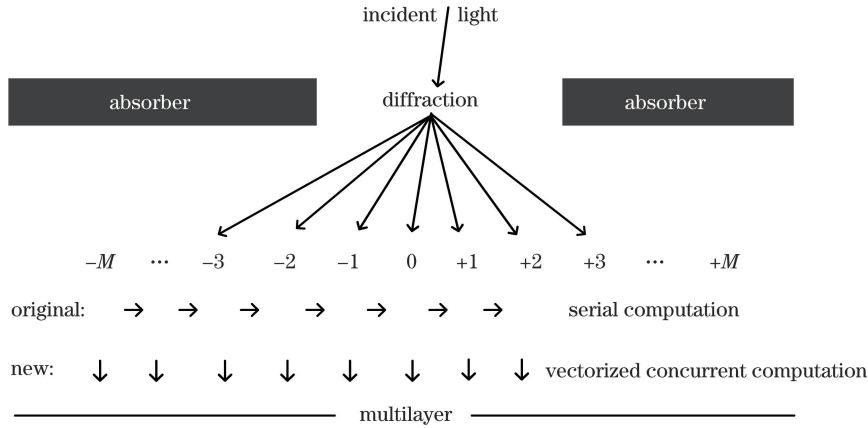


图 3 多层膜仿真的矢量化并发计算原理示意图

Fig. 3 Schematic of vectorized concurrent computation in multilayer film simulation

修正后的反射系数 r'_{ML} 为

$$r'_{ML} = \begin{cases} 0.855, & \theta_{in} \leq 10^\circ \\ \bar{r}_{EML}(\theta_{in}), & \theta_{in} > 10^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\bar{r}_{EML}(\theta_{in})$ 为不同入射角 θ_{in} 时通过等效膜层法计算得到的反射系数。

3 仿真结果与讨论

对无缺陷、含缺陷情况下的二维、三维 EUVL 掩模,在不同仿真参数及仿真指标下对模型进行全面多参数的仿真验证,仿真指标如表 1 所示。

表 1 不同掩模仿真指标

Table 1 Parameters of various mask simulations

Mask	Mask type	Pitch /nm	Pattern size /nm	Accuracy index	Speed index
A	2D absorber	400	200	Diffraction spectrum	Simulation time
B	2D multilayer	400		Reflection spectrum	Simulation time
C	3D defect-free	640	80-480	Areal image intensity	Simulation time
D	3D defect-free	144	72-80	CD versus azimuth	Simulation time
E	3D defect-free	176	88	CD versus azimuth	Simulation time
F	3D defective	240	88	CD versus pattern size CD versus pattern shift	Simulation time
G	3D defective	240	80	CD versus pattern shift	Simulation time

3.1 吸收层衍射谱仿真验证

以商用光刻仿真软件 Dr. LiTHO^[23] 的严格电磁场仿真方法——波导(WG)法为基准(以该方法仿真结果为标准值),分别采用扩展后边界脉冲修正法与原方法对二维掩模进行仿真,并对比仿真结果。若不做特殊说明,皆采取以下仿真参数:圆形照明光源,半径 σ 为 0.8,极紫外光波长为 13.5 nm,入射光线主入射角为 6° ;吸收层厚度为 70 nm,材料为 TaN,其复折射率为 0.9260-0.0436j。

对图形尺寸 $w=200$ nm,图形偏移 $x_0=60$ nm,周期 $p=400$ nm 的二维掩模吸收层 A,采用扩展后模型仿真得到的吸收层衍射谱与采用严格仿真 WG 法得到的吸收层衍射谱匹配结果如图 4 所示。当吸收层图形存在偏移时,由原模型所依据的理论

可知,原模型已不能有效描述衍射谱相位变化^[22],而扩展模型的衍射谱振幅、相位与严格仿真 WG 法匹配得较好。

3.2 多层膜衍射谱仿真验证

对无缺陷多层膜衍射谱进行仿真,等效膜层法具有较高精度。由其原理可知,实验对等效膜层法计算方式的改变并不影响仿真精度,而对速度的提升可见后文整体掩模仿真结果。

周期 $p=400$ nm 的二维含缺陷掩模多层膜 B,入射角在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内变化时,改进后的新模型与原简化模型仿真得到的 $0 \sim +3$ 级衍射谱的振幅误差(以严格仿真波导法为基准)如图 5 所示。图 5 中缺陷形态参数 $h_{top}=3$ nm, $w_{top}=90$ nm, $w_{bot}=h_{bot}=40$ nm。

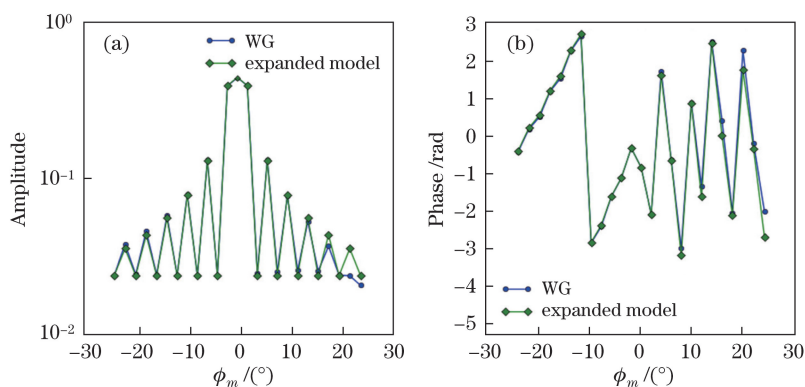


图 4 扩展模型对二维掩模吸收层 A 衍射谱的仿真结果。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 4 Simulation result of 2D mask absorber A obtained by the expanded model. (a) Amplitude; (b) phase

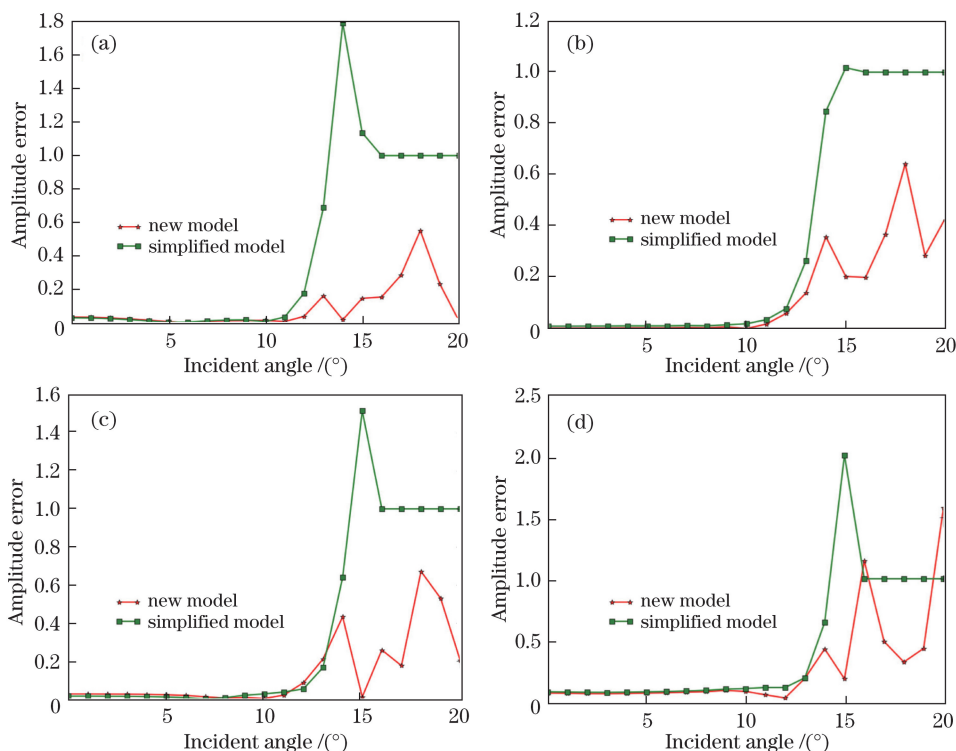


图 5 不同入射角下原简化模型与新模型对含缺陷掩模多层膜 B 衍射谱仿真的各级衍射光的振幅误差。

(a) 0 级; (b) +1 级; (c) +2 级; (d) +3 级

Fig. 5 Amplitude errors of various diffraction simulation orders of defective multilayer film B from the simplified model and the new model with different incident angles. (a) 0 order; (b) +1 order; (c) +2 order; (d) +3 order

由图 5 可知,改进后的新模型与原简化模型相比,在大入射角下的仿真精度有较大提升,这得益于改进后的新模型对多层膜理想平面镜反射系数的优化,将衍射光各级次在不同入射角下的振幅误差相加,得到对应各级次的误差总和。改进后的新模型与原简化模型相比,0~+3 级误差总和分别减小了 80.07%,62.89%,63.00%和 37.12%。

3.3 整体掩模仿真验证

将 2.2 节、2.3 节所述吸收层、多层膜仿真模型结合,建立基于掩模结构分解的整体掩模仿真方法,

选取典型的接触孔图形(特征尺寸范围为 18~30 nm)及其与拐角图形结合的复杂掩模图形,在相同仿真参数下,采用严格仿真方法、实验所提出的方法及快速方法进行仿真,得到无缺陷、含缺陷三维掩模衍射谱,进行对比验证。将衍射谱代入商用光刻仿真软件 Dr.LiTHO 的 Abbe-Hopkins 成像模型^[23]中,对不同方法得到的掩模所成像(空间像)及由空间像截取的图形关键尺寸值(即 CD 值)进行对比验证。通常采用掩模面尺寸来描述掩模,采用像面尺寸来描述 CD 值,掩模面尺寸为像面尺寸的 4 倍。严格仿

真采用商用光刻仿真软件 Dr.LiTHO 的 WG 方法。快速方法分别为 Dr.LiTHO 中的域分解方法 QUASI^[10]及实验的改进型结构分解法(ASDM)。

3.3.1 无缺陷掩模仿真

如图 6 所示,对包含不同偏移图形、在 x, y 两方向上的周期分别为 640 nm 和 640 nm(对应像面周期均为 160 nm)的大面积复杂掩模 C,采取 45°线偏振、内半径为 0.4、外半径为 0.8 的环形照明光,在照明主入射角为 6°,方位角为 0°及 90°两种情况下,由不同仿真方法得到的掩模空间像如图 7 所示。两种快速方法 QUASI、ASDM 与严格仿真 WG 方法的空间像误差的均方根(RMS)值在 0°照明方位角下分别为 0.0092 和 0.0041,在 90°照明方位角下分别为 0.0091 和 0.0033。取两方位角下的平均值(0.00915,

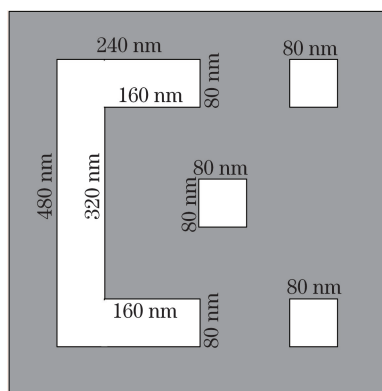


图 6 三维掩模 C 示意图
Fig. 6 Schematic of 3D mask C

0.0037),则改进方法 ASDM 与对比方法 QUASI 相比,仿真精度提升了约 60%。此外,在相同仿真硬

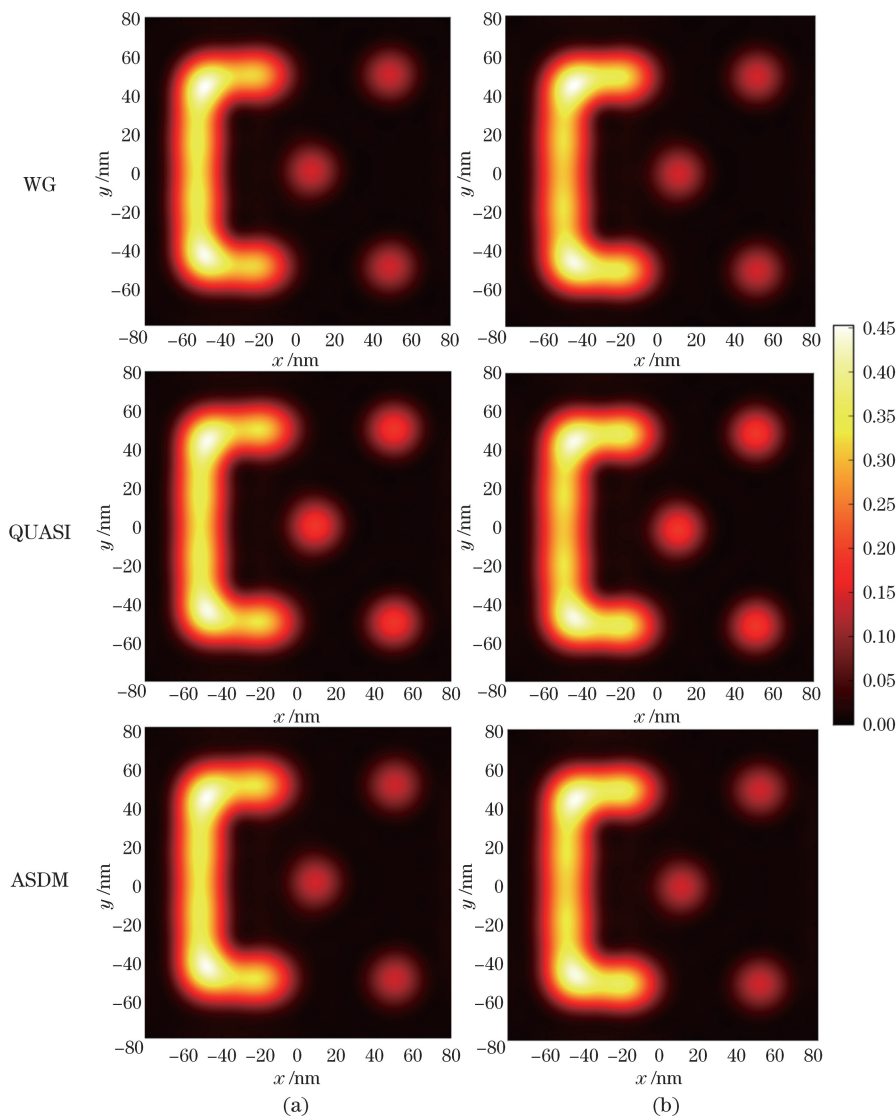


图 7 三维掩模 C 在不同吸收层图形偏移情况下的空间像仿真结果。(a)方位角为 0°;(b)方位角为 90°
Fig. 7 Aerial-image simulation results of 3D mask C for various absorber pattern shifts.
(a) Azimuth of 0°; (b) azimuth of 90°

件(Intel Xeon 16 核 2.0 GHz CPU, 64 GB 内存)下, 严格仿真 WG 方法对该掩模单次仿真所用时间为 45480 s(约 12.6 h), 对比方法 QUASI 所用时间为 32.7 s, 实验方法 ASDM 所用时间为 18.8 s, 实验方法仿真速度为严格仿真 WG 方法的 2419 倍, 是对比方法 QUASI 的 1.73 倍。

为进一步验证改进方法 ASDM 的仿真精度, 将

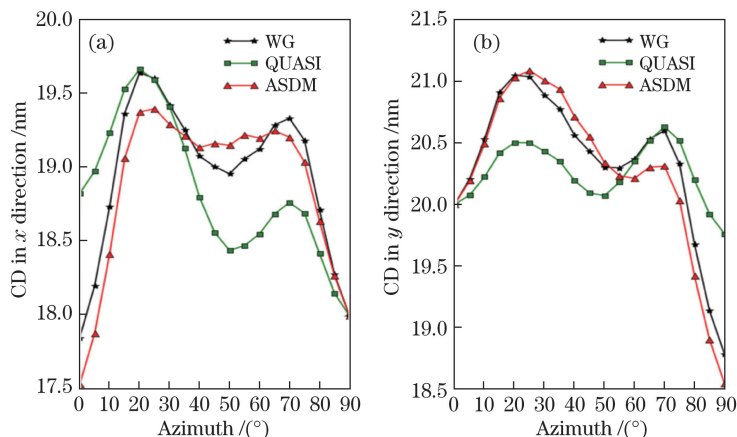


图 8 三维掩模 D 在不同方位角下的 CD 值仿真结果。(a) x 方向 CD 值; (b) y 方向 CD 值

Fig. 8 CD simulation results of 3D mask D versus azimuth angle. (a) CD in x direction; (b) CD in y direction

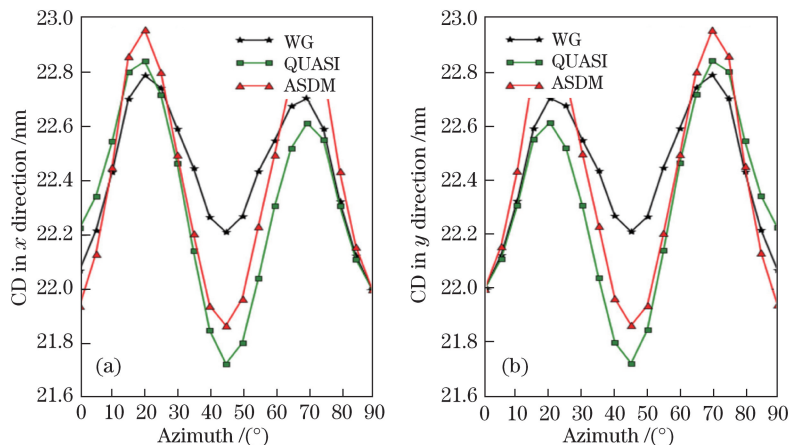


图 9 三维掩模 E 在不同方位角下的 CD 值仿真结果。(a) x 方向 CD 值; (b) y 方向 CD 值

Fig. 9 CD simulation results of 3D mask E versus azimuth angle. (a) CD in x direction; (b) CD in y direction

以严格仿真 WG 方法为基准, 两种快速方法 QUASI 及 ASDM 对三维掩模 D 的 CD 值仿真误差结果的 RMS 值分别为 0.468 nm 和 0.176 nm, 而对三维掩模 E 的 CD 值仿真误差的 RMS 值分别为 0.236 nm 和 0.181 nm。改进方法 ASDM 与快速方法 QUASI 相比, 对两个三维掩模仿真精度的提升分别为 62.4% 和 23.3%。对三维掩模 E 单次衍射谱进行仿真, 在相同仿真硬件(Intel i5 4 核 2.6 GHz CPU, 4 GB 内存)、相同仿真参数条件下, 严格仿真 WG 方法所用时间为 61.52 s, 两种快速方法 QUASI 及 ASDM 所用时间分别为 7.28 s 及 1.84 s, 改进方

入射光方位角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内以 5° 为间隔变化, 其他仿真参数不变, 对在 x, y 方向上吸收层图形尺寸分别为 72 nm 和 80 nm、偏移均为 12 nm、周期均为 144 nm 的三维矩孔掩模 D, 以及图形尺寸为 88 nm、周期为 176 nm 的无偏移方形接触孔掩模 E, 采用不同方法进行仿真, 得到的 CD 值仿真结果分别如图 8 和图 9 所示。

法 ASDM 的仿真速度为原方法(31.5 s)的 17 倍、对比方法 QUASI 的 4 倍。

3.3.2 含缺陷掩模仿真

对周期为 240 nm(对应像面尺寸为 60 nm)、图形特征尺寸为 88 nm(对应像面尺寸为 22 nm)的含缺陷掩模 F, 在 15° 大入射角下, 以严格仿真 WG 方法为基准, 采用原方法与改进方法 ASDM 仿真得到的掩模衍射谱误差分别如图 10 和图 11 所示, 其中原方法衍射谱误差的 RMS 值为 0.00842, 改进方法 ASDM 误差的 RMS 值为 0.00549, 与原方法相比仿真精度提升了 34.7%。

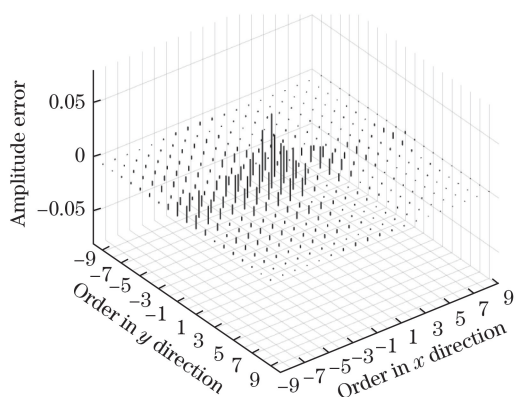


图 10 三维掩模 F 采用原方法仿真得到的衍射谱振幅误差
Fig. 10 Amplitude error obtained by the original method for diffraction spectrum simulation of 3D mask F

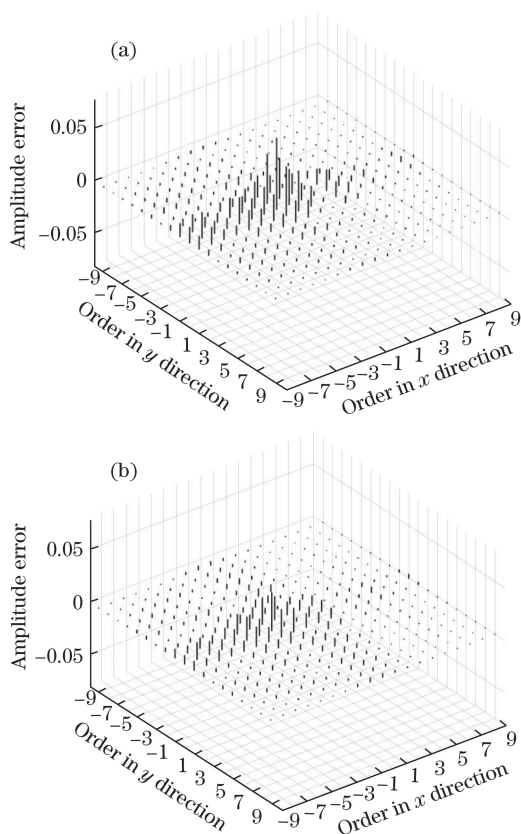


图 11 三维掩模 F 采用不同方法仿真得到的衍射谱振幅误差。(a)原方法;(b)改进方法 ASDM

Fig. 11 Amplitude error obtained by various methods for diffraction spectrum simulation of 3D mask F.

(a) Original method Original; (b) improved ASDM

如图 12 所示,对相同的三维掩模 F,在 6° 入射角下,掩模吸收层无偏移,仅图形尺寸变化时改进方法 ASDM 的 CD 值仿真结果与原方法的 CD 值仿真结果相同^[20],但单次掩模衍射谱仿真速度提升了约 80 倍(Intel Xeon 16 核 2.0 GHz CPU,64 GB 内存工作站,原方法用时 357.1 s,改进方法 ASDM 用时

4.41 s)。其中,缺陷形态参数 $h_{top} = 2$ nm, $w_{top} = 40$ nm, $w_{bot} = h_{bot} = 20$ nm; CD_x 为 x 方向成像 CD 值, CD_y 为 y 方向成像 CD 值; target 对应无缺陷时严格仿真得到的 CD 值。

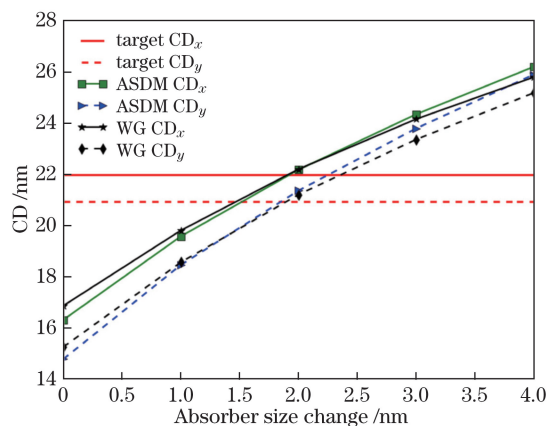


图 12 三维掩模 F 在不同吸收层图形尺寸下的 CD 值仿真结果

Fig. 12 CD simulation results of 3D mask F versus absorber pattern size

此外,采用 ASDM 与严格仿真 WG 方法对三维掩模在不同吸收层图形偏移情况下进行成像 CD 值仿真,对三维掩模 F 和三维掩模 G 的仿真结果如图 13 所示。三维掩模 G 的周期为 240 nm,图形特征尺寸为 80 nm(对应像面尺寸为 20 nm),缺陷形态参数 $h_{top} = 0$ nm, $w_{top} = 20$ nm, $w_{bot} = h_{bot} = 15$ nm。吸收层图形在 x, y 两个方向上具有相同偏移量。对三维掩模 F,偏移量在 0~76 nm 范围内以 8 nm 为间隔变化;对三维掩模 G,偏移量在 0~60 nm 范围内以 12 nm 为间隔变化。与严格仿真相比,ASDM 对三维掩模 F 和三维掩模 G 的 CD 值仿真误差均在 0.6 nm 以内,仿真速度提升了约 150 倍。需注意的是,对不同掩模图形,虽然 ASDM 与严格仿真 WG 方法对吸收层偏移仿真存在一定误差,但是变化趋势相似。因此可通过乘以常数因子或调整模型参数,使其与严格仿真结果匹配。对比吸收层尺寸变化和吸收层图形偏移两种情况下的 CD 值仿真结果可知,对缺陷进行补偿时,与吸收层图形偏移相比,改变吸收层尺寸更容易补偿缺陷对成像的影响。

4 结 论

基于掩模结构分解法,对掩模吸收层边界脉冲修正及多层膜单平面近似仿真方法分别进行了扩展和改进,通过仿真实验验证了对吸收层仿真方法进

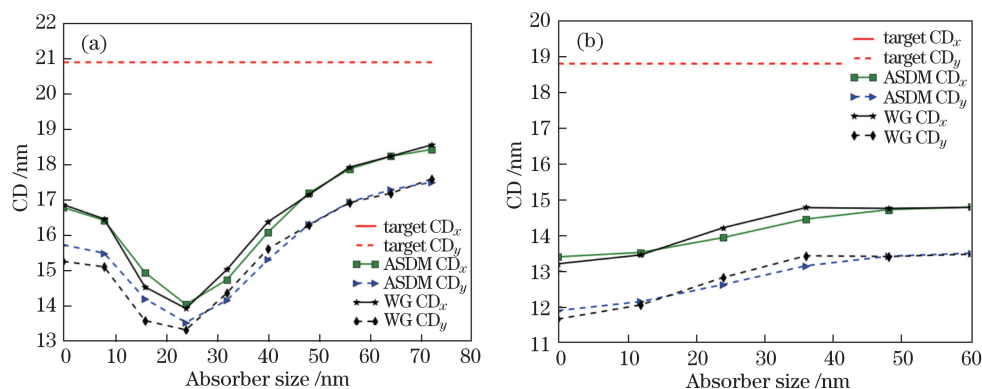


图 13 不同吸收层偏移下的 CD 值仿真结果。(a)三维掩模 F;(b)三维掩模 G

Fig. 13 CD simulation results versus absorber pattern shift. (a) 3D mask F; (b) 3D mask G

行扩展的正确性,同时验证了多层膜模型参数改进对仿真精度的提高,采用张量积、矢量并发计算提高了仿真速度,实现了对掩模图形尺寸及位置任意变化时无缺陷及含缺陷情况下掩模衍射谱的快速、精确仿真。在无缺陷情况下,对周期为 640 nm 的大面积含复杂图形的掩模,扩展改进方法 ASDM 与严格仿真 WG 方法相比空间像结果匹配良好,与对比方法 QUASI 相比精度提升了约 60%,且改进方法 ASDM 的仿真速度分别为严格仿真 WG 方法及对比方法 QUASI 的 2419 倍和 1.73 倍。对周期为 176 nm 及 144 nm 的三维掩模,改进方法 ASDM 与严格仿真 WG 方法相比,CD 仿真误差在 0.4 nm 以内,仿真精度与原方法相同且优于对比方法 QUASI,仿真速度分别为原方法及对比方法的 17 倍和 4 倍。在含缺陷情况下,对不同吸收层图形尺寸及图形偏移下掩模成像 CD 值的仿真结果表明,本文实验方法与严格仿真 WG 方法具有较好的匹配性,仿真速度提升了至少 80 倍。仿真速度的大幅提升表明,通过优化计算方式,充分利用仿真计算中的并行和并发性,可在不更换仿真硬件、不影响仿真精度的情况下大幅提升仿真速度,从而更有利于满足大面积三维掩模图形优化与缺陷补偿对仿真速度的需求。

参 考 文 献

- [1] Kim S S, Chalykh R, Kim H, *et al.* Progress in EUV lithography toward manufacturing[C]. SPIE, 2017, 10143: 1014306.
- [2] Buitrago E, Meeuwissen M, Yildirim O, *et al.* State-of-the-art EUV materials and processes for the 7 nm node and beyond[C]. SPIE, 2017, 10143: 101430T.
- [3] Turkot B, Carson S L, Lio A, *et al.* EUV progress toward HVM readiness[C]. SPIE, 2016, 9776: 977602.
- [4] Qi Z J, Rankin J, Narita E, *et al.* Viability of pattern shift for defect-free extreme ultraviolet lithography photomasks[C]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(2): 021005.
- [5] Liu X F, Howell R, Hsu S, *et al.* EUV source-mask optimization for 7nm node and beyond[C]. SPIE, 2014, 9048: 90480Q.
- [6] Lam M, Clifford C, Raghunathan A, *et al.* Enabling full field physics based OPC via dynamic model generation[C]. SPIE, 2017, 10143: 1014316.
- [7] Haque R R, Levinson Z, Smith B W. 3D mask effects of absorber geometry in EUV lithography systems[C]. SPIE, 2016, 9776: 97760F.
- [8] Cao Y T, Wang X Z, Bu Y. Fast simulation model for contact hole mask in extreme-ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705001. 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.
- [9] Mailfert J, Zuniga C, Philipsen V, *et al.* 3D mask modeling for EUV lithography[C]. SPIE, 2012, 8322: 832224.
- [10] Evanschitzky P, Erdmann A. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method[C]. SPIE, 2007, 6533: 65330Y.
- [11] Lam M C, Neureuther A R. Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks[C]. SPIE, 2006, 6349: 63492H.
- [12] Tirapu-Azpiroz J, Burchard P, Yablonoitch E. Boundary layer model to account for thick mask effects in photo lithography[C]. SPIE, 2003, 5040: 1611-1619.
- [13] Lam M C, Neureuther A R. Fast simulation methods for defective EUV mask blank inspection[C]. SPIE, 2004, 5567: 741-750.
- [14] Evanschitzky P, Erdmann A, Besacier M, *et al.* Simulation of extreme ultraviolet masks with defective

- multilayers[C]. SPIE, 2003, 5130: 1035-1045.
- [15] Liu X L, Li S K, Wang X Z. Simulation model based on equivalent layer method for defective mask multilayer in extreme ultra violet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622005.
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.
- [16] Gullikson E M, Cerjan C, Stearns D G, *et al.* Practical approach for modeling extreme ultraviolet lithography mask defects[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2002, 20(1): 81-86.
- [17] Clifford C H, Neureuther A R. Smoothing based model for images of isolated buried EUV multilayer defects[C]. SPIE, 2008, 6921: 692119.
- [18] Clifford C H, Neureuther A R. Fast simulation methods and modeling for extreme ultraviolet masks with buried defects[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2009, 8(3): 031402.
- [19] Liu X L, Li S K, Wang X Z. Simplified model for defective multilayer diffraction spectrum simulation in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905002.
刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905002.
- [20] Liu X L, Wang X Z, Li S K. Simulation model of mask with defect and its application to defect compensation in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822006.
刘晓雷, 王向朝, 李思坤. 极紫外光刻含缺陷掩模仿真模型及缺陷的补偿[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822006.
- [21] van Schoot J, van Ingen-Schenau K, Valentine C, *et al.* EUV lithography scanner for sub-8 nm resolution[C]. SPIE, 2015, 9422: 94221F.
- [22] Cao Y T, Wang X Z, Qiu Z C, *et al.* Simplified model for mask diffraction in extreme-ultraviolet projection lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405001.
曹宇婷, 王向朝, 邱自成, 等. 极紫外投影光刻掩模衍射简化模型的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405001.
- [23] Fühner T, Schnattinger T, Ardelean G, *et al.* Dr. LiTHO: a development and research lithography simulator[C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.