

# 基于变量分离分解法的极紫外光刻三维掩模快速仿真方法

张 恒<sup>1,2</sup>, 李思坤<sup>1,2</sup>, 王向朝<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出了一种基于分离变量法的极紫外光刻三维掩模衍射谱快速仿真方法,在保证一定仿真精度的前提下提高了仿真速度。该方法将三维掩模分解为 2 个相互垂直的二维掩模,对 2 个二维掩模采用严格电磁场方法进行衍射谱仿真并将结果相乘以重构成三维衍射谱。以 6° 主入射角、45° 线偏振光照明及 22 nm 三维方形接触孔掩模为例,在入射光方位角 0°~90° 变化范围内,相同仿真参数下,该方法的仿真结果与商用光刻仿真软件 Dr.LiTHO 的严格仿真结果相比,图形特征尺寸误差小于 0.21 nm,仿真速度提高约 65 倍。在上述参数下,该方法与 Dr.LiTHO 的域分解方法及基于掩模结构分解法等快速方法相比,仿真精度和速度均提高 1 倍以上。该模型无需参数标定,适用于矩形图形的三维掩模快速仿真。

**关键词** 衍射; 极紫外光刻; 掩模衍射谱仿真; 变量分离分解法; 接触孔图形

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0505001

## Fast Simulation Method of Extreme-Ultraviolet Lithography 3D Mask Based on Variable Separation Degradation Method

Zhang Heng<sup>1,2</sup>, Li Sikun<sup>1,2</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A fast simulation method based on variable separation is proposed for 3D mask diffraction in extreme-ultraviolet lithography (EUVL). The method achieves higher simulation speed while maintaining a good simulation accuracy. In this method, the 3D mask is decomposed into two orthogonal 2D masks. The diffraction spectrum simulation on two 2D masks are carried out through rigorous electromagnetic method. The results are then multiplied to reconstruct the three-dimensional diffraction spectrum. We set a premise of 6° main incident angle, 45° linearly polarized light illumination and 22 nm 3D square contact hole mask. Azimuth angle is ranging from 0° to 90°. Under the same simulation parameters, the simulation results of this method are compared with the rigorous simulation results of commercial lithography simulation software Dr. LiTHO. The errors of the simulated critical-dimension of the proposed method are within 0.21 nm, and the simulation speed is about 65 times faster. Under the above parameters, the proposed method is compared with the domain decomposition method of Dr. LiTHO and a fast method based on mask-structure decomposition. The results show that the simulation accuracy and speed are improved more than double. The method needs no calibrations for model parameters and suits fast simulations of 3D masks that contain rectangular patterns.

**Key words** diffraction; extreme-ultraviolet lithography; mask diffraction spectrum simulation; variable separation

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2017-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61474129)

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)

degradation method; contact hole pattern

OCIS codes 050.1755; 050.1940; 220.3740; 340.7480

## 1 引 言

极紫外光刻(EUVL)被认为是最有前景的下一代光刻技术<sup>[1]</sup>。目前,已有多台极紫外光刻机(ASML公司,NXE:3300机型)被用于先进半导体器件的研发制造中<sup>[2]</sup>。随着光源、掩模制备等相关技术不断取得突破,极紫外光刻技术有望被用于7 nm等节点的芯片量产中<sup>[3]</sup>。

在光刻机及光刻工艺研发中,对于光刻系统及光刻工艺参数的优化来说,使用计算机对光刻过程进行建模、仿真具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。掩模仿真是光刻仿真的重要组成部分。通过掩模衍射谱仿真可得到照明光经过掩模反射、衍射后的光场分布,并以此研究掩模衍射对成像的影响,解决与掩模相关的成像问题,得到优化后的照明光分布、掩模吸收层材料及厚度等参数<sup>[6-7]</sup>。

EUVL掩模衍射谱仿真可分为严格仿真方法和快速仿真方法两大类。严格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,如时域有限差分(FDTD)法<sup>[8]</sup>、严格耦合波分析(RCWA)法<sup>[9]</sup>及波导(WG)法<sup>[10-11]</sup>等。这类方法具有较高的仿真精度,但通常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<sup>[12]</sup>。

快速仿真方法通过采用近似模型或分解策略提高掩模仿真速度。如按掩模结构特性可将掩模衍射谱仿真进一步分解为吸收层仿真和多层膜仿真两部分。基于边界脉冲修正<sup>[13]</sup>和边界图形修正<sup>[14]</sup>的薄掩模近似模型可用于吸收层快速仿真。而对于多层膜仿真模型来说,以单一平面拟合多层膜反射特性的单平面近似(SSA)法<sup>[15]</sup>及其改进模型<sup>[16-17]</sup>的仿真速度较快,对多层膜全部膜层逐层计算的光线追迹法<sup>[18]</sup>、菲涅耳递推算法<sup>[19-20]</sup>的仿真精度优于单平面近似法,但仿真速度较慢<sup>[20]</sup>。将不同吸收层、多层膜模型结合,可得到一系列掩模衍射谱仿真方法,统称为掩模结构分解法。这类方法中,吸收层采用严格仿真,多层膜采用菲涅耳递推计算的方法因采用严格物理模型,理论上最准确。然而对于三维掩模,其仿真速度仍有待提高,如对仿真区域为200 nm×200 nm的掩模,在普通台式计算机上其仿真时间为5 h<sup>[19]</sup>,难以满足三维掩模快速仿真的需求。采用边界修正、改进单平面等近似模型虽可获得仿真速度的大幅提升,但通常以牺牲仿真精度为代价,且近似模型参数需由严格仿真标定,当仿真参数如掩模吸收层厚度、材料等变化时,需对模型参数重新标定,不利于参数变化复杂、精度要求较高的三维掩模仿真。此外,Adam K<sup>[21]</sup>提出的域分解法(DDM)被Erdmann A等<sup>[22-23]</sup>应用于EUVL掩模仿真中。这类方法将多个二维掩模的严格仿真结果叠加为三维掩模仿真结果,可大幅提升三维掩模的仿真速度,然而由于分解导致图形拐角等信息的丢失,其仿真精度仍有待提高<sup>[24]</sup>。

由此可见,对于EUVL三维掩模仿真,通常难以同时获得最优的仿真精度及仿真速度。为使仿真精度和速度更为平衡,同时避免引入需标定的模型参数,本文基于变量分离分解法(VSDM),将三维矩形掩模分解为两个相互垂直的二维掩模,对二维掩模采取严格仿真,并将结果相乘以重构成三维衍射谱,最终得到一种无需参数标定、快速准确的EUVL掩模仿真方法,以用于三维矩形掩模图形的快速仿真。

## 2 理论模型

### 2.1 VSDM原理

一个二元函数在某种坐标系内若能写成两个一元函数的乘积,则称此函数在该坐标系内是可分离变量的<sup>[25]</sup>。这种情况在直角坐标系中可写成:

$$f(x, y) = f_x(x)f_y(y), \quad (1)$$

可以证明可分离变量函数的频谱函数(即该函数的傅里叶变换)也是可分离变量函数。

函数的可分离性通常可使复杂的高维计算简化为简单的低维计算<sup>[25]</sup>。例如,对于经垂直入射光照射后的二维矩形开孔物体,其夫琅禾费衍射谱分布可由其物体透射率函数 $f(x, y)$ 的傅里叶变换 $F(\mu, \nu)$ 表征。这样,对于可分离变量的矩形透射率函数 $f(x, y)$ ,其频谱函数 $F(\mu, \nu)$ 的计算可由二维积分简化为2个一维积分的乘积:

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(x\mu + y\nu)] dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) \exp(-i2\pi x\mu) dx \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_y(y) \exp(-i2\pi y\nu) dy = F_x(\mu) \cdot F_y(\nu) \quad (2)$$

理论上,照明光经过三维 EUVL 掩模的传播,其衍射结果由其所遵循的麦克斯韦方程组及边界条件唯一确定。在严格求解麦克斯韦方程组的常用方法——WG 法中<sup>[26]</sup>,通常根据 EUVL 掩模介质沿  $z$  方向分层均匀分布的特性,采取分离变量思想,将磁矢势  $\mathbf{A}$  的  $z$  方向分量  $Z(z)$  与  $x, y$  方向分量  $f(x, y)$  分离,从而简化求解过程,即  $\mathbf{A} = f(x, y)Z(z)$ 。

类似地,对于在  $x, y$  方向对称分布的三维矩形开孔图形,可进一步将分离变量思想用于掩模衍射谱求解中,即将三维矩形掩模的衍射谱  $F(\mu, \nu)_z$  分解为沿  $x, y$  两方向二维掩模衍射谱的乘积,即  $F(\mu, \nu)_z = F_x(\mu)_z \cdot F_y(\nu)_z$ 。此外,由于 EUVL 掩模图形开孔尺寸通常与波长相近,且其厚度远大于波长,传统的薄掩模近似不够准确<sup>[10]</sup>。对分解后的二维掩模采用严格电磁场计算而非傅里叶变换得到其衍射谱,可保证最终的仿真精度。

周新江等<sup>[27]</sup>基于变量分离原理提出一种适用于传统光学光刻的厚掩模快速仿真模型,通过对不同入射角变量参数的分离,提高对部分相干光源表征的效率,从而提高仿真效率。不同于该模型,本研究基于分离变量原理,将 EUVL 三维厚掩模衍射谱分离为  $xz, yz$  两平面内二维掩模衍射谱的乘积,通过降低衍射谱数据维度以提高仿真效率。

## 2.2 仿真模型原理

在 EUVL 成像中,极紫外光从光源射出,经由照明系统照射到掩模上,从掩模反射、衍射出的光经过投影物镜的缩放,最终成像在硅片的光刻胶上。

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。吸收层材料通常为氮化钽(TaN),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的反射率。基底为二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)融石英玻璃,主要起稳定支撑的作用。入射光波长为 13.5 nm,其与  $z$  轴的夹角为入射角  $\varphi$ ,入射光在  $xy$  平面上的投影与  $x$  轴的夹角为方位角  $\theta$ 。

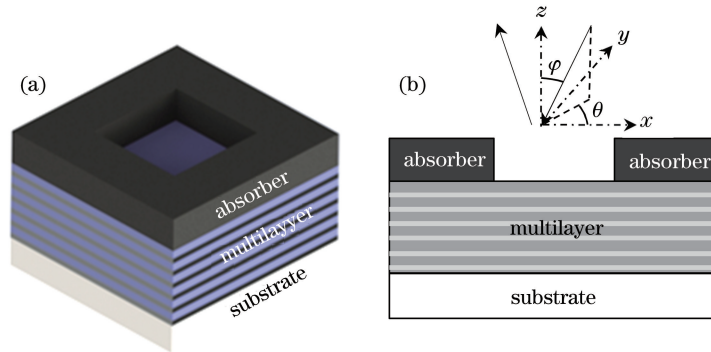


图 1 EUVL 三维掩模示意图。(a) 三维视图;(b) 侧截面图

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

基于 VSDM 的快速仿真模型原理如图 2 所示,根据 2.1 节所述分离变量思想,由于三维掩模图形对应的衍射谱可分解为 2 个二维掩模衍射谱的乘积,据此将矩形孔掩模沿图中过掩模中心的虚线分解为  $xz$  面和  $yz$  面上的 2 个二维掩模并分别进行仿真。二维掩模沿  $z$  方向即纵向分布的吸收层,以及多层膜各基底的材料、厚度等均保持不变。

给定三维掩模入射光角度  $\varphi, \theta$ ,则对应两二维掩模的入射光角度可由如下投影计算给出:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \arccos(\sin \varphi \cos \theta), \quad (3)$$

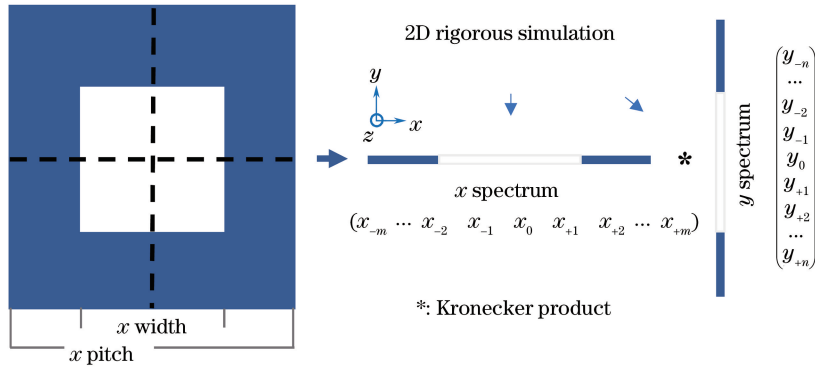


图 2 VSDM 仿真模型原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VSDM simulation model

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \arccos(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2), \quad (4)$$

式中  $\varphi_1, \varphi_2$  为对应两二维掩模的入射角。由于对二维掩模讨论方位角没有意义,故二者方位角皆取为  $0^\circ$ 。

由(3)式和(4)式获得二维掩模等效入射角后,采用严格电磁场仿真方法(本研究采用光刻仿真软件 Dr. LiTHO<sup>[28]</sup>中的 WG 法)对两二维掩模进行掩模衍射谱仿真,得到两个方向的二维衍射谱( $\mu_{\pm i}$ )、( $\nu_{\pm j}$ ),其中  $i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n, m, n$  为衍射谱最高级次。

最后,如(5)式所示,对两二维掩模衍射谱求克罗内克积(由符号"\*"表示),得到三维掩模衍射谱。

由于两二维衍射谱相乘时,值小于1的多层膜透射率相乘将导致结果偏小,因此,对上述掩模衍射谱除以多层膜透射率后即为最终三维掩模衍射谱结果:

$$\begin{pmatrix} \mu_{-m} & \dots & \mu_{-2} & \mu_{-1} & \mu_0 & \mu_1 & \mu_2 & \dots & \mu_{+m} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \nu_{-n} \\ \vdots \\ \nu_{-2} \\ \nu_{-1} \\ \nu_0 \\ \nu_{+1} \\ \nu_{+2} \\ \vdots \\ \nu_{+n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_{-m}\nu_{-n} & \dots & \mu_{-2}\nu_{-n} & \mu_{-1}\nu_{-n} & \mu_0\nu_{-n} & \mu_1\nu_{-n} & \mu_2\nu_{-n} & \dots & \mu_{+m}\nu_{-n} \\ \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ \mu_{-m}\nu_{-2} & \vdots & \mu_{-2}\nu_{-2} & \mu_{-1}\nu_{-2} & \mu_0\nu_{-2} & \mu_1\nu_{-2} & \mu_2\nu_{-2} & \vdots & \mu_{+m}\nu_{-2} \\ \mu_{-m}\nu_{-1} & \vdots & \mu_{-2}\nu_{-1} & \mu_{-1}\nu_{-1} & \mu_0\nu_{-1} & \mu_1\nu_{-1} & \mu_2\nu_{-1} & \vdots & \mu_{+m}\nu_{-1} \\ \mu_{-m}\nu_0 & \vdots & \mu_{-2}\nu_0 & \mu_{-1}\nu_0 & \mu_0\nu_0 & \mu_1\nu_0 & \mu_2\nu_0 & \vdots & \mu_{+m}\nu_0 \\ \mu_{-m}\nu_{+1} & \vdots & \mu_{-2}\nu_{+1} & \mu_{-1}\nu_{+1} & \mu_0\nu_{+1} & \mu_1\nu_{+1} & \mu_2\nu_{+1} & \vdots & \mu_{+m}\nu_{+1} \\ \mu_{-m}\nu_{+2} & \vdots & \mu_{-2}\nu_{+2} & \mu_{-1}\nu_{+2} & \mu_0\nu_{+2} & \mu_1\nu_{+2} & \mu_2\nu_{+2} & \vdots & \mu_{+m}\nu_{+2} \\ \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ \mu_{-m}\nu_{+n} & \dots & \mu_{-2}\nu_{+n} & \mu_{-1}\nu_{+n} & \mu_0\nu_{+n} & \mu_1\nu_{+n} & \mu_2\nu_{+n} & \dots & \mu_{+m}\nu_{+n} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

### 3 仿真结果与分析

通过对基于严格仿真方法与不同快速方法获得的掩模衍射谱、空间像及图形特征尺寸(CD)的对比,验证所提方法的有效性。空间像指掩模图形经光学系统缩放投影后,成像于硅片光刻胶上的光强分布。图形 CD 通过固定的阈值获得,即假定空间像强度超过某常数阈值的部分将转化为光刻胶像并以此截取最终图

形的线宽。严格仿真采用商用光刻仿真软件 Dr.LiTHO 的 WG 法。快速方法分别为 Dr.LiTHO 软件中的域分解 (QUASI) 方法<sup>[24]</sup>、基于掩模结构分解 (吸收层采用边界脉冲修正模型, 多层膜采用等效膜层法) (CL) 的方法<sup>[12,20]</sup> 及本研究所提的 VSDM。上述方法均采用相同的仿真参数 (表 1) 及仿真硬件, 其中照明光源为环形照明, 其参数由环形的内外半径  $\sigma_{in}$ 、 $\sigma_{out}$  给出, 仿真硬件为配有 16 核 CPU (2G Hz) 及 64 Gb 内存的工作站。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings

Simulation Object	Submodule	Parameter
Mask	Absorber	TaN thickness: 70 nm Refractive index: 0.9260-0.043633j
	Multilayer	40 pairs of Mo/Si double layer Mo/Si thickness: 4.17 nm/2.78 nm
	Substrate	SiO <sub>2</sub> thickness: 20 nm
Optics	Illumination	Wavelength: 13.5 nm Annular: $\sigma_{in}/\sigma_{out} = 0.4/0.8$
	Projection	4× reduction, NA: 0.33

### 3.1 掩模衍射谱

对于 CD 为 22 nm, 掩模周期为 44 nm (采用像面尺寸描述, 对应物面尺寸为像面尺寸的 4 倍) 的三维接触孔掩模, 采取 45° 线偏振的环形照明光, 在 6° 主入射角、0° 方位角下, 由不同仿真方法得到的该三维接触孔掩模的衍射谱如图 3 所示。照明光源采样点为 3×3 点光源阵列, 阵列中心点所对应的入射角为 6°, 与 9 点光源对应的 9 个衍射谱每个又可分为 TE、TM 两个分量谱。由于 TE、TM 分量结果在 45° 线偏振光照明下相差很小, 在此仅讨论 TE 分量。图 3 中所示为 3 种快速方法与严格仿真相比, TE 分量衍射谱各级次振幅与相位的均值误差。均值误差由快速方法与严格仿真衍射谱对应级次相减, 并取 9 个衍射谱均值所得。其中, VSDM 与 WG 法严格仿真相比, 相对均值误差为 2.96%, 仿真速度提高 64.8 倍。VSDM 与 QUASI 法及 CL 法相比, 均值误差分别降低 126% 和 117%, 仿真速度分别为 2 个对比方法的 2.38 倍和 2.10 倍。

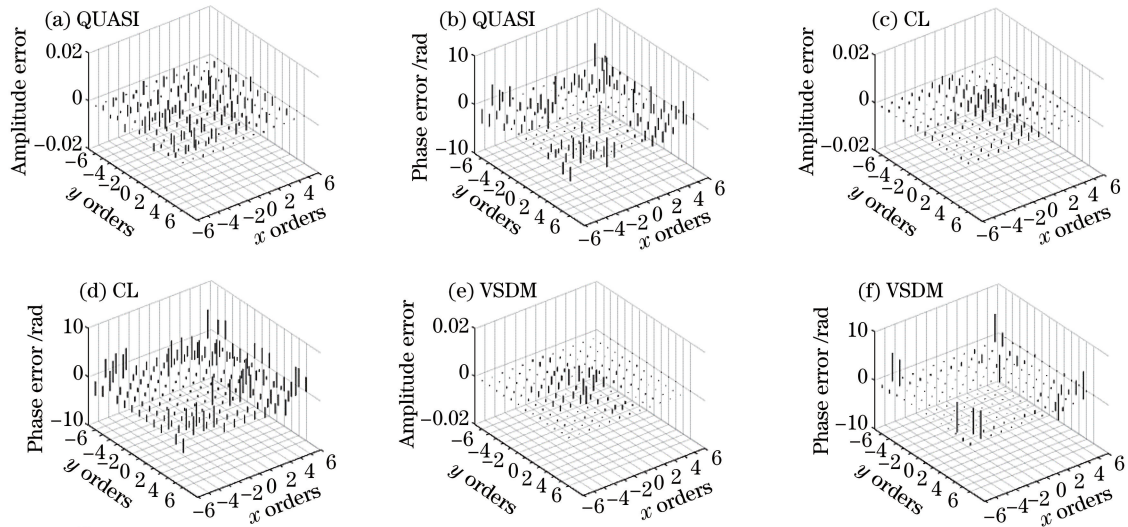


图 3 3 种快速方法掩模衍射谱仿真误差。(a)、(c)、(e) 分别为振幅误差; (b)、(d)、(f) 分别为相位误差

Fig. 3 Mask diffraction spectrum simulation errors of three different fast methods. (a), (c), (e) are amplitude errors, respectively; (b), (d), (f) are phase errors, respectively

### 3.2 空间像与 CD

由于采用部分相干光照明, 根据阿贝相干成像理论, 3.1 节所述不同照明点对应的多个衍射谱都将被成像系统接收, 最终形成掩模空间像, 且衍射谱高频信息将被有限的数值孔径 (NA) 滤去。因此, 将 3.1 节仿真得到的掩模衍射谱代入光刻仿真软件 Dr.LiTHO 的阿贝矢量成像模型中, 在相同成像系统参数下获得掩模

空间像仿真结果,如图4所示。将3种快速方法与严格方法的空间像相减,得到的空间像误差如图5所示。由图可知,VSDM空间像结果与严格仿真结果较为一致,误差较小。

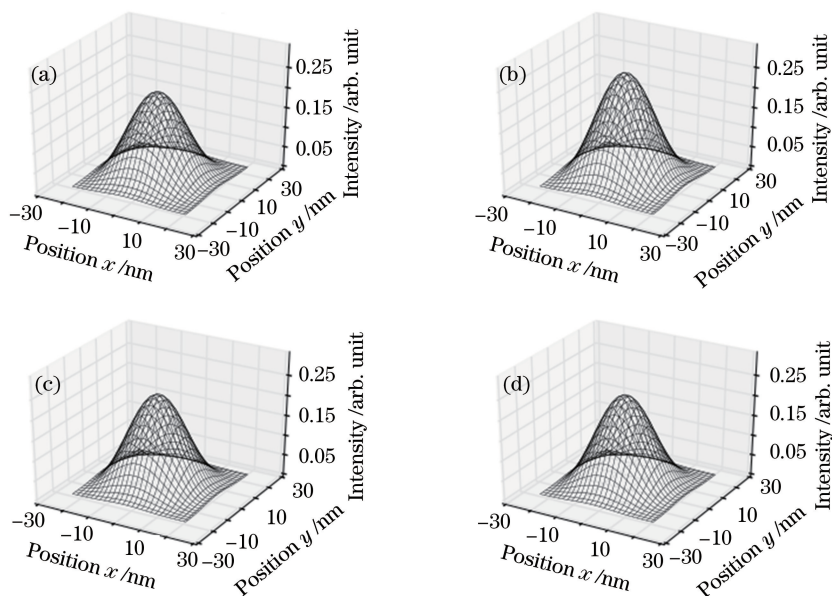


图4 不同方法掩模空间像仿真结果。(a) WG; (b) QUASI; (c) CL; (d) VSDM

Fig. 4 Aerial image results of different methods. (a) WG; (b) QUASI; (c) CL; (d) VSDM

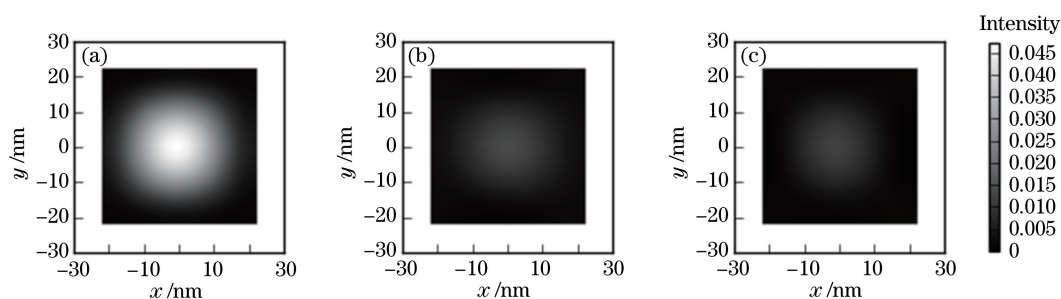


图5 不同快速方法掩模空间像仿真误差。(a) QUASI; (b) CL; (c) VSDM

Fig. 5 Simulation errors of mask aerial images for different fast methods. (a) QUASI; (b) CL; (c) VSDM

为进一步验证所提模型对成像CD仿真结果的有效性,将入射光方位角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 以 $5^\circ$ 为间隔改变,其他仿真参数不变,对方孔尺寸为22 nm,周期为44 nm的接触孔掩模及方孔尺寸为40 nm,周期为80 nm的接触孔掩模分别仿真,得到的CD随入射光方位角变化的结果分别如图6和图7所示。对于三维掩模,存在两个方向不同的图形CD:  $x$ 方向CD和 $y$ 方向CD,两方向空间像阈值,由方位角为 $90^\circ$ (对应 $x$ 方向)及 $0^\circ$ (对应 $y$ 方向)时获得目标CD值所对应的空间像强度值决定。

当CD方孔尺寸为22 nm,周期为44 nm时,与严格仿真相比,QUASI法、CL法及VSDM所对应的CD最大误差分别为0.49,0.44,0.21 nm,CD均值误差(对各个方位角及2个方向取平均)分别为0.176,0.202,0.072 nm。对CD方孔尺寸为40 nm,周期为80 nm的掩模,单个衍射谱的严格仿真时间约为10 min,3种快速方法仿真速度分别为严格仿真的159倍、170倍和427倍,CD均值误差分别为0.092,0.145,0.045 nm。此外,采用 $2 \times 2$ 的4点光源采样,对CD周期在 $x$ 方向方孔尺寸为16 nm,周期为40 nm, $y$ 方向方孔尺寸为22 nm,周期为60 nm的矩形掩模,由不同方法仿真得到的CD随方位角变化的结果如图8所示。3种方法的CD均值误差在 $x$ 方向分别为1.05,0.67,0.15 nm,在 $y$ 方向分别为1.14,0.68,0.20 nm。

仿真结果表明,VSDM在仿真精度、速度上皆优于与之对比的快速方法。根据分离变量原理,将三维矩形开孔掩模分解为两垂直方向上的掩模进行仿真,维度降低是速度得以大幅提升的原因。而对二维掩模采取严格仿真,保证了仿真精度,同时不存在参数标定的问题。作为对比的QUASI方法将掩模仿真分解为对

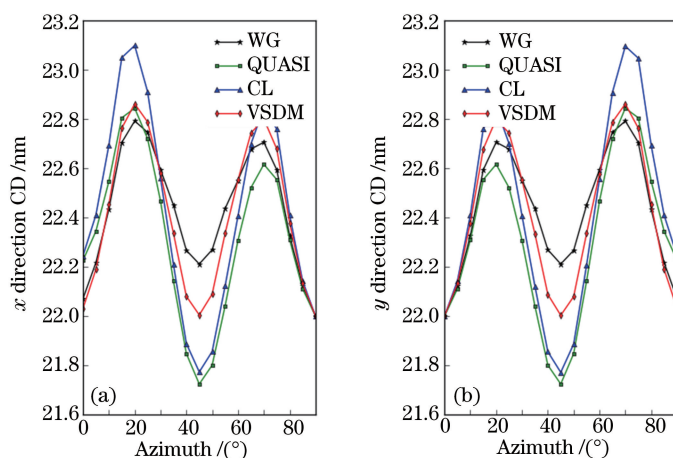


图 6 方孔尺寸为 22 nm、周期为 44 nm 的掩模 CD 随入射光方位角的变化结果。(a)  $x$  方向 CD; (b)  $y$  方向 CD

Fig. 6 Mask CD with square hole size of 22 nm, period of 44 nm versus azimuth angle of incident light.

(a) CD in  $x$  direction; (b) CD in  $y$  direction

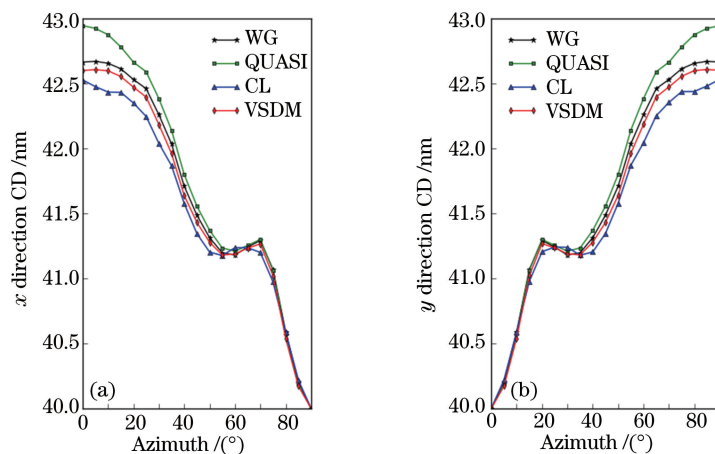


图 7 方孔尺寸为 40 nm、周期为 80 nm 的掩模 CD 随入射光方位角的变化结果。(a)  $x$  方向 CD; (b)  $y$  方向 CD

Fig. 7 Mask CD with square hole size of 40 nm, period of 80 nm versus azimuth angle of incident light.

(a) CD in  $x$  direction; (b) CD in  $y$  direction

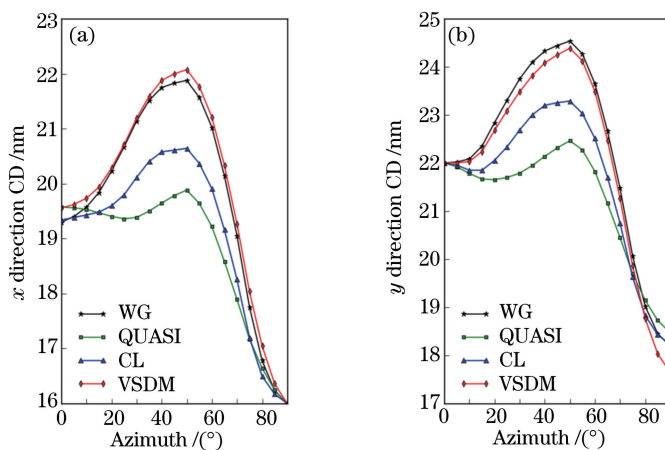


图 8  $x$  方向方孔尺寸为 16 nm, 周期为 40 nm,  $y$  方向方孔尺寸为 22 nm,

周期为 60 nm 的掩模 CD 随入射光方位角变化结果。(a)  $x$  方向 CD; (b)  $y$  方向 CD

Fig. 8 Mask CD with square hole size of 16 nm, period of 40 nm in  $x$  direction and square hole size of 22 nm, period of 60 nm in  $y$  direction versus azimuth angle of incident light. (a) CD in  $x$  direction; (b) CD in  $y$  direction

二维图形边界所在线的严格仿真及各线交界一维点的严格仿真,其三维衍射谱为各二维线衍射谱、一维点衍射谱及掩模面反射率线性相加的结果,其结果通常存在一个常数误差<sup>[24]</sup>,如图 4、图 5 所示。由于这种分解涉及两个以上的多个二维严格仿真,其速度低于 VSDM。然而,VSDM 目前适用于仅含矩形图形的掩模,对形状更复杂的掩模图形,后续工作将采取一定的区域分解策略进行仿真,即将复杂图形分解为不同矩形子图形相加的结果,各区域并行仿真,同时对分解图形边界拼接处的仿真误差采用脉冲修正法进行补偿。

## 4 结 论

提出了一种基于 VSDM 的 EUVL 三维掩模仿真方法。以严格仿真方法为基准,对比 QUASI 法和 CL 法 2 种快速仿真方法,对仿真得到的掩模衍射谱、空间像及 CD 在仿真精度及速度上进行了比较,验证了 VSDM 的优越性。仿真结果表明,VSDM 与严格仿真相比,对所仿真的不同周期和掩模 CD,CD 仿真精度误差小于 0.21 nm 的情况下,仿真速度提升在 60 倍以上,且随周期增大,仿真误差减小,仿真速度成指数提升。这主要是因为分离变量法将三维仿真简化为两二维仿真的乘积,通过降维提高了仿真速度,而二维仿真采用严格方法,从而保证了仿真精度,同时避免了复杂的参数标定。VSDM 方法与对比方法相比,仿真精度与仿真速度均有 1 倍以上提升。VSDM 采用分离变量原理,其物理意义清晰,不存在需要标定的模型参数,获得了较好的仿真精度与速度的平衡,尤其适合于三维矩形掩模的快速、精确仿真。

## 参 考 文 献

- [1] Wu B, Kumar A. Extreme ultraviolet lithography: a review[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2007, 25(6): 1743-1761.
- [2] Pirati A, Peeters R, Smith D, *et al.* Performance overview and outlook of EUV lithography systems[C]. SPIE, 2015, 9422: 94221P.
- [3] Turkot B, Carson S L, Lio A, *et al.* EUV progress toward HVM readiness[C]. SPIE, 2016, 9776: 977602.
- [4] Erdmann A, Fühner T, Evanschitzky P, *et al.* Optical and EUV projection lithography: a computational view[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 21-34.
- [5] Mack C, Jones R, Byers J. Computer-implemented method and carrier medium configured to generate a set of process parameters for a lithography process: US, 6968253[P]. 2005-11-22.
- [6] Cao Y, Wang X, Tu Y, *et al.* Impact of mask absorber thickness on the focus shift effect in extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2012, 30(3): 031602.
- [7] Erdmann A, Evanschitzky P, Shao F, *et al.* Predictive modeling of EUV-lithography: the role of mask, optics, and photoresist effects[C]. SPIE, 2011, 8171: 81710M.
- [8] Viala A, Erdmann A, Schmoellerb T, *et al.* Modification of boundaries conditions in the FDTD algorithm for EUV masks modeling[C]. SPIE, 2002, 4754: 890-899.
- [9] Schiavone P, Granet G, Robic J Y. Rigorous electromagnetic simulation of EUV masks: influence of the absorber properties[J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57(3): 497-503.
- [10] Zhu Z, Lucas K, Cobb J L, *et al.* Rigorous EUV mask simulator using 2D and 3D waveguide methods[C]. SPIE, 2003, 5037: 494-503.
- [11] Evanschitzky P, Erdmann A. Three dimensional EUV simulations - a new mask near field and imaging simulation system[C]. SPIE, 2005, 5992: 59925B.
- [12] Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang. 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. 极紫外光刻接触孔掩模的快速仿真计算[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0705001.
- [13] Lam M C, Neureuther A R. Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks[C]. SPIE, 2006, 6349: 63492H.
- [14] Tirapu-Azpiroz J, Burchard P, Yablonovitch E. Boundary layer model to account for thick mask effects in photolithography[C]. SPIE, 2003, 5040: 1611-1619.
- [15] 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.
- [16] Clifford C H, Neureuthe A R. Smoothing based model for images of isolated buried EUV multilayer defects[C]. SPIE,



- 2008, 6921: 692119.
- [17] Clifford C H, Neureuther A R. Fast simulation methods and modeling for extreme ultraviolet masks with buried defects [J]. *Journal of Micro/Nanolithography Mems & Moems*, 2009, 8(3): 031402.
- [18] Lam M C, Neureuther A R. Fast simulation methods for defective EUV mask blank inspection[C]. SPIE, 2004, 5567: 741-750.
- [19] Evanschitzky P, Erdmann A, Besacier M, *et al.* Simulation of extreme ultraviolet masks with defective multilayers [C]. SPIE, 2003, 5130: 1035-1045.
- [20] Liu Xiaolei, Li Sikun, Wang Xiangzhao. 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.
- [21] Adam K. Domain decomposition methods for the electromagnetic simulation of scattering from three-dimensional structures with applications in lithography[D]. Berkeley: University of California, 2001.
- [22] Erdmann A, Kalus C K, Schmoeller T, *et al.* Efficient simulation of light diffraction from 3-dimensional EUV-masks using field decomposition techniques[C]. SPIE, 2003, 5037: 482-493.
- [23] Mailfert J, Zuniga C, Philipsen V, *et al.* 3D mask modeling for EUV lithography[C]. SPIE, 2012, 8322: 832224.
- [24] Evanschitzky P, Erdmann A. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method[C]. SPIE, 2007, 6533: 65330Y.
- [25] Wang Shifan. Theory and application of information optics[M]. Beijing: BUPT Press, 2003: 31-32.  
王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003: 31-32.
- [26] Lucas K, Tanabe H, Strojwas J. Efficient and rigorous three-dimensional model for optical lithography simulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(11): 2187-2199.
- [27] Zhou Xinjiang. Theory and method for fast simulation of optical image in lithography based on the method of separation of variables[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 40-43.  
周新江. 基于变量分离理论的光刻成像快速计算方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 40-43.
- [28] Fühner T, Schnattinger T, Ardelean G. Dr. LiTHO-a development and research lithography simulator[C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.