

# 极紫外投影光刻掩模衍射简化模型的研究

曹宇婷<sup>1,2</sup> 王向朝<sup>1,2</sup> 邱自成<sup>1,2</sup> 彭 勃<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> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 建立一个计算极紫外投影光刻掩模衍射场的简化模型, 在该简化模型中通过对入射光场进行追迹推导衍射场分布的解析表达式。简化模型中的掩模包括多层膜结构和吸收层结构两部分。多层膜结构的衍射近似为镜面反射。吸收层结构的衍射利用薄掩模修正模型进行分析, 即将吸收层等效为位于某等效面上的薄掩模, 引入边界点脉冲描述边界衍射效应, 通过确定等效面的位置和边界点脉冲的振幅和相位, 对经过吸收层的几何光波进行修正。吸收层结构的薄掩模修正模型能够用于计算斜入射角在  $12^\circ$  范围内变化时, 11 nm 及其以上节点的密集线条的衍射场。以计算  $6^\circ$  角斜入射、22 nm 密集线条的掩模衍射场为例, 该掩模简化模型与严格仿真计算结果相一致。

**关键词** 衍射; 极紫外投影光刻; 薄掩模模型; 时域有限差分算法

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0405001

## Simplified Model for Mask Diffraction in Extreme-Ultraviolet Projection Lithography

Cao Yuting<sup>1,2</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup> Qiu Zicheng<sup>1,2</sup> Peng Bo<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> *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** A simplified model is built to calculate the mask diffraction field in extreme-ultraviolet lithography. In this model, the analytical expression of the diffraction fields is derived by incident-ray tracing. The mask in the simplified model includes two parts, the multilayer structure and the absorber layer structure. The diffraction of multilayer is approximated as mirror reflection, and the diffraction field of the absorber layer is calculated using the modified thin mask model, where the absorber layer is equivalent to a thin mask located on a certain plane. The boundary pulse represents the boundary diffraction-wave effects. The geometric-optical wave through the absorber layer is modified by determining the position of the thin mask plane and the amplitude and phase of the boundary pulse. This modified thin mask model for the absorber layer can be used for 11 nm line/space patterns with oblique incident angles no more than  $12^\circ$ . Taking 22 nm dense lines pattern at  $6^\circ$  incident angle as an example, the results of the simplified extreme-ultraviolet lithography mask model are consistent with the rigorous simulation.

**Key words** diffraction; extreme-ultraviolet projection lithography; thin mask model; finite-difference time-domain method (FDTD)

**OCIS codes** 050.1755; 050.1950; 340.7480

## 1 引 言

极紫外(EUV)光刻掩模是 EUV 光刻成像系统的重要组成部分。不同于透射式的深紫外(DUV)

光刻掩模, EUV 掩模为反射式掩模<sup>[1]</sup>, 且掩模厚度远大于入射光波长。在斜入射光照明条件下, 掩模的厚掩模阴影效应将导致光刻成像质量的恶化, 出

**收稿日期**: 2010-09-01; **收到修改稿日期**: 2010-09-19

**基金项目**: 国家自然科学基金(60938003)和国家科技重大专项项目(2008ZX02501-006, 2009ZX02205-001)资助课题。

**作者简介**: 曹宇婷(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事极紫外投影光刻掩模成像技术方面的研究。

E-mail: cytoe@163.com

**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方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

现图形位置偏移、图形特征尺寸偏差等掩模像差现象<sup>[2,3]</sup>。随着光刻特征尺寸的不断缩小,EUV光刻成像系统工艺容限的要求越来越严格,斜入射条件下的厚掩模阴影效应在光刻成像系统中不容忽视<sup>[4,5]</sup>。

传统的掩模衍射可基于基尔霍夫标量衍射理论采用薄掩模近似模型进行计算<sup>[6,7]</sup>,即假设掩模是具有一定透射系数的无限薄层,该方法忽略了掩模的厚度和边界衍射效应,在EUV光刻反射式掩模衍射中并不适用,需要采用严格仿真计算[如时域有限差分算法(FDTD)]来获得掩模衍射场的精确分布<sup>[8]</sup>。但严格仿真计算速度慢,计算量大,不利于大面积的掩模图形仿真和数据统计分析,为此,可建立一种简化模型快速计算掩模衍射场分布,得到与严格仿真相同的结果。

对于斜入射情况下的EUV反射式掩模,Yan等<sup>[9]</sup>针对薄掩模近似模型在图形边界处的衍射场误差,对边界周围的衍射场进行校正,校正值和校正区域的大小通过与严格仿真衍射场的频谱匹配计算获得,但该方法只能用于孤立线条、密集线条图形,在入射光角度变化时,校正参数需重新计算。EUV光刻掩模包括吸收层结构和多层膜结构(ML)两部分,可分别对其进行简化建模。无缺陷多层膜类似于镜面反射,EUV掩模的吸收层结构为透射式,类似于DUV掩模,可参考DUV掩模中的电磁场仿真简化模型如结构域分解方法(DDM)<sup>[10]</sup>、边界层(BL)方法<sup>[11]</sup>等进行简化建模。DDM方法将衍射场分为几何透射波和边界衍射波两部分,在图形边界处添加边界衍射波对薄掩模近似模型进行修正,但需考虑边界衍射波随入射光方向和偏振态的变化。BL模型在图形周围引入具有复透射系数的图形BL对薄掩模进行修正,BL的厚度与入射角有关,可基于物理衍射理论(PTD)对BL模型进行解释分析<sup>[12]</sup>,但该方法只能用于掩模的远场成像校正。

由于EUV光刻数值孔径(NA)比较小(0.4左右),掩模吸收层结构的建模在小角度范围内满足衍射场近场频谱匹配即可,且掩模图形特征尺寸远大于入射光波长,相邻边界间的串扰小。本文即根据EUV掩模吸收层结构特点,将吸收层等效为位于某等效面上的薄掩模,采用边界点光源发出的球面波代表边界衍射的影响,对吸收层薄掩模近似模型进行修正,并结合ML的镜面反射,得到描述EUV掩模衍射场的简化建模。

## 2 理论建模

### 2.1 EUV掩模与薄掩模近似

用于分析光衍射效应的边界衍射波思想由Young<sup>[7]</sup>提出,他将衍射场分为几何光波和边界衍射波两部分,几何光波直接穿过衍射屏,边界衍射波类似于沿边界线光源发出的柱面波。标量衍射理论中的薄掩模近似只考虑了几何光波,忽略了边界衍射波的影响。以尺寸归一化的周期光栅为例,薄掩模近似模型中的透射函数为

$$T(x) = \begin{cases} t_a & 0 < x < f \\ t_b & f < x < 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $t_a, t_b$ 为几何波透射系数, $f$ 为光栅占空比, $f = C_D/\Lambda, C_D, \Lambda$ 分别为掩模光栅的图形特征尺寸和周期,如图1(a)所示。

EUV掩模为反射式掩模,由ML和吸收层结构两部分组成,如图1(b)所示。斜入射光经吸收层衍射,再经多层膜反射,最后再次经过吸收层衍射得到掩模衍射场。由于掩模结构、材料和厚度的影响,薄掩模近似模型不能适用于EUV掩模衍射场的分析。对通过吸收层和ML的入射光进行追迹,可分别对两者进行建模,考虑边界衍射波和吸收层厚度的效应,得到修正后的薄掩模近似模型能够代替FDTD方法分析EUV掩模的衍射场分布。

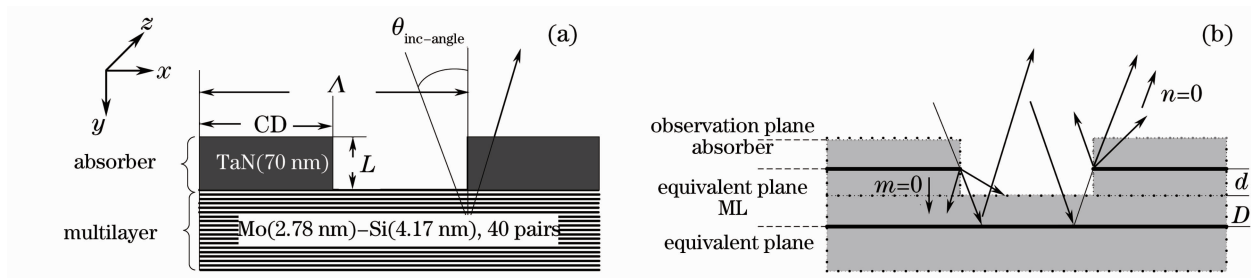


图1 EUV掩模示意图。(a)掩模结构;(b)掩模衍射简化模型

Fig. 1 Diagram of EUV mask. (a) mask structure; (b) simplified model for the mask diffraction

## 2.2 吸收层结构的薄掩模修正模型

### 2.2.1 模型参数

根据严格衍射理论,边界衍射现象类似于沿边界发出的柱面波(二维情况下对应为球面波),衍射场的严格解或高频近似解形式一般针对的是特定的材料和结构,如 Sommerfeld<sup>[7]</sup>无限薄良导体半平面结构。EUV 掩模吸收层的厚度和材料的不连续边界会引起复杂的衍射现象,目前还没有严格的解析表达式能够对此现象进行描述,只能采用等效近似的方法进行分析。沿边界发出的球面波对应于近场衍射的边界点脉冲,可采用边界点脉冲代表边界衍射的影响<sup>[13]</sup>,对吸收层衍射场薄掩模近似模型中的几何波进行校正。经边界脉冲修正后的吸收层薄掩模修正模型透射函数为

$$T'(x) = T(x) + A\exp(i\phi)\delta(x) + A\exp(i\phi)\delta(x-f), \quad (2)$$

式中  $A, \phi$  为边界点脉冲的幅值和相位。相应的衍射谱为

$$b_m = \int_0^1 T'(x) \exp(-i2\pi mx) dx = ft_a \exp(-i\pi mf) \text{sinc}(mf) + (1-f)t_b \times \exp[-i\pi m(1+f)] \text{sinc}[m(1-f)] + 2A\exp(i\phi) \times \exp(-i\pi mf) \cos(\pi mf), \quad (3)$$

式中  $m$  为衍射级次。采用严格仿真计算 FDTD 方法同样可得到吸收层结构的衍射谱,频谱匹配即通过这两种方法得到的衍射谱应相同,匹配误差定义

为在所关心的衍射角范围内各级衍射谱的均方根误差(RMS)。

一次正入射情况下的 FDTD 仿真即可计算出薄掩模修正模型透射函数中的 3 个参数:

$$t_a = b_0 - b_2 + i \frac{\pi}{2} b_1, \quad (4)$$

$$t_b = b_0 - b_2 - i \frac{\pi}{2} b_1, \quad (5)$$

$$A\exp(i\phi) = \frac{1}{2}b_2, \quad (6)$$

低阶衍射谱值  $b_0, b_1, b_2$  由 FDTD 计算得到。虽然上述方法得到的模型参数只保证了 0, 1, 2 级衍射谱相同,但由于衍射谱的对称性及图形横向尺寸较大的原因,其他较低衍射级次的衍射谱幅值同样拟合得比较好,如图 2(a) 所示, FDTD 仿真结构参数如表 1 所示,在 TE 偏振(电场矢量沿  $z$  方向,垂直于入射面)、单位平面波正入射条件下,  $f=0.5, \Delta=1300$  nm 的吸收层结构的衍射场近场频谱和 FDTD 严格仿真计算得到的近场频谱相匹配。为便于说明问题,图 2(a) 中衍射谱幅值采用了对数坐标。占空比为  $f=0.5$  的掩模图形中,严格仿真表明其吸收层结构的衍射谱偶级次项在  $20^\circ$  范围内的幅值近似为常数,相应地,薄掩模修正模型中的边界脉冲主要修正了薄掩模近似模型(未加边界脉冲时)频谱的零点值,偶级次衍射项幅值由零均变为了  $2A$ 。图 2(a) 中  $20^\circ$  范围内衍射谱幅值相对误差低于 4%。

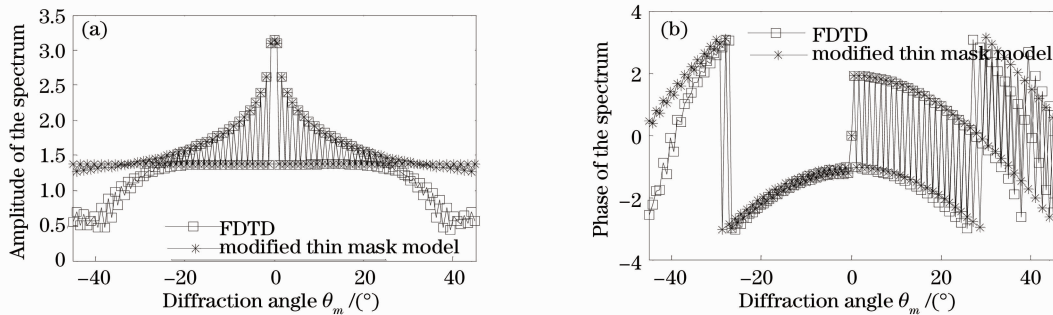


图 2 吸收层结构的衍射谱匹配。(a) 衍射谱幅值, (b) 衍射谱相位

Fig. 2 Spectrum matching of the mask absorber layer. (a) amplitude, (b) phase of the diffraction spectrum

表 1 EUV 掩模结构参数

Table 1 Structure parameters for EUV mask

	Material	Thickness / nm	Refractive index
Multilayer (40 pairs)	Si	4.17	0.9990+0.0018i
	Mo	2.78	0.9238+0.0064i
Absorber	TaN	70	0.9260+0.0436i
Wavelength / nm	13.5		

在将吸收层结构等效为薄掩模时,还需考虑吸收层厚度的影响,即存在某等效面位置  $d$ , 频谱  $b_m$  由等效面位置继续传播一段距离到观察面上,才能满足相位谱的匹配,  $d$  参数值由频谱匹配在  $20^\circ$  范围内的 RMS 最小来确定。相位再传播一段距离,相当于每一级次的衍射光需乘以一附加因子  $\exp(i\phi_m)$ ,  $\phi_m = (2\pi/\lambda)dcos\theta_m$ ,  $\theta_m$  为  $m$  级衍射光的衍射角。

表 1 条件下的模型参数计算结果为  $A\exp(i\phi) = 0.0036\exp(-i1.2394)$ ,  $t_a = 0.2396\exp(-i2.4086)$ ,  $t_b = 1$  等效面位置(即相位传播距离) $d = 35$  nm 左右时频谱匹配误差 RMS 最小。在模型应用中已将  $t_a$ ,  $A\exp(i\phi)$  经  $t_b$  归一化, 不影响最终结果。 $t_a, t_b$  的相位差也可通过电场在衰减介质中传播的表达式推算出, 即  $\Delta\phi = (2\pi)/\lambda(n_{\text{TaN}} - n_{\text{air}})L_{\text{TaN}}$ , 其中  $n_{\text{TaN}}, n_{\text{air}}$  分别为吸收层 TaN 材料和真空折射率,  $L_{\text{TaN}}$  为吸收层厚度, 计算得到  $\Delta\phi \approx -2.4$ , 该值与仿真结果相符。

根据严格衍射波理论, 边界衍射波的大小与入射光偏振态和材料属性有关, 与掩模图形尺寸大小无关<sup>[7]</sup>。经一次 FDTD 频谱匹配计算得到的模型参数可用于其他掩模图形尺寸中进行衍射场的计算。

### 2.2.2 斜入射条件下的霍普金斯(Hopkins)频移

吸收层结构的薄掩模修正模型同样适用于斜入射时的衍射场计算。由光栅方程可知, 斜入射时各级衍射光的衍射方向为

$$\sin \theta_m = \sin \theta_{\text{inc\_angle}} + m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (7)$$

式中  $\theta_{\text{inc\_angle}}$  为入射光角度。衍射效率定义为  $m$  级衍射光强  $I_m$  与入射光光强  $I_0$  之比  $\eta_m = I_m/I_0$ 。

Hopkins 频移中假设衍射光强度、相位和偏振态的变化随入射角的变化很小, 即斜入射时的衍射谱可以通过正入射衍射谱的简单频移实现。在 DUV 光刻成像中, 斜入射角比较大、图形尺寸较小的情况下 Hopkins 频移并不适用<sup>[14]</sup>。对于 EUV 光刻掩模吸收层结构, 图形尺寸远大于入射波长, 相邻边界间的串扰很小, 改变入射光角度时得到的衍射效率如图 3 所示。从图 3 可知, 即使对于特征尺寸很小( $C_D = 44$  nm)的光刻掩模图形, 吸收层结构的各级衍射光衍射效率在  $20^\circ$  入射角范围内几乎是不变的, 即该范围内衍射谱强度满足 Hopkins 频移的近似条件(对于 EUV 光刻该范围已足够)。因此, 斜

入射时的衍射谱也可以通过薄掩模修正模型计算, 只需将正入射时的衍射谱 Hopkins 频移至相应的入射角度再结合纵向的相位传播距离  $d$  即可得到斜入射时的衍射谱。

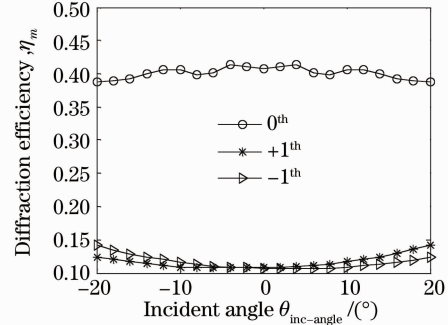


图 3 衍射效率随入射光角度的变化  
Fig. 3 Diffraction efficiencies versus the incident angle

综上所述, EUV 掩模吸收层结构可以等效为位于某等效面上的薄掩模, 采用边界点脉冲代表边界衍射波的影响, 对薄掩模近似模型进行修正。正入射时经过一次 FDTD 仿真计算, 该薄掩模修正模型的模型参数即可通过频谱匹配计算获得。模型参数不随掩模特征图形尺寸而变化, 能用于其他掩模结构中, 且斜入射时的衍射场可通过 Hopkins 频移得到。

### 2.3 多层膜结构的反射模型

EUV 掩模 ML 由 40 对以 Si/Mo 为材料的双层膜组成, 在表 1 的结构参数下, ML 反射系数随入射光角度的变化如图 4 所示<sup>[15]</sup>。ML 的反射具有一定的滤波作用, 在一定角度范围内反射系数可近似为常数, 其他情况下反射系数骤减, 可近似为零。滤波范围与 ML 结构和入射光波长有关<sup>[16]</sup>, 表 1 的结构参数下 ML 滤波作用范围可取为  $15^\circ$  左右。在滤波范围内, ML 可近似为镜面反射, 反射面的位置由入射光经过 ML 后相位的改变量决定。

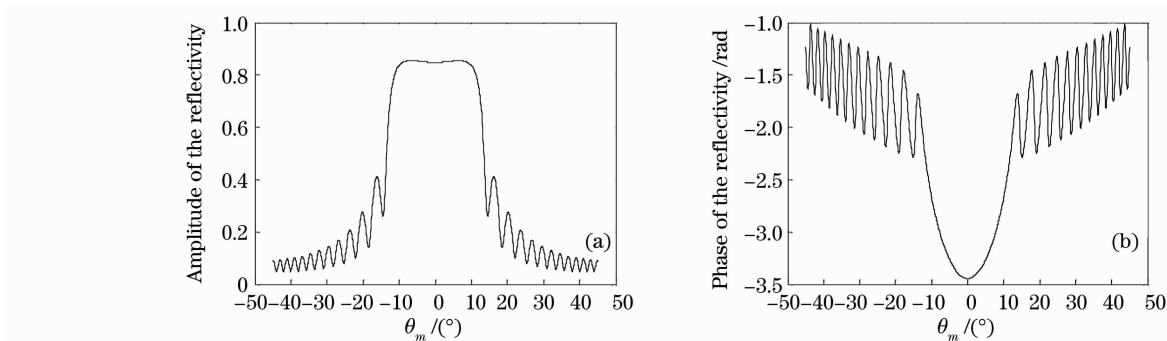


图 4 多层膜反射系数随入射光角度的变化。(a) 振幅, (b) 相位  
Fig. 4 ML reflectivity changes with the incident angle. (a) amplitude, (b) phase

## 2.4 EUV 光刻掩模衍射场的简化模型

将吸收层结构的薄掩模修正模型与 EUV ML 反射模型相结合,对入射光场进行追迹,可实现对整个 EUV 光刻掩模衍射的建模,如图 1(b)所示。在简化模型中分 3 步求解衍射场:首先斜入射光经吸收层衍射,采用薄掩模修正模型和 Hopkins 频移求解衍射场,衍射场再由吸收层等效面继续传播一段距离  $d$  到达 ML 表面;ML 采用镜面反射近似,吸收

层每个级次的衍射光入射到 ML 上对应一个相应角度下的反射系数  $r_m \exp(i\phi_m)$ ;最后,经 ML 反射后的光继续向前传播(由后面的仿真计算可知该传播距离同样为  $d$ )到达吸收层等效面上,再次采用薄掩模修正模型和 Hopkins 频移计算吸收层的衍射场,考虑从吸收层等效面到观察面的相位延迟,最终得到观察面上的衍射场分布。经推导,EUV 掩模反射光频谱可采用解析式描述为

$$f_n = \left\{ \sum_{m \in \text{filter\_ML}} [b_{m-s} \exp(i\psi_m)] \times [r_m \exp(i\phi_m)] \exp(i\psi_m) b_{n-m+s} \right\} \exp(i\psi_{n+s}), \quad (8)$$

式中  $s = \Lambda(\sin \theta_{\text{inc\_angle}}) / \lambda$  为斜入射引起的频移量,filter\_ML 为 ML 的滤波范围,注意上式中衍射级次  $m$  是以垂直掩模方向为基准,而  $n$  是以反射光主光线方向为基准[如图 1(b)所示]。

## 3 分析与讨论

### 3.1 吸收层结构的衍射

#### 3.1.1 掩模结构与模型参数

模型参数主要包括点脉冲  $A \exp(i\phi)$  的振幅和相位、几何波透射系数  $t_a, t_b$  和等效面位置  $d$ ,它们通过修正模型与 FDTD 的频谱匹配计算获得。几何波透射系数  $t_a, t_b$  与传播介质的材料及厚度有关,属几何光学范畴,这里不做详细讨论。本文主要讨论掩模

结构对点脉冲  $A \exp(i\phi)$  和等效面位置  $d$  的影响,所考察的吸收层材料分别为 Cr 和 TaN,分别在 TE, TM 偏振光照条件下对衍射场  $E_z, H_z$  分量进行分析。

边界点脉冲  $A \exp(i\phi)$  的变化曲线如图 5 所示,点脉冲值随吸收层厚度  $L$  的增加而增加。边界点脉冲代表了边界衍射波对几何波的影响,Cr 材料的边界衍射波小于 TaN,但 TaN 的吸收系数较 Cr 大,即相同吸收层厚度时 TaN 材料可以得到更好的图像对比度。由于在整个衍射谱中点脉冲的幅值比较小,吸收层厚度变化对掩模成像的影响主要反映在等效面位置参数  $d$  的变化上。

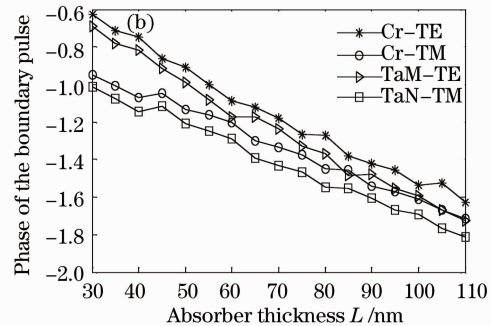
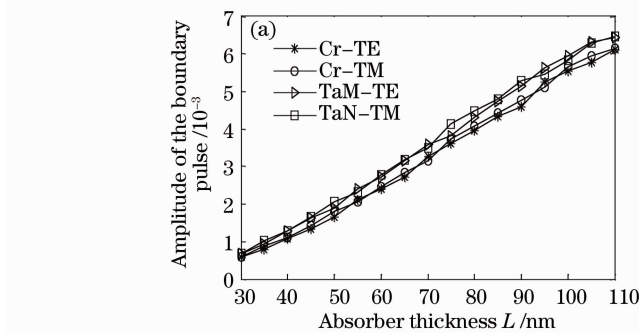


图 5 边界脉冲值  $A \exp(i\phi)$  随吸收层厚度的变化。(a)  $A$ , (b)  $\phi$

Fig. 5 Boundary pulse value  $A \exp(i\phi)$  versus the absorber thickness. (a)  $A$ , (b)  $\phi$

图 6(a)为最佳等效面位置  $d$  随吸收层厚度  $L$  变化的曲线,最佳等效面位置是通过频谱匹配 RMS 最小求得的,等效面位置对材料和入射光偏振态并不敏感,主要与吸收层厚度有关。图 6(b)为 TE 偏振 TaN 材料下 RMS 的轮廓图,横坐标为吸收层厚度,纵坐标为等效面位置,直线  $d=0.5L$  附近频谱匹配 RMS 均比较小,对最终拟合结果影响不大。

#### 3.1.2 斜入射时的衍射场分析

基于薄掩模修正模型,斜入射时吸收层结构的衍射场可结合 Hopkins 频移和纵向的相位传播计算获得。修正模型计算结果与 FDTD 比较,为便于说明问题,以最糟糕的情况为例,即仿真计算大角度斜入射条件下的小尺寸密集线条的衍射场。11 nm 节点光刻掩模密集线条图形 ( $C_D = 44 \text{ nm}$ ,  $f = 0.5$ )

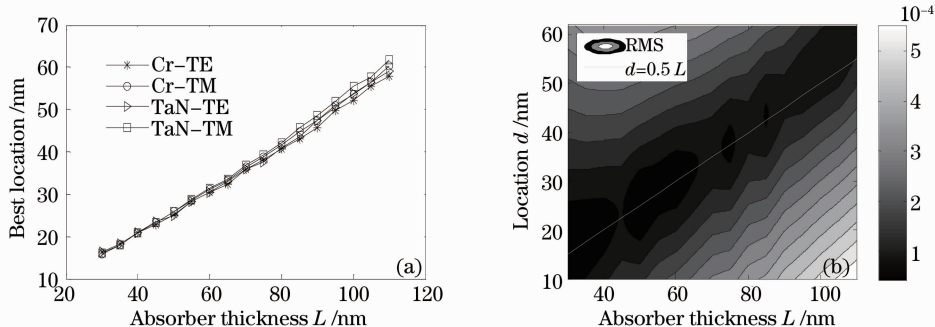


图 6 等效面位置随吸收层厚度的变化。(a)最佳等效面位置,(b)频谱匹配 RMS

Fig. 6 Equivalent plane location versus the absorber thickness. (a) best equivalent plane location, (b) RMS error of spectrum matching

在 12°斜入射时的吸收层结构衍射场分布如图 7 所示。由于 ML 滤波作用和 EUV 数值孔径的限制,吸收层薄掩模修正模型在 12°斜入射角范围内能满足频谱匹配即可。图 7 为吸收层的衍射谱经 20°滤波及傅里叶逆变换后的结果,修正模型与 FDTD 的结果基本一致,幅值误差小于 6%。

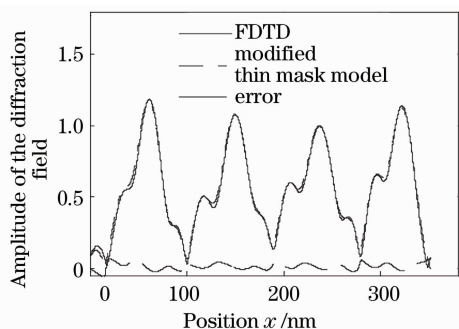


图 7 吸收层结构衍射场计算结果比较

Fig. 7 Calculation results comparison of diffraction field by the absorber structure

随着入射光角度的增大,图形尺寸的减小,修正模型与 FDTD 拟合的精度有所下降,这与相邻边界间的串扰有关。随着图形尺寸的减小和倾斜入射角的增大,相邻边界间的串扰加剧(如相邻边界二次衍射等),边界衍射波的影响不能仅仅通过一个简单的脉冲函数来表示,这也是 DUV 光刻中该修正模型失效的主要原因。在 DUV 光刻中相邻边界间隔为波长量级(193 nm 波长),只有相邻边界间隔远大于入射波长时薄掩模修正模型才适用,如 EUV 光刻。薄掩模修正模型的频谱匹配范围决定了该模型适用时的最小图形尺寸。正入射时,在近似模型中频谱第一个零点的衍射级次  $p$  通常与光栅占空比  $f$  成倒数关系,如密集线条  $p=2$ ,为进行有效的修正和频谱匹配,至少该零点项能在频谱匹配范围之内得到边界脉冲修正。由  $p/\Lambda = \sin \theta_p/\lambda$  得最小图形尺寸

$$C_{Dmin} = f \times \Lambda = \frac{1}{p} \times \Lambda = \frac{\lambda}{\sin \theta_p}, \quad (9)$$

频谱匹配范围  $\theta_p = 20^\circ$ (如图 2 所示)时最小图形尺寸  $C_{Dmin} \approx 40$  nm。

### 3.2 EUV 掩模的衍射场仿真

EUV 光刻中,入射光倾斜照明掩模,入射角一般在 6°左右。将光刻掩模简化模型中衍射谱(8)式的计算结果与 FDTD 的相比较,以 6°角斜入射、22 nm 密集线条的掩模衍射场计算为例,若  $NA=0.4$ ,则允许通过投影物镜光瞳的最大衍射角约为 6°,图 8 为反射光经 6°滤波逆变换后的电场计算结果。可见 EUV 光刻掩模简化模型与 FDTD 仿真结果相一致(幅值误差如图 8 下面的虚线所示,小于 2%),两种方法得到的图形特征尺寸差异小于 0.5 nm,简化模型可快速准确地计算掩模衍射场分布。

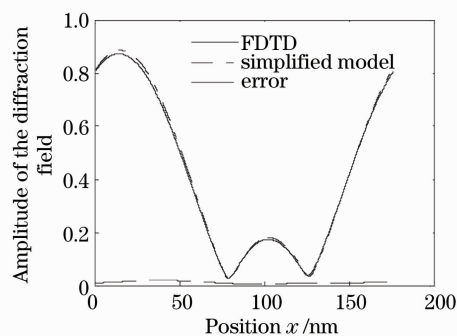


图 8 EUV 光刻掩模衍射场计算结果的比较

Fig. 8 Calculation-results comparison of diffraction field by the EUV lithography mask

## 4 结 论

通过建立 EUV 光刻掩模衍射场简化计算模型,实现了掩模衍射场分布的快速仿真计算。其中 ML 近似为镜面反射,吸收层结构等效为位于某等效面位置处的薄掩模,采用边界点脉冲代表边界衍

射波的影响,对薄掩模几何波近似模型进行了修正。模型参数通过频谱匹配计算获得,讨论了模型参数的影响因素及模型适用范围。仿真结果表明,采用 Hopkins 频移,吸收层薄掩模修正模型在  $12^\circ$  角斜入射条件下,仍能够用于 11 nm 节点密集线条衍射场的计算。

与严格仿真计算相比,光刻掩模衍射场简化计算模型在保证计算精度的同时提高了计算速度,便于进行大面积的掩模仿真计算及数据统计。掩模衍射场采用解析表达式进行简单描述,可以更好的分析和解释掩模的厚掩模阴影效应。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Xiong, Xing Tingwen. Design of extreme ultraviolet lithographic objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2520~2523  
杨 雄, 邢廷文. 极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2520~2523
- 2 H. Kang, S. Hansen. EUV simulation extension study for mask shadowing effect and its correction [C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 59213
- 3 T. Schmoeller, T. Klimpel. EUV pattern shift compensation strategies [C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69211B
- 4 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034  
苗二龙, 张 健, 谷勇强 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度非佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- 5 Yumi Nakajima. Aberration budget in extreme ultraviolet lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69211a
- 6 Jiang Wenbo, Hu Song, Zhao Lixin *et al.*. Design and analysis of amplitude photon sieves based on vector diffraction theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 428~432  
蒋文波, 胡 松, 赵立新 等. 基于矢量衍射理论的振幅型光子筛设计与分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 428~432
- 7 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 8 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on reflection characteristics of sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3272~3276  
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东 等. 亚波长光栅反射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3272~3276
- 9 Peiyang Yan. Understanding bossing curve asymmetry and focus shift effect in EUV lithography [C]. *SPIE*, 2002, **4562**: 279~287
- 10 Konstantinos Adam. Domain Decomposition Methods for the Electromagnetic Simulation of Scattering from Three-Dimensional Structures with Application in Lithography [D]. Berkeley: University of California, 2001
- 11 Xu Ma, Gonzalo R. Arce. Binary mask optimization for forward lithography based on the boundary layer model in coherent systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(7): 1687~1695
- 12 Tamer M. Tawfik, Ahmed H. Morshed, Dina Khalil. Modeling mask scattered field at oblique incidence [C]. *SPIE*, 2009, **7274**: 727433
- 13 Johannes Ruoff, Jens Timo Neumann. Polarization-induced astigmatism caused by topographic masks [C]. *SPIE*, 2007, **6730**: 67301t
- 14 Andreas Erdmann. Mask modeling in the low  $k_1$  and ultrahigh NA regime: phase and polarization effects [C]. *SPIE*, 2005, **5835**: 69~81
- 15 S. B. Bollepalli, M. Khan, F. Cerrina. Image formation in extreme ultraviolet lithography and numerical aperture effects [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol.*, 1999, **17**(6): 2992~2997
- 16 Hong Xiaogang, Xu Wengdong, Zhao Chengqiang *et al.*. Optimal design of surface plasmon resonance films structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2164~2169  
洪小刚, 徐文东, 赵成强 等. 表面等离子体共振膜系结构优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2164~2169