

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

刘晓雷^{1,2} 李思坤^{1,2} 王向朝¹

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 建立了一个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。通过等效膜层法求解含缺陷多层膜无缺陷区域和含缺陷区域不同位置的反射系数,准确快速地仿真含缺陷多层膜的衍射谱。与波导法严格仿真相比,200 nm尺寸时仿真速度提高9倍左右。与改进单平面近似模型和基于单平面近似的简化模型相比,该模型对衍射谱和空间像的仿真精度有了较大提高,并且仿真精度随缺陷尺寸和入射角的变化很小。以+1级衍射光为例,6°入射时,与改进单平面近似模型和简化模型相比,该模型对衍射谱振幅的仿真误差分别减小了77%和63%。

关键词 光学设计; 极紫外光刻; 衍射; 含缺陷多层膜; 等效膜层法; 改进单平面近似

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0622005

Simulation Model Based on Equivalent Layer Method for Defective Mask Multilayer in Extremeultra violet Lithography

Liu Xiaolei^{1,2} Li Sikun^{1,2} Wang Xiangzhao¹

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic 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 A model based on the equivalent layer method is developed to simulate defective mask multilayer in extreme ultraviolet (EUV) lithography. In this model, the defective multilayer is divided into defect free region and defective region. The reflection coefficients of two regions in different locations are computed by the equivalent layer method. The spectrum of defective multilayer can be obtained fast and accurately. Simulation time of the proposed model is 1/9 times that of the waveguide method for a multilayer of 200 nm size. Compared with advanced single surface approximation (SSA) model and the simplified model based on SSA, the simulation accuracy of the multilayer spectrum and aerial image of the proposed model is improved. The errors of simulated amplitude and aerial image are also with little fluctuation in different defect sizes and incidence angles. Taking +1 order diffraction as an example, compared with advanced SSA model and the simplified model based on SSA, in 6° incidence angle, the simulated amplitude error of the proposed model decreased as much as 77% and 63%, respectively.

Key words optical design; EUV lithography; diffraction; defective multilayer; equivalent layer method; advanced SSA

OCIS codes 220.3740; 050.1940; 050.1755; 070.7345; 070.7345

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61474129、61275207、61205102)、科技部国际科技合作专项项目(2011DFR10010)

作者简介: 刘晓雷(1987—),男,博士研究生,主要从事极紫外光刻掩模缺陷建模与仿真技术方面的研究。

E-mail: liuxl@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等方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

极紫外(EUV)光刻被誉为是最有前景的下一代光刻技术。不同于深紫外(DUV)光刻,极紫外光刻采用反射式掩模,通过由约40层的Mo/Si膜组成的多层膜反射极紫外光^[1-3]。由于目前工艺条件的限制,掩模缺陷尤其是多层膜中的缺陷成为制约极紫外光刻实现量产的主要障碍之一^[4]。在不破坏多层膜的情况下,多层膜中的缺陷难于修复,因此需要一定的方法补偿,而快速准确地仿真多层膜中的缺陷对于掩模衍射谱和成像的影响是大面积补偿的主要依据^[5]。

目前极紫外光刻掩模衍射谱仿真通常采用严格仿真方法,如时域有限差分法(FDTD)^[6]和波导法^[7]。严格仿真方法通过求解麦克斯韦方程组得到精确的掩模衍射谱分布,计算精度高,但严格仿真计算量大、计算速度慢,不利于大面积掩模仿真以及分析、补偿缺陷对掩模的影响。为提高极紫外光刻掩模衍射谱的仿真速度,提出了多种含缺陷多层膜的建模方法,如单平面近似法(SSA)^[8-9]、光线追迹法^[10-11]等。Clifford等^[9]提出的改进单平面近似模型(advanced SSA)是目前仿真速度最快的含缺陷多层膜模型。模型中采用相位突变表示缺陷的影响,但当基底缺陷较大时,缺陷造成的多层膜变形严重影响多层膜反射系数的振幅,仅通过相位突变已不能完全表示缺陷对多层膜反射光的影响。为此,本课题组提出了一种基于单平面近似的含缺陷多层膜简化模型^[12],将多层膜近似为位于多层膜等效面上的反射镜,采用相位突变和反射系数振幅衰减表示缺陷对多层膜反射系数的影响,与改进单平面近似模型相比,在仿真速度基本相当的情况下,提高了单平面近似模型的仿真精度。

基于单平面近似的模型通过牺牲仿真精度,极大地提高了仿真速度,然而多层膜上3.5 nm高度的缺陷会造成硅片面上10 nm的关键尺寸(CD)变化^[13],因此为了有效地补偿缺陷造成的空间像光强损失,需要准确地仿真含缺陷掩模的衍射谱和空间像^[14]。本文提出了一种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,通过将含缺陷多层膜划分为无缺陷区域和含缺陷区域,并采用等效膜层法求解含缺陷多层膜中不同位置的复反射系数,准确快速地仿真含缺陷多层膜的衍射谱。

2 理论建模

2.1 等效膜层法

2.1.1 单层膜反射系数

单层膜结构如图1所示,为平行平板结构,入射到单层膜的反射光和透射光存在多光束干涉。光在不同介质界面的反射系数和透射系数可根据菲涅耳公式求得[横电场(TE)偏振光入射时]:

$$r_s = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_i - \tilde{n}_t \cos \theta_t}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t}, t_s = \frac{2\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t}, \quad (1)$$

横磁场(TM)偏振光入射时

$$r_p = \frac{-\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t}, t_p = \frac{2\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t}, \quad (2)$$

式中 \tilde{n}_i 、 \tilde{n}_t 为复折射率, θ_i 、 θ_t 为入射角和折射角,满足折射定律 $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$, n_i 、 n_t 分别为复折射率 \tilde{n}_i 、 \tilde{n}_t 的实部。

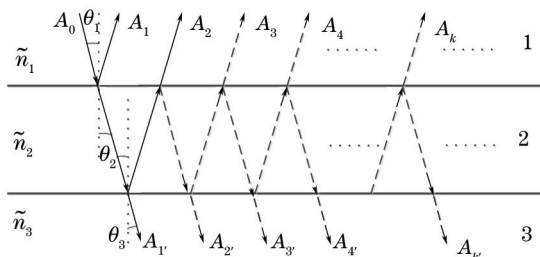


图1 单层膜结构

Fig.1 Single layer structure

为方便计算,未作特定说明时,下文中入射光均为TE偏振光。如图1,设光由1介质入射到2介质,界面的反射系数为 r_{12} ,透射系数为 t_{12} ,同理可定义由介质2入射到介质1的参数 r_{21} 、 t_{21} ,由(1)式可得

$$r_{12} = -r_{21}, t_{12}t_{21} = 1 - r_{12}^2. \quad (3)$$

其他类似参数同此定义,根据图1可得

$$\begin{cases} A_1 = A_0 r_{12} \\ A_2 = A_0 t_{12} r_{23} s_2 t_{21} \\ A_3 = A_0 t_{12} r_{23} s_2 r_{21} r_{23} s_2 t_{21} \\ A_4 = A_0 t_{12} r_{23} s_2 (r_{21} r_{23} s_2) t_{21} \\ \vdots \\ A_k = A_0 t_{12} r_{23} s_2 (r_{21} r_{23} s_2)^{k-2} t_{21} \\ \vdots \end{cases}, \quad (4)$$

式中 s_2 为相邻两束光的相位差, d 为膜层厚度,

$$s_2 = \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} n_2 \cdot 2d \cos \theta_2). \quad (5)$$

单层膜总的反射光为所有反射光之和,即

$$A_r(\theta_1) = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_k + \dots. \quad (6)$$

结合(3)~(6)式,可得

$$A_r(\theta_1) = A_0 \cdot \frac{r_{12} + r_{23} s_2}{1 + r_{12} r_{23} s_2}. \quad (7)$$

由此得到单层膜的反射系数为

$$r(\theta_1) = \frac{r_{12} + r_{23} s_2}{1 + r_{12} r_{23} s_2}. \quad (8)$$

2.1.2 多层膜反射系数

理想的 EUV 掩模多层膜基本结构如图 2 所示,由 N 层膜组成,多层膜由 Mo/Si 双层膜构成,基底为 SiO_2 ,其他结构参数见表 1。

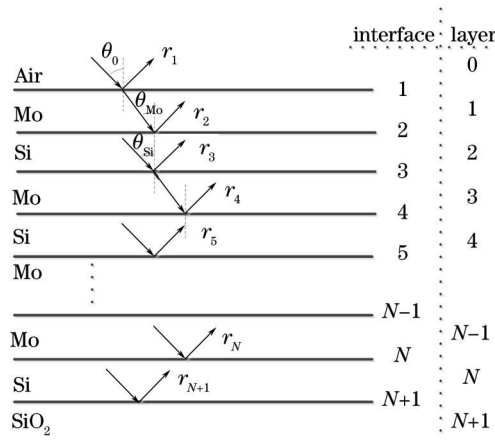


图 2 多层膜的基本结构

Fig.2 Structure of multilayer

表 1 理想多层膜结构参数

Table 1 Structure parameters of multilayer

Material	Thickness /nm	Refractive index
Air	-	1.0+j0.0
Mo	2.78	0.9238-j0.00643
Si	4.17	0.9990-j0.0018265
SiO_2	-	0.9780-j0.0108

采用等效膜层法(也称为 Vigoureux 方法^[15])计算多层膜的反射系数,从与基底相邻的第 N 层开始计算,则基底、第 N 层和第 $N-1$ 层构成一个单层膜,由(8)式可得此单层膜的反射系数为

$$\tilde{r}_N(\theta_{\text{Mo}}) = \frac{r_{\text{MoSi}} + r_{\text{SiSiO}_2} s_{\text{Si}}}{1 + r_{\text{MoSi}} r_{\text{SiSiO}_2} s_{\text{Si}}}, \quad (9)$$

式中 r_{MoSi} 为光由 Mo 层入射到 Si 层的反射系数, r_{SiSiO_2} 为光由 Si 层入射到 SiO_2 层的反射系数, s_{Si} 为光在 Si 层中以折射角 θ_{Si} 往返一次产生的相位差,且 $s_{\text{Si}} = \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{Si}} \cdot 2d_{\text{Si}} \cos \theta_{\text{Si}})$, d_{Si} 为 Si 层的厚度, θ_{Mo} 为光入射到此单

层膜上的入射角,即光在 Mo 层中的折射角。

同理,将基底和第 N 层视作整体 Γ , 则 Γ 、第 N-1 层和第 N-2 层构成一个单层膜,结合(8)式和(9)式可得此单层膜的反射系数为

$$\tilde{r}_{N-1}(\theta_{Si}) = \frac{r_{SiMo} + \tilde{r}_N s_{Mo}}{1 + r_{SiMo} \tilde{r}_N s_{Mo}} \quad (10)$$

重复此计算过程,直到第 1 层,可得到整个多层膜的反射系数为

$$\tilde{r}(\theta_0) = \frac{r_{airMo} + \tilde{r}_2 s_{Mo}}{1 + r_{airMo} \tilde{r}_2 s_{Mo}} \quad (11)$$

2.2 仿真模型

典型的含缺陷多层膜的基本结构如图 3 所示。图中所示的多层膜为平滑沉积工艺下^[16-18]得到的。假设多层膜中的缺陷为高斯型缺陷^[5],多层膜中缺陷的形态由表面缺陷形态和基底缺陷形态决定,表面缺陷形态包括高度 h_{top} 和半峰全宽 w_{top} ,基底缺陷形态包括高度 h_{bot} 和半峰全宽 w_{bot} 。为方便表示,缺陷形态参数可视为一个集合 Δ ,即

$$\Delta = (h_{top}, w_{top}; h_{bot}, w_{bot}), \quad (12)$$

已知缺陷形态参数 Δ 后即可得到整个多层膜的结构^[16]。

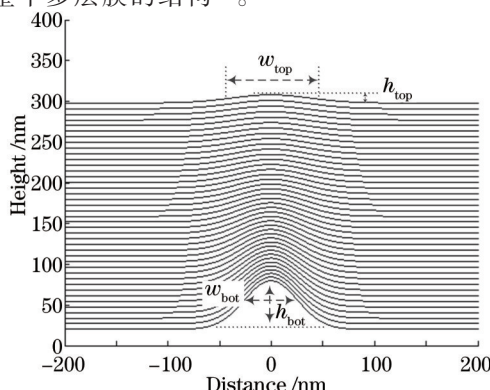


图 3 含缺陷多层膜及缺陷形态参数

Fig.3 Defective multilayer structure and defect parameters

含缺陷多层膜中,缺陷主要影响多层膜的不同位置的复反射系数,并且缺陷的影响范围以缺陷中心位置为中心,在 2 倍的表面缺陷半峰全宽范围内^[12,19]。为了得到含缺陷多层膜的不同位置的复反射系数,将含缺陷多层膜划分为无缺陷区域 S_1 和含缺陷区域 S_2 两部分,如图 4(a)所示。含缺陷区域为缺陷的影响范围,剩余部分为无缺陷区域。将含缺陷区域分割为 M 等份,并且设每小份多层膜的各层之间为平行分布^[20],如图 4(b)所示。通过等效膜层法可得到含缺陷多层膜的各等份的复反射系数,即可得到含缺陷多层膜的衍射谱。在计算复反射系数时,入射到每小份多层膜上的入射角根据多层膜表面形态作相应调整。入射角调整量由各小份多层膜中心位置的斜率决定。

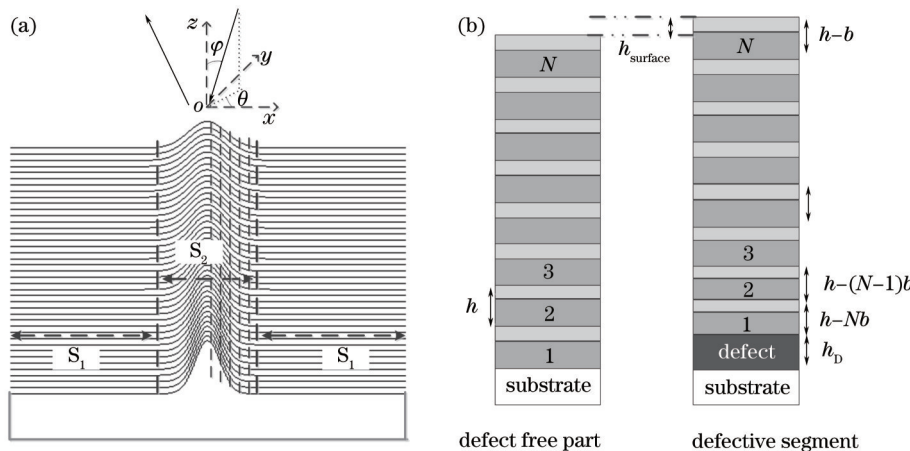


图 4 (a) 含缺陷多层膜的不同区域划分; (b) 无缺陷多层膜和含缺陷多层膜的膜厚分布

Fig.4 (a) Partition of defective multilayer; (b) thickness distribution of layer for defect free part and defective segment

入射光方向采用方向余弦表示,即 $(\alpha_m, \beta_m) = (\sin\varphi \cos\theta, \sin\varphi \sin\theta)$, α_m 和 β_m 分别为入射光方向与 x 轴方向和 y 轴方向夹角的方向余弦,其中入射角 φ 和方位角 θ 分别为入射光方向与 z 轴的夹角和入射光方向投影于 xoy 平面与 x 轴的夹角。对平面波入射时,含缺陷多层膜衍射谱为

$$G(\alpha_n) = \int_{S_1} \tilde{A}_0 \cdot P(x, \phi) \cdot \tilde{r}(\phi) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx = \int_{S_1} \tilde{A}_0 \cdot \tilde{r}_0(\phi) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx + \int_{S_2} \tilde{A}_0 \cdot P(x, \phi) \cdot \tilde{r}(x, \phi_x) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx, \quad (13)$$

式中 \tilde{A}_0 为入射光的复振幅, ϕ 为光入射到多层膜上的入射角,并且 $\cos\phi = \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}$, ϕ_x 为含缺陷部分随多层膜表面形态变化的入射角。 $\tilde{r}_0(\phi)$ 和 $\tilde{r}(x, \phi_x)$ 分别为多层膜的无缺陷区域 S_1 的复反射系数和含缺陷区域 S_2 内与位置有关的复反射系数。 α_n 为多层膜衍射谱 n 级衍射光的方向余弦。 $P(x, \phi)$ 为表面缺陷形态造成的入射光到达多层膜表面的往返相位差,且

$$P(x, \phi) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2h_{\text{surface}}(x) \cos\phi\right], \quad (14)$$

式中 $h_{\text{surface}}(x)$ 为含缺陷多层膜表面缺陷不同位置的高度,且无缺陷区域的高度为0,在单个等分间隔内, h_{surface} 为常数,如图4(b)所示。因此将含缺陷区域 S_2 分割为 M 份后,(13)式中的 S_2 积分部分可化简为

$$\int_{S_2} \tilde{A}_0 \cdot P(x, \phi) \cdot \tilde{r}(x, \phi_x) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx = \sum_{i=1}^M \int_{S_{2i}} \tilde{A}_0 \cdot P(\phi) \cdot \tilde{r}_i(\phi_i) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx. \quad (15)$$

3 仿真结果与讨论

结合(13)~(15)式得到含缺陷多层膜的衍射谱。将衍射谱输入Dr.LiTHO^[21]得到含缺陷多层膜的空间像。分别利用这里提出的仿真模型、波导法严格仿真、改进单平面近似模型及基于单平面近似的简化模型仿真含缺陷多层膜的衍射谱和空间像。对仿真结果进行对比分析验证模型的有效性。仿真采用波长为13.5 nm的TE偏振光圆形照明光源,部分相干因子为0.5;多层膜为40层Mo/Si双层膜结构;光刻投影物镜的数值孔径为0.35,放大倍率为1/4。这里提到的缺陷形态尺寸为掩模面尺寸,多层膜的尺寸为硅片面尺寸。

3.1 最佳等分间隔

在计算多层膜含缺陷区域的不同位置的复反射系数时,将含缺陷区域等分为 M 份,分别计算每小份多层膜的复反射系数。不同的等分间隔得到的模型仿真精度也不同,同时随着等分间隔的减小,模型的仿真速度也会减小。定义衍射谱衍射级次振幅仿真误差

$$E_{\text{error}} = \frac{|A_m(n) - A_r(n)|}{A_r(n)}, \quad (16)$$

式中 $A_m(n)$ 为提出的仿真模型的衍射谱 n 级衍射光的振幅, $A_r(n)$ 为波导法严格仿真得到的衍射谱 n 级衍射光的振幅。不同等分间隔下的零级衍射光振幅仿真误差的变化如图5所示,其中缺陷参数为基底缺陷高度40 nm,半峰全宽40 nm;表面缺陷高度3 nm,半峰全宽分别为60、90、120 nm。由图5可知,随着等分间隔的减小,零级衍射光的振幅仿真误差波动变小,在等分间隔小于3 nm时,振幅仿真误差的波动趋于平稳。因此,在考虑了仿真速度和仿真精度的情况下,最佳等分间隔为3 nm。

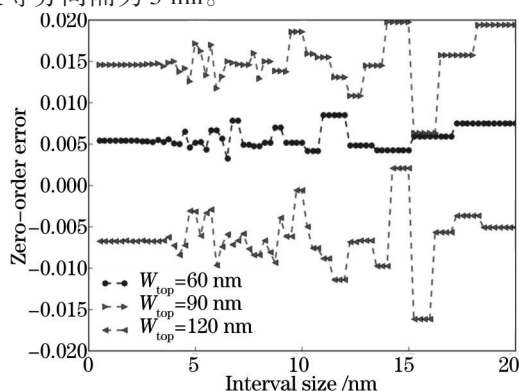


图5 不同等分间隔下的零级衍射光振幅仿真误差

Fig.5 Amplitude error of zero-order diffraction with different interval sizes

3.2 仿真结果

在等分间隔为 3 nm 时,通过提出的等效膜层法仿真模型计算含缺陷多层膜的衍射谱。图 6(a)~(c)所示分别为波导法严格仿真、等效膜层法仿真模型、基于单平面近似的简化模型和改进单平面近似模型得到的含缺陷多层膜的衍射谱和空间像。图中多层膜尺寸为 100 nm,缺陷形态为基底缺陷高度和半峰全宽为 40 nm;表面缺陷高度为 3 nm,半峰全宽为 60 nm。由图可知,基于单平面近似的简化模型和改进单平面近似模型只能计算衍射角为 $(-15^\circ, 15^\circ)^{[22-23]}$ [即衍射级次 $(-7,7)$]范围内的衍射光,而等效膜层法仿真模型可以计算与波导法严格仿真相同衍射级次范围的衍射光。由图 6(b)可知,在 $(-7,7)$ 衍射级次范围内,等效膜层法仿真模型、简化模型和改进单平面近似模型得到的衍射谱的各衍射级次的相位误差相差不大,说明三种方法对缺陷造成的衍射谱相位变化的仿真精度基本相同,而等效膜层法仿真模型得到的衍射谱的振幅仿真精度有所提高,并且该仿真模型得到的含缺陷多层膜的空间像较简化模型和改进单平面近似模型的精度更高,如图 6(c)所示,其中 ELM model 为提出的等效膜层法仿真模型。

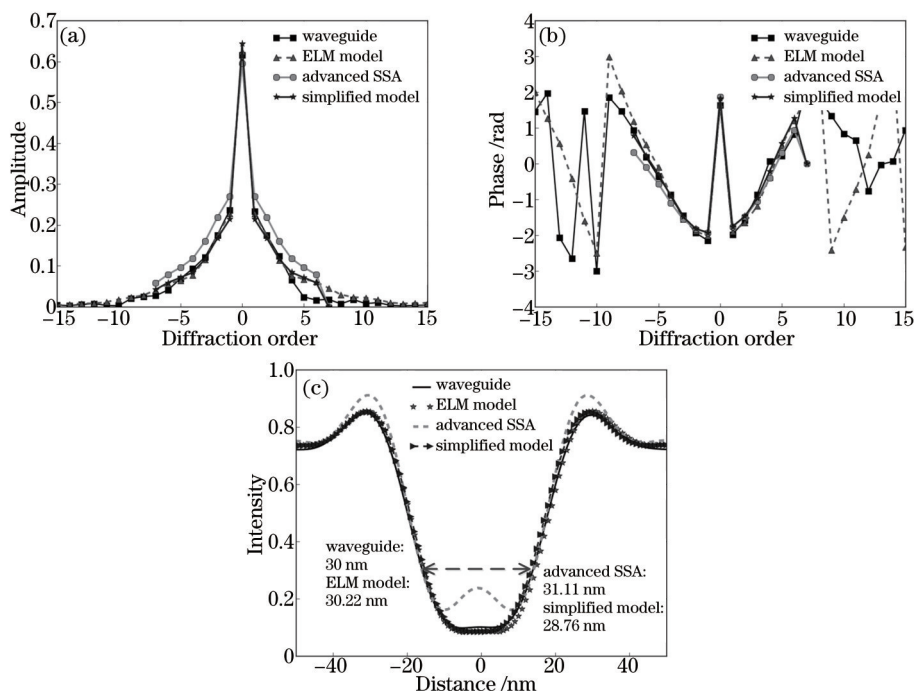


图 6 等效膜层法仿真模型、改进单平面近似模型、简化模型和波导法严格仿真得到的含缺陷多层膜衍射谱(a)振幅、(b)相位以及(c)空间像的仿真结果

Fig.6 (a) Spectrum amplitude, (b) spectrum phase and (c) aerial image from equivalent layer method model, advanced SSA model, simplified model and waveguide method for defective multilayer

图 7 为 6° 入射且 $h_{\text{bot}}=w_{\text{bot}}$ 情况下,等效膜层法仿真模型、简化模型和改进单平面近似模型得到的多层膜衍射谱中+1~+4级衍射光与严格仿真方法相比的振幅仿真误差,振幅仿真误差的定义如(16)式。图中仿真的多层膜尺寸为 100 nm,缺陷表面高度为 3 nm,半峰全宽 60 nm。由图可知,等效膜层法仿真模型与简化模型相比,部分衍射级次的精度有较大提高,与改进单平面近似模型相比,各衍射级次的仿真精度都有较大提高,并且相对于简化模型和改进单平面近似模型,等效膜层法仿真模型的振幅仿真误差随缺陷尺寸的变化波动更小。以+1级衍射光振幅仿真结果为例,如图 7(a),等效膜层法仿真模型的振幅仿真误差最大为 4.1%,而改进单平面近似模型和简化模型的最大误差分别达到 18%和 11%。与改进单平面近似模型和简化模型相比,等效膜层法仿真模型的+1级振幅仿真误差分别减小了 77%和 63%。图 7(d)中,+4级衍射光的振幅仿真误差分别减小了 84%和 61%。等效膜层法仿真模型和简化模型的+2级和+3级衍射光的振幅仿真误差基本相当,如图 7(b)、(c)所示。

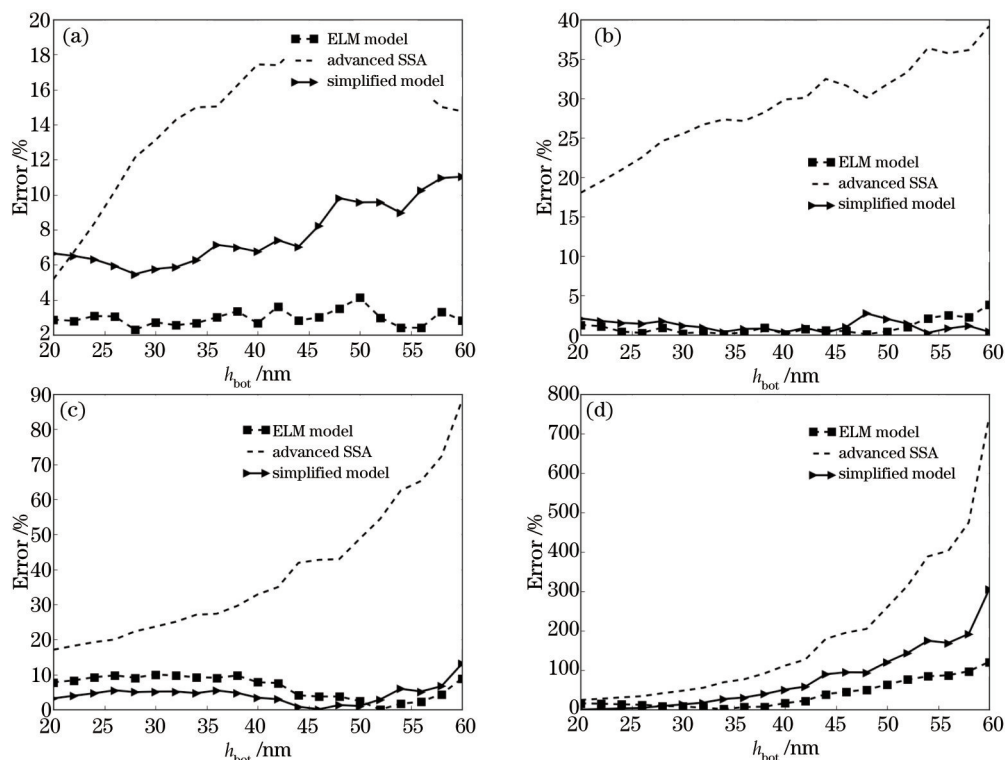


图7 不同 h_{bot} 情况下,等效膜层法仿真模型、简化模型和改进单平面近似模型得到的含缺陷多层膜衍射谱的 (a) +1级、(b) +2级、(c) +3级和(d) +4级衍射光的振幅仿真误差

Fig.7 Amplitude errors of (a) +1, (b) +2, (c) +3 and (d) +4 diffraction orders of spectrum from equivalent layer method model, simplified model and advanced SSA versus h_{bot}

图8为由等效膜层法仿真模型、简化模型、改进单平面近似模型和波导法计算得到的空间像的 Dip 结果, Dip^[5]的定义为

$$D_{ip} = \frac{I_{background} - I_{center}}{I_{background}}, \quad (17)$$

式中 $I_{background}$ 为无缺陷区域的空间像光强, I_{center} 为含缺陷区域中心的空间像光强,如图8(a)所示。由图8(b)可知,相比于改进单平面近似模型,等效膜层法仿真模型与严格仿真相比的 Dip 误差更小。与改进单平面近似模型和简化模型相比,等效膜层法仿真模型的 Dip 值随基底缺陷尺寸的变化趋势与严格仿真更加一致。图7和图8的结果都显示出在基底缺陷较小时,改进单平面近似模型和简化模型的误差都较小,尤其是简化模型。但随着基底缺陷尺寸的增大,简化模型的误差也迅速增大,而等效膜层法仿真模型的衍射级次的振幅仿真误差和 Dip 误差受缺陷尺寸变化影响很小。对于不同角度的入射光的 Dip 结果如图9所示,缺陷形态参

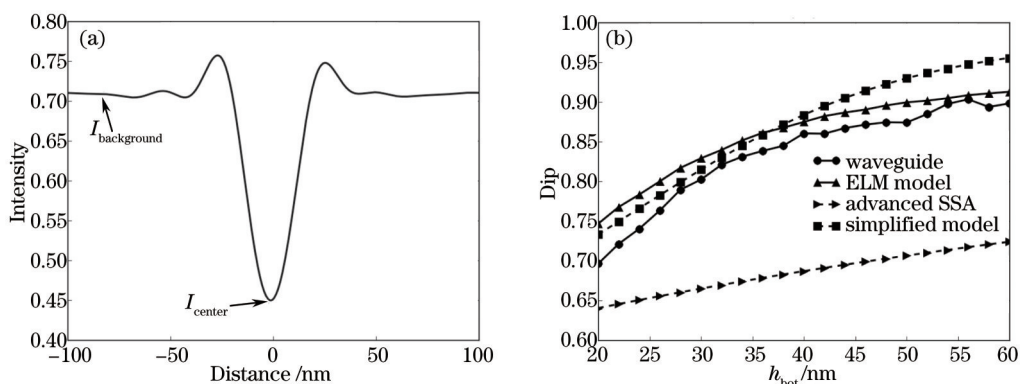


图8 (a) Dip 的定义;(b) 不同基底缺陷尺寸下,等效膜层法仿真模型、改进单平面近似模型、简化模型和波导法严格仿真得到的 Dip 结果比较

Fig.8 (a) Definition of Dip; (b) comparison of Dip among equivalent layer method model, advanced SSA, simplified model and waveguide method with different parameters of bottom defect

数与图6相同。不同入射角情况下,等效膜层法仿真模型的Dip结果与波导法严格仿真的结果具有相同的变化趋势。改进单平面近似模型和简化模型的结果与严格仿真的结果偏差较大。这主要是由于单平面近似是一个经验方法,缺乏实际的物理意义,在计算多层膜反射系数时,未考虑不同入射角的反射系数变化。

不同仿真方法的仿真时间比较如图10所示,通过不同尺寸含缺陷多层膜衍射谱的仿真时间比较不同仿真方法的仿真速度。如图所示,在多层膜尺寸为200 nm时,等效膜层法仿真模型的仿真速度与严格仿真相比,提高9倍左右。但是相比于改进单平面近似模型,等效膜层法仿真模型的仿真时间增加了1倍,改进单平面近似模型的仿真时间为4.1 s,而等效膜层法仿真模型的仿真时间为9.1 s。这主要是由于等效膜层法计算反射系数的时间大于单平面近似,并且等效膜层法仿真模型计算的衍射谱衍射级次是改进单平面近似模型的两倍。虽然仿真速度略小于改进单平面近似模型,但是等效膜层法仿真模型的衍射谱和空间像的仿真精度都有很大提高,而且在缺陷补偿计算过程中,仿真的掩模区域通常为受缺陷影响的掩模图形区域^[14],因此等效膜层法仿真模型的仿真速度可以满足缺陷补偿中衍射谱的仿真需求。

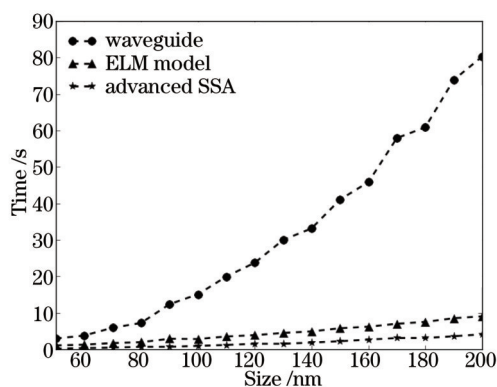


图9 不同入射角情况下的Dip结果

Fig.9 Comparison of Dip with different incidence angles

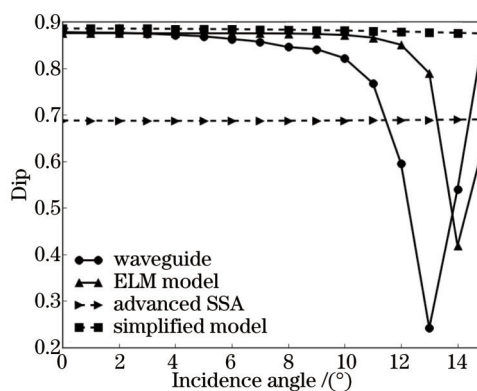


图10 仿真时间随多层膜尺寸的变化

Fig.10 Simulation time versus sizes of multilayer

4 结 论

本文提出了一种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,实现了含缺陷多层膜衍射谱的准确、快速仿真。该模型与波导法严格仿真相比,200 nm尺寸时仿真速度提高9倍左右。该模型与简化模型和改进单平面近似模型相比,仿真精度有了较大提高,并且仿真精度随缺陷尺寸和入射角的变化很小。6°入射时,与改进单平面近似模型和简化模型相比,该模型的+1级衍射光的振幅仿真误差分别减小了77%和63%,+4级衍射光的振幅仿真误差分别减小了84%和61%。虽然该模型的仿真速度略小于改进单平面近似模型,但由于在缺陷补偿计算过程中,仿真的掩模区域通常为受缺陷影响的掩模图形区域,因此该模型的仿真速度可以满足缺陷补偿中衍射谱的仿真需求。

参 考 文 献

- 1 R Peeters, S Lok, E Alphen, *et al.*. ASML's NXE platform performance and volume introduction[C]. SPIE, 2013, 8679: 86791F.
- 2 R Peeters, S Lok, J Mallman, *et al.*. EUV lithography: NXE platform performance overview[C]. SPIE, 2014, 9048: 90481J.
- 3 Du Yuchan, Li Hailiang, Shi Lina, *et al.*. Integrated development of extreme ultraviolet lithography mask at 32 nm node[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034002.
- 杜宇禅, 李海亮, 史丽娜, 等. 32 nm节点极紫外光刻掩模的集成研制[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034002.
- 4 A Erdmann, P Evanschitzky, T Bret, *et al.*. Analysis of EUV mask multilayer defect printing characteristics[C]. SPIE, 2012, 8322: 83220E.
- 5 C H Clifford, A R Neureuther. Smoothing based model for images of isolated buried EUV multilayer defects[C]. SPIE, 2008, 6921: 692119.
- 6 T Pistor, Y Deng, A Neureuther. Extreme ultraviolet mask defect simulation: low-profile defects[J]. J Vac Sci Technol B, 2000, 18(6): 2926-2929.
- 7 P Evanschitzky, A Erdmann. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method[C]. SPIE, 2007, 6533: 65330Y.

- 8 C H Clifford, A R Neureuther. Fast simulation of buried EUV mask defect interaction with absorber features[C]. SPIE, 2007, 6517: 65170A.
- 9 E M Gullikson, C Cerjan, D G Stearns, *et al.*. Practical approach for modeling extreme ultraviolet lithography mask defects[J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(1): 81–86.
- 10 C Sambale, T Schmoeller, A Erdmann, *et al.*. Rigorous simulation of defective EUV multilayer masks[C]. SPIE, 2003, 5256: 1239–1248.
- 11 M C Lam, A R Neureuther. Fast simulation methods for defective EUV mask blank inspection[C]. SPIE, 2004, 5567: 741–750.
- 12 Liu Xiaolei, Li Sikun, Wang Xiangzhao. 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.
- 13 C H Clifford. Simulation and Compensation Methods for EUV Lithography Masks with Buried Defects[D]. Berkeley: University of California, 2010: 19–20.
- 14 A Erdmann, P Evanschitzky, T Bret, *et al.*. Modeling strategies for EUV mask multilayer defect dispositioning and repair[C]. SPIE, 2013, 8679: 86790Y.
- 15 J M Vigoureux, F Baïda. Critical size of multi-resonant optical tunnel structures. Application to nonradiative effects[J]. Opt Commun, 1993, 101(5–6): 297–302.
- 16 T Hashimoto, H Yamanashi, M Sugawara, *et al.*. Lithographic characterization of EUVL mask blank defects[C]. SPIE, 2004, 5374: 740–750.
- 17 D G Stearns, P B Mirkarimi, E Spiller. Localized defects in multilayer coatings[J]. Thin Solid Films, 2004, 446(1): 37–49.
- 18 P Naulleau, K A Goldberg, E H Anderson, *et al.*. Lithographic characterization of the printability of programmed extreme ultraviolet substrate defects[J]. J Vac Sci Technol B, 2003, 21(4): 1286–1290.
- 19 E M Gullikson, E Tejnil, T Liang, *et al.*. EUVL defect printability at the 32 nm Node[C]. SPIE, 2004, 5374: 791–796.
- 20 M Ito, T Ogawa, K Otaki, *et al.*. Simulation of multilayer defects in extreme ultraviolet masks[J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40(4R): 2549–2553.
- 21 T Fühner, T Schnattinger, G Ardelean, *et al.*. Dr.LiTHO – a development and research lithography simulator[C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.
- 22 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Qiu Zicheng, *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 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang, *et al.*. Analysis of mask shadowing effects in extreme-ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0805001.
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.

栏目编辑: 何卓铭