

极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型

刘晓雷^{1,2} 李思坤¹ 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 建立了一个极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型,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光的影响,得到了含缺陷多层膜衍射谱的解析表达式。简化模型中,相位突变量由多层膜表面以下第6层膜的缺陷形态决定,反射系数振幅衰减量由基底的缺陷形态决定。与改进单平面近似(SSA)模型相比,仿真速度基本一致的情况下,简化模型提高了含缺陷多层膜衍射谱仿真的精度,6°入射时,衍射谱的0~+3级衍射光振幅的仿真误差减小50%以上,并且不同入射角情况下,尤其在入射角小于12°时,振幅误差稳定。得到了含缺陷多层膜衍射谱的解析表达式,可进一步理论分析缺陷对多层膜衍射谱的影响,为得到掩模缺陷的补偿公式奠定了基础。

关键词 衍射;极紫外光刻;多层膜模型;单平面近似

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0905002

Simplified Model for Defective Multilayer Diffraction Spectrum Simulation in Extreme Ultraviolet Lithography

Liu Xiaolei^{1,2} Li Sikun¹ Wang Xiangzhao^{1,2}

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

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

Abstract A simplified model is developed for defective multilayer spectrum simulation in extreme ultraviolet (EUV) lithography. Influence of defect on the reflected light is modeled by phase perturbation and amplitude attenuation of reflection coefficient. An analytical expression of defective multilayer diffraction spectrum is given. In the simplified model, the phase perturbation is dependent on the defect parameters of the 6th layer of the multilayer and the amplitude attenuation is dependent on the bottom defect parameters. Compared to advanced single surface approximation (SSA) model, accuracy of the multilayer spectrum of the simplified model is improved with nearly the same simulation time. The amplitude errors of 0~+3 orders of the multilayer spectrum are decreased more than 50% in 6° incidence angle. The errors are also with little fluctuation in different incidence angles, especially smaller than 12°. The analytical expression of defective multilayer diffraction spectrum is beneficial to analysis the effects of defect to multilayer spectrum and provides the basis for formulation of defective mask correction.

Key words diffraction; extreme ultraviolet lithography; multilayer model; single surface approximation

OCIS codes 050.1940; 220.3740; 050.1755; 070.7345

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,掩模缺陷是阻碍极紫外光刻技术发展的主要难题之一^[1]。极紫外光刻掩模缺陷主要分为

两种:振幅型缺陷和相位型缺陷,振幅型缺陷分布于吸收层和多层膜表面,主要影响掩模衍射谱的振幅;相位型缺陷分布于多层膜内部,造成多层膜的变形,主要影响多层膜衍射谱的相位^[2]。相较于振幅型缺

收稿日期: 2014-03-25; **收到修改稿日期**: 2014-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61275207,61205102)、科技部国际科技合作专项(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方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

陷,相位型缺陷对掩模衍射谱的影响更为复杂且难于修复,因此需要一定的方法进行补偿,而准确快速地仿真相位型缺陷对掩模衍射谱的影响是补偿的主要依据和大规模掩模仿真的需求。

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)^[3]和波导法^[4]。严格的仿真方法通过求解麦克斯韦方程组获得掩模衍射谱的精确分布,计算精度高,但计算量大、计算速度慢,不利于仿真大规模掩模和分析、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,基于极紫外光刻掩模的结构特点,可将吸收层和多层膜分别建模并进行简化运算^[5]。相位型缺陷存在于多层膜内部,对吸收层的影响很小,因此建模中仅需考虑缺陷对于多层膜衍射谱的影响,为此提出了多种含缺陷多层膜的建模方法,如单平面近似法(SSA)^[6]、光线追迹法^[7-8]等,其中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。该方法采用相位突变表示缺陷对多层膜反射光的影响,并采用多层膜表面以下某层的缺陷形态作为相位突变的参数,在基底缺陷较小时可有效的仿真缺陷对多层膜反射光的影响,但在基底缺陷较大的情况下,缺陷造成的多层膜变形严重影响了缺陷位置的反射系数振幅,仅通过相位突变已不能完全表示缺陷的影响。

本文提出了一种新的极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型,以相位突变和反射系数振幅衰减表示缺陷对多层膜反射光的影响,并采用平面镜近似理想多层膜,准确快速地仿真含缺陷多层膜的衍射谱。

2 理论建模

2.1 简化模型

采用的含缺陷多层膜为经过平滑沉积工艺处理

后得到的多层膜^[2,10-11],经平滑工艺后的含缺陷多层膜结构如图1所示。

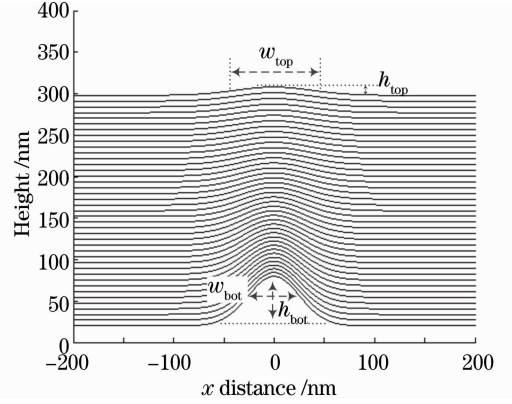


图1 平滑工艺处理后的含缺陷多层膜的结构
Fig.1 Defective multilayer geometry with smoothing deposition process

多层膜中缺陷的形态由表面缺陷形态和基底缺陷形态表示,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} 。为简化公式的表示,缺陷形态参数可视作一个集合 Δ ,即

$$\Delta = (h_{top}, w_{top}; h_{bot}, w_{bot}). \quad (1)$$

已知缺陷形态参数 Δ 后即可得到整个多层膜的结构^[2]。简化模型中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光的影响,模型基本结构如图2所示,图中 Γ_η 和 Γ_ϕ 分别为振幅衰减和相位突变的影响范围。为满足多层膜衍射谱的全局相位补偿,简化模型位于多层膜的平面镜等效面上^[12-14]。入射光方向采用方向余弦表示,即 $(\alpha_{in}, \beta_{in}) = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta)$, α_{in} 和 β_{in} 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 xy 平面与 x 轴的夹角。多层膜衍射谱可表示为

$$G(\alpha_m) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_{ML} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}\right) \int_{-1/2}^{1/2} \eta(x, \Delta) \exp[j\Phi(x, \Delta)] \cdot r_{ML} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_{ML} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}\right) \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \alpha_m x\right) dx, \quad (2)$$

式中 $\eta(x, \Delta)$ 为缺陷造成的反射系数振幅衰减系数, $\Phi(x, \Delta)$ 为缺陷等效相位突变, r_{ML} 为理想多层膜的等效平面镜反射系数, d_{ML} 为多层膜的平面镜等效面位置, α_m 为含缺陷多层膜衍射谱的 m 级衍射

光的方向余弦, m 为衍射级次, α_m 的范围由多层膜满足平面镜近似的最大入射角 φ_{ML} 决定,且 $|\alpha_m| \leq \sqrt{1 - \beta_m^2 - \cos^2 \varphi_{ML}}$ 。

2.2 简化模型参数

(2)式表示含缺陷多层膜的衍射谱,其中缺陷对

多层膜反射光的影响主要由反射系数振幅衰减系数 $\eta(x, \Delta)$ 和相位突变 $\Phi(x, \Delta)$ 表示,可表示为

$$\eta(x, \Delta) = \begin{cases} f_\eta(x, \Delta), & x \in \Gamma_\eta/p, \\ 1, & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\Phi(x, \Delta) = \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot h_\Phi(x, \Delta) (\sqrt{1 - \alpha_{in}^2 - \beta_{in}^2} + \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}), & x \in \Gamma_\Phi/p, \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

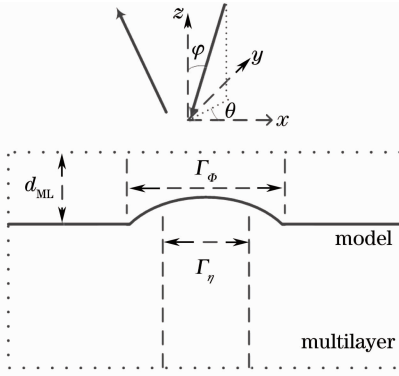


图2 极紫外光刻含缺陷多层膜简化模型
Fig. 2 Simplified model for defective multilayer of EUV lithography

式中 p 为多层膜的周期, $f_\eta(x, \Delta)$ 和 $h_\Phi(x, \Delta)$ 分别为在相应影响范围内的振幅衰减函数和相位突变等效传播距离。图3定义了缺陷对多层膜反射系数影

响的4个参数,其中 η_{\min} 为含缺陷多层膜不同位置反射系数振幅的最小值与最大值的比值, Φ_{\max} 为含缺陷多层膜不同位置反射系数相位的最大值与最小值之差。依据图3的参数定义,采用严格仿真方法通过改变 Δ 中的一项参数,固定其他三项参数,得到单一缺陷参数对多层膜反射系数和简化模型参数的影响,如图4所示,其中 Δ 各参数的取值范围分别为 h_{bot} (20, 60) nm, ω_{bot} (20, 60) nm, h_{top} (1, 5) nm, ω_{top} (60, 160) nm, 在取值范围内的均匀取样点为21个,其他参数设置如表1所示。由图4(b)、(d)可知,振幅衰减的影响范围 Γ_η 主要由基底缺陷的半峰全宽 ω_{bot} 决定,而相位突变的影响范围 Γ_Φ 主要由表面缺陷的半峰全宽 ω_{top} 决定,并且结合图中 ω_{bot} 和 ω_{top} 的取值范围可进一步得知振幅衰减的影响范围 Γ_η 为 $(-\omega_{\text{bot}}, \omega_{\text{bot}})$, 相位突变的影响范围 Γ_Φ 为 $(-\omega_{\text{top}}, \omega_{\text{top}})$ 。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Multilayer	Multilayer	40 bilayers of Mo/Si: 4.17 nm/2.78 nm, pitch is 100 nm at wafer scale
	Defect	Gaussian defect, $h_{\text{top}}=3$ nm, $\omega_{\text{top}}=90$ nm, $h_{\text{bot}}=30$ nm, $\omega_{\text{bot}}=30$ nm at mask scale
Optics	Illumination	$\lambda=13.5$ nm, incidence angle $\varphi=6^\circ$, azimuth angle $\theta=0^\circ$, traditional source, TE polarized, coherence factor $\sigma=0.5$
	Projection	4× reduction, numerical aperture NA=0.35

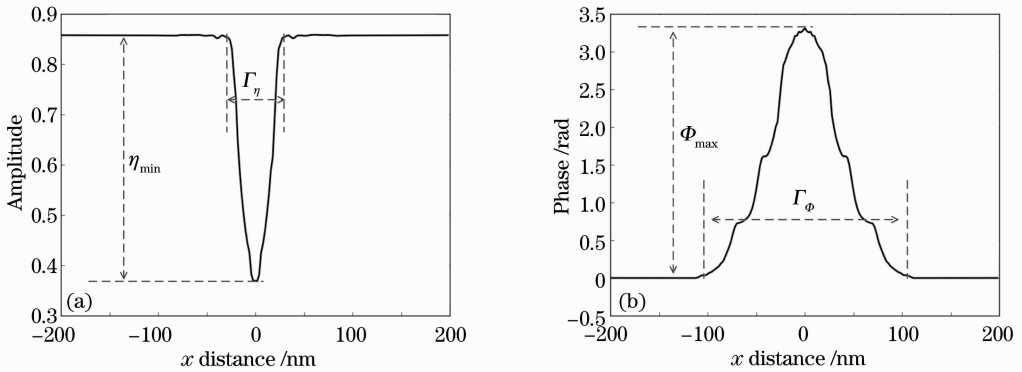


图3 含缺陷多层膜不同位置反射系数的(a)振幅和(b)相位

Fig. 3 (a) Amplitude and (b) phase of the reflection coefficient of defective multilayer at different locations

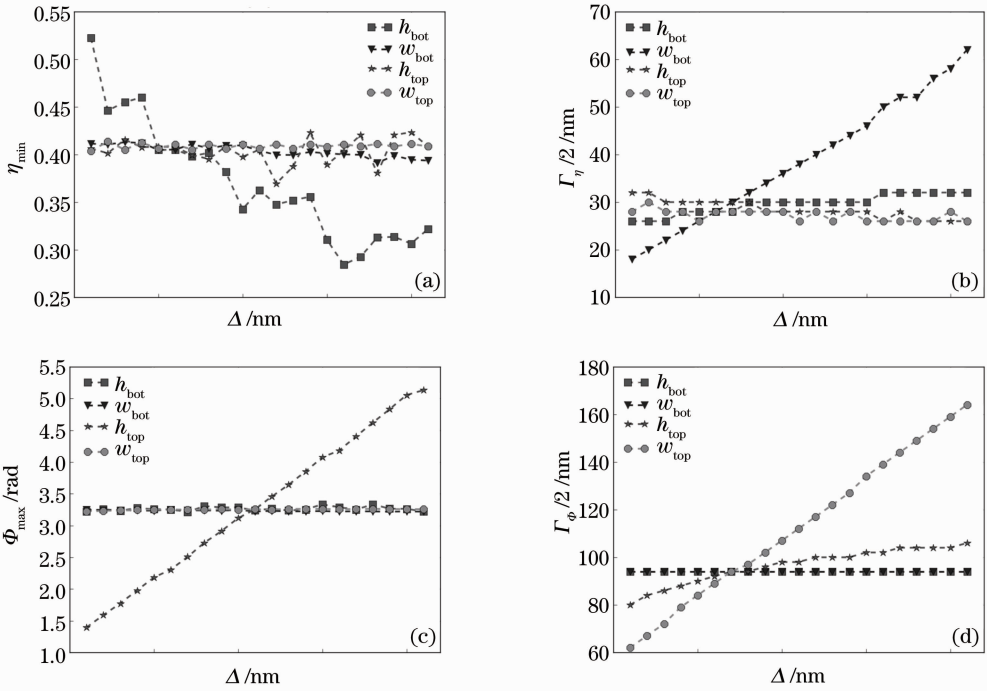


图 4 严格仿真方法仿真不同缺陷形态参数对简化模型参数的影响。(a) η_{\min} ; (b) $\Gamma_{\eta}/2$; (c) Φ_{\max} ; (d) $\Gamma_{\Phi}/2$

Fig. 4 Parameters of simplified model versus defect parameter with the rigorous method. (a) η_{\min} ; (b) $\Gamma_{\eta}/2$; (c) Φ_{\max} ; (d) $\Gamma_{\Phi}/2$

相位突变 $\Phi(x, \Delta)$ 由缺陷的表面形态决定^[6], 由图 4(c)、(d) 也可得知, 并且可通过选取表面以下某层的缺陷形态作为相位突变等效传播距离 $h_{\Phi}(x, \Delta)$ ^[9]。图 5 为采用多层膜表面第 1~8 层的缺陷形态作为相位突变等效传播距离参数的匹配结果, 如图所示最优化参数选择为第 6 层的缺陷形态。图 6 为不同表面缺陷高度情况下的最佳匹配层, 不同表面缺陷高度下相位突变参数的最佳匹配层为第 6 或 7 层, 而含缺陷多层膜中第 6 层与第 7 层的缺陷高度差最大为 0.2 nm, 近似为 $\lambda/70$, 对多层膜衍射谱

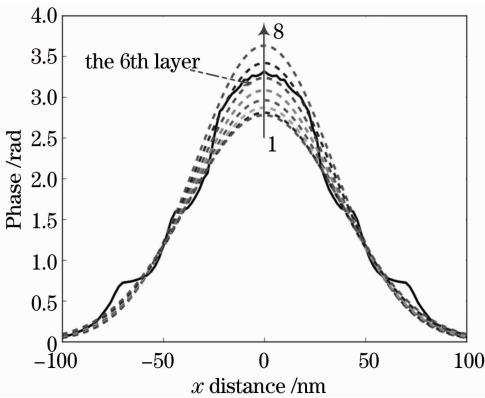


图 5 采用多层膜中不同层的缺陷参数匹配结果
Fig. 5 Fitting results with defect parameters of different layers in multilayer

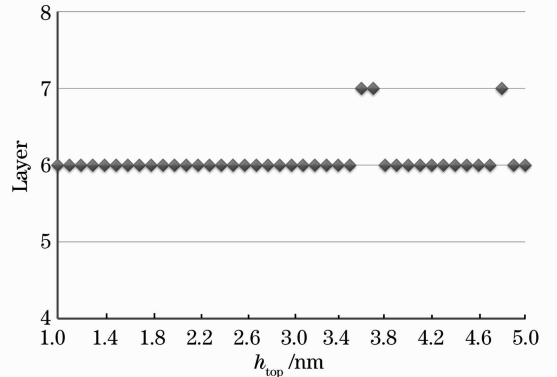


图 6 不同表面缺陷高度下的最佳匹配层
Fig. 6 Best fitting layer versus height of surface defects 的相位影响可忽略。因此为方便计算, 在以后的仿真中将选择第 6 层的缺陷形态作为相位突变等效传播距离参数。已知图 1 中高斯型缺陷的形态函数可表示为

$$h = h_0 \exp\left(-\frac{x^2 \cdot 4 \ln 2}{w_0^2}\right), \quad (5)$$

式中 h_0 和 w_0 分别为缺陷的高度和半峰全宽。因此相位突变等效传播距离可表示为

$$h_{\Phi}(x, \Delta) = h_6(\Delta) \exp\left\{-\frac{x^2 \cdot 4 \ln 2}{\left[\frac{w_6(\Delta)}{p}\right]^2}\right\}, \quad x \in \left(-\frac{w_{\text{top}}}{p}, \frac{w_{\text{top}}}{p}\right), \quad (6)$$

式中 $h_6(\Delta)$ 和 $w_6(\Delta)$ 分别为多层膜表面以下第 6 层膜的缺陷高度和半峰全宽。

图 4(a) 中各缺陷参数对振幅衰减的影响较为复杂, 基底缺陷高度与表面缺陷高度对振幅衰减的最小值都有影响, 这主要是由于不同的缺陷高度差使得多层膜中的膜层厚度分布与理想多层膜的分布不同, 多层膜反射系数振幅发生变化, 但相对于表面缺陷高度, 基底缺陷高度对振幅衰减的影响更大, 因此简化模型中振幅衰减量主要由基底缺陷高度决定。为简化多层膜衍射谱的表达式, 振幅衰减系数 $f_\eta(x, \Delta)$ 可采用抛物线拟合。振幅衰减主要与基底缺陷形态有关, $f_\eta(x, \Delta)$ 可表示为

$$f_\eta(x, \Delta) = a \cdot (x - b)^2 + c, \quad x \in (-w_{\text{bot}}/p, w_{\text{bot}}/p). \quad (7)$$

抛物线关于 $x = b$ 对称, 且通过 (b, η_{min}) , $(w_{\text{bot}}/p, 1)$ 两点, η_{min} 为振幅衰减系数的最小值, 并且 η_{min} 只与基底缺陷的高度 h_{bot} 有关, b 由缺陷在多层膜中的位置坐标确定。通过仿真不同基底缺陷高度得到振幅衰减系数的最小值, 拟合结果如图 7 所示, 得到的拟合表达式如下:

$$\eta_{\text{min}} = -0.0047 \cdot h_{\text{bot}} + 0.5585. \quad (8)$$

由此可得到振幅衰减系数 $f_\eta(x, \Delta)$, 以图 1 所示缺陷中心位置位于坐标原点为例,

$$f_\eta(x, \Delta) = \frac{1 - \eta_{\text{min}}}{(w_{\text{bot}}/p)^2} x^2 + \eta_{\text{min}}, \quad x \in (-w_{\text{bot}}/p, w_{\text{bot}}/p). \quad (9)$$

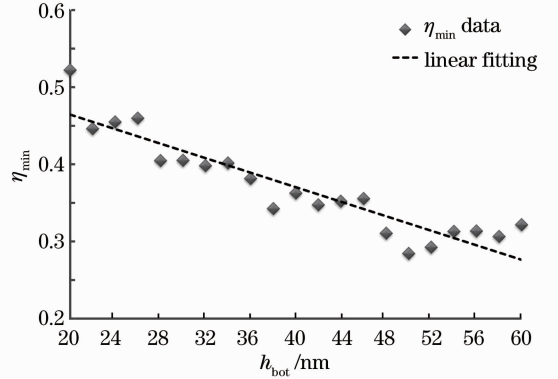


图 7 振幅衰减系数最小值随基底缺陷高度变化的线性拟合结果

Fig. 7 Linear fitting result of minimum of amplitude attenuation coefficient versus height of substrate defects

3 仿真结果与讨论

结合(2)~(4)、(6)、(9)式可得到极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱的解析表达式。将简化模型得到

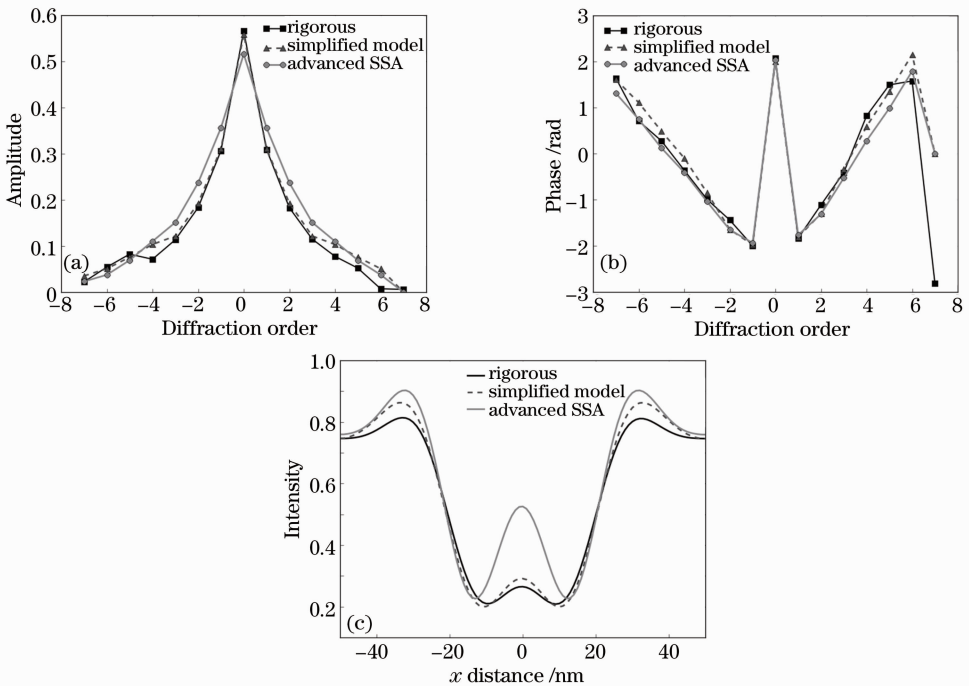


图 8 简化模型、改进单平面近似模型和严格仿真方法的含缺陷多层膜衍射谱振幅、相位以及空间像仿真结果比较。

(a) 衍射谱振幅; (b) 衍射谱相位; (c) 空间像

Fig. 8 Comparisons of spectrum amplitude, spectrum phase and aerial image among simplified model, advanced SSA model and rigorous method for defective multilayer. (a) Spectrum amplitude; (b) spectrum phase; (c) aerial image

的含缺陷多层膜衍射谱与改进单平面近似模型和波导法严格仿真方法得到的衍射谱相比较,并分别代入光刻仿真软件中进行成像计算,比较不同模型的空间像,从而验证简化模型的正确性。简化模型中,等效平面镜的反射系数 r_{ML} 约为 0.855,多层膜的等效面位置 d_{ML} 为 53.5 nm^[12],满足平面镜近似的最大入射角 φ_{ML} 约为 15°^[13],未作特殊说明时参数设置同表 1。

图 8 为简化模型、改进单平面近似模型和严格仿真方法的含缺陷多层膜衍射谱振幅、相位以及空间像的仿真结果比较。由于缺陷造成的相位突变采用相同的参数表示,简化模型与改进单平面近似模型的衍射谱相位的仿真精度基本一致[如图 8(b)所示],而图 8(a)中衍射谱振幅的仿真结果存在一定

的区别,简化模型较改进单平面近似模型的仿真结果精度更高,简化模型的空间像的仿真误差更小[如图 8(c)所示]。简化模型与改进单平面近似模型相比,只是在计算衍射谱的过程中增加了振幅衰减系数,因此对于仿真时间影响很小,可忽略不计。

图 9 为 6°入射角且 $h_{bot} = \omega_{bot}$ 的情况下,简化模型和改进单平面近似模型得到的多层膜衍射谱中 0~+3 级衍射光与严格仿真方法相比的振幅误差。振幅误差的定义如下:

$$V_{error} = \frac{|A_m(n) - A_r(n)|}{A_r(n)} \times 100\%, \quad (10)$$

式中 $A_m(n)$ 为简化模型或改进单平面近似模型的衍射谱 n 级衍射光的振幅, $A_r(n)$ 为严格仿真方法的衍射谱 n 级衍射光的振幅。

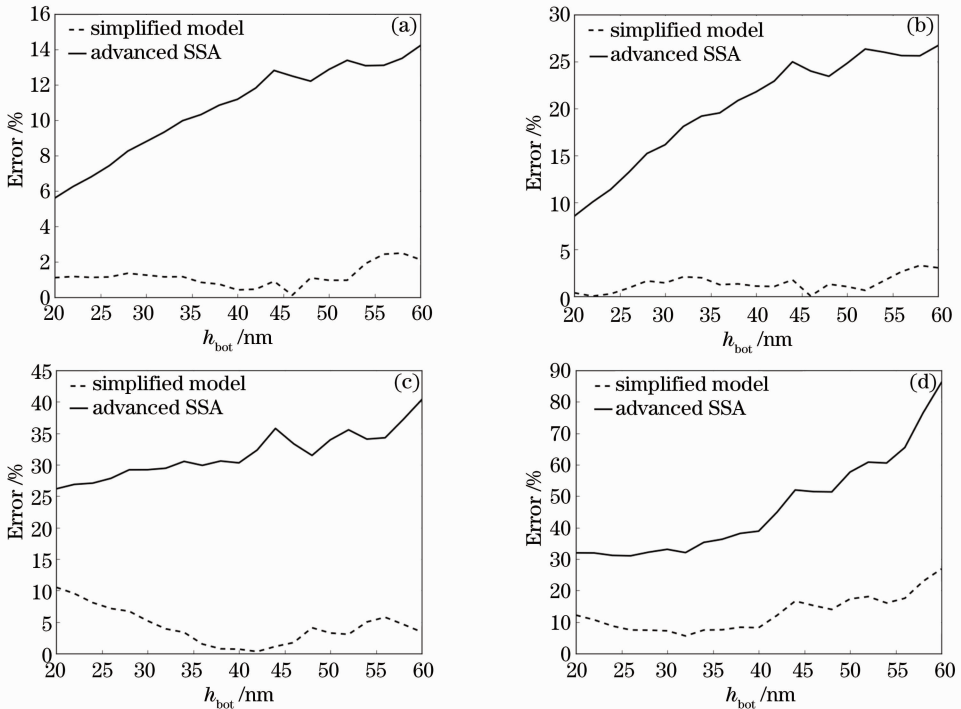


图 9 6°入射角且 $h_{bot} = \omega_{bot}$ 情况下,简化模型与改进单平面近似模型的衍射谱中各衍射级次的振幅误差随 h_{bot} 的变化。(a) 0 级衍射光; (b) +1 级衍射光; (c) +2 级衍射光; (d) +3 级衍射光

Fig. 9 Amplitude errors of diffraction orders of simplified model spectrum and advanced SSA spectrum versus h_{bot} with $h_{bot} = \omega_{bot}$ in 6° incidence angle. (a) The 0th order; (b) the +1st order; (c) the +2nd order; (d) the +3rd order

由图 9 可知,与改进单平面近似模型相比,简化模型各个衍射级次振幅的仿真精度都有所提高,各级衍射光的振幅误差减小 50% 以上,尤其较小衍射级次的振幅误差非常稳定。随着基底缺陷尺寸的增大,简化模型的较高衍射级次的振幅误差在不断增大,这主要是基底缺陷尺寸越大,多层膜变形越严重,缺陷对于多层膜衍射谱的影响更为复杂。图 10 讨论了同一缺陷形态、不同入射角情况下,简化模型

和改进单平面近似模型的 +2 级衍射光的振幅误差。在 15°入射角范围内,简化模型的仿真精度都优于改进单平面近似模型,并且在 12°范围内,误差非常稳定,说明模型在不同入射角情况下的仿真精度基本一致。当入射角大于 12°时,随着入射角的增大,误差迅速增大,这主要是由于大入射角情况下,平面镜近似的条件不能完全满足,但在含缺陷多层膜和含缺陷掩模的仿真中,大入射角情况对全掩

模仿真的结果影响很小,因此简化模型仍可满足含缺陷多层膜仿真的要求。

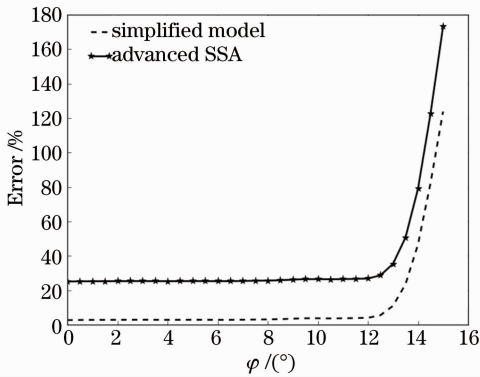


图 10 不同入射角情况下的+2 级衍射光的振幅误差
Fig.10 Amplitude errors of the +2nd order diffraction light versus incidence angle

4 结 论

提出了一种极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型,采用反射系数振幅衰减和相位突变表示缺陷对多层膜反射光的影响,得到了含缺陷多层膜衍射谱的解析表达式,实现了含缺陷多层膜衍射谱的快速准确仿真。该简化模型与改进单平面近似模型相比,仿真速度基本相同仿真精度优于忙乱近单半面近似模型,6°入射时,含缺陷多层膜衍射谱的0~+3 级衍射光振幅的仿真误差减小 50%以上,并且入射角的变化对衍射谱振幅的仿真误差影响不大。同时,简化模型得到的含缺陷多层膜衍射谱的解析表达式为分析缺陷对多层膜衍射谱的影响并得到缺陷补偿公式提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Andreas Erdmann, Peter Evanschitzky, Tristan Bret, *et al.*. Analysis of EUV mask multilayer defect printing characteristics [C]. SPIE, 2012, 8322: 83220E.
- 2 T Hashimoto, H Yamanashi, M Sugawara, *et al.*. Lithographic characterization of EUVL mask blank defects [C]. SPIE, 2004, 5374: 740—750.

- 3 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.
- 4 P Evanschitzky, A Erdmann. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method [C]. SPIE, 2007, 6533: 65330Y.
- 5 C H Clifford, A R Neureuther. Fast simulation of buried EUV mask defect interaction with absorber features [C]. SPIE, 2007, 6517: 65170A.
- 6 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.
- 7 C Sambale, T Schmoeller, A Erdmann, *et al.*. Rigorous simulation of defective EUV multilayer masks [C]. SPIE, 2003, 5256: 1239—1248.
- 8 M C Lam, A R Neureuther. Fast simulation methods for defective EUV mask blank inspection [C]. SPIE, 2004, 5567: 741—750.
- 9 C H Clifford, A R Neureuther. Smoothing based model for images of isolated buried EUV multilayer defects [C]. SPIE, 2008, 6921: 692119.
- 10 D G Stearns, P B Mirkarimi, E Spiller. Localized defects in multilayer coatings [J]. Thin Solid Films, 2004, 446(1): 37—49.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Yuting Cao, Xiangzhao Wang, Andreas Erdmann, *et al.*. Analytical model for EUV mask diffraction field calculation [C]. SPIE, 2011, 8171: 81710N.
- 14 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: 史 敏