

极紫外光刻含缺陷掩模仿真模型及缺陷的补偿

刘晓雷^{1,2} 王向朝^{1,2} 李思坤^{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 建立了一个基于单平面近似的极紫外(EUV)光刻三维含缺陷掩模的快速仿真模型。该仿真模型中,采用相位突变和振幅衰减表示缺陷对多层膜的反射系数的影响,吸收层模型采用薄掩模修正模型。以22 nm三维接触孔图形为例,周期为60 nm时,该仿真模型与波导法严格仿真相比,仿真速度提高10倍以上,而关键尺寸(CD)仿真误差小于0.6 nm。基于该仿真模型,对掩模缺陷进行了补偿计算,得到了与严格仿真一致的最佳图形修正量。针对不同的缺陷形态尺寸,提出了缺陷的可补偿性的概念,并进一步讨论了二维图形的缺陷的可补偿性。

关键词 光学制造; 极紫外光刻; 掩模仿真; 缺陷补偿; 单平面近似

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822006

Simulation Model of Mask with Defect and Its Application to Defect Compensation in Extreme-Ultraviolet Lithography

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

¹Laboratory of Information Optics and Opt-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 fast model is proposed for simulation of mask with defect based on single surface approximation in extreme-ultraviolet (EUV) lithography. In this model, the impact of defect on the reflection of the multilayer is calculated by phase perturbation and amplitude attenuation. Diffraction of the absorber is calculated by using the modified thin mask model. Taking 22 nm contact holes with pitch of 60 nm as example, compared with the waveguide method, the computation speed of the proposed model is increased more than 10 times and the critical dimension (CD) error is less than 0.6 nm. The optimal modification size for the compensation of defect is calculated by the proposed model and the result is same to that calculated by the waveguide method. Moreover, the concept of defect compensability is proposed for different defect sizes, and the defect compensability of 2D mask is discussed by using the proposed model.

Key words optical fabrication; extreme-ultraviolet lithography; mask simulation; defect compensation; single surface approximation

OCIS codes 220.3740; 050.1960; 220.4241; 050.1755

1 引言

极紫外(EUV)光刻是目前最有前景的下一代光刻技术。不同于深紫外(DUV)光刻, EUV光刻采用反射式掩模,掩模结构主要包括三部分:吸收层图形、多层膜和基底,其中多层膜由40层Mo/Si膜构成,用于反射

收稿日期: 2015-03-06; 收到修改稿日期: 2015-04-12

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补偿方面的研究。

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方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

EUV, 峰值反射率可达到 65%^[1-3]。根据 2013 年国际半导体技术路线图(ITRS), 2015 年 EUV 掩模吸收层厚度的均匀性要优于 0.48 nm, 空白掩模表面的缺陷尺寸要小于 19 nm(未采用缓解方法)和 62 nm(采用缓解方法)。但目前的工艺水平仍然难以量产出达到 ITRS 规定标准的掩模^[4-5], 因此掩模缺陷尤其是多层膜中的缺陷成为制约 EUV 光刻实现量产的主要障碍之一^[6]。由于 EUV 光刻采用 13.5 nm 的曝光波长, 即使很小的缺陷, 也将造成硅片面上关键尺寸(CD)很大的变化。多层膜上仅仅 3.5 nm 高度的缺陷可造成硅片面上 10 nm 的 CD 变化^[7]。在不破坏多层膜的情况下, 多层膜中的缺陷难于修复^[8], 因此需要一定的方法减少缺陷的影响。

针对 EUV 光刻掩模多层膜中的缺陷, 目前有多种减少缺陷影响的方法, 如图形偏移法^[9-10]、布图规划法^[11]和吸收层修正法^[6,12-13], 但是通常情况下, 通过单一方法难以消除掩模上所有缺陷的影响^[9-10,12]。为此, 研究人员将不同方法结合以达到更好的效果^[14-15]。A Elayat 等^[16]对不同的方法进行了比较, 指出图形偏移法和吸收层修正法相结合的方法是最有效的减少缺陷影响的方法。图形偏移法通过移动掩模图形, 将缺陷置于吸收层之下, 从而消除缺陷的影响^[9-10,16]。吸收层修正法采用光学邻近效应校正(OPC)的方法补偿缺陷造成的空间像光强损失, 从而在特定焦面上得到与理想掩模相同的成像 CD^[6,12-13,16]。目前吸收层修正法中的掩模仿真主要采用严格仿真方法, 如时域有限差分法(FDTD)^[17]和波导法^[18]。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, 尤其三维含缺陷掩模仿真(采用波导法, 22 nm 的密集接孔图形的仿真时间达到 8044 s), 因此严格仿真难以满足大面积的掩模仿真以及掩模缺陷补偿计算的需求。

为了提高含缺陷掩模的仿真速度, 提出了一种基于单平面近似的含缺陷多层膜仿真简化模型^[19]。本文将该多层膜模型进一步扩展至三维模型, 采用相位突变和振幅衰减表示缺陷对反射系数的影响, 在计算三维多层膜模型的参数时, 采用了域分解^[20]和区域分割^[21]的思想, 将三维多层膜离散化降维成二维模型。将该多层膜模型与吸收层薄掩模修正模型相结合建立了含缺陷掩模仿真模型。采用该仿真模型进行缺陷补偿的计算, 并进一步讨论了缺陷的可补偿性。

2 理论模型

2.1 掩模建模

2.1.1 三维含缺陷多层膜仿真模型

采用的含缺陷多层膜为平滑沉积工艺条件下得到的多层膜^[22-23]。多层膜中的缺陷主要是由基底缺陷和多层膜沉积过程中的缺陷引起的。据报道半导体制造技术合体(SEMATECH)在 54 nm 和 70 nm 缺陷检测灵敏度下的无缺陷掩模的成品率分别只有 4%和 8%, 并且研究表明 70~100 nm 尺寸的多层膜缺陷大部分是由基底缺陷引起的^[4,24], 因此主要考虑基底缺陷引起的多层膜缺陷。经平滑工艺后的含缺陷多层膜如图 1 所示, 图 1(a)、(b)分别为含缺陷多层膜的 xoz 截面图和俯视图。缺陷形态包含 6 个参数, 分别为表面缺陷和基底缺陷的高度 h_{top} 和 h_{bot} , x 方向的半峰全宽 w_{topx} 和 w_{botx} 以及 y 方向的半峰全宽 w_{topy} 和 w_{boty} , 为简化表示, 将缺陷形态的各参数定义为一个集合:

$$\Delta=(h_{top}, w_{topx}, w_{topy}; h_{bot}, w_{botx}, w_{boty}), \quad (1)$$

已知缺陷形态参数 Δ 即可得到整个含缺陷多层膜的三维结构。

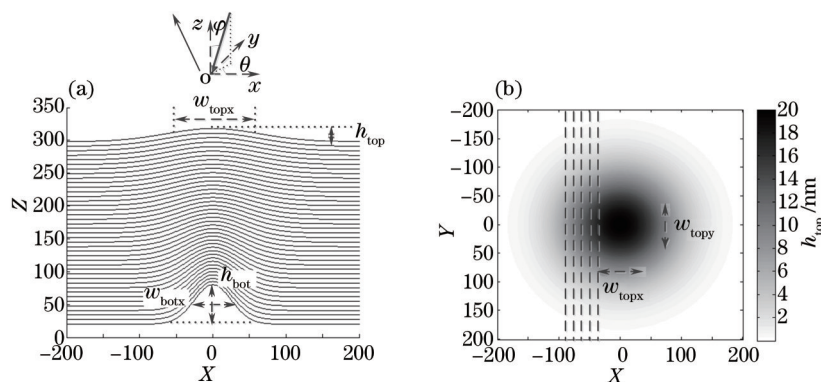


图 1 含缺陷多层膜的基本结构。(a) xoz 截面图; (b) 俯视图

Fig.1 Structure of defective multilayer. (a) xoz section view; (b) vertical view

基于单平面近似的含缺陷多层膜简化模型^[19]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。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^[19,25-26]。多层膜上的入射光为第一次经过吸收层图形衍射的吸收层衍射谱,衍射光方向采用方向余弦表示,即 (α_m, β_n) , α_m 和 β_n 为吸收层衍射谱 (m, n) 级衍射光方向与 x 轴方向和 y 轴方向夹角的方向余弦。三维含缺陷多层膜的衍射过程可表示为

$$R(\alpha_m, \beta_n; \alpha_{m'}, \beta_{n'}) = \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_{ML} (\sqrt{1 - \alpha_{m'}^2 - \beta_{n'}^2} + \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_n^2})\right] \times \iint \tilde{r}_{ML}(x, y, \Delta) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} (\alpha_m - \alpha_{m'})x\right] \cdot \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} (\beta_n - \beta_{n'})y\right] dx dy \quad (2)$$

式中 d_{ML} 为多层膜的平面镜等效面与多层膜上表面的距离, $\tilde{r}_{ML}(x, y, \Delta)$ 为含缺陷多层膜等效平面镜的不同位置的复反射系数,且

$$\tilde{r}_{ML}(x, y, \Delta) = \eta(x, y, \Delta) \cdot \exp[j\Phi(x, y, \Delta)] \cdot r_{ML} \quad (3)$$

$\eta(x, y, \Delta)$ 和 $\Phi(x, y, \Delta)$ 分别为缺陷造成的反射系数振幅衰减和等效相位突变^[19], r_{ML} 为理想多层膜的平面镜等效反射系数。在计算反射系数振幅衰减 $\eta(x, y, \Delta)$ 和等效相位突变 $\Phi(x, y, \Delta)$ 时,采用了域分解^[20]和区域分割^[21]的思想,将三维多层膜离散化降维成二维模型,如图1(b)所示,简化了三维模型的参数求解过程,并且由二维模型的参数求解过程^[19]可知在区域分割时仅需考虑 $(-w_{topx}, w_{topx})$ 之间的区域。 $\alpha_{m'}$ 和 $\beta_{n'}$ 为含缺陷多层膜衍射谱 (m', n') 级衍射光方向与 x 轴方向和 y 轴方向夹角的方向余弦, (α_m, β_n) 和 $(\alpha_{m'}, \beta_{n'})$ 的范围由多层膜满足平面镜近似的最大入射角 φ_{ML} 决定^[26],且 $\alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq 1 - \cos^2 \varphi_{ML}$, $\alpha_{m'}^2 + \beta_{n'}^2 \leq 1 - \cos^2 \varphi_{ML}$ 。

2.1.2 掩模仿真模型

EUV掩模衍射过程可分为三个部分,如图2所示,入射光经过吸收层衍射、多层膜反射并再次经过吸收层衍射得到掩模的衍射谱^[26-27]。其中吸收层和多层膜之间的多次往返反射比较小,可以忽略^[26]。由此可得到整个掩模衍射谱的表达式为

$$G(\alpha_m, \beta_n) = \iint F_{thick}(\alpha_m, \beta_n; \alpha_{in}, \beta_{in}) \cdot R(\alpha_m, \beta_n; \alpha_{m'}, \beta_{n'}) \cdot F_{thick}(\alpha_{m'}, \beta_{n'}; \alpha_{in}, \beta_{in}) d\alpha_{m'} d\beta_{n'} \quad (4)$$

式中, $F_{thick}(\alpha_m, \beta_n; \alpha_{in}, \beta_{in})$ 和 $F_{thick}(\alpha_{m'}, \beta_{n'}; \alpha_{m'}, \beta_{n'})$ 分别为光第一次经过吸收层和第二次经过吸收层的衍射谱函数。 $(\alpha_{in}, \beta_{in})$ 为入射光的方向余弦, $(\alpha_{in}, \beta_{in}) = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta)$, 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。 (α_m, β_n) 、 $(\alpha_{m'}, \beta_{n'})$ 和 $(\alpha_{m''}, \beta_{n''})$ 分别为第一次经过吸收层的衍射光、经过含缺陷多层膜的衍射光以及第二次经过吸收层的衍射光的方向余弦。

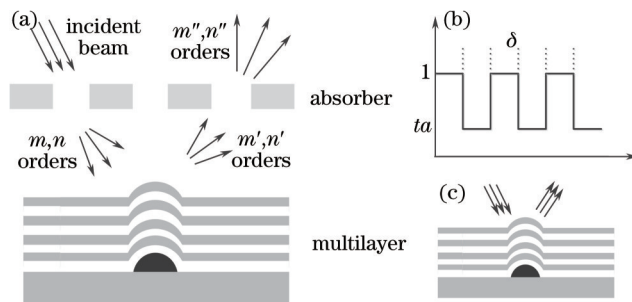


图2 掩模衍射过程。(a) 掩模结构分解; (b) 薄掩模修正模型; (c) 多层膜模型

Fig.2 Schematic of mask diffraction. (a) Decomposition of mask structure; (b) modified thin mask model; (c) multilayer model

吸收层采用薄掩模修正模型^[26-28],该模型将吸收层等效为特定平面上的薄层,薄层的透射系数由两部分构成,一部分是基尔霍夫标量衍射理论中的几何波透射函数,一部分是表示边界衍射波修正的边界脉冲修正函数。直接对透射光场进行傅里叶变换即可得到薄层的衍射谱函数 F_{thin} ,因此吸收层衍射谱函数可描述为

$$F_{\text{thick}}(\alpha_m, \beta_n; \alpha_{\text{in}}, \beta_{\text{in}}) = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_{\text{abs}}}{2} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_n^2}\right) F_{\text{thin}}(\alpha_m - \alpha_{\text{in}}, \beta_n - \beta_{\text{in}}) \times \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_{\text{abs}}}{2} \sqrt{1 - \alpha_{\text{in}}^2 - \beta_{\text{in}}^2}\right) \quad (5)$$

式中 d_{abs} 为吸收层的厚度, 等效薄掩模位于吸收层的中间位置, 式中的两相位因子分别表示入射光从吸收层上表面到达等效薄掩模位置和薄掩模衍射光从等效薄掩模位置到达吸收层下表面的相位传播。

2.2 缺陷补偿

缺陷补偿主要采用 OPC 的方法修正吸收层图形, 补偿空间像的光强损失, 从而在特定的焦面上得到与理想图形相同的 CD 结果^[6,12-13,16]。图 3 所示为缺陷补偿方法的基本原理, 图中 w 为掩模图形尺寸, Δw 为图形尺寸修正量, 其中纵向的三列分别为吸收层图形修正、空间像截面图和工艺窗口, 并且图中给出了目标图形的理想掩模空间像截面图和工艺窗口作为参照(实线部分), 横向的第一行为未进行缺陷补偿的结果, 第二行为缺陷补偿后的结果。由图可知, 与未补偿时相比, 经过补偿后, 不仅在最佳焦面位置得到了目标 CD, 而且增大了工艺窗口, 但是补偿后的含缺陷掩模的工艺窗口小于理想掩模的工艺窗口, 因此缺陷补偿方法可补偿缺陷在特定焦面上的光强损失, 但会损失一定的工艺窗口^[12]。

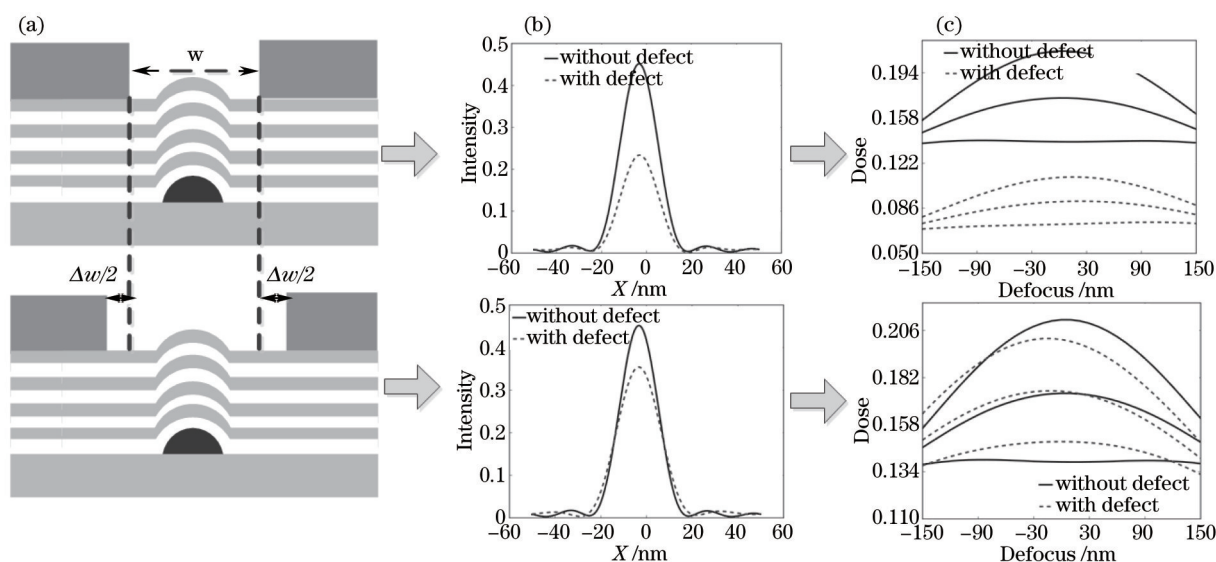


图 3 补偿方法的基本原理及补偿结果。(a)图形修正;(b)空间像截面图;(c)工艺窗口

Fig.3 Schematic of defect compensation method and compensation results. (a) Graph correction; (b) aerial image; (c) process windows

3 仿真结果及分析

结合(2)~(5)式可得到 EUV 光刻含缺陷掩模衍射谱的分布, 将此衍射谱输入 Dr.LiTHO^[29]光刻仿真软件进行成像计算。通过改变吸收层图形尺寸, 在特定焦面上得到与理想掩模相同的成像 CD, 实现对缺陷的补偿, 并与波导法严格仿真得到的结果进行比较, 验证模型的准确性。仿真采用 6° 入射的 13.5 nm 波长横电 (TE) 偏振光圆形照明光源, 部分相干因子为 0.5, 入射光方位角为 0° ; 吸收层厚度为 70 nm, 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。缺陷形态尺寸为掩模面尺寸, 而掩模周期及图形的尺寸采用硅片面尺寸。在进行三维接触孔图形掩模的严格仿真时, 考虑到仿真时间, 在仿真中采用霍普金斯频移^[25], 即斜入射时的衍射谱通过正入射衍射谱的简单频移得到。

3.1 缺陷补偿结果

以 22 nm 的二维图形(如图 3)为例, 图形周期为 100 nm, 仿真结果如图 4 所示, 图中仿真的缺陷形态为表面缺陷高度 2 nm, 半峰全宽 60 nm, 基底缺陷高度 20 nm, 半峰全宽 20 nm。CD 结果采用空间像阈值模型, 阈值由目标图形尺寸下的理想掩模的严格仿真求得。定义最佳图形修正量为在最佳焦面位置得到目标 CD 时缺陷补偿所需的图形修正量。由图 4 可知, 提出的仿真模型与严格仿真相比, 得到的最佳图形修正量完全相同, 并且

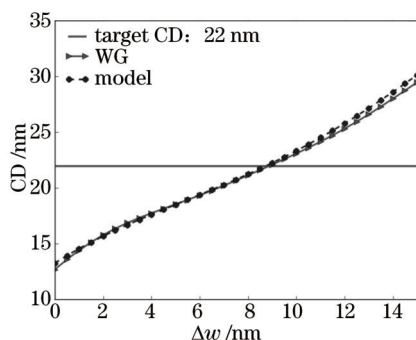


图4 不同图形修正量的缺陷补偿结果

Fig.4 Compensation results of different modification sizes

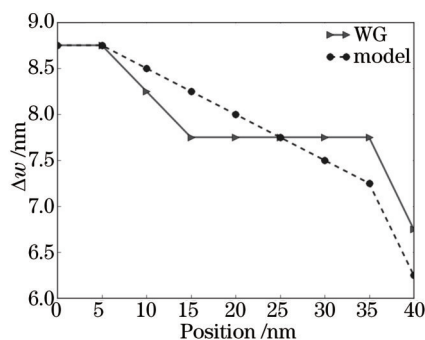


图5 最佳图形修正量随缺陷位置的变化

Fig.5 Optimal modification sizes versus defect positions

对于不同的图形修正量,该仿真模型与严格仿真的CD仿真结果相一致,最大CD仿真误差小于0.5 nm,图中横线为目标CD,曲线WG表示波导法得到的CD仿真结果,曲线model表示提出的仿真模型的CD仿真结果。

考虑到缺陷位置的随机性,缺陷并不总是在图形的中心位置。针对不同位置的缺陷,最佳图形修正量如图5所示,图中的缺陷大小与图4相同,图中曲线WG和model分别表示采用波导法和提出的仿真模型得到的不同缺陷位置情况下的最佳图形修正量。采用提出的仿真模型与严格仿真相比,在缺陷位于不同位置的情况下得到的最佳图形修正量误差小于0.5 nm。由图5可知,当缺陷位于图形中心时,缺陷补偿所需的最佳图形修正量最大,随着缺陷远离掩模图形的中心位置,最佳图形修正量不断减小。

三维接触孔图形如图6所示,由于缺陷存在一定的影响范围,对于高斯型缺陷,影响范围为两倍的表面缺陷半峰全宽^[19],因此针对密集图形,如果表面缺陷半峰全宽小于掩模图形的半个周期,在补偿计算中,仅需考虑单个周期的掩模图形,即图6中虚线范围内的掩模图形,若表面缺陷半峰全宽大于掩模图形的半个周期,则需依据缺陷影响范围确定合适的掩模图形仿真区域。设接触孔图形的尺寸为22 nm,周期为60 nm,缺陷形态 Δ 为(2, 60, 60; 20, 20, 20) nm,缺陷位于接触孔图形的中心位置,不同图形修正量的缺陷补偿结果如图7所示,图中横线 hor target CD 和 ver target CD 分别表示水平和垂直方向的目标CD,曲线 model hor 和 model ver 分别为提出的仿真模型的水平方向和垂直方向的CD仿真结果,曲线 WG hor 和 WG ver 分别为波导法得到的水平和垂直方向的CD仿真结果,并且水平方向为y方向,垂直方向为x方向。图中缺陷补偿的目标CD为理想掩模采用波导法严格仿真得到的成像CD,空间像CD阈值为理想掩模的水平方向目标CD为22 nm时的阈值。与严格仿真相比,提出的仿真模型的水平方向和垂直方向的CD仿真误差都小于0.6 nm。由图可知,理想掩模的垂直方向的成像CD略小于水平方向的成像CD,这主要是由于掩模阴影效应^[30-32]造成的。在不考虑阴影效应时,即缺陷补偿的水平方向和垂直方向的目标CD分别为理想掩模的水平方向和垂直方向的成像CD时,缺陷补偿所需的水平和垂直方向的最佳图形修正量相同,补偿前后的空间像截面如图8所示,图中曲线 hor without defect 和 ver without defect 分别为波导法得到的理想掩模空间像水平和垂直方向的截面图,model hor 和 model ver 分别为提出的仿真模型得到的含缺陷掩模空间像水平和垂直方向的截面图。而考虑阴影效应

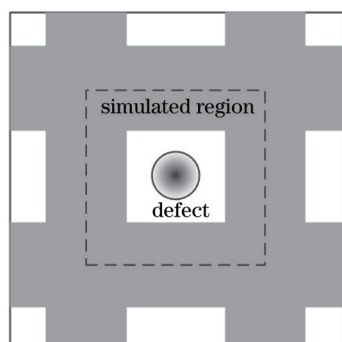


图6 含缺陷掩模接触孔图形

Fig.6 Contact hole mask with a defect

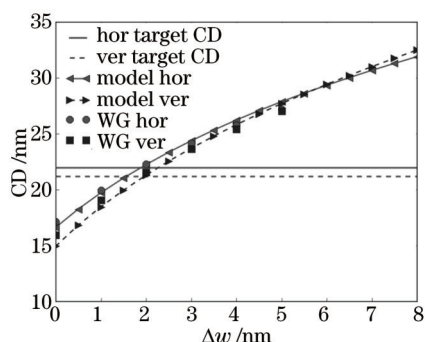


图7 接触孔图形不同图形修正量的缺陷补偿结果

Fig.7 Compensation results of different modification sizes for contact hole

的影响时,垂直方向的图形修正量除补偿缺陷造成的光强损失外,还需补偿阴影效应造成的光强损失,此时垂直方向的最佳图形修正量大于水平方向的最佳图形修正量。

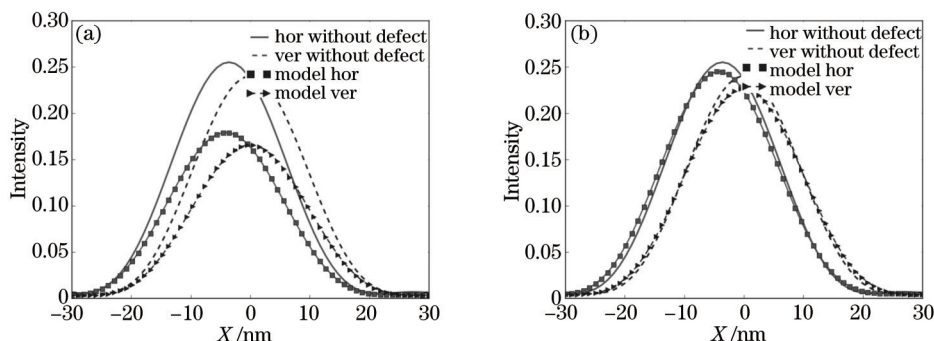


图8 周期60 nm时(a)补偿前与(b)补偿后的空间像截面图

Fig.8 Cross section of aerial image with a pitch of 60 nm (a) before and (b) after compensation

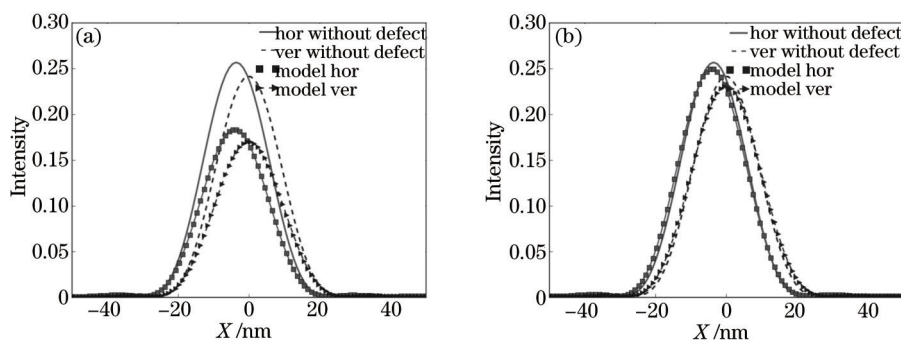


图9 周期100 nm时(a)补偿前与(b)补偿后的空间像截面图

Fig.9 Cross section of aerial image with a pitch of 100 nm (a) before and (b) after compensation

缺陷补偿计算所需的仿真时间为多次掩模仿真的时间总和,由于掩模仿真的时间主要由掩模周期决定,每次仿真中的掩模周期不变,因此可近似认为每次掩模仿真的时间恒定,因此总的仿真时间可表示为

$$T_{total} = T \cdot N, \quad (6)$$

式中 T 为单次掩模仿真的时间, N 为掩模仿真的次数。在图7中,采用波导法严格仿真进行三维含缺陷掩模接触孔图形仿真时,即使采用了霍普金斯频移,单次掩模仿真的时间也达到4265 s,而采用提出的仿真模型的单次仿真时间约为400 s,仿真速度提高10倍以上。当掩模周期达到100 nm时,严格仿真采用普通的台式电脑(Intel Dual-Core CPU 3.20 GHz, 4G内存)已无法实现,而采用提出的仿真模型可在50 min内完成。在100 nm周期时,采用与图8相同的缺陷形态参数并采用相同的最佳图形修正量进行缺陷补偿,补偿前后的空间像截面图如图9所示,图中曲线的含义同图8。与图8相比,图9中除周期不同外,补偿前后的空间像仿真结果基本相同,说明掩模周期的变化并不改变缺陷补偿的效果。因此通过选择合适的图形修正量仿真区间和掩模仿真区域,采用提出的仿真模型可实现快速的缺陷补偿计算。

3.2 缺陷的可补偿性

缺陷补偿通过修正吸收层图形,补偿空间像的光强损失,从而在特定的焦面上得到与理想图形相同的CD结果^[6,12]。图10所示为最佳图形修正量随表面缺陷高度的变化,其他参数同图4,图中曲线WG和model分别表示采用波导法和提出的仿真模型得到的不同表面缺陷高度情况下的最佳图形修正量。由图可知随着表面缺陷高度的增大,缺陷补偿所需的最佳图形修正量不断增大。由图5、图7和图10可知,缺陷补偿所需的最佳图形修正量受缺陷的形态和位置以及掩模图形的影响。缺陷的可补偿性定义为在给定的掩模图形和图形可修正量范围的条件下,当缺陷可得到有效的补偿,即在此修正量范围内存在最佳图形修正量时,该缺陷视为可补偿的,否则视为难以补偿的。图形可修正量范围可由相邻图形间的吸收层宽度决定。

以图3所示的22 nm二维图形为例,设图形最大可修正量为22 nm,缺陷的可补偿性分布如图11所示,图中(a)~(d)分别表示基底缺陷高度为20、30、40、50 nm,且 $h_{bot}=w_{bot}$ 时缺陷的可补偿性分布。在计算缺陷的可

补偿性时,缺陷位于图形中心位置,由图 5 可知,当缺陷位于图形中心位置时,补偿所需的最佳图形修正量最大,从而决定了缺陷的可补偿性。由图 11 可知,随着基底缺陷的增大,难以补偿的缺陷形态参数区域也不断增大。图 10 中,随着表面缺陷高度的增大,缺陷补偿所需的最佳图形修正量不断增大,而由图 11 可知,当较大的缺陷可被有效补偿时,缺陷高度的减小不能作为缺陷可被有效补偿的充分条件,而缺陷半峰全宽的减小可近似作为缺陷可被有效补偿的充分条件。图 11 还表明,在已知基底缺陷形态参数范围和掩模图形时,当表面缺陷的半峰全宽小于某特定值时,任意高度的表面缺陷都可被有效补偿。假设已知基底缺陷的高度和半峰全宽都小于 50 nm,由图 11 可知,表面缺陷半峰全宽小于 50 nm 的任意高度的缺陷都可被有效补偿。在图形偏移法和吸收层修正法结合时,通过吸收层修正法补偿图形偏移法未覆盖的缺陷。对特定的掩模图形,依据缺陷的可补偿性分布,可有效的区分可补偿的缺陷和难以补偿的缺陷。在图形偏移法中,针对不同缺陷给予不同的权重因子,从而更有效地进行图形偏移,以达到最好的效果。

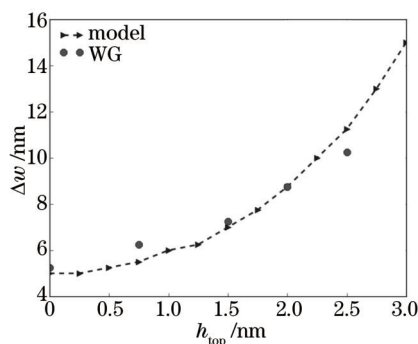


图 10 最佳图形修正量随 h_{top} 的变化

Fig.10 Optimal modification sizes versus h_{top}

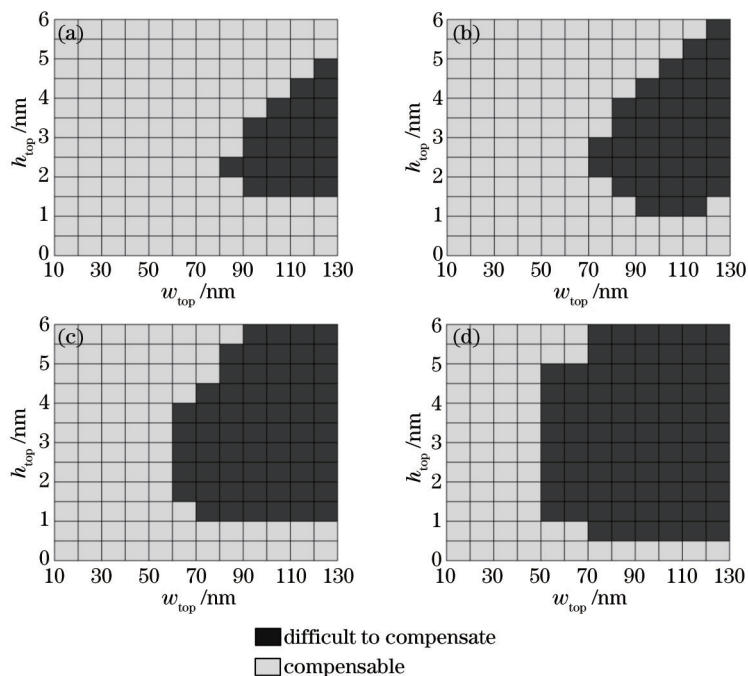


图 11 22 nm 二维图形的缺陷的可补偿性分布,其中 $h_{bot}=w_{bot}$,基底缺陷高度分别为。(a) 20 nm; (b) 30 nm; (c) 40 nm; (d) 50 nm
Fig.11 Defect compensability of the 2D mask with pattern size of 22 nm, where $h_{bot}=w_{bot}$, respectively and the bottom heights of defect are. (a) 20 nm; (b) 30 nm; (c) 40 nm; (d) 50 nm

4 结 论

建立了一个基于单平面近似的 EUV 光刻三维含缺陷掩模的快速仿真模型,并基于该仿真模型,对掩模缺陷进行了补偿计算。以 22 nm 三维接触孔图形为例,周期为 60 nm 时,该仿真模型与波导法严格仿真相

比,仿真速度提高10倍以上,而CD仿真误差小于0.6 nm。采用该仿真模型对二维图形和三维接触孔图形进行了缺陷补偿计算,得到了与严格仿真一致的最佳图形修正量。通过选择合适的图形修正量仿真区间和掩模仿真区域,采用所提出的掩模仿真模型可实现快速的缺陷补偿计算。最后,提出了缺陷的可补偿性的概念,并基于所提出的仿真模型讨论了二维图形的缺陷的可补偿性。依据缺陷的可补偿性分布,可以更有效的进行图形偏移,以达到最好的效果。

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 V Bakshi. EUV Lithography[M]. Washington SPIE Press, 2009: 187-198.
- 4 A O Antohe, P Kearney, M Godwin, *et al.*. Production of EUV mask blanks with low Killer defects[C]. SPIE, 2014, 9048: 90480H.
- 5 A Garetto, R Capelli, F Blumrich, *et al.*. Defect mitigation considerations for EUV photomasks[J]. J Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 2014, 13(4): 043006.
- 6 A Erdmann, P Evanschitzky, T Bret, *et al.*. Analysis of EUV mask multilayer defect printing characteristics[C]. SPIE, 2012, 8322: 83220E.
- 7 C H Clifford. Simulation and Compensation Methods for EUV Lithography Masks with Buried Defects[D]. Berkely: University of California, 2010. 19-20.
- 8 Y Deng, B La Fontaine, A R Neureuther. Performance of repaired defects and attPSM in EUV multilayer masks[C]. SPIE, 2002, 4889: 418-425.
- 9 Yan Peiyang, Lin Yan, M Kamna, *et al.*. EUVL multilayer mask blank defect mitigation for defect-free EUVL mask fabrication[C]. SPIE, 2012, 8322: 83220Z.
- 10 A Wagner, M Burkhardt, A B Clay, *et al.*. Mitigation of extreme ultraviolet mask defects by pattern shifting: Method and statistics[J]. J Vac Sci Technol B, 2012, 30(5): 051605.
- 11 A A Kagalwalla, P Gupta, D Hur, *et al.*. Defect-aware reticle floorplanning for EUV masks[C]. SPIE, 2011, 7974: 79740Z.
- 12 C H Clifford, T T Chan, A R Neureuther. Compensation methods for buried defects in extreme ultraviolet lithography masks[J]. J Vac Sci Technol B, 2011, 29(1): 011022.
- 13 A Erdmann, P Evanschitzky, T Bret, *et al.*. Modeling strategies for EUV mask multilayer defect dispositioning and repair[C]. SPIE, 2013, 8679: 86790Y.
- 14 A A Kagalwalla, P Gupta. Comprehensive defect avoidance framework for mitigating EUV mask defects[C]. SPIE, 2014, 9048: 90480U.
- 15 Du Yuelin, Zhang Hongbo, M Wong, *et al.*. Efficient multi-die placement for blank defect mitigation in EUV lithography[C]. SPIE, 2012, 8322: 832231.
- 16 A Elayat, P Thwaite, S Schulze. EUV mask blank defect avoidance solutions assessment[C]. SPIE, 2012, 8522: 85221W.
- 17 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.
- 18 P Evanschitzky, A Erdmann. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method [C]. SPIE, 2007, 6533: 65330Y.
- 19 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.
- 20 K Adam, A R Neureuther. Domain decomposition methods for the rapid electromagnetic simulation of photomask scattering[J]. J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 2002, 1(3): 253-269.
- 21 C Sambale, T Schmoeller, A Erdmann, *et al.*. Rigorous simulation of defective EUV multilayer masks[C]. SPIE, 2003, 5256: 1239-1249.
- 22 T Hashimoto, H Yamanashi, M Sugawara, *et al.*. Lithographic characterization of EUVL mask blank defects[C]. SPIE, 2004, 5374: 740-750.
- 23 D G Stearns, P B Mirkarimi, E. Spiller. Localized defects in multilayer coatings[J]. Thin Solid Films, 2004, 446: 37-49.

- 24 A O Antohe, D Balachandran, He Long, *et al.*. SEMATECH produces defect-free EUV mask blanks: Defect yield and immediate challenges[C]. SPIE, 2015, 9422: 94221B.
- 25 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.
- 26 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang. Fast simulation method 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.
- 27 C H Clifford, A R Neureuther. Smoothing based model for images of isolated buried EUV multilayer defects[C]. SPIE, 2008, 6921: 692119.
- 28 M C Lam, A R Neureuther. Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks[C]. SPIE, 2006, 6349: 63492H.
- 29 T Fühner, T Schnattinger, G Ardelean, *et al.*. Dr.LiTHO - a development and research lithography simulator[C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.
- 30 T Schmoeller, T Klimpel, I Kim, *et al.*. EUV pattern shift compensation strategies[C]. SPIE, 2008, 6921: 69211B.
- 31 Hua Song, L Zavyalova, I Su, *et al.*. Shadowing effect modeling and compensation for EUV lithography[C]. SPIE, 2011, 7969: 796910.
- 32 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: 韩 峰