

极紫外投影光刻接触孔掩模的快速仿真计算

曹宇婷^{1,2} 王向朝¹ 步 扬^{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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 采用一个极紫外投影光刻掩模衍射简化模型实现了三维接触孔掩模衍射场的快速仿真计算。基于该模型, 得到了接触孔掩模衍射场分布的解析表达式, 并对光刻成像时的图形位置偏移现象进行了解释和分析。简化模型中, 掩模包括吸收层和多层膜两部分结构, 吸收层的透射利用薄掩模修正模型进行计算, 多层膜的反射近似为镜面反射。以周期 44 nm、特征尺寸分别为 16 nm 和 22 nm 的方形接触孔为例, 入射光方向发生变化时, 该简化模型与严格仿真相比, 图形特征尺寸误差小于 0.4 nm, 计算速度提高了近 100 倍。此外, 考虑到多层膜镜面位置对图形位置偏移量的影响, 得到了图形位置偏移量的计算公式, 其计算结果也与严格仿真相一致。

关键词 光栅衍射; 极紫外投影光刻; 薄掩模模型; 严格电磁场仿真

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0705001

Fast Simulation Method for Contact Hole Mask in Extreme-Ultraviolet Lithography

Cao Yuting^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Bu Yang^{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 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper proposes a fast simulation method for the three-dimensional (3D) contact hole mask in extreme-ultraviolet lithography. Using the mask diffraction simplified model, an analytical expression of the diffraction spectrum of the contact hole is given, and theory analysis of the pattern shift effect is performed. The mask in the model includes two parts, the absorber and the multilayer structure. The absorber transmission is calculated using the modified thin mask model, and the multilayer reflection is approximated as mirror reflection. Taking 16 nm and 22 nm contact holes with a pitch of 44 nm as examples, the critical dimensional errors of the model are below 0.4 nm by comparison with the rigorous simulations, and the computation speed is increased nearly 100 times. Moreover, considering the equivalent location of the multilayer in the model, a formula is derived to calculate the amount of the pattern shift. The calculation results are consistent with those of the rigorous simulations as well.

Key words grating diffraction; extreme-ultraviolet lithography; thin mask model; rigorous electromagnetic field simulation

OCIS codes 050.1755; 050.1950; 340.7480

1 引 言

极紫外(EUV)投影光刻作为下一代光刻候选技术之一, 是深紫外(DUV)投影光刻向更短波段的

合理延伸。不同于 DUV 光刻, EUV 光刻系统中投影物镜和掩模均为反射式^[1], 且掩模厚度远大于入射光波长。在斜入射照明条件下, EUV 掩模的厚

收稿日期: 2012-01-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)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)

掩模效应使得光刻成像质量恶化,出现图形位置偏移、图形特征尺寸(CD)偏差等像差现象^[2,3],掩模对光刻成像质量的影响不容忽视。

在分析厚掩模效应时,传统的基尔霍夫薄掩模近似模型不再适用^[4],需采用严格仿真算法,如时域有限差分(FDTD)、严格耦合波(RCWA)和波导法^[5]等来获得掩模衍射场的精确分布。但严格仿真计算量大,计算速度慢,特别是对于三维(3D)接触孔图形的掩模仿真,其计算时间和计算量往往是二维(2D)线条图形的上百倍(如采用波导法计算 22 nm 密集线条需 2 s,而 22 nm 密集孔需 720 s)。为此,掩模严格仿真在光源掩模优化(SMO)和光学邻近效应校正(OPC)技术中的应用也受到了限制。

Adam^[6]采用域分解方法(DDM)将一个 3D 接触孔图形的仿真分解为两个 2D 线条图形和一个薄掩模的仿真,而 2D 线条图形的仿真可采用边界衍射波修正的方法进一步提高计算速度。但该方法还需考虑边界衍射波随入射光方向和偏振态的变化。此外,根据 EUV 掩模结构特点,掩模分解为吸收层和多层膜(ML)两部分,可分别对其进行建模和简化运算,如将 FDTD(计算吸收层衍射)和菲涅耳传输矩阵(计算 ML 反射)相结合^[7],或是将薄掩模修正模型(计算吸收层衍射)和光线追迹方法(计算 ML 反射)相结合^[8]。但这些快速仿真计算方法中也都还涉及到数值计算,对于 3D 接触孔图形的仿真其计算速度还有待进一步提高。

结合吸收层的薄掩模修正模型和 ML 的镜面反射近似,提出了 2D 线条图形的掩模衍射简化模型^[9,10]。本文即将该掩模衍射简化模型进一步扩展,应用到 3D 接触孔图形的快速仿真计算中,并基于该模型对图形位置偏移现象进行了解释和分析。严格仿真验证采用夫琅禾费实验室研发的 DrLiTHO 光刻仿真软件进行^[11]。

2 理论模型

2.1 接触孔掩模衍射简化模型

典型的 EUV 掩模结构如图 1 所示,图 1(a)为 3D 接触孔掩模的俯视图,图 1(b)为其 x 方向的截面图。接触孔沿 x 和 y 方向的图形 CD 分别为 w_x 和 w_y ,周期分别为 p_x 和 p_y 。EUV 掩模由吸收层和 ML 两部分组成,ML 包含了 40 对 Mo/Si, Si 层和 Mo 层的厚度分别为 4.17 nm 和 2.78 nm。入射光波长 λ 为 13.5 nm,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在 xy 面上的投

影与 x 轴的夹角。此外,入射光方向还可采用方向余弦表示, $(\alpha_{in}, \beta_{in}) = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta)$, α_{in} 和 β_{in} 分别为入射光方向与 x 轴和 y 轴夹角的余弦值。

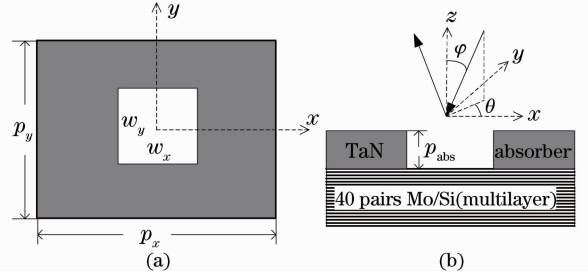


图 1 EUV 掩模结构。(a)俯视图;(b)截面图
Fig. 1 EUV mask structure. (a) Vertical view;
(b) section view

EUV 掩模的衍射过程如图 2(a)所示,斜入射光经过吸收层衍射、ML 反射最后再次经过吸收层衍射得到整个掩模的衍射场。其中吸收层和 ML 间往返的多次反射比较小而被忽略了。整个 EUV 掩模的衍射谱可描述为

$$G(\alpha_n, \beta_n) = \int F_{thick}(\alpha_n - \alpha_m, \beta_n - \beta_m) R(\varphi_m) \times F_{thick}(\alpha_m - \alpha_{in}, \beta_m - \beta_{in}) d\alpha_m d\beta_m, \quad (1)$$

式中 $(\alpha_{in}, \beta_{in})$ 和 (α_m, β_m) 分别代表入射光和衍射光方向(方向余弦); F_{thick} 为吸收层的衍射谱函数; R 为 ML 反射系数,其值与 ML 上方的入射角 φ_m 有关, $\cos \varphi_m = \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}$ 。(1)式可以理解为:方向为 $(\alpha_{in}, \beta_{in})$ 的入射平面波经吸收层衍射,得到一系列 m 级次的衍射波,每个 m 级次的衍射波经 ML 反射后,再次经过吸收层衍射,得到一系列新的 n 级次衍射波,最终的掩模衍射场将是各 m 级次衍射波的叠加。

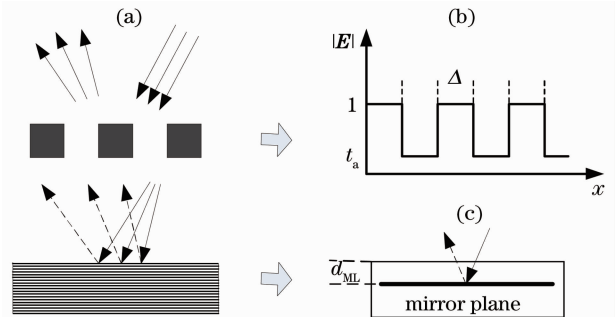


图 2 掩模衍射简化模型。(a)光线追迹;(b)吸收层的薄掩模修正模型;(c)ML 的镜面反射近似

Fig. 2 Simplified model for EUV mask diffraction. (a) Ray tracing; (b) modified thin mask model of the absorber; (c) mirror approximation of the ML

对于 EUV 掩模 ML 的反射,可等效为位于某平面上的镜面反射,如图 2(c)所示。光往返经过 ML 上表面和镜面位置时存在一个相位传播因子,对应于 ML 反射系数的相位部分。严格仿真结果

表明,ML 的反射具有滤波作用,在一定入射角范围内反射率可近似为常数,在该范围以外反射率骤减至近似为零^[9,10]。镜面近似后,ML 的反射可描述为^[10]

$$R_{ML}(\varphi_m) = \begin{cases} r_{ML} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} 2d_{ML} \cos \varphi_m\right), & \varphi_m \in (-\varphi_{ML}, \varphi_{ML}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中 r_{ML} 、 d_{ML} 和 φ_{ML} 分别为镜面反射系数、镜面位置和 ML 镜面反射的滤波范围。这些参数可通过与严格仿真的电磁场匹配得到,在图 1 的掩模结构下有 $r_{ML} \approx 0.855$, $d_{ML} \approx 53.5 \text{ nm}$, $\varphi_{ML} \approx 15^\circ$ 。

对于 EUV 掩模吸收层的衍射,可采用薄掩模修正模型进行计算^[9,10,12]。它将吸收层等效为位于某平面上的一个薄层,薄层的透射函数[如图 2(b)所示]包含两部分,一部分是基尔霍夫标量衍射理论中的几何波透射函数,另一部分是代表边界衍射波修正的边界点脉冲函数。与 2D 线条图形的吸收层

薄掩模修正模型不同^[12],3D 接触孔有两相互垂直的内表面,在同一偏振光照明条件下两垂直内表面上的电磁场边界条件不同。例如,在 y 偏振光照明条件下,对于沿 x 方向的内表面而言该偏振是 TM 偏振,而对于沿 y 方向的内表面而言该偏振是 TE 偏振。边界条件不同,3D 接触孔简化模型中两垂直内表面的边界点脉冲幅值也将不同,分别标记为 Δ_{TM} 和 Δ_{TE} 。在 y 偏振光照明条件下,等效薄层的透射函数可描述为

$$t_y(x, y) = t_a + (1 - t_a) \text{rect}(x/w_x, y/w_y) + \Delta_{TE} [\delta(x - w_x/2) + \delta(x + w_x/2)] \text{rect}(y/w_y) + \Delta_{TM} [\delta(y - w_y/2) + \delta(y + w_y/2)] \text{rect}(x/w_x), \quad (3)$$

式中 t_a 为吸收层的几何波透射系数。相应地,在 x 偏振光照明条件下,等效薄层透射函数 $t_x(x, y)$ 与(3)式类似,只需将 Δ_{TE} 和 Δ_{TM} 的位置互换即可。若光刻成像采用的是非偏振光照明,则可先将入射光偏振态分解为 x 偏振和 y 偏振分量,分别进行计算;再将两次计算结果相叠加即可得到非偏振光照明的结果。此外,薄层的等效面位置将引起相位延迟,吸收层的衍射谱函数最终描述为

$$F_{\text{thick}}(\alpha_m, \beta_m) = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_{\text{abs}}}{2} \sqrt{1 - \alpha_{\text{in}}^2 - \beta_{\text{in}}^2}\right) F_{\text{thin}}(\alpha_m - \alpha_{\text{in}}, \beta_m - \beta_{\text{in}}) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_{\text{abs}}}{2} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}\right), \quad (4)$$

式中 F_{thin} 为薄层的衍射谱函数,满足 Hopkins 频移不变原理,可直接对(3)式求傅里叶变换得到; d_{abs} 为吸收层的厚度;薄层等效面位于吸收层的中间位置^[9,12],公式中的两相位因子分别代表从吸收层上表面到薄层等效面和从薄层等效面到吸收层下表面的相位传播。模型参数通过与严格仿真间的频谱匹配计算获得^[9,12]。在 y 偏振光照明条件下,2D 线条掩模的一次严格仿真和频谱匹配可得到模型参数 t_a 和 Δ_{TE} ,而 Δ_{TM} 则可通过 x 偏振光照明得到。从而,只需经过两次 2D 线条掩模的严格仿真和频谱匹配即可得到 3D 接触孔掩模衍射模型中的所有参数值。且这些模型参数与图形 CD 和周期无关^[12],可用于其他 CD 和周期下的掩模线条或是接触孔图形中。

2.2 图形位置偏移量的几何分析

图形位置偏移是指 EUV 掩模斜入射时的光刻成像与正入射相比,图形中心位置存在偏移,这主要是由斜入射时厚掩模的阴影效应所引起的。在上述 EUV 掩模简化模型中,掩模吸收层等效为位于其中间位置处的一个薄层,ML 等效为距其上表面 d_{ML} 处的一个镜面,等效后的掩模衍射示意图如图 3 所示。由几何光学可知,在斜入射光照明条件下掩模成像将存在图形位置偏移,偏移量为

$$\Delta x = M(d_{\text{abs}} + d_{ML}) \tan \varphi_{\text{eff}}, \quad (5)$$

式中 M 为成像系统的放大倍率, φ_{eff} 为有效入射角。 φ_{eff} 比较小,有

$$\tan \varphi_{\text{eff}} \approx \alpha_{\text{in}} = \sin \varphi \cos \theta. \quad (6)$$

与以往的 EUV 掩模图形位置偏移量几何关系

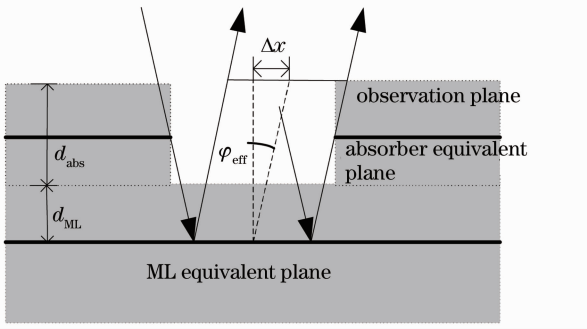


图 3 等效后的掩模衍射示意图

Fig. 3 Equivalent mask diffraction diagram

式不同^[13],由(5)式得到的图形位置偏移量还考虑了 ML 等效面位置 d_{ML} 的影响。而从后面的仿真验证也可看到 d_{ML} 对图形位置偏移量的影响是不可忽略的。

3 仿真结果与分析

结合(1)~(4)式可得到 3D 接触孔掩模衍射谱的解析表达式。将此衍射谱与严格仿真得到的衍射

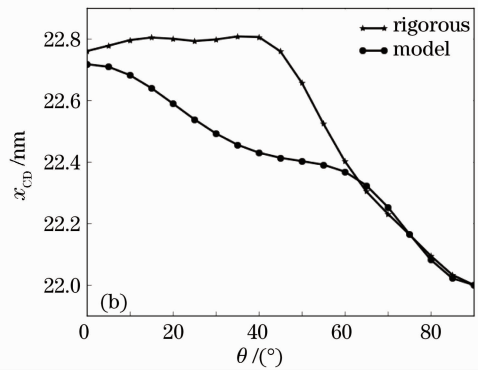
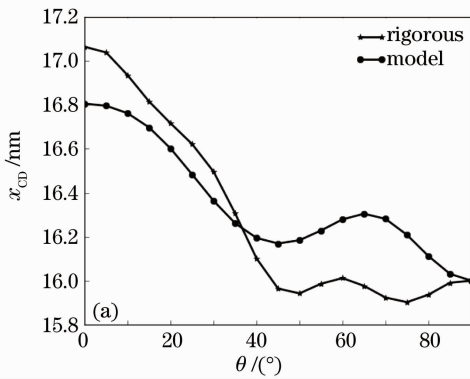


图 4 接触孔 x_{CD} 随入射光方向的变化。(a) 16 nm; (b) 22 nm

Fig. 4 x_{CD} of contact holes varying with the direction of incident light. (a) 16 nm; (b) 22 nm

掩模简化模型误差与图形相邻边界的衍射光相互串扰有关,特别是对于更小工艺节点如 11 nm,其边界衍射效应已不能仅仅通过模型中的边界点脉冲函数来表示。此外,掩模吸收层衍射采用了简单的薄掩模修正模型进行计算,在 20° 衍射角范围内可满足频谱匹配^[10],但随着掩模图形周期的减小,能够匹配的衍射谱所占比例下降,模型精度也将下降。如 16 nm 密集孔(周期为 32 nm)的最大 CD 误差达 1.5 nm,该误差与掩模周期减小有关(与上述简单参数设置条件下 16 nm 密集孔的成像对比度很小也有关系),并非主要是由 CD 减小所导致的。故简化模型更适合于大周期的掩模仿真计算,在保证 0.4 nm 误差的同时其计算量和计算时间上的优势

谱分别代入到光刻仿真软件中进行掩模成像计算,对关键光刻性能参数,如成像图形 CD 进行比较,从而验证模型的正确性。吸收层厚度 d_{abs} 设置为 70 nm;光刻投影物镜数值孔径 NA 为 0.35,放大倍率 M 为 1/4;采用非偏振光圆形光源照明,部分相干因子 σ 为 0.6;入射光方向 φ 为典型值 6° ,方位角 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。

3.1 CD 误差

以 16 nm 和 22 nm 节点的方形接触孔为例,当掩模图形周期为 44 nm(像方尺寸 $p_x = p_y = 44$ nm)时, x 方向成像图形 CD x_{CD} 随入射光方向的变化如图 4 所示。不考虑光刻胶的影响,CD 值由简单的空间阈值得到,图中阈值的选取使得入射光方位角 $\theta = 90^\circ$ 时, x_{CD} 为目标尺寸。由图 4 可知,在 44 nm 周期下,与严格仿真相比,简化模型得到的 16 nm 和 22 nm 接触孔 CD 误差均在 0.4 nm 范围内(业界要求 CD 综合误差控制在 10%),而计算速度提高了近 100 倍。

也将更加明显,如 22 nm 接触孔图形周期为 110 nm 时,严格仿真采用单个计算机(2 GB 内存)已无法实现,但简化模型却可在 4 min 内完成,其空间像分布如图 5 所示。

3.2 图形位置偏移量

在与图 4 相同的条件下,22 nm 接触孔在 x 方向的图形位置偏移量随入射光方向的变化如图 6 所示。当入射光方位角 $\theta = 90^\circ$ 时(入射面为 yz 平面),接触孔在 x 方向上无偏移。图中虚线是采用(5)式的计算结果,考虑 ML 等效面位置 d_{ML} 的影响后,由几何分析方法得到的图形位置偏移量与严格仿真计算结果相一致。掩模简化模型可用于更好地解释和分析 EUV 掩模阴影效应。

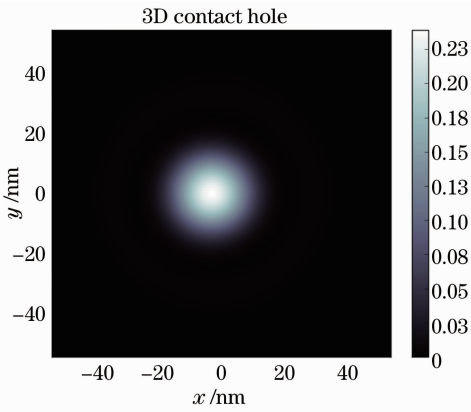


图5 简化模型得到的 22 nm 接触孔掩模空间像($\theta=0^\circ$)

Fig. 5 Aerial image of 22 nm contact hole obtained by the simplified model ($\theta=0^\circ$)

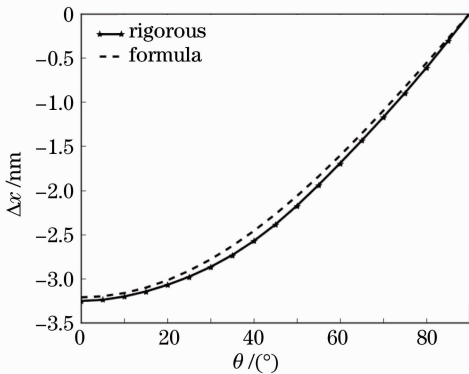


图6 图形位置偏移量随入射光方向的变化

Fig. 6 Pattern shift varying with the direction of incident light

4 结 论

建立了一个 3D 接触孔掩模衍射简化模型,得到了接触孔掩模衍射场分布的解析表达式,并基于该模型对光刻成像时的图形位置偏移现象进行了解释和分析。以 6° 斜入射、周期为 44 nm、CD 分别为 16 nm 和 22 nm 的方形接触孔为例,该模型的计算结果与严格仿真相一致,图形 CD 偏差小于 0.4 nm,计算速度提高了近 100 倍。掩模简化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。

此外,在掩模简化模型中,考虑 ML 等效面位置对图形位置偏移量的影响,由几何分析方法得到了图形位置偏移量的计算公式,其计算结果也与严格仿真相一致。简化模型可用于更好地解释和分析 EUV 掩模阴影效应。

参 考 文 献

- 1 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222003
- 2 刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222003
- 3 H. Kang, S. Hansen, Jan van Schoot *et al.*. EUV simulation extension study for mask shadowing effect and its correction[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69213I
- 4 T. Schmoeller, T. Klimpel, I. Kim *et al.*. EUV pattern shift compensation strategies[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69211B
- 5 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 412~514
- 6 P. Evanschitzky, A. Erdmann. Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method[C]. *SPIE*, 2007, **6533**: 65330Y
- 7 K. Adam. Domain Decomposition Methods for the Electromagnetic Simulation of Scattering from Three-Dimensional Structures with Applications in Lithography [D]. Berkeley: University of California, 2001
- 8 C. Sambale, T. Schmoeller, A. Erdmann *et al.*. Rigorous simulation of defective EUV multilayer masks[C]. *SPIE*, 2003, **5256**: 1239~1248
- 9 C. H. Clifford, A. R. Neureuther. Fast simulation of buried EUV mask defect interaction with absorber features[C]. *SPIE*, 2007, **6517**: 65170A
- 10 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
- 11 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
- 12 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, A. Erdmann *et al.*. Analytical model for EUV mask diffraction field calculation[C]. *SPIE*, 2011, **8171**: 81710N
- 13 Tim Fuhner, Thomas Schnattinger, Gheorghe Ardelean *et al.*. Dr. LiTHO: a development and research lithography simulator [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 65203F
- 14 M. C. Lam, A. R. Neureuther. Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks[C]. *SPIE*, 2006, **6349**: 63492H
- 15 Vivek Bakshi. EUV Lithography[M]. Washington: SPIE Press, 2009. 326~373

栏目编辑: 李文喆