

掩模衍射频谱轴向分量对光刻成像性能的影响

董立松 李艳秋 郭学佳

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 传统三维光刻矢量成像模型中将投影系统物方电磁场表示为二维形式, 实现方式分为两种: 采用局部坐标和忽略掩模衍射频谱的轴向分量。后者在浸没式光刻系统仿真中的适用性需要进一步分析。简述了忽略掩模衍射频谱轴向分量的矢量成像模型和引入该分量的全光路三维光刻矢量成像模型, 利用这两种模型和商业仿真软件, 研究了掩模衍射频谱轴向分量对光刻胶中成像特征尺寸的影响并对结果进行了讨论。研究表明, 相干照明和部分相干照明条件下, 掩模衍射频谱轴向分量对光刻成像的影响随着数值孔径的变化趋势存在较大差异。这说明相干照明下的分析结论并不适用于部分相干照明条件, 且只有全光路三维矢量成像模型才能满足浸没式高分辨光刻仿真的要求。

关键词 成像系统; 物理光学; 浸没式光刻; 矢量成像模型; 衍射频谱

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1111002

Influence of the Axial Component of Mask Diffraction Spectrum on Lithography Imaging

Dong Lisong Li Yanqiu Guo Xuejia

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Traditional three-dimensional (3D) vector imaging models treat the electric field distribution in the entrance pupil of projector by transforming the distribution in the local coordinate or ignoring the axial component of the mask diffraction spectrum (MDS). The accuracy of the model with the latter should be discussed in immersion lithography. The traditional 3D vector imaging model and a modified 3D lithography imaging model which integrates all the vector effects of plane wave through the whole imaging system are introduced. Then the influence of the axial component of MDS on the lithography imaging performance is analyzed by the modified imaging model and the resist model of commercial software PROLITH™. The results are discussed by using frequency spectrum analysis. The simulation results show that the accuracy of traditional 3D vector imaging model is degraded in hyper numerical aperture (NA) system for the axial component of MDS on the entrance pupil of projector cannot be ignored any more in immersion lithography. This demonstrates that only the modified 3D imaging model under partially coherent illumination condition can satisfy the requirement of hyper NA lithography simulation.

Key words imaging systems; physical optics; immersion lithography; vector imaging model; diffraction spectrum

OCIS codes 110.5220; 110.2960; 110.2990; 110.1758

1 引言

光刻成像理论和模型是正确分析和预估光刻系统成像性能、研究光刻工艺、预测和评估光刻技术的重要工具。

光刻成像模型自诞生以来, 逐渐由最初的标量模型发展到大数值孔径(NA)下的矢量模型^[1]。在当前的光刻技术发展阶段, 只有矢量成像

收稿日期: 2013-04-01; **收到修改稿日期**: 2013-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、国家科技重大专项(2012ZX02701001-005)

作者简介: 董立松(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事高数值孔径光刻成像理论与分辨率增强技术等方面的研究。

E-mail: donglisong@bit.edu.cn

导师简介: 李艳秋(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事高分辨成像及先进光刻技术、传感与微系统技术、微纳检测技术及精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

模型才能正确表征电磁波在光刻系统中传播时的矢量特性。

Flagello 等^[2-3]第一次建立了点光源相干照明下的矢量成像模型;Pistor^[4]利用 Abbe 点光源积分方法将该模型拓展到部分相干成像领域。Adam 等^[5]将经典 Hopkins 公式进行拓展,建立了基于 Hopkins 方程的矢量成像模型。Evanschitzky 等^[6]于 2009 年提出了部分相干照明下基于 Abbe 方法的严格矢量成像模型。Peng 等^[7]总结了光刻矢量成像模型的进展,将其表示为统一的解析形式。近年来,研究人员基于 Hopkins 方程提出了多种适用于光学临近效应修正(OPC)和光源-掩模优化(SMO)的快速矢量成像模型^[8-10]。上述矢量成像模型通过采用局部坐标^[3-4,6,9-10]或者忽略掩模衍射频谱的轴向分量^[5,8]的方式将投影系统物方电场分布表示为二维的形式。周远^[11]证明了忽略掩模衍射频谱轴向分量,仅考虑像方电磁场三维分布的成像模型在投影系统 NA 较小时具有足够高的仿真精度。Azpiroz^[12]首次在成像模型中同时考虑了物方和像方的三维电场分布,分析考虑和忽略掩模衍射频谱轴向分量引起的光刻空间像强度分布差异。但是已有的工作存在以下不足:一方面,实际的光刻系统均采用部分相干照明,而 Azpiroz^[12]在分析掩模衍射频谱轴向分量影响时采用的相干照明、干式投影系统($NA < 1$)、特征尺寸为 270 nm 的接触孔结构导致其并不完全适用于浸没式光刻系统;另一方面,在 45 nm 及以下节点,光刻空间像并不能准确描述光刻成像特征^[5]。

为了准确分析掩模衍射频谱轴向分量对浸没式

($NA > 1$)部分相干光刻胶成像性能的影响及趋势,本文首先简述了忽略掩模衍射频谱轴向分量的传统三维光刻矢量成像模型和加入这一分量的全光路三维光刻矢量成像模型;然后利用这两种成像模型和商业软件 PROLITH™ 中的光刻胶模型,计算出光刻胶中曝光图形的特征尺寸(CD),定量分析考虑和忽略掩模衍射频谱分布轴向分量对光刻成像性能造成的影响以及这种影响随投影系统 NA 的变化趋势;最后从频谱分析的角度对仿真结果进行了讨论。文中所使用的 NA 不仅包含了当前光刻技术中常用的技术参数,并且涵盖了固体浸没式光刻技术^[13]和像差检测技术中所使用的 NA 值,具有更广泛的适用范围。

2 理论模型

光刻成像系统主要由照明系统、掩模(物)、投影系统和硅片(像)等组成。基于光刻成像系统的性质,照明系统可以表示为其出瞳面,而投影系统可以用其入瞳和出瞳表示。投影系统入瞳是一个以轴上物点 O 为中心的球面,投影系统出瞳是一个以物点 O 的高斯像点 O' 为中心的球面。投影光刻成像系统示意图如图 1 所示,掩模位于 $x-y$ 平面,掩模的像面位于 x_i-y_i 平面。经掩模面衍射,到达投影系统入瞳处的平面波的方向余弦为 (α, β, γ) ,从出瞳传播到像面的平面波的方向余弦为 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 。以直角坐标系 $x-y-z$ 为全局坐标系, $S-P$ 为局部坐标系,其中 S 轴垂直于波矢量与光轴形成的平面(入射面), P 轴在入射面内并垂直于波矢量和 S 轴。

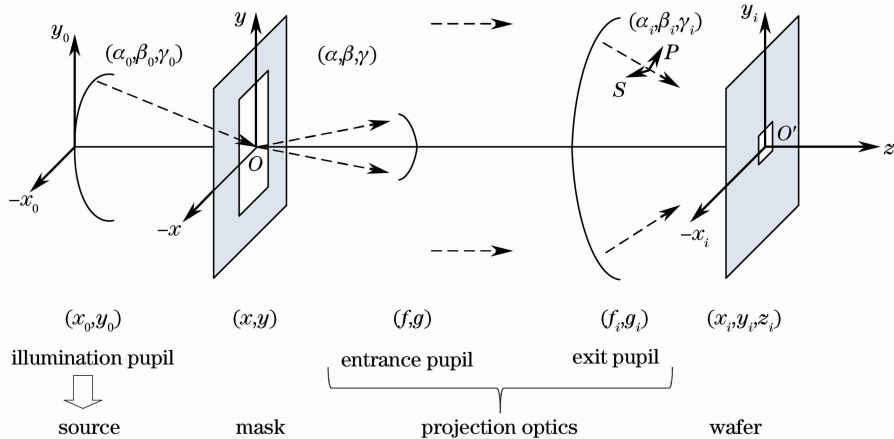


图 1 光刻成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of lithography optical system

利用平面波近似^[14]和夫朗禾费衍射理论,投影系统像面的电场分布为^[5]

$$I(f, g) = \iint_{-\infty}^{\infty} F_{\text{TCC}}(f_1, g_1, f + f_1, g + g_1) M(f_1, g_1) M'(f + f_1, g + g_1) df_1 dg_1, \quad (1)$$

$$F_{\text{TCC}}(f_1, g_1; f_2, g_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} S(f, g) K(f + f_1, g + g_1) K'(f + f_2, g + g_2) df dg. \quad (2)$$

根据 Hopkins 公式的物理含义可以将上述公式表示成

$$I(x_i, y_i, z_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} S(f, g) \|\mathcal{F}^{-1}[\Psi_{\text{ext-p}} \cdot \mathcal{F}(U)]\|^2 df dg, \quad (3)$$

其中 F_{TCC} 表示透射率交叉系数; M 表示掩模频谱; K 表示投影系统光瞳函数; S 表示光源的强度; 上标“'”表示共轭。 \mathcal{F} 表示傅里叶变换; \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换; U 为掩模衍射近场的电场分布; (f, g) 是投影系统入瞳面上的归一化光瞳坐标, 由于光瞳共轭性

质, 它也表示光源坐标; 变换矩阵 $\Psi_{\text{ext-p}}$ 表示投影系统出瞳对平面波各电场分量的变换性质^[15]。在函数 U 中, 只包含了掩模衍射电场分布的 x 和 y 分量, 而忽略了轴向分量。

在光刻投影系统的 NA 较小时, 上述近似具有

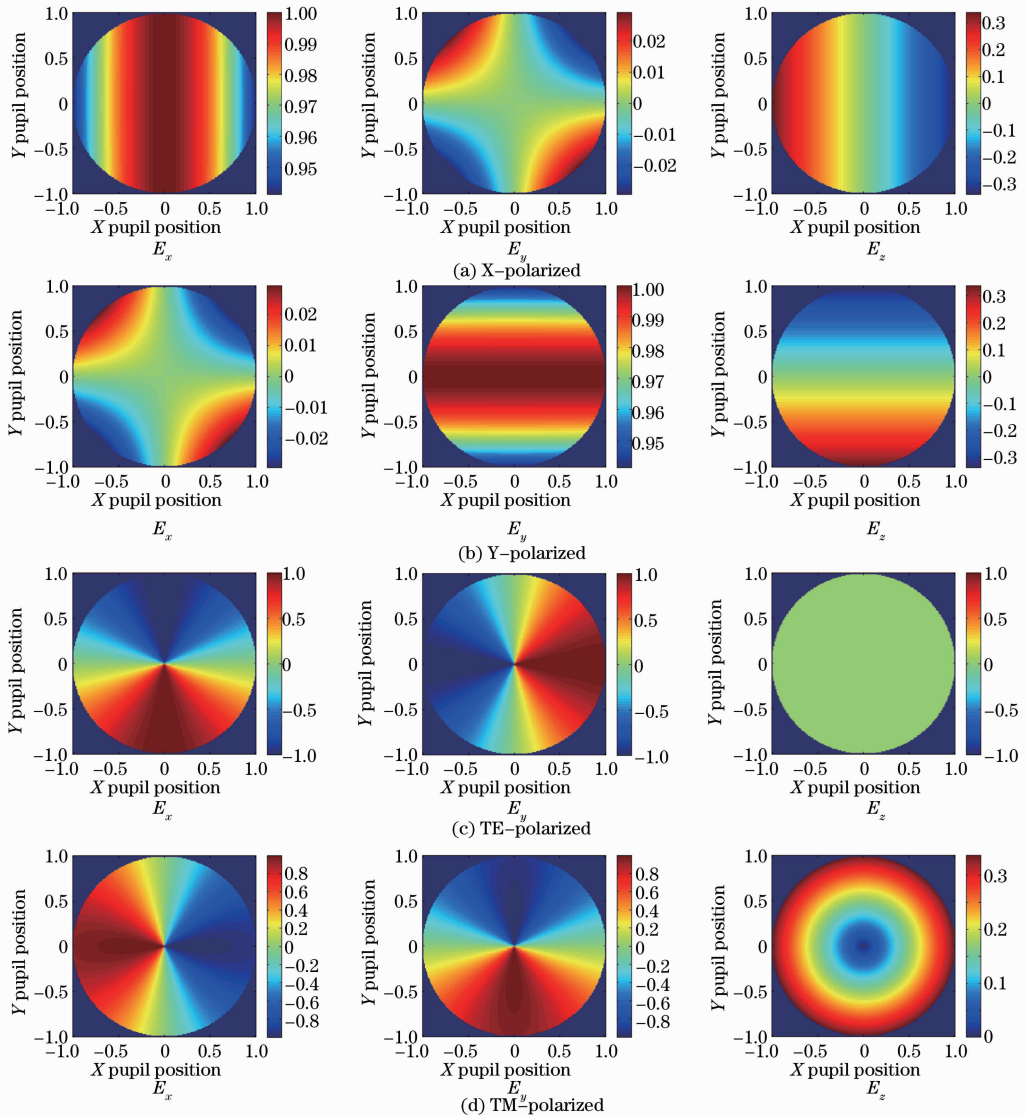


图 2 不同偏振光的电场在光瞳上的三维分布

Fig. 2 Electric field distributions of polarized light on entrance pupil of projector

足够高的精度,但是随着浸没式光刻系统的发展,尤其是固体浸没的引入^[13], NA 已远大于1,此时掩模衍射频谱的轴向分量已不可忽略。以 $NA=1.35$ 投影系统的轴上视场点为例,不同偏振光的电场在光瞳上的三维分布如图2所示。

$$I(x_i, y_i, z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(f, g) \|\mathcal{F}^{-1}\{\Psi_{\text{ext-p}} \cdot \Psi_{\text{ent-p}}(f, g) \cdot \mathbf{E}_M\}\|^2 df dg, \quad (4)$$

式中 \mathbf{E}_M 表示根据非傍轴矢量衍射理论得到的掩模三维衍射场^[16],它是一个 3×1 矩阵矢量; $\Psi_{\text{ent-p}}(f, g)$ 表示投影系统入瞳处的变换矩阵^[16]。

通过比较(4)式与(3)式,即可分析掩模衍射频谱轴向分量存在时像面的电场分布,将该电场分布与商业光刻仿真软件PROLITH™中的光刻胶模型相结合即可以从光刻胶中成像的角度分析掩模衍射频谱轴向分量对浸没式部分相干光刻成像性能的影响。

3 仿真结果与分析

首先选择表1所示的4种掩模结构和光刻配置参数,分别比较相干照明和部分相干照明下忽略掩模衍射频谱轴向分量的传统三维光刻矢量成像模型(后文简称传统三维模型)与全光路三维光刻矢量成像模型(简称全光路三维模型)所得空间像之间差值

从图2可以看出,除TE偏振光外,越接近光瞳边缘,电场的轴向分量越大,因此在浸没式光刻系统中需要进一步分析该分量对光刻成像的影响。部分相干照明下,涵盖了投影系统入瞳和出瞳处电磁场三维信息的全光路三维光刻矢量成像模型为

的均方根(RMS)随 NA 的变化趋势。然后利用PROLITH™软件中的光刻胶模型,计算出两种模型在相同条件下得到的光刻胶结果的CD差值随 NA 的变化(CD差值是指以全光路三维模型所得CD值为标准值,传统三维模型所得CD值与标准值的差,后文中所提到的CD差值均指该值的绝对值),定量分析掩模衍射频谱轴向分量对浸没式光刻成像性能的影响。其中在 $NA=1.35$ 以下时采用水浸没($n=1.44$), $NA=1.35$ 以上时采用的浸没介质为LuAg($n=2.14$)^[13]。最后从掩模衍射频谱的角度对这种影响进行了分析。由于光刻系统中多采用Y偏振光和TE偏振光照明,且TE偏振光不存在轴向分量,因此后文的仿真条件中均采用Y偏振光照明。表1中Att-PSM表示衰减型相移掩模, σ 为光源的部分相干因子。

表1 45 nm节点下的仿真条件

Table 1 Simulation conditions in 45 nm node

	Dense line	Semi-dense line	Contact hole	Isolated line
Mask type	6% Att-PSM	6% Att-PSM	6% Att-PSM	Alt-PSM
Line width /nm	45	45	75	45
Pitch /nm	90	135	150	225
Illumination type	Annular, Y-polarized, $\sigma=0.81/0.96$	Custom, Y-polarized, $\sigma=0.81/0.96$, blade angle is 30°	Annular, Y-polarized, $\sigma=0.47/0.62$	Conventional, Y-polarized, $\sigma=0.1$

由于在相干照明下,Y方向分布线条结构的频谱均分布在X轴上,Y偏振光照明时掩模衍射频谱的轴向分量为0,如图2所示,所以此时频谱轴向分量对光刻成像无影响。而对于相干照明下的接触孔结构,轴向分量对光刻成像的影响如图3所示。

部分相干照明下,掩模衍射频谱轴向分量对光刻成像的影响如图4所示。

从图3中可以看出,相干照明下传统三维模型与全光路三维模型仿真结果之间差值的均方根随着 NA 的增大而增大,而CD差值则随着 NA 的增大而减小。此外,在浸没介质和进入投影系统的掩模

衍射级次均相同的条件下,由于衍射级次对应的绝对光瞳坐标相同,均方根差值和CD差值不会随着 NA 的变化而变化。

从图4中均方根差值和CD差值的变化趋势可以得出以下结果。

1) 对于线条结构,传统三维模型与全光路三维模型仿真结果均方根差值和CD差值均随着 NA 的增大而递增。其中密集线条结构增加的趋势最明显,而孤立线条结构的增加趋势最弱,几乎可以忽略不计。这可以通过光刻成像理论和掩模的频谱分布得到解释(以密集线条为例,如图5所示;其余结构与此类似)。

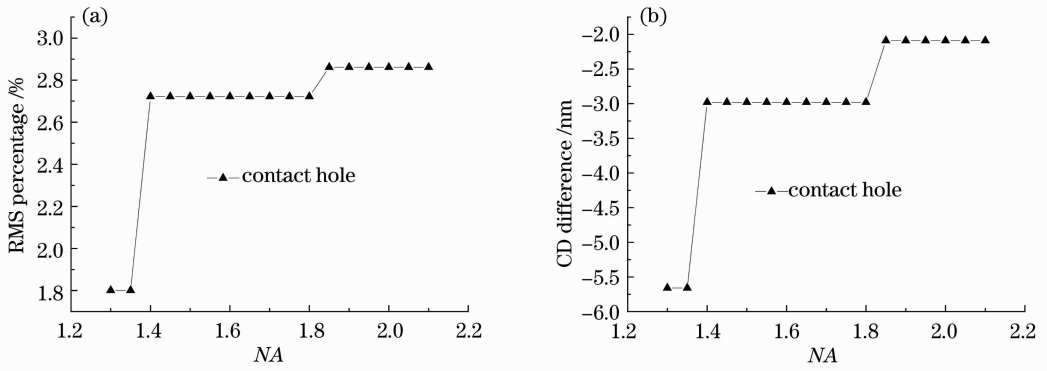


图3 相干照明下两种成像模型的仿真结果比较。(a)均方根值；(b) CD 差值

Fig. 3 Comparison of simulation results between traditional 3D imaging model and modified 3D model in coherent illumination. (a) RMS percentage; (b) CD difference

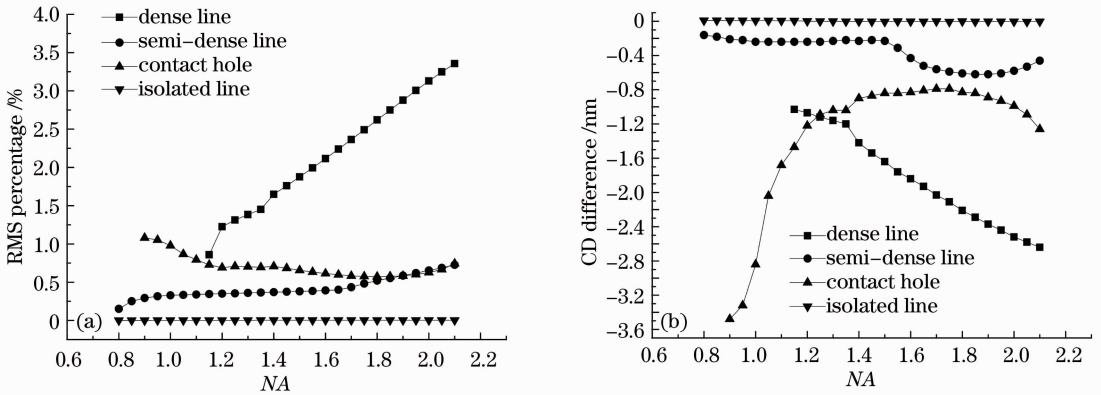


图4 部分相干照明下两种成像模型的仿真结果比较。(a)均方根值；(b) CD 差值

Fig. 4 Comparison of simulation results between traditional 3D imaging model and modified 3D model in partially coherent illumination. (a) RMS percentage; (b) CD difference

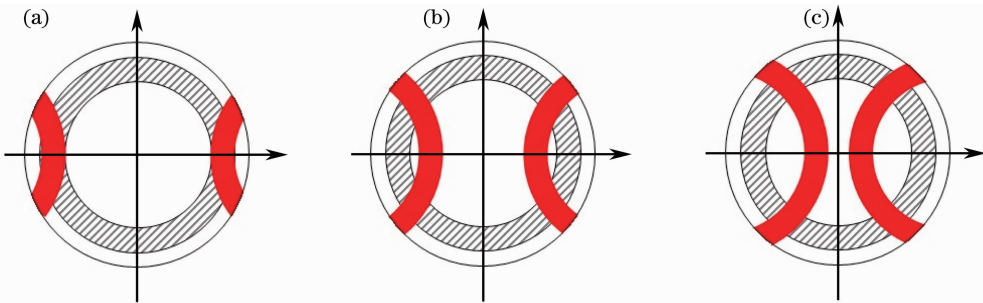


图5 一维密集线条结构的频谱分布。(a) $NA=1.2$ ；(b) $NA=1.55$ ；(c) $NA=2.1$

Fig. 5 Diffraction spectrum of 1D dense line. (a) $NA=1.2$ ；(b) $NA=1.55$ ；(c) $NA=2.1$

从光刻成像理论可知,当采用 Y 偏振光照明时,在成像模型中加入掩模衍射频谱的轴向分量后,频谱的 y 分量呈现出以 x 轴为中心沿 y 轴递减的趋势,其分布如图 2 所示,并且这种趋势随着 NA 的增大而增大。由于此时对成像的主要贡献来自于频谱的 y 分量,因此当参与干涉成像的频谱越靠近光瞳的上下边缘时,引起的成像误差越大。从图 5 中可以看出,NA 越大,则一级衍射光越接近光瞳的上下边缘,从而均方根差值和 CD 差值均呈现出递增的趋势。

2) 对于接触孔结构,传统三维模型与全光路三维模型仿真结果之间的均方根差值和 CD 差值均随着 NA 的增加整体上呈现减小的趋势,且当 NA 大于 1.8 时,均方根差值和 CD 差值随着 NA 的增加而缓慢增加,但即使在最小的情况下,该 CD 差值仍接近 1 nm。同样地,这也可以通过光刻成像理论和掩模的频谱分布得到解释。需要指出的是,对于一维线条结构,其零级频谱和一级频谱的值相差不大,而对于接触孔结构,一级频谱的值要远大于零级频

谱的值,且一级频谱决定着成像质量。因此由于掩模频谱轴向分量的引入导致的零级频谱的变化对成像质量的影响很小。

如图6所示,在 NA 小于1.2时只有 $(0,0)$, $(\pm 1,0)$ 和 $(0,\pm 1)$ 五个级次参与干涉成像,且 NA 越小,非零衍射级次越接近光瞳边缘,因此随着 NA 的增大,均方根差值和 CD 差值急剧下降。当 NA 在1.2和1.8之间时, $(\pm 1,\pm 1)$ 级次衍射光参与干涉成像,由于 $(\pm 1,0)$ 和 $(0,\pm 1)$ 级次逐渐接近光瞳中

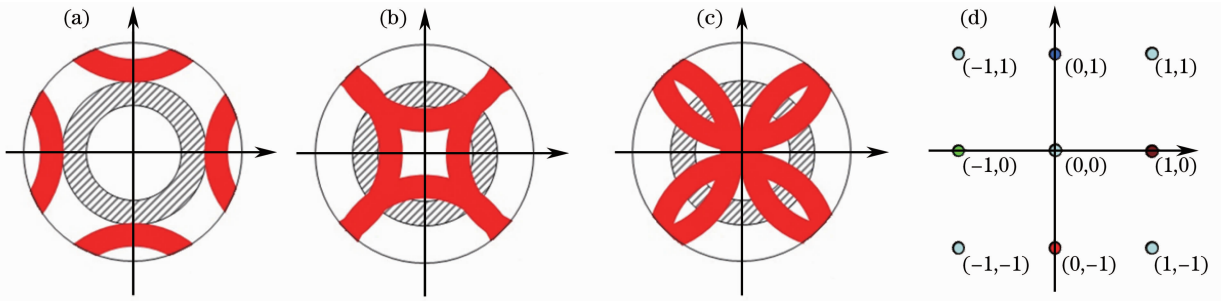


图6 接触孔结构的频谱分布。(a) $NA=1.2$; (b) $NA=1.55$; (c) $NA=2.1$; (d) 相干照明下的频谱分布

Fig. 6 Diffraction spectrum of contact hole. (a) $NA=1.2$; (b) $NA=1.55$; (c) $NA=2.1$; (d) spectrum distribution under coherent illumination

上述仿真结果证明在相干照明和部分相干照明下对掩模衍射频谱轴向分量的分析结果之间存在较大差距,相干照明下的结论不适用于部分相干照明条件。同时也证明了利用忽略掩模衍射频谱轴向分量的传统三维模型不能准确预言浸没式光刻系统的成像性能。为了满足浸没式光刻成像系统的仿真需求,必须建立涵盖投影系统物、像方三维电磁场信息的部分相干三维矢量成像模型,即本文中的全光路三维光刻矢量成像模型。

4 结 论

在 Y 偏振光相干照明条件下,掩模频谱轴向分量对于线条结构的光刻成像不造成影响,而对于接触孔结构,在浸没介质和进入投影系统的掩模衍射级次均相同的条件下,轴向分量造成的像质改变不会随着 NA 的变化而变化。在部分相干照明条件下,对于线条结构的掩模图形,掩模衍射频谱的轴向分量对光刻成像性能的影响会随着 NA 的增大而增大;而对于接触孔结构的掩模图形,这种影响会随着 NA 的增大整体呈现出减小的趋势,且当 NA 大于1.8时,均方根差值和 CD 差值随着 NA 的增加而缓慢增加,但即使在最小的情况下, CD 差值仍接近1 nm。

以上结果证明了相干照明下分析掩模频谱轴向

分量得出的结论不适用于部分相干照明条件。同时也证明了在浸没式光刻成像系统中,利用忽略掩模衍射频谱轴向分量的传统三维矢量成像模型并不能得到精确的仿真结果,只有利用涵盖投影系统物、像方电场三维信息的全光路三维光刻矢量成像模型才能满足光刻仿真的要求。这对于浸没式光刻成像系统的模拟分析和更大数值孔径下的光学检测具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 K F Lai, A E Rosenbluth, G Han, *et al.*. Modeling polarization for hyper- NA lithography tools and masks [C]. SPIE, 2007, 6520: 65200D.
- 2 D G Flagello, T Milster. 3D modeling of high numerical aperture imaging in thin films [C]. SPIE, 1992, 1625: 246–261.
- 3 A K Wong. Optical Imaging in Projection Microlithography [M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005. 102–107.
- 4 T V Pistor. Electromagnetic Simulation and Modeling with Applications in Lithography [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2001. 45–87.
- 5 K Adam, Y Granik, A Torres, *et al.*. Improved modeling performance with an adapted vectorial formulation of the Hopkins imaging equation [C]. SPIE, 2003, 5040: 78–91.
- 6 P Evanschitzky, A Erdmann, T Fühner. Extended Abbe approach for fast and accurate lithography imaging simulations [C]. SPIE, 2009, 7470: 747007.
- 7 D P Peng, P Hu, V Tolani, *et al.*. Toward a consistent and accurate approach to modeling projection optics [C]. SPIE, 2010, 7640: 76402Y.
- 8 Y Chen, Y Liu. A computation of partially coherent imaging illuminated by a polarized source via the stack pupil shift matrix

- approach [C]. SPIE, 2012, 8326; 832628.
- 9 X Ma, Y Q Li, L S Dong. Gradient-based resolution enhancement optimization methods based on vector imaging model [C]. SPIE, 2012, 8326; 83262B.
- 10 P Liu, Z F Zhang, S Lan. A full-chip 3D computational lithography framework [C]. SPIE, 2012, 8326; 83260A.
- 11 Zhou Yuan. Study on Propagation and Imaging of Light in High Numerical Aperture Lithography [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008. 16–18.
周 远. 高数值孔径光刻中光的传播与成像研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008. 16–18.
- 12 Jaione Tirapu Azpiroz. Analysis and Modeling of Photomask Near-Fields in Sub-Wavelength Deep Ultraviolet Lithography with Optical Proximity Corrections [D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2004.
- 13 J M Zhou, N V Lafferty, B W Smith, *et al.*. Immersion lithography with numerical apertures above 2.0 using high index optical materials [C]. SPIE, 2007, 6520; 65204T.
- 14 E Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems I. An integral representation of the image field [J]. Proc Roy Soc A, 1959, 253(1274): 349–357.
- 15 D G Flagello. Theory of high-NA imaging in homogeneous thin films [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(1): 53–64.
- 16 Li Yanqiu, Dong Lisong, Ma Xu. A Method to Acquire the Full Vector Aerial Image of Mask by Using Abbe Source Integration [P]. 201110424845, 2012-06-13.
李艳秋, 董立松, 马 旭. 基于 Abbe 矢量成像模型获取掩模三维矢量空间像的方法[P]. 201110424845, 2012-06-13.

栏目编辑: 张 腾