

一种增大工艺窗口的光源优化方法

江海波^{1,2} 邢廷文¹

¹中国科学院光电技术研究所应用光学研究室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 离轴照明(OAI)作为一种重要的分辨力增强技术(RET),不仅可以提高光刻分辨力,而且对焦深(DOF)也有一定程度地改善。针对特定的掩模图形,采用何种离轴照明模式能最大程度地改善光刻成像性能是主要研究的内容。通过优化设计的方法来获得最佳照明模式,采用的优化算法为最速下降法,采用的评价函数为光刻工艺窗口。工艺窗口包含三个方面的信息:成像精确度、曝光度、焦深。通过空间像性能对这三个方面分别做了描述,并将这三个函数加权得到综合评价函数,这种描述方法避免了复杂的光刻胶模型,评价函数值能快速准确地被求解。求解不同权重下的最佳照明模式及该照明模式对应的实际工艺窗口大小,结果表明,空间像性能描述的评价函数能较好地反映实际工艺窗口的性能,合理选择权重,优化得到的照明模式对工艺窗口性能有较大改善作用。

关键词 成像系统; 光学光刻; 离轴照明; 光源优化

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101101

A Method of Source Optimization to Maximize Process Window

Jiang Haibo^{1,2} Xing Tingwen¹

¹Laboratory of Applied Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

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

Abstract As an important resolution enhancement technology (RET), off-axis illumination (OAI) can not only improve lithography resolution, but also improve depth of focus (DOF) to some degree. Finding a best OAI mode to improve lithography performance for specific mask pattern is the main research content. The best OAI mode is obtained through optimum design method, using the steepest descent algorithm as the optimum method, and using process window as the evaluation function. The process window contains three information: image fidelity, exposure latitude and depth of focus. The three aspects are described by performance of aerial image, and the three functions are weighted to get a comprehensive evaluation function. The complex photoresist model is avoided, and the evaluation function value can be obtained quickly and accurately by the proposed method. The optimal OAI modes and actual process window are solved for different weights, and the results show that the actual performance of process window can be reflected by evaluation function described through aerial image, and the performance of process window can be improved greatly by using the optimal source obtained by selecting right weight.

Key words imaging systems; optical lithography; off-axis illumination; source optimization

OCIS codes 110.0110; 110.3960; 110.5220

1 引言

随着集成电路特征尺寸的不断缩小,光学光刻面临的挑战越来越大。如何提高光刻分辨力、增大焦深,成为光刻工作者们必须解决的问题。除了在设计、加工方面不断改进之外,计算光刻也成为研究的热点。近年来,许多分辨力增强技术,如离轴照明(OAI)、相移掩膜(PSM)、光学邻近效应校正(OPC)、偏振照明等,被广泛应用到光刻系统当中。其中,离轴照明技术在提高光刻分辨力、增大焦深方面具有明显的效果。

收稿日期: 2015-02-03; 收到修改稿日期: 2015-05-07; 网络出版日期: 2015-08-25

作者简介: 江海波(1987—),男,博士研究生,主要从事计算光刻方面的研究。E-mail: h.bj2008@163.com

导师简介: 邢廷文(1966—),男,博士,研究员,主要从事光学系统和光学仪器设计方面的研究。

E-mail: xingtw@ioe.ac.cn

离轴照明的概念在上世纪90年代就被引入到微光刻领域。基于倾斜照明的原理,更高级的照明技术不断被开发。通过数值优化的方法得到的自由照明模式在改进成像质量方面具有更突出的效果,而且随着衍射光学元件(DOE)^[1-2]及微反射镜阵列(MMA)^[3]的发展,自由照明模式的实现也得以保障。

光源优化的方法在一些文献中有相关的描述,按光源的表示形式不同可以分为以下四类:基于参数模型的光源优化^[4-6]、基于像素点的光源优化^[7]、基于拱形的光源优化^[8-10]、基于轮廓线的光源优化^[11]。此外,各种方法在评价函数及优化算法的选取上也有所差异,所选评价函数多为边缘位置误差(EPE)、NLS、MEEF、对比度等,优化算法大致分为:基于导数的优化算法^[12]、线性规划^[13]、粒子群算法^[14]、遗传算法^[15]等。光刻成像质量主要体现在成像精确度和焦深两个方面。成像精确度一般可以通过关键尺寸误差(CDE)、CD均匀性(CDU)、光刻胶图形侧壁角、像位置误差等来直接反映,焦深则是通过满足成像要求的离焦范围来描述,这些需要通过复杂的光刻胶模型来进行求解,而且很难用一些常规的数值优化方法如基于导数的优化方法来求最优解。本文提出了一种基于空间像性能来间接表征成像精确度和焦深的方法,通过最速下降法来优化光源,虽然没有考虑光刻胶的影响,但对最终成像具有明显的改善作用。

2 空间像矢量计算模型

光学光刻中的空间像计算可以通过部分相干成像公式来描述。部分相干成像计算有两种模型,一个是Hopkins模型,另一个是Abbe模型。由于Abbe模型的原理是将空间像看成点光源成像的非相干叠加,更适合于光源优化,基于Abbe模型的空间像矢量计算公式为

$$I(x,y) = \iint S_x(\alpha_s, \beta_s) [I_{xx}(\alpha_s, \beta_s; x, y) + I_{yy}(\alpha_s, \beta_s; x, y) + I_{zz}(\alpha_s, \beta_s; x, y)] + S_y(\alpha_s, \beta_s) [I_{xy}(\alpha_s, \beta_s; x, y) + I_{yx}(\alpha_s, \beta_s; x, y) + I_{zy}(\alpha_s, \beta_s; x, y)] d\alpha_s d\beta_s, \quad (1)$$

式中 S_x 、 S_y 分别是光源 x 、 y 偏振方向上的强度; $I_{ij}(\alpha_s, \beta_s; x, y)$ 是照明光瞳面上坐标位置 (α_s, β_s) 处的点光源照射物面后,具有 j 方向偏振的场在像面所成像沿 i 方向的强度分量,点光源成像计算公式为

$$I_{ij}(\alpha_s, \beta_s; x, y) = |\mathcal{F}^{-1}[(\Psi_{ij} \cdot H)(\alpha + \alpha_s, \beta + \beta_s)M(\alpha, \beta)]|^2, \quad (2)$$

式中 $M(\alpha, \beta)$ 是掩模频谱分布; $i = x, y, z; j = x, y$, Ψ_{ij} 是偏振因子,表达式为

$$\begin{bmatrix} \Psi_{xx} & \Psi_{xy} \\ \Psi_{yx} & \Psi_{yy} \\ \Psi_{zx} & \Psi_{zy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\alpha^2}{1+\gamma} & -\frac{\alpha\beta}{1+\gamma} \\ -\frac{\alpha\beta}{1+\gamma} & 1 - \frac{\beta^2}{1+\gamma} \\ -\alpha & -\beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$H(\alpha, \beta)$ 是系统传递函数的频谱,表达式为

$$\begin{cases} H(\alpha, \beta) = P(\alpha, \beta)R(\alpha, \beta)\exp(-ik\gamma z)\exp[ikW(\rho, \theta)] \\ R(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{(NA)^2(\alpha^2 + \beta^2)}{n_m^2 r^2} \\ 1 - \frac{(NA)^2(\alpha^2 + \beta^2)}{n_w^2} \end{bmatrix}^{0.25} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $P(\alpha, \beta)$ 是理想光瞳函数, $R(\alpha, \beta)$ 是系统缩小倍率影响因子, z 是离焦量, $W(\rho, \theta)$ 是像差项, r 是系统的缩小倍率, n_m 是物方折射率, n_w 是像方折射率。

将空白掩模所成空间像作为归一化因子,即认为经过全透掩模后的空间像强度处处为1,空间像归一化因子推导如下

$$m(x,y) = 1 \rightarrow M(\alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & \alpha = 0, \beta = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

$$I_{ij} = |\mathcal{F}^{-1}[(\Psi_{ij} \cdot H)(\alpha + \alpha_s, \beta + \beta_s)M(\alpha, \beta)]|^2 = [|\Psi_{ij}(\alpha_s, \beta_s) \cdot H(\alpha_s, \beta_s)|]^2 = [|\Psi_{ij}(\alpha_s, \beta_s) \cdot R(\alpha_s, \beta_s)|]^2, \quad (6)$$

因为

$$\Psi_{xx}^2 + \Psi_{yx}^2 + \Psi_{zx}^2 = 1, \Psi_{xy}^2 + \Psi_{yy}^2 + \Psi_{zy}^2 = 1, \quad (7)$$

可以得到归一化空间像系数为

$$I_{\text{norm}}(x, y) = \iint S_x(\alpha_s, \beta_s) |R(\alpha_s, \beta_s)|^2 + S_y(\alpha_s, \beta_s) |R(\alpha_s, \beta_s)|^2 d\alpha_s d\beta_s = \iint S(\alpha_s, \beta_s) |R(\alpha_s, \beta_s)|^2 d\alpha_s d\beta_s, \quad (8)$$

式中 $S(\alpha_s, \beta_s) = S_x(\alpha_s, \beta_s) + S_y(\alpha_s, \beta_s)$ 。

归一化空间像强度表达式为

$$I(x, y) = \frac{\iint \sum_j \sum_i S_j(\alpha_s, \beta_s) I_{ij}(\alpha_s, \beta_s; x, y) d\alpha_s d\beta_s}{\iint S(\alpha_s, \beta_s) |R(\alpha_s, \beta_s)|^2 d\alpha_s d\beta_s}, \quad (9)$$

式中 $i = x, y, z; j = x, y$ 。

3 优化方法

3.1 评价函数

评价光刻成像质量的一个综合性指标是工艺窗口性能。工艺窗口指的是保证掩模图形能正确复制到硅片上的曝光剂量和离焦量范围,它包含三个方面的信息:成像精确度、曝光度和焦深。成像精确度的表示方法有很多,最直接的表达就是 CDE 或 EPE,但两者都需要有光刻胶模型的支撑,光刻胶全物理模型计算速度太慢,简化模型误差较大,因此采用一些间接的手段来表征成像精确度,如空间像对比度、归一化对数斜率、实际空间像与目标图形间的差异等,这样既能快速计算,又能保证模型的准确。焦深是指满足一定约束条件的离焦范围,这些约束条件一般包括 CDE、光刻胶损失、侧壁角等。因此,在焦深最大化问题上,很难用一个数学表达式来描述它,可以通过一些间接的方法来表征。焦深体现的是离焦误差对成像的影响程度,也就是说如果像随离焦量的变化而改变很小,则焦深较大。至于曝光度,由于它与空间像 NILS 有近似的线性关系,而 $\text{NILS} \propto \|\nabla I\|$ 。所以,可以通过最小化空间像对离焦量的偏导 $(\partial I / \partial z)$ 及 $1 / \|\nabla I\|$,间接使得焦深和曝光度最大化。各评价指标的数学描述可表示为

成像精度表征为

$$F_1 = \|I - I_{\text{target}}\|^2, \quad (10)$$

焦深表征为

$$F_2 = \|I_{z_0} - I_0\|^2, \quad (11)$$

曝光度表征为

$$F_3 = 1 / \|\nabla I\|^2 = 1 / \left[\left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (12)$$

式中 I 是空间像强度, I_{target} 是目标图形, I_0 和 I_{z_0} 分别是离焦量为 0 和 z_0 时的空间像强度。将以上三个目标函数除以各自对光源的偏导数来消除量纲,再加权得到综合评价函数

$$F = \gamma_1 F_1 / \|\nabla F_1\|_2 + \gamma_2 F_2 / \|\nabla F_2\|_2 + (1 - \gamma_1 - \gamma_2) F_3 / \|\nabla F_3\|_2. \quad (13)$$

3.2 优化算法

光源优化(SO)的目标是找到最优光源 \hat{S} 使得评价函数值 F 最小,即

$$\hat{S} = \arg \min_S F(S). \quad (14)$$

求解最小化问题的方法很多,因为可以对目标函数求导,所以这里采用梯度法,上述各目标函数对光源求导,可得

$$\frac{\partial F_1}{\partial S_{ij}} = 2 \times \text{reshape}[(I - I_{\text{target}}), 1, N_x \times N_y] \cdot R_{ij} \cdot \text{reshape}[(I_{S_{ij}} - I), N_x \times N_y, 1] / \sum \sum (S \times R), \quad (15)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial S_{ij}} = 2 \times \text{reshape}[(I_{z_0} - I_0), 1, N_x \times N_y] \cdot R_{ij} \cdot \text{reshape}[(I_{z_0, S_{ij}} - I_{z_0}) - (I_{0, S_{ij}} - I_0), N_x \times N_y, 1] / \sum \sum (S \times R), \quad (16)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{ij}} = -2 \times \{ \text{reshape}(I^x, 1, N_x \times N_y) R_{ij} \cdot \text{reshape}[(I_{S_{ij}}^x - I^x), N_x \times N_y, 1] + \text{reshape}(I^y, 1, N_x \times N_y) \cdot R_{ij} \cdot \text{reshape}[(I_{S_{ij}}^y - I^y), N_x \times N_y, 1] \} / [(I^x)^2 + (I^y)^2] / \sum \sum (S \times R), \quad (17)$$

式中 S_{ij} 是光源矩阵中第 i 行第 j 列对应的强度值, N_x 和 N_y 分别是像面 x 和 y 方向划分的单元数, $\text{reshape}(I, m, n)$ 是 Matlab 中的命令,将矩阵 I 变换为 m 行 n 列的矩阵, R_{ij} 是缩小倍率影响因子矩阵中第 i 行第 j 列对应

的元素值, $I_{S_{ij}}$ 是点光源 S_{ij} 对应的空间像强度分布, $I_{0,S_{ij}}$ 和 $I_{z_0,S_{ij}}$ 分别是点光源 S_{ij} 在理想焦面和离焦量为 z_0 时对应的空间像强度分布, I^x 和 I^y 分别是空间像强度在 x 和 y 方向的偏导。

对单个点光源的强度约束为

$$0 \leq S_{ij} \leq S_{\max}, \quad (18)$$

归一化强度 s 应满足

$$0 \leq s_{ij} \leq 1, \quad (19)$$

通过

$$s_{ij} = \exp(-r_{ij}^2/a), \quad (20)$$

将约束优化问题转换为无约束优化问题。

终止条件为达到最大迭代次数,或光瞳填充比小于 10%。

4 仿真结果与分析

将上述优化方法运用到一维 6% 衰减相移掩模成像上,掩膜线宽为 45 nm,周期为 90 nm,波长 $\lambda = 193$ nm, NA 为 1.2, $n_w = 1.44$, 使用 XY 偏振光。评价函数配置以下不同的权重: (a) $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 0$, (b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$, (c) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 1$, (d) $\gamma_1 = 1/3, \gamma_2 = 1/3$ 。其中, (a)、(b)、(c) 三种配置对应的评价函数分别为 F_1 、 F_3 和 F_2 , 用来说明综合评价函数中各个函数实际发挥的作用,如配置 (a) 对应的评价函数表征的是成像精确度,理论上其对应的最优光源能使最佳焦面上的成像最精确,但实际工艺要考虑光刻胶的作用,显影后的工艺窗口性能是否与评价函数描述的一致则需要加以验证,配置 (d) 将评价函数中各项赋予相同的权重,得到性能均衡的结果,因为焦深和成像精确度之间的关系往往是互斥的,需要根据实际的光刻需求,选择合适的权重来均衡两者之间的利害关系。使用这四种配置得到的优化光源结果如图 1 所示。

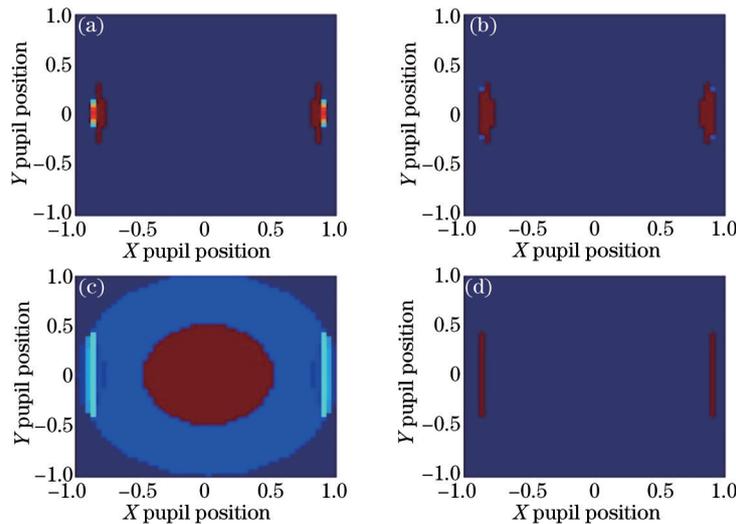


图 1 不同权值下优化得到的照明光瞳形状。(a) $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 0$; (b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$; (c) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 1$; (d) $\gamma_1 = 1/3, \gamma_2 = 1/3$

Fig.1 Optimal source shapes obtained by different weights. (a) $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 0$; (b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$;

(c) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 1$; (d) $\gamma_1 = 1/3, \gamma_2 = 1/3$

从图 1 可以看出,选择不同权值,得到的优化光源形状的差异较大。对比不同权值下优化得到的光源对成像精确度的影响,在 0~0.5 μm 之间等间距选择 11 个离焦量值,将每个离焦量下空间像与理想掩模形状差值的平方和作为评价指标, $F = \|I_z - I_{\text{target}}\|^2$, I_z 是离焦量为 z 时的空间像强度分布, I_{target} 是目标图形分布。这个评价函数值越小,成像越精确,评价函数值随离焦量变化越小,焦深越大。四种权值配置下得到的评价函数值 F 随离焦量变化的曲线图如图 2 所示,通过 *prolith* 计算得到的焦深如图 3 所示。

从图 2 可以看出,在理想焦平面位置,将表征成像精确度的评价函数值按从小到大的顺序排列,其对应的权值配置排列顺序为:(a)、(b)、(c)、(d);成像精确度随离焦量的变化率按从小到大的顺序排列,其对应的权值

配置排列顺序为:(c)、(d)、(b)、(a)。配置(a)对应的理想焦面上的成像精确度最高,但成像精确度随离焦量的变化率最大,按照推论,焦深应该最小;相比于配置(a),配置(b)对应的理想焦面上的成像精确度略低,但成像精确度随离焦量的变化更缓,焦深应该更大;对于配置(c),虽然成像精确度随离焦量的变化率最小,但成像精确度太差,几乎不能成像,也就没有焦深一说;配置(d)较之配置(a)、(b),理想焦面上的成像精确度要略低,但成像精确度随离焦量的变化趋势非常平缓,焦深应该最大。从图3 Prolith对实际工艺窗口的仿真结果来看,配置(b)对应的曝光度最大;配置(c)由于成像效果很差,焦深为0;配置(d)由于考虑了离焦量的影响,焦深最大,曝光度介于配置(a)与配置(b)之间。实际工艺窗口的仿真结果与分析是一致的,要获得较大的焦深,理想焦面上的成像精确度要满足一定的要求,成像精确度随离焦量的变化趋势要平缓,两者缺一不可。

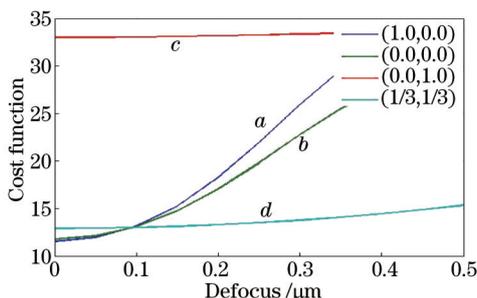


图2 四种权值配置下得到的优化光源计算得到的评价函数随离焦量的变化

Fig.2 Cost function obtained by optimal sources at four weights vary with defocus

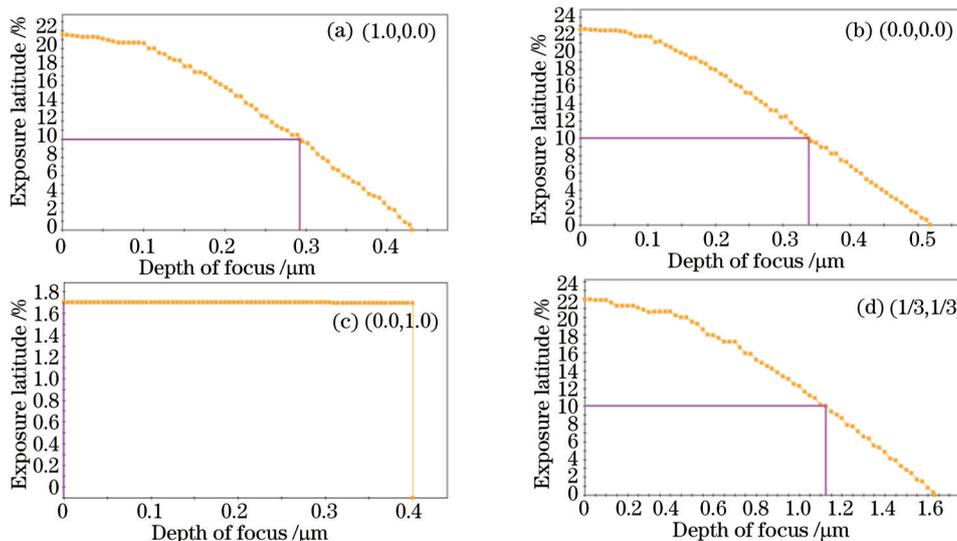


图3 不同权值下焦深大小

Fig.3 Values of focal depth at different weights

选用二维图形也做了类似的分析,掩模结构如图4所示,权值设置与一维情况一致,不同权值下的优化光源如图5所示,成像精确度随离焦量的变化如图6所示。



图4 掩模结构

Fig.4 Logic pattern

从图5来看,各种权值下优化得到的光源形状相差甚远。从图6可以看出,配置(c)和(d)对应的曲线变化最为平缓,对获得大焦深最为有利,但由于配置(c)对应的表征成像精确度的评价函数值过大,也就是所成像与目标图形差异过大,成像质量得不到保证,所以配置(d)是最佳的,其对应的光源形状能获得性能均衡的成像效果。

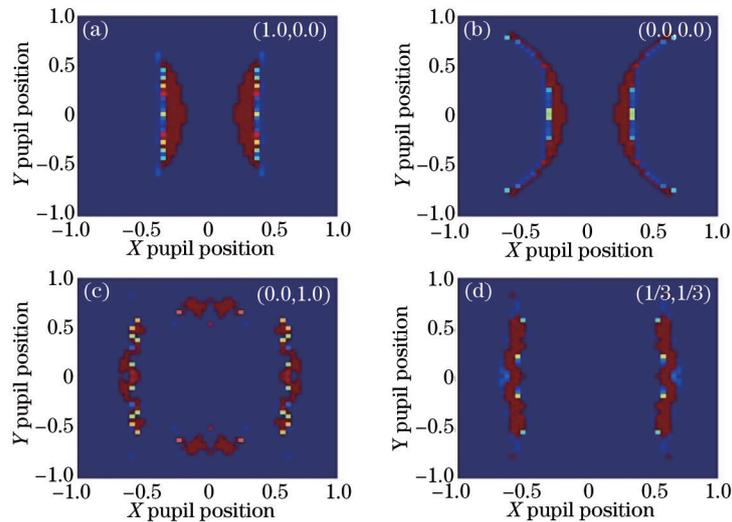


图5 不同权值下的优化光源

Fig.5 Optimal sources at different weights

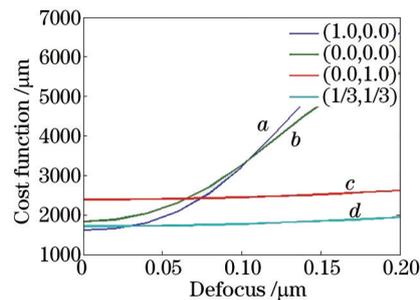


图6 成像精确度随离焦量的变化

Fig.6 Image fidelity vary with defocus

5 结 论

提出一种基于 Abbe 矢量模型的光源优化方法,从空间像角度对工艺窗口进行了描述,通过空间像强度与理想图形差值的平方和来间接表征成像精确度,通过空间像随离焦量的变化率及空间像在 x 、 y 方向的偏导数平方和来间接表征焦深和曝光度的大小。从仿真结果来看,空间像描述的上述三个评价指标能正确地反映实际工艺窗口的性能,给上述三个评价指标赋予不同的权重对成像结果影响很大,仅用单一的某项评价指标,其它两项性能都难以满足要求。所以,选择合适的权值,得到的优化光源才能获得均衡的工艺窗口性能,至于权值如何设置最合理,则需要根据具体的光刻要求采取试探性的方法来定。

参 考 文 献

- 1 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 2 Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian, *et al.*. A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off-axis lithography illumination system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122005.
宋强, 朱菁, 王健, 等. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122005.
- 3 M Mulder, A Engelen, O Noordman, *et al.*. Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems[C]. SPIE, 2009, 7520: 75200Y.
- 4 S Inoue, T Fujisawa, S Tamaushi, *et al.*. Optimization of partially coherent optical system for optical lithography[J]. J Vac Sci Technol, 1992, 10(6): 3004-3007.
- 5 R R Vallishayee, S A Orszag, E Barouch. Optimization of stepper parameters and their influence on OPC[C]. SPIE,

- 1996, 2726: 660-669.
- 6 T E Brist, G E Bailey. Effective multicutline QUASAR illumination optimization for SRAM and logic[C]. SPIE, 2003, 5042: 153-159.
- 7 Y Granik. Source optimization for image fidelity and throughput[C]. SPIE, 2004, 3(4): 509-522.
- 8 M Burkhardt, A Yen, C Progler, *et al.*. Illuminator design for printing of regular contact patterns[J]. Microelectron Eng, 1998, 41-42: 91-95.
- 9 C C Hsia, T S Gau, C H Yang, *et al.*. Customized off-axis illumination aperture filtering for sub-0.18 KrF lithography[C]. SPIE, 1999, 3679: 427-434.
- 10 A E Rosenbluth, S Bukofsky, C Fonseca, *et al.*. Optimum mask and source patterns to print a given shape[C]. SPIE, 2002, 1(1): 13-30.
- 11 E Barouch, S L Knodle, S A Orszag, *et al.*. Illuminator optimization for projection printing[C]. SPIE, 1999, 3679: 697-703.
- 12 Li Zhaoze, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911002.
李兆泽, 李思坤, 王向朝. 基于随机并行梯度速降算法的光刻机光源掩模联合优化方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911002.
- 13 Yan Guanyong, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Source optimization method of lithography tools based on quadratic programming [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022004.
闫观勇, 李思坤, 王向朝. 基于二次规划的光刻机光源优化方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022004.
- 14 Wang Lei, Li Sikun, Wang Xiangzhao, *et al.*. Source optimization using particle swarm optimization algorithm in optical lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422002.
王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源优化方法[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422002.
- 15 A Erdmann, T Fühner, T Schnattinger, *et al.*. Toward automatic mask and source optimization for optical lithography[C]. SPIE, 2004, 5377: 646-657.

栏目编辑: 苏 岑