

极紫外光刻离轴照明技术研究

王 君^{1,2} 金春水¹ 王丽萍¹ 卢增雄^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 离轴照明技术(OAI)是极紫外光刻技术中提高光刻分辨率的关键技术之一。为了实现考虑掩模阴影效应情况下离轴照明的优化选择,构造了一种新型实现 OAI 曝光的成像模型。将照射到掩模上的非相干光等效为一系列具有连续入射方向的等强度平行光,基于阿贝成像原理分别对掩模进行成像,最终在像面进行强度叠加实现 OAI 方式下空间成像的计算;并通过向投影系统函数添加离焦像差项实现不同离焦面上空间成像计算。该模型极大地简化了 OAI 条件下对掩模阴影效应的计算,提高了成像质量计算效率。结合光刻胶特性及投影曝光系统焦深设计要求,以显影后光刻胶轮廓的侧壁倾角为判据,获得了采用数值孔径为 0.32 的投影系统实现 16 nm 线宽黑白线条曝光的最优 OAI 参数。

关键词 X 射线光学;极紫外光刻;分辨率增强;离轴照明 阴影效应;光刻胶

中图分类号 O434.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1211003

Study on the Off-Axis Illumination for Extreme Ultraviolet Lithography

Wang Jun^{1,2} Jin Chunshui¹ Wang Liping¹ Lu Zengxiong^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Off-axis illumination (OAI) is one of the key technologies to enhance the resolution in extremely ultraviolet lithography (EUVL). For the optimizing of OAI specifications involving shadowing effect of mask, a novel model of OAI imaging is presented. It divides the incoherent incident light into a series of parallel light beams with numerical continuous directions, imaging the mask to the wafer plane with each of these beams based on Abbe imaging principle, and finally takes the superposition of the intensities to achieve OAI exposure in EUVL. Images at various defocus planes are equivalently achieved via adding extra defocus aberration into projection system. The model facilitates the simulation of the mask shadowing effect effectively. Then adapting the sidewall angle of the developed photoresist for criterion, the optimum specifications of OAI style are obtained for the exposure of 16 nm half-pitch dense line and space under the consideration of properties of photoresist and depth of focus requirement of the projection system with numerical aperture of 0.32.

Key words X-ray optics; extremely ultraviolet lithography; resolution enhancement; off-axis illumination; shadowing effect; photoresist

OCIS codes 340.7480; 110.2945; 110.1758; 070.2465

收稿日期: 2012-06-15; **收到修改稿日期**: 2012-07-12

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 王 君(1988—),男,硕士研究生,主要从事极紫外光刻投影系统光学设计方面的研究。

E-mail: wjciomp@gmail.com

导师简介: 金春水(1964—),男,博士,研究员,主要从事紫外极紫外光学技术方面的研究。E-mail: jincs@sklao.ac.cn (通信联系人)

1 引言

极紫外光刻技术被认为是最具潜力的下一代光刻技术之一。近年来,在超大规模集成电路制造需求的强烈驱动下,人们对光刻曝光系统分辨率的要求不断提高,使得各种分辨率增强技术,如离轴照明技术(OAI)、相移掩模技术(PSM)以及光学邻近效应校正技术(OPC)等成为研究热点。

在各种分辨率增强技术中,OAI被认为是最有希望拓展光学光刻分辨率的技术之一^[1],较之于传统照明 OAI 在保证分辨率前提下降低投影系统数值孔径(NA) d_{NA} ,增大焦深,从而降低光学设计难度。但离轴照明具有更多的参数,如部分相干因子、照明极开口角(POA)、照明极数量及形状等,而对于既定投影曝光系统及特定线宽的图案来说,只有最优的参数组合才能实现最佳的分辨率增强。

目前,国内外对离轴照明参数优化进行了大量研究^[2~5]。国外多采用四种离轴照明表征方法^[5],结合分辨率及生产率等因素对照明参数进行优化,确定了典型离轴照明参数的选择范围,获得了适于各种图案曝光的最优照明参数^[6]。国内则主要对离轴照明提高分辨率,增大焦深原理^[1,7,8]及实现不同离轴照明方法进行报道^[9,10]。以上报道主要针对紫外及深紫外光刻进行研究,曝光线宽一般在数百纳米,对照明参数进行优化时,均将掩模作为理想的薄掩模处理。但随着曝光线宽及工作波长的减小,投影系统 NA 的进一步增大,掩模吸收层厚度在离轴照明条件下所带来的阴影效应不可忽略。在极紫外光刻中使用 $d_{NA}=0.32$,5 倍微缩投影系统实现 16 nm 线宽图案曝光时,在部分相干因子较大的光源曝光下,掩模的有效曝光区域至多可减小 40%^[11],因此,在极紫外光刻技术中照明参数优化设计必须考虑掩模阴影效应,以尽可能准确地反映真实曝光过程。但是目前还未见有关考虑掩模阴影效应的 OAI 优化方法的报道。本文提出一种新的 OAI 空间成像模型,通过对掩模和投影系统透射率函数的调制实现了在考虑掩模阴影效应的情况下系列离焦面上的空间成像。结合光刻胶工艺特性及曝光系统焦深要求,获得了采用 $d_{NA}=0.32$ 投影系统实现 16 nm 线宽线条曝光的最优离轴照明参数。该参数的获得为实现 16 nm 线宽图案照明系统的构建提供了理论基础,将极大地节约研究成本和时间。

2 理论建模

基于阿贝原理^[12]的成像过程将光学系统处理

为一黑盒,与其具体空间参数无关,这对国内现阶段极紫外光刻领域大 NA 投影系统设计条件下的照明参数研究显得尤为重要^[13]。因此,本节以阿贝成像理论为基础,阐述 OAI 的基本原理,构建 OAI 条件下的空间成像模型,为后续利用 Matlab 软件实现 OAI 成像的数值计算提供理论依据。

2.1 离轴照明基本原理

采用离轴照明技术时,照明光束偏离光轴方向以倾斜角 θ_0 入射,则掩模图形的所有衍射光均发生 θ_0 的偏移。当 θ_0 在一定范围时只有 0 级和 ± 1 级中某一级进入系统从而实现相干成像。较之于传统照明,只有部分未参与相干成像的光束进入系统到达光刻胶,从而提高曝光质量^[1,14~16]。

2.2 离轴照明曝光计算模型

采用 OAI 技术时,照射到掩模上的光其入射角在一定范围内是连续变化的,从而形成非相干照明^[14]。非相干照明条件下,物面上所有点的振幅和位相随时间的变化是无关联的^[12],因此在像面的光强分布上应是各个物点在像面上的强度叠加。基于此,将该照明方式分解为一系列具有不同入射方向的平行光,每一束平行光经掩模和物镜系统在像面形成特定的光强分布,最终在像面进行光强的线性叠加实现成像,将此称作光源积分求解模型(SIM)。

以一维(部分相干因子 σ) OAI 为例进行建模。如图 1 所示,针对掩模上任意点 O 进行分析,浅阴影部分所示的非相干光入射方向介于 σ_{inner} 及 σ_{outer} 之间,按上述模型,将该非相干光等效为具有连续入射方向的多束平行光照射到 O 点,其中深色阴影部分 $d\sigma$ 表示入射方向为 σ 的平行光束,经掩模 O 点发生衍射,仅 0 级和 -1 级透过投影系统在像面干涉成像;当完成对每一束平行光对 O 点独立成像的计算后,将其像面强度分布线性叠加实现该离轴照明下

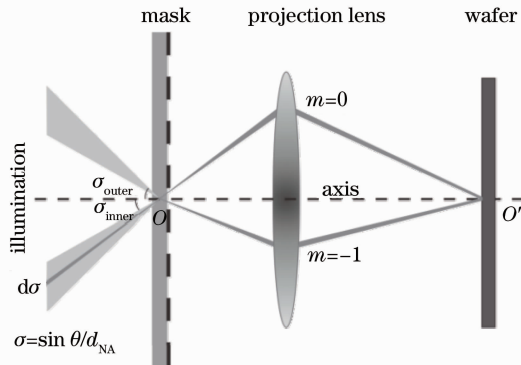


图 1 SIM 示意图

Fig. 1 Schematic of SIM

O点的空间成像。由于掩模上O点的选取是任意的,因此该过程适于整个掩模的成像,在一维情况下,该过程可表示为

$$I(x) = \int \left\{ \mathcal{F}^{-1} \{ H(f'_x \Delta) \mathcal{F} [M(\sigma) \times \exp(ik_x d_{NA} \sigma)] \} \right\}^2 d\sigma, \quad (1)$$

式中 M 为掩模的透射率函数,当考虑其阴影效应时,它是入射光方向 σ 的函数; H 为投影曝光系统光瞳函数, Δ 为像面离焦量,利用阿贝成像原理求解离焦面成像时,需对该函数进行调制。

2.2.1 掩模阴影效应

图2为极紫外光刻中所用反射式掩模在一束倾斜入射平行光照射下的示意图,其中 k 为光线波矢, θ 为光线入射角。为简化模型,在此并不考虑近场衍射效应,而仅从几何光学角度进行阐述,且任意与掩模吸收层有接触的光束均被完全吸收,则实际曝光的掩模线宽 W_o 与设计线宽满足关系^[16]:

$$W_o = W - 2h \tan \theta = W - 2h \frac{d_{NA} \sigma}{\sqrt{1 - (d_{NA} \sigma)^2}}, \quad (2)$$

式中 h 为掩模图案吸收层厚度。

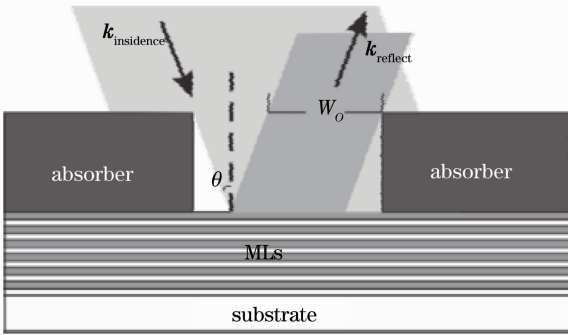


图2 一维照明情况下掩模阴影效应示意图

Fig.2 Schematic of mask shadowing effect under 1D illumination

2.2.2 离焦成像的实现

运用阿贝原理对衍射受限系统进行成像分析时,仅能得到高斯像面的光强分布。但由于机械装调精度及曝光系统的设计焦深要求,需要考虑投影系统在离焦平面上的成像质量。因此,人为地在投影系统出瞳处加一离焦像差项,等效地实现离焦成像,此时出瞳在频域的相干传递函数可以表示为^[17]

$$H_c(f_x) = P(f_x) \exp[ikW(f_x)], \quad (3)$$

式中 W 为波像差, P 为相干照明条件下理想成像的光瞳函数^[12], f_x 为频率的 x 分量。对于离焦 Δ 有

$$W(x) \approx \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{x^2}{d_i^2},$$

式中 x 表示系统出瞳上的坐标, d_i 为高斯像面距出瞳的距离。将上式转换到频域表示,则有

$$W(f_x) = \frac{\Delta}{2} \left(d_{NA} \frac{f_x}{f_0} \right)^2, \quad (4)$$

式中 f_0 为系统截止频率大小,只与光瞳形状大小有关。将上式代入(3)式即可实现离焦面上成像的计算。

2.3 像质评价

对于一般成像系统而言,通常采用传统的对比度对像质进行评价:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

式中 I_{\max} , I_{\min} 分别为像面待评价区域光强分布的最大和最小值,它可以清楚直观地反映空间成像质量,但在光刻领域有它不可克服的局限性,其采样点在明暗条纹的中心处,但在光刻中更注重明暗条纹的过渡快慢,即真实像轮廓在理想成像边处的斜率^[14];再者,光刻是一个极其复杂的过程,空间成像质量并不能完全反映最终光刻效果,还必须考虑光刻胶的光化学性质。根据文献^[16]可知对于正性光刻胶,在其特征曲线的敏感度附近有如下线性关系:

$$\frac{T(x)}{T_0} = \gamma \ln \left[\frac{E_0}{E(x)} \right], \quad E < E_0 \quad (6)$$

式中 T_0 为光刻胶初始厚度, $T(x)$ 为经显影后剩余的光刻胶厚度, E_0 是能对 T_0 厚度光刻胶完全曝光所需的最小剂量, $E(x)$ 为曝光量且满足 $E(x) = I(x)t$, t 为曝光时间,显影对比度 γ 不仅与光刻胶的性质有关,也与光刻胶相关工艺有关^[16],在一定范围内,其值越大,表明光刻胶工艺越高。设光刻胶没有反射,空间成像的强度完全被光刻胶吸收,等式两边同时对 x 求导:

$$\tan \alpha = \left| \frac{dT(x)}{dx} \right| = - \frac{T_0 \gamma}{E} \frac{dE(x)}{dx} = - T_0 \gamma \frac{S_{NIL}}{\omega}, \quad (7)$$

式中 α 为显影后光刻胶侧壁倾角, S_{NIL} 为归一化的像边缘对数斜率(NILS)^[7],其定义为

$$S_{NIL} = \omega \frac{d \ln [I(x)]}{dx}, \quad (8)$$

式中 ω 为理想成像的线宽, $I(x)$ 为像面光强分布,NILS反映了空间成像强度分布在理想成像的图案边界处光强变化快慢,仅与照明方式,掩模特征及投影系统等有关,而与光源的能量大小无关。NILS越大,表明光强在理论成像边界处的变化越快,在使用特定光刻胶时,经显影后光刻胶轮廓越理想,因此它是利用单一参数评价光刻成像质量的最佳选择^[14]。

3 二极照明参数优化

采用如图 3(a)所示的参数定义,图 3(b)中所示的一束单位振幅平行光表示为

$$U(x, y) = \exp[-ik \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi)],$$

式中 k 为波数。根据(2)式和(4)式可以得到在二维情形下:

$$W_0 = W - 2h \tan \theta \cos \varphi = W - 2h \frac{d_{NA} \sigma}{\sqrt{1 - (d_{NA} \sigma)^2}} \cos \varphi, \quad (9)$$

其中各参数定义参照图 3 所示, θ 为照明点 A 的径向入射角,与部分相干因子及投影系统 NA 有关, φ 为切向入射角, Φ 为照明极开口角, h 为掩模吸收层厚度。

$$W(f_x, f_y) = \frac{\Delta}{2} d_{NA}^2 \frac{f_x^2 + f_y^2}{f_0^2}. \quad (10)$$

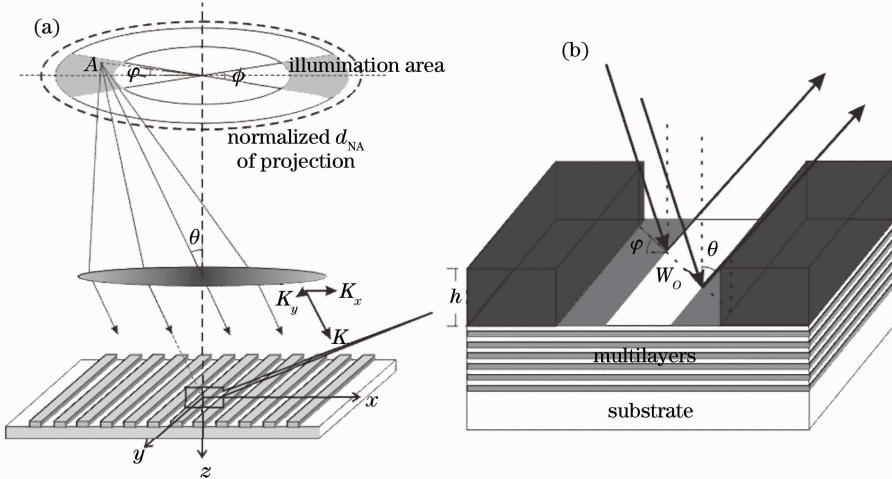


图 3 二维光源积分模型示意图。(a)二维情况下光源积分模型将非相干照明光源离散为具有连续入射方向的平行光示意; (b)二维照明下单束平行光照射下掩模阴影示意

Fig. 3 Schematic of SIM in 2-D. (a) Discretization of the non-coherent illumination into multi parallel light with numerically continuous incident directions by SIM; (b) shadowing effect of the mask with one parallel incident ray in 2-D

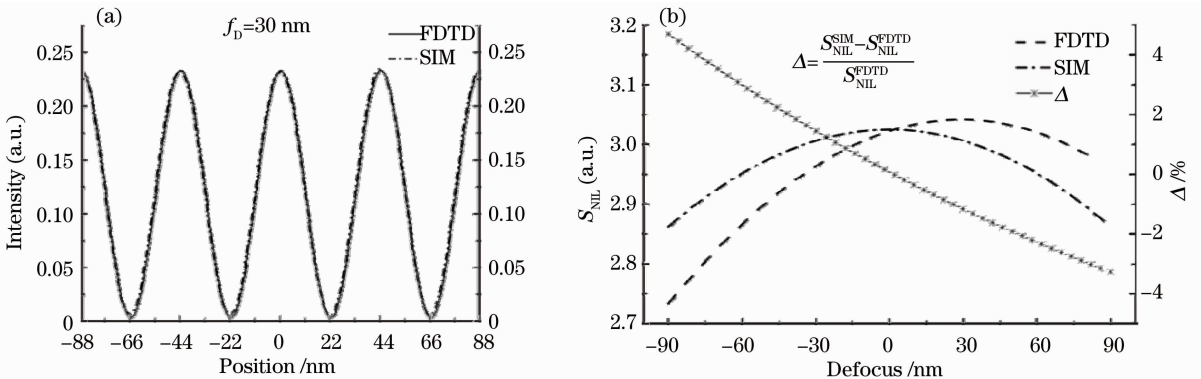


图 4 FDTD法与SIM模型空间成像质量计算比较

Fig. 4 Contrast of solutions with FDTD and SIM

任意选取一组离轴照明参数用 EM-Suite^[18] 软件进行时域有限差分(FDTD)严格电磁场仿真,并与本文所述模型计算结果进行对比: $\sigma_{outer} = 0.85, \sigma_{inner} = 0.55, \Phi = \pi/3, d_{NA} = 0.25$,采用 13.5 nm 的工作波长实现 22 nm 线宽密集黑白线条的曝光,计算不同离焦面上空间成像的 NILS 值,并以 EM-Suite 软件仿真结果作为标准计算百分比误差 Δ 。如图 4 所示,利用 SIM 计算出的空间成像强度分布与 EM-Suite 仿真得到的强度分布基本重合, NILS 误差在离焦 ± 100 nm 时仍在 5% 以内。同理,采用 $d_{NA} = 0.32$ 投影系统对实现 16 nm 线宽黑白线条的曝光进行模拟,结果表明 NILS 误差在离焦小于 100 nm 时小于 4%,从而验证了 SIM 模型的正确性。

较之于 FDTD 法^[19], SIM 模型在保证计算结果可靠的前提下, 采用近似算法有效提高了计算效率, 可在极短的时间对不同离轴照明方式下的掩模空间成像做出准确分析, 适于求解最优离轴照明方式。

图 4 中两种方法获得的空间成像差异主要来自于以下三个方面: 1) EM-Suite 利用严格的电磁场理论求解掩模对光场的影响, 近场衍射效应使得在掩模吸收层的几何阴影区仍有光场分布; 在 SIM 中仅从几何光学的角度, 利用基尔霍夫边界条件求解掩模成像。2) 在计算掩模阴影效应时, 对掩模“透射率”的数值离散使其“透射率”函数发生轻微偏移, 从而使得最后成像也发生了相应偏移。3) 随着离焦的增大, 强度分布在局部误差增大, NILS 误差增加, 这是因为模型中离焦的构建采取了二阶近似, 当离焦较大时, 需作进一步修正。

3.1 像质计算

考虑到照明系统各参数的可实现性及已有文献报道^[6,16], 确定以下参数范围实现 16 nm 线宽密集黑白线条的空间成像质量计算, 如表 1 所示, 其中 d_{HP} 表示半重复线间距 (HP), s 表示数值计算时所采用的步长。

表 1 投影系统及照明系统参数定义

Table 1 Specifications of projection and illumination system

| Items | Specifications |
|------------------|--|
| Projection | $d_{NA} = 0.32, d_{HP} = 16 \text{ nm}$ |
| σ_{outer} | $0.4 \sim 1.0, s = 0.05$ |
| σ_{inner} | $0.2 \sim 0.8, s = 0.05$ |
| $\phi/2$ | $15 \sim 90, s = 15 \text{ in degree}$ |
| other | $\sigma_{outer} - \sigma_{inner} \geq 0.2$ |

根据 SIM, 利用 Matlab 软件编程计算各离轴照

表 2 3 种实验室条件下实现 16 nm 线宽密集线条曝光的最佳 OAI 及其性能

Table 2 Best OAI in which 16 nm half-pitch dense line/space exposure is realized under three laboratory conditions and corresponding performance

| OAI Spec. | | | NILS of various defocus | | | S_{normal} |
|------------------|------------------|----------|-------------------------|---------|---------|--------------|
| σ_{outer} | σ_{inner} | $\phi/2$ | 0 nm | 50 nm | 100 nm | |
| 0.95 | 0.5 | 60 | 2.51934 | 2.28587 | 1.67513 | 0.481994 |
| 1 | 0.55 | 60 | 2.54375 | 2.32226 | 1.74841 | 0.465 |
| 0.9 | 0.5 | 60 | 2.50039 | 2.2919 | 1.73808 | 0.460905 |

4 结 论

构建了一种新的极紫外光刻离轴照明成像模型, 利用该模型对存在掩模阴影效应情况下的极紫外光刻照明参数进行了优化选择。基于阿贝成像原理分别用每一束平行光对相应的调制后的掩模进行

明方式下不同离焦面上空间成像的 NILS 值。

3.2 照明参数筛选

极紫外光刻的质量最终受晶片上显影后的光刻胶轮廓限制, 而光刻胶轮廓不仅与照明参数有关, 且受掩模吸收层厚度、光刻胶涂敷厚度、光刻胶工艺因子、像面位置等限制。目前, 适于极紫外光刻实现 16 nm 节点曝光的掩模吸收层厚度为 $20 \sim 70 \text{ nm}$ ^[16,20,21], 一般选取 50 nm, 为加快计算速度模型采用 1:1 投影系统, 因此该厚度约化为 10 nm。光刻胶选用日本 ZEON 公司的正性光刻胶 ZEP520A, 光刻胶初始厚度 T_0 设为 60 nm, 曝光后用乙酸戊酯作显影液在室温下显影 30 s, 再使用异丙醇浸洗终止显影; 在这种参数设定及工艺环境中, 显影对比度 $\gamma = 1.86$ ^[22]。要使显影后的光刻胶轮廓侧壁倾角 $\alpha < 85^\circ$, 则根据(7)式有:

$$S_{NIL} > 1.64. \quad (11)$$

在保证空间成像质量满足光刻胶曝光条件的同时, 还应尽量增大照明光瞳的照明区域以提高曝光均匀性及光源利用率。在极紫外光刻技术中, 具有特定形状的离轴照明方式一般通过利用具有相同几何形状的挡板进行整形实现, 被遮挡部分的光被完全吸收, 失去可用性。因此引入照明光瞳归一化有效照明面积 S_{normal} 大小作为筛选最优离轴照明方式的又一标准, 即

$$S_{normal} = \frac{S_{IA}}{\pi \sigma_{outer}^2}, \quad (12)$$

参数定义如图 3(a)所示, S_{IA} 为阴影区域所示的照明区域面积。 S_{normal} 越大, 表明被遮挡部分比例越小, 光能利用率越高, 反之则光能利用率低。由此可得到 3 组最佳参数, 如表 2 所示。

曝光成像, 得到了离轴照明条件下高斯像面上的空间像强度分布。通过在投影系统频域透射率函数上添加离焦像差项, 等效地实现了不同离焦平面上的离轴照明成像计算。计算了二极照明条件下等间距黑白线条的曝光结果, 获得了不同照明参数下不同

离焦面上的空间成像质量。结合焦深和光刻胶及其相关工艺等因素,获得了采用 $d_{NA}=0.32$ 投影物镜系统实现 16 nm 线宽曝光的最优二极照明参数,该照明参数实现了在 ± 100 nm 焦深范围内曝光显影后的光刻胶轮廓侧壁倾角不小于 85° ,并得到了最大的照明光瞳的照明区域,提高了曝光区域的曝光均匀性及光源利用率。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Exposure Microfabrication Technology [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 172~217
姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2006. 172~217
- 2 J. P. F. Luehrmann. 0.35- μm lithography using off-axis illumination[C]. *SPIE*, 1993, **1927**: 103~124
- 3 J. A. Torres, Y. Granik, F. Schellenberg. Contrast analysis and optimization for resolution enhancement technique[J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2003, **2**(2): 119~128
- 4 Y. Granik. Source optimization for image fidelity and throughput [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2004, **3**(4): 509~522
- 5 S. Miller. EUVL Scanners Operational at Chip Makers[R]. San Francisco: Semicon West, 2011
- 6 T. Fuühner, A. Erdmann, S. Seifert. Direct optimization approach for lithographic process conditions [J]. *J. Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, 2007, **6**(3): 031006
- 7 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 23~25
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, **26**(1): 23~25
- 8 Luo Xian'gang, Chen Xu'nian, Yao Hanmin *et al.*. The research of off axis illumination[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(6): 491~494
罗先刚, 陈旭南, 姚汉民等. 离轴照明技术研究[J]. 光电子·激光, 1998, **9**(6): 491~494
- 9 Zhao Yang. Design of Complex Illumination Optical System for Deep Ultraviolet Litography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. 51~86
赵阳. 深紫外光刻复杂照明光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010. 51~86
- 10 X. Han, L. Li, Y. Huang *et al.*. Different illumination modes in microlithography illumination system[C]. *SPIE*, 2010, **7849**: 78490N
- 11 Vivek Bakshi. EUV Lithography[M]. Bellingham: SPIE and John Wiley & Sons, Inc., 2008
- 12 Lü Naiguang. Fourier Optics[M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2006. 139~178
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 第2版. 北京:机械工业出版社, 2006. 139~178
- 13 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222003
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
- 14 C. Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2007. 29~445
- 15 B. J. Lin. Optical Lithography Here is Why[M]. Bellingham: SPIE, 2011. 29~320
- 16 H. J. Levinson. Principles of Lithography [M]. 3rd edition Bellingham: SPIE, 2010. 257~450
- 17 Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. 3rd edition. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 114~150
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家壁等. 译. 北京:电子工业出版社, 2006. 114~150
- 18 Thomas V. Pistor. Electromagnetic Simulation and Modeling with Applications in Lithography [D]. Berkeley: University of California, 2001. 88~110
- 19 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
- 20 V. Domnenko, T. Schmoeller, T. Klimpel. Analysis of EUVL mask effects under partially coherent illumination[C]. *SPIE*, 2009, **7271**: 727141
- 21 J. Mailfert, C. Zuniga, V. Philipsen *et al.*. 3D mask modeling for EUV lithography[C]. *SPIE*, 2012, **8322**: 832224
- 22 C. Chapin, D. Brown, N. Devlin. Optimization Studies of ZEP520 [R/OL]. 2010, <http://nanolithography.gatech.edu/processes>

栏目编辑: 李文喆