

光学系统像差对极紫外光刻成像特征尺寸的影响

明瑞锋¹, 韦亚一^{1,2*}, 董立松²

¹中国科学院大学微电子学院, 北京 100049;

²中国科学院微电子研究所, 北京 100029

摘要 13.5 nm 波长极紫外(EUV)光刻机的分辨率虽然很高,但因波长的减小使其对像差的容忍度降低,有必要研究像差对 EUV 光刻成像的影响。针对四类典型像差的波前特征,选取对像差最敏感的四类测试图形,研究像差对光刻成像特征尺寸和最佳聚焦点偏差量的影响。在满足焦深要求的条件下,给出各单类像差的最大允许范围,最后将四类像差总值控制在 0.04λ 内,从仿真分析的角度研究了实际工艺生产对像差的要求,即总像差需控制在 0.025λ 以内,约 0.34 nm。

关键词 光学设计; 极紫外光刻; 像差; 特征尺寸偏差; 工艺需求

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1222001

Influence of Optical System Aberration on Critical Dimension of EUV Lithography Imaging

Ming Ruifeng¹, Wei Yayi^{1,2*}, Dong Lisong²

¹School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract In comparison with traditional immersion lithography, extreme ultraviolet (EUV) lithography at a wavelength of 13.5 nm has become a promising technology. While imaging resolution has been greatly improved, aberration tolerances must be strengthened as they scale with wavelength, and a greater understanding of the effect of aberration on EUV lithography imaging is urgently needed. Focusing on the wave front characteristics of four kinds of typical aberrations, this study establishes corresponding aberration models according to their characteristics to explore the influence of aberration on lithographic imaging critical dimension and best focus bias. The maximum allowable range of single aberrations under required focus depths is provided. The total values of the four kinds of aberrations are controlled within 0.04λ , and the analysis is repeated to determine the requirements the aberrations needed in actual demand from the simulation. Based on these results, total aberrations should be controlled within 0.025λ , about 0.34 nm.

Key words optical design; extreme ultraviolet lithography; aberration; critical dimension bias; process requirement

OCIS codes 220.1010; 110.5220; 260.7200

1 引 言

随着 193i 光刻工艺的不断成熟与完善,22 nm 和 14 nm 芯片产品已陆续进行量产^[1]。浸没式光刻设备在更小节点集成电路生产中表现出的高成本和高工艺复杂度,催生了下一代光刻设备的研制需求^[2]。由瑞利判据可知,提高光刻成像分辨率最有效的方法之一就是减小曝光波长。而波长为 13.5 nm 的极紫外光刻机作为最有潜力的下一代光刻设备,

已被证实符合目前的诸多要求,有望推进更小技术节点量产的制程^[3]。

投影透镜是光刻机中最精密的部分,在设计、生产、使用过程中,会存在固有缺陷和热畸变^[4]等诸多问题。这些问题会导致成像光波的实际波前与理想波前有一定的差异,进而引起像差,降低光刻成像的对比度,扩大显影后图形与预期图形的偏差。随着入射波长不断减小,光刻工艺对透镜像差的控制要求也越来越严格。研究表明,在无修正的情况下,极

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-07-29

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02315001-003)、国家自然科学基金(61804174)

* E-mail: weiyayi@ime.ac.cn

紫外光刻机透镜实际像差的均方根最大值为 0.025λ ^[5], 因此可将仿真像差范围适当增大, 即取值 $0 \sim 0.05\lambda$ 。

在光刻成像仿真中, 像差采用泽尼克多项式^[6]表示, 而其前 10 项均有明确的物理意义, 其中 Z_5 表示像散, Z_7 表示彗差, Z_9 表示球差, Z_{10} 表示三叶像差。目前国内对 EUV (Extreme Ultraviolet Lithography) 像差的研究较少, 虽然中国科学院上海光学精密机械研究所对像差有诸多研究^[7], 但这些研究主要集中在深紫外光刻领域。在 EUV 方面, Hwang 等^[5]使用周期性 line/space 和多个平行短线结构对彗差 Z_7 进行了研究, 但仅是探究了其对一种像差的影响, 而 Fenger 等^[8]虽然研究了多种像差, 但并未考虑这些像差的共同影响。根据泽尼克多项式中 θ 前的系数可将前 16 项分为四类, 并从四类像差中各取一种代表性的像差, 如像散 Z_5 、球差

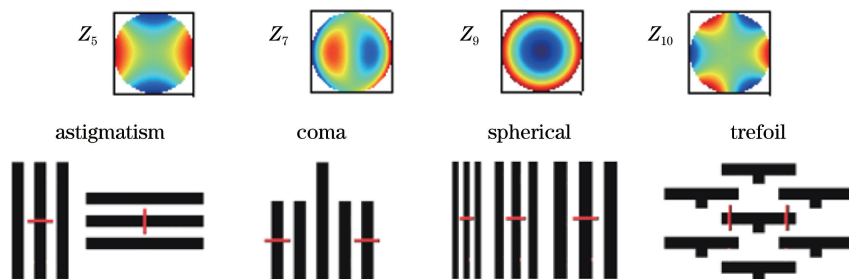


图 1 四种典型像差的波前分布及所采用的测试图形示意图

Fig. 1 Wavefront distributions of four typical aberrations and test diagrams

针对像散 Z_5 , 建立的模型是特征尺寸为 18 nm、周期为 36 nm 且取向分别是水平和垂直的线条, 测量处于对称中心的线条的特征尺寸, 并分析水平与竖直线条特征尺寸的差值随焦距、像差的变化情况。采用传统的照明方式, 数值孔径 NA 为 0.33, 角半径 σ 为 0.9。

针对彗差 Z_7 , 建立的模型是特征尺寸为 18 nm、周期为 36 nm 且具有对称性的 5 根垂直线条, 测量处于对称位置的第一和第五根线条的特征尺寸, 并分析左右两线条特征尺寸的差值随焦距、像差的变化情况。采用四极照明方式, 数值孔径为 0.33, 内角半径 σ_{in} 为 0.6, 外角半径 σ_{out} 为 0.8, 开口角为 60° , 旋转角为 0° 。

针对球差 Z_9 , 建立的模型是特征尺寸为 18 nm、周期从 36 nm 一直增大至 126 nm 的一系列取向垂直的线条, 测量处于对称中心处的线条的特征尺寸, 并分析最佳聚焦点随周期的变化情况。采用双极照明方式, 数值孔径为 0.33, 内角半径 σ_{in} 为 0.6, 外角半径 σ_{out} 为 0.8, 开口角为 60° 。

Z_9 、彗差 Z_7 和三叶像差 Z_{10} 。本文首先根据以上四种像差的波前分布及其对称特点, 选取周期性一维线条结构研究 Z_5 、 Z_9 和 Z_{10} 等像差对光刻成像特征尺寸的影响, 并选取非周期性、平行短线结构研究 Z_7 对特征尺寸的影响^[5]; 然后定量研究在不同泽尼克系数值和不同聚焦值情况下, 特征尺寸及最佳聚焦点的变化趋势, 以及像差对光刻曝光焦深的影响; 最后将这四类像差综合考虑再次进行相同的仿真分析。其中, 曝光条件、光刻材料等一部分参数来自于文献^[5, 8-9], 一部分则是模拟生产实际设置的。

2 仿真条件及设置

在进行了大量的仿真后, 针对四种不同类型的像差建立了对其最敏感的掩模结构, 结构模型如图 1 所示。图 1 中, 红色线条即为测量的位置。

针对三叶像差 Z_{10} , 建立的模型为具有周期性的水平短线结构, 水平周期为 180 nm, 垂直周期为 72 nm, 水平特征尺寸为 126 nm, 垂直特征尺寸为 18 nm。分析处于中心位置上的短线条左右两端特征尺寸差值随焦距、像差的变化情况。采用环形照明方式, 数值孔径为 0.33, 内角半径 σ_{in} 为 0.6, 外角半径 σ_{out} 为 0.75。

使用 Santaurus lithography (Synopsys) 进行三维仿真, 各结构的最佳仿真曝光参数如上文^[5, 8-9]所示, 曝光波长为 13.5 nm, 且像差取值分别为 0、 0.01λ 、 0.02λ 、 0.03λ 、 0.04λ 和 0.05λ , 光线主入射角为 6° 。EUV 掩模板为硅衬底, 衬底表面是以 40 为周期的 Mo/Si 相互堆叠的多层反射膜结构^[10], 最上层为 60 nm 厚的吸收层 Ta_6N_4 , 光刻胶等其他光刻材料参数如表 1 所示, 其中 n 为折射率, k 为消光率。显影条件为曝光后 110°C 烘烤 60 s, 再显影 60 s, 光阻厚度为 45 nm, 抗反射层 (ARC) 厚度为 20 nm, 测量高度为从底部往上 10% 高度内的平均特征尺寸 (CD) 值。值得一提的是, 文中的 dose 均

是根据无像差、最佳焦面位置处的特征尺寸符合标准而确定出的。

表 1 部分材料的光学参数

Table 1 Optical parameters of partial materials

| Material | n | k | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Multilayer | Mo | 0.92108 | 0.00644 |
| | Si | 0.99932 | 0.00183 |
| Ta ₆ N ₄ | 0.93025 | 0.04338 | |
| SOC (soft on chip) | 1.3 | 0.4 | |
| Resist | 0.98 | 0.00269 | |
| ARC | 1.34 | 1 | |

3 仿真结果

3.1 像散 Z_s

使用常规照明的 18/18 nm 周期性 line/space 的结果如图 2 所示。图 2(a)是水平方向的仿真结果,其最佳曝光能量为 6.8 mJ/cm²;图 2(b)是竖直方向的仿真结果,其最佳曝光能量为 12.8 mJ/cm²。两者的目标特征尺寸均为 18 nm,考虑到 20 nm 以下节点,从较为理想的仿真角度出发,将特征尺寸误差范围设置为±3%^[10]。图 2(c)为垂直线条特征尺

寸与水平线条特征尺寸的差值 Δ_{CD1} 在不同像差下随焦距的变化。

三维掩模效应与像差共同影响会导致取向不同的线条的最佳曝光能量和聚焦点存在差异,但从图 2(a)、(b)可以看出:所有曲线的交点均在某一个值附近,该值即为最佳聚焦点,光刻机投影系统处于最佳焦距时,像散对特征尺寸几乎无影响,但偏离最佳焦距越多,像散的影响就越大;对于水平取向的线条,在最佳焦距左侧的点,特征尺寸随着像差的增大而增大,右侧点的特征尺寸则随着像差的增大而减小;竖直取向线条与水平取向线条的规律正好相反。综合考虑后可知,当像差小于 0.02λ 时,焦深至少有 50 nm,随着像差增大,焦深急剧减小,故需控制像差小于 0.02λ,以保证正常生产。

由图 2(c)知,若需严格把控水平与垂直线条特征尺寸的偏差量,则最佳聚焦点可设置在水平线条结构的最佳焦距(-20 nm)与垂直线条结构的最佳焦距(-30 nm)之间,即-25 nm 的位置,此时水平和垂直特征尺寸都非常接近 18 nm,满足要求。

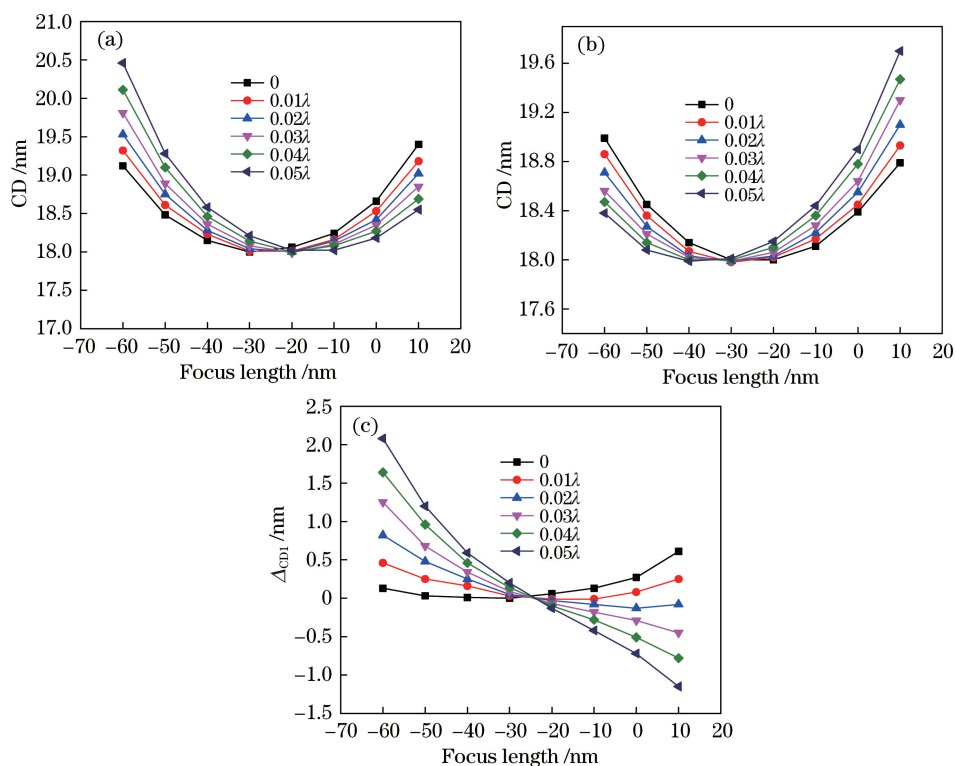


图 2 不同取向线条在不同像差下的特征尺寸随焦距的变化图。(a)水平线条;(b)垂直线条;
(c)水平线条与垂直线条特征尺寸差值

Fig. 2 Variation of critical dimension with focus length of lines with different orientations under different aberrations.
(a) Horizontal line; (b) vertical line; (c) critical dimension differences of horizontal and vertical lines

3.2 彗差 Z_7

采用四极照明的非周期性短线条(bar)结构的仿真结果如图3所示,最佳曝光能量为 14.1 mJ/cm^2 。图3(a)、(b)分别是从左至右的第一根短线条和第

五根短线条投影曝光结果的特征尺寸值,两者的特征尺寸均为 18 nm ,设置误差范围为 $\pm 3\%$ 。图3(c)为两者差值 Δ_{CD2} 随焦距的变化。有研究报道,彗差对图像失真的影响最大,尤其是对称性结构^[11]。

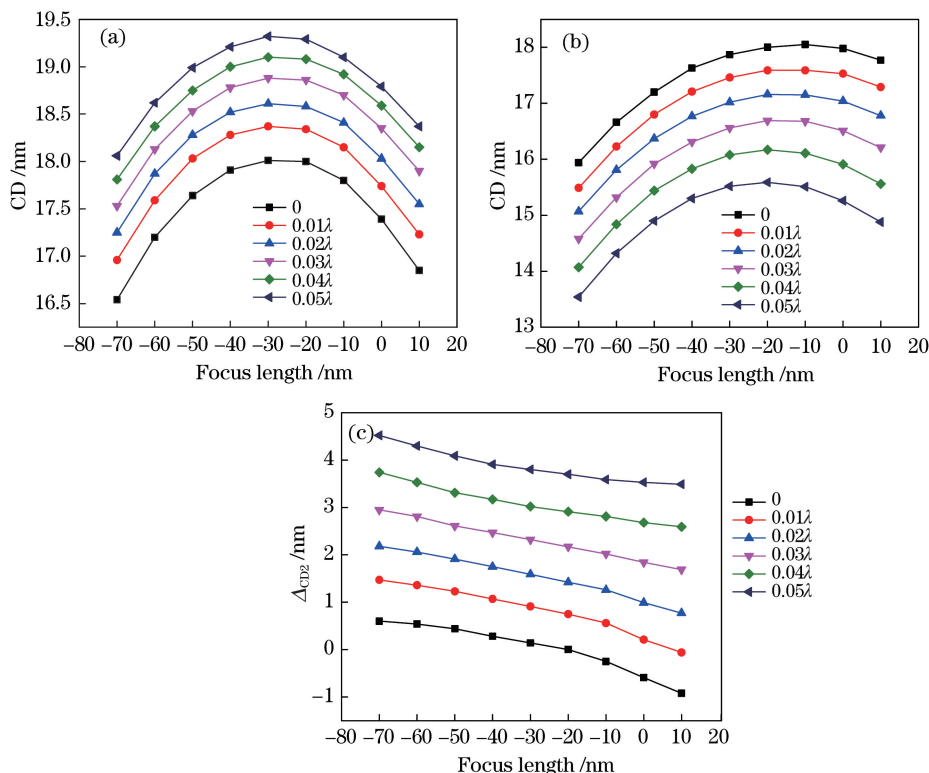


图3 短线条在不同像差下的特征尺寸随焦距的变化。(a)第一根线条;(b)第五根线条;(c)第一根和第五根线条特征尺寸的差值

Fig. 3 Variation of critical dimension with focus length of short lines with different aberrations. (a) 1st line; (b) 5th line; (c) critical dimension differences of 1st and 5th lines

由图3(a)、(b)知:随着像差增大,曲线向上或向下偏移,且平移量基本为定值,不同的是,第一根短线条的特征尺寸曲线随着像差增大向上偏移,即特征尺寸不断增大,而第五根短线条则完全相反;无像差时,焦深约为 50 nm ,但随着像差增大,焦深急剧减小,当像差增大至 0.01λ 时,焦深几乎为 0 。因此需控制像差在 0.01λ 以内,才能保证有足够的焦深。

由图3(c)知, Δ_{CD2} 与焦距约呈线性关系,掩模结构和光照条件等因素会影响直线的斜率,像差大小会影响截距。

3.3 球差 Z_9

采用四极照明的周期性线条结构的仿真结果如图4所示(360 nm 周期作为对照),随着周期从 36 nm 增大至 126 nm ,以周期为 36 nm 的最佳曝光能量(即 10 mJ/cm^2)作为基准,目标特征尺寸均为 18 nm ,允许偏差范围为 $\pm 3\%$ 。

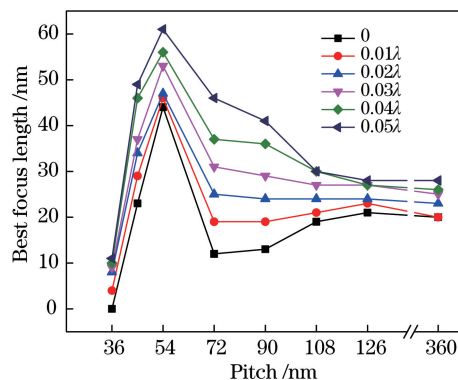


图4 不同像差下最佳焦距随周期的变化
Fig. 4 Best focus length varying with pitch under different aberrations

由图4知,当周期处于 $36 \sim 54 \text{ nm}$ 时,最佳聚焦点的变化幅度极大,此时,周期的变化对最佳聚焦点偏移的影响大于像差的影响,而周期为 72 nm 时,像差的影响达到最大,之后随着周期增大,像差的影响逐渐减小,可以发现最佳聚焦点稳定在

20~30 nm 处。

3.4 三叶像差 Z_{10}

采用环形照明的周期性短线条的仿真结果如图 5 所示。图 5(a)、(b) 分别是水平短线条左端特

征尺寸和右端特征尺寸随焦距的变化,图 5(c) 为两者差值 Δ_{CD3} 随焦距的变化。最佳曝光能量为 5.8 mJ/cm^2 时,两者的目标特征尺寸均为 18 nm,设置误差范围为 $\pm 3\%$ 。

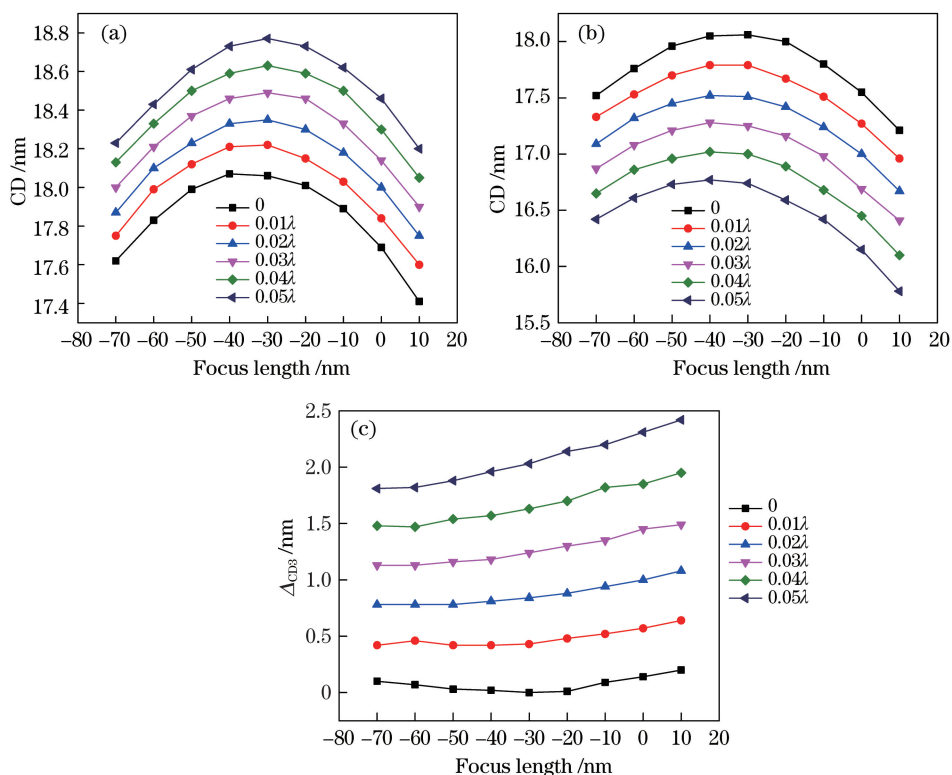


图 5 不同像差下水平短线条左右两端特征尺寸随焦距的变化。(a)左端;(b)右端;
(c)左端和右端特征尺寸差值

Fig. 5 Critical dimensions of left and right ends of horizontal short line varying with focus length under different aberrations.
(a) Left end; (b) right end; (c) difference of critical dimensions of left and right ends

由图 5(a)、(b) 知:两者有相同的最佳聚焦点,都位于 -30 nm 处;随着像差不断增大,左端特征尺寸不断增大,而右端特征尺寸却不断减小。由于存在一定的入射角,左端和右端特征尺寸的变化率并不一致,水平短线条右端对像差更敏感。无像差时,焦深约为 75 nm ,当像差增大至 0.02λ 时,焦深几乎为 0。因此需控制像差在 0.02λ 以内,才能保证有足够的焦深。

由图 5(c) 知,无像差时,两者特征尺寸的差值最小,随着像差等额增大,特征尺寸差值也近似表现为线性增长。

3.5 总像差

本文采用的掩模均为理想模型,故像差种类和大小对线条的均匀性几乎不会产生影响。但考虑到实际生产,在未接触到 EUV 光刻机时,任何可能性都会存在,但生产商会给出光刻机的最大像差范围,故应确定总像差,其他不同种类的像差随机取

值^[12],以尽可能提前预测未来可能出现的状况并提出对策。将总像差控制在 0.04λ 以内,即 Z_5 、 Z_7 、 Z_9 和 Z_{10} 的总和小于 0.04λ ,而单项像差随机取值,对上述 4 种结构模型再次进行仿真分析,目标特征尺寸仍为 $(18 \pm 0.54) \text{ nm}$,且保证在无像差时,最佳聚焦点下的特征尺寸为 18 nm 。仿真得到的 100 个结果如图 6 所示。

将结果按照 Z_5 数值从小到大排列可得到图 6,垂直取向的线条相比于水平线条对像差的容忍度更大,当 Z_5 大于 0.02λ 时,焦深小于 50 nm 。故需控制总像差在 0.03λ 以内,且 Z_5 和 Z_{10} 满足上述条件,才可始终保证焦深满足需求。

同理,对于 coma 对应的测试结构,将结果按照 Z_7 从小到大排列得到图 7,故非周期性 5 根短线条需保证总像差小于 0.025λ ,且 Z_7 小于 0.01λ ,才有 50 nm 的焦深。对于 trefoil 对应的测试结构,将结果按照 Z_{10} 从小到大排列得到图 8,故需要总像差小

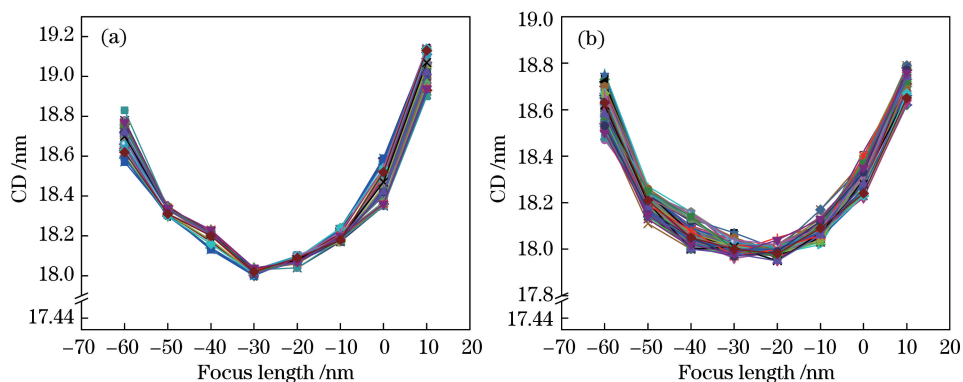


图 6 Z_5 对应测试模型下的特征尺寸-焦距图。(a)水平线条;(b)垂直线条

Fig. 6 Critical dimension varying with focus length of test structure corresponding to Z_5 model.

(a) Horizontal line; (b) vertical line

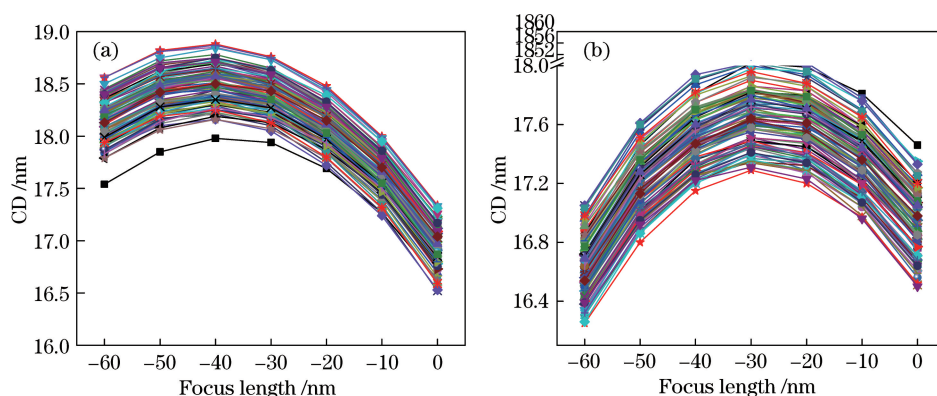


图 7 Z_7 对应测试模型下的特征尺寸-焦距图。(a)第一根线条;(b)第二根线条

Fig. 7 Critical dimension varying with focus length of test structure corresponding to Z_7 model.

(a) 1st line; (b) 2nd line

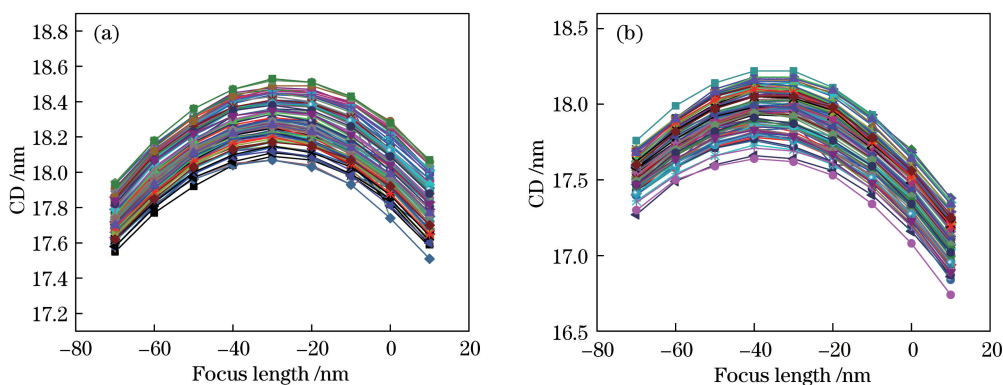


图 8 Z_{10} 对应测试模型下的特征尺寸-焦距图。(a)水平短线条左端;(b)水平短线条右端

Fig. 8 Critical dimension varying with focus length of test structure corresponding to Z_{10} model.

(a) Left end of horizontal short line; (b) right end of horizontal short line

于 0.03λ , 且 Z_{10} 小于 0.02λ 才可使左右两端的特征尺寸值均满足要求。值得一提的是, 从四类像差波前图可以看出, 当四者同时存在时, 会出现不同像差在不同结构上相互补偿的现象, 而仿真得到的结果也佐证了这一点。故上文中给出的总像差的允许范围是最苛刻的范围。

4 结 论

EUV 光刻机较传统的 193 浸没式光刻机有更小的分辨率。本文研究了 4 种典型低阶像差对 sub-1X 节点中光刻曝光结果中关键尺寸的影响。对比发现: 对于周期性结构, 像差 Z_5 、 Z_7 和 Z_{10} 的影响较

小,且在仿真条件下,对于同一聚焦点,像差与 Δ_{CD1} 、 Δ_{CD2} 、 Δ_{CD3} 均呈一定的线性关系,比例关系与模型结构、光照条件、像差类型有关;对于非周期性结构(对应 Z_7 项仿真结果),像差的影响极大,每增加 0.01λ , Δ_{CD2} 约增大 0.77 nm 。

Z_5 、 Z_7 、 Z_9 和 Z_{10} 均对工艺窗口表现出了不同程度的影响,分别需在 0.02λ 、 0.01λ 、 0.03λ 和 0.02λ 范围内才能有效地保证正常生产。当四种像差共同影响时,考虑到不同结构下不同类别的像差对特征尺寸的影响不同,故总像差需控制在 0.025λ 以内。

参 考 文 献

- [1] Yao C C. Research on the thermal aberration and active compensation in deep ultraviolet lithography projection objective[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 1-5.
姚长呈. 深紫外光刻投影物镜热像差仿真与主动补偿技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2016: 1-5.
- [2] van de Kerkhof M, Jasper H, Levasier L, *et al.* Enabling sub-10 nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10143: 101430D.
- [3] Pirati A, Peeters R, Smith D, *et al.* EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9776: 97760A.
- [4] Fujishima Y, Ishiyama S, Isago S, *et al.* Comprehensive thermal aberration and distortion control of lithographic lenses for accurate overlay[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831I.
- [5] Hwang J G, Kim I S, Kim G J, *et al.* CD error caused by aberration and its possible compensation by optical proximity correction in extreme-ultraviolet lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10143: 101431U.
- [6] Smith B W. Optics for photolithography[M]//Smith B W, Suzuki K, Sheats J R. Microlithography: science and technology. USA: CRC Press, 2007: 149-242.
- [7] Meng Z J, Li S K, Wang X Z, *et al.* Polarization aberration measurement method based on principal component analysis of different aerial images[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712006.
孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分空间像主成分分析的偏振像差检测方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712006.
- [8] Fenger G L, Sun L, Raghunathan S, *et al.* Extreme ultraviolet lithography resist-based aberration metrology [J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2013, 12(4): 043001.
- [9] Nakajima Y, Sato T, Inanami R, *et al.* Aberration budget in extreme ultraviolet lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6921: 69211A.
- [10] Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016: 507-510, 519-524.
韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 507-510, 519-524.
- [11] Last T, de Winter L, van Adrichem P, *et al.* Illumination pupil optimization in 0.33-NA extreme ultraviolet lithography by intensity balancing for semi-isolated dark field two-bar M1 building blocks [J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(4): 043508.
- [12] Brittany M. Mask roughness induced LER in EUV lithography[D]. California: University of California, Berkeley, 2011: 57-64.