

基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术

杜聚有^{1,2}, 戴凤钊^{1,2}, 步扬^{1,2}, 王向朝^{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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着光刻技术向 10 nm 及以下工艺节点的延伸, 光刻工艺对套刻精度提出了更高的要求, 相应的对准精度的要求已经达到亚纳米量级。提出一种基于自相干叠栅条纹的光刻机对准方法, 其原理是利用对准系统的光学结构将位相型光栅对准标记的同级次衍射光束进行分束和转像, 在对准系统像面上形成两组周期不同的干涉条纹, 这两组干涉条纹进一步干涉叠加形成自相干叠栅条纹, 组成自相干叠栅条纹的两组干涉条纹随对准标记的移动向相反方向移动, 并将对准标记的位移量进行放大, 从而提高对准标记位置测量的精度。通过对自相干叠栅条纹图像进行傅里叶变换和相位提取, 分析其相位信息得到对准标记的位置。仿真结果表明, 对准精度和对准重复精度分别可以达到 0.07 nm 和 0.11 nm。

关键词 测量; 光刻; 套刻; 对准; 叠栅条纹

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204006

Alignment Technique Using Moire Fringes Based on Self-Coherence in Lithographic Tools

Du Juyou^{1,2}, Dai Fengzhao^{1,2}, Bu Yang^{1,2}, Wang Xiangzhao^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract As the technology of lithography extending to 10 nm and below process nodes in advanced semiconductor manufacturing, lithography has put forward high requirements for the precision of overlay, and the corresponding alignment accuracy has reached sub-nanometer level. In this paper, a new alignment technique using Moire fringes based on self-coherence in lithographic tools is presented. The principle is that the same diffraction order beams from the alignment mark of the phase grating are split and image-rotated by using optical structure of alignment system. Two groups of interference fringes with different periods are formed on the image plane of the alignment system. The two group of interference fringes are further interfered and superimposed to form self-coherence Moire fringes. The two interference fringes move toward opposite direction when the alignment mark position is displaced, and this displacement of the alignment mark can be enlarged. The position measurement accuracy of the alignment mark is improved. The Fourier transform and phase extraction are carried out by self-coherence Moire fringe image, and the position of alignment mark is got by the analysis of its phase information. Simulation results show that the alignment accuracy and the alignment repetition accuracy can reach 0.07 nm and 0.11 nm respectively.

Key words measurement; lithography; overlay; alignment; Moire fringes

OCIS codes 120.3180; 050.1950; 020.1670

收稿日期: 2017-07-04; **收到修改稿日期:** 2017-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61405210, 61474129)

作者简介: 杜聚有(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高端光刻机对准技术方面的研究。E-mail: dujuyou88@163.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子学和高端光刻机技术等方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

随着光刻技术的不断发展,目前 193 nm 浸没式投影光刻机已经实现 10 nm 工艺节点的集成电路量产,并将进一步向 10 nm 以下工艺节点延伸^[1-3]。光刻工艺节点的持续缩小对套刻精度即两层曝光图形间的相对位置精度提出了越来越高的要求,对于 10 nm 工艺节点,套刻精度的要求在 3 nm 以下^[4-6]。影响套刻精度的因素包括掩模硅片对准精度、投影物镜像差、掩模硅片变形等,其中光刻机的掩模硅片对准精度是保证套刻精度的关键,对于 10 nm 工艺节点,对准精度要求在亚纳米量级^[3]。

在 193 nm 浸没式投影光刻机中,掩模与硅片对准包括掩模对准和硅片对准,两者共同决定了掩模与硅片的对准精度,但由于硅片对准精度更容易受到光刻工艺的影响,使得光刻机对掩模硅片对准精度的要求更高。193 nm 浸没式投影光刻机采用的硅片对准技术主要是基于自参考干涉仪的混合智能传感器对准(SMASH)技术^[7]和场像对准(FIA)技术^[8]。FIA 技术采用对准标记成像方式计算对准标记的位置信息,通过对准标记结构和图像算法优化可以提高对准标记位置测量的精度,缺点是对准精度和对准重复精度受对准标记成像对比度的影响。在 SMASH 技术中,对准标记的衍射光束在对准系统光瞳面上进行干涉,在工作台移动过程中干涉信号强度发生周期性变化,通过测量干涉信号强度的变化得到对准标记的位置信息,对准精度可以达到亚纳米量级^[9-11]。但由于 SMASH 技术采用运动扫描方式探测对准信号,在对准过程中,工作台的运动变形、工作台位置及对准系统光强信号采集的同步误差和光学系统的噪声等都会影响对准精度和对准重复精度。

中国科学院光电技术研究所对叠栅条纹对准方法进行了研究,硅片和掩模采用不同周期的光栅标记,两组光栅形成叠栅条纹并实现硅片和掩模对准,理论对准精度可达到 2 nm^[12-13]。

本文提出一种基于自相干叠栅条纹的对准方法,该方法采用静态图像处理方式进行对准标记位置的测量,在对准过程中不需要工作台运动扫描,就可以有效消除运动带来的对准误差。另外,该方法利用叠栅条纹将对准位置偏移量放大,可以有效提高探测灵敏度。

2 原 理

在投影光刻中,经过曝光、显影、烘焙、刻蚀等工艺,掩模板上的集成电路图形被转移到硅片上。在由多层结构组成的集成电路中,第二层及以上图形曝光前需要与前面已刻蚀的图形保持精确的位置关系,此两层相邻图形的相对位置精度即为套刻精度。对准系统用来测量硅片上原有图形的位置,其测量精度是保证套刻精度的关键。

自相干叠栅条纹对准技术原理如图 1 所示,其作用是将对准标记的衍射光束进行分束和转像,形成两组不同周期的干涉条纹,这两组干涉条纹在对准系统像面上进一步干涉叠加形成叠栅条纹。

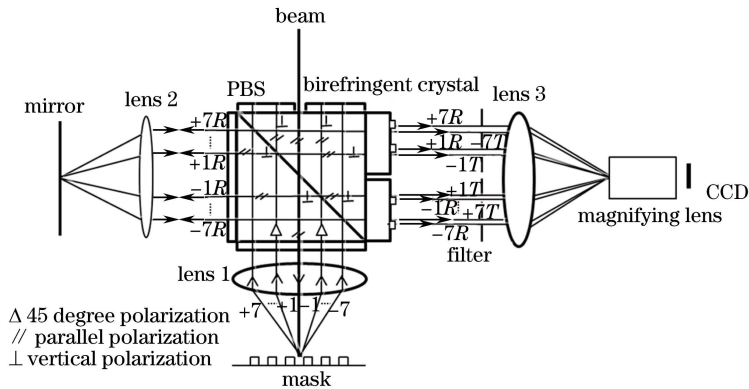


图 1 自相干叠栅条纹对准技术原理图

Fig. 1 Principle diagram of self-coherence Moiré fringes alignment technique

对准系统主要包括:用于衍射光束分束的偏振分光棱镜(PBS)组件,用于转像的透镜和反射镜,用于对准标记成像的 4f 光学系统,用于改变衍射光束位置的双折射晶体组件,用于衍射光束级次选择的滤波器,

用于叠栅条纹放大的放大透镜组和用于叠栅条纹图像提取的图像控制器(CCD)。

照明光束经过 PBS 组件和 $4f$ 光学系统前组透镜 1 后,照射到对准标记上发生衍射,同级次衍射光束经过透镜 1 和 PBS 组件后分离为能量相等的反射光束 R 和透射光束 T,透镜 2 和反射镜组成转像系统,将反射光束 R 正负级次衍射光束位置进行互换,并与透射光束 T 一起通过 PBS 组件,利用双折射晶体组件使反射光束 R 和透射光束 T 空间位置发生偏移,两束反射光束 R 之间的距离大于两束透射光束 T 之间的距离;经 $4f$ 光学系统后组透镜 3 后,由于反射光束 R 和透射光束 T 与对准系统光轴的夹角不同,分别形成周期不同的两组干涉条纹,两组干涉条纹进一步干涉叠加形成叠栅条纹,叠栅条纹经放大透镜组放大后,由 CCD 进行图像提取。

对准过程为,首先利用对准系统测量工作台上对准标记形成的叠栅条纹相位信息,然后测试硅片上对准标记形成的叠栅条纹相位信息,利用测量的相位信息计算硅片位置与理想位置的偏差,最后将硅片移动到理想位置。

将上述对准标记同一衍射级次的 4 束衍射光束($-R, +R, -T, +T$)近似为平面波,其振幅相等,表示为 A ,初始相位为 0,4 束衍射光束复振幅可分别表示为

$$E_1 = A \exp[-i(\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - \omega t)], \quad (1)$$

$$E_2 = A \exp[-i(\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - \omega t)], \quad (2)$$

$$E_3 = A \exp[-i(\mathbf{k}_3 \mathbf{r} - \omega t)], \quad (3)$$

$$E_4 = A \exp[-i(\mathbf{k}_4 \mathbf{r} - \omega t)], \quad (4)$$

式中 \mathbf{k} 为波矢, \mathbf{r} 为矢径, ω 为光频率, t 为传播时间。则在对准系统成像面处,4 束衍射光束振幅叠加为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4, \quad (5)$$

4 束衍射光束干涉的光强分布可以表示为^[14]

$$I_0 = E_1 \cdot E_1^* + E_2 \cdot E_2^* + E_3 \cdot E_3^* + E_4 \cdot E_4^* + \langle \text{Re} | 2E_1 \cdot E_2^* | \rangle + \langle \text{Re} | 2E_1 \cdot E_3^* | \rangle + \langle \text{Re} | 2E_1 \cdot E_4^* | \rangle + \langle \text{Re} | 2E_2 \cdot E_3^* | \rangle + \langle \text{Re} | 2E_2 \cdot E_4^* | \rangle + \langle \text{Re} | 2E_3 \cdot E_4^* | \rangle, \quad (6)$$

将(1),(2),(3),(4)式代入(6)式得到

$$I_0 = 4I + 2I \cos[(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \mathbf{r}] + 2I \cos[(\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1) \mathbf{r}] + 2I \cos[(\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_1) \mathbf{r}] + 2I \cos[(\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r}] + 2I \cos[(\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r}] + 2I \cos[(\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_3) \mathbf{r}], \quad (7)$$

光栅衍射公式为

$$\sin \theta_n = n\lambda / P, \quad (8)$$

式中 P 为光栅周期, θ_n 为光栅衍射角, λ 为照明光源波长, n 为衍射级次。

衍射光束形成的干涉条纹周期分别为(对准系统是放大倍率为 1 的 $4f$ 系统)

$$T = \lambda / (2 \sin \theta_n) = P / 2n, \quad (9)$$

$$T' = \lambda / (2 \sin \theta'_n) = P' / 2n, \quad (10)$$

式中 θ'_n 和 T' 分别为经过对准系统偏转和位移后第 n 级衍射光束角度和其形成的干涉条纹周期, P' 为此干涉条纹的等效对准标记周期。

将(9)、(10)式代入(7)式并假定 4 束衍射光强度相等为 I ,则叠栅条纹光强与对准标记位置 x 的关系可表示为,

$$I_0 = 4I + 2I \cos(4n\pi x / P) + 2I \cos(4n\pi x / P') + 4I \cos[4n\pi x (1/P - 1/P')] + 4I \cos[4n\pi x (1/P + 1/P')], \quad (11)$$

从(11)式中可以看出,叠栅条纹光强信号包括 4 种频率,周期分别为 $P/2, P'/2, PP'/(2|P-P'|), PP'/(2P+2P')$,其光强分布和空间频率分布如图 2 所示。通过傅里叶变换、滤波和逆变换处理,可以提取出周期为 $PP'/(2|P-P'|)$ 的叠栅条纹信息 I' ,即

$$I' = 4I \cos[4n\pi x (P' - P) / (PP')], \quad (12)$$

通过计算此周期信号的相位信息可得到对准标记的位置信息,即

$$x = NPP' / [2n(P' - P)], \quad (13)$$

式中 $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。结合对准系统,由(13)式可知,当对准标记位置移动一个周期 P 时,叠栅条纹同

样移动一个周期 $2PP'/[n(P-P')]$,将对准标记移动量放大,提高了对准标记位置的测量灵敏度。对准标记测量精度 $\Delta x'$ 与叠栅条纹位置测量精度 Δx 之间的关系为

$$\Delta x' = 2n(P - P') \cdot \Delta x / P', \quad (14)$$

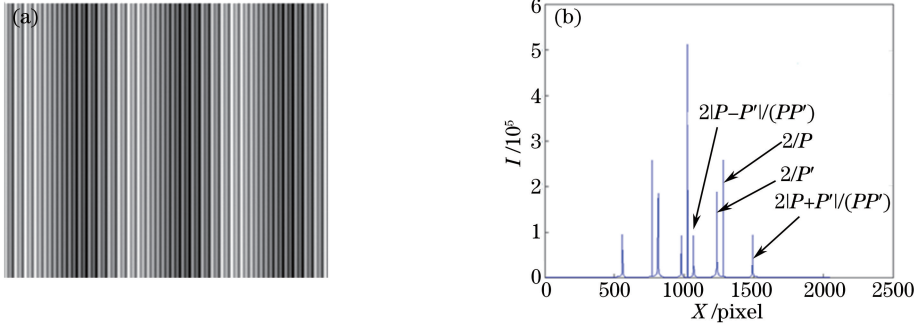


图 2 (a)叠栅条纹仿真图像;(b)空间频率分布图

Fig. 2 (a) Moire fringes simulation image; (b) spatial frequency distribution

3 理论分析和仿真

通过(14)式可以看出,对准精度取决于叠栅条纹相位测量精度,叠栅条纹相位测量精度主要受光刻机工作环境波动和对准信号噪声的影响。

3.1 环境波动

环境波动包括对准系统外部温度、压强局部波动,局部波动为在对准过程中对准标记正负衍射光束间的平均温度和压强差。环境波动会引入衍射光束波长的波动,进而导致各衍射光束间的相位波动,影响干涉条纹的相位信息。衍射光束间的位相差随温度局部波动和压强局部波动的变化分别为 $\Delta\phi_t, \Delta\phi_p$:

$$\Delta\phi_t = 2\pi(d/\lambda - d/\lambda_t), \quad (15)$$

$$\Delta\phi_p = 2\pi(d/\lambda - d/\lambda_p), \quad (16)$$

式中 λ_p 和 λ_t 分别为压强和温度局部变化后对应的波长, d 为对准标记与对准系统之间的距离。

$$\lambda_t = \lambda/n_t, \quad (17)$$

$$\lambda_p = \lambda/n_p, \quad (18)$$

式中 n_t 和 n_p 分别为温度和压强局部变化后对应的空气折射率,浸没式光刻机需要考虑浸没介质折射率的变化,不考虑水汽压的变化,根据 Barrell & Sears 大气折射率计算公式^[15],

$$n^{(t,p)} = 1 + (n_g - 1)p/[101325(1 + \alpha t)], \quad (19)$$

式中 $\alpha = 1/273.16$, p 和 t 分别为压强和温度,单位为 Pa 和 $^{\circ}\text{C}$, n_g 为标准大气折射率,设波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n_g = 1.00300231$ 。

将(15),(16)式代入(12)式中,可得

$$I' = 4I \cos[4n\pi x (P' - P)/(PP') + \Delta\phi_t + \Delta\phi_p], \quad (20)$$

环境波动影响引入的叠栅条纹位置测量误差 $\Delta x_{t,p}$ 为

$$\Delta x_{t,p} = PP'(\Delta\phi_t + \Delta\phi_p)/[4n\pi(P' - P)], \quad (21)$$

对准系统外部温度、压强局部波动引入的对准精度误差分别如图 3 和图 4 所示,计算过程中输入照明光源波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,对准标记与对准系统之间的距离为 4 mm。

从图 3 和图 4 中可以看出,对准精度受对准系统外部工作的温度局部波动的影响约为 $0.1 \text{ nm}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$,受对准系统外部压强局部波动的影响约为 $0.025 \text{ nm}/\text{Pa}$,并且两者对对准精度的影响皆为线性关系,因此严格控制对准系统外部的环境稳定性是提高对准精度的关键。

3.2 对准信号噪声

对准信号噪声主要来源于对准系统内外部的光学噪声和 CCD 以及相应电信号中产生的电子噪声,两者统称为对准信号噪声。此对准信号噪声叠加到叠栅条纹信号中,影响叠栅条纹相位的计算,进而影响对准精

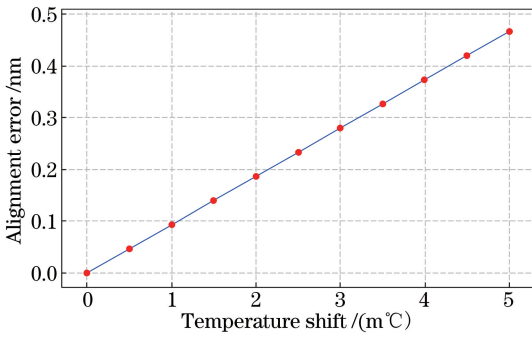


图 3 对准精度与温度局部波动的关系

Fig. 3 Relationship between local drift of temperature and alignment accuracy

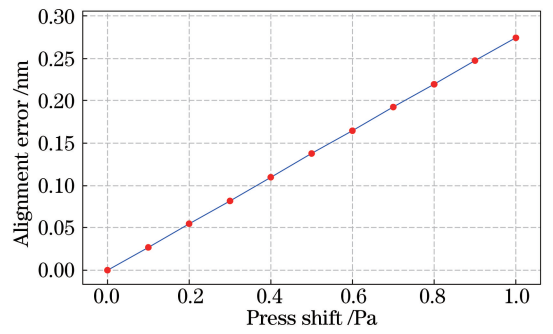


图 4 对准精度与压强局部波动的关系

Fig. 4 Relationship between local drift of pressure and alignment accuracy

度。下面利用 MATLAB 软件仿真对准信号噪声对对准精度的影响。

设定仿真输入条件:对准系统周期为 $16 \mu\text{m}$ 、占空比为 1:1 的相位光栅,尺寸为 $72 \mu\text{m} \times 276 \mu\text{m}$,对准标记 1 级衍射光束经过上述对准系统后形成的两组干涉条纹周期分别为 $8 \mu\text{m}$ 和 $8.8 \mu\text{m}$ 。7 级衍射光束经过上述对准系统后形成的两组干涉条纹周期分别为 $8/7 \mu\text{m}$ 和 $8.8/7 \mu\text{m}$,对准信号噪声为高斯分布,强度为叠栅条纹峰值的 1%。

放大透镜组的放大倍数为 8 倍,CCD 的像素大小为 $2 \mu\text{m}$,对准信号动态范围为 40 dB。

将上述对准信号噪声叠加到理想叠栅条纹图像中,结果如图 5 所示,然后经过图像的傅里叶变换、滤波、逆变换和拟合,提取出的叠栅条纹[周期为 $PP'/(2|P-P'|)$]如图 6 所示,通过计算叠栅条纹相位信息,将此叠栅条纹相位与理想信号叠栅条纹相位进行对比,可以得到对准信号噪声对对准精度的影响。

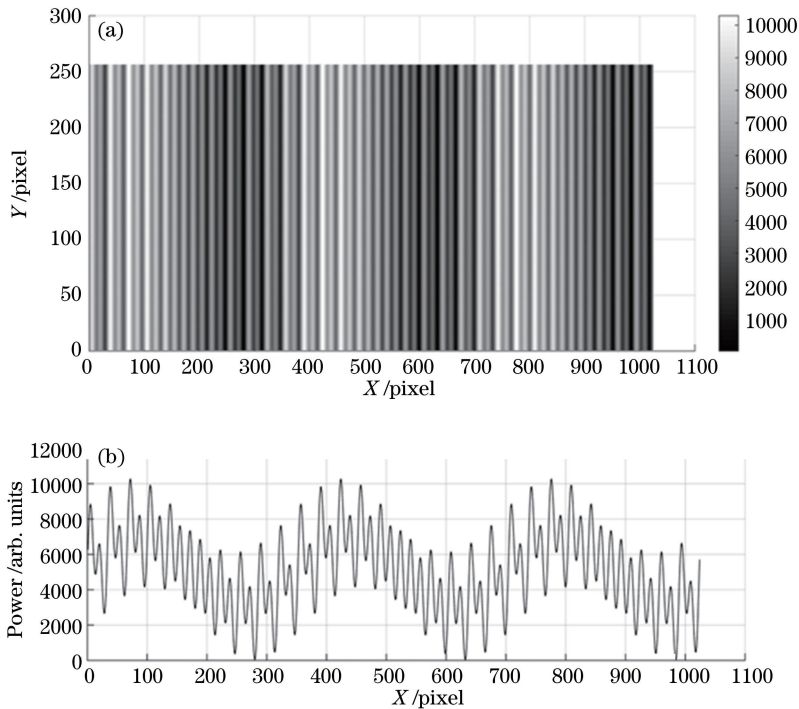


图 5 加入噪声后的叠栅条纹强度分布仿真图。(a)平面图;(b)截面图

Fig. 5 Simulation of intensity distribution of Moire fringes with noise. (a) Plane graph; (b) cross-section graph

经过 21 次仿真计算,在理想叠栅条纹信号中叠加 1% 的高斯噪声后,对准标记 1 级和 7 级衍射光束形成的叠栅条纹对准误差分别如图 7 和图 8 所示,从图 7 和图 8 中可以看出,对准标记 1 级和 7 级衍射光束形成的叠栅条纹的对准精度分别为 0.04 nm 和 0.0050 nm。利用对准标记高级次衍射光束形成的叠栅条纹进行对准,可以获得更高的对准精度。

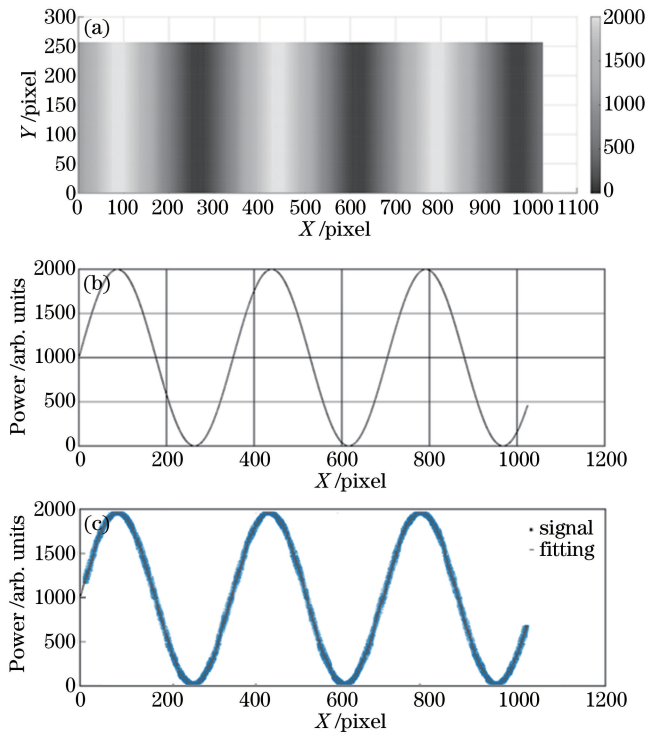


图 6 傅里叶变换、滤波和傅里叶逆变换后的叠栅条纹仿真图。(a)平面图;(b)截面图;(c)拟合图
Fig. 6 Simulation of Moire fringes by Fourier transform, filtering, inverse Fourier transformation.
(a) Plane graph; (b) cross-section graph; (c) fitting graph

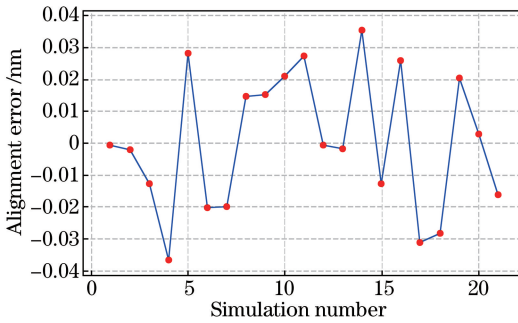


图 7 1 级衍射光束对准误差仿真

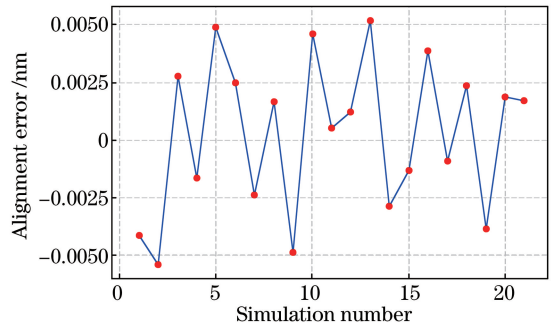


图 8 7 级衍射光束对准误差仿真

Fig. 7 Alignment error simulation of the 1st diffraction beam Fig. 8 Alignment error simulation of the 7th diffraction beam

随着对准信号噪声增加,对准精度会相应地降低,对准信号噪声为对准信号强度的 1%、5%和 10%情况下,对应的对准误差如图 9 所示。从图 9 中可以看出,当对准信号噪声增加到对准信号强度的 10%时,1 级和 7 级衍射光束所形成叠栅条纹得对准精度分别为 0.25 nm 和 0.05 nm。

对准标记的对准位置与理想位置存在偏差的情况下(小于对准标记的 1 个周期,预对准精度),CCD 只能采集部分叠栅条纹图像,如图 10 所示,经过仿真计算,对准误差小于 10^{-3} nm,可忽略。

对准标记沿中心旋转时,组成叠栅条纹的两组干涉条纹向相反方向旋转,如图 11 所示为对准标记旋转 1° 后形成的叠栅条纹图像,经过仿真计算,对准误差小于 10^{-3} nm,可忽略。

3.3 对准精度和对准重复精度

对准重复精度一般由多次对准精度仿真进行计算得到,依据下面公式可计算出此对准技术的对准重复精度 $x_{re-error}$:

$$\bar{x}_{error} = \sum_{i=1}^M x_{error,i} / M, \quad (22)$$

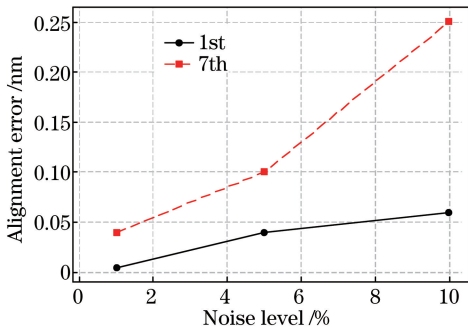


图 9 不同噪声情况下的对准误差仿真

Fig. 9 Alignment error simulation with different noise levels

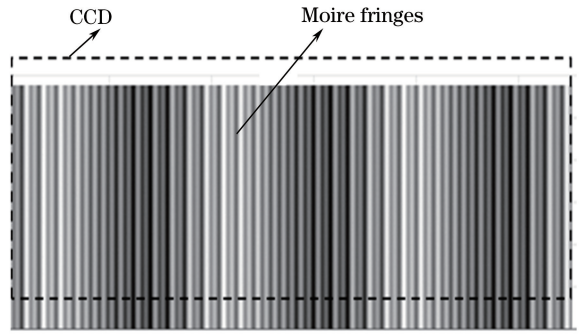


图 10 CCD 与叠栅条纹图像偏移示意图

Fig. 10 Image offset between CCD and Moire fringes

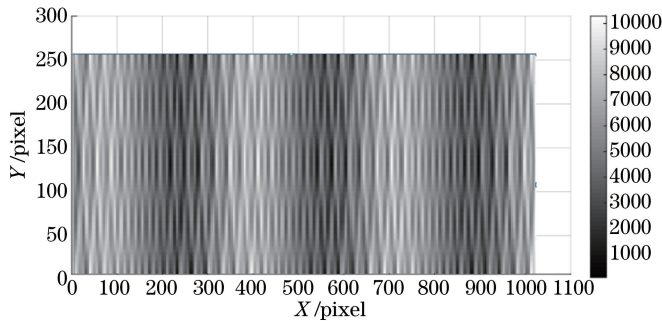


图 11 对准标记旋转 1° 后所形成叠栅条纹仿真图

Fig. 11 Simulation of Moire fringes after 1° rotation of alignment mark

$$x_{re-error} = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (x_{error} - \bar{x}_{error})^2}{M-1}} \quad (23)$$

通过 21 次仿真计算,在对准过程中(一般对准时间小于 0.5 s)对准系统外部温度、压强局部波动(3σ)分别为 0.5 m°C 和 0.2 Pa,光学、电子噪声为叠栅条纹强度峰值 1% 的情况下,对准标记 1 级衍射光束所形成叠栅条纹的对准精度为 0.09 nm,对准重复精度为 0.14 nm,对准标记 7 级衍射光束所形成叠栅条纹的对准精度为 0.07 nm,对准重复精度为 0.11 nm;信号噪声为叠栅条纹峰值的 10% 情况下,对准标记 1 级衍射光束所形成叠栅条纹的对准精度为 0.3 nm,对准重复精度为 0.5 nm,对准标记 7 级衍射光束所形成叠栅条纹的对准精度为 0.12 nm,对准重复精度为 0.18 nm。

上述叠栅条纹对准方法的对准精度和对准重复精度是基于设定的条件下进行的仿真,根据离散傅里叶变换性质,如果采用更大的图像放大倍率或更小的 CCD 像素,增加叠栅条纹单周期内的采样点数,或者采用更大尺寸的对准标记,增加叠栅条纹的周期数据,理论上可以进一步提高对准精度和对准重复精度。对准时间过程主要为对准信号处理过程和运动台复位过程。

4 结 论

本文提出了一种基于自相干叠栅条纹的光刻对准方法,并利用计算机模拟对对准精度和对准重复精度进行了仿真计算。当对准系统外部温度、压强局部等效波动(3σ)分别为 0.5 m°C 和 0.2 Pa 时,在对准信号上叠加 1% 的高斯噪声条件下,对准精度为 0.07 nm,对准重复精度为 0.11 nm。该方法在对准信号噪声增加到为对准信号强度 10% 的情况下,对准精度、对准重复精度为 0.3 nm 和 0.5 nm。在一定范围内,对准精度基本不受对准标记初始位置偏移和旋转的影响。

参 考 文 献

[1] Oyama K, Yamauchi S, Hara A, *et al.* Sustainability and applicability of spacer-related patterning towards 7nm node

- [1] . SPIE, 2015, 9425: 942514.
- [2] Gao W, Ciofi I, Saad Y, *et al.* Rigorous assessment of patterning solution of metal layer in 7nm technology node[J]. Journal Micro/Nanolithography Mems & Moems, 2016, 15(1): 013505.
- [3] Graaf R D, Weichselbaum S, Droste R, *et al.* NXT: 1980Di immersion scanner for 7nm and 5nm production nodes[J]. SPIE, 2016, 9780: 978011.
- [4] Verstappen L, Mos E, Wardenier P, *et al.* Holistic overlay control for multi-patterning process layers at the 10 nm and 7 nm nodes[J]. SPIE, 2016, 9778: 97781Y.
- [5] Gorhad K, Sharoni O, Dmitriev V, *et al.* Co-optimization of RegC[®] and TWINSCAN[™] corrections to improve the intra-field on-product overlay performance[J]. SPIE, 2016, 9778: 97783D.
- [6] Mulkens J, Hinnen P C, Kubis M, *et al.* Holistic optimization architecture enabling sub-14-nm projection lithography [J]. Journal Micro/Nanolithography Mems & Moems, 2014, 13(1): 011006.
- [7] Den Boef A J, Hoogerland M, Gajdeczko B. Alignment system and method: US7564534B2[P]. 2009-7-21.
- [8] Nagayama T, Nakajima S, Sugaya A, *et al.* New method to reduce alignment error caused by optical system [J]. SPIE, 2003, 5038: 849-860.
- [9] Castenmiller T, Van de Mast F, de Kort T, *et al.* Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[J]. SPIE, 2010, 7640(3): 76401N.
- [10] Charley A L, Leray P, Pypen W, *et al.* High speed optical metrology solution for after etch process monitoring and control[J]. SPIE, 2014, 9050(1): 90501H.
- [11] Miyasaka M, Saito H, Tamura T, *et al.* The application of SMASH alignment system for 65-55-nm logic devices[J]. SPIE, 2007, 6518: 65180H.
- [12] Si Xinchun, Tong Junmin, Tang Yan, *et al.* Lithography alignment technology based on two-dimensional Ronchi grating[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0910001.
司新春, 佟军民, 唐燕, 等. 基于二维 Ronchi 光栅的纳米光刻对准技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0910001.
- [13] Si Xinchun, Tang Yan, Hu Song, *et al.* High-precision alignment technique with large measurement range based on composite gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0105003.
司新春, 唐燕, 胡松, 等. 基于复合光栅的大范围高精度对准方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0105003.
- [14] Lei M, Yao B L, Rupp R A. Structuring by multi-beam interference using symmetric pyramids[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5803-5811.
- [15] Barrell H, Sears J E. The refraction and dispersion of air for the visible spectrum[M]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1939, 238(786): 1-64.