

相位光栅非对称性对位置测量精度的影响

杨光华^{1,2}, 王宇^{1,2}, 李璟^{1,2*}, 丁敏侠¹, 卢增雄^{1,2}¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在相位光栅位置测量系统中,加工、后处理等工艺会导致光栅结构发生非对称性变形,增加了位置测量误差。因此,建立了非对称性光栅的衍射场理论模型,分析了光栅非对称性对位置测量精度的影响,并根据不同衍射级次对非对称性敏感度的差异提出了一种多衍射级次权重优化方法,以修正光栅非对称性变形引入的测量误差。实验结果表明,当光栅中心槽深为入射波长的 1/4 时,顶部倾斜非对称性和底部倾斜非对称性对测量精度的影响可以忽略;当占空比为 0.5 时,侧壁非对称性对测量精度的影响可以忽略。非对称性引入的位置误差,经多衍射级次权重优化法修正后可控制在 0.05 nm 以内。

关键词 光栅; 非对称性; 测量精度; 位置测量系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1905001

Effect of Phase Grating Asymmetry on Position Measurement Accuracy

Yang Guanghua^{1,2}, Wang Yu^{1,2}, Li Jing^{1,2*}, Ding Minxia¹, Lu Zengxiong^{1,2}¹Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In a position measurement system based on a phase grating, the grating undergoes asymmetric deformation during processing and post-processing, resulting in a position measurement error. Therefore, this paper established a theoretical diffraction field model of an asymmetric grating and analyzed the influence of grating asymmetry on position measurement accuracy. On this basis, it proposed a weight optimization method with multi-diffraction orders according to the different sensitivity of the diffraction orders to the grating asymmetry. The method is expected to correct the measurement error introduced by the asymmetrical grating deformation. The experimental results show that when the center groove depth of the grating is 1/4 of the incident wavelength, the influence of top tilt asymmetry and bottom tilt asymmetry on the measurement accuracy can be neglected. When the duty cycle is 0.5, the effect of sidewall asymmetry can also be neglected. The position error introduced by asymmetry can be kept within 0.05 nm by the weight optimization method with multi-diffraction orders.

Key words grating; asymmetry; measurement accuracy; position measurement system

OCIS codes 050.1950; 050.1940; 050.1960; 230.1950

1 引言

相位光栅位置测量技术具有精度高、受环境影响小的特点,被广泛应用于集成电路装备硅片位置的测量中^[1]。入射光束照射相位光栅时会生成不同级次的衍射光束,其中, m 和 $-m$ 级次的衍射光会

发生干涉。扫描光栅会生成测量信号,通过提取测量信号的相位可获得光栅的位置信息^[2-6]。随着集成电路技术节点的不断缩小,对相位光栅位置测量系统的精度要求也越来越严格^[7-9]。

在相位光栅位置测量技术中,要求相位光栅结构为对称结构^[2]。但相位光栅的结构在加工及后续

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-03-31; 录用日期: 2021-04-23

通信作者: *lijing2018@ime.ac.cn

处理过程中会发生非对称性变形^[7-12],如刻蚀和沉积工艺会导致光栅侧壁倾斜,抛光工艺往往会导致光栅顶部倾斜,涂胶和曝光工艺会导致光栅底部倾斜^[10-12]。这些非对称性导致 m 级次和 $-m$ 级次衍射光的初始相位不相等,进而影响测量精度。因此,研究光栅的非对称性变形对位置测量精度的影响及减小非对称性变形引入的测量误差具有重要意义。常用于分析光栅非对称性对位置测量精度影响的方法有时域有限差分(FDTD)方法、严格耦合波分析(RCWA)方法以及标量衍射理论等^[13-21]。Xu 等^[13]用 FDTD 方法分析了抛光导致的顶部倾斜非对称性对套刻精度的影响,并优化了测量波长。Sanchez 等^[14-18]用 RCWA 方法研究了顶部倾斜非对称性对位置测量精度的影响,并提出了一种优化波长权重法,减小了非对称性对对准和套刻精度的影响。杜聚有等^[19-20]用 RCWA 方法分析了楔角和圆角非对称性对位置测量精度的影响,并提出了一种基于波长和偏振修正对准位置差异的方法。Zhang 等^[21]采用标量角谱理论建立了分析模型,研究表明,当光栅槽深等于 $1/4$ 波长时,非对称性对位置测量精度的影响较小。严格矢量求解方法的精度较高,但花费时间较长,不利于快速分析典型倾斜非对称性对位置测量精度的影响规律。基于标量衍射理论的方法测量精度比基于严格矢量求解的方法低,但能更好地分析光栅结构和衍射场之间的关系,计算速度快;且在位置测量系统中,光栅周期通常为 $16\ \mu\text{m}$,大于 10 倍入射波长(可见光波段)。但目前基于标量衍射理论建立的模型比较复杂,只是定性分析槽深为 $1/4$ 入射波长情况下非对称性对位置测量精度的影响规律。

本文首先基于标量衍射理论建立了非对称性相位光栅的衍射场理论模型,详细分析了顶部倾斜、底部倾斜及侧壁倾斜等典型非对称性对位置测量精度的影响;然后提出了一种多衍射级次权重优化法,以修正非对称性变形引入的位置误差;最后通过实验验证了非对称性及其他光栅结构参数在一定范围内变化时修正方法的有效性。

2 理论模型

2.1 非对称性对位置测量精度的影响

基于相位光栅的位置测量原理^[2]如图 1 所示,其中,波长为 λ 的入射光束垂直入射到相位光栅,生成的各级衍射光束经收集镜后入射至干涉仪模块,使 m 和 $-m$ 级次衍射光发生干涉。先通过扫描相

位光栅生成周期性的测量信号,然后提取测量信号中的相位信息,并计算相位光栅的位置信息。

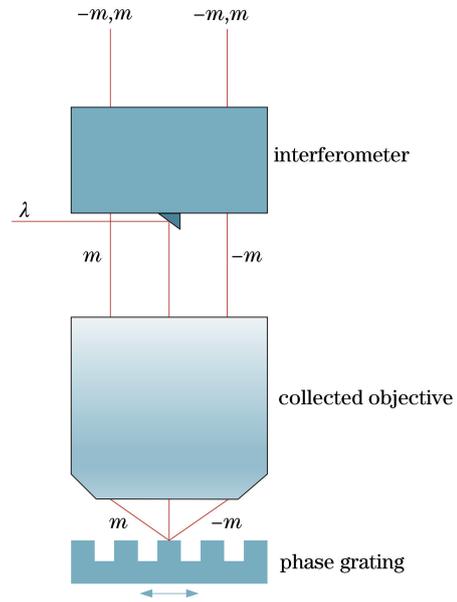


图 1 基于相位光栅的位置测量系统原理

Fig. 1 Principle of the position measurement system based on phase grating

假设非对称相位光栅 G 的位置为 x_0 , 波长为 λ 的平面波垂直入射到相位光栅,平面波的初始相位为 0 。扫描相位光栅时, m 级次衍射光的复振幅 E_m^G 可表示为

$$E_m^G = |E_m^G| \exp \left\{ j \left[-\frac{2m\pi}{d}(x - x_0) + \varphi_m^G \right] \right\}, \quad (1)$$

式中, $|E_m^G|$ 为 E_m^G 的振幅, φ_m^G 为 E_m^G 的相位, d 为光栅周期, x 为扫描运动位置。 $-m$ 级次衍射光的复振幅 E_{-m}^G 可表示为

$$E_{-m}^G = |E_{-m}^G| \exp \left\{ j \left[\frac{2m\pi}{d}(x - x_0) + \varphi_{-m}^G \right] \right\}, \quad (2)$$

式中, $|E_{-m}^G|$ 为 E_{-m}^G 的振幅, φ_{-m}^G 为 E_{-m}^G 的相位。由(1)式和(2)式可知,测量信号的光强为

$$I_m(x) = |E_m^G|^2 + |E_{-m}^G|^2 + 2|E_m^G||E_{-m}^G| \cos \left[\frac{4m\pi}{d}(x - x_0) - (\varphi_m^G - \varphi_{-m}^G) \right]. \quad (3)$$

光栅为非对称结构时 E_m^G 和 E_{-m}^G 的示意图如图 2 所示,令 $\Delta\varphi_m^G = \varphi_m^G - \varphi_{-m}^G$, 根据提取的测量信号相位计算光栅位置 x'_0 , 可表示为

$$x'_0 = x_0 + \frac{\Delta\varphi_m^G}{4m\pi} d. \quad (4)$$

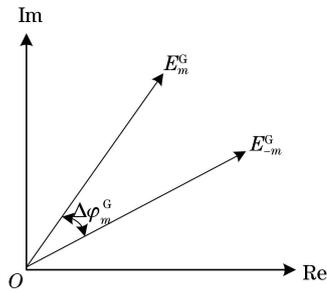


图 2 光栅为非对称结构时 E_m^G 和 E_{-m}^G 的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of E_m^G and E_{-m}^G when the grating is asymmetric structure

由于相位光栅为非对称性结构,即 $\Delta\varphi_m^G \neq 0$,则非对称性导致 m 级次衍射光的位置测量误差为

$$\Delta x_m = \frac{\Delta\varphi_m^G}{4m\pi} d, \quad (5)$$

m 级次衍射光测量信号的对比值 V 可表示为

$$V = \frac{2|E_m^G||E_{-m}^G|}{|E_m^G|^2 + |E_{-m}^G|^2} \quad (6)$$

获得非对称光栅 G 的衍射场 E_m^G 后,通过(5)式和(6)式可计算出非对称性对测量精度和对比度的影响。

2.2 非对称性相位光栅衍射场的理论模型

假设相位光栅 G 在左侧底部、左侧壁以及左侧顶部发生非对称性变形,如图 3 所示。其中, l 为栅脊的宽度, $f=l/d$ 为占空比, h 为槽深, Δh 为非对

称高度。光栅沿 x 轴有无限个周期,垂直纸面无限延伸,且每个周期的非对称性变形完全相同。将光栅 G 分为底部倾斜 $G1$ 、侧壁倾斜 $G2$ 、顶部倾斜 $G3$ 和理想矩形 $G4$ 部分,各部分的中心位置分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 ,脊宽度分别为 f_1d 、 f_2d 、 f_3d 和 f_4d 。由文献 [22]可知,相位光栅 G 的衍射场 E_m^G 可表示为

$$E_m^G = E_m^{G1} + E_m^{G2} + E_m^{G3} + E_m^{G4}, \quad (7)$$

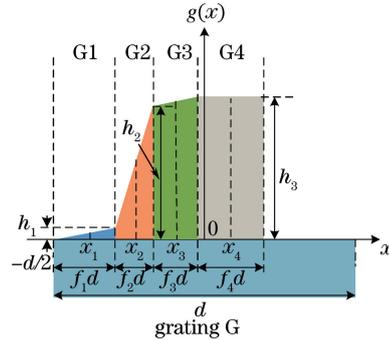


图 3 非对称光栅结构

Fig. 3 Structure of the asymmetric grating

式中, E_m^{G1} 、 E_m^{G2} 、 E_m^{G3} 和 E_m^{G4} 分别为光栅 $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 、 $G4$ 的 m 级次衍射光的衍射场,如图 4 所示。光栅 $G1 \sim G4$ 均可看作顶部倾斜光栅的特殊情形,如光栅 $G4$ 可看作非对称性为 0 的顶部倾斜光栅。因此,只要获得顶部倾斜光栅的衍射场,就可以计算出 $E_m^{G1} \sim E_m^{G4}$,进而获得 E_m^G ,顶部倾斜非对称光栅结构 $g(x)$ 如图 5 所示。

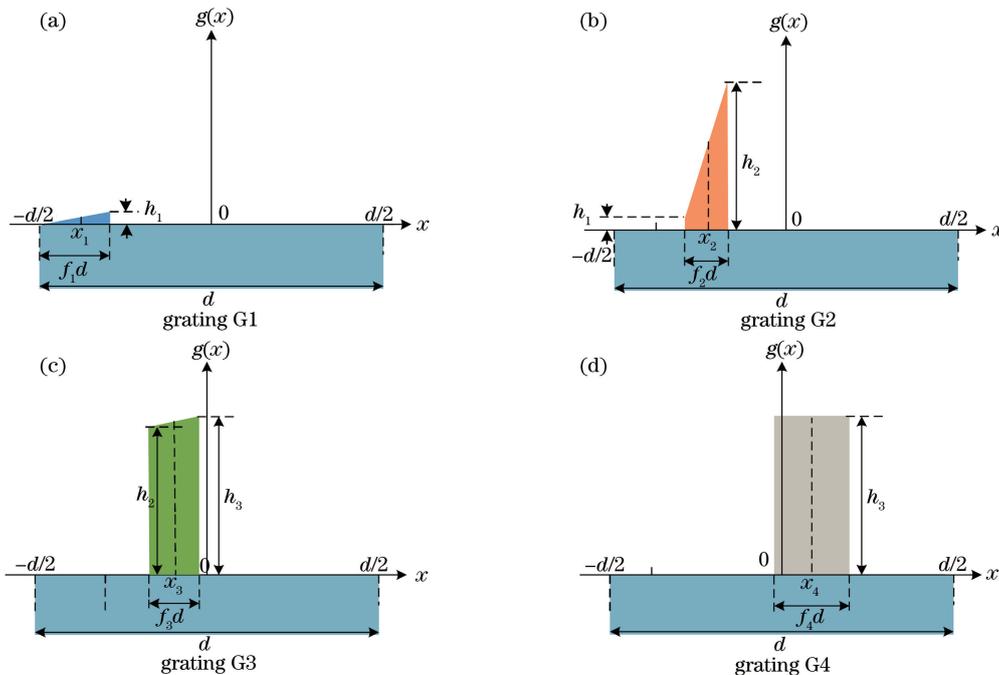


图 4 分解光栅的结构。(a)光栅 $G1$; (b)光栅 $G2$; (c)光栅 $G3$; (d)光栅 $G4$

Fig. 4 Structure of the decomposed grating. (a) Grating $G1$; (b) grating $G2$; (c) grating $G3$; (d) grating $G4$

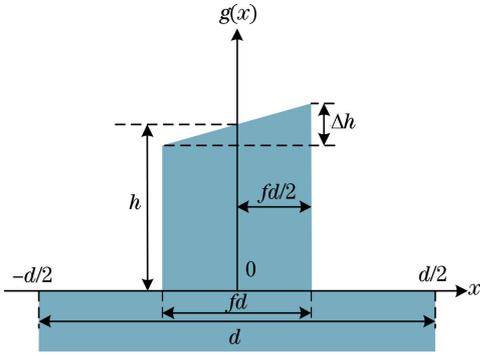


图 5 非对称光栅结构

Fig. 5 Structure of the asymmetric grating

在图 5 的坐标系中将光栅结构表示为

$$g(x) = \begin{cases} 0, & nd + fd/2 < |x| \leq nd + d/2 \\ h + x \cdot \Delta h / fd, & |x| \leq nd + fd/2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中, n 为非负整数。光栅的反射函数可表示为

$$R(x) = \begin{cases} r, & nd + fd/2 < |x| \leq nd + d/2 \\ r \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (h + x \Delta h / fd) \right], & |x| \leq nd + fd/2 \end{cases}, \quad (9)$$

式中, r 为光栅材料的反射系数, 实验中将 r 设置为 1。当入射光束为单位振幅的平面波时, m 级次衍射光的衍射场可表示为

$$E_m^G = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} R(x) \exp \left(-j \frac{2m\pi}{d} x \right) dx, \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式, 得到

$$E_m^G(h, \Delta h, f) = -\frac{\sin(m\pi f)}{m\pi} + \frac{\sin(m\pi f + 2\pi\Delta h/\lambda)}{m\pi + 2\pi\Delta h/(f\lambda)} \exp(-j4\pi h/\lambda), \quad (11)$$

式中, $m \neq 0$ 。将典型顶部倾斜相位光栅的衍射场应用于光栅 G1~G4 四种特殊情形后, 可以推导出光栅 G1~G4 的衍射场。根据傅里叶平移定理得到 E_m^{G1} 、 E_m^{G2} 、 E_m^{G3} 和 E_m^{G4} 分别为

$$E_m^{G1} = E_m(h_1/2, h_1, f_1) \exp \left(-j \frac{2m\pi}{d} x_1 \right), \quad (12)$$

$$E_m^{G2} = E_m[(h_1 + h_2)/2, h_2 - h_1, f_2] \times \exp \left(-j \frac{2m\pi}{d} x_2 \right), \quad (13)$$

$$E_m^{G3} = E_m[(h_2 + h_3)/2, h_3 - h_2, f_3] \times \exp \left(-j \frac{2m\pi}{d} x_3 \right), \quad (14)$$

$$E_m^{G4} = E_m(h_3, 0, f_4) \exp \left(-j \frac{2m\pi}{d} x_4 \right), \quad (15)$$

将(11)式~(15)式代入(7)式, 计算出非对称光栅 G 的衍射场 E_m^G 为

$$E_m^G = A + jB, \quad (16)$$

其中, A 、 B 分别为

$$A = \begin{cases} -\frac{\sin(m\pi f_1)}{m\pi} \cos \left(\frac{2m\pi}{d} x_1 \right) + \frac{\sin(m\pi f_1 + 2\pi h_1/\lambda)}{m\pi + 2\pi h_1/(f_1\lambda)} \cos \left(2\pi h_1/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_1 \right) \\ -\frac{\sin(m\pi f_2)}{m\pi} \cos \left(\frac{2m\pi}{d} x_2 \right) + \frac{\sin[m\pi f_2 + 2\pi(h_2 - h_1)/\lambda]}{m\pi + 2\pi(h_2 - h_1)/(f_2\lambda)} \cos \left[2\pi(h_2 + h_1)/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_2 \right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_3)}{m\pi} \cos \left(\frac{2m\pi}{d} x_3 \right) + \frac{\sin[m\pi f_3 + 2\pi(h_3 - h_2)/\lambda]}{m\pi + 2\pi(h_3 - h_2)/(f_3\lambda)} \cos \left[2\pi(h_3 + h_2)/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_3 \right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \cos \left(\frac{2m\pi}{d} x_4 \right) + \frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \cos \left(4\pi h_3/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_4 \right) \end{cases}, \quad (17)$$

$$B = \begin{cases} \frac{\sin(m\pi f_1)}{m\pi} \sin \left(\frac{2m\pi}{d} x_1 \right) - \frac{\sin(m\pi f_1 + 2\pi h_1/\lambda)}{m\pi + 2\pi h_1/(f_1\lambda)} \sin \left(2\pi h_1/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_1 \right) \\ \frac{\sin(m\pi f_2)}{m\pi} \sin \left(\frac{2m\pi}{d} x_2 \right) - \frac{\sin[m\pi f_2 + 2\pi(h_2 - h_1)/\lambda]}{m\pi + 2\pi(h_2 - h_1)/(f_2\lambda)} \sin \left[2\pi(h_2 + h_1)/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_2 \right] \\ \frac{\sin(m\pi f_3)}{m\pi} \sin \left(\frac{2m\pi}{d} x_3 \right) - \frac{\sin[m\pi f_3 + 2\pi(h_3 - h_2)/\lambda]}{m\pi + 2\pi(h_3 - h_2)/(f_3\lambda)} \sin \left[2\pi(h_3 + h_2)/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_3 \right] \\ \frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \sin \left(\frac{2m\pi}{d} x_4 \right) - \frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \sin \left(4\pi h_3/\lambda + \frac{2m\pi}{d} x_4 \right) \end{cases}. \quad (18)$$

同理, 得到非对称光栅 G 的衍射场 E_m^G 为

$$E_m^G = C + jD, \quad (19)$$

其中, C 和 D 分别为

$$C = \begin{cases} -\frac{\sin(m\pi f_1)}{m\pi} \cos\left(\frac{2m\pi}{d}x_1\right) + \frac{\sin(-m\pi f_1 + 2\pi h_1/\lambda)}{-m\pi + 2\pi h_1/(f_1\lambda)} \cos\left(2\pi h_1/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_1\right) \\ -\frac{\sin(m\pi f_2)}{m\pi} \cos\left(\frac{2m\pi}{d}x_2\right) + \frac{\sin[-m\pi f_2 + 2\pi(h_2 - h_1)/\lambda]}{-m\pi + 2\pi(h_2 - h_1)/(f_2\lambda)} \cos\left[2\pi(h_2 + h_1)/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_2\right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_3)}{m\pi} \cos\left(\frac{2m\pi}{d}x_3\right) + \frac{\sin[-m\pi f_3 + 2\pi(h_3 - h_2)/\lambda]}{-m\pi + 2\pi(h_3 - h_2)/(f_3\lambda)} \cos\left[2\pi(h_3 + h_2)/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_3\right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \cos\left(\frac{2m\pi}{d}x_4\right) + \frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \cos\left(4\pi h_3/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_4\right) \end{cases}, \quad (20)$$

$$D = \begin{cases} -\frac{\sin(m\pi f_1)}{m\pi} \sin\left(\frac{2m\pi}{d}x_1\right) - \frac{\sin(-m\pi f_1 + 2\pi h_1/\lambda)}{-m\pi + 2\pi h_1/(f_1\lambda)} \sin\left(2\pi h_1/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_1\right) \\ -\frac{\sin(m\pi f_2)}{m\pi} \sin\left(\frac{2m\pi}{d}x_2\right) - \frac{\sin[-m\pi f_2 + 2\pi(h_2 - h_1)/\lambda]}{-m\pi + 2\pi(h_2 - h_1)/(f_2\lambda)} \sin\left[2\pi(h_2 + h_1)/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_2\right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_3)}{m\pi} \sin\left(\frac{2m\pi}{d}x_3\right) - \frac{\sin[-m\pi f_3 + 2\pi(h_3 - h_2)/\lambda]}{-m\pi + 2\pi(h_3 - h_2)/(f_3\lambda)} \sin\left[2\pi(h_3 + h_2)/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_3\right] \\ -\frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \sin\left(\frac{2m\pi}{d}x_4\right) - \frac{\sin(m\pi f_4)}{m\pi} \sin\left(4\pi h_3/\lambda - \frac{2m\pi}{d}x_4\right) \end{cases}. \quad (21)$$

扫描相位光栅时,生成的测量信号光强可表示为

$$I_m(x) = \left| E_m^G \exp\left[-j\frac{2m\pi}{d}(x - x_0)\right] + E_{-m}^G \exp\left[j\frac{2m\pi}{d}(x - x_0)\right] \right|^2 = A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + 2\sqrt{(A^2 + B^2)(C^2 + D^2)} \cos\left[\frac{4m\pi}{d}(x - x_0) - (\varphi_m^G - \varphi_{-m}^G)\right], \quad (22)$$

其中,

$$\begin{cases} \cos \varphi_m^G = A / \sqrt{A^2 + B^2}, \\ \sin \varphi_m^G = B / \sqrt{A^2 + B^2}, \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \cos \varphi_{-m}^G = C / \sqrt{C^2 + D^2}, \\ \sin \varphi_{-m}^G = D / \sqrt{C^2 + D^2}, \end{cases} \quad (24)$$

式中, φ_m^G 为 E_m^G 的相位, $\sqrt{A^2 + B^2}$ 为 E_m^G 的振幅, φ_{-m}^G 为 E_{-m}^G 的相位, $\sqrt{C^2 + D^2}$ 为 E_{-m}^G 的振幅。位置误差 Δx_m 和对比度 V 可表示为

$$\Delta x_m = \frac{d}{4m\pi} (\varphi_m^G - \varphi_{-m}^G), \quad (25)$$

$$V = \frac{2\sqrt{(A^2 + B^2)(C^2 + D^2)}}{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}. \quad (26)$$

2.3 多衍射级次权重优化法

由(5)式可知,非对称性导致的位置误差 Δx 是衍射级次 m 的函数;且对于同一非对称性,不同衍射级次 m 具有不同的 Δx_m 。因此,可利用衍射级次对非对称性的敏感度差异修正非对称性引入的位置测量误差,该方法也被称为多衍射级次权重优化法。假设位置测量传感器可以探测 N 个衍射级次的测量信号,非对称性导致衍射级次 m 的位置测量误差

为 Δx_m ,光栅实际位置为 x_0 。由于本研究聚焦非对称性对位置测量精度的影响,不考虑其他因素导致的位置测量误差,则根据 m 级次衍射光测量信号获得的位置可表示为

$$x_m = x_0 + \Delta x_m, \quad (27)$$

令不同衍射级次 m 的权重为 w_m ,则测量位置 x 可表示为

$$x = \sum_{m=1}^N w_m x_m, \quad (28)$$

将(27)式代入(28)式,得到

$$x = x_0 \sum_{m=1}^N w_m + \sum_{m=1}^N w_m \Delta x_m. \quad (29)$$

为了使测量位置 x 趋近于实际位置 x_0 ,要求

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^N w_m = 1 \\ \sum_{m=1}^N w_m \Delta x_m = 0 \end{cases}. \quad (30)$$

由上述分析可知,为了修正非对称性对位置测量精度的影响,需使 $\{w_m\}$ 与 $\{\Delta x_m\}$ 的积趋近 0,且要保证 $\{w_m\}$ 的和为 1。(30)式通常为超定方程,可采用最小二乘法找到一组 $\{w_m\}$,使 $\{w_m\}$ 与 $\{\Delta x_m\}$ 的积趋近于 0。

3 实验结果与分析

根据上述方法建立的理论模型分析典型倾斜非对称性对各衍射级次测量信号对比度和位置误差的影响,并验证多衍射级次权重优化法的有效性。相位光栅位置测量传感器中通常采用奇衍射级次生成测量信号^[2],因此,实验主要分析非对称性对奇衍射级次(1、3、5、7、9)测量信号对比度和位置误差的影响,仿真中光栅的周期为 16 μm,入射光波长为 633 nm。

3.1 顶部倾斜非对称性

对于顶部倾斜非对称性的衍射场,当 $h = (2n - 1)\lambda/4$,且 n 为正整数时,(11)式可表示为

$$E_m = -\frac{\sin(m\pi f)}{m\pi} - \frac{\sin(m\pi f + 2\pi\Delta h/\lambda)}{m\pi + 2\pi\Delta h/(f\lambda)}, \quad (31)$$

式中, E_m 和 E_{-m} 均为实数,如图 6 所示。可以发现, Δh 的变化不会影响位置测量精度,但会使 E_m 和 E_{-m} 的幅值不相等,降低了测量信号的对比度。

当 $\sin(m\pi f + 2\pi\Delta h/\lambda) = 0$ 时,(11)式可表示为

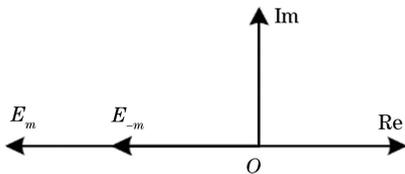


图 6 $h = (2n - 1)\lambda/4$ 时 E_m 和 E_{-m} 示意图
Fig. 6 Schematic diagram of E_m and E_{-m}
when $h = (2n - 1)\lambda/4$

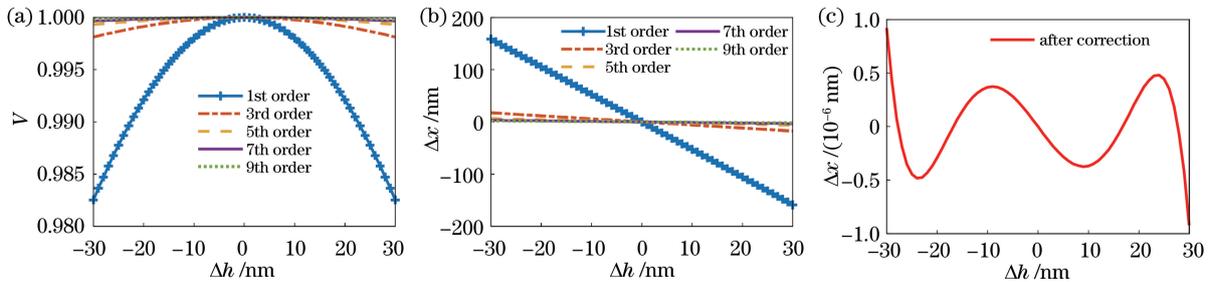


图 8 当 h 一定时, Δh 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 Δh 的变化曲线;

(b) Δx 随 Δh 的变化曲线;(c)修正后 Δx 随 Δh 的变化曲线(顶部倾斜)

Fig. 8 Effect of Δh on V and Δx and the corrected Δx when h is certain. (a) Change curve of V with Δh ;

(b) change curve of Δx with Δh ; (c) change curve of Δx with Δh after correction (top tilt)

当 $f = 0.5$, $\Delta h = 10$ nm 时,对比度 V 和位置误差 Δx 随槽深 h 的变化如图 9(a)、图 9(b)所示。可以发现,在非对称性一定的情况下, h 对 V 的影响较小,对 Δx 的影响较大。当 $h = 158.25$ nm ($\lambda/4$

$$E_m = -\frac{\sin(m\pi f)}{m\pi}, \quad (32)$$

式中, E_m 和 E_{-m} 大小相等,方向相同,如图 7 所示,对比度 $V = 1$ 。此时,非对称性也不会影响位置测量精度。但在相位光栅设计中,为了增强奇衍射级次,通常使 $\sin(m\pi f) = 1$ ^[22],如 $f = 0.5$ 时, $\Delta h = \lambda/4$ (波长为可见光波段),实际工艺过程中,通常不可能产生如此大的非对称变化。

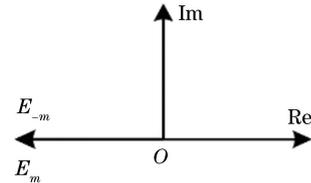


图 7 $\sin(m\pi f + 2\pi\Delta h/\lambda) = 0$ 时 E_m 和 E_{-m} 示意图
Fig. 7 Schematic diagram of E_m and E_{-m}
when $\sin(m\pi f + 2\pi\Delta h/\lambda) = 0$

当 $f = 0.5$, $h = 100$ nm 时,对比度 V 和位置误差 Δx 随 Δh 的变化曲线如图 8(a)、图 8(b)所示。可以发现,随着非对称性 Δh 的增加,对比度 V 逐渐减小,位置误差 Δx 逐渐增加;且衍射级次越低,对比度越小,位置误差越大,但所有衍射级次的对比度均大于 0.98。 $m = 1$ 时的最大位置误差 Δx_1 为 158.71 nm; $m = 9$ 时的最大位置误差 Δx_9 为 1.94 nm。当顶部非对称性在 $[-30$ nm, 30 nm] 范围内变化时,采用多衍射级次权重优化法修正后,非对称性引入的位置误差 Δx 小于 10^{-6} nm,可以忽略,如图 8(c)所示。

@ 633 nm) 时, $\Delta x = 0$; 当 $\Delta h = 10$ nm, 槽深为 175 nm 时, $m = 1$ 时的 Δx 达到 13.52 nm; 采用多衍射级次权重优化法修正后,位置误差接近于 0,可以忽略,如图 9(c)所示。

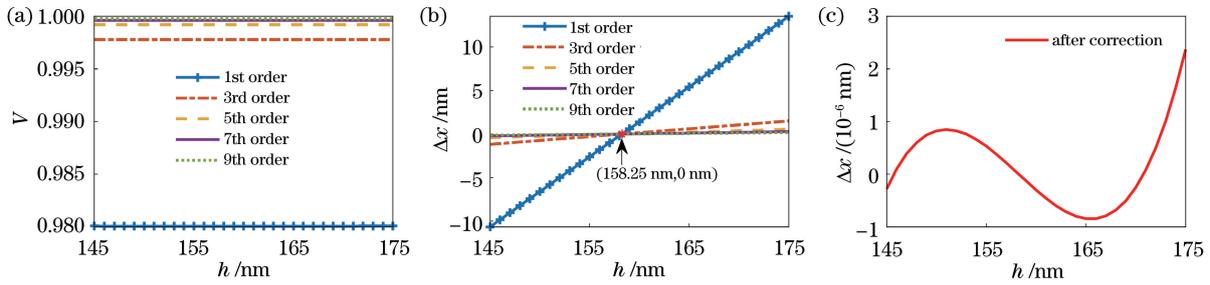


图 9 当 Δh 一定时, h 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 h 的变化曲线;
(b) Δx 随 h 的变化曲线;(c)修正后 Δx 随 h 的变化曲线(顶部倾斜)

Fig. 9 Effect of h on V and Δx and the corrected Δx when Δh is certain. (a) Change curve of V with h ;
(b) change curve of Δx with h ; (c) change curve of Δx with h after correction (top tilt)

3.2 底部倾斜非对称性

底部倾斜非对称光栅结构如图 10 所示, 根据 (7) 式计算出各衍射级次的衍射场可表示为

$$E_m = \frac{\sin(m\pi f)}{m\pi} \exp\left(-j\frac{4\pi h}{\lambda}\right) - \frac{\sin(m\pi f - 2\pi\Delta h/\lambda)}{m\pi + 2\pi\Delta h/[(1-f)\lambda]} \exp\left(-j\frac{2\pi\Delta h}{\lambda}\right). \quad (33)$$

当 $h - \Delta h/2 = (2n - 1)\lambda/4$ 且 n 为正整数时, (33) 式可表示为

$$E_m = \exp\left(-j\frac{4\pi h}{\lambda}\right) \times \left\{ \frac{\sin(m\pi f)}{m\pi} + \frac{\sin(m\pi f - 2\pi\Delta h/\lambda)}{m\pi + 2\pi\Delta h/[(1-f)\lambda]} \right\}, \quad (34)$$

此时, E_m 和 E_{-m} 如图 11 所示。可以发现, Δh 的变化不会影响位置测量精度, 但 E_m 和 E_{-m} 的幅值不同, 导致对比度 V 减小。用 $h - \Delta h/2$ 表示中心槽深, 通常 $\sin(m\pi f - 2\pi\Delta h/\lambda) = 0$ 时, $\sin(m\pi f) = 1^{[22]}$, 如 $f = 0.5$ 时, $\Delta h = \lambda/4$, 但实际中不可能产生如此大的非对称变化。

当 $f = 0.5, h = 100 \text{ nm}$ 时, 对比度 V 和位置误差 Δx 随底部倾斜非对称性 Δh 的变化如图 12(a)、

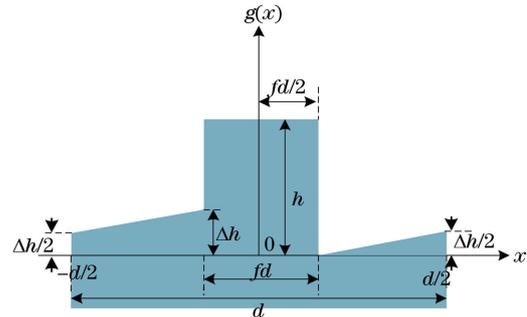


图 10 底部倾斜非对称光栅结构

Fig. 10 Structure of the bottom tilted asymmetric grating

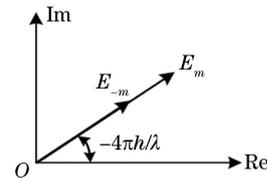


图 11 $h - \Delta h/2 = (2n - 1)\lambda/4$ 时 E_m 和 E_{-m} 示意图

Fig. 11 Schematic diagram of E_m and E_{-m} when $h - \Delta h/2 = (2n - 1)\lambda/4$

图 12(b) 所示。可以发现, 底部倾斜非对称性 Δh 越大, V 越小, Δx 越大; 且衍射级次 m 越小, V 越小, Δx 越大。当 $\Delta h = 30 \text{ nm}, m = 1$ 时, 位置误差 Δx_1

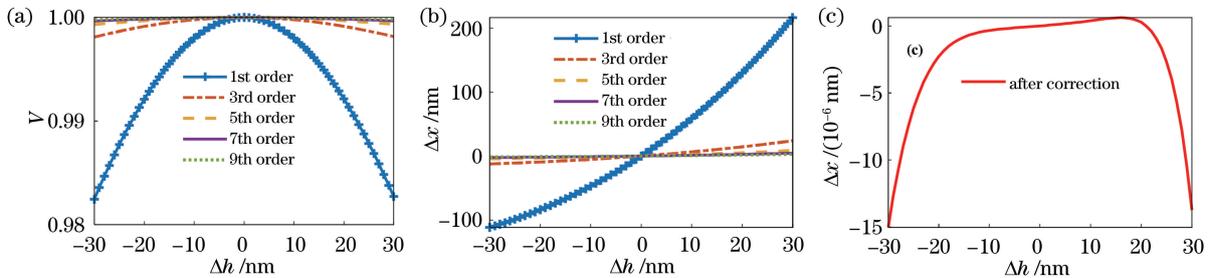


图 12 当 h 一定时, Δh 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 Δh 的变化曲线;
(b) Δx 随 Δh 的变化曲线;(c)修正后 Δx 随 Δh 的变化曲线(底部倾斜)

Fig. 12 Effect of Δh on V and Δx and the corrected Δx when h is certain. (a) Change curve of V with Δh ;
(b) change curve of Δx with Δh ; (c) change curve of Δx with Δh after correction (bottom tilt)

为 216.1 nm; $m=9$ 时, 位置误差 Δx_1 为 2.6 nm。经多衍射级次权重优化法修正后, 非对称性对 Δx 的影响接近于 0, 如图 12(c) 所示。

当 $f=0.5, \Delta h=10$ nm 时, 对比度 V 和位置误差 Δx 随槽深 h 的变化如图 13(a)、图 13(b) 所

示。可以发现, 当 $h-\Delta h/2=158.25$ nm ($\lambda/4 @ 633$ nm) 即 $h=163.25$ nm 时, $\Delta x=0$ 。经多衍射级次权重优化法修正后, 底部倾斜非对称性对 Δx 的影响接近于 0, 如图 13(c) 所示。

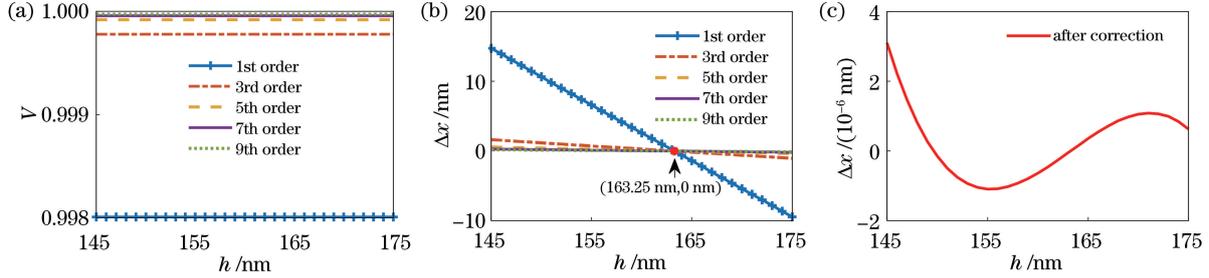


图 13 当 Δh 一定时, h 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 h 的变化曲线; (b) Δx 随 h 的变化曲线; (c) 修正后 Δx 随 h 的变化曲线(底部倾斜)

Fig. 13 Effect of h on V and Δx and the corrected Δx when Δh is certain. (a) Change curve of V with h ; (b) change curve of Δx with h ; (c) change curve of Δx with h after correction (bottom tilt)

3.3 侧壁倾斜非对称性

侧壁倾斜非对称光栅结构如图 14 所示。根据(7)式计算出各衍射级次的衍射场为

$$E_m = \frac{\Delta f \sin(2\pi h/\lambda + 2m\pi\Delta f) \exp[j(m\pi f - 2\pi h/\lambda)]}{\pi(h/\lambda + m\Delta f)} - \frac{\sin[m\pi(f + \Delta f)] \exp(jm\pi\Delta f)}{m\pi} + \frac{\sin[m\pi(f - \Delta f)] \exp[-j(m\pi\Delta f + 4\pi h/\lambda)]}{m\pi}, \quad (35)$$

当 $mf=n-1/2$ 且 n 正整数时, (35) 式可表示为

$$E_m = (-1)^n \exp[j(-\pi/2 - 2\pi h/\lambda)] \left[\frac{\Delta f \sin(2\pi h/\lambda + 2m\pi\Delta f)}{\pi(h/\lambda + m\Delta f)} - \frac{2\cos(m\pi\Delta f) \sin(m\pi\Delta f + 2\pi h/\lambda)}{m\pi} \right], \quad (36)$$

此时, E_m 和 E_{-m} 如图 15 所示。可以发现, Δf 的变化不会影响位置测量精度, 但 E_m 和 E_{-m} 的幅值不同, 导致对比度 V 减小。

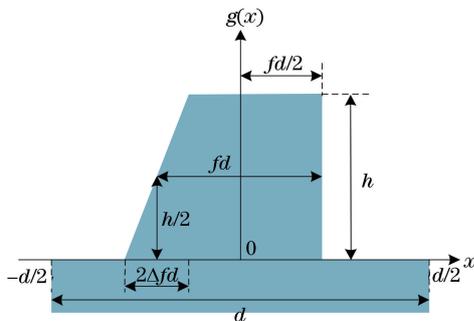


图 14 侧壁倾斜非对称结构

Fig. 14 Structure of the sidewall tilted asymmetric grating

当 $f=0.3, h=100$ nm 时, 对比度 V 和位置误差 Δx 随侧壁倾斜非对称性 Δf 的变化如图 16(a)、图 16(b) 所示。可以发现, Δf 越大, V 越小, Δx 越大。当 $m=5$ 时, $mf=n-1/2$ (n 为正整数), $\Delta x=$

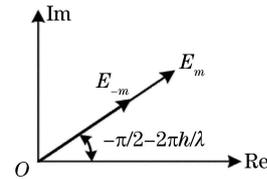


图 15 $mf=n-1/2$ 且 n 正偶数时 E_m 和 E_{-m} 示意图

Fig. 15 Schematic diagram of E_m and E_{-m}

when $mf=n-1/2$ and n is a positive even value 0, 不随 Δf 的变化而变化。经多衍射级次权重优化法修正后, 非对称性对 Δx 的影响接近于 0, 如图 16(c) 所示。

当 $\Delta f=0.01, h=100$ nm 时, 对比度 V 和位置误差 Δx 随占空比 f 的变化情况如图 17(a)、图 17(b) 所示。可以发现, 当 $f=0.5$ 时, 所有奇衍射级次均满足 $mf=n-1/2$ (n 为正整数), 因此, 各奇衍射级次的 $\Delta x=0$ 。经多衍射级次权重优化法修正后, 非对称性对 Δx 的影响接近于 0, 如图 17(c) 所示。

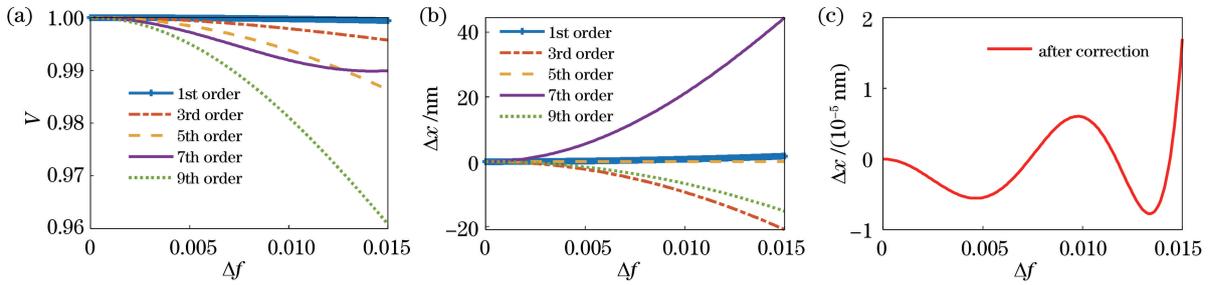


图 16 当 f 一定时, Δf 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 Δf 的变化曲线;
(b) Δx 随 Δf 的变化曲线;(c)修正后 Δx 随 Δf 的变化曲线(侧壁倾斜)

Fig. 16 Effect of Δf on V and Δx and the corrected Δx when f is certain. (a) Change curve of V with Δf ;
(b) change curve of Δx with Δf ; (c) change curve of Δx with Δf after correction (sidewall tilt)

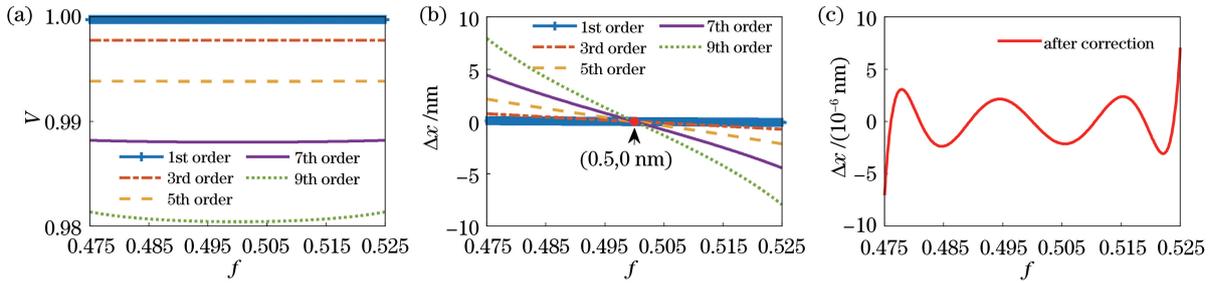


图 17 当 Δf 一定时, f 对 V 和 Δx 的影响及修正后的 Δx 。(a) V 随 f 的变化曲线;
(b) Δx 随 f 的变化曲线;(c)修正后 Δx 随 f 的变化曲线(侧壁倾斜)

Fig. 17 Effect of f on V and Δx and the corrected Δx when Δf is certain. (a) Change curve of V with f ;
(b) change curve of Δx with f ; (c) change curve of Δx with f after correction (sidewall tilt)

3.4 多种复合非对称性相位光栅

当相位光栅包含多种非对称性,即相位光栅存在底部非对称性、楔角非对称性、侧壁非对称性及顶部非对称性时,整个相位光栅可以分为 $G1 \sim G7$,每部分的宽度为 $f_i d$,每部分的中心位置为 x_i ,其中, i 的取值范围为 $1 \sim 7$,如图 18 所示。

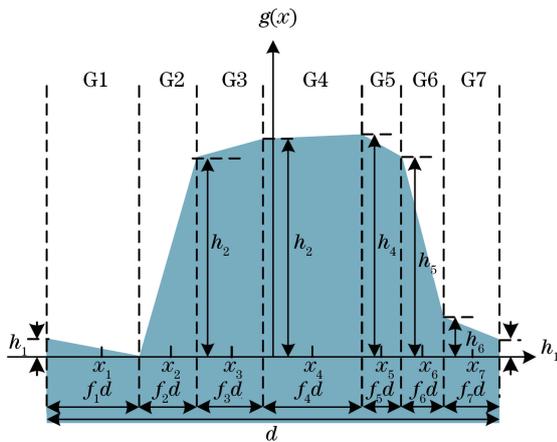


图 18 复合非对称相位光栅结构

Fig. 18 Structure of the multiple asymmetric phase grating
当 $\{f_i\} = \{0.25, 0.005, 0.016, 0.458, 0.007, f_6, f_7\}$, 其中, $f_6 \in [0.0045, 0.0055]$, f_7

由 $\sum f_i = 1$ 决定。 $\{h_i\} = \{3 \text{ nm}, 97 \text{ nm}, 100 \text{ nm}, h_4, 100 \text{ nm}, h_6, 3 \text{ nm}\}$, 其中, h_4 为变量且 $h_4 \in [100 \text{ nm}, 102 \text{ nm}]$, h_6 由 $h_1 + f_7 h_1 / f_1$ 决定。可以发现, f_6 的变化会导致右侧壁倾斜和底部倾斜非对称性的变化, h_4 的变化会导致顶部倾斜和右侧角非对称性的变化。对比度 V 随 f_6 和 h_4 的变化情况如图 19 所示, 可以发现, 各衍射级次对比度 V 均在 0.995 以上; 且当 f_6 和 h_4 变化时, ΔV 的变化小于 0.002。位置误差 Δx 随 f_6 和 h_4 的变化情况如图 20 所示, 可以发现, 各衍射级次的最大位置误差 Δx 随衍射级次的增大而增大, $m = 9$ 时 Δx 最大, 为 90.1 nm; $m = 1$ 时 Δx 最小, 为 30.9 nm; 当 f_6 和 h_4 变化时, $m = 1$ 对应的 Δx 变化范围最大, 为 11.3 nm, 其余各衍射级次的 Δx 变化范围均小于 3 nm。经多衍射级次权重优化法修正后, 位置误差可控制在 0.05 nm 以内, 这表明对于多种非对称性同时变化的情况, 多衍射级次权重优化法也可以很好地控制位置误差。

3.5 实验结果分析

采用 RCWA 对非对称相位光栅场分析模型进行验证, 以底部倾斜标记的第 1 衍射级次为例, 结果

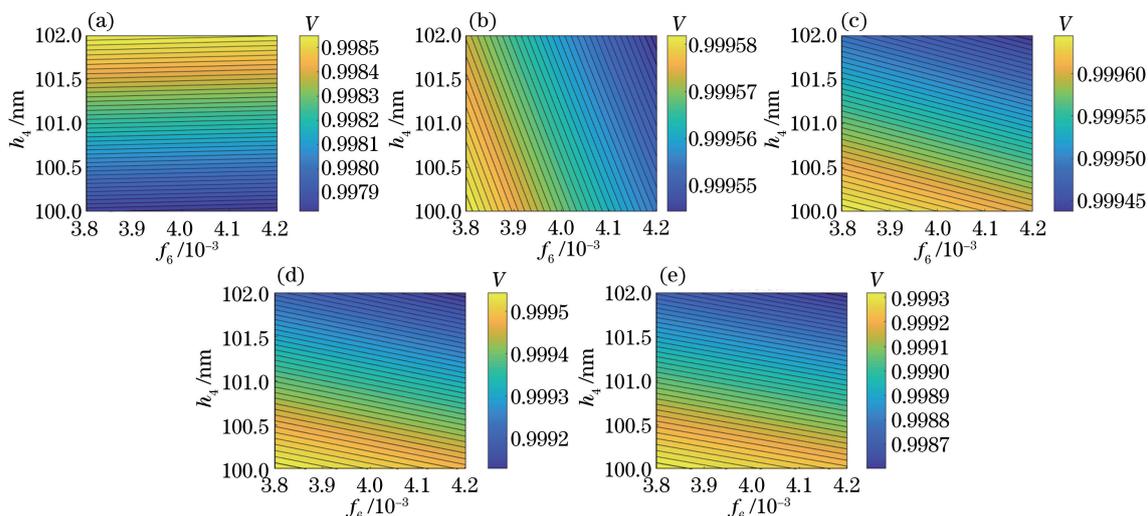


图 19 对比度 V 随 f_6 和 h_4 的变化。(a) $m=1$; (b) $m=3$; (c) $m=5$; (d) $m=7$; (e) $m=9$

Fig. 19 Contrast V changes with f_6 and h_4 . (a) $m=1$; (b) $m=3$; (c) $m=5$; (d) $m=7$; (e) $m=9$

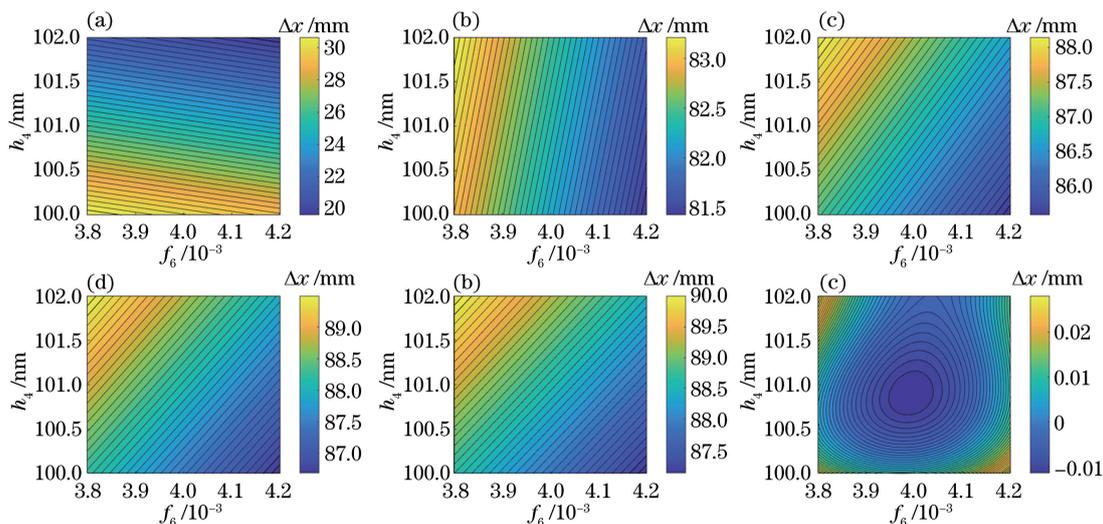


图 20 位置误差 Δx 随 f_6 和 h_4 的变化。(a) $m=1$; (b) $m=3$; (c) $m=5$; (d) $m=7$; (e) $m=9$; (f) 修正后

Fig. 20 Position error Δx changes with f_6 and h_4 . (a) $m=1$; (b) $m=3$;

(c) $m=5$; (d) $m=7$; (e) $m=9$; (f) after correction

如图 20 所示。其中,光栅材料为单晶硅,光栅周期为 $16 \mu\text{m}$, 占空比 $f=0.5$, 底部非对称性 $\Delta h=10 \text{ nm}$, 入射波长为 633 nm 。当槽深 h 变化时,基于(34)式和(5)式计算的位置误差与基于 RCWA 方法计算的位置误差如图 21 所示。可以发现,当槽深为 163.25 nm 时,两者的计算结果一致,位置误差均为 0 ; 当槽深为 148.25 nm 时,两者的计算误差最大,其中,RCWA 的计算结果为 12.350 nm , 基于(34)式和(5)式的计算结果为 12.080 nm , 两者的差为 0.270 nm 。因此,对于典型倾斜非对称性对位置精度影响的规律,可以采用本模型进行分析。但本模型基于标量衍射理论,其局限性与标量衍射理论相同,即在光栅周期接近或小于入射波长的情况下,

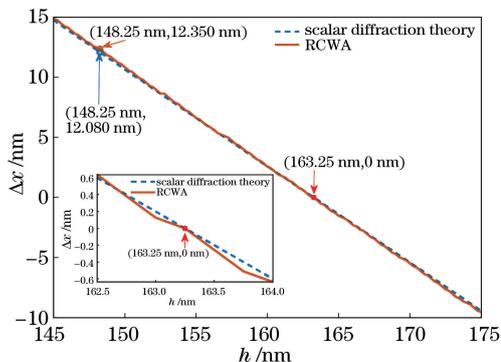


图 21 标量衍射理论和 RCWA 方法的计算结果

Fig. 21 Calculation results of scalar diffraction theory and RCWA method

需采用矢量衍射理论进行分析。

4 结 论

分析了典型非对称性相位光栅对位置测量精度的影响,并提出了一种修正非对称性对位置测量误差的方法。首先,分析了非对称性对位置测量精度的影响,建立了非对称相位光栅衍射场理论模型,并基于各衍射级次对非对称性的敏感度差异,提出了多衍射级次权重优化法,以修正非对称性对位置测量精度的影响。然后,基于该模型详细分析了顶部倾斜非对称性、底部倾斜非对称性、侧壁倾斜非对称性等典型非对称性对信号对比度和位置测量精度的影响,并验证了多衍射级次优化权重法的有效性。实验结果表明,当中心槽深为 $1/4$ 波长的奇数倍时,顶部倾斜非对称性和底部倾斜非对称性对位置测量精度的影响可以忽略;当占空比和衍射级次的积为 $1/2$ 波长的奇数倍时,侧壁倾斜非对称性对该衍射级次的位置误差可以忽略。经多衍射级次权重优化法修正后,非对称性对位置误差的影响可以控制在 0.05 nm 以内。实际应用中,可根据理想标记尺寸和加工精度,确定光栅结构和非对称性的变化范围,然后仿真该范围内非对称性导致的位置误差,获得衍射级次权重,从而修正非对称性导致的位置误差。该方法不需要测量非对称性的光栅结构,即使光栅为非对称结构或其结构参数在一定范围内变化时,也可以较好地修正非对称性引入的位置误差,具有较强的工艺适应性。

参 考 文 献

- [1] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(10): 532-547.
- [2] den Boef A J. Optical wafer metrology sensors for process-robust CD and overlay control in semiconductor device manufacturing [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, 4(2): 023001.
- [3] Jacobs B J, Kramer P. Apparatus for aligning a mask with respect to semiconductor substrate: US3811779 [P]. 1974-05-21.
- [4] Keij S, Setija I, van der Zouw G, et al. Advances in phase-grating-based wafer alignment systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5752: 948-960.
- [5] Miyasaka M, Saito H, Tamura T, et al. The application of SMASH alignment system for 65-55-nm logic devices [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 65180H.
- [6] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, et al. Alignment technique using moire fringes based on self-coherence in lithographic tools [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204006.
杜聚有, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204006.
- [7] Bunday B, Bello A F, Solecky E, et al. 7/5 nm logic manufacturing capabilities and requirements of metrology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10585: 105850I.
- [8] Li Y Q, Liu Y, Liu L H. Effect of thermal deformation on imaging performance for 16 nm extreme ultraviolet lithography objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0122001.
李艳秋, 刘岩, 刘丽辉. 16 nm 极紫外光刻物镜热变形对成像性能影响的研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0122001.
- [9] Ming R F, Wei Y Y, Dong L S. Influence of optical system aberration on critical dimension of EUV lithography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1222001.
明瑞峰, 韦亚一, 董立松. 光学系统像差对极紫外光刻成像特征尺寸的影响 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1222001.
- [10] Wittekoek S, van der Werf J, George R A. Phase gratings as wafer stepper alignment marks for all process layers [J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 0538: 24-31.
- [11] Cui Y T, Goodwin F, van Haren R, et al. Segmented alignment mark optimization and signal strength enhancement for deep trench process [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5375: 1265-1277.
- [12] Lee B S, Kim Y H, Hwang H, et al. Overcoming low-alignment signal contrast induced alignment failure by alignment signal enhancement [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 97800B.
- [13] Xu B Q, Wu Q, Dong L S, et al. Selection of DBO measurement wavelength for bottom mark asymmetry based on FDTD method [J]. *Journal of Semiconductors*, 2019, 40(12): 122403.
- [14] Sanchez M I, Ukraintsev V A, Leray P, et al. Improving scanner wafer alignment performance by target optimization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97782M.
- [15] Erdmann A, Kye J, Menchtchikov B, et al. Computational scanner wafer mark alignment [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10147: 10147C.
- [16] Menchtchikov B, Socha R, Zheng C M, et al.

- Reduction in overlay error from mark asymmetry using simulation, ORION, and alignment models [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10587: 105870C.
- [17] Megens H, Brinkhof R, Aarts I, et al. Holistic feedforward control for the 5 nm logic node and beyond [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10961: 109610K.
- [18] Jeong I H, Kim H S, Kong Y O, et al. Improved wafer alignment model algorithm for better on-product overlay [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10961: 109610A.
- [19] Du J Y, Dai F Z, Wang X Z. Calibration method for alignment error caused by asymmetric deformation of mark and its application in overlay measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704004. 杜聚有, 戴凤钊, 王向朝. 标记非对称变形导致的对准误差修正方法及其在套刻测量中的应用 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704004.
- [20] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, et al. Calibration method of overlay measurement error caused by asymmetry mark [J]. Applied Optics, 2018, 57(33): 9814-9821.
- [21] Zhang T, Zhao X, Cui J, et al. Influence of asymmetric grating structures on measurement accuracy in integrated phase grating interference-based metrology [J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1847-1854.
- [22] Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Investigation of the diffraction efficiency of enhanced phase grating [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1205001. 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 增强型相位光栅衍射效率研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1205001.