

doi:10.3788/gzxb20144311.1112002

单幅圆条纹相位展开光刻对准研究

徐锋^{1,2}, 胡松³

(1 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

(2 特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010)

(3 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要:针对光刻对准中产生的单幅封闭干涉条纹经相位解析后获得的包裹相位, 提出在极坐标系对其进行相位展开进而获得对准偏移量的方法. 该方法首先将对准过程中两圆光栅相对移动产生条纹的相位分布从直角坐标系转换到极坐标系; 其次分析在极坐标系下对准偏移量与相位参量的关系; 最后通过取不同径向半径获得初始相位振幅与相位延迟进而求取对准偏移量. 数值模拟与实验验证该方法的可行性并与传统的最小二乘与路径跟踪相位展开方法进行了对比分析. 结果表明该方法对包裹相位进行展开进而达到几十纳米量级的高准确度对准, 具有很强的适应性.

关键词:信息光学; 光刻; 对准; 相位展开; 包裹相位; 封闭条纹; 极坐标

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1112002-6

Alignment in Lithography with Single Circular Fringe Pattern Phase Unwrapping

XU Feng^{1,2}, HU Song³

(1 Faculty Information & Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China)

(2 Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province,
Mianyang, Sichuan 621010, China)

(3 Institute Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The phase unwrapping method based on the polar coordinate to get the alignment offset was proposed for the wrapped phase generated after the single closed interference fringe phase extraction in alignment of nanolithography. The phase distribution of the fringe pattern occurs in the relative movement between two circular gratings was transformed from rectangular coordinates system to polar coordinates system firstly; then the relationship between the alignment offset and the phase parameter was analysis in polar coordinates system; the initial phase amplitude and phase delay in different radial radius were got to acquire the alignment offset finally. The feasibility of the method was verified by numerical simulation and experiment and the comparisons of the tradition least squares method and path tracking method are given. The results show that the wrapped phase can be unwrapped for the alignment with high precision in tens of nanometers through the method with good adaptability.

Key words: Information optics; Lithography; Alignment; Phase unwrapping; Wrapped phase; Closed fringe; Polar coordinator

OCIS Codes: 120.1680; 220.1140; 100.5070; 100.3008; 100.2650

0 引言

作为纳米技术的基础, 纳米器件的制造对高分辨

力光刻技术的需求越来越迫切. 随着高集成度电路 (Integrated Circuit, IC) 以及相关器件的研发, IC 特征尺寸愈来愈小, 对光刻分辨力要求也越来越高. 如何提

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60976077) 和西南科技大学博士基金 (No. 12zx7128) 资助

第一作者: 徐锋 (1985—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光刻对准与条纹分析技术. Email: casxfeng@gmail.com

收稿日期: 2014-03-25; 录用日期: 2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

高光刻的分辨力成为业界关注的热点问题. 光刻对准技术作为光刻的三大核心技术之一^[1], 是影响光刻分辨力的一个重要因素之一, 提高对准准确度是提高光刻分辨力的一个重要途径. 基于光栅调制空间相位成像的纳米级对准方法^[2-4], 理论上能达到较高的对准准确度且具有最好的抗干扰能力. 而在该对准方法前期研究中, 提出了一种基于二维解析小波变换进行相位提取的方法^[5], 然而提取出的相位呈现包裹性, 需要对应的相位展开方法来获得相位进而获得对准偏移量.

通常, 在包裹相位二维相位展开过程中, 需要同时兼顾精确性和一致性两个方面. 其中, 精确性指展开恢复后的相位分布与原始相位分布应没有误差或误差较小; 一致性指展开后的相位信息中任意两点之间的相位差与两点之间的路径无关^[6]. 目前主流的二维相位展开方法主要分为两大类: 即最小二乘法 (Least Square, LS) 与路径跟踪法 (Path Tracking, PT). 最小二乘展开法^[7-10] 是一种广泛使用的优化方法, 此类算法基于包裹相位的相位梯度与展开相位的相位梯度之差最小的准则. 基于最小二乘算法的二维相位展开分为加权和无加权两种形式. 路径跟踪法着眼于相位的局部信息, 在局部相位不存在残差点的前提下通过对包裹相位的二维一阶差分连续积分实现相位展开, 再根据一定的搜索策略完成全局展开. 此类相位展开方法的研究主要集中在选择积分路径的设置上. 常见的积分路径为质量图引导, 通常的质量图有残差点、方差、灰度梯度、相位导数方差、二阶相位差分、调制度、小波脊系数幅值^[11-16]. 光刻对准中圆光栅产生的单幅封闭干涉条纹因其多频率特性导致在相位提取时仍存在部分残差区域, 此时由传统的二维相位展开方法进行去包裹将导致误差的传递, 从而影响到最终的对准准确度.

本文针对该问题, 结合圆光栅对准理论, 提出了在极坐标系下进行相位展开进而获得对准偏移量的方法, 在完成相位展开的同时能较好地抑制噪音, 达到高准确度对准. 首先将对准中干涉条纹的产生与相位分布与双光栅偏移关系进行了介绍, 其次介绍干涉条纹相位与对准偏移量的在极坐标系中的对应关系进而获得对准偏移量, 最后通过数值模拟和实验对该方法的可行性进行了验证.

1 理论

1.1 对准干涉条纹

基于光栅调制空间相位成像纳米对准方法采用了两周期接近的圆形微光栅分别作为掩模和硅片上的对准标记, 将掩模与硅片的相对位置变化反映到条纹图像的空间相位变化中, 通过电荷耦合元件 (Charge-Couple Device, CCD) 采集到干涉条纹图像, 再解析条纹图像的空间相位信息, 可以获得掩模与硅片的相对

位移信息, 用于进一步的对准. 图 1 显示了基于光栅调制空间相位成像接近式纳米对准示意图. 图 2 为对准中掩模和硅片上光栅标记和对应产生的条纹图像. 当这两组如图 2(a)、(b) 所示的光栅标记对准重合时, 经过放大将产生如图 2(c)、(d) 所示的条纹. 这两组光栅标记对应的微米级周期分别为 T_1 、 T_2 , 其中图 2(c) 表示掩模硅片未对准时的条纹分布图像, 图 2(d) 表示两标记完全对准时的条纹分布图像.

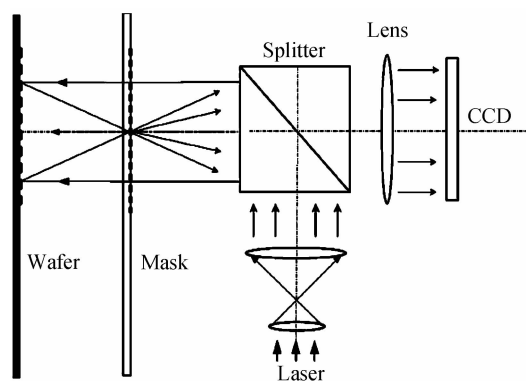


图 1 接近式光刻掩模硅片对准示意图

Fig. 1 The framework of wafer-mask alignment in the proximity lithography

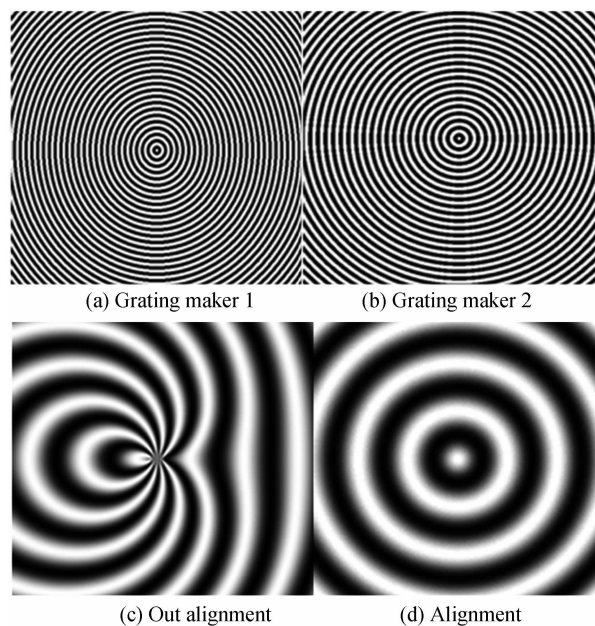


图 2 两组光栅标记及相应的条纹

Fig. 2 The two group grating marker and the corresponding fringe

通常, 条纹图像可表示为

$$f(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y)) \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$, $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示条纹强度, 背景强度和条纹的调制度. $\varphi(x, y)$ 为所要提取的相位信息. 图 2(c)、(d) 中条纹的相位可表示为

$$\varphi_1(x, y) = 2\pi(f_1 \sqrt{(x-\Delta x)^2 + y^2} - f_2 \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (2)$$

$$\varphi_2(x, y) = 2\pi(f_1 \sqrt{x^2 + y^2} - f_2 \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (3)$$

式中 $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ 分别为硅片标记和掩模标记未对准和完全对准时的相位分布, $f_1 = 1/T_1$ 和 $f_2 = 1/T_2$ 分别为两标记光栅的空间频率, Δx 是两光栅标记沿 x 方向的位移^[2]. 光栅标记的偏移量与条纹图的相位偏移存在一定的关系.

1.2 干涉条纹相位极坐标分析

图 3 给出了两光栅的极坐标示意图, 其中 O 与 O_1 分别为掩模与硅片光栅的中心点. $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为掩模上光栅各点到其中心的距离, θ 表示掩模上光栅各点与水平方向上的夹角. 同理, $\epsilon = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ 为硅片上光栅与掩模上光栅中心点之间的距离, 而 φ 为两

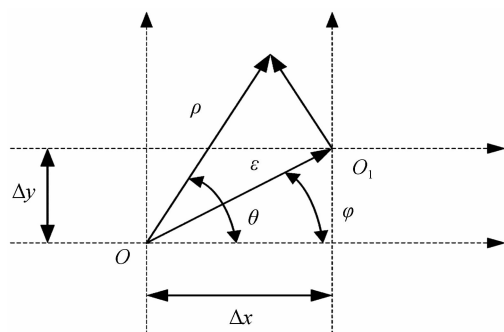


图 3 双圆光栅极坐标

Fig. 3 The relation between two groups circular grating markers in polar coordinates

中心点连线与水平方向之间的夹角即偏离角. 硅片上光栅相对于掩模上光栅在 x , y 方向分别有 Δx , Δy 的位移时, 对应的相位变化在极坐标下可表示为

$$\Phi(\rho, \theta) = 2\pi(f_1[(\rho \cos \theta + \epsilon \cos \varphi)^2 + (\rho \sin \theta + \epsilon \sin \varphi)^2]^{1/2} - f_2 \rho) \quad (4)$$

通过对式(4)进行化简, 得

$$\begin{aligned} \Phi(\rho, \theta) = & 2\pi(f_1[\rho^2 + \epsilon^2 + 2\rho\epsilon \cos \theta \cos \varphi + \\ & 2\rho\epsilon \sin \theta \sin \varphi]^{1/2} - f_2 \rho) = 2\pi(f_1[\rho^2 + \epsilon^2 + \\ & 2\rho\epsilon \cos(\theta - \varphi)]^{1/2} - f_2 \rho) \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 由于两中心的距离 ϵ 相当小, 因此此处取 $\epsilon^2 \approx (\epsilon \cos(\theta - \varphi))^2$, 则

$$\begin{aligned} \Phi(\rho, \theta) \approx & 2\pi(f_1 \sqrt{(\rho + \epsilon \cos(\theta - \varphi))^2} - f_2 \rho) = \\ & 2\pi(f_1(\rho + \epsilon \cos(\theta - \varphi)) - f_2 \rho) = \\ & 2\pi[(f_1 - f_2)\rho + f_1 \epsilon \cos(\theta - \varphi)] = \\ & 2\pi(f_1 - f_2)\rho + 2\pi f_1 \epsilon \cos(\theta - \varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)中可知, 圆条纹的相位分布在极坐标中是以两光栅的差频为基频的条纹, 而两光栅中心点相对偏移的距离与偏离的角度仅与条纹的初始相位有关. 从式(6)中还可知其初始相位随着圆光栅的角度呈现余弦变化. 两光栅中心点之间的距离与偏离角仅与其初始相位的振幅与相位延迟有关. 当任取一点到光栅中心的距离 ρ 并旋转一周时, 获得的相位值为其初始相位在幅度上偏移. 从获取的相位值的振幅与相位延迟, 可获得两光栅中心点之间的距离与偏离角. 其中,

两光栅中心点的距离可通过式(7)获得.

$$\epsilon = A/2\pi f_1 \quad (7)$$

依据余弦函数的特征, 可知当初始相位取得最大值时相位延迟 φ 即为 θ . 当计算出两光栅中心点之间的距离与偏离角时, 即可获得两光栅在 x 与 y 方向上的相对偏移量 Δx 与 Δy 为

$$\Delta x = \epsilon \cos \varphi \quad (8)$$

$$\Delta y = \epsilon \sin \varphi \quad (9)$$

2 数值模拟

通过数值模拟生成周期分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 的圆形微光栅, 其格式如图 2(a)、(b). 其中, T_1 , T_2 分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$. 并模拟了 $20\times$ 条纹放大镜头, 当两光栅叠加产生一定位移则生成的非对准条纹如图 4(a), 其尺寸设为 256×256 pixel. 由于在图像采集过程中, 不可避免地会受到外界噪音、光路抖动等因素的干扰, 从而影响相位提取准确度, 因此模拟中采用了对其加入均值为 0, 标准偏差为 0.5 的均匀高斯白噪音, 如图 4(b). 我们对噪音条纹图应用文献[4]所述方法提取得到非对准相位图如图 4(c)所示. 其对应的两圆光栅中心的偏移量在 x 方向向左偏离 1.5 个光栅周期.

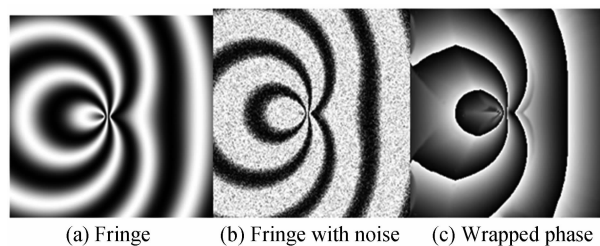


图 4 非对准条纹、噪音条纹与包裹相位

Fig. 4 The fringe of out alignment, the fringe with noise and the wrapped phase

通过对图 4(c)中二维包裹相位沿中心角度旋转一周分别取 ρ 为 40, 50, 60 所得的截断相位为 $\varphi_w(\theta)$, 其分布如图 5(a)所示, 从图可知, 相位 $\varphi_w(\theta)$ 都在 $[-\pi, \pi]$ 内. 图 5(b)显示了相对于截断相位 $\varphi_w(\theta)$ 展开的相位 $\varphi(\theta)$. 从图中可知, 当选择不同的距离 ρ 时, 其展开相位为一组余弦曲线, 所不同的是各曲线的起始值随半径选取不同而变化, 此与前面式(6)理论推导相互印证. 由于两光栅中心点的距离与偏离角都只与初始相位的相位延迟与振幅有关, 与相位的实际分布无具体关系, 因此可选择不同的距离 ρ 进行叠加后平均进行分析. 图 6(a)、(b)、(c)分别为取 30 个半径 ρ 进行叠加平均之后的截断相位、展开后的相位以及进行拟合后的相位. 通过计算可知其振幅为 9.401 8, 两光栅相对偏移为 1.496 3 个光栅周期, 而相位延迟大致为 180° . 从中可知其在 x 方向向左偏离了 1.496 3 个光栅周期. 与理论值相差大约 0.003 7 个光栅周期. 以 $10 \mu\text{m}$

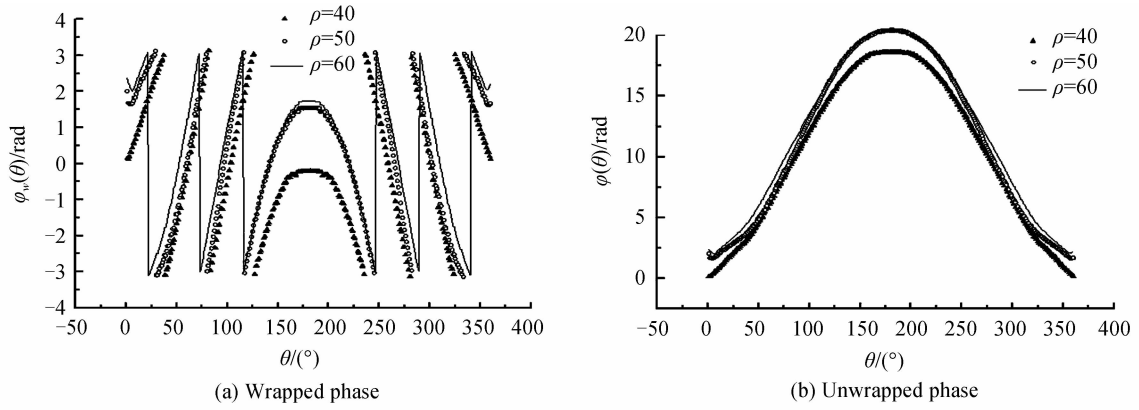


图5 分别取径向半径为40, 50, 60后的截断与展开相位分布纹图
Fig. 5 The wrapped and unwrapped phases with radial radius are 40, 50, 60

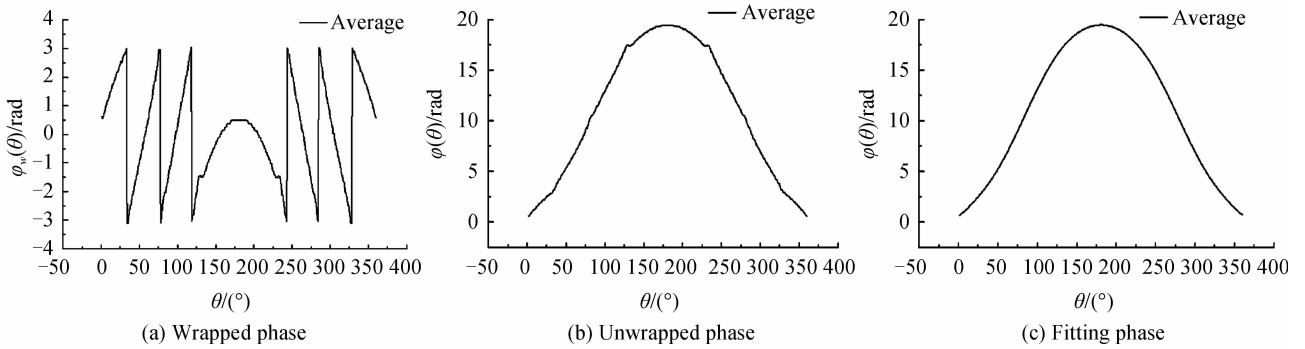


图6 叠加取平均之后的截断相位、展开相位、拟合后相位
Fig. 6 The wrapped, unwrapped and fitting phase after average

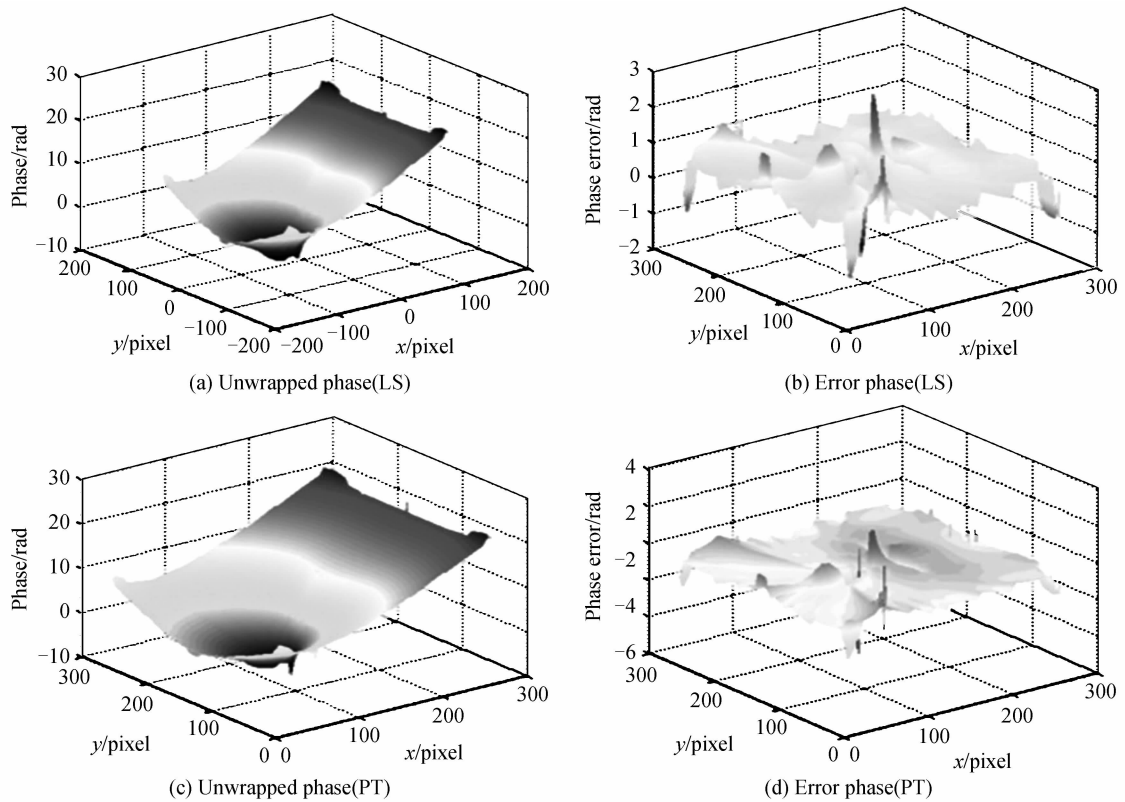


图7 经最小二乘法与路径跟踪法展开后的相位与误差分布图纹
Fig. 7 The unwrapped and error phase distribution with least squares and path tracking method

的光栅周期为例,其位移偏差为 $0.037 \mu\text{m}$. 为了进行对比,我们对数值模拟中如图 3(c)所示的单幅封闭包裹相位分别运用最小二乘法,路径跟踪法进行了相位展开. 最终获得的相位分布与误差分别如图 7 中 (a), (b), (c), (d) 所示. 图 7(a) 为图 3(c) 所示包裹相位经加权最小二乘法展开后的相位分布, 而图 7(b) 为展开的相位与仿真中真实相位的误差分布. 经过计算, 其平均误差为 $0.863 2 \text{ rad}$, 而最大误差为 $2.945 4 \text{ rad}$. 从图中可知条纹的相位展开总体上存在较大误差. 图 7(c) 所示为包裹相位通过在二维小波脊处的瞬时频率为质量图进行引导的路径跟踪法获得的二维展开相位. 而图 7(d) 为展开的相位与仿真中真实相位的误差分布, 经过计算, 其平均误差为 $0.2226 3 \text{ rad}$, 而最大误差为 $4.846 9 \text{ rad}$. 从图中可知条纹的相位展开总体误差较小, 但在边缘与中心部分仍有较大误差, 从而影响偏移量的计算.

3 实验

为了验证相位展开方法在实际应用中的有效性, 依据图 1 所示的对准示意图搭建了实验平台. 图 8(a) 为经掩模上周期为 $4.4 \mu\text{m}$ 的圆光栅与硅片上周期为 $4 \mu\text{m}$ 的圆光栅叠加产生的粗对准圆形莫尔条纹图. 在实验中, 为了便于后期的条纹相位解析处理, 因此, 对所有实验条纹图像通过图像截取使得条纹图大小为 $256 \times 256 \text{ pixel}$. 从图中可看出光学抖动与硅片工艺等对条纹图有部分影响, 但总体成像质量较好. 通过运用文献[4]所述方法对其进行处理后, 获得的包裹相位分布如图 8(b) 所示. 对其运用本文所述的二维相位展开方法, 在极坐标系下不同半径叠加取平均值后获得的截断相位、展开相位与拟合后的相位如图 9(a), (b), (c) 所示. 同时计算出其相位振幅为 12.004 , 相位延迟为 1° . 经计算分析, 其位移偏差大致为 $1.910 5$ 个光栅周期. 从第一章 1.4.3 节粗对准理论模型中可知, 光栅位移偏差半个周期, 将有 1 个条纹穿过圆心, 此实验条

纹图像中大约有 4 个条纹穿过圆心, 即大约有 2 个周期的偏移, 由此可知, 实验与理论相符. 通过计算可得其在 x 与 y 方向的偏移量分别为 $1.910 2$ 个光栅周期与 $0.033 3$ 个光栅周期. 然后通过三维定位台与纳米定位系统移动硅片两个光栅周期(即 $8 \mu\text{m}$)之后采集到图像如图 10(a) 所示. 再运用文献[5]所述方法进行分折, 可得包裹相位图如图 10(b) 所示. 然后, 再通过在极坐标系下对包裹相位不同半径叠加取平均值得到的相位分布如图 11(a) 所示. 理论上若掩模与硅片完全对准时, 所有角度的相位值应该完全相等. 而从图中可看出该相位分布未发生截断情况, 表明硅片相对于掩模已经进入精对准范围内, 但仍然存在一定的偏移. 经过拟合后其相位分布如图 11(b) 所示. 经计算可知, 其相位振幅为 0.7216 , 相位延迟为 178° . 而计算出掩模硅片的相对位移为 $0.114 8$ 个光栅周期. 然后通过相对位移与相位延迟仍然可计算出在 x 和 y 方向上的相对位移分别为 $-0.114 7$ 个光栅周期与 0.004 个光栅周期, 以 x 方向为例, 通过条纹分析其移动 $2.024 9$ 个光栅周期, 与实际位移偏差为 $0.024 9$ 个光栅周期, 即大约 90 nm 的位移偏差. 由此可知经本文方法处理后对准确度能达到几十纳米量级, 若采用更小周期的光栅, 理论上可获得更高的对准准确度.

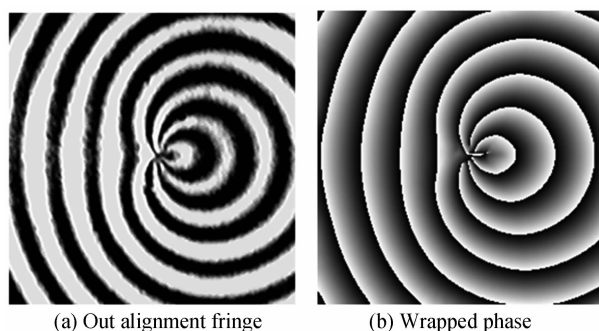


图 8 实验中非对准圆条纹与相位提取后的包裹相位
Fig. 8 The fringe of out alignment and the phase after transform in experiment

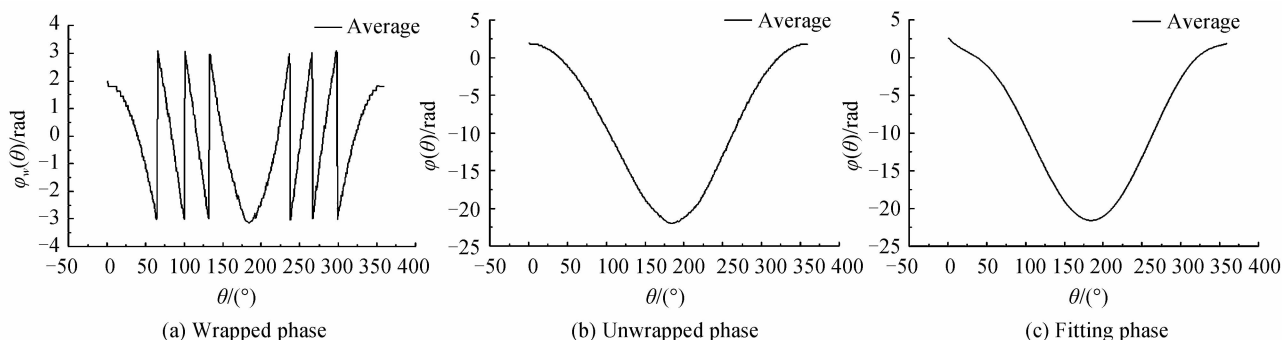


图 9 实验圆条纹包裹相位叠加取平均之后的截断相位、展开后相位、拟合后相位
Fig. 9 The wrapped, unwrapped and fitting phase after average in experiment

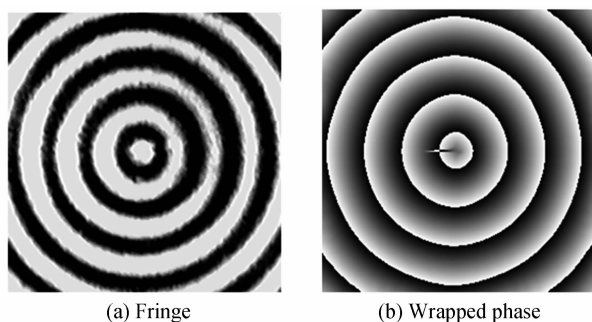


图 10 实验中偏移 2 个光栅周期后圆条纹包裹相位图
Fig. 10 The fringe and the phase with two grating period offset in experiment

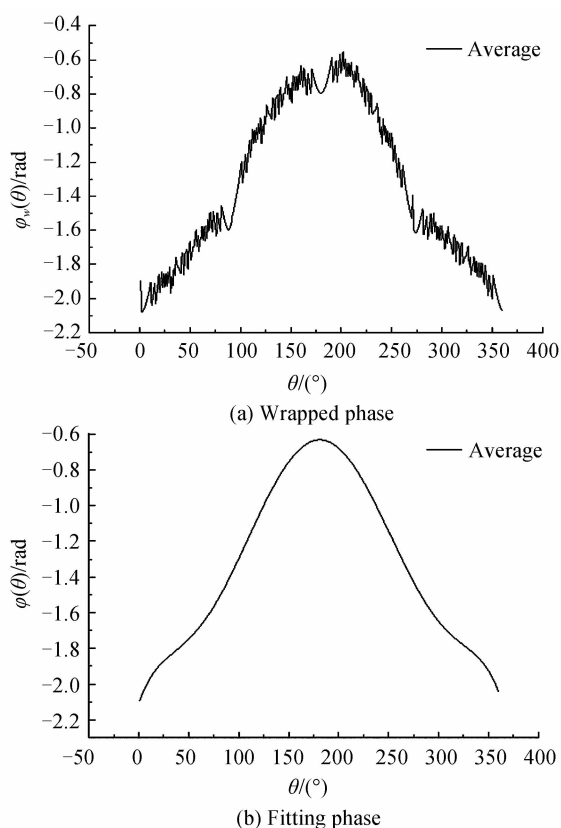


图 11 实验中偏移 2 个光栅周期后叠加取平均之后的包裹相位、拟合后相位

Fig. 11 The wrapped and fitting phase after average with two grating period offset in experiment

4 结论

针对纳米光刻对准中双圆光栅叠加所产生的单幅封闭圆条纹经相位解析后获得的包裹相位,通过极坐标表示其相位分布并取不同径向半径叠加平均后进行相位展开,同时还通过不同的展开相位初始相位振幅与相位延迟获得对准的偏移量.本文对条纹相位的直角坐标表示与极坐标表示进行了理论分析并提出了极坐标系下进行相位展开求取对准偏移量的方法,最终通过数值模拟和实验两方面对该方法进行了验证.从文中可看出,对于单幅的封闭条纹,与传统的最小二乘法与路径跟踪法相比,极坐标系下的相位展开方法能

更好地抑制误差,并且获得高准确度对准.

参考文献

- [1] 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, 2006:61~81.
- [2] ZHOU Shao-lin, FU Yong-qi, TANG Xiao-ping, *et al.* Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(11): 7869-7880.
- [3] ZHOU Shao-lin, TANG Xiao-ping, HU Song, *et al.* Analysis of Moiré pattern of dual gratings alignment in nanometer lithography [J]. *Microfabrication Technology*, 2008, **3**: 13-17. 周绍林,唐小萍,胡松,等. 纳米光刻双光栅对准莫尔条纹分析[J]. *微细加工技术*, 2008, **3**: 13-17.
- [4] ZHOU Shao-lin, YANG Yong, CHEN Wang-fu, *et al.* Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702-706. 周绍林,杨勇,陈旺富,等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 702-706.
- [5] XU Feng, HU Song, ZHOU Shao-lin, *et al.* Interference fringe pattern phase analysis in alignment of nano lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212001: 1-6. 徐锋,胡松,周绍林,等. 光刻对准中干涉条纹相位解析研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2):0212001: 1-6.
- [6] HUANG Bai-sheng, XU Jia-dong. Fast phase unwrapping method for interferometric phase based in new quality-guided[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, **22**(2): 528-531, 541. 黄柏圣,许家栋. 一种基于新质量图引导的干涉相位快速解缠方法[J]. *系统仿真学报*, 2010, **22**(2): 528-531, 541.
- [7] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1994, **11**(1): 107-117.
- [8] LU Yuan-gang, WANG Xiang-zhang, ZHANG Xu-ping. Weighted least-squares phase unwrapping algorithm based on derivative variance correlation map[J]. *Optik*, 2007, **118**(2): 3627-3632.
- [9] ZHANG Xiong, QIAN Xiao-fan. An improvement on the Least-squares phase unwrapping algorithm for under sampled Interferogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 121-125. 张雄,钱晓凡. 欠采样干涉图最小二乘相位解包裹算法改进[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 121-125.
- [10] QIAN Xiao-fan, RAO Fan, LI Xing-hua, *et al.* Accurate Least-Squares phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **29**(2): 0209001, 1-5. 钱晓凡,饶帆,李兴华,等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. *中国激光*, 2012, **29**(2): 0209001, 1-5.
- [11] QIAN Ke-mao, GAO Wen-jing, WANG Hai-xia. Windowed Fourier-filtered and quality-guided phase-unwrapping algorithm[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(29): 5420-5428.
- [12] LI Si-kun, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Reliability-guided phase unwrapping in wavelet-transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(18): 3369-3377.
- [13] CUI Hai-hua, LIAO Wen-he, CHENG Xiao-sheng, *et al.* Mathematic descriptions and analysis of quality weighting factors in phase unwrapping algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 90-104. 崔海华,廖文和,程筱胜,等. 相位展开算法中质量权值的数学描述与分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 90-104.
- [14] WU Yong-hui, CHENG Xiao-sheng, CUI Hai-hua, *et al.* A novel method for 2D phase unwrapping guided by quality cut [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **39**(3): 0308004, 1-6. 吴勇辉,程筱胜,崔海华,等. 基于质量线导向的二维相位展开新方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0308004, 1-6.
- [15] LU Yuan-gang, ZHAO Wan-cheng, ZHANG Xu-ping, *et al.* Weighted-phase-gradient-based quality maps for two-dimensional quality-guided phase unwrapping[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2012, **50**(10): 1397-1404.
- [16] CHEN Ke, XI Jiang-tao, YU Yang-guang. Quality-guided spatial phase unwrapping algorithm for fast three-dimensional measurement[J]. *Optics Communications*, 2013, **294**: 139-147.