

接近式光刻对准中的叠栅干涉测角方法

佟军民^{1,2} 周绍林² 赵立新² 胡松²

(¹ 许昌职业技术学院机电工程系, 河南 许昌 461000)
(² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 干涉测量是众多科学与工程领域广泛采用的精密计量手段。探索了一种方便可控的基于双光栅衍射的叠栅干涉相敏测角方法,可直接用于接近式光刻过程中掩模衬底的倾斜矫正及面内角调节,便于微纳器件及微光电子系统集成等相关应用。本方法旨在分别利用双光栅多次衍射产生的对称与相似级次,实现 $(m, -m)$ 级叠栅干涉与 $(m, 0)$ 级叠栅干涉,产生相位与二者相对倾斜角、面内角有关的场分布。分析推导了叠栅干涉测角的基本原理,然后介绍相应的 $(m, -m)$ 级与 $(m, 0)$ 级干涉测角方案设计。具体而言,二者均类似地根据条纹偏转及频率变化分别以离轴与同轴的方式监测倾斜及面内偏转角度。设计相应的组合光栅标记进行实验验证。实验结果及分析表明,倾斜角与面内角的调节精度分别可达 10^{-3} rad 及 10^{-4} rad。

关键词 测量;干涉测量;叠栅技术;微细加工;光刻

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1208001

Angular Measurement Using Moire Interferometry for Alignment of Proximity Lithography

Tong Junmin^{1,2} Zhou Shaolin² Zhao Lixin² Hu Song²

¹ Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xuchang Vocational College, Xuchang, Henan 461000, China

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Interferometry is among the widely-used precise metrologies in varieties of science and engineering fields. An easy-to-control moire interferometric angular measurement method based on multi-diffraction of dual gratings is proposed, to facilitate tilt remediation and in-plane angle adjustment between mask and substrate in proximity lithography, as well as related applications in micro/nano devices and micro-optoelectronics system etc. This method aims to take advantages of symmetric and similar orders generated from dual-gratings diffractions to realize the $(m, -m)$ and $(m, 0)$ interferometry, in which fields with phase distribution associated with tilt and in-plane angle are formed. The fundamental of presented moire interferometry is derived in detail and related schemes of $(m, -m)$ and $(m, 0)$ interferometric measurement are introduced. Specifically, both schemes monitor the tilt and in-plane angle according to the fringe deflection and frequency variation in an on-axis and off-axis manner respectively. Corresponding composite gratings are designed for experimental verification. Experimental and analytical results indicate that the tilt and in-plane angle can be adjusted with an accuracy below 10^{-3} rad and 10^{-4} rad, respectively.

Key words measurement; interferometry; moire techniques; micr-fabrication; lithography

OCIS codes 120.4120; 120.3180; 220.4000; 220.3740

1 引言

平面间的高精度角度测量在众多微纳米科学与技术应用中扮演着重要角色。特别地,当前众多微

纳米加工技术如传统光学光刻、纳米压印、X射线光刻等^[1-2],仍作为多种微纳米器件及结构的主要加工手段,如软光刻过程中的模板制作^[3]、片上芯片结

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61376110, 61274108)

作者简介: 佟军民(1969—),男,硕士研究生,副教授,主要微电子专用设备技术方面的研究。E-mail: tjmtx@126.com

导师简介: 胡松(1965—),男,博士,研究员,主要从事微电子专用设备技术方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

构图形化^[4-5]、微光学元件以及光子晶体结构的
光学加工^[6-7]等。而其中至关重要的环节之一就是掩
模沉底对准过程中的高精度角度调节,包括相对掩
模硅片倾斜消除(即调平)、面内旋转角调节等角度
测量过程,直接决定最终器件结构特征尺寸的高精
度与高质量加工。

干涉测量技术一直作为众多领域的精密计量手
段,如激光或数字散斑干涉术^[8]、轮廓术与表面测
量^[9-10]、全息术及波前测量^[11-13]等。而在接近式或
投影式光刻系统中,基于干涉测量的精密计量技术
更是得到深入的应用。例如,在 X 射线光刻系统
中,早期研究者通过探测同周期标记光栅对称衍射
光的干涉强度,实现基于激光干涉的对准位置检
测^[14];为进一步提高抗干扰能力及测量精度,有人
提出通过检测拍信号相位实现位移调节的双频激光
干涉方法^[15]。类似的干涉测量技术也应用 ASML
(世界最大光刻机公司)投影光刻系统的对准传感
器,如同轴对准(TTL)以及高级次增强对准技术
(ATHENA)^[16-18],即收集通过曝光镜头的首次衍
射对称级次(± 1 级或者更高级次),通过另一光栅
产生周期干涉信号实现位置检测。最近,有研究人
员提出一种干涉空间相位成像的方法实现对准点检
测,并用于波带片阵列光刻及扫描探针刻蚀过
程^[19]。总体而言,所有的这些方法都是旨在极大地
利用干涉测量的高精度优势。相比之下,基于拍信
号相位检测的双频激光干涉方法可实现较高的探测
灵敏度;基于空间相位成像的方法在平衡精度、复杂
度以及抗干扰能力等方面展现了更优越的性能,可
实现比基于干涉强度方法更高的测量精度。尽管如
此,极少的研究直接针对光刻掩模硅片对准过程
中平面间的角度矫正,而且以上方法涉及的角度校
准一般都需要通过复杂多步骤的三点对准过程实
现。

有鉴于此,本文深入讨论一种适用于接近式光
刻的叠栅干涉测量方法,重在突出该方法可在平衡
复杂度与精度的前提下,直接监控掩模硅片对准及
调平过程中的角度偏差,主要包括面内旋转角及倾
角矫正。前期工作中,从原理分析及实验论证的角
度,证实了类似的叠栅测量方法在掩模硅片对准、

间隙测量等应用中的高灵敏度和低复杂度特点^[20-22]。
本文进一步利用其便于角度调节的优势,充分证实
其在接近式光刻对准及相关的角度调节应用中的灵
活性与高灵敏度特点。首先在以前工作基础上,更
为系统地分析该叠栅干涉测量方法的基本原理,进
而设计提出具体的角度测量方法,最后通过实验进
行分析验证。

2 基本原理

通常,两个光栅重叠将在其表面引发多次衍射,
产生系列衍射波分量相互叠加形成某种无序分布。
一般将经过第一个光栅处发生 m 级衍射、第二个光
栅发生 n 级衍射的分量称为 (m, n) 次谐波,如图 1
所示,因此所有谐波分量叠加最终决定双光栅衍射
后的场分布,即

$$E(x, y) = \sum_{m, n} A_m B_n \exp\{i2\pi[mf_1 G_1(x, y) + nf_2 G_2(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 A_m 、 B_n 表示光栅的傅里叶系数, f_1 、 f_2 分别
为基频(周期的倒数), $G_1(x, y)$ 、 $G_2(x, y)$ 表示与
光栅几何面形有关的透射系数。一般的线光栅情况
下,该透射系数为关于 x 、 y 的一次式。

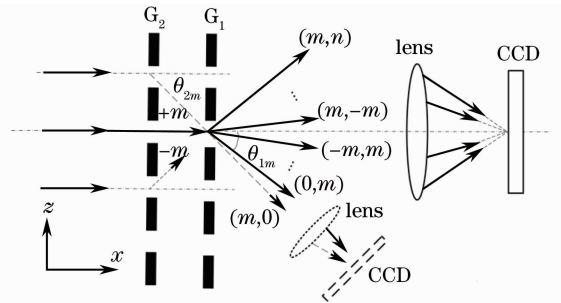


图 1 双光栅重叠多次衍射及特殊级次成像示意图
Fig. 1 Multi-diffraction of superposed dual gratings
and imaging of special diffraction orders

实际情况中,当两个光栅周期接近时,对称衍射
级 $(m, -m)$ 和 $(-m, m)$ 以很小的夹角近似地沿
着光栅的法线出射,从而使更多高级次分量被轴上
物镜接收,并在 CCD 像面干涉形成周期规律的分布,
如图 1 中所示。因此,假设所有 $(m, -m)$ 、 $(-m,$
 $m)$ 参与成像,则相应的场分布可表示为

$$E_{(m, -m)}(x, y) = \sum_m A_m B_{-m} \exp\{i2\pi m[f_1 G_1(x, y) - f_2 G_2(x, y)]\} = A_0 B_0 + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} A_m B_{-m} \cos\{2\pi m[f_1 G_1(x, y) - f_2 G_2(x, y)]\}, \quad (2)$$

式中 $A_{(m,-m)} = A_m B_{-m}$ 为两光栅谐波系数的乘积,且假设光栅具有理想对称性,即 $A_{(m,-m)} = A_{(-m,m)}$ 。在线光栅重叠情况下,透射系数 $G_1(x,y), G_2(x,y)$ 为一次式,(2)式可进一步简化为

$$E_{(m,-m)}(x,y) = A_0 B_0 + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} A_{(m,-m)} \cos\{2\pi m(\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2) \cdot \mathbf{X}\}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ 为两光栅的频率矢量,表征两线光栅的排列方向以及空间频率, $\mathbf{X} = (x, y)$ 表示二维坐

标。可见,各次对称谐波分量干涉叠加产生的强度分布将是一系列正余弦条纹,其频率矢量为 $\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2$, 表征条纹的排列方向及空间频率,与光栅排列相似。

类似地, $(m,0), (0,m)$ 表示另一组经其中一光栅 G_1 (或 G_2) 发生 m 级衍射、经另一光栅 G_2 (或 G_1) 发生零级衍射并以近似相等角度出射的特殊级次衍射分量,由于两光栅周期接近,两束光以近似相同的衍射角出射,易于被长工作距离、低 NA 物镜接收成像于 CCD 像面,如图 1 所示。根据(1)式, $(m,0), (0,m)$ 两束光的干涉场分布不难得出

$$E_{(m,0)}(x,y) = A_m B_0 \exp[i2\pi m f_1 G_1(x,y)] + A_0 B_m \exp[i2\pi m f_2 G_2(x,y)], \quad (4)$$

化简得到其干涉强度分布为

$$I_{(m,0)}(x,y) = |E_{(m,0)}(x,y)|^2 = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos\{2\pi m[(\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2) \cdot \mathbf{X}] + \varphi_0\}, \quad (5)$$

式中 $I_1 = (A_m B_0)^2, I_2 = (A_0 B_m)^2$ 表示两束光的强度, φ_0 表示初始相位差。可见,(5)式表示 $(m,0), (0,m)$ 的干涉场分布与 $(m,-m), (-m,m)$ 衍射组干涉结果类似,干涉条纹的频率矢量(即排列方向与频率或周期)直接取决于原光栅的频率矢量。因此,这两种干涉过程均以相似的规律将面内角度关系(即光栅的排列方向)直接反映于最后的条纹相位分布中,任意角度偏差将直接引起条纹的排列方向与周期变化,即频率矢量变化,这就是本文叠栅干涉测角的基本原理。为方便后文引用,将前者称为 $(m,-m)$ 级叠栅干涉,后者称为 $(m,0)$ 级叠栅干涉。

3 应用方案

通常,掩模硅片对准需要在消除对准偏差之前,首先对二者进行充分的角度校准,包括消除掩模硅片倾斜、调整掩模硅片面内旋转角。本文主要讨论如何在实际的掩模硅片对准过程中,通过叠栅干涉

测量实现面内角及倾斜角的校准。

3.1 倾斜角消除

值得注意的是,消除相对倾斜实现掩模衬底调平,是实际间隙及面内角调整、掩模衬底对准等过程之前保证二者平行度的首要任务。如图 2 所示,此处采用一种反射式 $(m,0)$ 级叠栅干涉实现倾斜角矫正。为避免横向位移对干涉结果的影响,两个标记光栅均设置于掩模上。准直激光束通过分光镜及反射镜以特定角度入射标记光栅表面,分别来自周期近似相等光栅 G_1, G_2 的同级衍射光(通常是 1 级衍射) B_1 与 B_2 , 在 G_2 的表面以近似相等的角度衍射返回。其中,光束 B_1 或 B_2 等于相应光栅的利特罗角,即来自左边光栅 G_1 的光束 B_1 经过衬底反射后,透过光栅 G_2 与 B_2 几乎同方向出射,从而便于被长工作距离、低数值孔径的物镜接收,最后干涉成像于 CCD 像面。由于最后干涉场实际是由两光栅的 +1 级衍射形成,与前面所述的 $(m,0)$ 级干涉原理

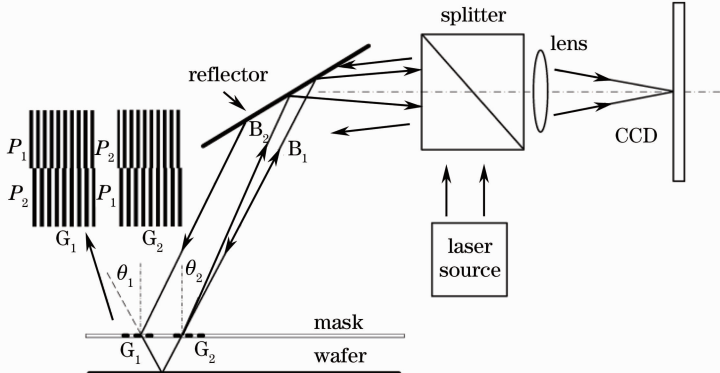


图 2 掩模衬底对准过程中的 $(m,0)$ 级叠栅干涉调平方案示意图

Fig. 2 Scheme of $(m,0)$ interferometry for leveling in the mask-sustrate alignment process

类似,此处称为(1,0)级叠栅干涉。由于衬底面内角、横向位移变化不会对结果产生影响,从而便于单独实现倾斜量检测。

如图2所示,其具体过程可解释为,其中一束衍射光(左侧光栅)通过衬底反射后透过第二个光栅表面,与该光栅的同级次反射衍射光几乎同方向返回发生干涉,衬底的任意倾斜将直接改变光束偏转方向(对应光栅的频率矢量),从而改变干涉场的相位分布,即干涉条纹的分布方向以及空间频率,如(2)式中所示。

进一步分析光束偏转空间关系与干涉场相位变化,以图2中上半部左右周期分别为 P_1 、 P_2 的光栅为例,如图3所示,衬底偏转致使来自周期 P_1 光栅的衍射光 B_1 偏转为 B'_1 ,继而导致表征原来沿 x 轴方向的频率矢量 F (以及条纹分布方向)偏转致 F' 。方便起见,将偏转角分解至横截面 ZOX 与纵截面 ZOY 两个方向。当衬底在 ZOX 及 ZOY 方向分别偏转 $\delta\theta$ 、 $\delta\varphi$ 时,则光束 B_1 在两个方向相应地偏转 $2\delta\theta$ 、 $2\delta\varphi$,如图3中 B'_1 所示,根据其中矢量几何关系,式(5)中所示干涉场的频率矢量可重新表示为

$$F' = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\tan(\theta_1 + 2\delta\theta)}{\sqrt{1 + \tan^2(\theta_1 + 2\delta\theta) + \tan^2 2\delta\varphi}} - \sin \theta_2, \frac{\tan 2\delta\varphi}{\sqrt{1 + \tan^2(\theta_1 + 2\delta\theta) + \tan^2 2\delta\varphi}} \right]. \quad (6)$$

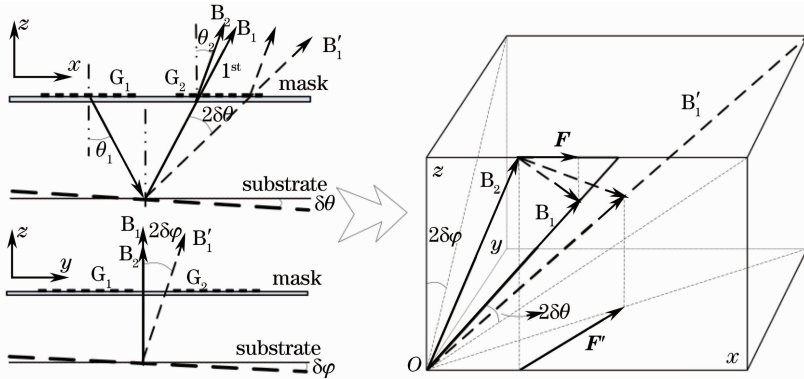


图3 衬底偏转导致光束偏转及干涉场频率矢量变化示意图

Fig. 3 Light beam deflection induced by substrate tilt and frequency variation of the interference field

可见,(6)式表明,衬底相对于掩模的任意倾斜将直接改变该频率矢量的方向角及幅度,从而改变干涉场的相位分布。特别地,由于一般情况下两个方向上的倾斜角均较小,横截面分量 $\delta\theta$ 主要引起频率变化,而纵截面分量 $\delta\varphi$ 主要导致条纹偏转。因此,当采用图2中所示的差动组合光栅标记时,来自左边上下半部分光栅的衍射光经过衬底反射分别透过右边上下半部光栅,衬底倾斜将引发上下半部条纹以相反的模式偏转或频率变化(频移)。

3.2 面内角矫正

当掩模衬底以特定间隙调平以后,面内角矫正则是消除对准偏差前的最后一步。根据第2部分基本原理所述,由于 $(m, -m)$ 级叠栅干涉是由对称级次衍射光产生,对掩模衬底间隙变化不敏感,便于面内旋转角矫正。其与 $(m, 0)$ 级叠栅干涉不同之处在于入射角及标记光栅的分布,如图4所示,激光束经分光、反射后垂直入射分别位于掩模与衬底的重叠光栅,然后通过反射式装置接收 $(1, -1)$ 及 $(-1, 1)$ 级衍射光产生干涉条纹。同时,复合标记采用与图

3种类似的组合光栅,面内角度偏差将导致两组光栅以相反方向发生相对偏转,产生两组差动条纹,使探测灵敏度加倍并且利于互相参照计算,如图4中模拟条纹所示。因此,该设计通过与前面消除倾斜角类似的机制,即掩模衬底之间的任意面内偏转角将引起两组条纹发生相反的偏转,通过条纹的相位分布即可监视并调整面内偏转角度。

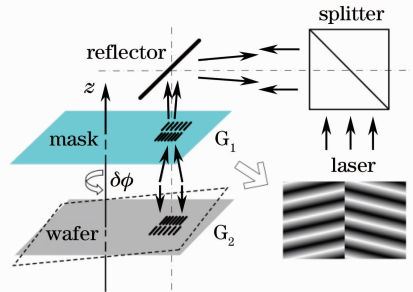


图4 掩模衬底对准过程中的面内角矫正示意图

Fig. 4 Illustration of in-plane angle adjustment in the mask-substrate alignment process

假设衬底相对于掩模的面内偏转为 $\delta\phi$,并且两组光栅产生条纹的频率矢量分别为 F_1 、 F_2 ,根据(1)

式,条纹频率矢量不难推导为

$$\mathbf{F}_1 = f_1 \exp(i\delta\phi) - f_2, \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_2 = f_1 - f_2 \exp(i\delta\phi). \quad (8)$$

两组条纹的角度差可进一步推导为

$$\Delta\phi_f = \arctan\left(\cot \delta\phi - \frac{f_1}{f_2} \csc \delta\phi\right) + \arctan\left(\frac{f_2}{f_1} \csc \delta\phi - \cot \delta\phi\right). \quad (9)$$

显然,根据(9)式结果,掩模与衬底之间的面内角度偏差可直观地反映为两组条纹的相对偏转,并且偏转角 $\Delta\phi_f$ 直接由面内角度偏差 $\delta\phi$ 决定,由此实现面内角度偏差矫正。

4 结果与讨论

为证实本次所述叠栅干涉测角方法的可行性及在光刻对准过程中的应用,按照第3部分所述的方案搭建了对准系统平台,并展开相应角度调节实验。实验系统中主要采用了一个 633nm 半导体激光器、倍率 $\times 8$ 工作距离 110 mm 的镜头以及一个像素宽度为 8.3 μm 的 WAT902H CCD。

在利用(1,0)级叠栅干涉实现掩模衬底(硅片)倾斜校准的实验中,通过 X 射线光刻制作周期分别为 $P_1=1 \mu\text{m}$ 、 $P_2=1.1 \mu\text{m}$ 的光栅,并利用二者设计成如图 2 种所示组合光栅标记,上下半部光栅分别对应原理中所述 G_1 、 G_2 部分,最终形成上下两组叠

栅干涉条纹,上半部分条纹由右上部分光栅(周期为 P_2)的反射衍射与经硅片反射的左上部分光栅(周期为 P_1)衍射形成,而下半部分条纹则由右下部分光栅(周期为 P_1)衍射与左下部分光栅(周期为 P_2)衍射以相反模式形成。因此,上下两组条纹随倾斜变化直接产生相反偏转及频移,使探测灵敏度加倍。

图 5、6 分别为倾斜矫正过程中的几组仿真分析与实验结果。其中,图 6 中实验图像对应了组合标记 4 个部分,右半部分为对应的叠栅干涉条纹,左半部分为倾斜状态下衬底反射引起的等厚干涉条纹,同样可在本实验中用于粗略调节。如前面分析所述,当掩模衬底在横、纵两个截面方向均存在某倾斜量时,将同时改变最后叠栅干涉条纹的偏转及频移,即上下两组条纹频率变化与偏转方向相反,如图 5(a)中分析计算与图 6(a)中实验结果所示,上下条纹以不同的频率(周期)相对偏转。当掩模衬底的横截面倾斜消除,只存在纵截面方向分量时,上下部分叠栅干涉角度相同,两组条纹频率(周期)完全一致,仅存在不同方向的偏转,如图 5(b)及图 6(b)所示。同样,当掩模衬底的纵截面倾斜消除,只存在横截面方向分量时,对应上下部分光栅衍射只在横截面方向发生偏转,上下两组条纹产生反方向频移,并且排列一致不发生偏转,如图 5(c)与图 6(c)所示。最后,当掩模衬底完全调平,两个方向的倾斜角均消除

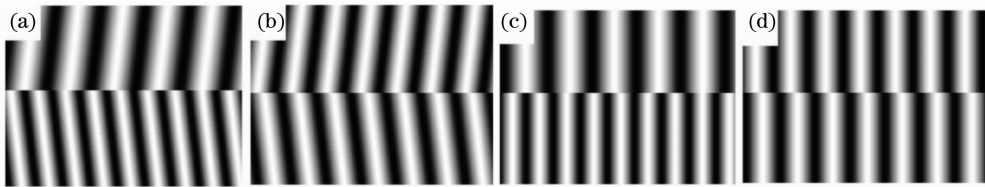


图 5 掩模衬底倾斜矫正过程中几组分析计算结果。(a) 横、纵截面倾斜同时存在; (b) 仅纵截面倾斜; (c) 仅横截面倾斜; (d) 无倾斜

Fig. 5 Analytical results in the mask-substrate tilt angle adjustment. (a) Tilts exist in both cross and longitudinal section; (b) tilt exists only in the longitudinal section; (c) tilt exists only in the cross section; (d) no tilts exist

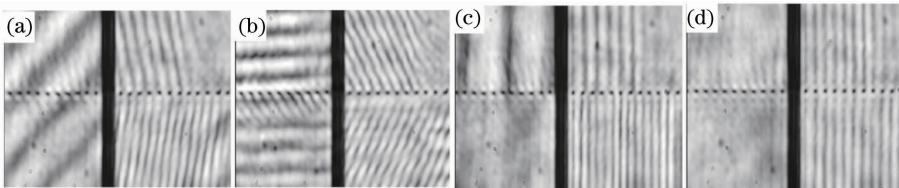


图 6 掩模衬底倾斜角正实验过程中的几组叠栅干涉条纹。(a) 横、纵截面倾斜同时存在; (b) 仅纵截面倾斜; (c) 仅横截面倾斜; (d) 无倾斜

Fig. 6 Several groups of moire fringes recorded in the mask-substrate tilt remediation experiment. (a) Tilts exist in both cross and longitudinal section; (b) tilt exists only in the longitudinal section; (c) tilt exists only in the cross section; (d) no tilts exist

后,两组条纹以相同的频率一致排列。整体过程,分析计算与实验结果保持完全一致。根据(6)式,可分别得到上下两组条纹的频率矢量,得到两组条纹频率差及相对偏转可近似推导如下:

$$\Delta f = \frac{2\delta\theta}{\lambda} \cdot (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \quad (10)$$

$$\Delta\theta \approx \arctan\left(\frac{\cos \theta_1 \tan 2\delta\varphi}{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}\right) + \arctan\left(\frac{\cos \theta_2 \tan 2\delta\varphi}{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}\right), \quad (11)$$

因此,实验过程中可通过等厚干涉条纹实现粗略定性地调节,再配合叠栅干涉条纹定量地矫正掩模衬底间的倾斜角,实现二者调平。倾斜量消除后,下一步实验进行了掩模衬底面内扭转角调节。首先在前面系统基础上分别设计加工了另外两组周期接近的光栅 $P_1=4 \mu\text{m}$ 、 $P_2=4.4 \mu\text{m}$ 以及 $P_1=8 \mu\text{m}$ 、 $P_2=10 \mu\text{m}$ 分别组成标记,其布局如图 4 种所示,上下标记分别以相反方向设置于掩模及衬底之上。除(1,-1)级叠栅干涉按前面所述方式用于面内角调节外,(1,0)级叠栅干涉矫正也得到验证。值得一提的

是,倾斜消除后,掩模衬底之间的间隙变化会继续引起干涉场相移(即条纹平移),并由泰伯效应导致条纹呈周期性的模糊和清晰,但只要调节间隙至泰伯距离处实现干涉条纹清晰成像,便不影响面内角度矫正。图 7 分别为由前面所述两组光栅组成的复合标记对应的实验结果,其中图 7(a)~(c)为周期为 $P_1=4 \mu\text{m}$ 、 $P_2=4.4 \mu\text{m}$ 对应的(1,-1)级叠栅干涉条纹,图 7(d)~(f)为周期为 $P_1=8 \mu\text{m}$ 、 $P_2=10 \mu\text{m}$ 对应的(1,0)级叠栅干涉条纹。由前面推导不难知道,当面内角度被完全矫正后,两组条纹的周期($P=1/|f_1-f_2|=P_1P_2/|P_1-P_2|$)分别为 $44 \mu\text{m}$ 及 $40 \mu\text{m}$ 较为接近,这一点从实验结果中可看出。此外,图 7(a)表示某面内角偏差引起两组条纹相对偏转,图 7(b)为面内角偏差减小后条纹偏转随之被适当矫正后的结果,图 7(c)两组条纹排列一致,表明面内角初步得到矫正。同样,图 7(d)、(e)中两组条纹偏转方向相反,分别表明面内角偏差方向相反,图 7(f)则表示(1,0)级叠栅干涉下面内角得到较理想矫正后的结果。

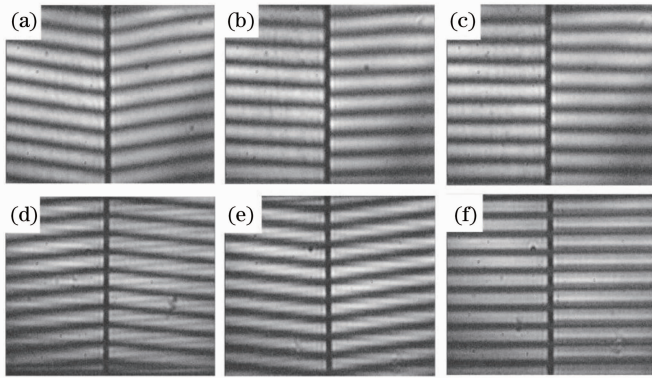


图 7 掩模衬底面内矫正实验结果。(a)~(c) 周期为 $P_1=4 \mu\text{m}$ 、 $P_2=4.4 \mu\text{m}$ 光栅的(1,-1)级叠栅干涉条纹;
(d)~(f) 周期为 $P_1=8 \mu\text{m}$ 、 $P_2=10 \mu\text{m}$ 光栅的(1,0)级叠栅干涉条纹

Fig. 7 Results of the mask-substrate in-plane angle adjustment experiment. (a)~(c) the (1,-1) moiré interference fringes by gratings with periods of $P_1=4 \mu\text{m}$ and $P_2=4.4 \mu\text{m}$; (d)~(f) the (1,0) moiré interference fringes by gratings with periods of $P_1=8 \mu\text{m}$ and $P_2=10 \mu\text{m}$

分析及初步的手动调节实验证实,倾斜矫正角分辨率及面内角检测灵敏度分别优于 10^{-3} rad 及 10^{-4} rad 。此外,当掩模衬底的相对倾斜及面内偏转被消除后,本文所述(1,-1)及(1,0)级叠栅干涉还可分别进一步用于对准偏差监测及间隙测量,即在(1,-1)叠栅干涉中掩模衬底的横向偏差或在(1,0)级叠栅干涉中掩模衬底间隙,均将引起对应的两列平行条纹产生反向相移,将位移转化为相移,具体在前面工作中已有报道,此处不赘述。

5 结 论

平面间高精度的面内角或倾斜角检测是微纳米加工及小型化光电子器件等集成领域的重要基础。本文提出了一种适用于接近式光刻系统的叠栅干涉测角方法,旨在方便可控地用于掩模衬底对准及调平过程中的倾斜角及面内角矫正,可方便扩展应用至相关的微器件制作与集成工艺过程。具体通过双光栅多次衍射引起的对称或相似级次实现叠栅干涉,产生与两光栅所在平面之间的相对倾斜、面内偏

转角有关的相位分布,继而通过条纹分布方向、频率等特征实现角度检测。具体而言, $(m, -m)$ 干涉以同轴的方式使对称级次以相似角度沿着出射干涉, $(m, 0)$ 以离轴的方式使两束光以近似角度偏离光栅法线出射干涉,二者以相似机理产生随倾斜、面内偏转发生相位变化的场分布。原理上,两者可同时用于横向位移及角度检测,但分析及实验证明, $(m, 0)$ 干涉方案更适宜于倾斜矫正,因为该过程可利用等厚干涉实现初步调节,再结合叠栅干涉实现精细调节,而同轴的 $(m, -m)$ 干涉方案更适宜于倾斜矫正后的面内角检测,可避免后续横向对准偏差测量过程中间隙变化等不确定因素的影响。最后实验证实,本文提出的叠栅干涉测角方案可方便可控地实现微加工及微器件制作过程中的倾斜角与面内角偏差检测,并可进一步调节消除至 10^{-3} rad 与 10^{-4} rad量级以内。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Lithography Micromachining Technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 162-165.
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. 162-165.
- 2 Liu Ming, Chen Baoqin, Xie Changqing, *et al.*. Application of micro/nanofabrication on micro/nano electrical devices [J]. Physics, 2006, 35(1): 47-50.
刘明, 陈宝钦, 谢常青, 等. 微纳加工技术在微纳电子器件领域的应用[J]. 物理, 2006, 35(1): 47-50.
- 3 George M Whitesides, Emanuele Ostuni, Shuichi Takayama, *et al.*. Soft lithography in biology and biochemistry[J]. Annu Rev Biomed Eng, 2001, 3: 335-373.
- 4 Scharnweber T, Truckenmüller R, Schneider AM T, *et al.*. Rapid prototyping of microstructures in polydimethylsiloxane (PDMS) by direct UV-lithography[J]. Lab Chip, 2011, 11(7): 1368-1371.
- 5 Weiqiang Chen, Raymond H W Lam, Jianping Fu. Photolithographic surface micromachining of polydimethylsiloxane (PDMS)[J]. Lab Chip, 2012, 12(2): 391-395.
- 6 Y Zhang, N Gao, C Xie. Using circular Damman gratings to produce impulse optic vortex rings[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(4): 041107.
- 7 Yao P, Schneider G, Prather D, *et al.*. Fabrication of three-dimensional photonic crystals with multilayer photolithography [C]. SPIE, 2005, 5720: 27-35.
- 8 D J Chen, F P Chiang. Computer-aided speckle interferometry using spectral amplitude fringes[J]. Appl Opt, 1993, 32(2):

- 225-236.
- 9 P J Caber. Interferometric profiler for rough surfaces[J]. Appl Opt, 1993, 32(19): 3438-3441.
- 10 J C Wyant. Computerized interferometric surface measurements [J]. Appl Opt, 2013, 52(1): 1-8.
- 11 J C Wyant, V P Bennett. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 12 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪峰, 闫锋, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.
- 13 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang, *et al.*. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江, 等. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612003.
- 14 D C F, H I Smith. A new interferometric alignment technique [J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(7): 426-428.
- 15 Junji Itoh, Toshihiko Kanayama, Nobufumi Atoda, *et al.*. An alignment system for synchrotron radiation x-ray lithography[J]. J Vac Sci Technol B, 1988, 16(6): 409-412.
- 16 G Bouwhuis, S Wittekoek. Automatic alignment system for optical projection printing [J]. Electron Devices, IEEE Transactions, 1979, 26(4): 723-728.
- 17 G Pugh, M Giorgi. Evaluation of ASML ATHENA alignment system on intel front-end processes [C]. SPIE, 2002, 4689: 286-294.
- 18 Li Guang, Zhu Jiangping, Chen Mingyong, *et al.*. Novel coaxial focusing method based on interference [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208005.
李光, 朱江平, 陈铭勇, 等. 基于干涉的同轴检焦新方法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208005.
- 19 Moon, Euclid E, Chen Lynn, Everett Patrick N, *et al.*. Interferometric-spatial-phase imaging for six-axis mask control [J]. J Vac Sci Technol B, 2003, 21(6): 3112-3115.
- 20 Zhou Shaolin, Tang Xiaoping, Hu Song, *et al.*. Analysis of moire pattern of dual gratings alignment in nanometer lithography [J]. Opto-electronic Engineering, 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.
- 21 Ma Ping, Zhou Shaolin, Hu Song, *et al.*. The analysis of moiré fringes and application on the alignment of lithography[J]. Opto-electronic Engineering, 2010, 37(7): 102-106.
马平, 周绍林, 胡松, 等. 莫尔条纹分析及其在光刻对准中的应用[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 102-106.
- 22 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Fuwang, *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.

栏目编辑:何卓铭