

文章编号: 0253-2239(2009)03-0702-05

基于双光栅的纳米测量方法

周绍林^{1,2} 杨 勇^{1,2} 陈旺富^{1,2} 严 伟¹ 马 平¹ 蒋文波^{1,2} 胡 松¹ 唐小萍¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 针对两个物体或平面的相对位移和间隙的纳米级变化量, 提出并研究了一种光栅测量方法。采用两组周期接近的微光栅重叠可以产生一组周期分布的条纹, 条纹的周期相对于两光栅周期被大幅度放大, 并将光栅间的位移反应在条纹的相位信息中。建立了关于双光栅产生叠栅条纹的复振幅分布的近似理论模型。基于该模型设计了一种能够测量两个平行平面相对位移和间隙的方法。针对光栅移动产生相应条纹的过程进行了数值计算。结果表明, 两个平行平面的相对微位移将引起相应条纹的大位移, 并且该方法最终能在纳米级以内分辨两平面(物体)的相对位移或者间隙变化量。

关键词 纳米测量; 光栅; 干涉; 叠栅条纹

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0702

Dual-Grating-Based Nanometer Measurement

Zhou Shaolin^{1,2} Yang Yong^{1,2} Chen Wangfu^{1,2} Yan Wei¹ Ma Ping¹ Jiang Wenbo^{1,2}
Hu Song¹ Tang Xiaoping¹

(¹ Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy Of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy Of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract In order to measure the variation of displacement or gap of two parallel planes in nanometer level, a grating-based metrology was brought forward and researched. Two superposed micro-gratings with slightly different periods were adopted to generate a set of periodic moiré fringes, the period of which was hugely magnified with regard to that of two gratings. And the relative displacement of gratings was encoded in the phase of fringes. Firstly, an approximate theoretical model about distribution of complex amplitude of fringes of two gratings was built. Then, a method of measuring in-plane displacement and gap of two parallel planes was designed on the basis of this model. Finally, numerical computation about the process of movement of two gratings to generate corresponding fringes was performed. The results show that a small relative displacement of two gratings leads to a large displacement of corresponding fringes and this method can resolve the variation of displacement or gap of two parallel planes within nanometer.

Key words nanometer measurement; gratings; interference; moiré fringes

1 引 言

纳米测量作为纳米科技的基础, 涉及到微电子、材料科学等领域, 如材料特性检测、成分分析、微纳加工、纳米驱动等。传统上主要采用迈克耳孙激光干涉仪等干涉方法实现纳米级测量和定位^[1~4]; 不但对激光光源稳定性和环境要求较高, 而且测量系统结构比较复杂、体积庞大。随着光栅加工技术的发展, 出现了基于高精度高线数光栅的干涉测量技

术^[5~8]。事实证明, 基于光栅干涉条纹的纳米测量方法具有精度高、易实现等优越性^[9]。

本文提出一种新的基于双光栅的纳米测量方法, 将两个平面(物体)之间的纳米级相对位移反映在光栅叠栅条纹的相位信息中, 具有精度高、稳定性好等特点, 在诸多领域如光刻对准中具有广泛的应用空间。主要从傅里叶光学角度建立双光栅纳米测量的近似理论模型, 再针对纳米级位移测量设计了

收稿日期: 2008-05-30; 收到修改稿日期: 2008-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(60706005, 60776029)和国家 863 计划(2006AA03z355)资助课题。

作者简介: 周绍林(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事微纳加工相关技术方面的研究。E-mail: xiangyayong@163.com

导师简介: 胡 松(1965-), 男, 博士, 研究员, 主要从事微电子总体专用设备方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

具体实现方案。在数值仿真的基础上,从理论上验证了结合传统的条纹细分、特征提取等手段,能够实现纳米甚至亚纳米级的位移分辨力。

2 双光栅测量模型

根据不同的透射系数,光栅可分为矩形光栅、正弦光栅等。一般地,周期为 T 、栅缝宽度为 d 、栅线沿 x 轴方向排列的矩形光栅透射系数可表示为^[10]

$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x-nT}{d}\right), \quad (1)$$

根据傅里叶光学理论,单位振幅平面波透过光栅后,在栅后的衍射波分布可以看作一系列不同传播方向对应于不同空间频率的各次谐波的线性叠加。即对(1)式作傅里叶分解

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(f) \exp(i2\pi fx) df = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp(i2\pi n f_0 x), \quad (2)$$

其中, $a_n = df_0 \text{sinc}(ndf_0)$, $E(f)$ 是透过光栅衍射波的频谱, $f_0 = 1/T$ 表示谐波基频。

现有两个矩形光栅以微小间距重叠(图 1),栅线均沿 x 轴方向分布、周期分别为 T_1 、 T_2 (假设 $T_1 < T_2$)、缝宽为 d_1 、 d_2 且单位振幅平面波透过后复振幅分别为 $E_1(x)$ 、 $E_2(x)$ 。当单位振幅的平面波透过它们时,忽略衍射波在两光栅之间微小间隙的角谱传播效应,在栅后的复振幅分布可由 $E(x) = E_1(x)E_2(x)$ 近似决定。同时,在衍射波分解中,谐波次数越高对应系数越小、谐波能量迅速减小。可以采用有限次谐波(N 次)的线性组合近似衍射波的复振幅。即

$$E(x) = E_1(x)E_2(x) \approx \sum_{n=-N}^{+N} a_n \exp(i2\pi n f_1 x) \times \sum_{m=-N}^{+N} b_m \exp(i2\pi m f_2 x), \quad (3)$$

经分析发现,孔栅比为 $1/2$ 时,该分解中只有奇次谐

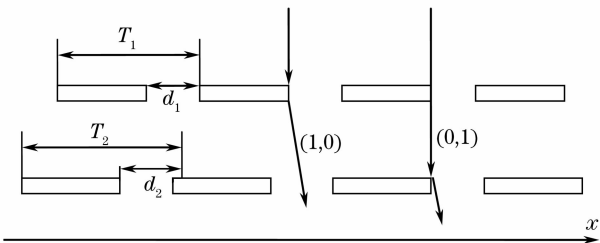


图 1 双光栅衍射近似原理图

Fig. 1 Schematic of diffraction of dual gratings

波, ± 2 次等偶次谐波杂光被滤除,使得 0 、 ± 1 次谐波成分占衍射波能量的主要成分,有利于简化分析模型以及提高栅后条纹的衬比度。即,除了光强均匀分布的背景光以外,经光栅 1 的 ± 1 级衍射再经光栅 2 的 0 级衍射,以及光栅 1 的 0 级衍射再经光栅 2 的 ± 1 级衍射形成两组能量占主导的衍射光: $(0, \pm 1)$ 及 $(\pm 1, 0)$, 如图 1 中所示。由于两光栅周期接近(即基频 f_1 、 f_2 接近),两路衍射光近似平行出射,并干涉形成光学‘拍’,在光栅后产生了一组光强呈周期分布的条纹,如图 2。这里两光栅归一化周期为 $T_1 = 1$ 、 $T_2 = 1.1$,宽度均为 20 。经分析,条纹复振幅的重复频率为 $f_1 - f_2$,周期 $T_f = T_1 T_2 / |T_1 - T_2|$ 。显然,两个光栅的周期越接近,条纹的周期越大。

同样地,呈周期分布的条纹的复振幅也可以分解为不同空间频率谐波的线性组合,即(3)式可归一化为

$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \exp[i2\pi(f_1 - f_2)x].$$

当周期为 T_1 的光栅 1 相对光栅 2 左移 Δx ,振幅变为

$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \exp\{i2\pi[(f_1 - f_2)x + f_1 \Delta x]\},$$

即条纹向左移动 $f_1 \Delta x / (f_1 - f_2)$ 。反之,光栅 2 相对光栅 1 右移 Δx 时,条纹左移 $f_2 \Delta x / (f_1 - f_2)$ 。可见,

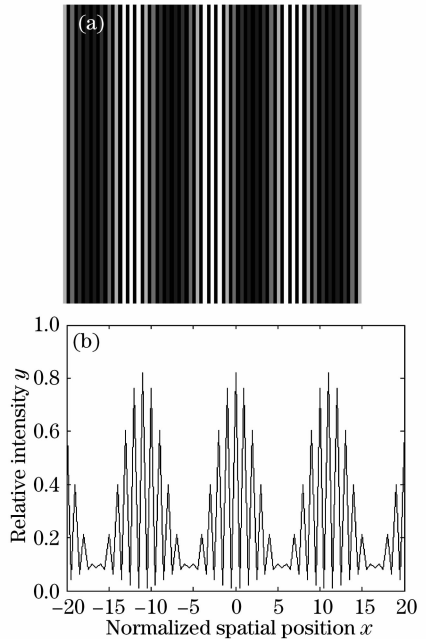


图 2 双光栅衍射后形成的条纹(a)及条纹复振幅分布(b)

Fig. 2 Fringes (a) and their distribution of complex amplitude (b) in diffraction of dual gratings

光栅相对移动导致条纹的空间相位发生变化,引起条纹的移动。光栅间的相对微位移将放大为条纹的大位移,两周期越接近,一定的位移引起的条纹位移量越大,使其在位移测量中具有很高的探测灵敏度。

3 设计

采用两个周期非常接近的矩形光栅产生周期条纹。光学系统和 CCD 对条纹接收,再利用图像处理方法对条纹进行分析提取条纹移动前后的相位差,实现两个(物体)平面的纳米位移以及微小间隙变化的测量。如光刻工艺的对准环节中,在掩模和硅片上分别采用这两光栅作为标记,理论上能够实现纳米级的对准精度。

3.1 位移测量

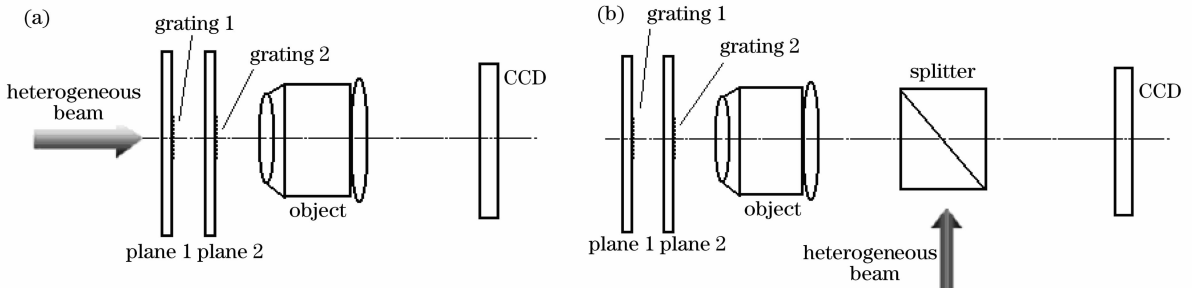


图 3 位移测量系统简图。(a) 基于透射式光栅的位移测量模型设计; (b) 基于反射式光栅的位移测量模型设计
Fig. 3 Diagram of displacement measurement system. (a) model of displacement measurement based on transmission gratings; (b) model of displacement measurement based on reflection gratings

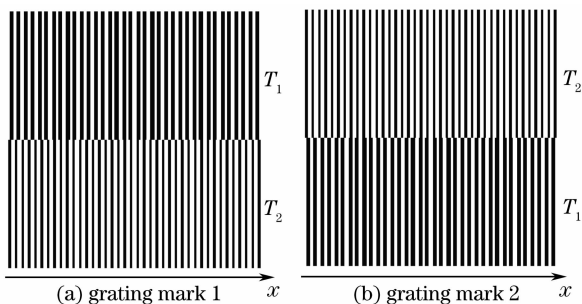


图 4 位移测量中的两个光栅标记。(a) 光栅标记 1;
(b) 光栅标记 2
Fig. 4 Two grating marks in measurement of displacement.

(a) grating mark 1; (b) grating mark 2

这时两平面的相对位移量由 $\Delta x = \Delta x' \times 2 |f_1 - f_2| / m(f_2 + f_1)$ 决定。对于同样的条纹位移量 $\Delta x'$, 对应的光栅位移量 Δx 约为图 1 模型的 2 倍。所以, 该设计在反映两平面的相对位移量、确定初始位置的同时, 使位移测量灵敏度加倍。

3.2 间隙测量

为了将两个平面间隙变化也反应在条纹的移动

采用图 1 的模型可直接测量两平行平面的相对位移, 系统设计简图如图 3 所示。其中图 3(a) 采用透射测量, 图 3(b) 采用反射式衍射光栅实现反射测量, 可采用宽带光源。假设光栅 1 所在平面 1 为固定参考, 这时只需测量出条纹移动后的相位变化 $\Delta\phi$ 或位移量 $\Delta x'$, 就可直接测出光栅 2 所在的平面 2 相对平面 1 的位移量 Δx 。即

$$\Delta x = \Delta x' \cdot \frac{2 |f_1 - f_2|}{f_2} \cdot \frac{1}{m} = \frac{\Delta\phi \cdot T_2}{2\pi}, \quad (4)$$

其中, $\Delta x' = \Delta\phi / 2\pi \cdot m T_1 T_2 / |T_1 - T_2|$ 、 m 为条纹接收系统的放大倍数。

而在某些应用如光刻对准中, 不仅确定硅片的位移量, 还需确定掩模硅片的初始对准位置。这时就需要在硅片上初始对准位置处设另一参照标记实现掩模硅片的对准。为此设计如图 4 所示标记。

或相位变化中。采用图 5 中的设计。其中光栅 1 为透射式衍射光栅, 光栅 2 为反射式衍射光栅。单色光从 +2 级方向入射两光栅发生衍射。其中从光栅 1 出射的 -2 级衍射光以同样的角度经过平面 2 返回后透过光栅 2, 与直接从光栅 2 反射的 +2 级衍射光近似平行出射(两光栅周期非常接近), 并发生干涉叠加形成随两平面间隙变化而移动的周期条纹。

在采用如图 4 的差动光栅标记时, 两光栅周期接近并且在两标记中反向逆序排列。这时条纹会随

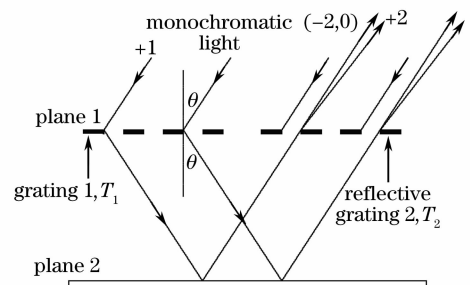


图 5 基于反射式光栅的间隙测量模型

Fig. 5 Gap-measurement model based on reflection grating

着光栅的相对运动灵敏度变大。测量出两组条纹相对运动中的相位变化 $\Delta\phi$ 或相对位移量 $\Delta x'$ ，就可以得到间隙变化 Δg ，即

$$\Delta g = \Delta x' \cdot \frac{1}{(f_1 + f_2)/|f_1 - f_2|} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2 \tan \theta} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \cdot \frac{1}{2 \tan \theta}, \quad (5)$$

式中 $\theta = \arcsin(2\lambda/T_1)$ ， λ 为单色光波长、 $\Delta x'$ 意义同前。

4 仿真及精度分析

采用了如图 1 所示的模型以及图 4 中的标记对两个平面相对位移的过程作了数值仿真，图 6 为该过程中两标记不同位移量所对应的两组条纹。这里采用无量纲归一化坐标，假设两光栅的归一化周期分别为 $T_1=1$ 、 $T_2=1.1$ ，孔栅比均为 $1/2$ ，而且两个标记归一化大小均为 $N \times N$ ，即长和宽均为 N 个光栅周期大小，其中 $N=40$ 。

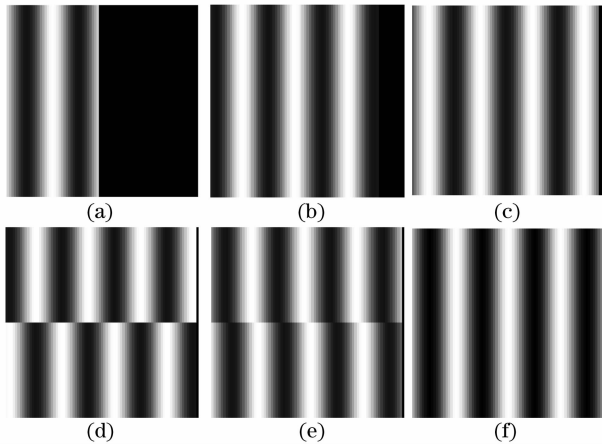


图 6 两标记相距(a) 20; (b) 10; (c) 1/2; (d) 1/4; (e) 1/16; (f) 0 个平均周期时的条纹

Fig. 6 Fringes corresponding to two marks offset by (a) 20; (b) 10; (c) 1/2; (d) 1/4; (e) 1/16; (f) 0 averaged periods of two gratings

这时，条纹的归一化周期为 $T = T_1 T_2 / (T_2 - T_1) = 11$ ，如图 2 (a)。在两个标记完全对准前，随着两光栅的相对移动，条纹数目发生变化，两组条纹间的相位位置也发生变化。只有两光栅完全对准时条纹数目最多为 $N' = N(T_1 - T_2) / T_1 T_2 \approx 3.6$ ，而且此时两组条纹的空间相位分布完全一致。

由前面光栅位移与条纹位移的关系知，两标记的相对位移 Δx 直接引起两组条纹的相对位移量为 $\Delta x' = \Delta x \cdot |T_1 + T_2| / (T_2 - T_1)$ 。可见只要两标记相对位移满足 $\Delta x = T \cdot m/2$ ，其中 $T =$

$2T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$ 为两光栅的平均周期。即两光栅距离平均周期的半整数倍时，两组条纹之间距离为条纹周期的整数倍，两组条纹的空间相位一致。其中，图 6(a)~图 6(c)反映了两个光栅重合的部分越来越大，且相距为平均周期的半整数倍时条纹空间相位分布一致的过程；图 6(c)~图 6(e)反应两光栅在 $0.5T$ 内相对运动的过程。图 6(e)中，条纹数目达到最大且空间相位分布一致，表示两光栅回到初始位置。所以，该设计的位移测量范围是 $(0, N)$ ，间隙测量范围 $(N/2 \tan \theta, N/\tan \theta)$ 。只要提取两组条纹的相位差(变化量)，就可以求出两光栅的距离(变化量)。在光刻对准中，一般需要粗对准使两标记的距离小于 $0.5T$ 以实现最终精对准。

系统采用周期分别是 $T_1=1$ 、 $T_2=1.02$ 的光栅标记，“ $30 \times$ ”的条纹成像镜头，靶面为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 、像素数为 768×576 的 CCD。则条纹位移相对光栅位移放大 $M_f = (T_1 + T_2) / |T_1 - T_2| = 101$ 倍，CCD 分辨力 $\eta_{\text{CCD}} = 3.6 \text{ mm} / 768 = 4687.5 \text{ nm}$ ，结合接收物镜的放大倍率 $M_o = 30$ ，系统的分辨力为 $\eta = \eta_{\text{CCD}} / M_f M_o \approx 1.55 \text{ nm}$ 。在该系统的基础上再结合图像处理方法实现图像清晰化以及 CCD 像素高度细分，设计更高倍率的接收物镜，系统的精度可提高至亚纳米级。

5 结 论

从傅里叶光学角度推导了两个周期近似相等的光栅重叠产生呈周期分布条纹的近似理论模型。其中，条纹的周期相对于原光栅周期被大幅度放大，且对于两光栅的相对位移具有很高的位移灵敏度。通过设计将该模型用于两个平行平面的纳米位移以及间隙变化的探测，并建立各自的测量模型。仿真结果表明，该方法通过提取两组条纹图案的相位关系实现位移探测，理论上能够实现纳米级甚至亚纳米级的分辨力。由此，在诸多的纳米测量领域中如光刻对准等，该方法将具有广泛的应用空间。

参 考 文 献

- Rosen J TM. Longitudinal spatial coherence applied for surface profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(23): 4107~11
- X. X. Zhang, Y. Z. Song. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1445~1450
张香春, 宋耀祖. 傅里叶变换求取叠栅条纹微小位移的精度分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1445~1450
- Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Laser diode interferometer used to measure displacements in large range with a nanometer accuracy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(5):

- 455~458
王学锋, 王向朝, 钱 锋 等. 用于纳米精度大范围位移测量的半导体激光干涉仪[J]. 中国激光, 2001, **A28**(5): 455~458
- 4 Wang Lin, Li Dacheng, Cao Mang *et al.*. X-ray inteferometry for pitch nanometer measurement of SPM master[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1675~1679
王 林, 李达成, 曹 芒 等. X 射线干涉仪实现扫描探针显微镜样板线间距纳米测量[J]. 光学学报, 2000, **20**(12): 1675~1679
- 5 Shinohara M, Suhara T. Integrated-optic grating-scale-displacement sensor using linearly focusing grating couples[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 239~241
- 6 Lin S T. A new moiré interferometer for measuring in-plane displacement[J]. *J. Exp. Mech.*, 2001, **42**(2): 140~143
- 7 H. J. Xia, Y. T. Fei. 2D nano-displacement measurement with diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 311~314
夏豪杰, 费业泰 等. 基于衍射光栅的二维纳米位移测量技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, **5**(4): 311~314
- 8 X. C. Chu, H. B. Lü, S. H. Zhao. Wide-range grating interferometer with nanometer resolution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 55~69
楚兴春, 吕海宝, 赵尚弘. 大量程纳米级光栅干涉位移测量[J]. 光电工程, 2008, **35**(1): 55~69
- 9 Z. Q. Zou. Nano-gratings measurement technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(1): 8~15
邹自强. 论纳米光栅测量技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2004, **2**(1): 8~15
- 10 Q. T. Liang. Physical Optics [M]. 2th ed., Beijing: China Machine Press, 1986
梁铨廷. 物理光学[M]. 第 2 版, 北京: 机械工业出版社, 1986