

动态干涉仪的位相光栅衍射效率研究

李金鹏¹, 陈磊¹, 方波², 朱文华¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了解决普通二维光栅在动态干涉术中光能量利用不足的问题, 使用标量衍射理论和傅里叶分析法对矩形正交位相光栅和棋盘型位相光栅的衍射效率进行推导, 分别对两种光栅的最佳工作级次选择策略进行研究。分析结果表明, 当分光器件为矩形正交位相光栅时, 应选择(0, ± 1)级与(± 1 , 0)级作为动态干涉仪的工作级次, 光能量利用率达到 54.4%; 当分光器件为棋盘位相光栅时, 应选择(± 1 , ± 1)级作为动态干涉仪的工作级次, 光能量利用率达到 65%。实验对比了两种光栅在动态干涉仪上的应用效果, 当选用(± 1 , ± 1)级作为工作级次时, 结果表明使用棋盘型位相光栅的应用效果优于矩形正交位相光栅。因此在动态干涉仪中使用棋盘位相光栅并选用(± 1 , ± 1)级作为工作级次能够消除光能量利用不足对测量造成的影响。

关键词: 光学干涉测量; 动态干涉仪; 位相光栅; 衍射效率

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2696-06

Diffraction efficiencies of phase gratings based on dynamic interferometer

Li Jinpeng¹, Chen Lei¹, Fang Bo², Zhu Wenhua¹

(1. Institute of Electronic and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Anhui Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to overcome the insufficient of the light energy diffracted by common two dimension grating in dynamic interferometry, diffraction efficiency of the cross phase grating and phase chessboard were derived using scalar analysis and Fourier method, and selection scheme of optimum operation orders was studied. The analytical result of their diffraction efficiency demonstrates that if the cross phase grating is chosen, the(0, ± 1)th and(± 1 , 0)th orders should be selected as operation orders, and utilization rate can reach 54.4%; If the phase chessboard is chosen, (± 1 , ± 1)th orders is selected as operation ones, and utilization rate can reach 65%. Application effect of these two phase grating are compared in dynamic interferometer. When (± 1 , ± 1)th is selected as operation orders, the experimental results indicates that application effect of phase chessboard is better than that of cross phase grating. So influence of insufficient light energy on the measurement result can be eliminated by using phase chessboard and selecting (± 1 , ± 1)th as operation orders.

Key words: optical interferometry; dynamic interferometer; phase grating; diffraction efficiency

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61108041; UI231111)

作者简介: 李金鹏(1985-), 男, 博士生, 主要从事光干涉测量方面的研究。Email: kingpenglee@163.com

导师简介: 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

Email: chenlei@mail.njust.edu.cn

0 引言

光栅是现代光学中的重要光学元件,越来越多地应用在光学测量中。在基于泰伯效应的技术应用中,光栅是必不可少的关键器件^[1-2];在剪切干涉术中,光栅能在低级次衍射光与高级次衍射光之间引入剪切量^[3];在移相干涉术中光栅能够作为移相器件,在低级次衍射光与高级次衍射光之间引入额外移相量^[4]。在动态干涉测量中光栅充当分光器件,使得干涉仪能在同一时刻得到一组具有固定移相量的干涉图^[5-9]。

光栅除了充当移相器以及分光器以外,还能够以位相光栅的形式改变各个衍射级次的衍射效率,提升干涉测量装置的性能。例如,Kevin等在moire干涉术中采用了位相光栅提高了条纹对比度并提升了光能量利用率^[9];Vanusch等采用一维Ronchi位相光栅产生两组测试光,同时得到两个正交方向剪切的干涉图,并提升了工作级次的衍射效率^[10];Jerome在波前检测技术中采用棋盘位相光栅与哈特曼板组合抑制了非工作级次的衍射效率,提升波前检测的灵敏度^[11];Gustavo在同步移相干涉仪中使用光栅实现了测试光与参考光不同衍射级次之间错位相干,由于该光栅采用的是特殊形式的位相光栅,能使四个工作级次衍射效率大致相当,从而能够得到四幅对比度很好的移相干涉图^[12];Gustavo将该技术应用到横向剪切干涉仪与径向剪切干涉仪中,实现了基于剪切干涉的同步移相干涉术^[13]。

动态干涉术能够抑制振动对移相干涉测量造成的误差,适用于光学元件的在线测量以及瞬态波面的实时测量。然而现有的动态干涉仪若以二维全息光栅作为分光器件,将降低光能量利用率。该问题在测量低反射率光学元件的时候显得更加突出。文中针对动态干涉仪提升光能量利用率、拓展测量范围的实际应用需求,采用二维位相型光栅作为分光器件。研究了矩形正交位相光栅以及棋盘位相光栅的衍射效率。基于动态干涉仪研制了这两种位相光栅并对其实际应用效果做了对比试验。

1 原理

1.1 动态干涉仪中的分光系统

图1为利用波片、偏振分光镜、偏振片等偏振器

件搭建的泰曼型动态干涉仪,其中半波片(HWP)可以改变线偏光的偏振态从而改变参考光与测试光的相对光强; $\lambda/4$ 波片(QWP)的作用为将线偏振光转变为圆偏振光,如果两次通过 $\lambda/4$ 波片, P 光会变为 S 光, S 光将变为 P 光;偏振分光镜的作用为透射 P 光反射 S 光。二维光栅的作用是将一组参考光与测试光分为四组,移相单元在这四组光中引入的移相分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,利用四步移相算法即可解调相位。

图1中虚线框为动态干涉仪的分光移相单元,其中分光光路如图2所示。

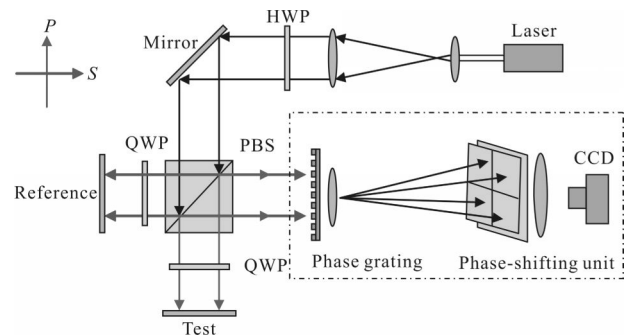


图1 动态干涉仪装置图

Fig.1 Set up of dynamic interferometer

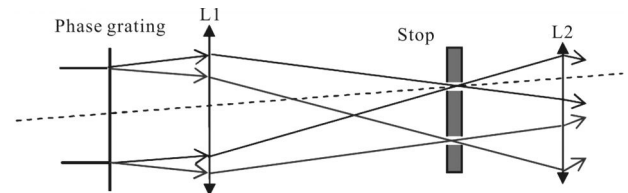


图2 动态干涉仪分光光路

Fig.2 Beam splitting structure of dynamic interferometer

参考光与测试光经过光栅发生衍射,在透镜L1的后焦面上汇聚,光阑的作用是选择四组相干光形成空间移相干涉图。移相干涉术要求所选择的四组光光强强度一致,实际测量需要光能量利用率尽可能大,另外为了保证成像透镜L2不会引入较大畸变,应选择低级次衍射光。这样在选定光栅类型后要求所选择的工作级次应满足:

1. 衍射效率一致
2. 衍射效率尽可能大
3. 工作级次为光栅的低级次衍射光

为此针对两种二维光栅—矩形正交位相光栅以及棋盘光栅的衍射效率展开研究。

1.2 二维位相光栅衍射效率

假定二维位相光栅周期单元内的透射率函数为 $t_u(x,y)$, 则整个光栅的透射率函数是周期单元函数的二维延拓:

$$t(x,y) = t_u(x,y) * \frac{1}{\Lambda_x} \text{comb}\left(\frac{x}{\Lambda_x}\right) * \frac{1}{\Lambda_y} \text{comb}\left(\frac{y}{\Lambda_y}\right) \quad (1)$$

式中: * 表示卷积运算; Λ_x 和 Λ_y 分别表示 x 和 y 方向的光栅周期, 为梳状函数。若以单位振幅的平面波入射到光栅平面, 其频谱面上的复振幅可以表示为^[14]:

$$T(u,v) = T_u(u,v) \text{comb}(\Lambda_x u) \text{comb}(\Lambda_y v) =$$

$$T_u(u,v) \frac{1}{\Lambda_x} \sum_{N=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{N}{\Lambda_x}\right) \frac{1}{\Lambda_y} \sum_{M=-\infty}^{\infty} \delta\left(v - \frac{M}{\Lambda_y}\right) \quad (2)$$

其中 T_u 为透射率函数 t_u 的傅里叶变换。令 $u = \frac{n_1}{\Lambda_x}$, $v =$

$\frac{n_2}{\Lambda_y}$ 衍射级次 (n_1, n_2) 的衍射效率可以表示为:

$$\eta_{n_1, n_2} = \left| T(u,v)_{u=\frac{n_1}{\Lambda_x}, v=\frac{n_2}{\Lambda_y}} \right|^2 = \left| \frac{1}{\Lambda_x \Lambda_y} T_u\left(\frac{n_1}{\Lambda_x}, \frac{n_2}{\Lambda_y}\right) \right|^2 \quad (3)$$

1.2.1 矩形位相光栅衍射效率

矩形正交位相光栅结构如图3所示。

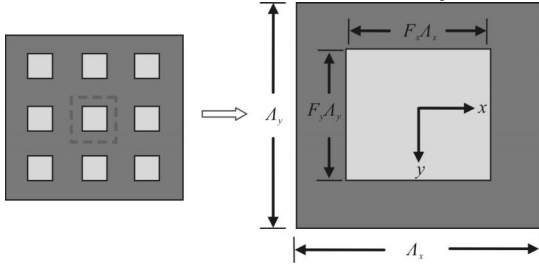


图3 矩形正交位相光栅的周期单元

Fig.3 Unit cell of rectangular cross phase grating

单元透射函数 $t_u(x,y)$ 可表示为:

$$t_u(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{F_x \Lambda_x}, \frac{y}{F_y \Lambda_y}\right) (e^{-i\varphi} - 1) + \text{rect}\left(\frac{x}{\Lambda_x}, \frac{y}{\Lambda_y}\right) \quad (4)$$

式中: rect 为矩形函数; $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_s - n_c)$; F_x 和 F_y 表示矩形脊区在一个周期内分别沿 x 方向和 y 方向的占空比; n_s 和 n_c 分别表示光栅基底材料和环境介质的折射率; d 为矩形脊区凸起厚度。

根据公式(3), 矩形位相光栅的衍射效率可以表示为:

$$\eta_{n_1, n_2} = \left| \frac{1}{\Lambda_x \Lambda_y} T_u\left(\frac{n_1}{\Lambda_x}, \frac{n_2}{\Lambda_y}\right) \right|^2 =$$

$$\left| \left[(e^{-i\varphi} - 1) \frac{\sin(\pi n_1 F_x)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2 F_y)}{\pi n_2} + \frac{\sin(\pi n_1)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2)}{\pi n_2} \right] \right|^2 =$$

$$4 \left(\frac{\sin(\pi n_1 F_x)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2 F_y)}{\pi n_2} \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} +$$

$$4 \left(\frac{\sin(\pi n_1)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2)}{\pi n_2} \right) \left(\frac{\sin(\pi n_1 F_x)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2 F_y)}{\pi n_2} \right) \sin^2 \frac{\varphi}{2} +$$

$$\left[\frac{\sin(\pi n_1)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2)}{\pi n_2} \right]^2 \quad (5)$$

1.2.2 棋盘位相光栅衍射效率

棋盘位相光栅是指光栅微结构具有棋盘状分布特征, 如图4所示。

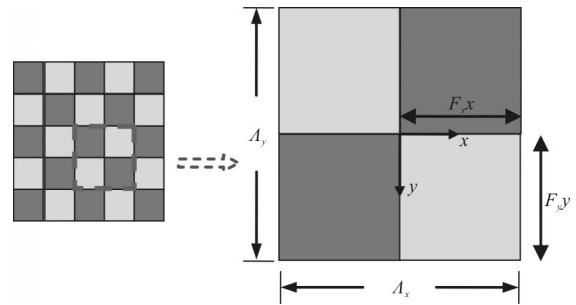


图4 棋盘位相光栅的周期单元

Fig.4 Unit cell of phase chessboard

在光栅一个周期单元内, 使用矩形分割方法将光栅周期单元划分为 2×2 个面积相同的矩形单元, 棋盘位相光栅一个周期单元的透射函数 $t_u(x,y)$ 的一般形式为:

$$t_u(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x - \frac{F_x \Lambda_x}{2}}{F_x \Lambda_x}, \frac{y - \frac{F_y \Lambda_y}{2}}{F_y \Lambda_y}\right) (e^{-i\varphi} - 1) +$$

$$\text{rect}\left(\frac{x + \frac{(1-F_x)\Lambda_x}{2}}{(1-F_x)\Lambda_x}, \frac{y + \frac{(1-F_y)\Lambda_y}{2}}{(1-F_y)\Lambda_y}\right) (e^{-i\varphi} - 1) +$$

$$\text{rect}\left(\frac{x}{\Lambda_x}, \frac{y}{\Lambda_y}\right) \quad (6)$$

典型的棋盘光栅占空比为 $F_x = F_y = 1/2$, 根据公式(3)其 (n_1, n_2) 衍射级次的衍射效率表示为:

$$\eta_{n_1, n_2} = \left| \frac{1}{\Lambda_x \Lambda_y} T_u\left(\frac{n_1}{\Lambda_x}, \frac{n_2}{\Lambda_y}\right) \right|^2 =$$

$$16 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\sin(\frac{\pi n_1}{2})}{\pi n_1} \frac{\sin(\frac{\pi n_2}{2})}{\pi n_2} \right)^2 \cos^2 \left[\frac{\pi}{2} (n_1 + n_2) \right] -$$

$$8 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \frac{\sin(\frac{\pi n_1}{2})}{\pi n_1} \frac{\sin(\frac{\pi n_2}{2})}{\pi n_2} \frac{\sin(\pi n_1)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2)}{\pi n_2}$$

$$\cos \frac{\pi}{2} (n_1 + n_2) + \left[\frac{\sin(\pi n_1)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2)}{\pi n_2} \right]^2 \quad (7)$$

2 衍射效率计算分析

2.1 矩形位相光栅衍射效率分析

为了满足1.1节提出的衍射效率要求,对矩形正交位相光栅进行计算分析,由于动态干涉仪中希望光能量集中于较低衍射级次,考察光栅(0,±1)级,(±1,0)级和(±1,±1)级衍射效率与相位延迟量 φ 以及光栅占空比的关系。当选用矩形正交位相光栅时,先考察工作级次为(0,±1)级,(±1,0)级的衍射效率。根据公式(5)衍射效率可以写成:

$$\eta_{n_1, n_2} = 4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\sin(\pi n_1 F_x)}{\pi n_1} \frac{\sin(\pi n_2 F_y)}{\pi n_2} \right)^2 \quad (8)$$

$$n_1 = 0, \pm 1, n_2 = \pm 1, 0$$

此时若要4个级次衍射效率相等需要满足:

$$\begin{cases} F_x = F_y \\ 0 < F_x < 1 \\ 0 < F_y < 1 \end{cases} \quad (9)$$

以(0,1)级为例,此时的衍射效率为:

$$\eta_{0,1} = \frac{4}{\pi^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} F_x^2 \sin^2 \pi F_x \quad (10)$$

若要使得衍射效率最大,需满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_{0,1}}{\partial \varphi} = 0 \\ \frac{\partial \eta_{0,1}}{\partial F_x} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由此得到 $\varphi = (2k+1)\pi$, $F_x = 0.6465$, 此时对应的衍射效率 $\eta_{0,1} = 13.6\%$ 。类似的经过计算可以得到当 $F_x = F_y = 0.6465$ 时四级光衍射效率有最大值 $\eta_{0,1} = \eta_{0,-1} = \eta_{1,0} = \eta_{-1,0} = 13.6\%$, 总能量利用率达54.4%。

再考察(±1,±1)4个衍射级次,衍射效率可以写成:

$$\eta_{\pm 1, \pm 1} = 4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\sin(\pi F_x)}{\pi} \frac{\sin(\pi F_y)}{\pi} \right)^2 \quad (12)$$

当 $\varphi = (2k+1)\pi$, $F_x = F_y = 0.5$, 时,四级光衍射效率 $\eta_{1,1} = \eta_{1,-1} = \eta_{-1,1} = \eta_{-1,-1} = 4.11\%$ 有最大值,能量利用率达到16.44%。

由以上计算分析可知,若选择矩形正交位相光栅作为动态干涉仪的分光器件,应当选择(0,±1)级,(±1,0)级4个衍射级次。此时最大的光能量利用率能够达到54.4%。

2.2 棋盘位相光栅衍射效率分析

同样对棋盘位相光栅的衍射效率进行计算分析。

首先考察(0,±1)级,(±1,0)级,根据公式(7)可以得到:

$$\eta_{n_1, n_2} = 0 \quad n_1 = 0, \pm 1; n_2 = \pm 1, 0 \quad (13)$$

因此当采用棋盘位相光栅时,不能选择这4个级次作为动态干涉仪的工作级次。

当选择(±1,±1)4个衍射级次时,衍射效率可以写成:

$$\eta_{\pm 1, \pm 1} = \frac{16}{\pi^4} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (14)$$

当 $\varphi = (2k+1)\pi$ 时,衍射效率具有最大值 $\eta_{\pm 1, \pm 1} = \frac{16}{\pi^4} = 16.44\%$ 。总能量利用率达到65%。

可以得到结论,当选择棋盘位相光栅作为分光器件时,应选用(±1,±1)作为工作级次作为动态干涉仪的工作级次,此时光能量利用率最大到达65%。

3 实验

先后设计并研制了矩形正交位相光栅和棋盘位相光栅。将两种光栅分别应用于动态干涉仪中,选择(±1,±1)为动态干涉仪的工作级次,比较两种光栅的应用效果。

动态干涉仪的中心波长为632.8 nm,矩形正交位相光栅选用K9玻璃为基底材料,折射率为1.516,占空比为 $F_x = F_y = 0.5$,光栅周期设计为40 μm ,刻蚀深度设计为613.2 nm,对应于相位延迟量为 $\varphi = \pi$ 。如2.1节讨论,光能量利用率达到16.44%。棋盘位相光栅选用的基底材料为熔石英,折射率为1.457,占空比为 $F_x = F_y = 0.5$,光栅周期设计为50 μm ,刻蚀深度设计为692.3 nm,对应于相位延迟量为 $\varphi = \pi$ 。如2.2节讨论,光能量利用率应有最大值65%。

用Veeco NT9100型白光轮廓仪分别测量两种光栅微观形貌。如图5(a)所示,矩形正交位相光栅刻蚀深度的实测值为610.1 nm,占空比为 $F_x = F_y = 1/2$,光栅常数40.1 μm 。如图5(b)所示,棋盘位相光栅的刻蚀深度的实测值为711.8 nm,周期为50.1 μm 。

保持CCD采集条件相同,测试条件相同采集同步移相干涉图。采用矩形正交位相光栅得到的干涉图如图6(a)所示,采用棋盘位相光栅得到的干涉图如图6(c)所示。对比两图,可以看出通过矩形正交位相光栅产生的干涉图光强不足,对比度低,而棋盘位相光栅产生的干涉图光强大,对比度高。图6(b)为

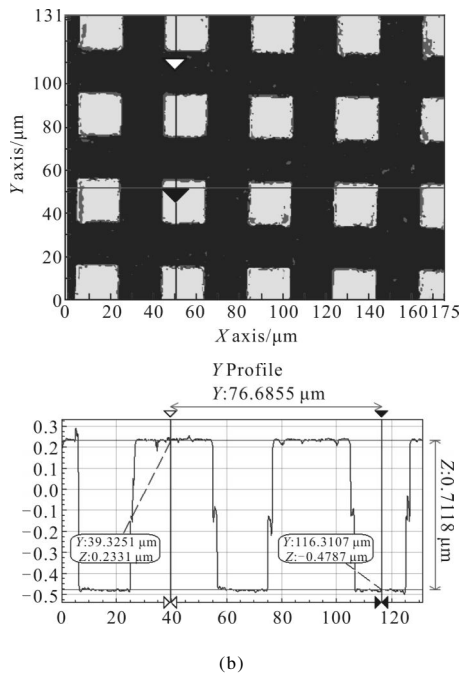
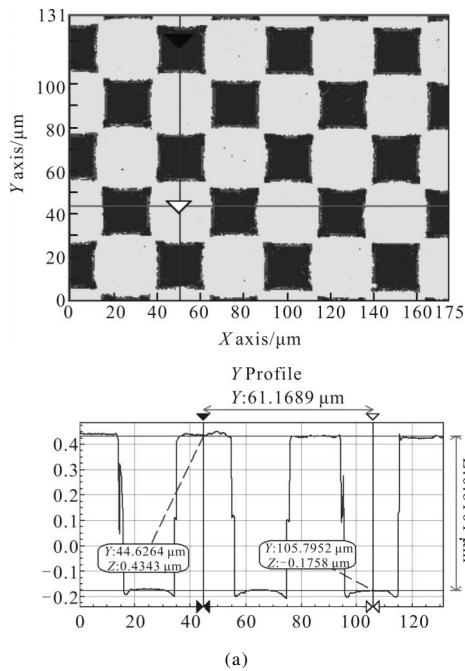


图 5 两种光栅的轮廓测量

Fig.5 Profile measurements of the two gratings

图 6(a)中左上方子干涉图的灰度直方图,图 6(d)为图 6(c)中左上方子干涉图的灰度直方图。图 6(b)中灰度值集中在 70 以下,亮条纹与暗条纹灰度值相差不大;图 6(d)中灰度值最大达到 180,亮条纹与暗条纹灰度值相差较大,条纹对比度较高。移相干涉图的对比如可用 $V = \text{Mean} \left(\frac{2\sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \right)$ 计算^[15], 其中 I_1, I_2, I_3 和 I_4 表示移相图序列, $\text{Mean}()$ 表示平均

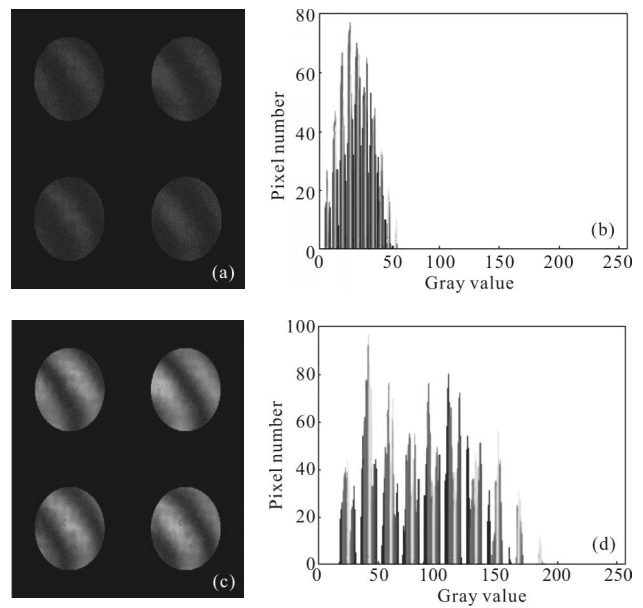


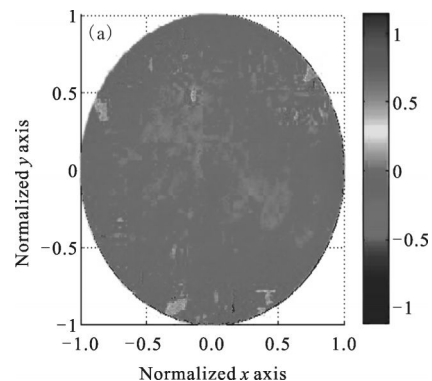
图 6 两种光栅用于动态干涉仪的效果

Fig.6 Results of the two kinds of gratings applied to dynamic interferometer

值运算,分别计算图 6(a)和图 6(c)中移相干涉对比度均值,图 6(a)计算结果为 $V_{\text{cross}}=0.464$,图 6(c)计算结果为 $V_{\text{chessboard}}=0.611$ 。

采用四步移相法解调采集到的干涉图,并经过解包裹消倾斜运算可以得到相位分布。图 7(a)给出了图 6(a)中干涉图解调结果。从图中可以看出,光能量利用率较低使得干涉图信噪比较低,导致了局部区域相位恢复偏差较大。图 7(b)给出了图 6(c)中干涉图的相位恢复结果,由于光能量利用率较大使得干涉图信噪比较高,相位得以成功解调,其峰谷值为 0.202λ ,均方根值为 0.023λ 。

由实验结果可知,选择 $(\pm 1, \pm 1)$ 作为工作级次时,棋盘光栅的应用效果优于矩形正交位相光栅。在该系统中由于采用了棋盘位相光栅,提升了光能量



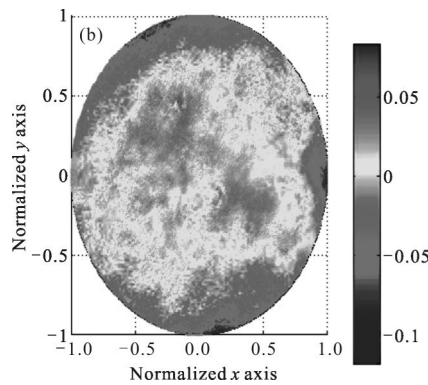


图7图6(a)和(c)干涉图的相位恢复结果

Fig.7 Results of phase retrieve interferogram shown by Fig.6(a) and (c)

利用率,使得干涉图信噪比增加并成功恢复了相位,消除了光能量利用不足对测量造成的影响。

4 结论

文中根据动态干涉仪提升光能量利用率的实际需要,理论研究了二维位相光栅的衍射效率,给出了矩形正交位相正交光栅与棋盘位相光栅衍射效率的解析形式,并分别得出了两种光栅的最佳工作级次。实验研究了矩形正交位相光栅与棋盘位相光栅在动态干涉仪中的应用效果。使用棋盘位相光栅并选用选择 $(\pm 1, \pm 1)$ 级作为工作级次实际解决了动态干涉仪光能量利用率不足的问题。

参考文献:

- [1] Yun Yu, Xie Ping, Peng Yong, et al. Method for testing light colimation based on Talbot effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 267-269. (in Chinese)
云宇, 解平, 彭勇, 等. 基于 Talbot 效应检测光束准直性方法的研究[J], 红外与激光工程, 2008, 37(S): 267-269.
- [2] Lu Heng, Chen Hao, He Yong. Alignment method for measurement of long focal length based on Talbot-Moiré effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2836-2841. (in Chinese)
陆衡, 陈好, 何勇. 基于泰伯莫尔法的长焦距测量系统的装调技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2836-2841.
- [3] Zhiqiang Liu, Masashi Okada, Katsumi Sugisaki, et al. Double-grating lateral shearing interferometer for EUV optics at-wavelength measurement[C]//SPIE, 2005, 5752: 663-672.
- [4] Yucong Zhu, Satoru Odate, Ayako Sugaya, et al. Method for designing phase-calculation algorithms for two-dimensional grating phase-shifting interferometry [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(18): 2815-2822.
- [5] Zuo Fen, Chen Lei. Errors researching for a simultaneous phase shifting interferometer[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(4): 536-540. (in Chinese)
左芬, 陈磊. 一种同步移相干涉系统的误差研究 [J]. 光学技术, 2009, 35(4): 536-540.
- [6] Li Bo, Chen Lei, Zhao Bing, et al. Spatial mismatch calibration using circular carrier technique in the simultaneous phase shifting interferometry[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(8): 1037-10.
- [7] Qian Kemao, Wu Xiaoping, Anand Asundi. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(13): 2448-2453.
- [8] Neal Brock, John Hayes, Brad Kimbrough, et al. Dynamic Interferometry[C]//SPIE, 2005, 5875, 1-10.
- [9] Kevin G H, Steven L C. Phase grating use in moire interferometry[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(10):1517-1520.
- [10] Vanusch Nercissian, Irina Harder, Klaus Mantel, et al. Diffractive simultaneous bidirectional shearing interferometry using tailored spatially coherent light[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(4): 571-578.
- [11] Jerome Primot, Nicolas Guerineau. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(31): 5715-5720.
- [12] Gustavo Rodriguez-Zurita, Cruz Meneses-Fabian, Noel-Ivan Toto-Arellano, et al. One-shot phase-shifting phase-grating interferometry with modulation of polarization: case of four interferograms [J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7806-7817.
- [13] Rodriguez-Zurita G, Toto-Arellano N I, Meneses-Fabian C, et al. Lateral and rotational shearing phase-shifting interferometry with phase-grating multiplexing [C]//CLEO Pacific Rim, 2009.
- [14] Elias N Glytsis. Two-dimensionally-periodic diffractive optical elements: limitations of scalar analysis[J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(4): 702-715.
- [15] Malacara D. Optical Shop Testing 3rd Edition[M]. New York: Wiley, 2007: 501-598.