

四波前横向剪切干涉仪的关键技术研究

刘克*, 张孝天, 钟慧, 何飞, 刘书豪, 李艳秋**

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 四波前横向剪切干涉(QWLSI)是一种精度高、动态范围大、分辨率高、抗干扰能力强的瞬态波前检测技术。本文结合国内外相关研究工作,重点阐述了本课题组在分束器件设计、多方向横向剪切干涉图处理、测量误差校准等 QWLSI 的关键技术研究方面取得的进展。以关键技术研究为基础,本课题组开发了 QWLSI 的原理装置,其绝对测量精度(RMS)达到 0.0038λ (2.4 nm , $\lambda=635\text{ nm}$),重复测量精度(RMS)达到 0.0004λ (0.25 nm , $\lambda=635\text{ nm}$)。QWLSI 与商品化的夏克-哈特曼波前传感器的对比实验结果表明,两种仪器对含有第 4~36 项单项 Zernike 像差入射波前的测量结果基本一致。

关键词 光学检测; 剪切干涉; 衍射光栅; 相位提取; 波前重建; 误差校准

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230738

1 引言

光干涉法是一种重要的光学精密测试技术^[1-2],其灵敏度高且具备波长级的测量精度,具有不接触待测物体的无损特性。横向剪切干涉属于共光路干涉,与菲索干涉仪^[3]、泰曼-格林干涉仪^[4]等传统的干涉测量技术相比,横向剪切干涉技术具有对测量环境稳定性要求不高、对光源相干性要求低、检测范围广等优点。横向剪切干涉技术的基本原理是:利用分光元件将待测波面复制成若干波面,并使得它们产生一定的横向错位量,利用光波重叠区域的干涉图获取沿错位方向的波前相位差分信息,最终通过波前重构实现待测波前相位信息的测量^[5-8]。

横向剪切干涉技术起源于 1923 年经典的 Ronchi 检验法^[9],发展至今已有一百年,其大致可以归为两类:双光束横向剪切干涉技术和多光束横向剪切干涉技术。双光束横向剪切干涉技术主要利用平行平板作为分束器件产生横向错位的两束相干光,典型代表有单平行平板法(Murty, 1964 年)^[10]、双平行平板法(Hariharan, 1975 年)^[11]、双平行板间夹液晶层法(Griffin, 2001 年)^[12]、平移楔板法(Disawal 等, 2004 年)^[13]等。双光束横向剪切的干涉图样仅能获取沿错位方向的波前相位差分信息,若要实现波前相位信息的测量,势必要增加系统的复杂性,以获取至少两个错位方向的剪切干涉图。近年来,国内外学者聚焦于多光束横向剪切干涉的研究,该技术将待测光波同时复

制成出射角不同的多束光波,进而在观测面的重叠区域形成多光束横向剪切干涉图,使得只需要一幅干涉图便能包含多个错位方向的波前相位差分信息,实现瞬态波前的实时检测。

多光束横向剪切干涉技术起源于三波前横向剪切干涉的研究,Primot^[14]在棱镜式的三波前横向剪切干涉的基础上加以改进,使用正六边形相位光栅取代难以加工的棱镜作为分束器件^[15],确保了参与干涉的 3 个波前波矢方向的准确性,奠定了以光栅为分束器件的多光束横向剪切干涉的技术基础。随后出现了以光栅为分束器件的四波前横向剪切干涉(QWLSI)^[16-24]、九波前横向剪切干涉^[25]等技术,其中 QWLSI 获得了广泛的研究,先后发展出改进的哈特曼板横向剪切干涉^[21-24]、交叉光栅横向剪切干涉^[16-20, 26-27]、随机编码光栅四波前横向剪切干涉^[28-32]等技术。近年来, QWLSI 已经被广泛地应用到光刻物镜的像差测量^[16-20]、红外透镜的像差测量^[33-34]、非球面元件的面形测量^[35]、大口径拼接望远镜的波前传感^[36]、相位显微成像^[37]、红外激光的光束质量测量^[38]等领域。本课题组开展了 QWLSI 的研发,在分束器件设计、多方向横向剪切干涉图处理、测量误差校准等 QWLSI 关键技术研究方面取得了一定的进展,并在此基础上开发了一套 QWLSI 原理装置。本文主要介绍本课题研制的 QWLSI 最新进展和实验结果。

2 分束器件设计

四波前横向剪切干涉技术的工作原理如图 1 所

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-04-20; 录用日期: 2023-05-05; 网络首发日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61975013, 62175014)、国家科技重大专项(2017ZX02101006-001)

通信作者: *liuke@bit.edu.cn; **liyanqiu@bit.edu.cn

示。待测波前通过分束器件被复制成波前畸变信息相同、出射角度不同的 4 个波前,在光电耦合器件 CCD 靶面上互相错位而发生干涉;利用计算机处理采集的干涉图,并通过波面重构的算法来恢复待测波前的相位分布。分束器件是 QWLSI 的关键器件,目前均采用衍射光栅来实现。如图 1 所示,理想情况下,待测波前通过光栅后仅存在 (+1, +1)、(+1, -1)、

(-1, -1)和 (-1, +1)级衍射光,形成四波前横向剪切干涉图。然而,作为分束器件的衍射光栅势必会产生除 4 束一级衍射光以外的高级次衍射光,这些高级次衍射光会在四波前横向剪切干涉图中引入噪声,降低其对比度,从而产生测量误差。因此,减小高级次衍射光带来的测量误差,成为分束器件设计的主要目标。

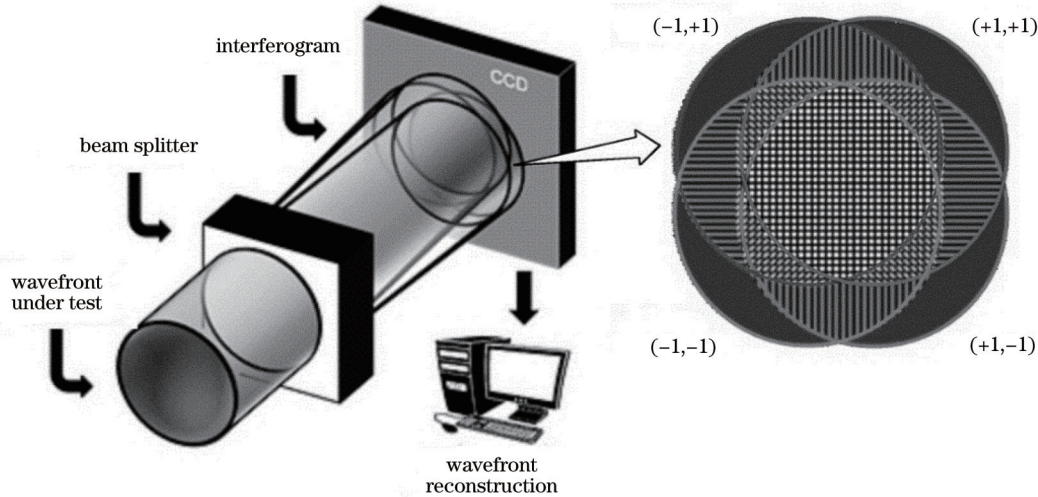


图 1 四波前横向剪切干涉仪工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of quadri-wave lateral shearing interferometer

交叉光栅横向剪切干涉^[16-20, 26-27]在衍射光栅后方设置级选择板来消除高级次衍射光,仅允许 4 束一级衍射光通过并发生横向剪切干涉。但是,级选择板会增加系统的复杂度,影响干涉仪的通用性;同时,级选择板的大小限制了可测量波前畸变的空间频率,影响干涉仪的动态测量范围。因此,通过合理设计光栅结构来抑制衍射场中的高级次衍射光,是四波前横向剪切干涉仪的发展趋势。

为了仅产生 4 束一级衍射光,如图 2(a1)所示, QWLSI 理想分束器件的透过率分布应为透过率在 $[-1, +1]$ 区间的二维正弦函数^[38]。然而,对具有连续透过率变化的理想光栅进行加工是较为困难的,仅能利用若干台阶来近似,即便利用全息干涉法也难以制作含有负值的透过率连续变化的光栅^[39]。2000 年, Primot 等^[21-24]在哈特曼传感器的基础上提出了改进的哈特曼板横向剪切干涉技术,其采用由二值振幅光栅[图 2(b2)]和棋盘式相位光栅[图 2(d)]紧密贴合而成的混合光栅[图 2(b1)]作为分束器件^[40]。其中棋盘式相位光栅消除了零级光和偶数级次衍射光,二值振幅光栅消除了 3 的整数倍级次衍射光,但是 ± 5 、 ± 7 、 ± 11 等高级次衍射光仍然存在,使得 CCD 仅能在光栅后面特定的位置可以采集到高对比度的干涉条纹,不能实现剪切比的连续可调。

2015 年, Ling 等^[28-32]利用基于光通量约束的随机编码方法生成二值化振幅光栅[图 2(c2)],再组合相

位差为 0 和 π 的棋盘式相位光栅[图 2(d)],生成可以达到近似理想二维正弦光栅效果的随机编码混合光栅[图 2(c1)],有效地抑制了 ± 1 级以外的其他级次衍射光。但是,在这种随机编码光栅中由网格划分和像元尺寸差异导致的量化误差^[41]仍会引入高级次衍射光,从而影响干涉图的对比度。2018 年,本课题组的王健年^[42]利用平面波角谱理论,推导出基于光通量约束的随机编码光栅衍射光场分布的解析表达式。在随机编码混合光栅空间频谱的衍射级次处各衍射光的振幅 A_{fip} 表达式如式(1)所示,不同周期中第 m 行、第 n 列像元透过率和 S_{mn} 的表达式如式(2)所示。

$$A_{\text{fip}}\left(\frac{k}{d}, \frac{k'}{d}\right) = \sum_{m,n=1}^D \left\{ F_{\frac{k}{d}, \frac{k'}{d}} \left[\text{rect}\left(\frac{x-m\omega}{\omega}, \frac{y-n\omega}{\omega}\right) \right] \cdot S_{mn} \right\}, \quad (1)$$

$$S_{mn} \approx \frac{N^2}{B^2} \cdot \text{round} \left\{ \sum_{p=1}^B \sum_{q=1}^B \sin \left[\frac{2\pi}{A \cdot B} \left(B \cdot \left\lfloor \frac{m}{B} \right\rfloor + q \right) \right] \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{A \cdot B} \left(B \cdot \left\lfloor \frac{n}{B} \right\rfloor + p \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: k 为第 k 级衍射光; d 为光栅周期宽度; ω 为像元边长; D 为单周期 x 或 y 方向含有的像元数量; $\text{round}(\cdot)$ 为对某数取最接近的整数; A 和 B 为编码系数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为某数向下取整; N^2 为光栅含有周期数。将由一系列高度

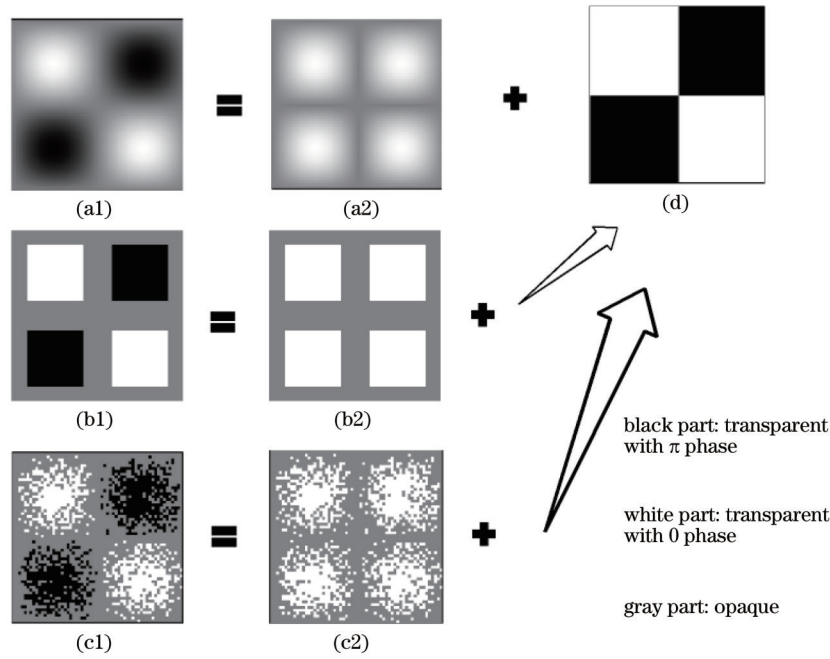


图 2 四波前横向剪切干涉的分束器件示意图。(a1) 理想正弦光栅;(a2) 理想振幅光栅;(b1) 改进的哈特曼模板;(b2) 二值振幅光栅;(c1) 随机编码混合光栅;(c2) 随机编码振幅光栅;(d) 相位光栅

Fig. 2 Schematic of beam splitter components with QWLSI. (a1) Ideal sinusoidal grating; (a2) ideal amplitude grating; (b1) improved Hartmann mask; (b2) binary amplitude grating; (c1) random encoded grating; (c2) random encoded amplitude grating; (d) phase grating

分布为 S_{mn} 的窗函数组成的透过率函数称为量化光栅透过率函数,并将具有该透过率函数的光栅称为量化光栅。式(1)和(2)表明,衍射场中存在的高级次衍射光与其编码系数 A 和 B 有关,在实际加工中受限于光栅线宽和最小像元的尺度,衍射光场中存在的高级次衍射光不能被完全抑制,其幅值相对 ± 1 级衍射光也不能被忽略。

为了进一步抑制衍射光场中的高级次衍射光,本课题组改进了随机光栅的编码规则,提出了全局随机编码约束。基于光通量约束的原有随机光栅编码规则在一个周期内对于理想正弦光栅进行近似^[28],而全局随机编码规则将近似扩展到整块光栅上,使得所有周期中第 x 行、第 y 列处像元的透过率绝对值均值等于理想正弦光栅单个周期内第 x 行、第 y 列处的透过率绝对值。当 k, k' 的值分别为 $c \cdot D \pm 1$ 和 $c' \cdot D \pm 1$ 时,全局随机编码光栅在衍射级次 (k, k') 处的振幅为

$$A_{\text{mp}}\left(\frac{k}{d}, \frac{k'}{d}\right) = \omega^2 \cdot N^2 \cdot \text{sinc}\left(\frac{c \cdot D \pm 1}{D}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{c' \cdot D \pm 1}{D}\right) \cdot \frac{D^2}{-2}, \quad (3)$$

式中: $\text{sinc } x = \sin(\pi x)/(\pi x)$; c, c' 为任意整数。全局随机编码规则使各个周期内同一位置像元的透过率在光栅的全局范围内随机分布,具有更高的随机性。由式(3)可知,全局随机编码约束进一步抑制了除 $c \cdot D \pm 1$ 和 $c' \cdot D \pm 1$ 以外的所有高级次衍射光。基于光通量约束的随机编码混合光栅对应的量化光栅的透过率函数

与理想正弦函数差别较大,故量化光栅衍射光场中不能达到完全抑制除了 4 束一级衍射光以外的高级次衍射光的效果;全局随机编码混合光栅的透过率函数已经接近理想正弦光栅的透过率函数,如图 3 所示。基于该约束设计的全局随机编码光栅可以获得接近任意透过率分布光栅的衍射光场^[43]。将全局随机光栅编码规则应用于 QWLSI,设计了全局随机编码混合光栅来接近理想正弦光栅^[44]。理论计算和仿真结果表明,全局随机编码混合光栅在与原有随机编码光栅具有相同的光栅周期和像元大小的情况下,成功地抑制了像元光以外的所有高级次衍射光,在干涉图样对比度、剪切比调节自由度和工作带宽等方面均优于原随机编码混合光栅。

值得一提的是,当待测波前存在高阶像差时,需要采用周期较小的光栅,以提高干涉仪可探测的空间频率。当光栅周期较小时,由于光栅周期内的网格数和像元数变少,基于光通量约束的原有随机编码混合光栅会产生较强的高级次衍射光,此时全局随机编码混合光栅的性能优势将更加明显。

全局随机编码混合光栅需要将振幅光栅和相位光栅精确对准,加工难度大;同时,全局随机编码混合光栅中使用了振幅光栅,导致光的透过率受到影响。本课题组提出一种基于全局随机编码约束的纯相位光栅^[45],该光栅在与全局随机编码混合光栅周期和像元大小相同的情况下,也能够达到相同的抑制高级次衍射光的效果。同时,在全局随机编码相位光栅的加工过程中,不需要套刻振幅光栅,具有加工难度小、光透

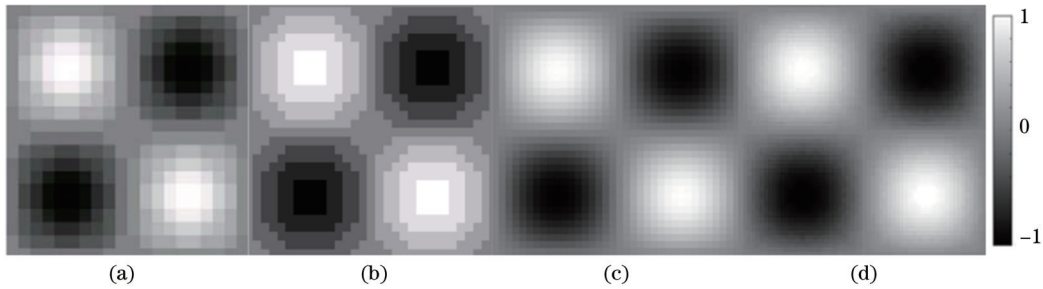


图 3 不同光栅的透过率图^[44]。(a) 基于光通量约束的随机编码混合光栅(编码系数 (A, B) 取 $(20, 3)$);(b) 基于光通量约束的随机编码混合光栅(编码系数 (A, B) 取 $(30, 2)$);(c)与单周期内全局随机编码混合光栅($D \times D$ 设为 40×40)等效的量化光栅;(d)单周期内的理想二维正弦光栅

Fig. 3 Diagrams of transmittance of different gratings^[44]. (a) Randomly encoded hybrid grating based on luminous flux constraint (encoding coefficient (A, B) is $(20, 3)$); (b) randomly encoded hybrid grating based on luminous flux constraint (encoding coefficient (A, B) is $(30, 2)$); (c) quantized grating corresponding to globally random encoded hybrid grating in a single period ($D \times D$ is 40×40); (d) ideal two-dimensional sinusoidal grating in a single period

过率高的优势。

3 多方向横向剪切干涉图处理

干涉图处理技术是光学干涉测量的关键技术,其核心问题是如何利用干涉条纹的强度分布图正确地提取待测波前每一点的相位值。QWLSI图像处理一般包括干涉图预处理、相位提取、相位展开和波前重构4个步骤,如图4所示。干涉图预处理是对CCD采集的原始干涉图进行滤波降噪、有效区域识别、条纹外插等处理。相位提取是利用时间调制、空间调制等手段,从

预处理后的干涉图中解算出尽量接近实际真值的相位值。由于四波前横向剪切干涉图通常含有4个方向的载波,相位提取结果仅为待测波前4个方向的差分相位处于 $(-\pi, \pi]$ 主值区间内的包裹值,必须经过相位展开,将相位包裹值加上或减去 2π 的整数倍,获得连续分布的差分相位分布。波前重构则是利用至少两个方向的差分相位分布,重建出待测波前的相位分布。本课题组在研究常规的干涉图像处理技术的基础上,对QWLSI干涉图像处理过程中遇到的特殊问题进行重点研究,并提出一系列解决方法。

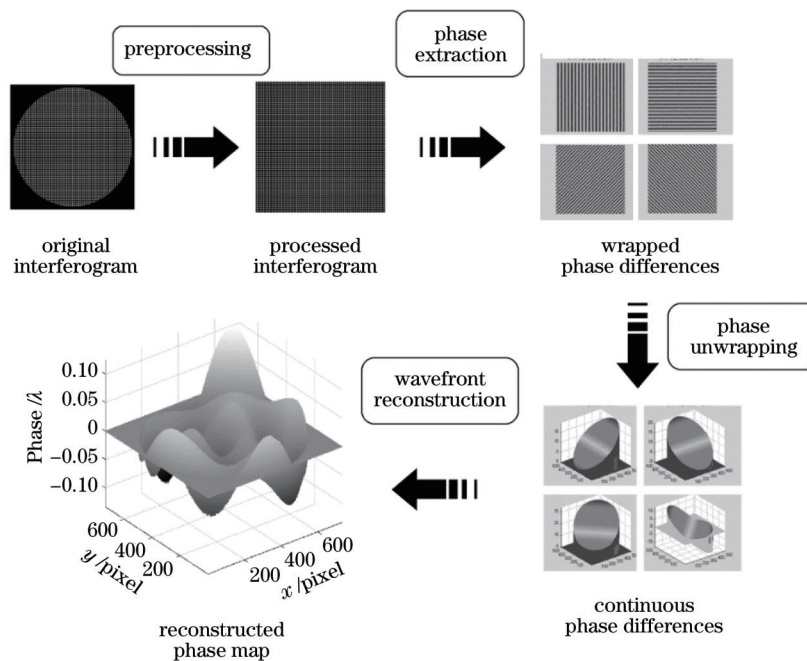


图 4 QWLSI图像处理流程图

Fig. 4 Image processing flow chart of QWLSI

干涉图预处理方面,重点研究了适用于QWLSI二维干涉图的延拓技术。QWLSI通常采用二维傅里叶变换等空域调制方法进行相位提取,因此需要对干

涉图进行空域延拓处理,减小边界效应所引起的测量误差^[46]。现有的干涉图延拓方法如边界对称反转外延法^[47]、边缘极值点为原点的外插法^[48]、傅里叶变换迭代

法等^[49-50]主要应用一维干涉图的延拓。本课题组提出一种利用线性载波频率的二维干涉图延拓技术^[51],通过对原有干涉图 $I(x, y)$ 进行快速傅里叶运算,可以得到正交方向上的两个线性载波频率,再利用这两个载波频率构建两幅干涉图。为使这两幅干涉图与原干涉图在正交方向上连续,利用最小二乘法计算干涉图表达式中的常数项,结合之前的两个载波频率,可以生成与原干涉图匹配的拓展图 $I_{\text{carrier}}(x, y)$,再使用原始的干涉图的有效区域代替生成干涉图中对应的部分,可以得到延拓后的干涉图 $I_{\text{extrapolation}}(x, y)$,如式(4)所示,其中 valid-region 表示原始干涉图的干涉区域, filled-region 表示进行延拓的区域。仿真结果表明,这种方法可以有效地抑制 QWLSI 干涉图在计算中的频谱泄漏问题,提高了干涉图处理精度^[51]。

$$I_{\text{extrapolation}}(x, y) = \begin{cases} I(x, y), & (x, y) \in \text{valid-region} \\ I_{\text{carrier}}(x, y), & (x, y) \in \text{filled-region} \end{cases} \quad (4)$$

相位提取方面,重点研究了适用于 QWLSI 二维干涉图的虚光栅移相莫尔条纹法,解决了同一幅干涉图在相同的采样频率下,使用现有的傅里叶变换法边缘误差较大、抗噪性较差的问题。提出一种二维虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法,仿真和实验结果表明,该方法能高精度地提取两个正交方向的差分相位信息,边缘区域的提取精度明显优于傅里叶变换法。相比于传统的双光束横向剪切干涉, QWLSI 的一个显著优势是其干涉图中含有 4 个方向的差分相位信息,使用这 4 个方向的差分相位信息,可以显著增强波前重构算法的抗噪性^[52]。针对此问题,提出一种四向虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法,根据采集的 QWLSI

干涉图的载波频率选取合适的参考频率,构造 8 幅相移量不同的二维虚光栅,之后与采集的干涉图相乘,可以得到 8 幅莫尔条纹图,并对莫尔条纹图通过傅里叶变换得到的傅里叶谱进行低通滤波后,再进行傅里叶逆变换,可以得到 8 幅低频莫尔条纹强度图,最后通过八步相移算法得到 QWLSI 干涉图的包裹相位。这种方法能高精度地提取 4 个方向的差分相位信息^[53],是一种通过优化设计虚光栅载波频率和滤波窗来减小相位提取中频谱泄漏的方法^[54]。

相位展开方面,重点研究了适用于 QWLSI 的并行相位展开算法,以提高干涉图的处理速度。研究了质量图导引并行相位展开算法,用计算机 CUDA 编程平台实现了导数方差图、最大相位梯度图、伪相关质量图生成算法的并行处理,仿真结果表明导数方差图处理速度最快^[55]。研究了离散余弦变换最小二乘并行相位展开算法,并行求解包裹相位的二阶偏微分,然后对二维离散余弦变换求解泊松方程的过程进行并行处理,在相同条件下,其运算速度较原来的相位展开算法提升了近 10 倍,明显提高了干涉图处理效率,而且随着干涉图像素数的增加,并行处理效果更优^[56]。

波前重构方面,重点研究了同时利用 QWLSI 多个方向的波前差分相位来重构待测波前的算法,以提高波前重构的精度和抗噪性。提出一种利用差分 Zernike 圆多项式的“两向四剪切”波前重构方法^[57]:若使用 $W(x, y)$ 表示待测波前, $\Delta W_x(x, y)$ 与 $\Delta W_y(x, y)$ 分别表示 x 与 y 方向上的剪切波前, s 表示剪切量,则 $\Delta W_x(x, y)$ 与 $\Delta W_y(x, y)$ 可以分别用式(5)与式(6)表示,在使用差分 Zernike 圆多项式进行波面拟合时,可以增加使用的信息量。

$$\Delta W_x(x, y) = [W(x + s/2, y + s/2) - W(x - s/2, y + s/2) + W(x + s/2, y - s/2) - W(x - s/2, y - s/2)]/2, \quad (5)$$

$$\Delta W_y(x, y) = [W(x + s/2, y + s/2) - W(x + s/2, y - s/2) + W(x - s/2, y + s/2) - W(x - s/2, y - s/2)]/2. \quad (6)$$

两向四剪切波前重构方法利用 2 个正交方向的 4 个波前差分相位进行重构,当其他条件相同时,与传统的“两向两剪切”波前重构方法相比,该方法具有更好的抗噪特性。为了进一步提高波前重构的抗噪性,提出一种利用差分 Zernike 圆多项式的“四向六剪切”波前重构方法^[58],在上述“两向四剪切”的基础上,增加了如式(7)、(8)所描述的 45° 方向和 135° 方向的剪切波前,其中 $\Delta W_{45}(x, y)$ 与 $\Delta W_{135}(x, y)$ 分别表示 45° 方向和 135° 方向的剪切波前。然后,将 4 个方向的 6 个波前差分相位分别用差分 Zernike 圆多项式的线性组合表示,可实现不同剪切比下的波前重构。与传统的利用

离散傅里叶变换的“四向六剪切”波前重构方法^[52]相比,该方法具有更高的精度,更适用于高数值孔径光刻投影物镜、显微物镜等高分辨光学系统的像差精密测量。另外,在不同剪切比下,该方法均可实现高精度的波前重构,克服了离散傅里叶变换法仅适用于小剪切比的不足。

$$\Delta W_{45}(x, y) = W(x + s/2, y - s/2) - W(x - s/2, y + s/2), \quad (7)$$

$$\Delta W_{135}(x, y) = W(x + s/2, y + s/2) - W(x - s/2, y - s/2). \quad (8)$$

4 误差校准

QWLSI 的误差源主要有光栅的加工误差、光栅与探测器的装调误差等。光栅的加工误差会影响其衍射性能,进而影响干涉仪的测量精度。光栅与探测器的装调误差会在测量结果中引入额外的像差,这些像差作为系统误差同样会影响干涉仪的测量精度。

针对使用改进的哈特曼板作为分束器件的 QWLSI,本课题组在 2013 年提出一种利用傅里叶变换理论的光栅加工误差容限分析方法^[59],分析了光栅占空比误差、图形偏移误差、光栅基底刻蚀深度误差以及光栅侧壁角误差的加工误差容限。例如:理想情况下改进哈特曼板的远场衍射场中 (m, n) 级衍射

光的强度可以用式(9)的 $I(m, n)$ 表示;存在光栅占空比误差 ζ 时, $I(m, n)$ 的表达式变为式(10)的 $I(m, n, \zeta)$;用式(11)的 $I_{\text{RLI}}(m, n, \zeta)$ 表示含有光栅占空比误差 ζ 时,各级衍射光相对 $(+1, -1)$ 级衍射光的光强,之后可以依据需要的各级衍射光相对强度来确定 ζ 的范围。图形偏移误差、光栅基底刻蚀深度误差以及光栅侧壁角误差等加工误差均可同理分析^[60],此处不再赘述。

$$I(m, n) = \left| \frac{4}{\pi^2 mn} \sin\left(\frac{\pi m}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi m}{3}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{3}\right) \right|, \quad (9)$$

$$I(m, n, \zeta) = \left| \frac{4}{\pi^2 mn} \sin\left(\frac{\pi m}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin\left[\frac{\pi m}{2}\left(\frac{2}{3} + \zeta\right)\right] \sin\left[\frac{\pi n}{2}\left(\frac{2}{3} + \zeta\right)\right] \right|^2, \quad (10)$$

$$I_{\text{RLI}}(m, n, \zeta) = \frac{I(m, n, \zeta)}{I(1, -1, \zeta)} \times 100\%. \quad (11)$$

针对使用改进的哈特曼板作为 QWLSI 的分束器件,本课题组在 2014 年提出一种利用光波干涉理论和波前重构算法,分析光栅与探测器的装调误差在测量结果中引入像差灵敏度的方法^[61],在极坐标下,用 δ_x 与 δ_y 分别表示光栅的装调误差在干涉图 x 与 y 方向的差分相位中引入的额外相位差。光栅相对于探测器的倾斜所引入的额外相位差可以表示为

$$\begin{cases} \delta_x = \frac{4\pi R}{P_c} [(\cos \alpha - 1) \cdot \rho \cos \phi] \\ \delta_y = \frac{4\pi R}{P_c} [(\cos \beta - 1) \cdot \rho \sin \phi] \end{cases}, \quad (12)$$

式中: R 表示出瞳半径; P_c 表示光栅周期; ρ 与 ϕ 分别表示归一化半径与方向角; α 与 β 分别表示 x 与 y 方向上光栅相对于探测器的倾斜角。光栅相对于探测器的倾斜所引入的相位差在待测波面上表现为离焦像差,通过进一步的波前重构就可以得到光栅相对于探测器的倾斜与其产生的离焦像差的关系^[61]。但是该方法仅适用于大剪切比的横向剪切系统。当系统剪切比较小时,光栅与探测器的装调误差在测量结果中除了引入额外的离焦,还会引入相对较大的像散。本课题组在 2021 年定量分析了小剪切比 QWLSI 中,光栅与探测器的相对倾斜在测量结果中引入的像散误差^[62],即

$$\begin{cases} a_4 = \frac{\pi R \lambda}{2s P_c} (\cos \alpha - 1) \\ a_5 = \frac{\pi R \lambda}{2s P_c} (\cos \beta - 1) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: a_4 与 a_5 分别表示 Zernike 多项式中 Z_4 、 Z_5 (x 、 y 方向像散) 的系数。针对使用全局随机编码相位光栅作

为分束器件的 QWLSI,本课题组在 2021 年利用傅里叶光学理论分析了全局随机编码相位光栅的加工误差,得到全局随机编码相位光栅的加工误差容限^[63]。随机编码相位光栅的刻蚀深度误差和侧壁角误差与随机编码混合光栅的加工误差接近^[64],但是不需要精度达到微米量级的套刻对准,显著降低了工艺复杂度和加工难度。

5 QWLSI 原理装置

在关键技术研究的基础上,本课题组开发了 QWLSI 的原理装置,实物如图 5(a) 所示。该装置可自由切换,选用改进的哈特曼板、随机编码混合光栅或随机编码相位光栅作为分束器件,通过沿光轴方向移动分束器件实现干涉仪剪切比的调节。本课题组开发了 QWLSI 的干涉图处理软件,图 5(b) 为该软件的操作界面。软件采用 MATLAB 开发,包含干涉仪参数设置、干涉图采集、干涉图处理、结果显示 4 个模块^[56]。其中,干涉图处理模块包括相位提取、相位展开和波前重构 3 个部分,集成了本课题组提出的二维虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法^[52]、四向虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法^[54]、利用差分 Zernike 圆多项式的“两向四剪切”^[57]和“四向六剪切”^[58]波前重构算法等。

建立了 QWLSI 的零检验测试光路,光路中包含波长为 635 nm 的光源、光栅、光电自准直仪、CCD 探测器,并标定了干涉仪的绝对测量精度^[63]。如图 6 所示,利用单模光纤产生的理想球面波作为基准,四波前横向剪切干涉仪与理想点光源的距离大于 1 m,入射光波仅为整个球面波前中心的很少一部分,因此光栅上的入射光可近似为理想平面波。利用本课题组提出的装调误差校准方法,去除了光栅倾斜在测量结果中引入的像散误差。在像散误差校准后,四波前横向剪

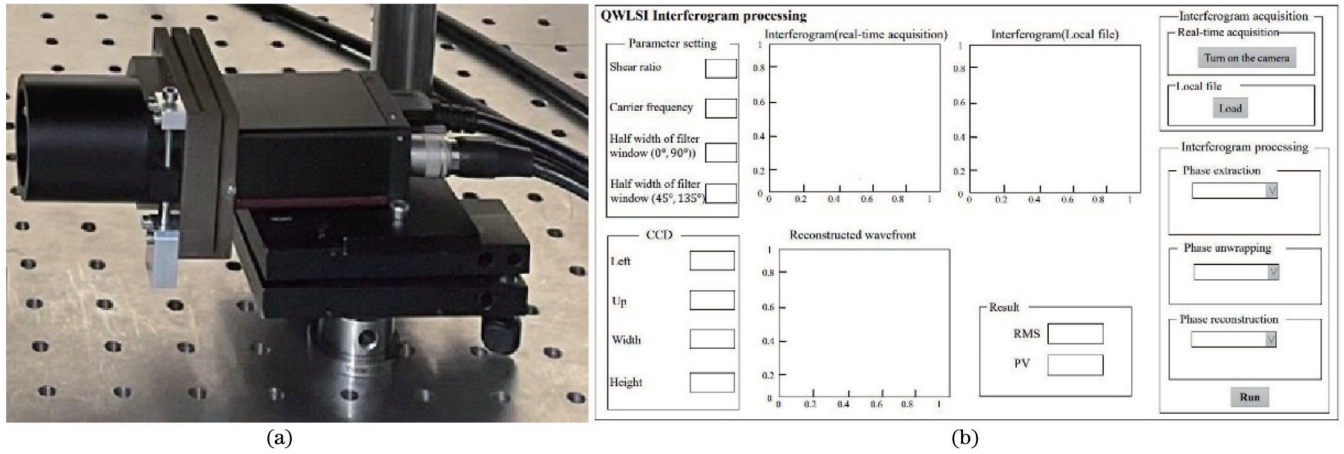


图 5 四波前横向剪切干涉仪。(a)实物图;(b)干涉图处理软件操作界面

Fig. 5 Quadri-wave lateral shearing interferometer. (a) Photo; (b) interferogram processing control panel

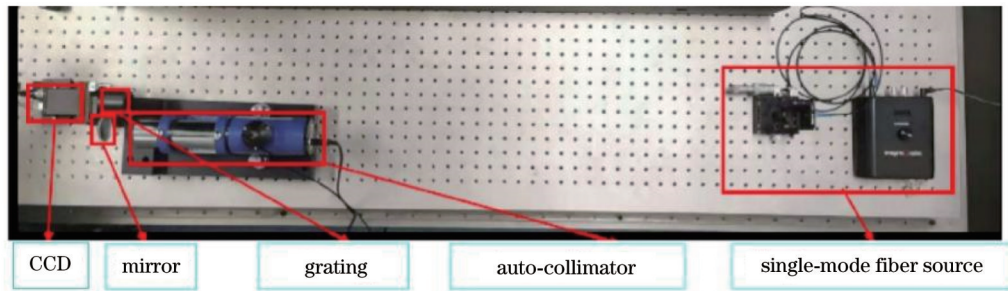


图 6 四波前横向剪切干涉仪的零检验测试光路

Fig. 6 Zero-check test optical path for quadri-wave lateral shearing interferometer

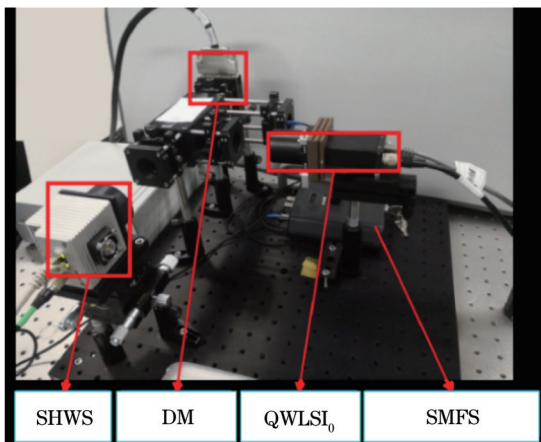
切干涉仪的绝对测量精度(RMS)达到了 0.0038λ (2.4 nm, λ=635 nm)。

建立了 QWLSI 的动态响应测试实验系统,如图 7 所示,系统主要包括波长为 635 nm 的激光光源、可变形反射镜、四波前横向剪切干涉仪、夏克-哈特曼波前传感器

器。其中可变形反射镜可以产生前 36 项 Zernike 多项式系数表示的像差。将夏克-哈特曼波前传感器、可变形反射镜与四波前横向剪切干涉仪置于系统共轭位置处,利用可变形反射镜产生一系列线性的特定单项 Zernike 像差。将四波前横向剪切干涉仪的测量结果与商品化的夏克-哈特曼波前传感器的测量结果进行对比,检验四波前横向剪切干涉仪测量各项 Zernike 像差的动态响应,部分实验结果如图 8 所示。实验结果表明,四波前横向剪切干涉仪对含有第 4~36 项单项 Zernike 像差入射波前的测量结果具有良好的响应线性度,且与夏克-哈特曼波前传感器的测量结果基本一致。

6 总结与展望

以 QWLSI 为代表的多光束横向剪切干涉技术,仅需要一幅干涉图便能提取多个方向的波前相位差分信息,实现瞬态波前的实时检测,是精度高、灵敏度和动态范围可调的通用型波前测量仪器的发展方向。近年来,国内外相关研究机构在该领域的研究工作聚焦在以光栅为分束器件的四波前横向剪切干涉技术,开发出以改进的哈特模板、随机编码光栅等为分束器件的 QWLSI,这些 QWLSI 在多个领域得到了广泛应用。本课题组还开展了 QWLSI 的分光器件设计、多方向横向剪切干涉图处理、误差校准等关键技术的研究



SHWS: Shack-Hartmann wavefront sensor;
DM: deformable mirror;
QWLSI₀: quadri-wave lateral shearing interferometer;
SMFS: single-mode fiber source

图 7 四波前横向剪切干涉仪的动态响应测试实验系统

Fig. 7 Experimental system for dynamic response testing of quadri-wave lateral shearing interferometer

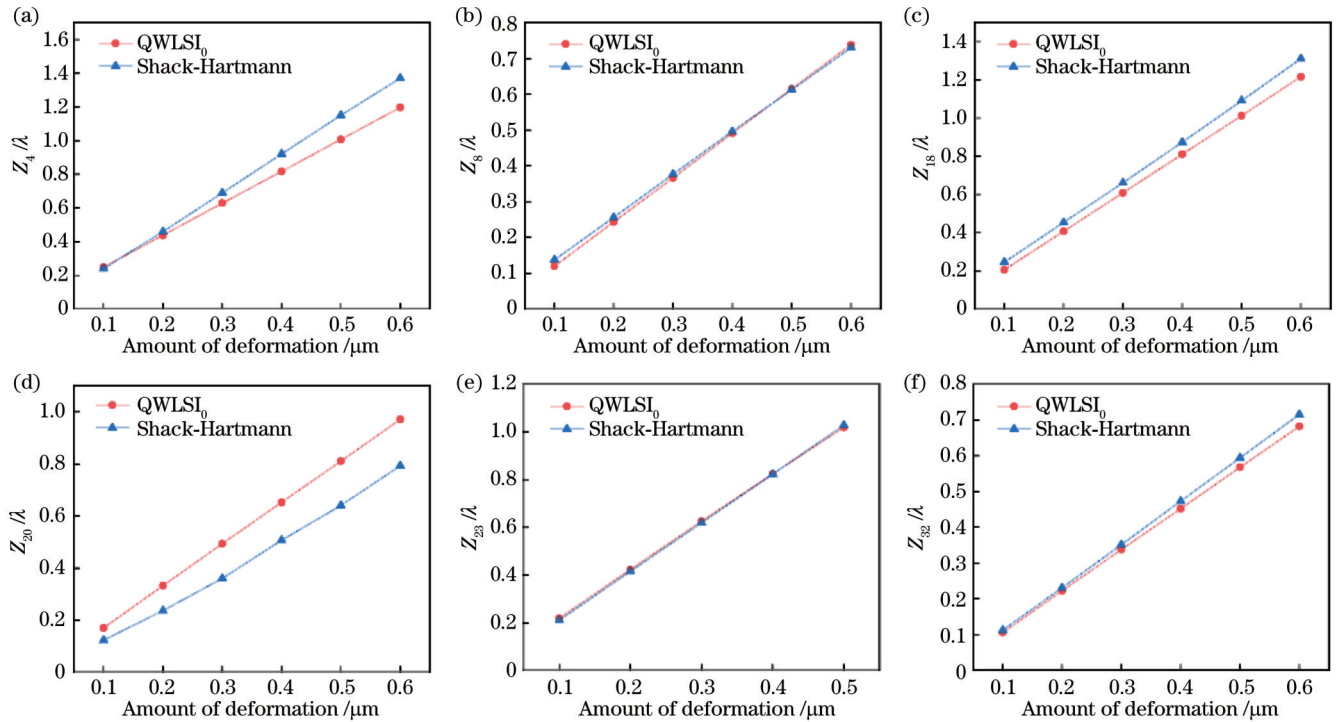


图 8 四波前横向剪切干涉仪和夏克-哈特曼波前传感器对单项 Zernike 像差响应的部分对比测量结果。(a) Z_4 ; (b) Z_8 ; (c) Z_{18} ; (d) Z_{20} ; (e) Z_{23} ; (f) Z_{32}

Fig. 8 Partial measurement results of quadri-wave lateral shearing interferometer and Shack-Hartmann wavefront sensors for the single Zernike aberration response. (a) Z_4 ; (b) Z_8 ; (c) Z_{18} ; (d) Z_{20} ; (e) Z_{23} ; (f) Z_{32}

究,并取得了一定的研究成果。在关键技术研究的基础上,开发出 QWLSI 的原理装置,该装置具有较高的绝对测量精度和较好的动态响应特性。

近年来 QWLSI 技术已在面形测量、相位成像方面展现了巨大的潜力,取得了显著的成果,但仍有一些理论与技术问题亟待突破。非球面元件面形测量方面,目前 QWLSI 已经应用到非球面检测领域,未来可开展的研究工作包括:QWLSI 与部分零位补偿镜结合起来扩大非零位系统的动态范围;QWLSI 与其他检测技术结合,解决传统干涉系统中光强匹配、环境扰动等方面的问题^[65]。光学系统像差测量方面,QWLSI 直接测量光学系统出射的球面波前时,会引入一定的系统误差,且该误差随着光学系统数值孔径的增大急剧增加^[66]。另外,QWLSI 的剪切量也与待测光学系统的数值孔径有关,而剪切量的准确性直接影响波前重构精度。因此需要研究在大孔径角球面波入射条件下适用于 QWLSI 的高精度系统误差标定技术和剪切量标定技术。相位显微技术方面,目前对于生物样本的研究还处于初步探索阶段^[67],对于适用于波前畸变大、高频信息多的生物组织的相位显微技术鲜有报道,主要是因为此类生物样品结构复杂,目前缺乏从相位图有效反演出复杂细胞结构的高精度方法。因此,异质、复杂生物样品的相位显微技术是未来的主要发展趋势之一。QWLSI 具有连续可调的动态范围,下一步的工作中,将研究进一步提高 QWLSI 可测波前畸变的幅度

和空间频率的关键技术,开展实用化、小型化的仪器研制,开发 QWLSI 在相位成像方面的应用。

参 考 文 献

- [1] 金国藩. 激光测量学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1990.
Jin G F. Laser measurement[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1990.
- [2] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
Yang G G. Modern optical testing technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997.
- [3] 陈进榜, 陈磊, 王青, 等. 大孔径移相式 CO₂ 激光干涉仪[J]. 中国激光, 1998, 25(1): 31-36.
Chen J B, Chen L, Wang Q, et al. A large aperture phase shifting CO₂ laser interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(1): 31-36.
- [4] Maire G, Girard J, Drsek F, et al. Experimental inversion of optical diffraction tomography data with a nonlinear algorithm in the multiple scattering regime[J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(9): 746-755.
- [5] Roddier F, Roddier C. Wavefront reconstruction using iterative Fourier transforms[J]. Applied Optics, 1991, 30(11): 1325-1327.
- [6] Rimmer M P, Wyant J C. Evaluation of large aberrations using a lateral-shear interferometer having variable shear[J]. Applied Optics, 1975, 14(1): 142-150.
- [7] Harbers G, Kunst P J, Leibbrandt G W R. Analysis of lateral shearing interferograms by use of Zernike polynomials[J]. Applied Optics, 1996, 35(31): 6162-6172.
- [8] Liu X J. A polarized lateral shearing interferometer and application for on-machine form error measurement of engineering surfaces[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003.
- [9] Ronchi V. Le Frange di Combinazioni Nello Studio delle Superficie e dei Sistemi Ottici[J]. Riv. d'Optica e Meccanica di

- Precisione, 1923, 2(4): 9-35.
- [10] Murty M V R K. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. Applied Optics, 1964, 3(4): 531-534.
- [11] Hariharan P. Simple laser interferometer with variable shear and tilt[J]. Applied Optics, 1975, 14(5): 1056-1057.
- [12] Griffin D W. Phase-shifting shearing interferometer[J]. Optics Letters, 2001, 26(3): 140-141.
- [13] Disawal R, Dhanotia J, Prakash S. Phase-shifting lateral shearing interferometry using wedge-plate and interferometric grating[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7534-7539.
- [14] Primot J. Three-wave lateral shearing interferometer[J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6242-6249.
- [15] Primot J, Sogno L. Achromatic three-wave (or more) lateral shearing interferometer[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(12): 2679-2685.
- [16] Hasegawa M, Ouchi C, Hasegawa T, et al. Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5533: 27-36.
- [17] Kato S, Ouchi C, Hasegawa M, et al. Comparison of EUV interferometry methods in EUVA project[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5751: 110-117.
- [18] Sugisaki K, Okada M, Zhu Y C, et al. Comparisons between EUV at-wavelength metrological methods[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5921: 59210D.
- [19] Ouchi C, Kato S, Hasegawa M, et al. EUV wavefront metrology at EUVA[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6152: 61522O.
- [20] Sugisaki K, Okada M, Otaki K, et al. EUV wavefront measurement of six-mirror optics using EWMS[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6921: 69212U.
- [21] Primot J, Guérineau N. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard[J]. Applied Optics, 2000, 39(31): 5715-5720.
- [22] Guérineau N, Harchaoui B, Primot J, et al. Generation of achromatic and propagation-invariant spot arrays by use of continuously self-imaging gratings[J]. Optics Letters, 2001, 26(7): 411-413.
- [23] Chanteloup J C F, Cohen M. Compact high resolution four wave lateral shearing interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5252: 282-290.
- [24] Velghe S, Primot J, Guérineau N, et al. Advanced wave-front sensing by quadri-wave lateral shearing interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6292: 62920E.
- [25] Patorski K, Służewski Ł, Trusiak M. Single-shot 3×3 beam grating interferometry for self-imaging free extended range wave front sensing[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4417-4420.
- [26] Zhu Y, Sugisaki K, Okada M, et al. Experimental comparison of absolute PDI and lateral shearing interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5752: 1192-1199.
- [27] Zhu W H, Li J P, Chen L, et al. Systematic error analysis and correction in quadriwave lateral shearing interferometer[J]. Optics Communications, 2016, 380: 214-220.
- [28] Ling T, Liu D, Yue X M, et al. Quadriwave lateral shearing interferometer based on a randomly encoded hybrid grating[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2245-2248.
- [29] Ling T, Liu D, Yang Y Y, et al. Off-axis cyclic radial shearing interferometer for measurement of centrally blocked transient wavefront[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2493-2495.
- [30] Ling T, Yang Y Y, Yue X M, et al. Common-path and compact wavefront diagnosis system based on cross grating lateral shearing interferometer[J]. Applied Optics, 2014, 53(30): 7144-7152.
- [31] Ling T, Liu D, Yang Y Y, et al. Compact wavefront diagnosis system based on the randomly encoded hybrid grating[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 963329.
- [32] Ling T, Yang Y Y, Liu D, et al. Retrieval of phase distributions from the quadriwave lateral shearing interferogram obtained by randomly encoded hybrid grating[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 96332G.
- [33] Velghe S, Brahmi D, Boucher W, et al. MWIR and LWIR wavefront sensing with quadri-wave lateral shearing interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7300: 73000T.
- [34] Velghe S, Haidar R, Guérineau N, et al. *In situ* optical testing of infrared lenses for high-performance cameras[J]. Applied Optics, 2006, 45(23): 5903-5909.
- [35] Zhang R, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Non-null testing of the aspheric surface using a quadriwave lateral shearing interferometer[J]. Applied Optics, 2020, 59(18): 5447-5456.
- [36] Toulon B, Primot J, Guérineau N, et al. Segmented wave-front measurements by lateral shearing interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6671: 66710P.
- [37] Ling T, Jiang J B, Zhang R, et al. Quadriwave lateral shearing interferometric microscopy with wideband sensitivity enhancement for quantitative phase imaging in real time[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 9.
- [38] Velghe S, Primot J, Guérineau N, et al. Accurate and highly resolving quadri-wave lateral shearing interferometer, from visible to IR[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5776: 134-143.
- [39] 岳秀梅, 杨甬英, 凌瞳, 等. 可用于四波横向剪切干涉波前检测的随机编码混合光栅设计[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008006.
- Yue X M, Yang Y Y, Ling T, et al. Design of randomly encoded hybrid grating for wavefront testing by quadriwave lateral shearing interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1008006.
- [40] Ling T, Yang Y Y, Liu D, et al. General measurement of optical system aberrations with a continuously variable lateral shear ratio by a randomly encoded hybrid grating[J]. Applied Optics, 2015, 54(30): 8913-8920.
- [41] Li J E, Tang F, Wang X Z, et al. Analysis of lateral shearing interferometry without self-imaging limitations[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8070-8079.
- [42] 王健年. 全局随机编码光栅横向剪切干涉技术基础研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- Wang J N. Basic studies on the lateral shearing interferometry with globally random encoded grating[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [43] 刘克, 王健年, 李艳秋. 全局随机编码二值化衍射光栅: CN108732669B[P]. 2021-04-06.
- Liu K, Wang J N, Li Y Q. Global random coded binary diffraction grating: CN108732669B[P]. 2021-04-06.
- [44] 刘克, 王健年, 李艳秋. 一种基于全局随机编码规则的混合衍射光栅: CN108761605B[P]. 2021-05-04.
- Liu K, Wang J N, Li Y Q. A hybrid diffraction grating based on global random encoding rules: CN108761605B[P]. 2021-05-04.
- [45] 刘克, 王健年, 李艳秋. 一种基于全局随机编码规则的位相衍射光栅: CN108761604A[P]. 2018-11-06.
- Liu K, Wang J N, Li Y Q. A phase diffraction grating based on global random encoding rules: CN108761604A[P]. 2018-11-06.
- [46] Talamonti J J, Kay R B, Krebs D J. Numerical model estimating the capabilities and limitations of the fast Fourier transform technique in absolute interferometry[J]. Applied Optics, 1996, 35(13): 2182-2191.
- [47] Bone D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. Applied Optics, 1986, 25(10): 1653.
- [48] 刘廷瑞, 何海涛. 基于 FFT 干涉图处理的外插修正算法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2003, 9(5): 456-458.
- Liu T R, He H T. A modified algorithm for fringe-pattern extrapolation based on FFT analysis[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2003, 9(5): 456-458.
- [49] 苏俊宏, 陈磊, 朱日宏. 干涉图空域延拓技术研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 397-400.

- Su J H, Chen L, Zhu R H. Interferogram region spreading technology in spatial domain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 397-400.
- [50] 王雨雷, 吕志伟, 何伟明, 等. 采用一种新的外推延拓法重构激光波前[J]. *中国激光*, 2006, 33(suppl): 401-404.
Wang Y L, Lü Z W, He W M, et al. Wavefront reconstruction by means of a new extrapolation method of fringe-prolongation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(suppl): 401-404.
- [51] Wang H, Li Y Q, Liu K, et al. Two-dimensional interferogram extrapolation method using linear carrier-frequency[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8417: 841709.
- [52] Velghe S, Primot J, Guéroux N, et al. Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(3): 245-247.
- [53] 陈晨. 二维干涉图的虚光栅移相莫尔条纹相位提取研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Chen C. Research on virtual grating phase shifting Moiré fringe phase extraction for two-dimension interferogram[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [54] Liu K, Ji Z B, Chen C, et al. Phase extraction using multi-directional Moiré fringes for multi-lateral shearing interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 81-90.
- [55] Wang L, Liu K, Li Y Q. Quality map guided parallel phase unwrapping algorithm for multi-lateral shearing interferometry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11927: 119270R.
- [56] 王亮. 四波横向剪切干涉仪的并行相位展开算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.
Wang L. Research on parallel phase unwrapping algorithm of quadri-wave lateral shearing interferometry[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2021.
- [57] Wang H, Li Y Q, Liu K, et al. Improved wavefront reconstruction using difference Zernike polynomials for two double-shearing wavefronts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8550: 855013.
- [58] Liu K, Wang J N, Wang H, et al. Wavefront reconstruction for multi-lateral shearing interferometry using difference Zernike polynomials fitting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 75-81.
- [59] Wang H, Li Y Q, Liu K. Approach to characterize manufacture tolerances of two-dimensional cross-phase grating[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 104101.
- [60] 汪海. 正交位相光栅横向剪切干涉仪关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
Wang H. Research on key techniques of cross phase grating lateral shearing interferometer[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [61] Wang H, Li Y Q, Liu K. Misalignment effects of cross-phase grating lateral shearing interferometer and its alignment technique [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 054103.
- [62] Si Y W, Liu K, Li Y Q, et al. Calibration of the astigmatism errors induced by misalignment of quadri-wave lateral shearing interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11927: 119270Q.
- [63] 司义威. 四波面横向剪切干涉仪误差分析与校准技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.
Si Y W. Error analysis and calibration of quadri-wave lateral shearing interferometer[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2021.
- [64] 岳秀梅. 用于波前传感的随机编码混合光栅设计及误差分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Yue X M. Design and error analysis of randomly encoded hybrid grating for wavefront sensing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [65] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 161-186.
Liang Z J, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186.
- [66] 刘志祥. 二维剪切干涉检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
Liu Z X. Wavefront aberration measurement technology based on two-dimensional lateral shearing interferometry[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [67] 钟慧, 李艳秋, 刘克, 等. 嵌入式相位传感的多功能 Stokes-Mueller 偏振仪[J]. *光学学报*, 2023, 43(2): 0212003.
Zhong H, Li Y Q, Liu K, et al. Multifunctional Stokes-Mueller polarimeter based on embedded phase sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(2): 0212003.

Key Technologies of Quadri-Wave Lateral Shearing Interferometer

Liu Ke*, Zhang Xiaotian, Zhong Hui, He Fei, Liu Shuhao, Li Yanqiu**

Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Significance As a significant optical precision measuring technology, optical interferometry is known for its wavelength-level measurement accuracy. As the industry calls for higher demands on measurement accuracy, the requirements on the sensing range of measurement methods are also increasingly wide. Additionally, due to the influence of human traffic, construction, and other factors, some measurement methods insensitive to environmental changes should be urgently proposed. These demands on the industry drive the development of optical interferometry. A lot of interference testing techniques have emerged in the development of optical interferometry. One of these techniques is lateral shearing interferometry which is common optical path interferometry and features a wide detection range and low need for environmental stability or coherence of the light source. As a result, this kind of interferometry has a variety of applications.

The lateral shearing interferometry originated from the Ronchi test in 1923 with a history of one hundred years, it can be divided into double-beam lateral shearing interferometry and multi-beam lateral shearing interferometry. The double-

beam lateral shearing interferometry needs at least two interferograms with different shear directions to recover the full wavefront phase information. This is because the interferogram of double-beam lateral shearing interferometry only contains the wavefront phase information about the shear direction, while this problem is resolved by multi-beam lateral shearing interferometry. Through this technology, the wavefront can be copied into multiple wavefronts to different emission angles at the same time, and then a multi-beam lateral shear interferogram is formed over the overlapping region of the observation surface. Therefore, each interferogram contains information about the phase differences between the wavefronts in multiple shear directions. Thus, only one interferogram is necessary to recover the wavefront to be measured through technical steps such as phase extraction, phase unwrapping, and wavefront reconstruction, which greatly improves the measurement efficiency and makes real-time detection of instantaneous wavefronts possible.

In multi-beam lateral shearing interferometry, it is necessary to copy incident light waves of multiple light waves simultaneously, which requires obtaining the mutually interfering working wavefront and removing unwanted advanced diffracted light, and the key is in the design of light-splitting elements. The initial development of multi-beam lateral shearing interferometry employs prisms with high work surface processing requirements as the light-splitting elements, and then gratings are adopted to reduce the difficulty in device processing and improve the accuracy of the interference wavefront vector direction. Compared with other traditional interference methods, this technique greatly simplifies the whole measurement system. Quadri-wave lateral shearing interferometry (QWLSI) is characterized by high accuracy, large dynamic range, high resolution, and strong anti-interference ability. For example, due to the system simplicity, the QWLSI based on randomly coded hybrid grating theoretically requires only a two-dimensional grating and CCD. Thus it is the research focus of many research institutions in China and abroad. In recent years, QWLSI has been applied to the aberration detection of lithography objective lens, the surface shape detection of aspheric elements, and the wavefront sensing of large aperture splicing telescope. However, in pursuit of higher measurement accuracy today, a series of improvements still need to be conducted. Therefore, summarizing the completed work is a necessity, which is beneficial to better guide future work.

Progress The development of our research team in several QWLSI areas is outlined. First, we describe the beam splitter design in QWLSI. Based on the randomly coded grating designed by Zhejiang University, our research group designs a global random coded hybrid grating that can better suppress the high-order secondary diffracted light and a phase-only grating based on global random coding constraint with low processing difficulty and high light transmittance. Second, we present our efforts to process interferograms. In the interferogram preprocessing field, we study the extension technique appropriate for two-dimensional QWLSI interferogram to reduce the measurement error caused by the boundary effect. The virtual grating phase-shifted Moiré fringe approach has been researched in terms of phase extraction. The present Fourier transform method's issues with substantial edge errors and weak anti-noise ability are resolved, and the algorithm's phase extraction accuracy and spectrum leaking are thoroughly investigated. In phase unwrapping, our team has studied the parallel phase unwrapping technique, which can speed up interferogram processing and significantly improve efficacy. Additionally, we research the algorithm of employing the wavefront differential phase of QWLSI in multiple directions to reconstruct the wavefront for improving the accuracy and anti-noise ability of wavefront reconstruction. Third, we investigate the QWLSI errors, including the processing error and installation and adjusting errors of the grating. Technical support for QWLSI installation and adjustment is provided by the quantitative results of the machining error tolerance of the grating and the influence of installation and adjustment error on measurement accuracy. The built fundamental QWLSI device based on the research on important technologies is then introduced, and the measurement accuracy in absolute terms is provided.

Conclusions and Prospects The QWLSI with gratings as beam splitters have been the recent research subject in pertinent academic institutions domestically and internationally. Our research team has created the fundamental QWLSI device based on important studies. As expanding the application of QWLSI in related sectors, we will conduct research on the essential technologies to enhance the amplitude and spatial frequency of the detectable wavefront distortion in QWLSI.

Key words optical detection; shearing interferometer; diffraction grating; phase extraction; wavefront reconstruction; error calibration