

## 基于四波横向剪切干涉的表面形貌测量方法

董正琼, 黄贤文, 徐仁, 祝仁龙, 周向东, 聂磊

Measurement method for surface topography based on quadriwave lateral shearing interferometry

引用本文:

董正琼, 黄贤文, 徐仁, 祝仁龙, 周向东, 聂磊. 基于四波横向剪切干涉的表面形貌测量方法[J]. [激光技术](#), 2024, 48(6): 906–912.

DONG Zhengqiong, HUANG Xianwen, XU Ren, et al. Measurement method for surface topography based on quadriwave lateral shearing interferometry[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2024, 48(6): 906–912.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. [光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响](#)

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 329–334.

### 2. [基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器](#)

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 41–45.

### 3. [锗硅非对称耦合量子阱相位调制器特性的研究](#)

引用本文: 石浩天, 江佩璘, 张意, 等. 锗硅非对称耦合量子阱相位调制器特性的研究[J]. [激光技术](#), 2023, 47(5): 587–591.

### 4. [基于霍夫变换的结构光场3维成像方法](#)

引用本文: 张志俊, 吴庆阳, 邓亦锋, 等. 基于霍夫变换的结构光场3维成像方法[J]. [激光技术](#), 2023, 47(4): 492–499.

### 5. [基于DPMZM的微波光子倍频激光雷达仿真分析](#)

引用本文: 阳琴, 陈孝林, 曾诚, 等. 基于DPMZM的微波光子倍频激光雷达仿真分析[J]. [激光技术](#), 2023, 47(6): 729–735.

文章编号: 1001-3806(2024)06-0906-07

## 基于四波横向剪切干涉的表面形貌测量方法

董正琼<sup>1</sup>, 黄贤文<sup>1</sup>, 徐仁<sup>1</sup>, 祝仁龙<sup>1</sup>, 周向东<sup>1</sup>, 聂磊<sup>1,2\*</sup>

(1. 湖北工业大学 机械工程学院 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 武汉 430068, 中国; 2. 襄阳湖北工业大学产业研究院, 襄阳 441100, 中国)

**摘要:** 为了解决传统四波横向剪切干涉测量系统中特定分光器件存在的加工难度高、光谱适用范围受限等问题, 利用空间光调制器替代分光光栅将入射光分为4束横向剪切相干子波, 通过灵活调整光栅的折射率来调制子波衍射效率以适应照明光源, 再根据子波两两干涉效应重建出反映样品折射率和高度信息的光程差分布, 即可实现宽光谱大尺寸范围内的表面形貌精确测量; 结合傅里叶变换法研究了入射光不同波长对光程差重建精度的影响规律, 并利用空间光调制器搭建了1套适用于可见光至近红外的宽光谱四波横向剪切干涉测量系统。结果表明, 该系统对石英标准样件刻蚀深度的测量结果为  $209.39 \text{ nm} \pm 1.72 \text{ nm}$ , 与其标称值  $210.83 \text{ nm} \pm 2.39 \text{ nm}$  和白光干涉仪测量值  $212.92 \text{ nm} \pm 1.35 \text{ nm}$  基本保持一致, 验证了所提表面形貌测量方法的有效性。该研究可为四波横向剪切干涉技术在表面形貌测量领域的扩展应用提供理论参考。

**关键词:** 测量与计量; 表面形貌测量; 四波横向剪切干涉; 空间光调制器; 光程差重建

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.017

## Measurement method for surface topography based on quadriwave lateral shearing interferometry

DONG Zhengqiong<sup>1</sup>, HUANG Xianwen<sup>1</sup>, XU Ren<sup>1</sup>, ZHU Renlong<sup>1</sup>, ZHOU Xiangdong<sup>1</sup>, NIE Lei<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Xiangyang Industrial Institute of Hubei University of Technology, Xiangyang 441100, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of high processing difficulty and limited spectral application range of specific spectra device in traditional quadriwave lateral shearing interferometry system, dividing incident light beam into four beams of lateral shearing coherent wavelets was proposed by using a spatial light modulator instead of a spectro grating. The diffraction efficiency of wavelets was adjusted flexibly by adjusting the refractive index of grating to adapt to the illumination light source, and the optical path difference distribution reflecting the height information and refractive index of the sample was reconstructed according to the interference effect between two wavelets, so as to realize accurate measurement of surface topography in a wide spectral and large dimensions range. In this study, the effect of incident light wavelength on the reconstruction accuracy of optical path difference was investigated by combining the Fourier transform method, and a wide spectrum quadriwave lateral shearing interferometry system from the visible to near infrared was built using a spatial light modulator. The results show that the system measured the etching depth of a standard quartz sample at  $209.39 \text{ nm} \pm 1.72 \text{ nm}$ , which is basically consistent with its nominal value of  $210.83 \text{ nm} \pm 2.39 \text{ nm}$  and the measurement value of  $212.92 \text{ nm} \pm 1.35 \text{ nm}$  by white light interferometer, which verifies the effectiveness of the surface topography measurement method proposed. This study can provide a theoretical reference for the extended application of quadriwave lateral shearing interferometry in the field of surface topography measurement.

**Key words:** measurement and metrology; surface topography measurement; quadriwave lateral shearing interferometry; spatial light modulator; optical path difference reconstruction

## 0 引言

随着光电元器件和集成电路等微纳结构的制造工

艺不断突破, 迫切需要高性能的测量设备来满足日益增长的高精度表面形貌测量需求<sup>[1-2]</sup>。目前, 表面形貌测量法主要分为机械探针式测量法<sup>[3]</sup>、扫描探针显微镜<sup>[4]</sup>和干涉显微测量法<sup>[5]</sup>3种。机械探针式测量法精度高, 但费时且易损伤被测表面; 扫描探针显微镜纵向和横向分辨率均达到纳米量级, 但测量范围窄且操作复杂; 与上述测量方式相比, 干涉显微测量法具有操作简易和无接触等优势, 其纵向分辨率可达纳米级, 横向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975191); 湖北省科技创新人才基金资助项目(2023DJC048)

\* 通信作者: leinie@hbut.edu.cn

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-12-08

分辨率和测量范围取决于相机像元尺寸和像元数。常用的干涉显微测量法包括四波横向剪切干涉<sup>[6-8]</sup> (quadriwave lateral shearing interferometry, QLSI)、数字全息<sup>[9]</sup>和衍射相位成像<sup>[10]</sup>等方法。其中,四波横向剪切干涉法因存在鲁棒、消色差和瞬态测量等优势<sup>[11]</sup>,目前在表面形貌测量领域具有更为广泛的应用前景。

QLSI 的基本原理是利用波前分光器件<sup>[12]</sup>将携带待测结构表面形貌信息的入射光分成4束横向剪切相干子波,通过分析子波两两干涉结果并结合波前重构算法<sup>[13-14]</sup>,即可重建出反映样品折射率和高度信息的光程差分布,进而得出待测样品的表面形貌信息。其中,波前分光器件是实现四波横向剪切干涉的核心部件,许多学者对此展开了诸多研究,例如 PRIOMT 等人<sup>[15]</sup>提出了一种基于改进哈特曼掩模板(modified Hartmann mask, MHM)的四波横向剪切干涉仪,采用 MHM 作为波前分光器件,实现了对生物样品的定量相位测量,但 MHM 需要保证相位光栅每个周期单元与掩模板4个周期单元高精度对准;LING 等人<sup>[16]</sup>在此基础上提出了一种可用于四波横向剪切干涉波前检测的随机编码混合光栅,根据光通量约束的随机编码法设计了由相位光栅和振幅编码光栅组成的随机编码混合光栅(random encoded hybrid grating, REHG),能实现任意畸变的波前检测,但 REHG 加工难度大,且同样存在对准难题;FANG<sup>[17]</sup>设计了基于棋盘型相位光栅的横向剪切干涉仪,准确测量了干涉仪标准镜头的透射波前,但该方案光路系统复杂,需要小孔光阑和光栅配合分光。上述波前分光器件加工过程中的对准误差等因素会降低子波的衍射效能,从而导致干涉条纹信噪比下降,最终影响表面形貌测量。再者,目前的 QLSI 在系统搭建时使用的分光器件均是定制分光光栅,其刻蚀深度是针对特定波长和正入射情况下设计的,当入射光波长脱离特定范围以内时,测量精度明显降低<sup>[18]</sup>。总的来说,采用定制分光光栅存在加工难度大且光谱的适用范围很窄等局限性。

为此,本文作者提出了一种基于空间光调制器(spatial light modulator, SLM)的四波横向剪切干涉表面形貌测量方法,采用 SLM 加载占空比为1/2的棋盘型相位光栅作为 QLSI 的波前分光器件,相比于传统的分光光栅,通过 SLM 加载的光栅能在不改变各光路元器件位置的情况下灵活调整光栅折射率来保证子波衍射效率始终取得最高值,使得 QLSI 测量精度不受照明光源波段的影响,同时也可避免光栅加工误差对测量结果的影响。

## 1 基本原理

本文中提出适用于宽光谱的四波横向剪切干涉

表面形貌测量系统的光路如图1所示。图中,参数 $\alpha$ 为入射光和 SLM 法线的夹角,为了达到 SLM 最佳相位调制效果, $\alpha$ 一般小于 $10^\circ$ <sup>[19]</sup>;  $f_1$ 、 $f_2$  是双凸透镜  $L_1$ 、 $L_2$  的焦距。将传统的2维相位光栅替换为反射式液晶空间光调制器。准直后的发光二极管(light-emitting diode, LED)出射的平行光透过被测件后,先经过物镜和管镜(tube lens, TL)组成的显微成像系统放大,再经孔径光阑(iris diaphragm, ID)和偏振片 P 形成完全的线偏振光入射至 SLM 的工作区域中,然后通过 SLM 调制的棋盘型相位光栅分光后,得到4束包含大部分能量的1级衍射光,最后采用双凸透镜  $L_1$  和双凸透镜  $L_2$  组成的中继透镜组将4束1级衍射光中继到相机的互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS)上,即图像传感器,由 CMOS 采集四波横向剪切干涉图像。被测件为表面刻有凹槽的石英样品,光源经准直后出射的理想平面波透过石英样品,携带石英样品的光程差(optical path difference, OPD)为:

$$\Delta l_{\text{OPD}} = (n_1 - n_0) \cdot h \quad (1)$$

式中: $n_1$  为石英样品折射率; $n_0$  为空气折射率; $h$  为石英样品表面的相对高度,根据  $h$  即可解算待测物体的表面形貌信息。因此,从四波横向剪切干涉图中解调出 OPD 后,根据式(1)即可获得待测物体的表面形貌信息。

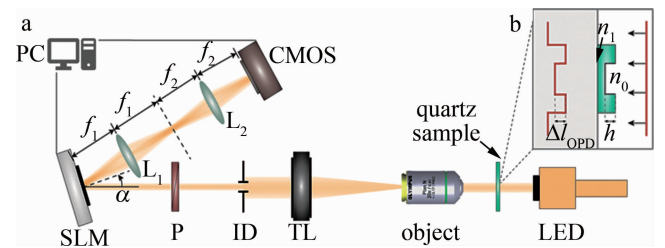


图1 基于四波横向剪切干涉的表面形貌测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a surface topography measurement system based on quadriwave lateral shearing interferometry

通过图1所示的测量光路,得到1幅包含待测样品表面形貌信息的干涉图后,仅考虑包含入射光绝大部分能量的0级光和1级光的情况下,载频干涉图的光强分布可表示为:

$$I(x, y) = \frac{I_0}{8} \left\{ 2 + 2\cos[2\pi f_0 x + sk \cdot W_x(x, y)] + 2\cos[2\pi f_0 y + sk \cdot W_y(x, y)] \right\} \quad (2)$$

式中: $I_0$  为入射光光强; $f_0$  为引入的线性载频; $k$  为波数; $W_x(x, y)$  和  $W_y(x, y)$  为 OPD 在  $x$ 、 $y$  方向的差分; $s$  为剪切量。

对式(2)进行傅里叶变换(Fourier transform, FT)

后,采用滤波窗函数滤出  $x$  方向的 1 级频谱:

$$C(f_x, f_y) = \text{FT} \left\{ \frac{I_0}{8} \cdot \exp[sk \cdot W_x(x, y)] \right\} \quad (3)$$

式中:  $(f_x, f_y)$  为频域坐标,则 OPD 在  $x$  方向的差分为:

$$W_x(x, y) = \frac{\arctan \left\{ \frac{\text{Im}[\text{FT}^{-1}\{C(f_x, f_y)\}]}{\text{Re}[\text{FT}^{-1}\{C(f_x, f_y)\}]} \right\}}{sk} \quad (4)$$

式中:  $\text{FT}(\cdot)$  和  $\text{FT}^{-1}(\cdot)$  为 2 维傅里叶变换和逆变换操作;  $\text{Im}(\cdot)$  为求虚部运算;  $\text{Re}(\cdot)$  为求实部运算。在提取 OPD 在  $x$  方向的差分后,采用相同方法提取 OPD 在  $y$  方向的差分,再基于最小二乘的傅里叶变换法<sup>[20]</sup>重建  $\Delta L_{\text{OPD}}$ ,其表达式如下:

$$\Delta L_{\text{OPD}} = \text{FT}^{-1} \left\{ \frac{\text{FT}[W_x(x, y)] + i \times \text{FT}[W_y(x, y)]}{2\pi i \times (f_x + i \times f_y)} \right\} \quad (5)$$

式中:  $i$  为虚数单位。此时,根据式(1)即可求得样品的表面形貌信息。然而,OPD 的重建精度受到 0 级光和 1 级光衍射效率的影响,当 0 级光的衍射效率过大时,0 级光会与 1 级光发生干涉,在进行频域滤波时,式(3)中除了提取到所需要的  $x$  方向 1 级频谱之外,还会提取到少部分 0 级频谱及其干扰项,导致 OPD 在  $x$  方向的差分提取产生误差。由于采用 SLM 加载棋盘型相位光栅作为波前分光器件,其分光原理可以以棋盘型相位光栅为例进行理论推导,设棋盘型相位光栅周期为  $2T$ ,相邻光栅单元之间的相位差为  $\varphi$ ,则该光栅透过函数<sup>[21]</sup>可表示为:

$$t(x, y) = \left\{ \exp(i\varphi) \left[ \text{rect}\left(\frac{x + T/2}{T}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y - T/2}{T}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - T/2}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{y + T/2}{T}\right) \right] + \left[ \text{rect}\left(\frac{x + T/2}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{y + T/2}{T}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - T/2}{T}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y - T/2}{T}\right) \right] \right\} * \sum_{m_x} \sum_{m_y} \delta(x - 2Tm_x) \delta(y - 2Tm_y) \quad (6)$$

式中:  $(x, y)$  为空间域坐标;  $\text{rect}(\cdot)$  表示矩形函数;

$\delta(\cdot)$  表示狄拉克函数;  $m_x, m_y$  为  $x, y$  方向的衍射级次;  $*$  表示卷积运算。对式(6)进行傅里叶变换,即可得到棋盘型相位光栅的复振幅分布:

$$\begin{aligned} \text{FT}\{t(x, y)\} &= \frac{1}{4} \sum_{m_x} \sum_{m_y} \text{sinc}\left(\frac{m_x}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y}{2}\right) \times \\ &\left\{ \exp\left[i\varphi + i\frac{\pi}{2}(m_x - m_y)\right] + \exp\left[i\frac{\pi}{2}(-m_x - m_y)\right] + \right. \\ &\left. \exp\left[i\varphi + i\frac{\pi}{2}(-m_x + m_y)\right] + \exp\left[i\frac{\pi}{2}(m_x + m_y)\right] \right\} \times \\ &\delta\left(f_x - \frac{m_x}{2T}\right) \delta\left(f_y - \frac{m_y}{2T}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\text{sinc}(\cdot)$  为归一化 sinc 函数,即  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ 。由式(7)易知,当  $m_x$  或  $m_y$  为偶数时,  $\text{sinc}(\cdot) = 0$ ,即偶级次的复振幅为 0,棋盘型相位光栅的衍射光场中消除了偶级次。将  $m_x = m_y = 0$  代入式(7)后,求得 0 级衍射光的相对衍射效率:

$$\eta_0 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \varphi \quad (8)$$

当  $m_x$  和  $m_y$  为  $\pm 1$  时,求得 4 束 1 级衍射光的相对衍射效率:

$$\eta_1 = \frac{32}{\pi^4} (1 - \cos \varphi) \quad (9)$$

由式(8)可知,0 级光的相对衍射效率与相位差  $\varphi$  呈周期为  $2\pi$  的余弦变化,在  $\varphi = 0, \varphi = 2\pi$  时取得极大值 100%,在  $\varphi = \pi$  时取得极小值 0。由式(9)可知,1 级衍射光的相对衍射效率与相位差  $\varphi$  仍然呈周期为  $2\pi$  的余弦变化,且变化趋势与 0 级光相反,在  $\varphi = 0, \varphi = 2\pi$  时取得极小值 0,在  $\varphi = \pi$  时取得极大值 65.72%。如图 2 所示,分别是  $\varphi$  取  $0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, \pi$  时,各级频谱的归一化强度分布,红色实线框内是  $x$  方向 +1 级频谱,窗口半径通常取图像的  $1/6$ <sup>[22]</sup>,黄色虚线框是 0 级光与 1 级光发生干涉产生的干扰频谱。从图 2 中可以看出,当  $\varphi = \pi$  时,即 0 级光的相对衍射效率取得极小值,干扰频谱的影响最小。相位光栅相邻单元的相位差  $\varphi$  的表达式为:

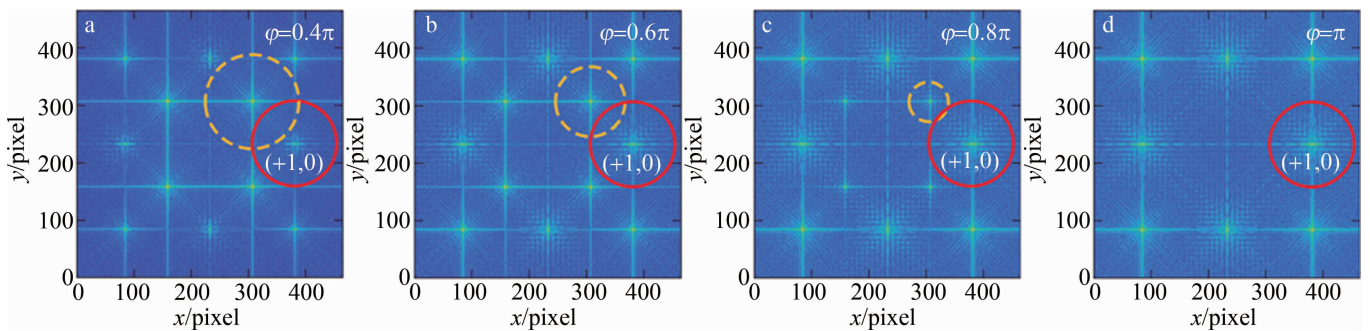


图 2 1 级频谱和干扰频谱的归一化强度分布

Fig. 2 Normalised intensity distributions for the first-order spectrum and interference spectrum



$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 - n_0) \cdot d \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为入射光的波长;  $n_2$  为相位光栅的折射率;  $d$  为刻蚀深度。传统的棋盘型相位光栅的折射率和刻蚀深度固定,而当入射光波长与刻蚀深度不匹配时,1 级衍射光的衍射效率降低,OPD 的重建结果将会受到干扰频谱的影响。

## 2 仿真验证

以 peaks 函数作为待测 OPD 输入,设定如下仿真参数来定量分析入射波长对 OPD 重建精度的影响:(a)光场。通光孔径形状为方形,空气折射率  $n_0 = 1$ ,入射 peaks 函数的振幅分布如图 3a 所示;(b)探测器。像元尺寸为  $6 \mu\text{m}$ ;采样点数为  $504 \times 504$ ,探测器取得的干涉图如图 3b 所示;(c)棋盘型相位光栅。周期  $T = 18 \mu\text{m}$ ,刻蚀深度  $d = 550 \text{ nm}$ ,相位光栅的折射率  $n_2 = 1.5$ 。

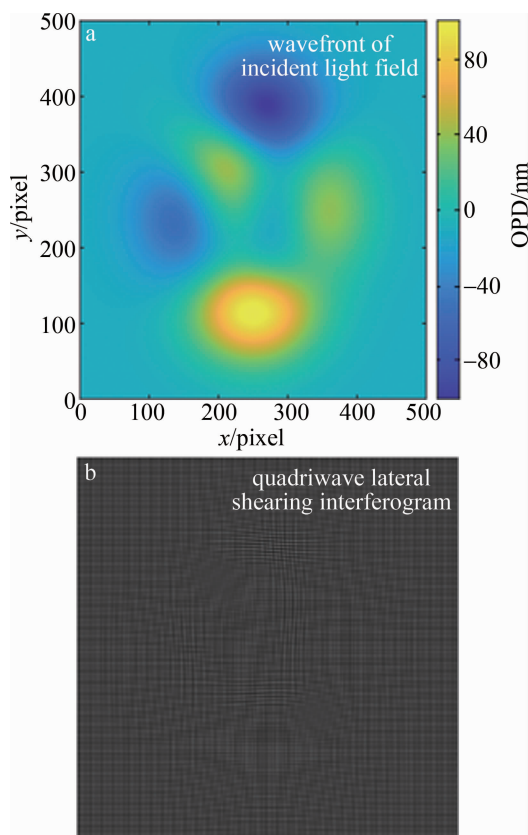


图 3 仿真光场波前及对应四波横向剪切干涉图

Fig. 3 Simulated wavefront of light field and corresponding quadriwave lateral shearing interferogram

peaks 函数重建 OPD 与理论 OPD 残差的均方根值(root mean square, RMS)随入射光波长  $\lambda$  的变化如图 4 所示。当入射波长  $\lambda$  在  $417 \text{ nm} \sim 807 \text{ nm}$  之间时,RMS 小于  $0.84 \text{ nm}$ ,OPD 重建精度受影响程度较小,几

乎可以忽略;当  $\lambda = 413 \text{ nm}$  时,RMS 为  $10.31 \text{ nm}$ ,此时重建精度已经受到较大影响。因此,采用刻蚀深度为  $550 \text{ nm}$  的棋盘型相位光栅作为 QLSI 的分光器件,光源的波长会限制在固定波段  $417 \text{ nm} \sim 807 \text{ nm}$  以内,当波长在这个范围之外时,重建精度严重下降。而采用 SLM 调制生成的棋盘型相位光栅可以在光路结构不发生改变的情况下调整光栅折射率  $n_2$  的大小,针对不同波长的光源条件,利用 SLM 的可编程性调制光栅的  $n_2$ ,满足  $(n_2 - n_0) d / \lambda = 1/2$ ,即  $\varphi = \pi$ 。此时无论波长如何改变,OPD 重建精度均能达到最高。因此采用 SLM 作为分光器件比起传统相位光栅能够适应更宽的光谱。

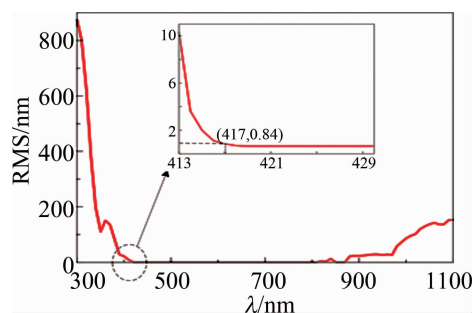


图 4 peaks 函数重建 OPD 与理论 OPD 残差的 RMS 随入射光波长  $\lambda$  的变化图

Fig. 4 RMS plot of the reconstructed OPD of the peaks function against the theoretical OPD residuals as a function of the incident light wavelength  $\lambda$

## 3 实验结果与分析

为验证基于 SLM 的四波横向剪切干涉表面形貌测量方法的可行性与有效性,根据图 1 所示系统示意图搭建了如图 5 所示的基于 SLM 的四波横向剪切干涉实验装置。采用的光源为暖白光 LED 照明套件(WFA1010, THORLABS),该套件内自带预先对准的准直透镜;显微成像系统由 20 倍物镜(MXPLFLN-BD, OLYMPUS)和焦距为  $200 \text{ mm}$  的管镜(TTL200MP, THORLABS)组成;ID 为孔径光阑,用来调整入射光的光斑大小,避免入射光照射在 SLM 非工作面上直接反射形成 0 级光;偏振片 P 用来调整入射光的偏振态,避免因入射光线偏方向与液晶分子的不平行而产生的 0 级光干扰;采用的 SLM 为反射式纯相位空间光调制器(HDSLM80R, UPOLabs),填充率为 95%,像素大小为  $8 \mu\text{m}$ ,其调制生成的棋盘光栅周期  $T$  设置为  $64 \mu\text{m}$ ;采用的 CMOS 相机像元大小为  $5.86 \mu\text{m} \times 5.86 \mu\text{m}$ ;  $L_1$  为焦距  $f_1 = 50 \text{ mm}$  的双凸透镜,  $L_2$  为焦距  $f_2 = 30 \text{ mm}$  的双凸透镜,  $L_1$  和  $L_2$  组成的中继透镜组除了用来中

继成像以外,还具有缩束的作用,将干涉图每条纹周期控制在 6 个像素左右,保证了 CMOS 像素的有效利用。

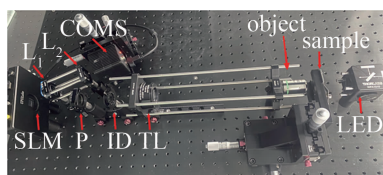


图 5 基于 SLM 的四波横向剪切干涉实验装置图

Fig. 5 Experimental setup diagram of quadriwave lateral shearing interferometry based on SLM

为了获取待测样品的表面形貌和刻蚀深度信息,采用图 5 所示的实验装置对待测样品的取样区进行测量,相机收集的干涉图如图 6 所示。由于在测量的过程中显微系统及透镜引入的像差、光学系统上的灰尘、光束的不均匀性等静态波前缺陷,对测量结果具有一定的影响。为消除这些干扰,在待测样品的表面平整无刻蚀处另取一幅同样大小的背景光干涉图。

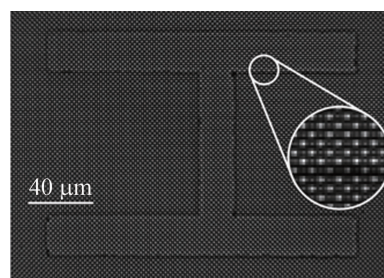


图 6 CMOS 相机采集干涉图

Fig. 6 Interferogram acquired by CMOS camera

对样品干涉图进行傅里叶变换后,然后采用滤波窗函数将  $x$  方向和  $y$  方向的 +1 级频谱提取出来,如图 7a 和图 7b 所示。根据式(4)即可算出  $x$  方向和  $y$  方向的差分相位。再采用相同的方式算出背景光干涉图的  $x$  方向和  $y$  方向差分相位,最后将两幅干涉图相同方向的差分相位相减即可得到消除静态波前缺陷影响的差分相位,如图 7c 和图 7d 所示。

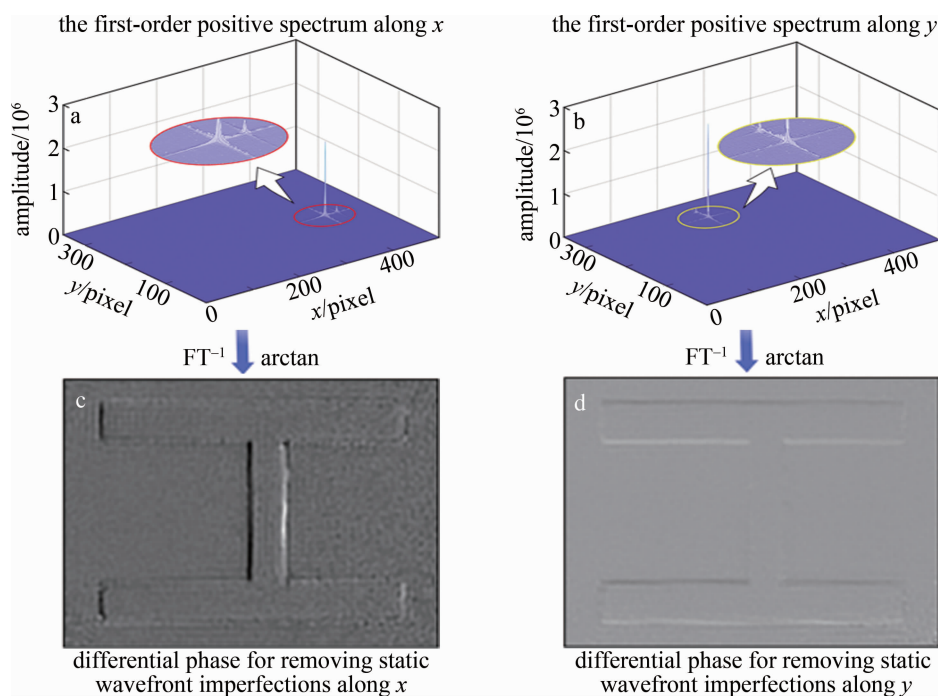


图 7 差分相位提取过程

Fig. 7 Differential phase extraction process

在可见光波段石英玻璃的折射率  $n_1 = 1.45990$ , 空气的折射率  $n_0 = 1.00028$ , 结合式(1)和式(5)计算出石英样品的表面形貌信息,如图 8a 所示。为进一步获得样品的刻蚀深度信息,沿图 8a 的红线剖开,得到的刻蚀深度分布如图 8b 所示。该样品表面刻蚀深度的平均值为 294.24 nm,底部凹槽刻蚀深度的平均值为 84.85 nm,该样品的平均刻蚀深度为 209.39 nm。为验证测量结果的准确性,在保持实验光路结构不变的情况下,重复开展 50 次实验,得到的重复性结果为

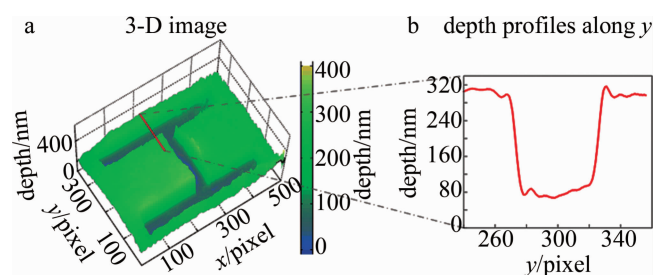


图 8 石英样品的表面形貌重建结果

Fig. 8 Surface topography reconstruction results of quartz sample

209.39 nm  $\pm$  1.72 nm, 因此, 本实验中搭建的 QLSI 系统测量过程较稳定。

为验证本文中所提方法测量石英表面刻蚀深度的准确性, 采用白光干涉仪 (ER230, ATOMETRICS) 对同一样品的刻蚀深度进行测量, 测得的石英样品刻蚀深度为 212.92 nm  $\pm$  1.35 nm。如表 1 所示, 该石英样品的标称刻蚀深度为 210.83 nm  $\pm$  2.39 nm, 因此本文中提出的方法测量石英样品刻蚀深度的相对误差为 0.68%, 白光干涉法测得的相对误差为 0.99%, 两种方法的测量结果均与样品标称值吻合, 表明本文中提出的方法能成功地探测纳米级样品的表面形貌, 且具有较高的精度。其次, 基于逐层扫描为原理的白光干涉仪一次测量时需要提取多幅干涉图, 当阈值设定为 400 张时, 其测量时间 (包括成像时间和图像呈现时间) 为 23.53 s, 而 QLSI 只需要两幅干涉图即可完成表面形貌测量, 其测量时间 (包括成像和图像呈现时间) 小于 1 s, 远小于白光干涉仪测量所用时间。图 8 和表 1 中石英样品表面刻蚀深度即为相对高度  $h$ 。

表 1 本文中方法与白光干涉法测得石英样品的刻蚀深度和相对误差  
Table 1 Etching depth and relative error of quartz sample measured by the method of this paper and white light interferometry

method type	$h/\text{nm}$	relative error/%	measuring time/s
nominal values	210.83 $\pm$ 2.39	—	—
white light interferometry	212.92 $\pm$ 1.35	0.99	23.53
proposed method	209.39 $\pm$ 1.72	0.68	<1

此外, 将图 5 所示实验装置的显微成像系统从透射式改为反射式照明, 再对标称值为 200 nm 台阶高度的硅晶圆样品开展了测量实验研究, 在 LED 照明下获取的 3 维形貌提取结果和  $y$  方向的高度剖面, 如图 9a 和图 9b 所示。表 2 所示为 QLSI 与白光干涉法分别开展 50 次重复性实验得到的台阶高度测量结果。前者对应的重复性结果为 201.95 nm  $\pm$  1.19 nm, 与标称值的相对误差为 0.98%, 白光干涉法对应的相对误差为 0.82%。从表 2 可以看出, 上述两种方法得出的测量结果与样品标称值基本吻合, QLSI 方法利用反射式测

量时仍然具有较高的测量精度, 进而在很大程度上验证了本文中所提表面形貌测量方法的有效性和可靠性。图 9 和表 2 中硅晶圆样品表面高度即为相对高度  $h$ 。

表 2 本文中方法与白光干涉法测得硅晶圆样品的高度和相对误差  
Table 2 Height and relative error of silicon wafer sample measured by the method of this paper and white light interferometry

method type	$h/\text{nm}$	relative error/%	measuring time/s
nominal values	200	—	—
white light interferometry	201.63 $\pm$ 1.05	0.82	21.63
proposed method	201.95 $\pm$ 1.19	0.98	<1

## 4 结 论

提出了一种基于 SLM 的四波横向剪切干涉表面形貌测量方法, 旨在解决传统 QLSI 中分光光栅存在的加工难度高、光谱适用范围受限等问题。利用 SLM 的可编程特性加载相位差恒为  $\pi$  的棋盘型相位光栅作为波前分光器件, 以获取四波横向剪切干涉图, 然后采用傅里叶变换法从干涉条纹中解调出 OPD, 结合样品折射率分布以实现石英样品表面形貌测量。建立四波横向剪切干涉仿真模型, 分析了重建 OPD 与理论 OPD 残差的 RMS 随入射光波长的变化, 验证了本文中所提方法的科学性和适用性。搭建基于 SLM 的四波横向剪切干涉测量系统分别对石英和硅晶圆的表面形貌进行测量, 并将测量结果与白光干涉仪的结果对比。本文中的方法与白光干涉仪测量结果的相对误差均小于 1%, 在样品标称尺寸允许的误差范围以内, 验证了本文中方法对不同类型样品的表面形貌测量的有效性和可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] LIU J M, ZHAO H, WU Q Zh, *et al.* Patterned wafer defect inspection at advanced technology nodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312003 (in Chinese). 刘佳敏, 赵杭, 吴启哲, 等. 先进节点图案化晶圆缺陷检测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312003.
- [2] JIN Ch. Research on micro-nano structure measurement based on digital holography and its key technologies[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2022 (in Chinese). 金川. 基于数字全息微纳结构测量及其关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [3] HAN Zh G, LI S Y, FENG Y N, *et al.* Development of the inspection pattern specimen for the contact profiler stylus state[J]. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2019, 56(9): 761-765 (in Chinese). 韩志国, 李锁印, 冯亚南, 等. 接触式轮廓仪探针状态检查图形样块的研制[J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(9): 761-765.
- [4] HUI F, LANZA M. Scanning probe microscopy for advanced nanoelectronics[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(6): 221-229.
- [5] CHEN J L, YU Q H, GE B, *et al.* A phase difference measurement method for integrated optical interferometric imagers[J]. *Remote*

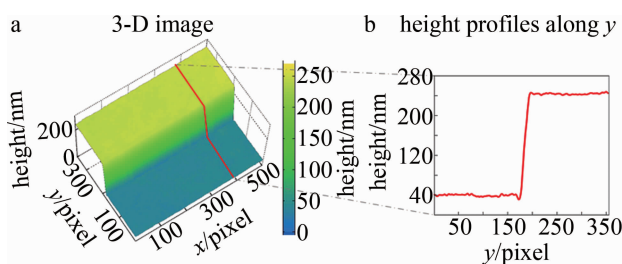


图 9 硅晶圆样品的表面形貌重建结果

Fig. 9 Surface topography reconstruction results of silicon wafer sample



- Sensing, 2023, 15(8): 2194.
- [6] YUAN X, XUE Y G, MIN J W, *et al.* High-precision gaseous flame temperature field measurement based on quadriwave-lateral shearing interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 162: 10730.
- [7] KHADIR S, ANDRÉN D, VERRE R, *et al.* Metasurface optical characterization using quadriwave lateral shearing interferometry[J]. ACS Photonics, 2021, 8(2): 603-613.
- [8] LIU K, ZHANG X T, ZHONG H, *et al.* Key technologies of quadri-wave lateral shearing interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1512001 (in Chinese).  
刘克, 张孝天, 钟慧, 等. 四波前横向剪切干涉仪的关键技术研究[J]. 光学学报, 2023, 45(15): 1512001.
- [9] WEI W G, HAN J H, FU Y Zh. Design and verification of two-step phase-shifted digital holography [J]. Laser Technology, 2020, 44(1): 86-90 (in Chinese).  
位文广, 韩俊鹤, 付玉洲. 一种两步相移数字全息的设计与实验验证[J]. 激光技术, 2020, 44(1): 86-90.
- [10] ZHONG Zh, WANG Ch, LIU L, *et al.* Diffraction phase microscopy using a defocus grating[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(4): 219-224.
- [11] ZHU W H. Research on transient interferometric techniques of laser wavefront at multiple wavelengths[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).  
朱文华. 多波段激光波前瞬态干涉关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [12] CUI B Ch. Research on multiwave lateral shearing interferometry based on diffractive optical elements[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese).  
崔博川. 基于衍射光学元件的多波前横向剪切干涉方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [13] DAI F, TANG F, WANG X, *et al.* Generalized zonal wavefront reconstruction for high spatial resolution in lateral shearing interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America, 2012, A29(9): 2038-2047.
- [14] LI J, TANG F, WANG X Zh, *et al.* Wavefront reconstruction for lateral shearing interferometry based on difference polynomial fitting [J]. Journal of Optics, 2015, 17(6): 065401.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] FANG B. Wavefront measurement with four-wave lateral shearing interferometry based on phase grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).  
方波. 基于位相光栅的四波横向剪切干涉法波前检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [18] SONG J W, MIN J W, YUAN X, *et al.* Quadriwave lateral shearing interferometry quantitative phase imaging based on 2D ronchi phase grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11): 1118001 (in Chinese).  
宋金伟, 闵俊伟, 袁勋, 等. 基于二维朗奇相位光栅的四波横向剪切干涉定量相位成像[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1118001.
- [19] ZHAO Z X, ZHUANG Y Y, XIAO Zh X, *et al.* Characterizing a liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence angles using the self-interference method[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(9): 090701.
- [20] KOTTLER C, DAVID C, PFEIFFER F, *et al.* A two-directional approach for grating based differential phase contrast imaging using hard X-rays[J]. Optics Express, 2007, 15(3): 1175-1181.
- [21] ZHAI Zh Sh, HUANG Y Sh, LI Q Y, *et al.* Diffraction characteristics of orthogonal phase grating based on spatial light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1605002 (in Chinese).  
翟中生, 黄缘胜, 李沁洋, 等. 基于空间光调制器的正交相位光栅衍射特性[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1605002.
- [22] BAFFOU G. Quantitative phase microscopy using quadriwave lateral shearing interferometry (QLSI): Principle, terminology, algorithm and grating shadow description[J]. Journal of Physics, 2021, D54(29): 294002.