

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.10

双差动快速结构光显微测量方法和系统

唐燕¹, 韩陈浩磊^{1,2}, 冯金花¹, 全海洋¹, 王建¹, 胡松¹

(1.中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 快速结构光显微测量技术具有高精度、高效率以及强适应性等特点, 广泛应用于微纳检测领域。传统的快速结构光显微测量方法, 利用轴向调制度响应曲线的线性区域, 通过构建调制度值与实际高度之间的关系来实现三维形貌重建。但是, 轴向调制度响应曲线的线性区域很短, 传统方法的应用受限于其较窄的动态测量范围。为了克服这一缺陷, 提出了一种双差动快速结构光显微测量技术。通过引入两条额外的探测支路构建双差动轴向调制度响应曲线, 可以获得更宽的线性区域。在数值孔径为0.9, 放大倍率为100倍的显微物镜条件下, 其测量范围在仿真分析中可从380 nm提升到760 nm, 在实验中可从300 nm提升到600 nm。仿真与实验结果均证明双差动快速结构光显微测量方法的动态测量范围相比传统方法的动态测量范围提升了一倍, 有效地拓展了快速结构光显微测量技术的应用范围。

关键词: 检测; 三维形貌恢复; 快速结构光显微测量; 双差动检测; 微纳检测

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0112-10

Double-differential fast structured illumination microscopy measurement method and system

TANG Yan¹, HAN Chenhaolei^{1,2}, FENG Jinhua¹, QUAN Haiyang¹, WANG Jian¹, HU Song¹

(1.State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-Fabrication, Institute of Optics and Electronics,

Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fast structured illumination microscopy plays an important role in micro-nano detection due to the characteristics of high accuracy, high efficiency and strong adaptability. Traditional methods utilizes the linear region of the axial modulation response curve to achieve 3D topography recovery by building the relationship between the modulation and the actual height. However, the application of traditional methods is limited to its narrow dynamic measurement range since the linear region of axial modulation response curve is very short. In order to overcome the disadvantage, a double-differential fast structured illumination microscopy is proposed. By introducing two additional detection branches for building the double-differential axial modulation response curve to obtain a wider linear region, the proposed method can obtain a larger dynamic measurement range. Under the condition of a microscope objective with a numerical aperture of 0.9 and a magnification of 100, the dynamic measurement range is expanded from 380 nm to 760 nm in simulation and from 300 nm to 600 nm in actual experiment. The simulations and experimental results verify that the dynamic measurement

收稿日期: 2023-01-17; **修回日期:** 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875201, 61975211, 62005287, 61604154); 四川省杰出青年科技基金(2020JDJQ0005); 四川省中央引导地方发展计划(2020ZYD020); 四川省地方创新合作合作计划(2022YFQ0007); 四川省科技项目(2018JY0203)

引用格式: 唐燕, 韩陈浩磊, 冯金花, 等. 双差动快速结构光显微测量方法和系统[J]. 计测技术, 2023, 43 (1): 112-121.

Citation: TANG Y, HAN C H L, FENG J H, et al. Double-differential fast structured illumination microscopy measurement method and system[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43 (1): 112-121.



range of double-differential fast structured illumination microscopy is twice as large as that of the traditional method under the same system parameters, which effectively broadens the application range of fast structured illumination microscopy.

Key words: measurement; 3D topography recovery; fast structured illumination microscopy; double-differential detection; micro-nano detection

0 引言

具有不同功能的微纳结构器件在材料科学、生物医药和半导体工业等领域有着十分广泛的应用^[1-2]。通常,微结构的表面形貌对其功能有着决定性的作用^[3-4]。在过去的几十年里,科研人员提出了多种方法以实现微纳结构表面形貌测量,如共聚焦显微测量技术、白光干涉测量技术以及结构光显微测量技术等^[5-11]。

结构光显微测量技术因其所具有的高精度和高测量效率等特点,在微纳检测领域越来越受到重视。结构光显微测量技术的基本原理是:将正弦条纹图案投影到待测物体的表面,此时表面形貌的高度信息被条纹所调制,利用精密位移台轴向扫描被测样本,并使用CCD相机同步采集反射回来的调制后的条纹图像,经数据处理后可得到视场内某一像素点的调制度响应曲线,其形状类似高斯函数,它代表着该像素点的调制度值随着轴向扫描位置变化的情况。最大的调制度值出现在该像素点刚好处于显微物镜焦平面上时,通过获取视场内每一个像素点的最大调制度值对应的轴向位置,可以实现相貌恢复。然而,由于需要轴向扫描,传统的结构光显微测量技术的应用受限于其较长的测量时间^[12-14]。

为了突破测量时间的限制,科研人员提出了快速结构光显微测量技术,显著减少了单次测量所需的时间。快速结构光显微测量技术的原理是:提取轴向调制度响应曲线的线性区域,并标定出调制度值与轴向扫描位置之间的近似线性的关系,之后在测量过程中只需要于动态测量范围内采集一次图像,并求出其调制度值分布,即可根据标定关系完成相貌恢复,实现快速检测。然而,由于轴向调制度响应曲线的主峰近似高斯曲线,其线性区域的长度很窄,该测量方法在有效测量范围方面所有限制(一般情况下有效测量范围仅为数百纳米),这一缺陷同样限制了该方法的广泛应用^[15-17]。

近年来,许多科研人员开展了快速结构光显微测量方面的研究。Lee^[18]利用快速结构光显微测量方法实现了微沟槽表面的深度测量,使用550 nm的非相干光源与一个14位相机,实现了2 nm的纵向分辨力。Wang^[19]比较了不同放大倍率与数值孔径的显微物镜下的动态测量范围变化情况,在数值孔径为0.75、放大倍率为50×和数值孔径为0.85、放大倍率为100×的条件下进行相应实验,发现显微物镜的数值孔径与放大倍率越大,其轴向调制度响应曲线越陡直,即测量精度越高,且有效测量范围越窄。Xie等人^[20]提出了差分快速结构光显微测量系统,利用两条轴向调制度响应曲线获取更大的动态测量范围,成功地将动态测量范围在传统方法的基础上提高了30%,并且对台阶形貌物体实现了高精度测量,此外,该差分方法在测量精度方面也有一定的提升。不过,差分方法提高后的动态测量范围仍旧不能够满足实际测量需求。

针对上述问题,本文提出了一种具有大动态测量范围的双差动快速结构光显微测量技术,在结构光显微测量系统中引入两条电荷耦合器件(Charge-coupled Device, CCD)探测支路,基于相移法以及轴向扫描,针对每一个像素点获取三条轴向调制度响应曲线,根据三条响应曲线构建双差动轴向调制度响应曲线。随后,提取双差动轴向调制度响应曲线的线性区域,并标定调制度值与轴向扫描位置之间的线性关系。在相貌恢复过程中,一次采集处于动态测量范围中的3个CCD图像,求解其对应的调制度值分布,结合标定关系进行相貌恢复。开展原理仿真与实际实验,验证该方法的有效性,为推动快速结构光显微测量技术的性能提升提供技术支撑。

1 双差动快速结构光显微测量原理

图1为双差动快速结构光显微测量系统原理图,由LED光源发出的光照射在数字微镜器件(Digital Micromirror Devices, DMD)上,产生正弦

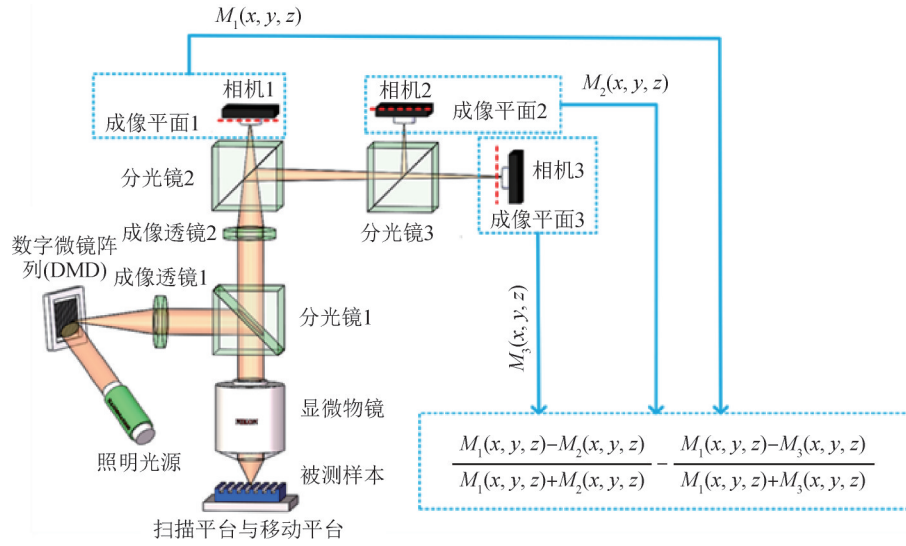


图1 双差动快速结构光显微测量系统原理图及信号处理过程

Fig.1 Schematic diagram of double-differential fast structured illumination microscopy and process of signal processing

条纹后经过成像透镜1、分光镜1、显微物镜投影在待测物体表面,由待测物体表面反射回的光被分光镜2分成两束,其中一束被相机1所接收,另一束被分光镜3分为两束后分别被相机2与相机3接收。相机1放置于成像平面处,相机2和相机3分别放置于成像平面之前与成像平面之后,且相机2与成像平面的距离和相机3与成像平面的距离相等(距离 d 可以根据实际测量需求调整)。图1展示了通过三条单独的轴向调制度响应曲线构建双差动轴向调制度响应曲线的算法,其中, $M_1(x, y, z)$, $M_2(x, y, z)$, $M_3(x, y, z)$ 分别为相机1、相机2、相机3的调制度值。

假设一幅正弦条纹图案投影到待测物体表面,CCD相机接收到的反射光强可表示为

$$I(x, y) = I_0 B(x, y) \left[1 + C(x, y) \cos(2\pi f x + \phi_0) \right] \quad (1)$$

式中: I_0 为背景光强; $B(x, y)$ 为表面亮度, $0 \leq B(x, y) \leq 1$; $C(x, y)$ 为投影条纹对比度; f 为投影条纹的空间频率; ϕ_0 为投影条纹的初始相位,且为常数。

之后,利用相移法求解整场调制度分布。假设相移总步数为 L ,每一次相移的光强分布可记为

$$I_i(x, y) = I_0 B(x, y) \left[1 + C(x, y) \cos\left(2\pi f x + \frac{2i\pi}{L} + \phi_0\right) \right] \quad (2)$$

式中: $I_i(x, y)$ 为第 i 次相移的光强分布, $i = 1, 2, \dots, L$ 。

投影条纹的调制度分布 $M(x, y, z)$ 可定义为

$$M(x, y, z) = \left[\sum_{i=1}^L I_i(x, y, z) \sin\left(\frac{2i\pi}{L}\right) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^L I_i(x, y, z) \cos\left(\frac{2i\pi}{L}\right) \right]^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得

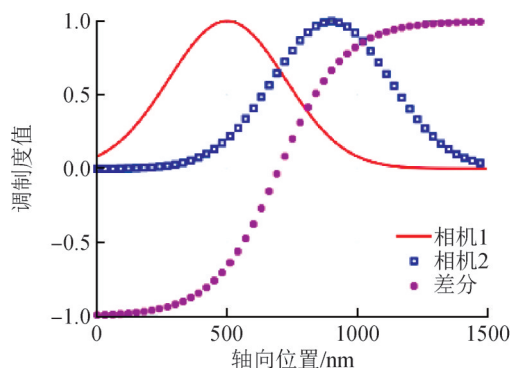
$$M(x, y, z) = \frac{1}{2} B(x, y) LC(x, y, z) \quad (4)$$

在双差动快速结构光显微测量系统中,改进后得到的双差动轴向调制度响应曲线可表示为

$$M(x, y, z) = \frac{M_1(x, y, z) - M_2(x, y, z)}{M_1(x, y, z) + M_2(x, y, z)} - \frac{M_1(x, y, z) - M_3(x, y, z)}{M_1(x, y, z) + M_3(x, y, z)} \quad (5)$$

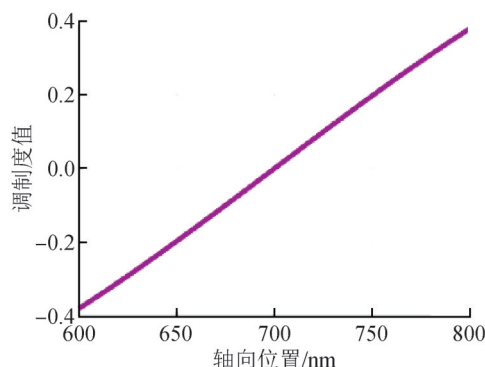
仿真得到某一像素点的差分轴向调制度响应曲线和双差动轴向调制度响应曲线如图2所示。AMR1, AMR2, AMR3分别为3个CCD对该像素点的轴向调制度响应曲线。在实际的实验过程中,通过轴向扫描被测样本并求解调制度,可获得每一个像素点的轴向调制度响应曲线。

在传统差分快速结构光显微测量系统中,通过公式 $\frac{M_1(x, y, z) - M_2(x, y, z)}{M_1(x, y, z) + M_2(x, y, z)}$ 构建差分轴向调制度响应曲线,通过提取其线性区域并进行标定,如图2(b)所示,可以获得调制度值和实际高度之间的关系。后续通过采集一次处于动态



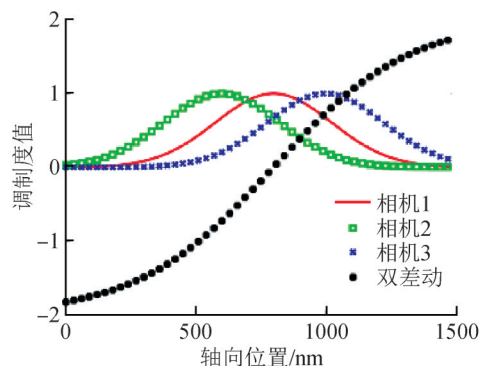
(a) 差分轴向调制度响应曲线

(a) Differential axial modulation response curve



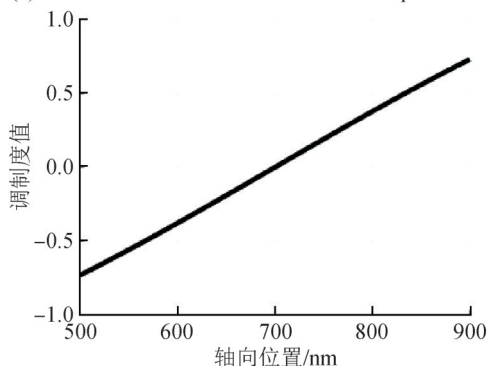
(b) 图2(a)的线性区域

(b) Linear region of Figure 2(a)



(c) 双差动轴向调制度响应曲线

(c) Double-differential axial modulation response curve



(d) 图2(c)的线性区域

(d) Linear region of Figure 2(c)

图2 轴向调制度响应曲线仿真图

Fig.2 Simulation of axial modulation response curves

测量范围内的条纹图求解调制度，并完成高度转换，即可实现形貌恢复。标定区域的长度代表了系统的有效工作范围，通常被限制在数百纳米，不能够满足实际运用需求。

在双差动快速结构光显微测量系统中，引入2条CCD探测支路，根据式(5)构建的双差动轴向调制度响应曲线如图2(c)所示，其线性区域如图2(d)所示。显然，在同样的系统参数下，双差动方法的动态测量范围相比差分方法的动态测量范围提升了一倍。

2 仿真分析

在快速结构光显微系统中，标定区域的斜率和范围分别代表了系统的测量精度与动态测量范围。根据式(5)可知，标定区域的斜率和范围与离焦距离 d 有关，因此进行离焦距离对测量影响的数值分析。

假设显微物镜的数值孔径 $NA = 0.9$ ，投影条纹的归一化空间频率 $v = 0.32$ ，照明光源的中心波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ ，通过计算可以获得系统的半高宽 $FWHM = 527 \text{ nm}$ 。图3(a)展示了不同差分距离下的轴向调制度响应曲线，各自对应的双差动轴向调制度响应曲线如图3(b)所示。根据图3(b)可知，随着离焦距离 d 增加，线性区域的范围先增加后减少，并且当处于焦平面上的相机的轴向调制度响应曲线的峰值位置与两个立交相机的轴向调制度响应曲线的峰值位置之间的间隔等于轴向调制度响应曲线的半高宽时，取得最大值。

离焦距离 d 和系统动态测量范围的关系如图4所示，其中， $d \in [200 \text{ nm}, 600 \text{ nm}]$ 。由图4可知，当 $d = 400 \text{ nm}$ 时，系统的动态测量范围达到最大。因此，为了说明双差动方法的提升程度，在后续的仿真中设离焦距离 $d = 400 \text{ nm}$ 。

标定区域的 $R - square$ 通常用来评估该区域的直线度， $R - square \in [0, 1]$ 。 $R - square$ 越接近1，表明标定区域的直线度越好，测量结果越准确。标定区域的斜率通常代表系统测量精度，斜率越大，测量精度越高。动态系数 C_f 用于说明系统的动态测量范围， $C_f \in [0, 1]$ ，且动态测量范围被限制在 $[C_f \times (\min(M) + \bar{M}) - \bar{M}, C_f \times (\max(M) - \bar{M}) + \bar{M}]$ ，其中， $\bar{M} = (\max(M) + \min(M))/2$ 。动态系数

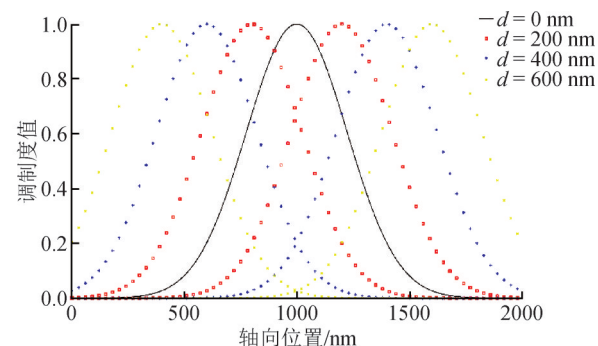
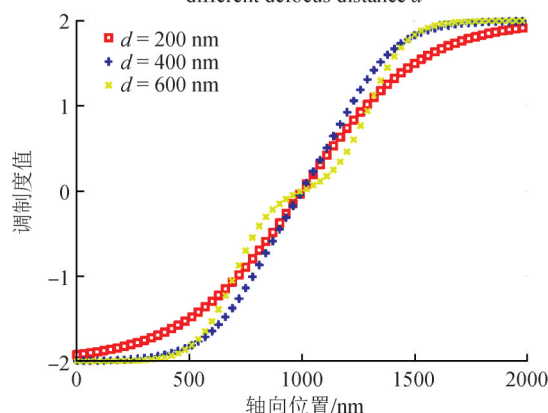
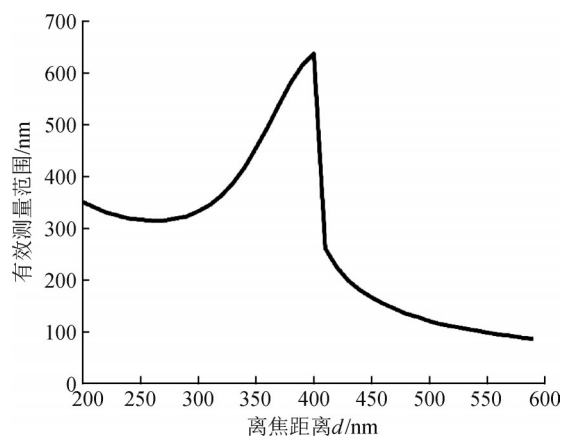
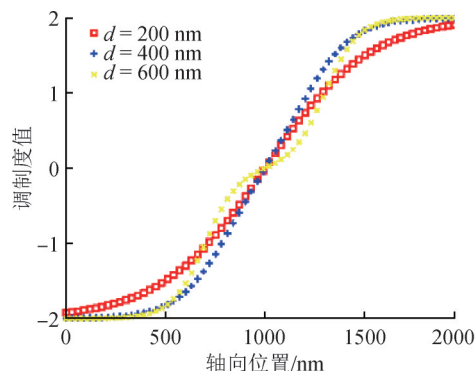
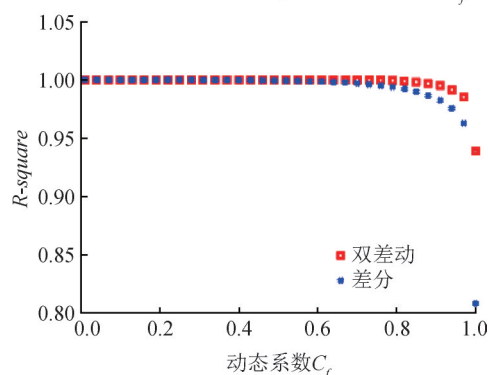
(a) 不同离焦距离 d 下的轴向调制度响应曲线(a) Axial modulation response curves at different defocus distance d (b) 不同离焦距离 d 下的双差动轴向调制度响应曲线(b) Double-differential axial modulation response curve at different defocus distance d

图3 离焦距离对轴向调制度响应曲线的影响

Fig.3 Influence of defocus distance on axial modulation response curves

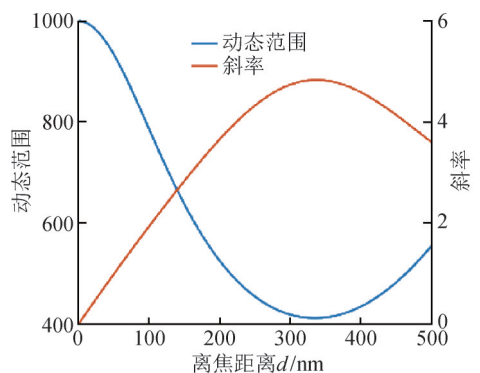
图4 有效测量范围随离焦距离 d 的变化关系Fig.4 Relationship between effective measurement range and defocus distance d

C_f 越大, 系统的动态测量范围越大。图5展示了差分快速结构光显微测量系统与双差动快速结构光显微测量系统线性区域的斜率和 $R - square$ 随动态系数的变化情况。由图5可知, 双差动方法的

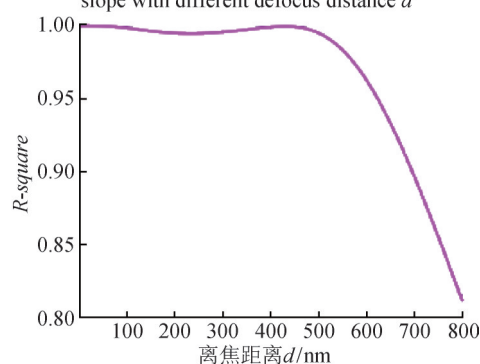
(a) 差分法与双差动法的斜率随动态系数 C_f 的变化情况(a) Variation of slope of double-differential axial modulation curve and differential axial modulation curve with dynamic coefficient C_f (b) 差分法与双差动法的 $R - square$ 随动态系数 C_f 的变化情况(b) Variation of $R - square$ of double-differential axial modulation curve and differential axial modulation curve with dynamic coefficient C_f 图5 差分法与双差动法的斜率和 $R - square$ 随动态系数 C_f 的变化情况Fig.5 Variations of slope and $R - square$ of double-differential axial modulation curve and differential axial modulation curve with dynamic coefficient C_f

斜率与 $R - square$ 均优于差分方法。为了获得较好的直线度, $R - square$ 应大于 0.999。例如, 当 $C_f = 0.8$ 时, 双差动方法的 $R - square = 0.9992$, 可以认为此时调制度值与高度的转换可信度为 99.92%。

为了比较双差动方法的轴向调制度响应曲线标定区域的能力, 需要综合考虑线性区域的直线度、斜率、动态测量范围等参数。动态范围、斜率、 $R - square$ 随离焦距离的变化情况如图6所示。由图6(a)可知, 当离焦距离 d 增加时, 斜率先增加后减少, 这意味着“越大的离焦距离带来越高的测量精度”只在一定范围内有效。与此同时, 随着离焦距离的增加, 动态测量范围先减少后增



(a) 动态范围和斜率随离焦距离 d 的仿真关系
(a) Simulated curves of dynamic range and slope with different defocus distance d



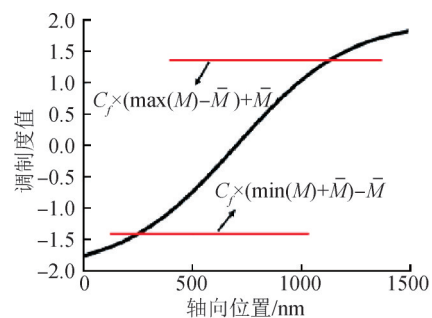
(b) R -square 随离焦距离 d 的仿真关系
(b) Simulation relationship between R -square and defocus distance d

图6 动态范围、斜率、 R -square 随离焦距离 d 的变化情况

Fig.6 Variations of dynamic range, slope and R -square with defocus distance d

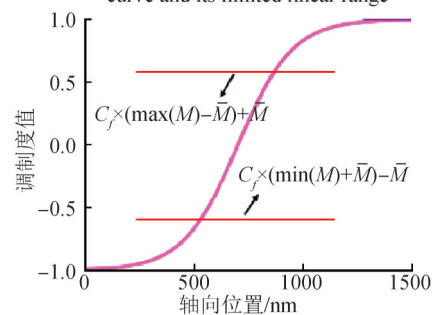
加。所以,高测量精度与大动态测量范围无法同时实现,离焦距离 d 应根据实际需求设定。图6(b)为 R -square 随离焦距离 d 的变化关系,随着离焦距离的增加, R -square 先减少,然后增加到一个较高的值,随后快速降低。

图7(a)为双差动轴向调制度响应曲线,两条红色横线分别为线性区域的上下限。图7(c)为双差动轴向调制度响应曲线的线性区域,即双差动方法的动态测量范围。图7(b)为差分轴向调制度响应曲线,两条红色横线分别为线性区域的上下限。图7(d)为差分轴向调制度响应曲线的线性区域,即差分方法的动态测量范围。根据图7(c)、图7(d)可知,当取动态系数 $C_f = 0.8$ 及离焦距离 $d = 400$ nm时,双差动方法的动态测量范围为 760 nm,差分方法的动态测量范围为 380 nm。仿真从原理上证明了双差动方法的动态测量范围是差分方法的两倍。



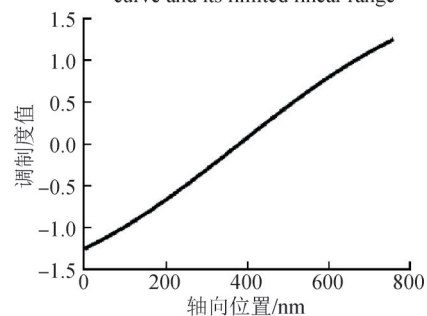
(a) 双差动轴向调制度响应曲线及其限制的线性区域范围

(a) Double-differential axial modulation response curve and its limited linear range

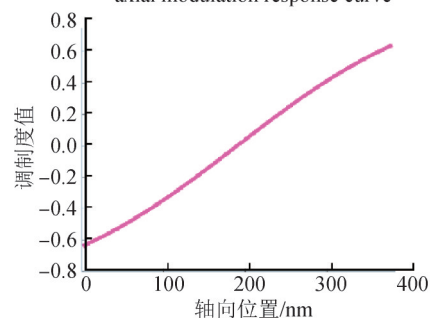


(b) 差分轴向调制度响应曲线及其限制的线性区域范围

(b) Differential axial modulation response curve and its limited linear range



(c) 双差动轴向调制度响应曲线的线性区域
(c) Linear region of double-differential axial modulation response curve



(d) 差分轴向调制度响应曲线的线性区域
(d) Linear region of differential axial modulation response curve

图7 双差动法与差分法的轴向调制度响应曲线及其线性区域

Fig.7 Axial modulation response curves of double-differential method and differential method and their linear regions

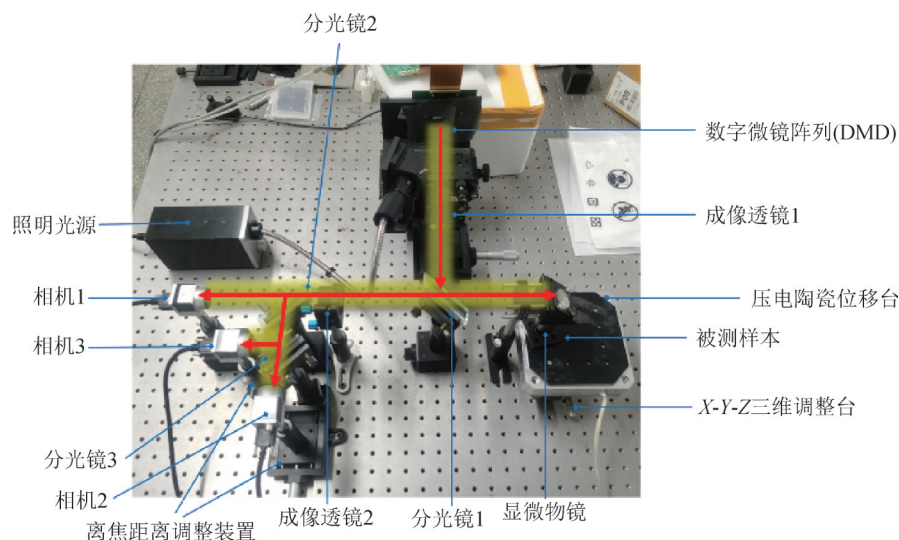


图8 实验装置图

Fig.8 Experimental system

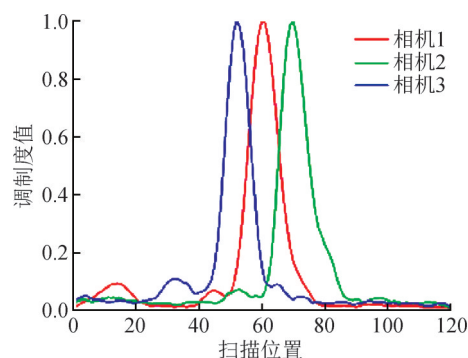
3 实验验证

为了进一步验证双差动方法的有效性与可行性,搭建如图8所示的双差动快速结构光显微测量系统实验装置。使用中心波长为580 nm、带宽为160 nm的宽带光源照明,采用像素数量为 1920×1080 、像素间隔为 $7.56 \mu\text{m}$ 的DMD投影条纹图案,使用3个包含 2048×1536 像素点、像素大小为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 的CCD相机进行图像采集。相机1放置于成像平面处,相机2和相机3离焦,为了保证获得的有效测量范围最大,应保证3个CCD相机中相邻的两个相机的轴向调制度响应曲线相交在主瓣腰上的中心处。显微物镜的数值孔径 $NA = 0.9$,放大倍率为 $100 \times$ 。采用三维平移台粗调整样本位置。为了获取轴向调制度响应曲线,使用分辨力为 0.5 nm ,纵向重复定位误差不高于 10 nm ,闭环行程为 $200 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷位移台实现样本的轴向扫描。

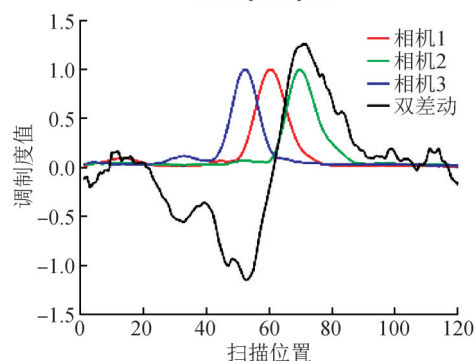
取一硅片作为标准样本进行测量系统线性区域的标定工作。调整硅片轴向位置,使其处于显微物镜焦平面附近,调整压电陶瓷位移台,使其轴向降低 $3 \mu\text{m}$,记此处轴向位置为 $0 \mu\text{m}$ 。之后使用压电陶瓷位移台进行轴向扫描, $0 \sim 3 \mu\text{m}$ 处的扫描间隔为 50 nm ,并同步进行CCD图像采集。利用相移法求解调制度,并获取系统的三条轴向调制度响应曲线,如图9(a)所示。由式(5)计算得到系统的

双差动轴向调制度响应曲线,如图9(b)所示。

提取调制度响应曲线的线性区域,双差动方法与差分方法的动态测量范围分别如图10(a)、



(a) 某一像素点的三条轴向调制度响应曲线
(a) Three axial modulation response curves of a certain pixel point



(b) 测量系统的双差动轴向调制度响应曲线
(b) Double-differential axial modulation response curve of measurement system

图9 实验获得的轴向调制度响应曲线

Fig.9 Axial modulation response curves obtained by experiment

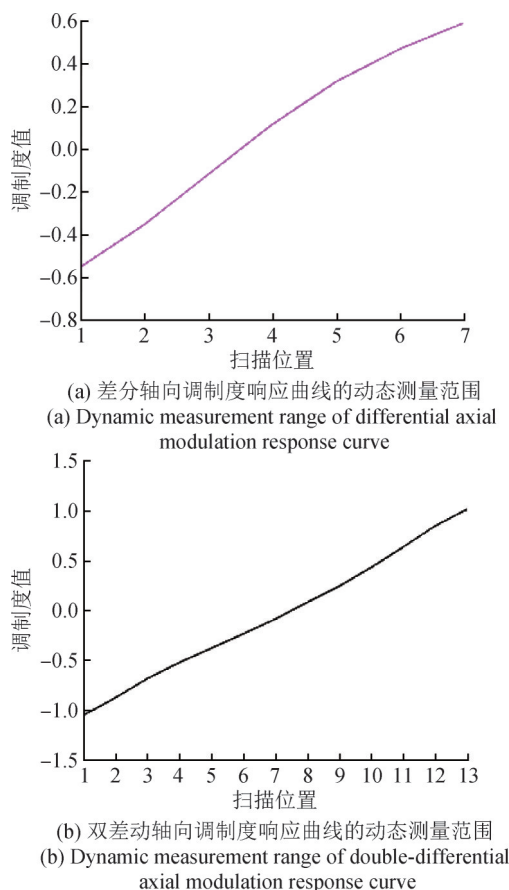


图10 差分法与双差动法的动态测量范围

Fig.10 Dynamic measurement ranges of differential method and double-differential method

图10(b)所示。由图10可知,双差动方法的动态测量范围约为600 nm,而差分方法的动态测量范围约为300 nm,证明了双差动方法的动态测量范围相比差分方法的动态测量范围提升了一倍。

为了验证双差动方法恢复三维形貌的能力,取某台阶表面作为测量样本,经过台阶仪验证,其台阶绝对高度为138.3 nm,如图11所示。

将台阶样本置于扫描位置3150 nm处,该处属于系统的动态测量范围内,三个相机同时采集一组满周期相移图像。通过相移法解得调制度分布,并根据所标定的调制度值与高度之间的关系进行形貌恢复,三维形貌恢复结果如图12(a)所示。图12(b)为图12(a)在 $X=100$ 处的形貌横截面,其台阶高度差处于 (134.1 ± 5.1) nm,符合台阶仪测量结果要求。

为了验证在整个测量范围内系统的形貌恢复能力,分别在扫描位置2900, 3150, 3350 nm处采

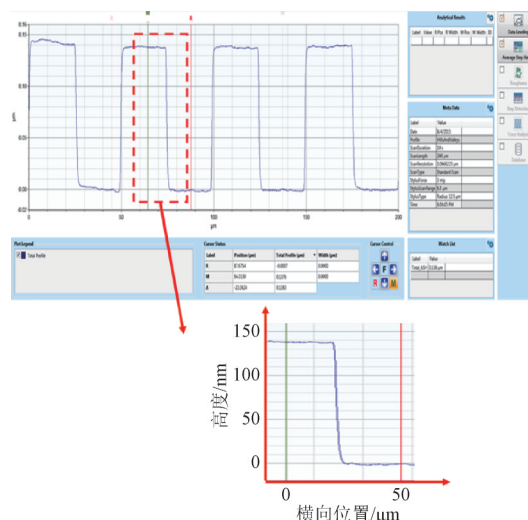
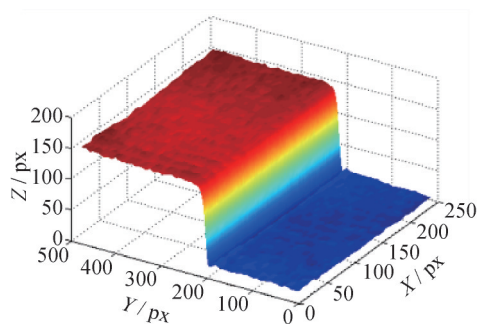


图11 台阶仪测量的样本高度结果

Fig.11 Height of the sample measured by stylus profiler



(a) 双差动法恢复三维形貌结果

(a) Restored result of three-dimensional topography by double-differential fast structured illumination microscopy

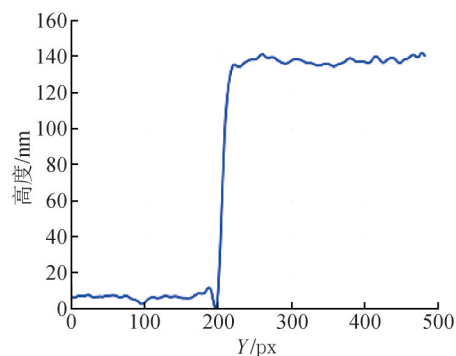
(b) 恢复结果在 $X=100$ 处的横截面(b) Cross-section profiles of restored result at $X=100$

图12 测量结果

Fig.12 Measurement result

集图像做形貌恢复,每个扫描位置重复测量6次,结果如图13所示。平均高度分别为136.7, 131.5, 133.9 nm,均与台阶仪测量结果相近。6组台阶高度的标准差如表1所示,对分别为1.219, 1.689,

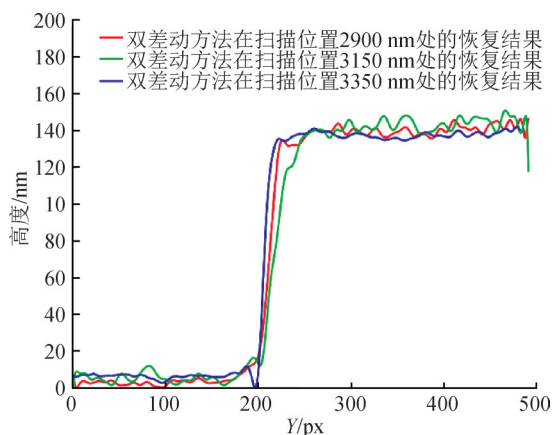


图13 不同轴向扫描位置的恢复结果

Fig.13 Restored results at different axial scanning positions

表1 三个扫描位置测量结果标准差

轴向位置	标准差
2900	1.219
3150	1.689
3350	1.221

1.221 nm的3个位置进行6次重复测量的标准差都较小,证明了双差动方法具有较好的三维形貌恢复能力,且系统具有较好的测量重复性。

图14为相同实验条件下差分方法的测量结果,由于差分方法与双差动方法构建轴向调制度响应曲线的公式不同,所以两种方法测量得到的台阶高低是反向的,为了便于观察,此处进行了翻转处理。

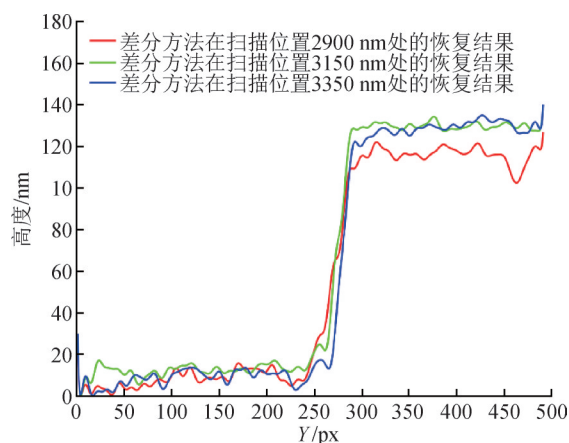


图14 差分方法在不同轴向扫描位置的恢复结果

Fig.14 Restored results of differential method at different axial scanning positions

由图14可以看出,当扫描位置处于3150, 3350 nm时,差分方法的测量结果与双差动方法的测量结果相近,但是当扫描位置处于2900 nm时,差分方法所测得的台阶高度约为120 nm,与台阶仪标定结果相差较远,产生这种现象的原因是当样本放置在扫描位置2900 nm处时,超出了差分测量系统的有效测量范围,导致最后的测量结果不准确。综上所述,在相同的实验参数下,所提出的双差动方法具有比差分方法更宽的有效测量范围。

4 结论

提出了一种双差动快速结构光显微测量方法,将两条CCD探测支路引入传统结构光显微测量系统中,三个具有相同参数的CCD分别放置在显微物镜的焦平面之前、焦平面之后以及焦平面上,通过相移法以及轴向扫描,获得每一个像素点的三条轴向调制度响应曲线,并利用三条响应曲线构建双差动轴向调制度响应曲线,之后提取出双差动轴向调制度响应曲线的线性区域,并标定调制度值与轴向扫描位置之间的线性关系。只需要一次采集处于动态测量范围中的三个CCD图像,求解其对应的调制度值分布,结合标定关系即可完成形貌恢复。开展了仿真分析和实验验证,结果表明双差动快速结构光显微测量方法的动态测量范围相比差分方法的动态测量范围提升了一倍。通过对高度为138.3 nm的台阶样本进行形貌恢复实验,验证了双差动快速结构光显微测量方法恢复被测样本三维形貌的可行性与有效性。本研究为促进快速结构光显微测量技术的发展提供了重要支撑,具有技术借鉴价值。

参考文献

- [1] TAHMASEBI P. Accurate modeling and evaluation of microstructures in complex materials[J]. Physical review E, 2018, 97(2): 23307.
- [2] CHEN C H, TSAI F C, WANG C C, et al. Three-dimensional characterization of active membrane waves on living cells[J]. Physical review letters, 2009, 103(23): 238101.
- [3] ABDEL-AAL H A. Functional surfaces for tribological applications: inspiration and design [J]. Surface topography: metrology and properties, 2016, 4(4): 43001.
- [4] SHARMA V, KUMAR S, REDDY K L, et al. Bioin-

- spired functional surfaces for technological applications [J]. Journal of molecular and engineering materials, 2016, 4(1): 1640006.
- [5] SMITH C L. Basic confocal microscopy[J]. Current protocols in neuroscience, 2011, 56(1).
- [6] DENG Q, LIU J, TANG Y, et al. Spatial modulation-assisted scanning white-light interferometry for noise suppression[J]. IEEE photonics technology letters, 2017, 30(4): 379 – 382.
- [7] SAXENA M, ELURU G, GORTHI S S. Structured illumination microscopy[J]. Advances in optics and photonics, 2015, 7(2): 241 – 275.
- [8] 乔晓旭, 罗怡, 王晓东. 精密测量和加工中的激光技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 74 – 83.
QIAO X X, LUO Y, WANG X D. Laser technology in precision measurement and manufacture [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 74 – 83. (in Chinese)
- [9] 姜志峰, 耿万佳, 张记云, 等. 被动式激光跟踪测量方法及其误差补偿技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 34 – 41.
LOU Z F, GENG W J, ZHANG J Y, et al. Passive laser tracking measurement method and error compensation technology [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 34 – 41. (in Chinese)
- [10] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 91 – 96.
LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for the measurement of nano-scale topography [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(2): 91–96. (in Chinese)
- [11] 李杨, 张凯林, 石伟. 激光扫描共聚焦显微镜在微小硬度压痕测量中的应用研究[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 46 – 49.
LI Y, ZHANG K L, SHI W. Application of confocal laser scanning microscope in microvickers hardness indentation measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(6): 46 – 49. (in Chinese)
- [12] NEIL M A A, JUŠKAITIS R, WILSON T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope [J]. Optics letters, 1997, 22(24): 1905 – 1907.
- [13] ZHONG M, SU X, CHEN W, et al. Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning [J]. Optics express, 2014, 22(26): 31620 – 31634.
- [14] DAN D, YAO B, LEI M. Structured illumination microscopy for super-resolution and optical sectioning [J]. Chinese science bulletin, 2014, 59(12): 1291 – 1307.
- [15] KRZEWINA L G, KIM M K. Single-exposure optical sectioning by color structured illumination microscopy [J]. Optics letters, 2006, 31(4): 477 – 479.
- [16] TSAI C W, LEE C H, WANG J. Deconvolution of local surface response from topography in nanometer profilometry with a dual-scan method [J]. Optics letters, 1999, 24(23): 1732 – 1734.
- [17] ZHONG M, CHEN F, XIAO C, et al. 3-D surface profilometry based on modulation measurement by applying wavelet transform method [J]. Optics and lasers in engineering, 2017, 88: 243 – 254.
- [18] LEE C H, MONG H Y, LIN W C. Noninterferometric wide-field optical profilometry with nanometer depth resolution [J]. Optics letters, 2002, 27(20): 1773 – 1775.
- [19] WANG T, LIU T, YANG S, et al. Nonscanning three-dimensional measurement by structured illumination sectioning microscopy [J]. Optical engineering, 2018, 57(7): 74104.
- [20] XIE Z, TANG Y, HE Y, et al. Fast structured illumination microscopy with reflectance disturbance resistibility and improved accuracy [J]. Optics express, 2019, 27(15): 21508 – 21519.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 唐燕 (1982—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为微纳制造中的纳米检测技术。针对制造过程检测需要, 开展光刻机设备核心检焦、对准及间隙测量等关键技术研究; 针对加工结果检测需要, 以超分辨、三维测量为核心, 开展多种检测方法研究及专用设备研发。