

高分辨力分光瞳差动共聚焦传感技术研究*

刘超^{1,2}, 王允³, 赵维谦³, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学 生物医学检测技术及仪器北京实验室 北京 100101; 3. 北京理工大学光电学院 北京 100081)

摘要:为了提高现有共聚焦传感技术的轴向分辨力、实现微观形貌的高精度测量,在提出分光瞳差动共聚焦传感技术的基础上,对其关键参数优化理论进行了进一步研究,并研制了一种具有最优参数的分光瞳差动共聚焦显微传感器,其融合了分光瞳差动共聚焦显微技术和基于可编辑探测器件的虚拟针孔技术,利用探测区域偏移可使分光瞳共聚焦显微技术轴向特性曲线产生相移这一特性,沿特定方向在探测面上对称设置两个虚拟针孔,通过探测它们的强度响应并进行差动处理实现高轴向分辨力、高定位精度测量。对所研制的传感器进行了轴向响应特性及传感器非线性验证,给出了其轴向相对位移测量公式,还利用所研传感器对实际的高度标准样品进行了测量,经实验验证,所研传感器轴向分辨力可达5 nm,横向分辨力为0.82 μm ,为微细结构三维表面的高精度测量提供了一种新的传感技术及系统。

关键词: 共聚焦; 分光瞳; 虚拟针孔

中图分类号: TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 416.20

High-resolution divided-aperture differential confocal sensing technique

Liu Chao^{1,2}, Wang Yun³, Zhao Weiqian³, Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China; 3. School of Optic-electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve axial resolution of the confocal sensor and realize high accuracy measurement of micro-topography, the split-pupil differential confocal sensing technique is proposed. The key parameter optimization theory is further studied, and a divided-aperture differential confocal microscopic sensor with optimal theoretical parameters is developed. The developed sensor combines divided-aperture differential confocal microscopy and virtual pinholes based on editable detection device. The offset of the detection area can bring the phase offset of the axial characteristic curve in the divided-aperture confocal microscopy. Two virtual pinholes are set symmetrically on the detection surface in a specific direction, whose responses are obtained and differentially processed to achieve high axial resolution and high positioning accuracy measurement. The developed sensor are tested The axial response, nonlinear property of the developed sensor are evaluated and the actual sample is measured. The axial relative displacement measurement formula is obtained. Experimental results indicate that the axial resolution of the developed sensor is 5 nm and the lateral resolution is 0.82 μm , which can provide a new sensing technology and system for the high-precision measurement of the three-dimensional surface of the microstructure.

Keywords: confocal microscopy; divided aperture; virtual pinhole

0 引言

现代超精密制造和加工技术的不断进步对微观尺寸的超精密检测技术提出了越来越高的要求,因此微观尺寸结构的形貌及尺寸测量也成为了研究热点^[1-3]。共聚焦显微技术在传统显微技术的探测器前引入了针孔,使传统的显微测量由面成像变为点扫描成像,具有独特的光学层析成像能力和高轴向分辨力,作为光探针技术广泛应用于三维微细结构和三维表面轮廓测量等领域,一直是显微测量领域的重要工具之一。为了进一步提高其分辨能力, Koester C. J.^[4]在 Maurice D. M.^[5]的基础上将共聚焦显微技术与光学分光瞳技术相结合,提出了一种非满光瞳入射的共聚焦显微技术,该技术进一步增强了系统抑制散射光的能力,其层析能力和杂散光抑制能力得到了显著的增强,因此非常适于透明、半透明和高散射率样品的测量; Sheppard C. J. R. 等人^[6-7]在传统共聚焦显微技术光路结构中加入了遮光板,提出了共聚焦 θ 显微技术,并对三维表面进行了观测,获得了分辨力更高、成像立体感更好的图像; Török P 等人^[8-9]在共聚焦显微技术的入射光路中设置了半光瞳光阑,并引进暗场照明以改进成像效果,对印刷掩模板和人体细胞进行了成像测量,通过理论分析和实验给出了该技术会降低系统横向分辨力的结论; Aguilar J. F.^[10]对 Sheppard C. J. R. 等人和 Török P 等人的光路结构进行了改进,将光阑设置在光源和分光镜之间,充分利用了物镜的入瞳和出瞳,更符合反射式共聚焦显微镜的工作状态,显著地抑制了伪光作用; Dwyer P. J. 等人^[11-12]提出了一种具有柱面镜和扫描反射镜的线扫描共聚焦 θ 显微技术,实现了线照明和扫描成像; Glazowski C 等人^[13-14]研制了基于共聚焦 θ 显微技术的内窥镜,实现了实时成像,获取的图像拥有更好的层析效果和更少的斑点杂像。

但是,以上技术仍采用传统共聚焦技术的强度响应曲线斜边线性段换算或峰值追踪法的测量方法^[15-17],存在以下不足:当利用强度响应曲线斜边线性段进行测量时,无法实现绝对位移测量;当利用强度响应的峰值对样品进行焦点跟踪测量时,由于与焦点对应的强度响应曲线顶点处灵敏度最差,因而制约了焦点跟踪精度的进一步提高;容易受光源强度波动、背景光干扰、环境温度漂移的影响,成像信噪比不高。为了克服上述不足,基于虚拟针孔技术,提出了一种可进行双极性绝对测量的分光瞳差动共聚焦传感技术(divided-aperture differential confocal sensing technique, DDCST)^[18],其利用可编辑探测器器件取代了传统的物理针孔与光电探测器,通过软件在探测面上设置了两个点探测器实现差动探测,进而实现了双极性绝对零点跟踪测量等。

本文基于分光瞳差动共聚焦传感技术,优化了其关

键参数,研制了分光瞳差动共聚焦传感器,实现了基于 CCD 的虚拟针孔探测,大幅简化了探测系统,实现了针孔位置和尺寸的自由调整,避免了物理针孔调整误差给传感系统带来的影响,并构建了相应的实验系统对其基本特性进行验证。本文所研传感器保留了分光瞳共聚焦传感技术结构简单、有利于传感器小型化设计的突出优点,由于取消了针孔等硬件设备,传感器的尺寸及成本都被大幅压缩,稳定性得到了明显提升,特别适用于三维微细结构和三维表面轮廓测量领域,扩展了分光瞳共聚焦技术的应用领域。

1 基本原理

1.1 分光瞳差动共聚焦传感技术原理

DDCST 测量原理如图 1 所示,物镜 L 的光瞳面被分割为照明光瞳 S_1 和收集光瞳 S_2 。平行光束透过照明光瞳 S_1 后被物镜 L 会聚到被测表面,载有被测样品信息的反射光经过收集光瞳 S_2 及会聚镜后成像于 CCD 探测面上,在被测样品离焦过程中光斑运动的方向上,在光斑中心两侧对称地设置两个微区 A 和 B,只读取其平均灰度值,则该区域即点探测器的设置就起到了针孔的作用,然后利用两微区信号进行差动相减处理后的曲线的零位或线性段即可实现焦点跟踪或者位移测量。其中, (x, y, z) 为物镜 L 的像方空间坐标, (η, ξ) 为光瞳坐标, (x_d, y_d, z_d) 为探测面的像方坐标。

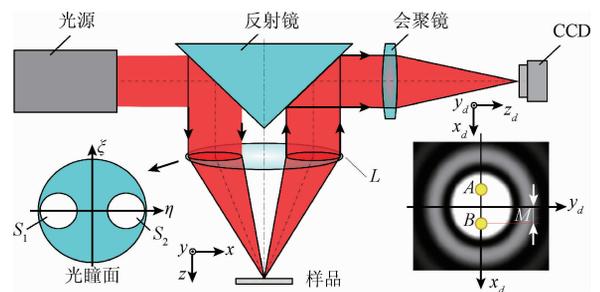


图1 分光瞳差动共聚焦传感技术原理

Fig. 1 Principle of DDCST

在 DDCST 中,当使用中等以下数值孔径 ($NA < 0.7$) 的物镜时,系统遵循傍轴近似原理。此时,照明系统和收集系统的点扩散函数分别为 $h_i(v_x, v_y, u)$ 和 $h_c(v_x, v_y, u, v_M)$, 其式可表达为:

$$h_i(v_x, v_y, u) = \iint_{S_1} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{iu}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \times \exp[i(v_x v_\xi + v_y v_\eta)] dv_\xi dv_\eta \quad (1)$$

$$h_c(v_x, v_y, u, v_M) = \iint_{S_2} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{iu}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \times \exp\{i[(v_x + v_M)v_\xi + v_y v_\eta]\} dv_\xi dv_\eta \quad (2)$$

式中: $v_x = 2\pi x \sin\alpha / \lambda$, $v_y = 2\pi y \sin\alpha / \lambda$, $u = 8\pi z \sin^2(\alpha/2) / \lambda$ 为物镜 L 在像空间的归一化光学坐标, $P(v_\xi, v_\eta)$ 为物镜 L 的光瞳函数, v_ξ 与 v_η 为物镜 L 的归一化半径, 令 M 为

点探测器与光轴之间的偏移量, $v_M = 2\pi M \sin\alpha_d / \lambda$ 为点探测器偏移量的归一化坐标。点探测器 A 和点探测器 B 探测到的强度信号分别如式(3)、(4)。

$$I_A(x, y, z, -v_M) = \left| \iint_{S_1} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp[i(v_x v_\xi + v_y v_\eta)] dv_\xi dv_\eta \times \right. \\ \left. \iint_{S_2} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp\{i[(v_x - v_M)v_\xi + v_y v_\eta]\} dv_\xi dv_\eta \right|^2 \quad (3)$$

$$I_B(x, y, z, +v_M) = \left| \iint_{S_1} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp[i(v_x v_\xi + v_y v_\eta)] dv_\xi dv_\eta \times \right. \\ \left. \iint_{S_2} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp\{i[(v_x + v_M)v_\xi + v_y v_\eta]\} dv_\xi dv_\eta \right|^2 \quad (4)$$

DDCST 的响应曲线由两个点探测器即单针孔的响应曲线相减而成, 其强度响应函数如式(5), 其仿真结果

如图 2 所示。

$$I_{\text{DDCST}}(x, y, z, v_M) = I_A(x, y, z, -v_M) - I_B(x, y, z, +v_M) = \left| \iint_{S_1} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp[i(v_x v_\xi + v_y v_\eta)] dv_\xi dv_\eta \right|^2 \times \\ \left\{ \left| \iint_{S_2} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp\{i[(v_x - v_M)v_\xi + v_y v_\eta]\} dv_\xi dv_\eta \right|^2 - \right. \\ \left. \left| \iint_{S_2} P(v_\xi, v_\eta) \exp\left[\frac{i u}{2}(v_\xi^2 + v_\eta^2)\right] \cdot \exp\{i[(v_x + v_M)v_\xi + v_y v_\eta]\} dv_\xi dv_\eta \right|^2 \right\} \quad (5)$$

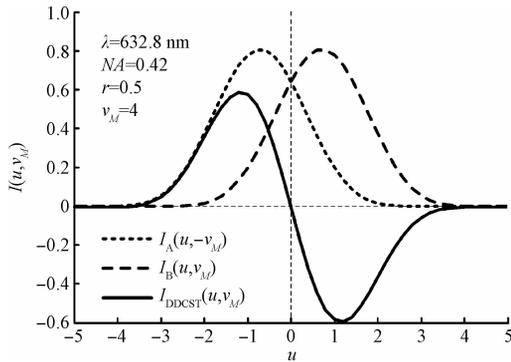


图2 分光瞳差动共聚焦传感技术轴向响应曲线

Fig. 2 Axial response curve of DDCST

由图 2 可知, 当点探测器存在横向偏移 v_M 时, 其相应的轴向强度响应 $I_A(u, -v_M)$ 及 $I_B(u, v_M)$ 沿 u 轴方向产生一定的相移。差动相减后的轴向响应曲线 $I_{\text{DDCST}}(u, v_M)$ 的零位与物镜 L 的焦点位置共轭, 此特性极便于 DDCST 进行焦点跟踪测量; 其线性段的斜率及长度均优于单针孔探测时, 因此轴向分辨率及线性量程范围也得到了提升。

在 DDCST 中, 点探测器的偏移量、位置和大小均可通过软件系统任意选定, 可以避免物理针孔调整难度大的缺点, 极大地降低了系统调试难度和成本; 而且还可依据不同的测量需求, 综合考虑传感器分辨率和量程范围之间的关系, 通过改变点探测器的位置和大小进行参数间的最优化的匹配, 选定合适的传感器特性曲线以取得最佳测量结果。

由于采用了差动相减的数据处理方法, DDCST 还可

以有效抑制光源光强波动、探测器电子漂移、环境状态差异等产生的共模噪声, 提高了系统的稳定性。

1.2 系统参数优化

物镜 L 的光瞳函数 $P(v_\xi, v_\eta)$ 是影响单针孔响应的重要因素, 可决定其轴向响应的峰值及宽度, 影响单针孔探测时的测量精度和分辨率, 进而影响 DDCST 的分辨能力, 其分辨率公式可表达为:

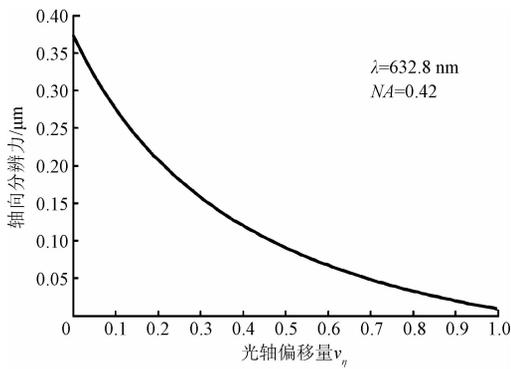
$$\Delta = \frac{\partial I_A(x, y, z, -v_M)}{v_\eta} \quad (6)$$

光轴偏移量与单针孔系统分辨率的关系如图 3 所示, 可知 $P(v_\xi, v_\eta)$ 对轴向及横向分辨率影响趋势不一, 当 $0.4 < v_\eta < 0.6$ 时, 其横向和轴向分辨率变化不大。并且当 $v_\eta = v_\xi = 0.5$ 时, 物镜的入瞳面得到最大利用, 可探测信号强度也最大, 而且可使被测样品在产生轴向运动时显微系统焦斑只沿 x_d 方向运动, 是轴向及横向分辨率变化的最佳平衡点, 可以充分发挥分光瞳差动共聚焦传感技术的优势, 最有利于后续的测量。因此, 本文所设计传感器取 $v_\eta = 0.5$ 。

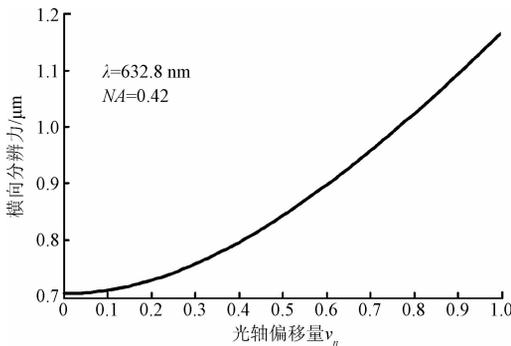
传统共聚焦传感技术利用响应曲线的线性段测量相对位移, 其曲线斜率决定了测量精度, 且可表征轴向分辨率。在 DDCST 中, 其轴向分辨率同样可由响应曲线线性段的斜率表示, 由于其由带有对称偏移量的点探测器相减运算得到, 点探测器的响应对 DDCST 响应曲线线性段的斜率有直接影响, 探测焦面上离轴 v_M 处的某微小区域 i 的轴向强度响应 $I_i(u, v_M)$ 为:

$$I_i(u, v_M) = |h_i(0, 0, u) \cdot h_c(0, 0, u, v_M)|^2 \quad (7)$$

选取不同的偏移量 v_M , 对其轴向响应进行仿真, 其结果如图 4 所示。



(a) 光轴偏移量对轴向分辨率的影响
(a) The relationship of axial resolution and axis offset



(b) 光轴偏移量对横向分辨率的影响
(b) The relationship of lateral resolution and axis offset

图3 光轴偏移量与单针孔系统分辨率的关系

Fig. 3 The relationship of resolution of single pinhole system and axis offset

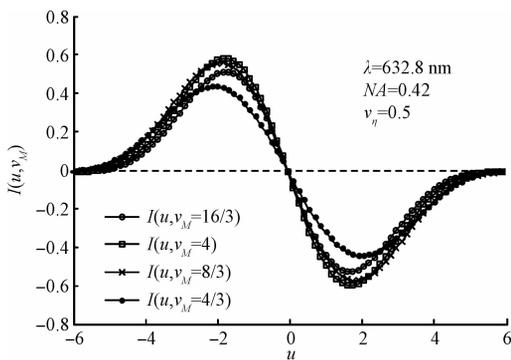


图4 不同 v_M 值的分光瞳差动共聚焦传感器技术轴向响应曲线

Fig. 4 Axial properties curves of DDCST with different v_M

由图4可知,不同的偏移量 v_M 会决定不同的轴向响应曲线,也具有不同的线性段斜率,因此,一定存在一个最佳偏移量 v_M 对应着最佳的系统轴向分辨率。

由于直线上各点斜率均相等,所以 DDCST 响应曲线线性段的斜率可以由其在 $u=0$ 处的斜率 $k(0, v_M)$ 表示:

$$\Delta_{\text{axial}} = k(u=0, v_M) = \frac{\partial I_{\text{DDCST}}(u, v_M)}{\partial u} = k \quad (8)$$

对其进行仿真计算,结果如图5所示,可知,当 $v_M=4$ 时, $k(u=0, v_M)$ 有最大值,即当 $v_M=4$ 时 DDCST 具有最佳轴向分辨率。

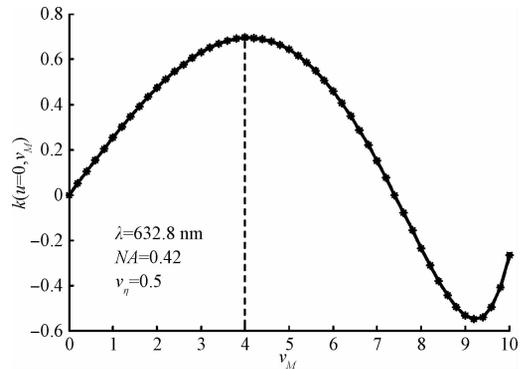


图5 不同 v_M 值的分光瞳差动共聚焦传感技术轴向响应曲线线性段斜率

Fig. 5 The linear section slope of DDCST axial response curve with different v_M

2 传感器设计

基于图1所示原理,依据前述分析,本文设计了如图6所示的激光分光瞳差动共聚焦传感器(divided-aperture differential confocal sensor, DDCS)。其物镜光瞳面被分割为直径均等的照明光瞳 S_1 和收集光瞳 S_2 ,为了便于 CCD 探测器进行分割焦斑探测,DDCS 将会聚在 CCD 探测器面上的焦斑进行放大。由元器件参数和几何光学原理计算得,测量光束在会聚透镜焦面上的光斑直径约为 $\phi 30 \mu\text{m}$,被放大镜放大并成像在 CCD 的光斑直径约为 $\phi 520 \mu\text{m}$,在该参数条件下的,针孔实际最佳偏移量约为 30 pixels。在 CCD 像面上设置直径为 6 个像素的圆形微区 A 和 B,其几何尺寸约为 $\phi 36 \mu\text{m}$ 。

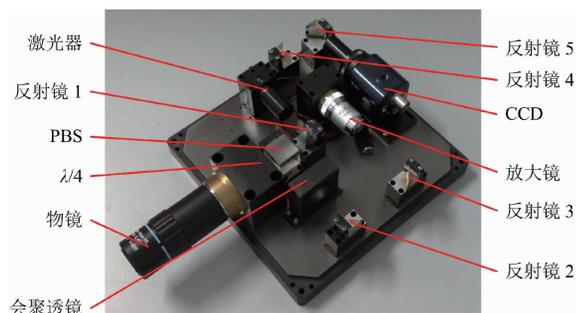


图6 激光分光瞳差动共聚焦传感器

Fig. 6 The assembled DDCS

3 实验验证

为了验证以上技术的正确性及所设计传感器的测量特性,对 DDCCS 进行了轴向特性实验以获得其传感方程,并进一步针对实际样品进行了测量。

3.1 轴向特性实验

以平面反射镜为测量物沿物镜轴向运动,对 DDCCS 的轴向分辨力进行测量。实验中,平面反射镜位移由压电陶瓷驱动器完成,位移监测由干涉仪完成。同时在探测面上设置 2 个具有对称偏移量的虚拟针孔,计算其像素平均灰度并进行差动处理,得到如图 7 所示的 DDCCS 轴向强度响应 $I_{DDCS}(z)$ 。

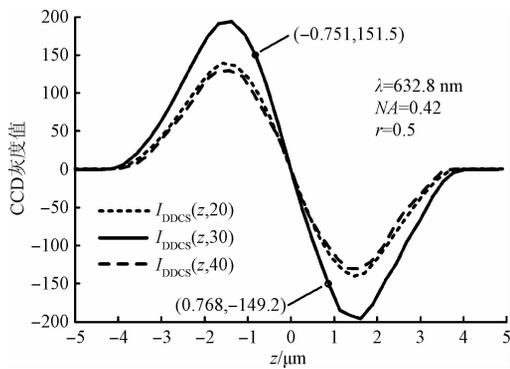


图7 DDCCS 轴向特性实验结果

Fig. 7 Axial property experimental curves of DDCCS

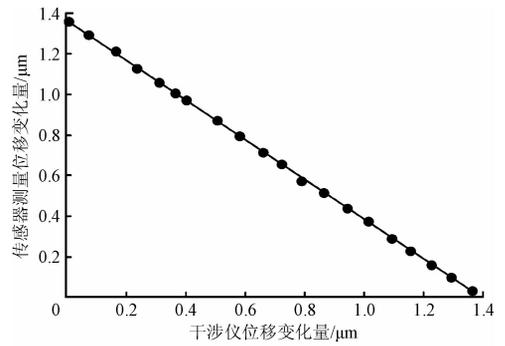
取其线性段 $[-0.751, 0.768]$ μm 进行直线拟合,可得光强与轴向位移 z 的关系为:

$$I(z) = -212z - 7.6 \quad z \in (-0.751, 0.768) \quad (9)$$

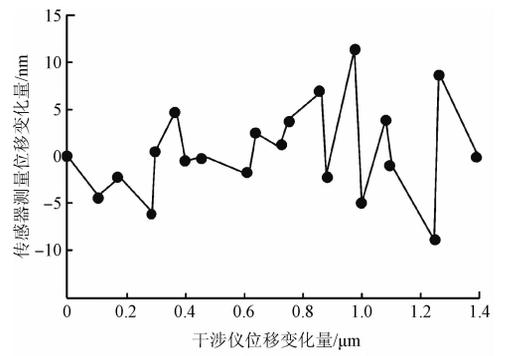
由图 7 分析还可知,所测轴向强度响应曲线与理论仿真结果一致,线性测量范围约 $1.519 \mu\text{m}$,包含的灰阶总数为 300,因此所研 DDCCS 的轴向分辨力约为 5 nm 。利用该线性方程还可在量程范围内进行相对位移量的换算,从而在不需要对样品进行 z 向扫描的情况下仍然可以完成三维表面的测量。

3.2 非线性测试

利用式(9)计算线性区域内的轴向位移,用激光干涉仪对所研 DDCCS 的轴向位移进行标定,为直观起见,我们将线性区域内传感器测量的轴向位移量和干涉仪位移归零化,将传感器测量位移变化量与干涉仪位移变化量的对应关系制成图,如图 8 所示,可知,DDCCS 在其测量曲线线性区域内的非线性误差约为 20 nm ,约为其量程的 1.3% 。



(a) DDCCS-干涉仪位移变化量
(a) The displacement variation of DDCCS-interferometer



(b) DDCCS-干涉仪位移归零化变化量
(b) The reset displacement variation of DDCCS-interferometer

图 8 DDCCS 非线性曲线

Fig. 8 The nonlinear curve of DDCCS

4 应用案例

采用本文所研制的 DDCCS,对 Budget Sensor 公司生产的高度标准 HS-500MG 的表面轮廓进行了实际测量验证,其实物及原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) Dimension 3100 测量结果如图 9 所示,由标示说明可知,AFM 测得的峰谷高度为 477.29 nm ,可测得斜坡横向距离 937.5 nm 。

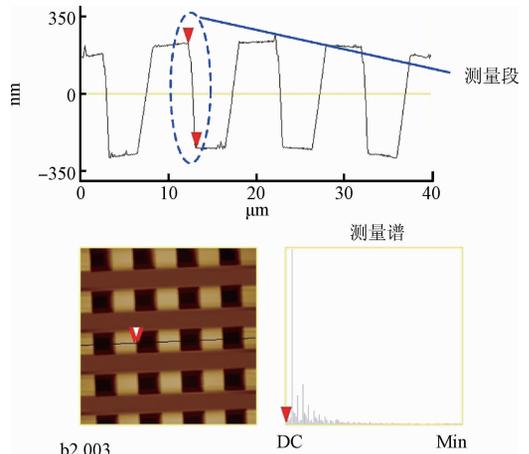


图 9 HS-500MG 的 AFM 测量结果

Fig. 9 Measurements of HS-500MG with AFM

利用 DDCS 对所显示的同一段微观结构进行测量,其结果如图 10 所示,可知,DDCS 实测高度约为 489 nm,实测斜坡宽度为 1.79 μm (包含 AFM 所测斜坡宽度 0.973 5 μm),可得系统的横向分辨率约为 0.82 μm 。与实际已测特性曲线比较可知,轴向和横向特性符合程度良好。

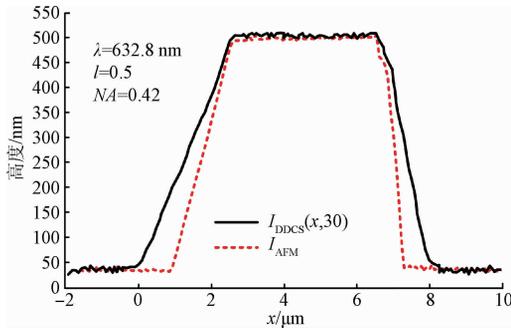


图 10 HS-500MG 的 DDCS 测量结果

Fig. 10 Measurements of HS-500MG with DDCS

5 结 论

本文基于激光分光瞳差动共聚焦传感技术,对其关键参数进行了优化设计,确定了最佳归一化光瞳半径及点探测器的最佳偏移量,设计和装配了激光分光瞳差动共聚焦传感器,并对其轴向响应特性进行了验证,给出了其相对位移测量方程和非线性特性。针对实际高度标准的测量证明,所研传感器的轴向分辨率可达 5 nm,横向分辨率约为 0.82 μm ,与标准测量结果基本一致。本文所研传感器采用了可编辑器件作为探测器,大幅减小了传感器的成本及装调难度,扩展了其性能可调性,后期将继续进行系统集成研究以减小传感器尺寸及重量,可为三维微细结构和三维表面轮廓测量领域提供一种新的传感技术与系统。

参考文献

- [1] 彭凯,于治成,刘小康,等. 单排差动结构的新型纳米时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 734-740.
PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. Novel nanometer time-grating displacement sensor with single row differential structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 734-740.
- [2] 徐立新,谢建斌,杨智伟,等. 微细热电偶的制作与时间常数标定方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1023-1028.
XU L X, XIE J B, YANG ZH W, et al. Preparation of micro thermocouple and calibration method of time constant [J]. Journal of Electronic Measurement and

Instrumentation, 2016, 30(7): 1023-1028.

- [3] 周正干,李洋,陈芳浩,等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 371-378.
ZHOU ZH G, LI Y, CHEN F H, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 371-378.
- [4] KOESTER C J. Scanning mirror microscope with optical sectioning characteristics: Applications in ophthalmology [J]. Applied Optics, 1980, 19(11): 1749-1757.
- [5] MAURICE D M. A scanning slit optical microscope [J]. Investigative Ophthalmology, 1974, 13(12): 1033-1037.
- [6] SHEPPARD C J R, HAMILTON D K. High-resolution stereoscopic imaging [J]. Applied Optics, 1983, 22(6): 886-887.
- [7] SHEPPARD C J R, GONG W, SI K. The divided aperture technique for microscopy through scattering media [J]. Optics Express, 2008, 16(21): 17031-17038.
- [8] TOROK P, LACZIK Z, SHEPPARD C J R. Effect of half-stop lateral misalignment on imaging of dark-field and stereoscopic confocal microscopes [J]. Applied Optics, 1996, 35(34): 6732-6739.
- [9] TOROK P, HIGDON P, WILSON T. On the general properties of polarized light conventional and confocal microscopes [J]. Optics Communications, 1998, 148(4-6): 300-315.
- [10] AGUILAR J F. Confocal profiling of grooves and ridges with circular section using the divided aperture technique [J]. Revista Mexicana De Física, 2005, 51(4): 420-425.
- [11] DWYER P J, DIMARZIO C A, RAJADHYAKSHA M. Confocal theta line-scanning microscope for imaging human tissues [J]. Applied Optics, 2007, 46(10): 1843-1851.
- [12] DWYER P J, DIMARZIO C A, ZAVISLAN J M, et al. Confocal reflectance theta line scanning microscope for imaging human skin in vivo [J]. Optics Letters, 2006, 31(7): 942-944.
- [13] GLAZOWSKI C, ABEYTUNGE S, RAJADHYAKSHA M. Real-time line-scanning reflectance confocal endoscope to enhance sectioning and reduce speckle for intraoral imaging [C]. Proceedings of SPIE, 2012, 8207(2): 82071U-82071U-7.
- [14] GLAZOWSKI C, ZAVISLAN J, RAJADHYAKSHA M. Background and speckle suppression with a divided pupil

and Nomarski prism for reflectance line-scanning confocal microscopy of human tissues [C]. Proceedings of SPIE, 2012, 8227:20.

- [15] 潘越,徐熙平,乔杨. 8~12 μm 红外动态热像模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1853-1860.
PAN Y, XU X P, QIAO Y. Opto-mechanical structural design for 8 - 12 μm infrared dynamic thermal image simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8):1853-1860.
- [16] 武国梁,王刚,齐荔荔,等. 基于相位线性展开的波前误差检测与图像复原[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5):50-52.
WU G L, WANG G, QI L L. Wavefront phase error detection and image restoration based on linear expansion [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(5):50-52.
- [17] 陆惠宗,屠明亮,纪晨东,等. 激光聚焦偏移测量微小位移方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 461-466.
LU H Z, TU M L, JI CH D, et al. Micro displacement measurement method based on laser focus deviation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 461-466.
- [18] ZHAO W Q, LIU CH, QIU L R, Laser divided-aperture differential confocal sensing technology with improved axial resolution [J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25979-25989.

作者简介



刘超,分别在2006年和2013年于北京理工大学获得学士学位和博士学位,现为北京信息科技大学讲师,主要研究方向为光电检测技术与仪器、生物医疗技术与仪器等领域。

E-mail: liuchaodi@vip.sina.com

Liu Chao received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Beijing Institute of Technology in 2006 and 2013, respectively. Now he is an assistant professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include opto-electronics and bio-medical measurement technology and equipment.



祝连庆(通讯作者),分别在1982年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为光纤传感与激光技术、光电精密测试技术等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of technology in 1982 and 1989, respectively, and his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. Now he is a professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, fiber laser, and optical measurement technology.