

# 基于数字微镜的并行激光共焦显微检测技术研究

涂龙<sup>1,2</sup> 余锦<sup>1</sup> 樊仲维<sup>1,3</sup> 邱基斯<sup>3</sup> 赵天卓<sup>1,3</sup> 王治昊<sup>1,2</sup> 吴权<sup>1,2,3</sup>  
葛文琦<sup>1</sup> 郭广妍<sup>1,2</sup> 王昊成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院 激光工程中心, 北京 100094  
<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

**摘要** 为了对微纳加工工件进行三维形貌测量,建立了基于数字微镜的并行激光共焦显微检测系统。首先,利用衍射光学对数字微镜的夫琅禾费衍射模型进行了研究。接着,利用数字微镜实现扫描像素单元为 $2 \times 2$ ,周期为 $T=3$ 的并行扫描模式。然后对三维图像重构算法和激光散斑匀化进行了分析。最后,利用该系统分别对镀膜平板、WSZ位置灵敏阳极探测器以及螺钉进行了三维测量。实验结果表明,在轴向平移台步距为10 nm的条件下,该系统能准确重构出样品三维形貌。该共焦显微检测方法能大大提高共焦扫描速度,能很好地满足一般工业检测需求,本文为并行共焦检测技术提供了一条新的研究和应用方法。

**关键词** 并行共焦显微;数字微镜;三维图像重构;形貌测量

**中图分类号** TH742 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101702

## Research on the Technology of Parallel Laser Confocal Microscopy Detection Based on Digital Micromirror Device

Tu Long<sup>1,2</sup> Yu Jin<sup>1</sup> Fan Zhongwei<sup>1,3</sup> Qiu Jisi<sup>3</sup> Zhao Tianzhuo<sup>1,3</sup> Wang Zhihao<sup>1,2</sup>  
Wu Quan<sup>1,2,3</sup> Ge Wenqi<sup>1</sup> Guo Guangyan<sup>1,2</sup> Wang Haocheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China  
<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup>Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

**Abstract** In order to measure workpiece's micro-nano three-dimensional topography, a parallel confocal microscopy detection system based on digital micromirror device(DMD) is set up. Firstly, the Fraunhofer diffraction model of DMD is studied. Secondly, the parallel scanning model of  $2 \times 2$  pixel unit and  $T=3$  is realized by the use of DMD. Then the three-dimensional image reconstruction algorithm and laser speckle homogenization is analyzed. Finally, the measuring system makes three-dimensional measurements for coated plate, WSZ position sensitive anode detector and screw respectively. The experimental results show that the three-dimensional reconstruction image is obtained under the condition that the stepping motor moves 10 nm per step. This parallel confocal microscopy system greatly improves the three-dimensional testing speed and can satisfactorily meet the general industrial testing requirement. It provides a new method of research and application for parallel confocal detection technology.

**Key words** parallel confocal microscopy; digital micromirror device; 3D image reconstruction; shape measurement

**OCIS codes** 170.1790; 180.1790; 180.6900

**收稿日期**: 2013-03-27; **收到修改稿日期**: 2013-05-09; **网络出版日期**: 2013-08-27

**基金项目**: 中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)、海淀区基本计划项目(K20110037)

**作者简介**: 涂龙(1988-),男,硕士研究生,主要从事激光技术及其应用方面的研究。E-mail: tulong@aoe.ac.cn

**导师简介**: 余锦(1971-),男,博士,研究员,主要从事全固态激光与非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: jinyu@aoe.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

# 1 引言

近年来,微器件和微光机电系统(MOEMS)的实验研究和工业生产对其表面三维形貌检测提出了越来越高的要求。共焦显微成像技术由于其高精度、高分辨率、非接触、独特的轴向层析成像能力以及易于实现三维图像重构等功能在微纳检测、精密测量和生命科学研究等领域得到了广泛的应用。传统的共焦显微探测技术都是基于光源、被照物点和探测器三点彼此共轭的原理进行单点机械扫描,因此扫描速度比较慢,机械控制系统复杂,扫描所引起的振动限制了测量的精度,并存在渐晕现象,不易实现实时快速的三维测量。为克服共焦显微镜成像速度慢、视场小的缺点,并行共焦显微检测技术成为当前的研究热点,该方法采用微光学器件实现对光束的分割,使单点扫描变为多光束同时并行扫描,极大提高了测量速度。目前,国内外研究人员提出了各类并行共焦方法,按实现并行方式的不同主要分为 Nipkow 转盘法<sup>[1-2]</sup>、微透镜阵列法<sup>[3-4]</sup>、达曼光栅法<sup>[5-6]</sup>、像散法<sup>[7]</sup>、数字微镜法<sup>[8-9]</sup>和彩色色差法<sup>[10-12]</sup>等。

基于 DMD 的并行共焦显微检测技术将 DMD 与共焦测量方法相结合,用 DMD 及其控制系统替代了传统共焦测量中的照明针孔和横向扫描结构,充分发挥 DMD 横向分辨率高、响应速度快以及便于计算机控制的优点,大大提高其扫描速度<sup>[9]</sup>。但是国内外在此方面的研究中大多采用准单色非相干光作光源,而不是采用单色性和方向性都好的激光做光源,主要原因是激光良好的相干性在并行共焦显微检测中会带来相干噪声和散斑,从而影响分辨率。对此,本文给出了一种基于数字微镜(DMD)的并行激光共焦显微检测系统并对其进行相关的理论和实验研究。理论上,本文在傅里叶光学分析基础上,给出了基于 DMD 的并行激光共焦显微理论模型。实验上,搭建了并行共焦显微检测系统,利用旋转随机相位板对激光散斑进行了匀化并达到较好的效果,充分利用激光单色性好、亮度高和方向性好的优点,又去除了激光散斑对分辨率的影响,在图像处理上,利用 Matlab 图像处理工具对 CCD 采集到的二维图像依次进行去噪和压缩处理、层面图像恢复和三维图像重构,实现对样品表面精确、大范围的三维测量。并在此基础上进行了大量的实验研究,分析了影响并行共焦探测系统特性的一些因素及其对并行共焦检测精度的影响,为并行共焦测量系统设计与仪器化提供了理论基础和实验参考。

## 2 基于 DMD 的并行共焦显微理论模型

### 2.1 并行共焦显微技术简介

并行共焦系统通过微光学器件,实现对光束的分割,从单点扫描变为多路并行探测,同步对被测表面的不同点进行探测,从而实现全场同步测量。图 1 为并行共焦检测的原理图。

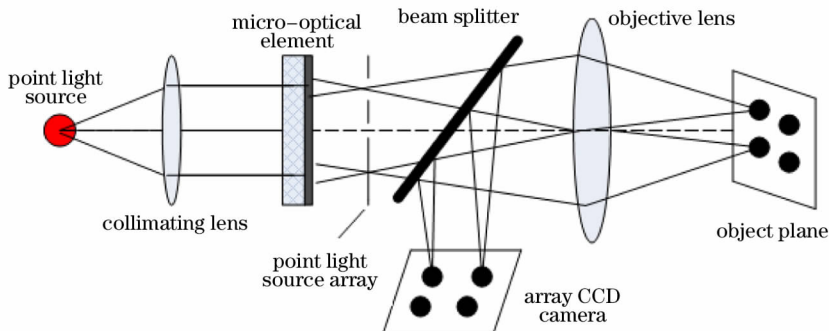


图 1 并行共焦显微示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel confocal microscopy

中国科学院光电研究院的田维坚等<sup>[13]</sup>在 1999 年给出了共焦三维检测的理论。(1)式给出了在共焦显微镜三维成像的过程中,系统的有效点扩展函数是照明和成像子系统点扩展函数的乘积,即

$$h_{\text{con}} = h_1 h_2, \quad (1)$$

与串级系统(两个点扩展函数的卷积)不同,这样系统总的点扩展函数变窄了,因而改善了总的点扩散特性。这是共焦系统分辨率优于一般显微系统的根本原因。在傍轴的条件下,并行共焦检测中任一点光源成像都满足脉冲响应函数乘积的共焦关系。定义开关函数

$$S_{i,j}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad (2)$$

当微镜处于‘开’状态时为 1, 处于‘关’状态时为 0, 则平行单色光照射到 DMD 上经反射形成的光源阵列排列如图 2 所示。

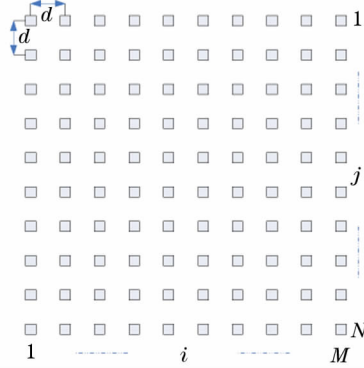


图 2 点光源阵列示意图

Fig. 2 Schematic diagram of point light source array

点光源阵列的光场振幅分布函数可表示为

$$G(r_0) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \delta(x_0 - id, y_0 - jd, Z_0) S_{i,j}(x_i, y_j), \quad (3)$$

式中  $d$  为相邻点光源间距。在傍轴条件下, 对于并行共焦检测, 系统的总点扩展函数为

$$h_{\text{con}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_1(0, 0, \Delta z) h_2(x - iD, y - jD, \Delta z) S_{i,j}(x_i, y_j), \quad (4)$$

即并行共焦系统探测面的总光场是各点光源形成的共焦光路光场的和, 对于整个系统而言, 相当于大量共焦系统同时工作<sup>[14]</sup>, 从而实现了并行共焦检测。

## 2.2 DMD 夫琅禾费衍射模型分析

光线经过 DMD 调制后的特性, 由于微镜的尺寸很小, 衍射现象显著, 此时应将微镜阵列看成是一个二维衍射光栅。设  $M$  为 DMD 在  $x$  方向的微镜数目,  $N$  为 DMD 在  $y$  方向的微镜数目,  $d$  为相邻微镜中心之间的间距,  $a$  为一个 DMD 镜片的边长, 设波长为  $\lambda$  的一束平行光正入射于 DMD 上, 由位移-相移定理, 其产生的夫琅禾费衍射场的一般形式为

$$\tilde{U}(\theta_x, \theta_y) = \tilde{u}_0(\theta_x, \theta_y) \tilde{S}(\theta_x, \theta_y), \quad (5)$$

其中结构因子为

$$\tilde{S}(\theta_x, \theta_y) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \exp[i(\delta_{1i} + \delta_{2j})], \quad (6)$$

排内元间干涉为

$$\tilde{S}_x(\theta_x) = \exp[i(M-1)\beta_1] \left( \frac{\sin M\beta_1}{\sin \beta_1} \right), \text{ 且 } \beta_1 = \frac{\pi d \sin \theta_x}{\lambda}, \quad (7)$$

面内排间干涉为

$$\tilde{S}_y(\theta_y) = \exp[i(N-1)\beta_2] \left( \frac{\sin N\beta_2}{\sin \beta_2} \right), \text{ 且 } \beta_2 = \frac{\pi d \sin \theta_y}{\lambda}. \quad (8)$$

因此, DMD 产生的夫琅禾费衍射场结构因子为

$$\tilde{S}(\theta_x, \theta_y) = \tilde{S}_x(\theta_x) \tilde{S}_y(\theta_y), \quad (9)$$

相应的夫琅禾费衍射场强度分布为

$$I(\theta_x, \theta_y) = |\tilde{u}_0(\theta_x, \theta_y)|^2 \left( \frac{\sin M\beta_1}{\sin \beta_1} \right)^2 \left( \frac{\sin N\beta_2}{\sin \beta_2} \right)^2, \quad (10)$$

由于 DMD 单元为矩孔 ( $a \times a$ ), 则其衍射强度单元因子为

$$|\bar{u}_0(\theta_x, \theta_y)|^2 = i_0 \left( \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \right)^2 \left( \frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \right)^2, \quad (11)$$

且

$$\alpha_1 = \frac{\pi a \sin \theta_x}{\lambda}, \quad \alpha_2 = \frac{\pi a \sin \theta_y}{\lambda}, \quad (12)$$

DMD 产生的夫琅禾费衍射强度结构因子  $\left( \frac{\sin M\beta_1}{\sin \beta_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin N\beta_2}{\sin \beta_2} \right)^2$ , 决定了主极强的方位角  $(\theta_x, \theta_y)$

$$\begin{cases} d \sin \theta_x = k_1 \lambda, & k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ d \sin \theta_y = k_2 \lambda, & k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}, \quad (13)$$

当  $k_1=0$  及  $k_2=0$  时, 光波场出现零级衍射条纹, 此时光强也达到最大, 因而相干光经 DMD 调制后所形成的光波场是一个包含了 DMD 自身的衍射图样<sup>[15]</sup>。由衍射反比定律  $a\Delta\theta \approx \lambda$  可得零级衍射条纹的发散角约为 0.02 rad, 在传播距离不远的情况下可以近似的看作平行光。

### 3 实验设计

#### 3.1 光学系统

基于 DMD 的并行激光共焦显微检测系统设计如图 3 所示。

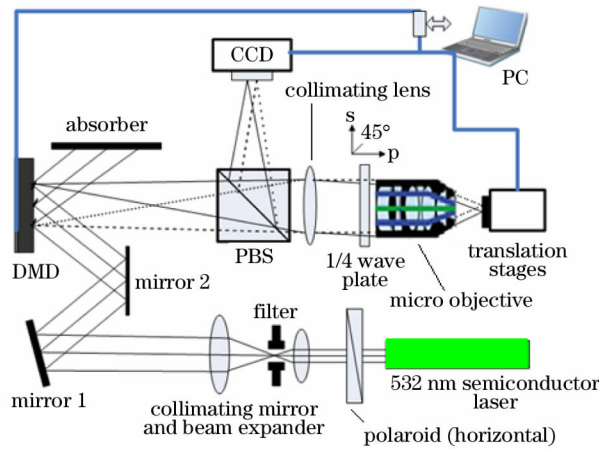


图 3 基于 DMD 的并行激光共焦显微系统示意图

Fig. 3 Parallel laser confocal microscopy system based on DMD

波长为 532 nm 的半导体激光器发出的光经偏振方向与水平面平行的偏振片后, 再经过扩束准直和滤波孔后变为平行光, 入射至 DMD 上, DMD 像素充当虚拟照明针孔阵列<sup>[17]</sup>, 对入射光进行调制。经 DMD 反射的平行光通过偏振分光棱镜后被分解为 p 偏振态测量光和 s 偏振态杂散光, 测量光依次入射到准直透镜和 1/4 波片, 再经无限远显微物镜聚焦到被测物上。被测物反射回来的光束经无限远显微物镜、1/4 波片、准直透镜后成为 S 偏振光, 经偏振分光棱镜反射后成像到 CCD 上, 此时 DMD 像素和 CCD 像素在焦平面上满足物象关系, CCD 像素相当于探测针孔<sup>[16]</sup>。被测物固定在一维位移台上, 由计算机控制一维电控平移台在轴向运动, 对被测物进行逐层扫描, 然后再对采集到的二维图像进行三维重构, 得到物体表面轮廓。

#### 3.2 数字显微镜控制

使用的 DMD 是由德州仪器生产, 其阵列大小为  $1024 \times 768$ , 翻转角度为  $+12^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $-12^\circ$ , 显微镜二进制翻转频率为 150 Hz。如果同时让 DMD 上每一个微镜同时处于“ON”的状态, 则由于 DMD 相邻微镜间隔太小, 根据瑞利判据会造成接收端成像的重叠。最小间距由瑞利衍射决定:

$$\delta = 0.61\lambda/NA. \quad (14)$$

从(14)式可以看出最小间距与光源的波长和物镜的数值孔径有关。系统中采用绿光, 波长为 532 nm, 当显微物镜的数值孔径为 0.15 时, 计算出  $\delta$  为  $2.2 \mu\text{m}$ , 而数字微镜之间间隔为  $1 \mu\text{m}$ , 所以相邻工作微镜间至少有一个微镜处于“OFF”状态。对于共焦成像来说, 相邻工作微镜的间隔越大越好, 但是这将降低测量效率。综合考虑, 选用  $2 \times 2$  的像素单元, 周期为  $T=3$  的扫描模式。其扫描方法为图 4 所示, 图中每个绿色方格代

表处于“开”状态的4个数字微镜,只有处于“开”状态的微镜起到扫描成像的作用,每次扫描完一个状态后,数字微镜阵列分别向右或向下移动一个单位,由于周期为 $T=3$ 的扫描模式一共有9个扫描状态,这样扫描 $3^2$ 次后,就可以在一个层面上完成对整个视场的扫描<sup>[16]</sup>。

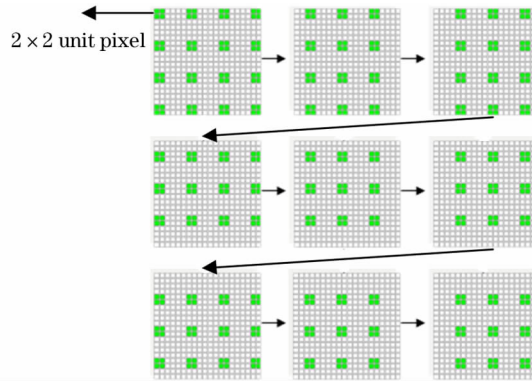


图4  $2 \times 2$  像素单元,  $T=3$  的 DMD 扫描模式示意图

Fig. 4 Scanning mode diagram of DMD with  $2 \times 2$  pixel unit and  $T=3$

按照蔡司公司给出的共焦显微系统的轴向分辨率计算公式算得该并行共焦显微检测系统轴向光强分布曲线的半峰全宽约为  $0.42 \mu\text{m}$ , 其表达式为

$$\Delta z \approx \frac{0.45\lambda}{n - \sqrt{n^2 - NA^2}} \quad (15)$$

### 3.3 图像处理

基于 DMD 的并行共焦显微检测系统在三维检测中需要在横向进行  $T^2$  次扫描得到一个层面的完整信息,然后依次在轴向进行扫描以获取不同层面的光斑阵列图像,再根据各层面图像的光强灰度值来获取样品的三维信息。本实验采用极值搜索法和 Matlab 图像处理工具对所采集到的二维图像进行三维重构。极值搜索法就是对每个光斑点搜索其所有轴向采样光强,将最大光强对应的位置作为该横向采样光斑点的高度,最终重构出整个样品的形貌<sup>[4]</sup>。在本实验的三维图像重构中,先在横向上采取局部求极值求得一个层面的二维图像信息,然后对二维图像进行去噪<sup>[18-19]</sup>和压缩,再在轴向上采取整体求极值的办法获得整个样品表面的三维形貌,其原理如图 5 所示。

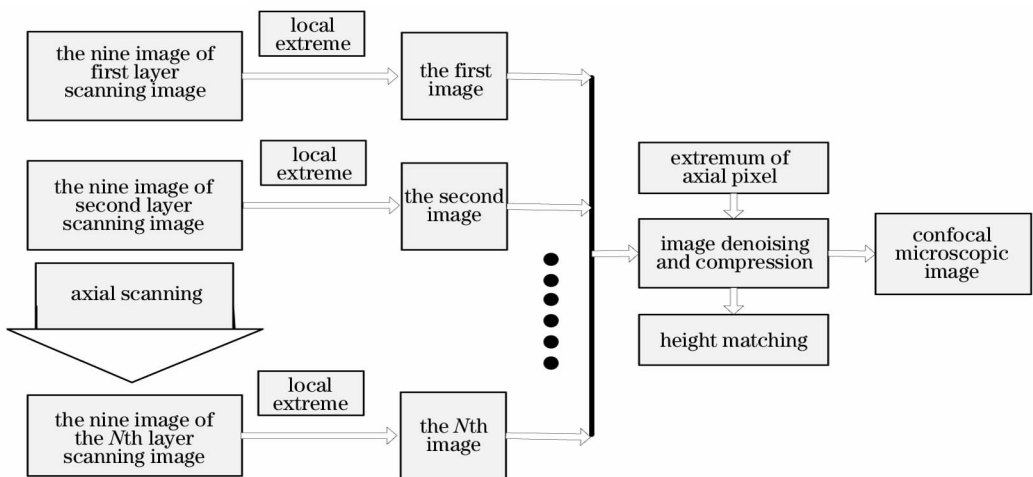


图5 三维重构流程图

Fig. 5 Flow chart of three-dimensional reconstruction

图 5 是以  $2 \times 2$  扫描单元、周期为  $T=3$  的并行模式对楔条型 WSZ 位置灵敏阳极探测器测量图像的处理流程简图,其轴向步距为  $10 \text{ nm}$ ,整个轴向上的扫描深度为  $80 \text{ nm}$ ,在扫描位置逐渐发生变化的过程中,其获取的图像也逐渐发生变化。

### 3.4 激光散斑匀化

由于具有极好的相干性,当激光从粗糙表面反射时会形成了无规的强度分布,也就是散斑。散斑的存在降低了并行共焦显微的成像质量,在本实验中,为了尽量降低散斑对成像质量的影响,采取了两种办法,一是采用发散角大、相干性差的半导体激光器做光源;二是在光路中加入散斑匀化装置,本实验在光路中加入旋转随机相位板来匀化散斑,图6是加旋转随机相位板之前和之后的对比图,可以看出加旋转随机相位板后散斑得到很好的匀化,图像变得更加清晰,这样既充分运用了激光单色性好、亮度高和方向性好的优点,又克服了激光散斑对图像清晰度的影响。

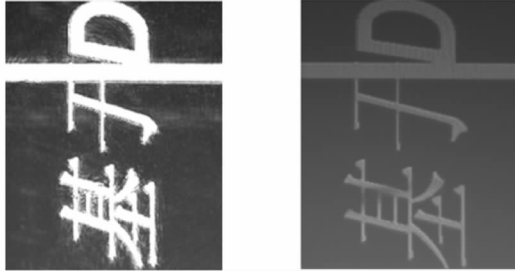


图6 散斑匀化前后对比图

Fig. 6 Contrast diagram before and after speckle homogenization

## 4 实验测量与结果

### 4.1 对镀膜平板的测量

用单个虚拟针孔为 $2 \times 2$ 单元、周期为3、步距为 $1 \mu\text{m}$ 的DMD扫描模式对镀膜平板进行并行共焦测量,所用无限远平场显微物镜的数值孔径为0.15,放大倍数为5倍,将所获得的90幅图像经过去噪、压缩和三维重构后,所得结果如图7所示。

从图7可以看出,实验结果能较好的反映镀膜平板的三维形貌,轴向测量深度为 $9 \mu\text{m}$ ,俯视图中左上角高程略高说明平板法线相对光轴方向略微倾斜;蓝线代表一条未打开的DMD阵列,在图像上能清晰地显示出来。

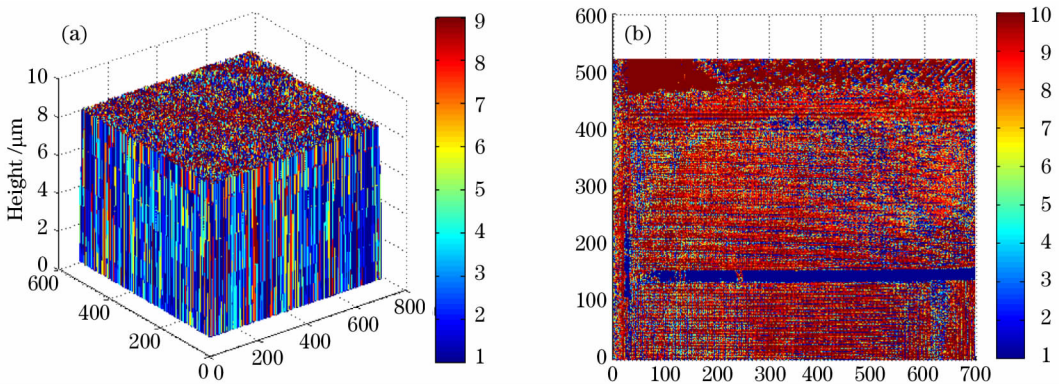


图7 镀膜玻璃平板并行共焦显微三维形貌侧视图和俯视图

Fig. 7 Side view and top view of coated glass plate's three dimensional reconstructed image

### 4.2 对楔条型WSZ位置灵敏阳极探测器的测量

用单个虚拟针孔为 $2 \times 2$ 单元、周期为3、步距为 $10 \text{ nm}$ 的DMD扫描模式对楔条型WSZ位置灵敏阳极探测器(图8)进行并行共焦显微测量,所用无限远平场显微物镜的数值孔径为0.90,放大倍数为100倍,将所获得的72幅图像经过去噪、压缩和三维重构后,所得结果如图9所示。

从图9可以看出,实验结果能较好的被检区域的三维形貌,轴向测量深度为 $80 \text{ nm}$ ,像方视场为 $0.076 \text{ mm} \times 0.062 \text{ mm}$ 。右上角大部分区域为镀膜区,红带部分为激光加工产生的突起熔渣,左下角蓝色区域为加工划线区。

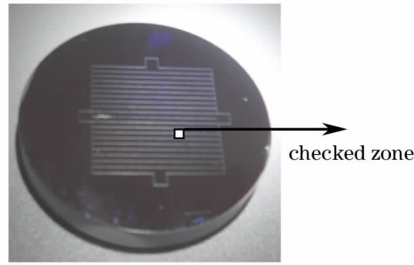


图 8 WSZ 阳极探测器

Fig. 8 WAZ anode detector

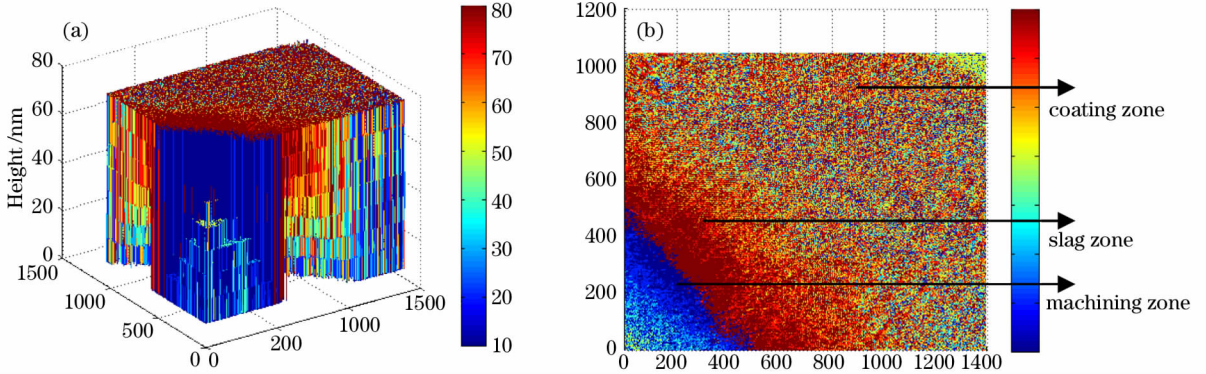


图 9 阳极探测器并行共焦显微三维形貌侧视图和俯视图

Fig. 9 Side view and top view of anode detector's three dimensional reconstructed image

### 4.3 对螺钉的测量

用单个虚拟针孔为  $2 \times 2$  单元、周期为 3、步距为  $1 \mu\text{m}$  的 DMD 扫描模式对螺钉进行并行共焦显微测量, 所用无限远平场显微物镜的数值孔径为 0.15, 放大倍数为 5 倍, 将所获得的 72 幅图像经过去噪、压缩和三维重构后, 所得结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 轴向测量深度为  $8 \mu\text{m}$ , 俯视图中三条红色斜带表示螺钉的螺纹顶, 像方视场为  $1.52 \text{ mm} \times 1.24 \text{ mm}$ , 螺钉上两条螺纹的间距约为  $1 \text{ mm}$ , 与螺钉的实际的螺纹间距吻合。此外, 不难发现中间条纹比两边条纹略宽, 这是由于螺钉的斜面很陡, 非正入射的光源经样品反射回来后会有较大的能量损失。

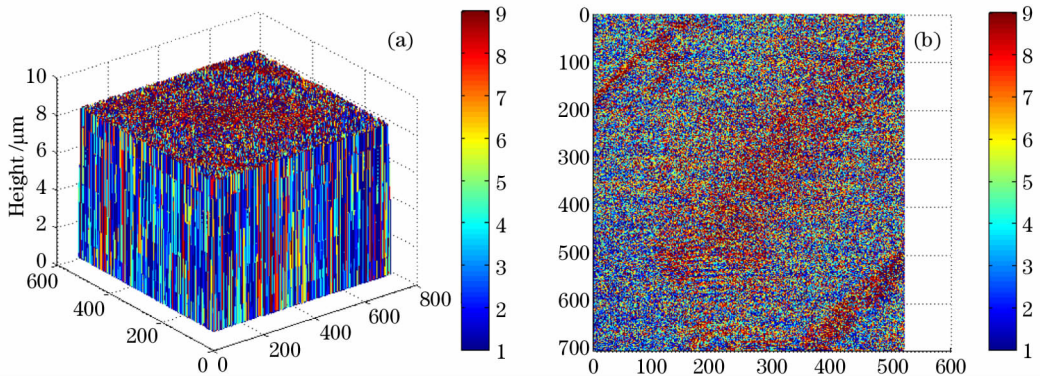


图 10 螺钉并行共焦显微三维形貌侧视图和俯视图

Fig. 10 Side view and top view of screw's three dimensional reconstructed image

## 5 结 论

本文建立了基于数字微镜的并行激光共焦显微检测系统, 对该系统所采用的并行分光技术、数字微镜衍射模型、三维图像重构算法、激光散斑匀化以及实验结果进行研究, 在步进电机最小步距为  $10 \text{ nm}$  的情况下

达到轴向扫描分辨率 10 nm 的结果。实验中也存在如下问题:光源光强的波动范围为 3%左右,这会对测量结果产生影响。本文在理论和实验上充分说明了并行激光共焦显微检测技术在工业应用上的良好前景,为并行激光共焦显微检测技术的理论和实验研究提供了相关参考。

### 参 考 文 献

- 1 G Q Xiao, T R Corel. Real-time confocal scanning optical microscope[J]. Appl Phys Lett, 1988, 53: 716—718.
- 2 H-J Jordan, M Wegner, H Tiziani. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy[J]. Measurement Science & Technology, 1998, 9: 1142—1151.
- 3 Tiziani H J, Achi R, Kramen R N, *et al.*. Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses[J]. Appl Opt, 1996, 35(1): 120—125.
- 4 Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. Appl Opt, 1994, 33(4): 567—572.
- 5 Rong Yang, Qingsheng He, Minxian Wu, *et al.*. Parallel confocal systems for biomedical application[C]. SPIE, 2001, 4378: 127—132.
- 6 R Yang, W Xie, L Zhang, *et al.*. Research progress of biochip[J]. Progress of Biological Engineering, 1999, 19: 4, 33—38.
- 7 Bi Meihua. Study for the System of Optics in Parallel Confocal Measurement Based Astigmatism[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. 7—12.
- 8 Dana Dudley, Walter Duncan, John Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. SPIE, 2003, 4985: 14—25.
- 9 Anthony H B de Vriesa, Donna J Arndt-Jovina, Thomas M Jovina. Generation-3 programmable array microscope (PAM) with digital micro-mirror device (DMD)[C]. SPIE, 2011, 7932: 79320G
- 10 G Molesini, G Pedrini, P Poggi, *et al.*. Focus wavelength encoded optical profilometer[J]. Opt Commun, 1984, 49: 229—233.
- 11 M A Browne, O Akinyemi, A Boyde. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration[J]. Scanning, 1992, 14: 145—153.
- 12 Tu Long, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Parallel confocal microscopic detection technique and its research progress[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080006.  
涂 龙,余 锦,樊仲维,等. 并行共焦显微检测技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080006.
- 13 Tian Weijian, Chen Bo, Pang Lin, *et al.*. Theoretical analysis for parallel confocal detecting method[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(10): 1381—1385.  
田维坚,陈 波,庞 霖,等. 并行共焦三维检测方法的理论分析[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1381—1385.
- 14 Wang Yonghong, Yu Xiaofen, Li Ruijun. Non-scanning 3D profile parallel confocal detecting system based on DLP technology[C]. SPIE, 2003, 5253: 437—441.
- 15 Yu Qing, Yu Xiaofen, Cheng Lingli, *et al.*. Research on the influence of Talbot effect on the imaging in laser parallel confocal microscopy system[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1271—1274.  
余 卿,余晓芬,程伶俐,等. 泰伯效应对激光并行共焦显微系统成像影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1271—1274.
- 16 Ingo Krohne, Tilo Pfeifer, Frank Bitte, *et al.*. New method for confocal microscopy and its endoscopic application[C]. SPIE, 2003, 5143: 281—288.
- 17 Wenmei Hou, Yunbo Zhang. Fast parallel 3D profilometer with DMD technology[C]. SPIE, 2011, 8321: 1—7.
- 18 Tang Pingyu, Zheng Jihong, Sun Guoqiang, *et al.*. Experimental study of four-channel frequency division multiplexed fluorescence confocal microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1106003.  
唐平玉,郑继红,孙国强,等. 四路频分复用荧光共焦显微探测系统实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1106003.
- 19 Tang Pingyu, Zheng Jihong, Cao Jianwei, *et al.*. Two-channel frequency division multiplexed fluorescence confocal microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 091801.  
唐平玉,郑继红,曹剑伟,等. 双路频分复用荧光共焦显微探测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 091801.