

文章编号:1002-2082(2012)01-0014-05

采用变焦液体透镜的共焦检测系统的设计与仿真

张运波,侯文玫,郑继红

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘 要:共焦显微技术越来越广泛地应用于微机电系统和半导体器件的三维轮廓测量。设计一种新型采用变焦透镜作为轴向扫描方式的共焦显微系统,利用变焦透镜的焦距变化来代替传统的轴向位移扫描。系统实现了无机械运动的轴向扫描,消除了传统共焦系统中由位移台移动带来的振动,不仅减小了系统的复杂度,而且降低了成本。进一步设计了基于位移台和变焦透镜的两种共焦检测系统,并且对其进行了仿真实验。实验结果表明:基于位移台和基于变焦透镜的共焦系统的聚焦成像和离焦成像结果类似,并且光强的轴向分布曲线也基本相同,表明此方法可行。

关键词:三维轮廓测量;共焦显微镜;轴向扫描;变焦液体透镜

中图分类号:TN202;TH742.9

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0101004

Design and simulation of confocal detection system utilizing tunable-focus liquid lens

ZHANG Yun-bo, HOU Wen-mei, ZHENG Ji-hong

(Department of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The technology of confocal microscope is widely applied in the three-dimensional profile metrology of the micro-electro-mechanical system and semiconductor device. This paper presents a novel confocal microscope system based tunable-focus lens. By utilizing the changeable focal length of this lens instead of the traditional scanning methods in axial displacement, the system can realize scanning in axial direction without mechanical movement and eliminate the vibration caused by the axial scan movement. It can decrease the system complexity, and reduce the cost. A displacement stage based confocal system and a tunable-focus lens based confocal system were designed, and experiments were carried out for the two systems. Experimental results show that the confocal images of in-focus and out-of-focus of the two systems are similar, furthermore, the light intensity distribution along axial direction is basically the same, and that shows this new scan method is feasible.

Key words: three-dimensional profile metrology; confocal microscope; axial scan; tunable-focus liquid lens

引言

共焦显微技术不仅分辨率高,并且具有独特的三维成像能力,受到各国研究者的普遍重视^[1-4]。共

焦显微技术中的轴向扫描装置主要是以压电陶瓷或步进电机作为驱动装置的位移台^[5-6],以德国 PI 公司的产品为代表。其优点是分辨率高,特别是基于

收稿日期:2011-03-02; 修回日期:2011-03-29

基金项目:自然科学基金中德科学中心(GZ 404-303/2)、上海市教委重点学科第 5 期(J50505)和上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1001)资助

作者简介:张运波(1981—),男,上海理工大学在读博士,主要从事光学微纳米检测方面的研究。

E-mail:realzhangyunbo@gmail.com

压电陶瓷位移台的分辨率可以达到亚纳米^[7]。但是采用位移台进行轴向移动扫描,会引入机械振动,对共焦测量造成不利的影响,并且制造复杂,价格昂贵。此外,还有人在光路中引入扫描转盘来代替位移台的方法^[8],也可以实现轴向扫描,但是还是无法避免机械转动对测量精度的影响。

传统透镜的制作材料主要为玻璃、塑料或石英。透镜一旦生产,其光学参数无法改变。变焦液体透镜是通过控制液体工作层的外部形状或改变内部折射率分布而实现焦距变化的透镜。与传统的自动对焦镜头相比,液体透镜具有体积小、反应速度快、耗电量小、精确度高等优点^[9]。

本文提出了采用变焦液体透镜作为共焦检测系统的轴向扫描手段的方法,具有轴向无机械扫描的特点。通过控制变焦液体透镜的焦距,使得照明针孔、被测物和探测针孔三者共轭时,探测器上的光强最大,由此可以确定被测物上该点对应的焦距,从而确定被测物上该点的轴向位置。

1 基于变焦液体透镜共焦检测的基本原理

1.1 反射式共焦显微镜的工作原理

反射式共焦显微镜的原理如图1所示。照明针孔和探测针孔处于共轭位置上,光源发出的光经过聚光镜后通过照明针孔形成点光源,通过照明针孔的光经过分光镜、物镜聚焦到样品上,样品表面反射回来的光经过物镜,被分光镜反射到探测针孔上,此时绝大部分光能通过探测针孔被光强探测器接收。当样品表面处于离焦位置时,被测物表面反射回来的光线在探测针孔处形成一个圆斑,所以只有一部分光能通过探测针孔被光强探测器接收,此时的光强会比聚焦时探测的光强弱。这一性质意味着样品表面的位置是可以确定的,也决定了共焦显微镜具有三维成像的特点。

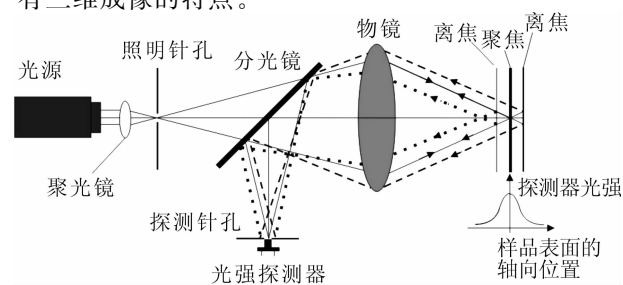


图1 反射式共焦显微系统原理

Fig. 1 Configuration of reflective confocal microscope

共焦检测技术中,对样品表面进行X-Y方向上扫描叫做横向扫描技术。共焦显微镜横向扫描技术主要有:单点扫描法^[10],Nipkow盘法^[11],微透镜阵列法^[12]等,本文不对其做详细描述。

根据共焦成像原理,本文提出采用变焦液体透镜来代替轴向扫描装置,实现了轴向无机械扫描。

1.2 基于变焦液体透镜的轴向扫描方法

1.2.1 变焦液体透镜介绍

变焦液体透镜主要分为3种:基于电润湿效应的双液体变焦透镜、微流体透镜和液晶透镜。本文以液晶透镜为例,简述其变焦原理。液晶透镜的结构为图2所示。从上到下依次为铝电极(在它上面有一个圆孔)、上玻璃衬底、上聚酰亚胺层、液晶层、下聚酰亚胺层、透明电极、下玻璃衬底。对2个电极施加电压后,内部液晶的折射率就会形成中心对称的指数分布,造成光线的偏折,达到聚光效果^[13]。变焦透镜的焦距表达式为^[14]

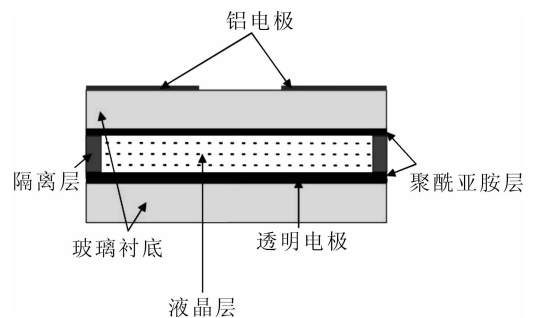


图2 变焦液体透镜的结构

Fig. 2 Structure of the liquid crystal lens

$$f = \frac{r^2}{2d_{LC}\delta_n} \quad (1)$$

式中: r 为透镜通光半径; d_{LC} 为液晶层的厚度; δ_n 为液晶层中心位置与边缘位置处的折射率之差,它随着所加电压的增大而减小。

1.2.2 基于变焦液体透镜轴向扫描原理

基于变焦液体透镜的共焦检测原理如图3所示。系统中采用变焦液体透镜代替了原来的物镜和轴向扫描装置。在图3(a)中,调节变焦透镜的焦距,使照明针孔成像到样品表面,被样品反射回来的光大部分能够通过探测针孔被探测器接收,对应图1中样品位于焦面上的情况。此时接收到的光强值最大。

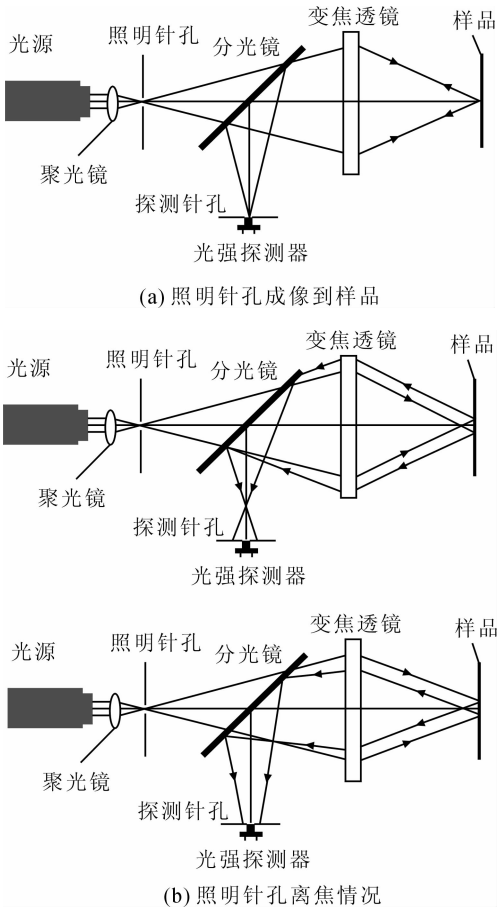


图3 基于变焦液体透镜的共焦检测原理

Fig. 3 Confocal testing setup of tunable-focus liquid lens

在图 3b 中(上),调节变焦透镜的焦距,使照明针孔成像到样品表面,此时被样品反射回来的光在探测针孔处形成一个光斑,只有一部分光能通过探测针孔被探测器接收,其光强值会减小。对应图 1 中样品位于左面离焦位置的情况。

在图 3b 中(下),调节变焦透镜的焦距,使照明针孔成像到样品表面后,此时被样品反射回来的光同样在探测针孔处形成一个光斑,探测器接收到的光强值同样会变小。对应图 1 中样品位于右面离焦的情况。

综上所述,只有变焦透镜调焦,使得照明针孔成像到样品表面时,探测器的光强最大,由此可以确定样品表面的轴向位置。

2 利用位移台扫描的共焦显微系统

传统的共焦显微镜的轴向扫描装置为位移台(样品固定在位移台上),其结构如图 4 所示。光源经过照明针孔形成具有一定发散角的光束,经过

分光镜、镜筒透镜后形成平行光,再经过物镜,入射到样品(固定在位移台上)表面,被样品表面反射回来的光再经过物镜、镜筒透镜、分光棱镜后被探测器接收。

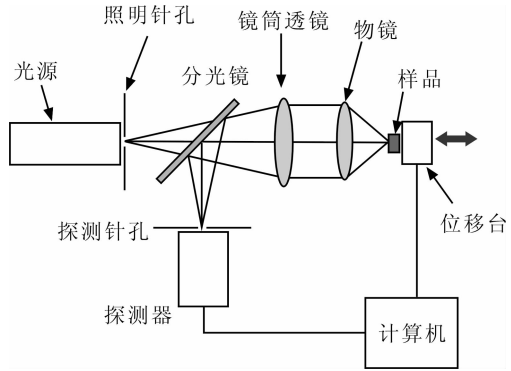


图4 基于位移台的共焦系统

Fig. 4 Confocal microscope with displacement stage

影响共焦系统轴向分辨率的主要因素是轴向光强分布,称为深度响应(depth response)函数。它的归一化光强分布 $I(z)$ 计算公式为^[15]

$$I(z) = \left\{ \frac{\sin[knz(1 - \cos\alpha)]}{knz(1 - \cos\alpha)} \right\} \quad (2)$$

式中: z 为主光轴上点到焦平面的距离; α 为显微物镜的孔径角; k 为波数($k=2\pi/\lambda$); n 为介质的折射率。

3 基于变焦透镜的共焦显微系统的设计

基于变焦液晶透镜的共焦显微系统结构如图 5 所示。可以看到,此系统不再有位移台,取而代之的是变焦液晶透镜。计算机通过电压控制器控制变焦液晶透镜的焦距,可以使之每次变化 Δf ,当光线经过变焦透镜聚焦到样品表面时,探测器上的光强最大,由此可以确定被测点的轴向位置。

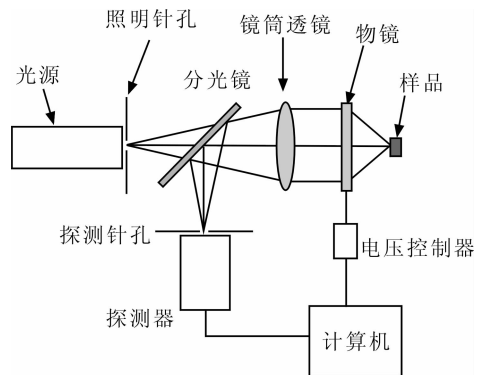


图5 基于变焦液体透镜的系统

Fig. 5 Confocal microscope with tunable-focus lens

变焦透镜的数值孔径(图6所示)计算可以表示为

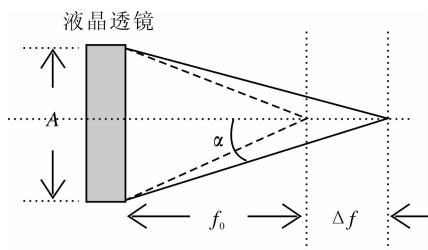


图6 数值孔径变化示意图

Fig. 6 Tunable NA of the liquid crystal lens

$$NA = \sin \alpha = \frac{A}{\sqrt{A^2 + 4(f_0 + \Delta f)^2}} \quad (3)$$

式中: A 为透镜的通光口径; f_0 为变焦液晶透镜聚焦到样品时的焦距。

当 A 与 Δf 不能忽略时, Δf 对数值孔径有一定影响。把此时的 NA 值代入(2)式,得到归一化光强的表达式为

$$I(\Delta f) = \left\{ \frac{\sin \left[kn \Delta f \left(1 - \frac{A \cot \alpha_0 + 2 \Delta f}{\sqrt{(A \cot \alpha_0 + 2 \Delta f)^2 + A^2}} \right) \right]}{kn \Delta f \left(1 - \frac{A \cot \alpha_0 + 2 \Delta f}{\sqrt{(A \cot \alpha_0 + 2 \Delta f)^2 + A^2}} \right)} \right\}^2 \quad (4)$$

绝大多数实际情况满足 $A \gg \Delta f$, Δf 对 NA 的影响可以忽略。其归一化光强的表达式与(2)式相同。

4 仿真实验

下面采用 LightTools 软件分别对基于位移台和基于变焦透镜的共焦检测系统进行仿真实验。

4.1 基于位移台的共焦系统仿真

仿真光路如图4所示。光源和照明针孔采用应用库里的点光源模型。应用库里没有显微镜,所以采用双凸透镜来代替。物体轴向扫描位置通过对被测物的位置属性进行设置。用来代替物镜的透镜参数如下:焦距为4.5 mm,直径为5 mm,厚度为2 mm,可以认为成薄透镜。

首先进行仿真成像实验,其目的是得到物体表面处于聚焦和离焦时的成像图像,实验结果如图7所示。从图7(a)和图7(b)的对比可以看到,离焦时成像模糊,聚焦时所成的像为一个亮斑,验证了图1所示的共焦原理。图8为系统的轴向响应曲线。

4.2 基于变焦透镜的共焦系统仿真

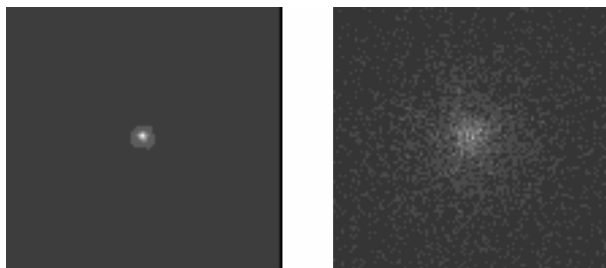
基于变焦液体透镜的系统仿真光路如图5所示。应用库里没有液体透镜,但根据通过改变透

镜的焦距来实现轴向扫描这一思想,通过设置透镜的不同焦距来进行仿真。

Lighttools 不能直接设置透镜的焦距,但是可以通过设置透镜2个工作面的曲率半径来设置焦距。透镜焦距和2个工作面的曲率半径的关系表示为^[16]

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (5)$$

式中: f' 为焦距; n 为介质的折射率; r_1 和 r_2 为透镜表面的曲率半径; d 为透镜的厚度。



(a) 聚焦

(b) 离焦

图7 基于位移台的共焦成像仿真图

Fig. 7 Simulation image of the movement stage based confocal system

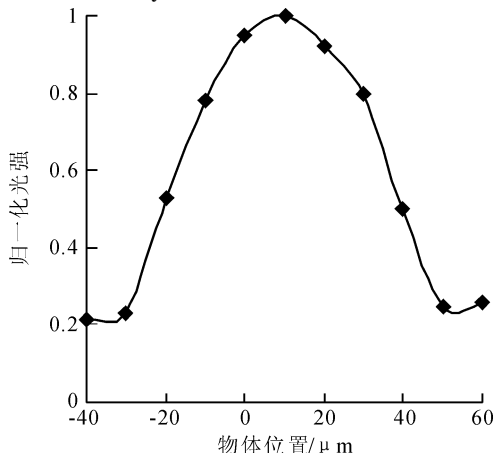
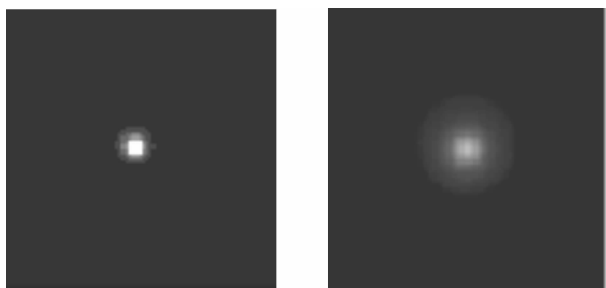


图8 基于位移台的共焦系统轴向响应曲线

Fig. 8 Depth response curve of the confocal system with tunable-focus lens



(a) 聚焦

(b) 离焦

图9 基于变焦透镜的共焦成像仿真图

Fig. 9 Simulation image of confocal system with tunable-focus lens

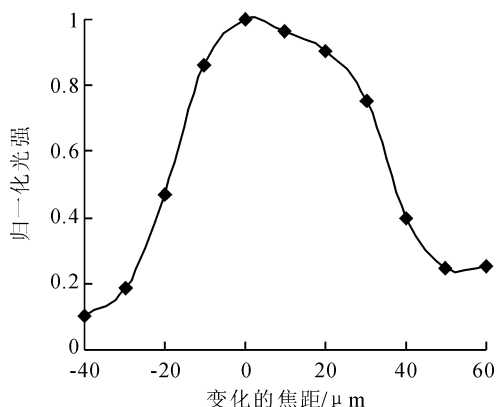


图 10 基于变焦透镜共焦系统的轴向响应曲线

Fig. 10 Depth response curve of the system with tunable-focus lens

通过图 8 和图 10 对比可以看出,共焦显微系统采用变焦的方法得到的轴向响应曲线基本类似于采用位移台得到的轴向相应曲线,这说明基于变焦液晶透镜的共焦系统同样具有三维检测能力。仿真实验结果证明,采用变焦透镜作为共焦检测系统的轴向扫描方法可行。

5 结论

设计了一种采用变焦透镜的共焦系统,通过对变焦液晶透镜和基于变焦液晶透镜的共焦系统分析和 LightTools 仿真,得出以下结论:

1) 采用变焦液晶透镜作为共焦轴向扫描方式实现了轴向无机械扫描,解决了传统的采用位移台轴向扫描带来的机械振动、摩擦等问题。

2) 当变焦透镜的通光口径远远大于变焦透镜焦距的变化步长 Δf 时,其归一化光强的轴向分布与采用位移台共焦系统的轴向分布相同。当焦距变化 Δf 与变焦液晶透镜的通光口径比不能忽略时,其归一化光强与 Δf 的关系函数将有所变化。

3) 仿真实验得到两种轴向扫描方法的轴向响应曲线基本相同,从而证明共焦系统采用变焦透镜作为轴向扫描的方法可行。

参考文献:

[1] WILSON T. Confocal microscope[M]. New York: Academic Press, 1990.

[2] PAWLEY J B, MASTERS B R. Handbook of biological confocal microscopy[J]. Journal of Biomedical Optics, 2008, 13: 029902.

[3] 胡茂海, 杨晓春. 一种提高共聚焦显微镜信噪比算

法的研究[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 70-72.

HU Mao-hai, YANG Xiao-chun. Algorithm of improving confocal microscope SNR[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 70-72. (in Chinese with an English abstract)

- [4] FUJITA K, NAKAMURA O, KANEKO T. Confocal multipoint multiphoton excitation microscope with microlens and pinhole arrays[J]. Optics Communications, 2000, 1: 7-12.
- [5] RAJADHYAKSHA M, ANDERSON R R, WEBB R H. Video-rate confocal scanning laser microscope for imaging human tissues in vivo[J]. Applied Optics, 1999;38(10):2105-2115.
- [6] VAISHNAVI V, VARGHESE L, JAFFAR ALI B M. A stage- scanning laser confocal microscope and protocol for DNA methylation sequencing [J]. Bio-medical Science and Engineering, 2010(3):496-500.
- [7] SPANNER K, VORNDRAAN S. Advances in piezo-nanopositioning technology[J]. IEEE/ ASME International Conference on, 2003, 2: 1338 - 1343.
- [8] 李明周,王昭,赵宏. 点扫描激光共焦测量研究[J]. 工具技术,2003, 37:39-41.
- LI Ming-zhou, WANG Zhao,ZHAO Hong. Research of point scanning laser confocal measurement [J]. Tool Engineering, 2003,37:39-41. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 董伟辉, 谢永军, 李恩玲. 利用镜面形变实现共轴折反射式变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31 (6): 893-897.
- DONG Wei-hui, XIE Yong-jun, LI En-ling. Design of coaxial catadioptric zoom system using deformable mirrors [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31 (6): 893-897. (in Chinese with an English abstract)
- [10] SHEPPARD J R. Scanning optical microscopy[J]. Advances in optical and electron microscopy, 1987, 1(10):1-98.
- [11] SHIN-ICHIRO K. Confocal laser microscope scanner and CCD camera[J]. Yokogawa Technical Report; English Edition, 2002, 33:17-20.
- [12] FUJITA K, NAKAMURA O, KANEKO T. Confocal multipoint multiphoton excitation microscope with microlens and pinhole arrays[J]. Optics Communications, 2000(1): 7-12.
- [13] REN Hong-wen, WU S T. Adaptive liquid crystal lens with large focal length tenability[J]. Optics Express, 2006, 14 (23): 11292-11298.