

文章编号: 0258-7025(2005)01-0105-05

集成光纤束并行共焦测量

王 昭, 朱升成, 谭玉山, 弥 宁

(西安交通大学机械工程学院激光与红外应用研究所, 陕西 西安 710049)

摘要 为了克服单点扫描共焦测量中速度慢、机构复杂的不足, 基于并行共焦测量的思想, 利用集成光纤束器件实现光束分割, 同时起到共焦测量中针孔的作用。在此基础上设计了基于该器件的一套并行共焦测量系统。系统中还采用了专门设计的棱镜将光源与信号光分离。给出了系统的测量原理, 说明系统具有结构简单, 信噪比高等特点。初步实验表明了该系统的可行性。

关键词 集成光学; 集成光纤束; 共焦; 并行测量

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Parallel Confocal Measurement though Integrated Optical Fiber Bundle Plate

WANG Zhao, ZHU Sheng-cheng, TAN Yu-shan, MI Ning

(Laser & IR Institute, Institute of Mechanical Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract In order to solve the problems of slow scanning speed and mechanical complexity in a single point scanning confocal microscope, a new way based on the principle of multiple-beam confocal was proposed. A parallel beam becomes a series of point sources by an integrated optical fiber bundle plate. The confocal system based that device is set up. A special prism is designed to separate the signal light from illumination light in the system. The principle of this new way is described in detail and some characteristics are given. A practical setup is shown and the confocal image is got to prove its feasibility.

Key words integrated optics; integrated optical fiber bundle; confocal; parallel detecting

1 引 言

自 Minsky 提出了共焦显微术的概念以来, 共焦测量方法以其高精度、高分辨率及易于实现三维成像数字化的独特优势, 在现代医学、材料学、生物学和半导体芯片检测等亚微米技术领域被广泛应用^[1~3]。但是这些商业化的共焦显微镜多是单点扫描显微镜, 全场信息的获得是通过扫描手段实现的。因此导致了测量速度慢、机构复杂和光能利用率低等缺点, 不利于它的全面推广。为此, 人们提出了各种并行非扫描共焦显微镜的方法, 如尼普科夫(Nipkow)转盘法^[4]、微透镜^[5]、针孔阵列^[6]等共焦显微镜。

尼普科夫转盘法的关键是在高速旋转的尼普科夫转盘上周期分布一些呈螺旋状的针孔阵列, 每一时刻被侧面被不同针孔处的光源所照明, 由于观察到的这些离散点形成积分效应, 给人一种观察到整场剖面的感觉。这种方法虽然解决了单点扫描问题, 但光能利用率低, 测量精度受转盘转动的影响, 转盘的制作较复杂; 微透镜方法是用微透镜阵列代替共焦光学系统中的物镜, 实现了全场并行共焦检测。这种方法不仅提高了测量速度还提高了光能利用率。但这种检测为达到足够分辨率, 必须使微透镜焦距很小, 所以其工作距离很短, 限制了其应用。此外, 微透镜阵列把信息光和背景杂散光全部传送

收稿日期: 2003-08-08; 收到修改稿日期: 2004-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(60077031)资助项目。

作者简介: 王 昭(1964—), 女, 河南郑州人, 西安交通大学机械工程学院博士, 教授, 主要从事光电测量领域的研究。

E-mail: wangzhao@xjtu.edu.cn

到探测器,使得系统信噪比降低,影响测量精度;针孔阵列共焦检测是以普通光学成像透镜取代显微物镜,以微针孔阵列取代单针孔,实现了全场并行共焦测量。尽管该方法提高了测量视场,并可用于大尺寸样品的测量,但其测量精度由针孔衍射角确定,精度高则能量利用率低,反之精度又得不到保证;M. Eisner^[7~9]等将微透镜阵列和针孔组合很好地解决了光能利用率低和工作距离短等问题。但不足之处是该组合器件制作工艺复杂,难以制作符合要求的微透镜-针孔组合器件,且杂散光不易消除,导致信噪比低。

本文提出了一种利用集成光纤束器件实现并行共焦测量的方法,通过集成光纤束对光束的分割,实现了全场的同步测量。

2 原 理

2.1 光纤传光特性

这里使用的是阶跃型折射率光纤,即光纤的芯和包层分别为两种不同折射率的均匀透明介质,光线在阶跃型光纤内的传输是以全反射和直线传播的方式进行的。该光纤中的光射线主要有子午射线和斜射线两种。所谓子午光线是指与光纤轴线相交或平行的光线,而斜光线是指与光纤轴线既不相交也不平行的光线。图 1 是子午光线在光纤内部传播原理图, n_0 为光纤周围介质的折射率, n_1 和 n_2 分别是光纤纤芯和包层的折射率,根据几何光学,要使得子午光线能够在光纤中以全反射的形式传播,则入射角要满足以下条件

$$\phi \leq \phi_c, \quad (1)$$

其中

$$\sin \phi_c = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2)$$

ϕ_c 为光纤的集光能力,称为入射孔径角。

当光纤的直径不变且不发生弯曲时,子午光线在光纤内的传播,由光纤出射端射出的光线出射角不变,但其出射方向视其在光纤内的反射次数而定。

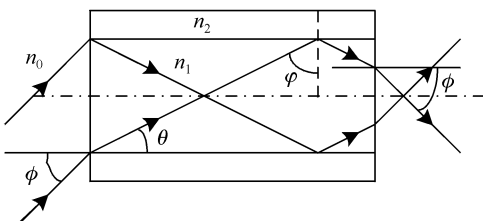


图 1 光线在光纤内部的传播示意图

Fig. 1 Light propagation in the optical fiber

当反射次数为偶数时,出射光线与入射光线方向相同;反射次数为奇数时,出射光线与入射光线方向对称于光纤的光轴。

由于斜光线和光纤的光轴不在一个平面内,因而斜光线在光纤内每进行一次全反射,反射平面的方位就要改变一次,其光路轨迹是一空间的螺旋折线,在端面上的投影如图 2 所示。所有这些折线和光纤光轴是等距的且都等于斜光线和光纤光轴的距离 a 。其中 A 点为入射点的投影点, r_0 为光纤内芯半径。由光纤出射端射出光线的出射角仍等于光线入射角,其端面出射点 B 位于图 2 中的投影折线上,出射点的位置由光线入射点的位置及光纤长度决定,出射光线在光纤端面的投影和半径为 a 的圆相切。

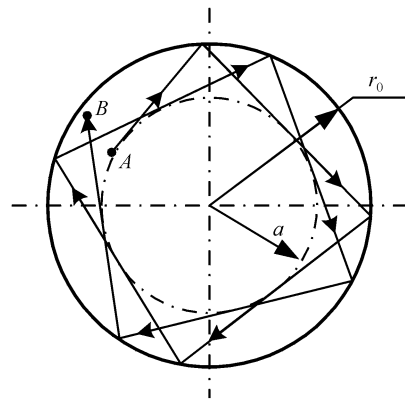


图 2 斜光线传播轨迹在光纤端面的投影

Fig. 2 Trace projection of inclined light propagation on the end of a fiber face

由上所述,当一束平行光垂直入射到光纤一端时,出射光仍为平行光,如图 3(a)所示。而当平行光斜射到光纤一端时,出射光将为一锥面平行光束,如图 3(b)所示。以上只是在几何光学条件下得到的近似结论。实际上按照光纤的模式理论及圆孔衍射理论,当平行光垂直入射光纤一端时,出射光的横截面光场是一准高斯分布,在光纤内芯较细的情况下,衍射效应比较明显^[10]。几何光学条件下得到的光场分布是实际光场分布的近似。

图 4(a)为光纤经过透镜成像示意图,光纤经过透镜的区域如图中的灰色环形区域,而透镜中心无光通过,因此可以将其等效为图 4(b)的形式,即针孔经环形透镜的成像情况。所谓环形透镜即在普通透镜的中心加一圆形截止光阑。图 4(b)中环形透镜的数值孔径应等于图 4(a)中有效数值孔径,且其截止光阑半径要由图 4(a)中的内环半径决定。这样便可借助环形透镜的概念来分析采用光纤面板的

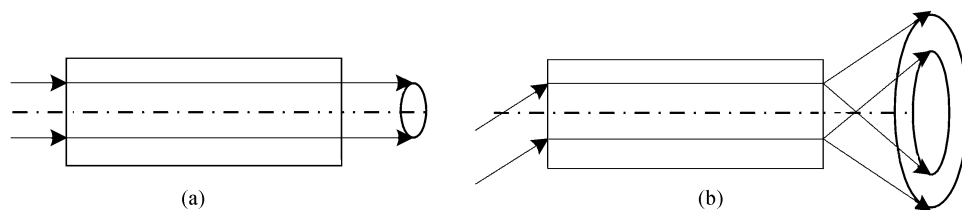


图 3 平行光束经过光纤后的传播示意图

(a) 平行光垂直入射; (b) 平行光倾斜入射

Fig. 3 Scheme of fiber transmit light

(a) upright incidence; (b) incline incidence

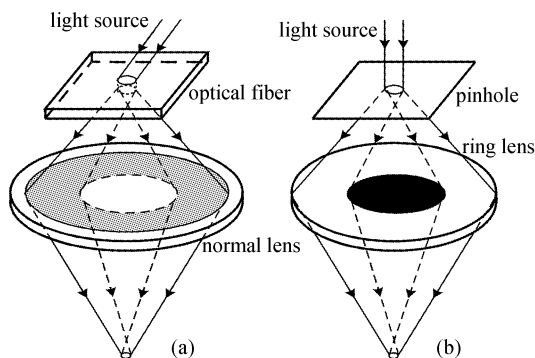


图 4 光纤和针孔通过透镜成像的比较

(a) 光纤经普通透镜成像; (b) 针孔经环形透镜成像

Fig. 4 Images of a fiber and a pinhole through the lens

(a) image of a fiber through an normal lens;

(b) image of a pinhole through a ring lens

共焦系统的轴向分辨率。

在实际使用中光源及探测器一般都具有一定的大小,结果表明利用环形透镜可以提高系统的轴向分辨率^[11]。另外使用环形透镜阻挡了中心的一部分光线通过,必然降低了光能利用率,使用光纤虽然具有环形透镜的效果,但由于使用中并没有光线被遮挡,因此系统接受到的信号强度不会降低。

集成光纤束面板由许多单根光纤集成在一起,每根光纤的端面都可以看作一个取样孔。上端面取样孔起到光束分割和产生点光源的作用;下端面取样孔起到点探测器的作用,对由被测物返回的光起到针孔限制的作用。面板设计时主要考虑各光纤纤芯和包层之间的占空比足够大以保证各测量点之间不会有串扰,光纤芯径取决于系统的放大率和要求测量的横向分辨率。

2.2 集成光纤束并行共焦原理

图 5 是集成光纤束并行共焦测量系统原理及结构示意图。单色准直光源经透镜准直后照射到 4 (棱镜 2) 上,并在棱镜 2 的斜面上发生全反射,继而照射到其下方的集成光纤束板 6 上;集成光纤束此

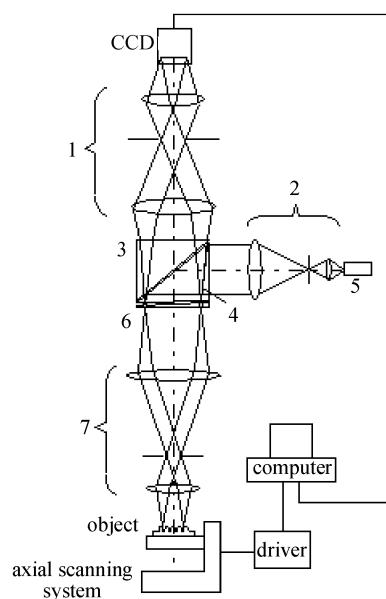


图 5 集成光纤束面板并行共焦测量系统

1: 成像透镜; 2: 准直透镜; 3: 棱镜 1; 4: 棱镜 2;

5: 光源; 6: 光纤束板; 7: 物镜

Fig. 5 System of integrate fiber plate parallel confocal measurement

1: imaging lens; 2: collimating lens; 3: prism 1; 4: prism 2;

5: light source; 6: optical fiber plate; 7: object lens

时既起到光束分割作用,同时又起到针孔阵列作用,即产生一个面阵的点光源。该阵列光源再通过下方的物镜系统 7 投射到沿透镜系统光轴方向扫描的被测物上,若被测物上的点与光纤束面板上的点共焦,则由该点返回的光又经原路聚焦到光纤面板上的同一点上,此时的集成光纤束面板起到的是探测器前针孔的作用。通过光纤的光再通过棱镜 2 和棱镜 1 由其上的成像透镜系统 1 到达 CCD 靶面。因此其共焦原理与单点是一样的,但每一个纵向扫描位置可并行测量许多的点,这些点的个数由光纤面阵的点数确定。这样由一系列纵向面阵扫描图,通过计算机数据处理可得到被测物体的三维轮廓或层析

图。

其中 CCD 前面的成像透镜系统 1 和物体前的物镜系统 7 均采用双边远心光路,并在两透镜的共焦点位置设置光阑以保证每个共焦点的光照均匀性和光斑中心不因扫描位置而改变。相邻点之间有确定的间隔,以确保被测面两个相邻点成像到 CCD 靶面上,彼此不发生串扰。

系统中棱镜 1 和 2 的作用是分光。它使得从光源出来的光可以全反射进入集成光纤束面板中,而从面板回来的光可以大部分透射而进入 CCD 成像透镜系统中。如图 6 所示,当一束平行光通过棱镜面 1 到达斜面 2 时,要保证其入射角 θ 等于或稍大于其临界角,从而在斜面 2 上发生全反射。当从物体反射回来的光再次通过面板时形成一个光锥,光锥中只有极少部分的光被斜面 2 全反射,而绝大部分光又从斜面 2 透射出去。棱镜 1 主要起到光路补偿作用,便于系统设计。当调整从光源出来照射到斜面 2 上的入射角度时,照射到光纤前后表面的光锥顶角(即数值孔径)也发生变化,因此,通过改变入射到集成光纤束面板上的平行光的方向,从而改变了数值孔径角,相应地也就改变了测量灵敏度。为减少光纤端面的反射光透过分光棱镜对信号光的影响,可采取在光纤端面镀增透膜和倾斜分光棱镜一个小角度的办法。由于在本设计中,返回的信号光在光纤端面反射光的锥体内传播,通过图 5 中成像透镜系统 1 的光阑,滤掉了反射杂散光,从而提高信噪比。

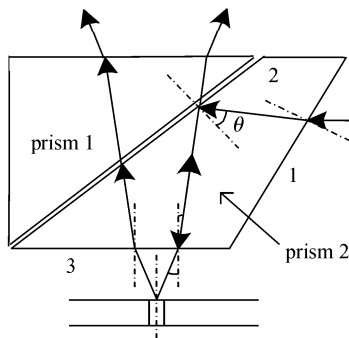


图 6 分光棱镜的设计

Fig. 6 Design of splitter prism

3 实验装置和结果

3.1 并行共焦测量系统装置

按照图 5 的光路结构,我们设计制作的系统装置如图 7 所示。根据轴向测量精度约 $1 \mu\text{m}$ 的要

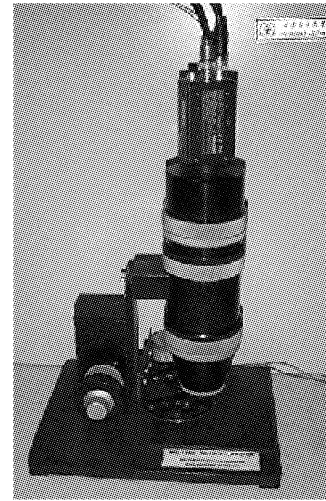


图 7 实际测量系统

Fig. 7 Practical system

求,按照单点共焦光强响应关系确定每个点对应的数值孔径,物镜系统 7 中下面透镜的焦距为 12 mm ,由此确定其光阑的直径。双边远心光路中两透镜的焦距比为 6,由此又可确定从集成光纤束面板中单个光纤出射光的孔径角约为 3° 。而光纤的数值孔径仅取决于纤芯与包层的折射率差的大小,而与光纤的几何尺寸无关,因此几乎对所有的光纤的入射孔径角都可以满足这个要求;另外根据测量横向分辨率和物镜系统 7 的放大倍数可确定各光纤排列间隔,而光纤的占空比取决于系统的测量范围,其设计原则是保证相邻的测量点之间的光线在测量范围内不发生串扰。光纤束面板本身的形状可以是圆的,也可以是方的,视装配要求和工艺而定,本系统中设计为方形,实际有效面积控制在直径为 20 mm 内,它不同于普通的光纤面板,它的占空比要求不小于 $1:6$,实际设计的尺寸为芯径 $6 \mu\text{m}$,周期为 $66 \mu\text{m}$,按照图 8 所示的方式排列,约有 7 万多个光点可同时进行物面扫描测量。为了区分不同探测点,成像透镜系统 1 的横向放大率设计为 $1/4$,因为 CCD 靶面与光纤束面板上表面处于共轭位置,在 CCD 靶面上像点之间的距离为 $66/4 = 16.5 \mu\text{m}$,大于 CCD 像素尺寸,彼此的像点是分开的。系统设计的轴向测量分辨率为 $1 \mu\text{m}$,横向为 $20 \mu\text{m}$ 。

3.2 实验结果

为验证系统的可行性,对集成光纤束测量系统进行了初步实验。实验结果如图 9 所示。该图为测量系统在采样间距为 $12 \mu\text{m}$,测试一角硬币的“RE”时,共焦和离焦时的图像。此时图 9(a)和(b)的轴

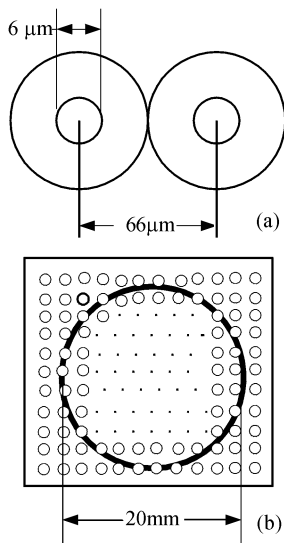


图 8 光纤束面板的结构

(a) 光纤束排列方式; (b) 有效测量点

Fig. 8 Construction of integrated optical fiber bundle plate

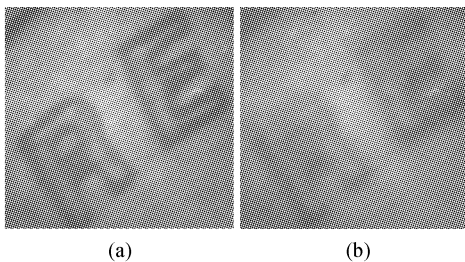
(a) arrangement of optical fiber bundle;
(b) effective area of the optical fiber plate

图 9 由实际系统得到的硬币不同轴向位置的图像

Fig. 9 Image of a coin obtained by the proposed microscope
(a) confocal; (b) off-focal

向移动的距离为 $120 \mu\text{m}$ 。由图片看出,当物体处于共焦平面时,物体像清晰地成像于 CCD 靶面上,此时 CCD 接受到的光能量最大;当离焦时,物体的像模糊不清,CCD 接受到的光强减弱,由于制作工艺和条件限制,所制作的集成光纤束面板的占空比达不到设计要求。

4 结 论

综上所述,本文提出的集成光纤束并行共焦测量方法和系统,和以往的其他并行共焦测量系统相比,具有下面几个特点:

1) 利用集成光纤束面板进行光束分割,产生二维点光源阵列来实现并行共焦光路,从而实现对测量表面的全场同步检测。集成光纤束面板同时起到光源和探测器针孔的限制作用,结构紧凑、简单。

2) 对测量精度有重要影响的数值孔径角由入射到面板上平行光的方向决定。可以通过变换入射光的参数来改变检测的范围,以满足不同的测量对象所要求的分辨率和测量范围要求。

3) 系统采用了专门设计的棱镜将光源和信号光分开,代替了以往采用偏振棱镜和 $1/4$ 波片分光的元件,减少了反射面,提高了系统的信噪比。

因为从光纤出射的光束横截面是一环形光斑,相同数值孔径时,该系统应具有更高的测量灵敏度。由于采用集成光纤束和较少的光学器件,安装调试简便,总体的制造成本下降。

参 考 文 献

- 1 T. Wilson, Barry R. Masters. Confocal microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4):565~566
- 2 T. Wilson. Depth response of scanning microscope [J]. *Optik*, 1989, **81**(3):113~118
- 3 Eric J. Lerner. Laser microscopy open a new dimension [J]. *Laser Focus World*, 2000, **36**(12):141~144
- 4 G. Q. Xiao, G. S. Kino. A real-time confocal scanning optical microscope [C]. *SPIE*, 1987, **809**:107~113
- 5 Hans J. Tiziani, Hans-Martin Uhde. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4):567~572
- 6 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan *et al.*. Multi-beam confocal system using pinhole array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):263~266
- 孔 兵,王 昭,谭玉山等. 基于针孔阵列的多光束共焦三维测量系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3):263~266
- 7 M. Eisner, N. Lindlein, J. Schwider. Confocal microscopy with a refractive microlens-pinhole array [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10):748~749
- 8 Mitsuhiro Ishihara, Hiromi Sasaki. High-speed 3D shape measurement using a non-scanning multiple-beam confocal imaging system [C]. *SPIE*, 1998, **3478**:68~75
- 9 Tian Weijian, Ding Zhihua, Guo Lurong *et al.*. A confocal method for measuring whole-field three-dimensional surface topography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6):757~761
- 田维坚,丁志华,郭履容等. 一种全场三维共焦检测的新方法[J]. *光学学报*, 1998, **18**(6):757~761
- 10 Yuan Libo. Light source and the optical field formed by a optical fiber end [J]. *Optical Communication Technology*, 1994, **18**(1):54~64
- 苑立波. 光源与纤端光场[J]. *光通讯技术*, 1994, **18**(1):54~64
- 11 Kong Bing. The Theory of Multi-beam Confocal Technique for 3-D Profile Measurement and Its Applications [D]. Xi'an: School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2002
- 孔 兵. 多光束共焦三维轮廓测量技术理论及应用研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2002