

基于光探针技术的自聚焦透镜光斑测量方法

糜长稳 王克逸 李明 章荣平

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230027)

摘要 以扫描探针显微理论为基础, 讨论了基于光学纤维探针技术的自聚焦透镜光斑测量方法, 介绍了实验系统的构成和测量原理、光学探针的制作和软件控制技术, 并且以日本产 NSG 自聚焦透镜为样品进行了光斑测量和分析. 所得结果对于评价自聚焦透镜的成像性能具有重要意义.

关键词 光探针; 自聚焦透镜; 光斑测量

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

0 引言

自聚焦透镜又称为梯度折射率光纤, 是一种微型光学圆柱形玻璃, 其折射率由中心向边缘呈抛物线分布. 运用非均匀介质中光线微分方程式可以求得光线在自聚焦透镜中传输时形成的是一条平滑的正弦曲线, 在正弦曲线轨迹和光纤中心轴线相交处, 光线都会聚在一起. 由于自聚焦透镜体积小、数值孔径高、焦距短、分辨率高、光谱范围宽等特点, 已经成为微小光学中十分重要的一种微型成像元件, 大大简化了成像系统的结构, 在光纤连接器、光纤耦合器、波分复用器、光纤光栅、集成光学、医用内窥镜以及其他要求小型化的仪器中均得到了广泛应用. 具有耦合效率高、插入损耗低、成像质量高等优点^[1].

激光光斑的测量和分析^[2,3]是评价自聚焦透镜成像质量和光纤耦合器设计的重要参数, 对于自聚焦透镜综合像差的评估、变折射率材料的选用以及离子交换工艺的提高具有重要意义^[4]. 高数值孔径的自聚焦透镜光斑^[5]在微米量级, 现有的测量方法如彩色 CCD 摄像法^[6]、刀口扫描法^[2]等结构复杂、光谱响应特性差、分辨率低、很难获得光斑分布的精细结构且不易仪器化, 因而很难适用于自聚焦透镜批量检测.

光探针技术^[7]是 80 年代以来发展起来的一种可以获得高空间分辨率的光学测量技术. 其核心技术是使用光学纤维探针作为照明或探测器件. 将光纤拉锥、腐蚀^[8]并经侧面镀膜, 在探针尖端形成直径约为 20 ~ 50 nm 的小孔. 探针尖端孔径确定了仪器的分辨率上限. 下文介绍了基于光探针技术的自聚焦透镜光斑测量仪, 可以对自聚焦透镜的工作距离和光斑进行测量和分析计算. 具有结构简单、分辨率高、智能化等特点.

1 系统构成与测量原理

如图 1 所示. 自聚焦透镜光斑测量系统由激光光源、扩束系统、样品台、扫描器、音叉传感器、光学探针和光电倍增管、电路控制系统、计算机软硬件系统组成. 激光光源经扩束后, 均匀照明被测样品自聚焦透镜端面, 经自聚焦透镜聚焦后在其后端面附近形成光斑. 将探针移动到光斑附近进行横向二维扫描, 所得光学信号经光学探针收集后经单模光纤传输到光电倍增管进行光电转换, 再经放大和 A/D 转换为数字信号, 输入到计算机重建成为光斑能量分布图. 本装置的另一个突出优点是可以对自聚焦透镜的工作距离进行精确测量. 在光纤探针尖端固定有微接触传感器(石英音叉), 经校准使传感器保持与光纤探针尖端平齐, 通过与样品相连接的步进马达使样品沿光轴方向接近探针, 选择小步距马达和高精度一维平移台可使轴向分辨率达到 0.4 μm, 设定探针与透镜端面轻微接触时探针的位置为坐标原点, 从原点起按一定步距(由步进电机性能决定)进行逐层扫描, 通过比较各层光斑的大小, 找出光斑最小位置即为焦平面, 简单计算原点到焦平面的距离就得到了样品的工作距离. 图像处理模块对采集到的光斑图像进行预处理, 如背景校正、FFT 滤波, 从而消除随机噪声和各种干扰信号的影响, 以获得较高质量的图像, 便于分析计算. 通过软件处理, 可以分析计算出光斑的各项参数, 如光斑大小, 任意截线上的能量分布; 各截面光斑的比较等. 并提供样

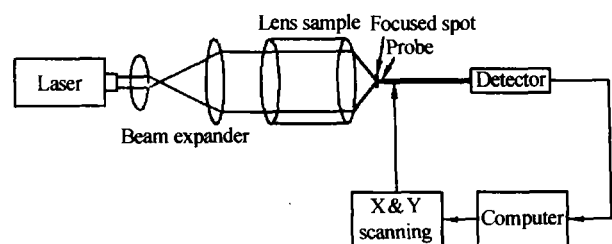


图 1 自聚焦透镜光斑测量仪系统原理图

Fig. 1 Schematic layout of optical spot measurement system

品的工作距离和光斑的等效直径, 光斑图像的 3D 显示等.

2 光纤探针制作

光学探针的作用相当于显微物镜和目镜在传统光学显微镜中的地位, 它的尖端透光几何孔径决定了仪器的分辨率上限. 为了获得自聚焦透镜光斑高分辨的信息, 一方面, 必须使通过光学探针的光束在横向上尽可能的受到限制, 另一方面, 要使得通过限制区域的光流量尽可能的大, 以得到较高的信噪比. 遵照上述两方面的要求, 我们采用加热拉伸和化学腐蚀相结合的方法, 制作步骤如下: 第一步, 剥去单模光纤端部光纤包层; 第二步, 用二氧化碳激光器对光纤端部边加热边拉伸, 使它断裂成垂直于光纤轴线有一定锥度和较平坦端面的针尖. 第三步, 将经加热拉伸得到的探针放入氢氟酸溶液中, 在一定的温度和时间控制下进行腐蚀, 消除探针尖端由于拉伸断裂而造成的锯齿状等不规则外形, 以得到相对尖端锥角较大、针尖直径较小、表面平滑、尺寸均匀的探针. 最后, 为了在探针顶端得到透光小孔, 在探针侧面均匀蒸镀一层约为 100 nm 的铝膜, 同时在针

尖端部留出未镀膜的小孔. 运用上述方法制作光学探针可以有效地将尖端透光小孔的直径控制在 50 nm 左右, 针尖镀膜技术有效地防止了光信号在横向的泄漏, 保证能获得极高的横向分辨率; 一定的尖端锥角和均匀尺寸保证有较高的光能量传输效率.

3 软件控制技术

测量仪分为硬件测量系统和软件分析系统. 通过硬件测量系统将光斑扫描成像后, 再借助软件分析光斑. 分析软件以 Visual C++ 6.0 编写, 系统框图如图 2 所示. 按功能分为扫描成像、光斑定标、图象处理、分析计算和结果显示五个模块, 扫描成像模块负责采集各截面光斑并显示; 光斑标定模块确定光斑图像与实际光斑之间的尺寸对应关系; 图像处理模块对采集到的光斑图像进行预处理, 如背景校正、滤波、多幅图像的平均等, 目的是消除随机噪声和各种偶然因素的影响, 以获得较高质量的图像, 便于分析计算; 分析计算模块主要是对光斑的各项参数进行计算, 如能量分布和直径的关系, 各截面光斑的比较等; 结果显示模块负责输出分析结果, 包括样品的工作距离和光斑的等效直径.

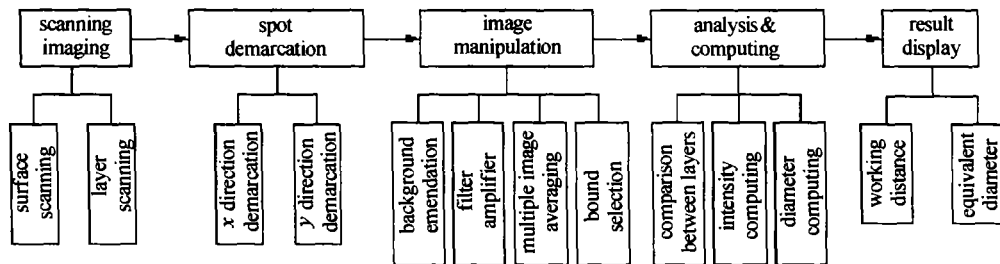


图 2 软件控制系统框图

Fig. 2 Procedure for software controlling system

4 实验结果与讨论

运用该系统对日本板硝子株式会社 (NSG) 生产的 SLW-2.0 型自聚焦透镜样品进行了测量. 采用波长为 650 nm 的半导体激光器作为光源, 经原点定位、不同轴向位置的初步测量, 初步确定了焦面光斑的位置, 在该位置前后一段区域内进行有规律的层析扫描, 从而得到由散焦到聚焦再由聚焦到散焦全过程的多幅图像, 如图 3 所示. 图 3 的扫描范围为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 各幅图像之间的轴向间隙为 $40 \mu\text{m}$, 图 3(d) 为样品的焦面光斑.

激光光斑直径数据算法通常有等效圆直径法和均方根直径法两种. 等效圆直径法是指运用与光斑具有相同面积的圆的直径来表征光斑大小. 我们采用均方根直径法对测得的光斑直径 (DMS) 进行了计算, 算法如下式所示, 式中 $R(x)$ 表示包含光斑总能量 $x\%$ 部分所对应的半径, 运用该式对由光斑大

小与轴向位置的函数关系所确定的焦面光斑前后 $50 \mu\text{m}$ 区域的光斑直径进行了计算, 所得计算结果如图 4. 该自聚焦透镜的焦面光斑直径约为 $1.246 \mu\text{m}$, 优于一般国产自聚焦透镜.

$$DMS = \sqrt{\frac{R^2(30) + R^2(50) + R^2(70) + R^2(85) + R^2(100)}{5}} \times 2$$

由于透镜的各种像差特别是球差的影响, 通常在焦点附近的光斑尺寸会存在一定程度的不规则波动. 除了透镜本身质量, 影响测量精度的主要因素有:

1) 光纤探针的制作质量. 探针质量主要由拉锥、腐蚀和镀膜的工艺水平决定. 较大的锥角和良好的镀膜可以提高光学信号的传输效率, 而尖端小孔的直径则直接决定了测量系统的光学分辨率.

2) 扫描器非线性. 驱动电压和位移之间的非线性会产生较大的测量误差.

3) 步进电机的步距. 实验系统中待测样品由步进电机驱动沿光轴方向移动, 受电机步距精度的

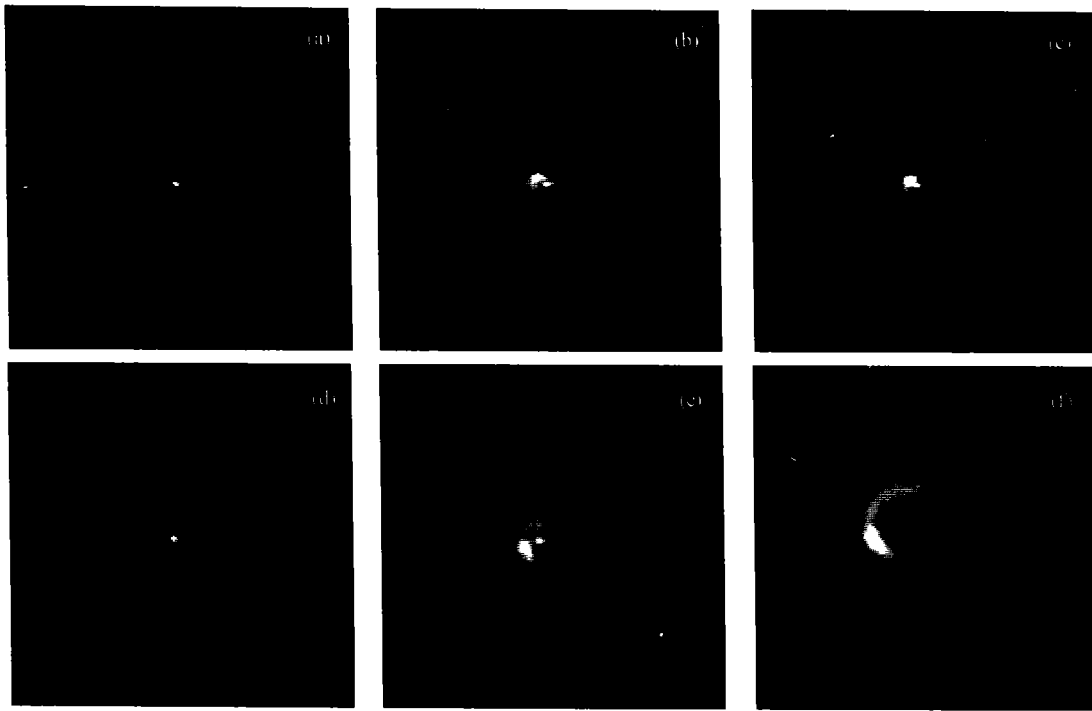


图3 (a)~(f)光斑扫描图像

Fig.3 Series scanning images of optical spot

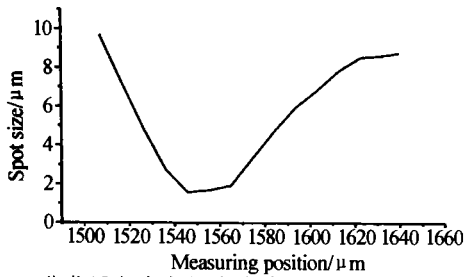


图4 工作位置与光斑尺寸关系

Fig.4 The relation between working distance and spot size

限制,可能会错过焦面而造成焦面位置定位误差.

图5(a)是对透镜焦面光斑进行图像处理后的得到的光斑伪三维图像,表征了光斑能量的分布,中央

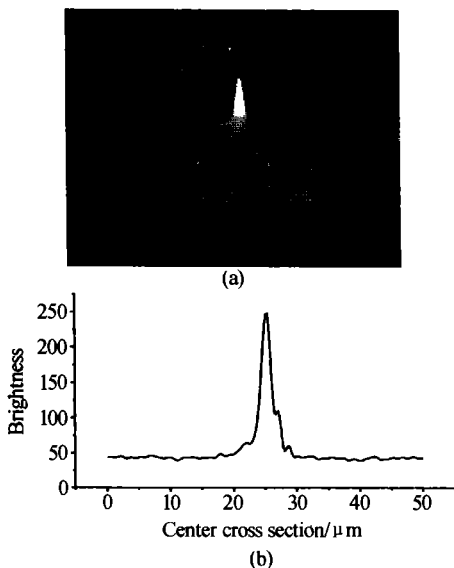


图5 (a)光斑伪三维图像;(b)中心截面能量分布

Fig.5 (a) False 3D image of optical spot;(b)Energy distribution of central section

亮斑集中了全部能量的百分之八十以上,这就是物点通过理想光学系统的衍射像.图5(b)是样品光斑在中心截面内的能量分布,以灰度值表示.

基于光探针技术的自聚焦透镜光斑测量方法的测量精度会受到像差、探针制作工艺、扫描器的性能和步进电机步距角精度等因素的影响.像差会影响到透镜焦面位置的确定,进而影响工作距离的测定;光纤探针的制作水平直接影响测量系统的光学分辨率;扫描器的非线性也会带来一定的测量误差.此外,由于运用光探针测量的是空间光场分布,对于聚焦点位于透镜内部的情况无法测量,因此运用该方法测量光斑,一般要求样品长度应小于 $p/4$.

5 结论

基于光探针技术的自聚焦透镜光斑测量方法结合了光纤探针的高分辨率和耦合效率,可对自聚焦透镜、微球、微透镜等微小光学器件的光斑进行测量,为需要对光斑进行评估的领域提供了一种可靠的高精度的测量方法.

参考文献

- 1 李宁华,胡玉禧,王克逸.两种测量光斑的方法.工具技术,2002,36(4):35~37
Li N H, Hu Yu X, Wang K Y. *Tool Eng*, 2002, 36(4): 35 ~ 37
- 2 Marchand E W. Gradient index optics. Academic Press, 1978
- 3 刘晓兵,刘智,文捷,等.激光光斑测量仪.激光技术,1995,(19)3:186~190

- Liu X B, Liu Z, Wen J, *et al.* *Laser Tech*, 1995, (19)3: 186 ~ 190
- 4 黎高平, 宗亚康, 吴宝宁, 等. 自聚焦透镜光斑直径、分辨率测试研究. *应用光学*, 1995, (16)6: 45 ~ 48
- Li G P, Zong Y K, Wu B N, *et al.* *J of Applied Optics*, 1995, (16)6: 45 ~ 48
- 5 Kenichi Lga. Evaluation and reduction of aberrations in distributed-index lens. *Applied Optics*, 1982, 21(6): 1024 ~ 1030
- 6 Yamashi T. Gradient-index rod with high N. A. *Applied Optics*, 22(3): 400 ~ 403
- 7 Betzig E, Trauman J K, Harris T D, *et al.* Breaking the diffraction barrier: Optical microscopy on a nanometric scale. *Science*, 1991, 251: 1468 ~ 1470
- 8 Stockl R, Fokas C, Deckert V, *et al.* High-quality near-field optical probes by tube etching. *App Phys Lett*, 1992, 75(12): 160 ~ 162

The Method of Measuring Optical Spot of Radial Gradient Lens Based on Optical Probe Technique

Mi Changwen, Wang Keyi, Li Ming, Zhang Rongpin

Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027

Received date: 2003-03-10

Abstract Based on the theory of scanning probe microscopy, a novel method of measuring optical spot radial gradient lens utilizing optical probe technique is presented. After introduced system layout, the measuring principle, and analyzed optical spot scanning images of Japanese NSG radial gradient lens are given. The results are very useful for evaluating the imaging properties of radial gradient lens.

Keywords Optical probe; Radial gradient lens; Optical spot measurement

Mi Changwen was born in 1974. Now, he is a Master candidate in the University of Science and Technology of China. He is doing research on micro-optics.

