

文章编号: 0258-7025(2003)02-0171-04

测量大数值孔径光学系统小光斑的方法

徐文东, 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 介绍了一种小孔扫描测量大数值孔径光学系统小光斑的方法。利用近场光学显微镜的光纤探针采样技术和压电陶瓷扫描技术, 可对光学系统小光斑的光强分布进行高空间分辨的测量。由于光纤探针采样点的大小为几十纳米或更小, 压电陶瓷扫描间距为几纳米或更小, 因此该方法特别适合大数值孔径光学系统小光斑的测量。实验证明, 采用该方法, 测量的空间分辨率可达 50~100 nm 左右。

关键词 应用光学; 小光斑; 近场光学显微镜光纤探针; 大数值孔径光学系统

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Method for Testing Small Light Spot Produced by an Optical System with High NA

XU Wen-dong, GAN Fu-xi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract This paper introduced a method to testing small light spot produced by an optical system with high NA. By using technology of fiber probe detecting and PZT tube scanning of near-field optical microscopy, the small light spot can be measured with high spatial resolution. The results show that a resolution of 50~100 nm can be obtained.

Key words applied optics; small light spot; fiber probe of near-field optical microscopy; optical system with high NA

1 引言

目前, 随着科学技术的发展, 大数值孔径光学系统的应用越来越广、越来越深入, 例如高密度光盘驱动器与母盘刻录机的物镜、高倍显微镜的物镜等, 对它们的光学质量的测试与评价也显得越来越重要。对于光盘驱动器与母盘刻录机物镜, 小光斑指的就是读写或刻录光斑的光强分布; 对于显微镜物镜, 当用非相干光照射时, 小光斑指的就是星点像, 当用相干光照射时, 小光斑指的就是点扩散函数。

小孔扫描测量大数值孔径光学系统小光斑的方法是对小光斑的光强直接用很小的孔(小于波长的几分之一)进行局部采样, 对通过小孔的光进行探测, 并驱动小孔精密扫描, 而得到小光斑二维的光强分布。近场光学显微镜的光纤探针就带有这样的很

小的小孔, 它的小孔直径远小于波长, 目前近场光学显微镜光纤探针的小孔直径已达十几纳米^[1], 它是被特别制作来采集近场光信息的, 用来采集小光斑这种远场光信息是完全没有问题的。与采用薄膜上随机得到的小孔不同, 近场光学显微镜光纤探针的小孔不仅尺寸容易重复(参见它的制作工艺^[2~4]), 它的定位也容易(每个光纤探针基本上只有一个小孔, 且位于光纤尖端), 它后面的光纤主体还将光场通过小孔而产生的不可传播的光转换为可传播的光, 收集起来并传送到另一端的光电探测器中, 因此使用起来特别方便。近场光学显微镜已实用化, 并成为产品^[5], 光纤探针作为近场光学显微镜的消耗件, 它的价格也迅速下降。同时, 近场光学显微镜所采用的压电陶瓷扫描技术也正是小孔精密扫描所需要的技术, 其最小位移间距达几纳米或更小, 远超过

收稿日期: 2001-05-24; 收到修改稿日期: 2002-02-28

作者简介: 徐文东(1966—), 男, 湖北省孝感市人, 中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员, 博士, 主要从事光存储测量技术研究。E-mail: xuwendong@online.sh.cn

小光斑测试的使用要求,而且作为所有扫描探针显微镜的共有技术,已非常简单和成熟。这两种技术的结合,使该方法能测量的细节远小于目前所有其他方法可达到的程度。

2 方法描述

以测量大数值孔径显微镜物镜的点扩散函数为例,其测量装置的原理如图 1 所示。

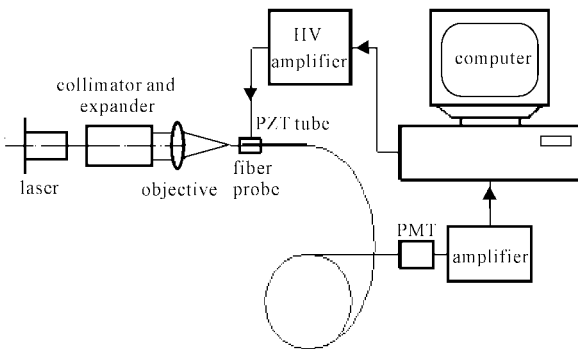


图 1 测量大数值孔径光学系统小光斑的系统

Fig. 1 A system for testing small optical spot of the optical system with high NA

由半导体激光器发出的光经非球面透镜准直和普通扩束镜扩束后入射到大数值孔径显微镜物镜上,在被测物镜焦面上形成一小光斑,即点扩散函数。前端有一个小孔的镀金属膜锥形光纤探针置于小光斑处,对光场采集,并由光纤主体将光传输至另一端的光电倍增管上进行光电转换;电信号经放大和模数转换后由计算机处理。计算机通过数模转换控制高压放大器的输出,从而控制管状压电陶瓷管的横向两维扫描和纵向位移(用于调焦)。压电陶瓷管带动光纤探针进行焦面上的两维扫描,从而使计算机可给出小光斑的两维光强分布图,即点扩散函数,如需要的话,由快速傅里叶变换给出被测物镜的光学传递函数。

实际装置中对光源进行了直接光强调制,电信号经过放大滤波后再解调,以减小外界光及电路噪声的影响。

由经典波动光学知道,处于光场中的介质,由于受迫振动而发出次波,激发光无论是近场光还是远场光,都有同样的效果,这就是光纤探针同样可以用于远场的原因。当光纤探针位于远场光场中时,光纤探针小孔内的介质各点(在空气介质界面上)都发出这种次波。由近场光学知道,远场光中无小于波

长数倍的细节,很小的孔内的介质各点受到的激发光应是近似相同的。由于各点空间位置如此接近,各次波的叠加应是十分简单的,叠加后的光仍可以看成一点发出的,强度是各次波的和。如果光的偏振方向垂直于光纤探针的轴线,光不是很强的话(没有非线性效应产生),那么,探针就可以准确地采集到光的强度、波长和偏振状态等信息。对于光的偏振方向不垂直于光纤探针轴线的情况,问题就比较复杂。注意远场光是横波,光的偏振方向在波阵面内,理想光学系统焦平面上的光的波阵面是平面,那么光的偏振方向肯定垂直于光纤探针轴线(假设光纤探针轴线与光轴重合),离焦的情况下以及有像差的情况下,就不是这样,尽管角度很小^[6,7]。这当然在一定程度上影响了光纤探针对光的强度和偏振状态的传递。

实际装置的具体参数为:半导体激光器波长 650 nm,调制频率 50 kHz,光纤探针小孔直径 50~80 nm(TOPMETRIX 生产,型号 1720-00),压电陶瓷管的横向两维扫描范围 8 μm 左右,在国产原子力显微镜电子学机箱(包含对压电陶瓷扫描的控制电路,D/A 转换器位数为 16 位;信号采集电路,A/D 转换器位数为 12 位)和软件支持下进行。

3 结 果

利用上述装置对金相显微镜物镜进行了测量。

测量结果如图 2(a),(b)所示。图 2(a)为数值孔径为 0.65 的 40 \times 平场消色差金相显微镜物镜(共轭距非无限远)的小光斑测试结果。图 2(b)为数值孔径为 0.85 的 50 \times 平场消色差金相显微镜物镜(共轭距无限远)的小光斑测试结果。可以看出由于没有整形,光斑形状是长形的,对应于激光器的长形的发光面。图 2(a)由于扩束倍率不够(40 \times),激光器发光面的大小对最终光斑大小的影响是显著的,光斑大小(短边方向)为 1.2 μm 左右(半高宽),比理论值稍大;而图 2(b)具有较大的扩束倍率(50 \times),激光器发光面的大小对最终光斑大小的影响不显著,光斑大小(短边方向)为 0.5 μm (半高宽)左右,虽比理论值(点光源产生的小光斑)仍大一些,但那是消色差物镜所无法避免的(波像差达不到小于 $\lambda/4$)。总的信噪比较好,图像中无背景花纹。

影响光斑形状的因素很多,除像差外,圆偏振光和线偏振光的光斑是不同的,如果小孔边缘有漏光,形状也会有变化。各种测试条件对测试结果的影响

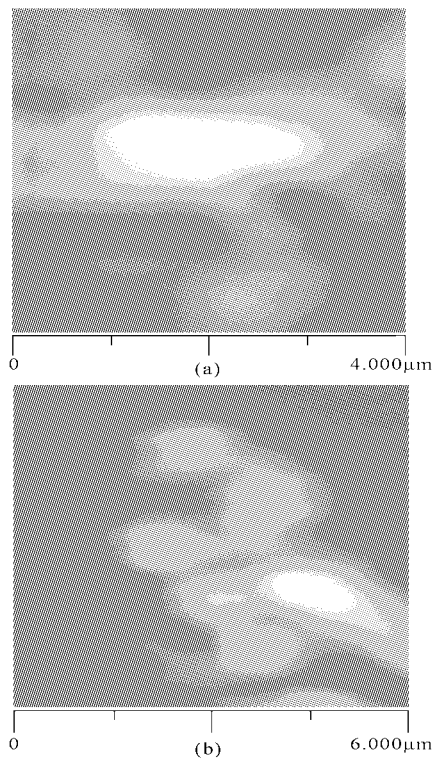


图 2 显微镜物镜的测试结果

Fig. 2 Testing result for microscopy objective

(a) 40 \times , NA=0.65; (b) 50 \times , NA=0.85

还有待进一步的实验研究。

用于定量测试时,需要对装置进行标定。纵坐标的光强的测量是相对值,可以进行归一化。光强的具体数值是不重要的,在光较强时应设法衰减光强,以免光纤探针损坏,光较弱时应设法提高前置放大器的倍率。灵敏度和精度与光和电的噪声、光和电的短期稳定性(测量时间为半分钟以内)以及光电转换和电放大的非线性有关。在光不是非常弱的情况下,由于系统采用了调制解调原理(信噪比在 40 dB 以上),电路的噪声可以忽略(50 kHz 左右),光的 1%左右的噪声(10 kHz 以下)就决定光强测量的灵敏度。重复测量的误差在 2%以下,线性很好。横坐标要考虑很多因素,首先是分辨率,分辨率由扫描范围和 D/A 位数决定,由于采用扫描探针显微镜(SPM)技术,D/A 位数 16 位,在各种扫描范围内分辨率都是非常高的。其次是光纤探针尖的扫描范围,它由好几个因素决定:其一是压电陶瓷管端部的扫描范围应在压电陶瓷管结构尺寸决定的最大线性扫描区域内,并由加在压电陶瓷管上的最大电压决定,本实验装置的最大电压范围为 ± 200 V,压电陶瓷管端部 XY 方向上的扫描最大范围为 $\pm 8 \mu\text{m}$ 左

右,具体加在压电陶瓷管上的最大电压因而 XY 方向上的最大扫描范围由程序控制;其二是光纤探针的固定方式,光纤伸出越长,扫描区域就越大,光纤不动点离压电陶瓷管端部越近,扫描区域就越大。为适应不同的测量,压电陶瓷管和光纤探针小孔的尺寸是需要改变的,光纤探针在损坏时也需要更换,这时扫描范围都可能变化。为此采取了两种措施:一是提供标准小光斑,其大小是固定和已知的;二是提供软件修改坐标的方法;用标准小光斑对横坐标标定后就可以测其他小光斑了。标准小光斑由一个点光源加一个像差矫正得很好的 40 \times 显微镜物镜(Nikon 平场物镜)组成。点光源由半导体激光器的会聚光点处加小孔得到,小孔的直径应小于激光会聚光点以及显微镜像方衍射极限光斑的四分之一,较小的小孔也同时保证了小孔内激光光强的均匀性,以避免激光模式的变化产生的影响(例如温度变化、老化等),保证点光源的稳定。之所以采用像差矫正得很好的显微镜物镜,是由于小光斑的光强分布可以由衍射理论精确计算出来。以后提供给用户的可以是点光源加一般的显微镜物镜,然后给出光斑定标后的测试图,将横坐标基准传递下去。实验证明,在采用加速老化后的压电陶瓷管后,对标准小光斑的测试的重复误差可以小于 2%。另外还有非线性问题,压电陶瓷管的非线性是主要的原因,在扫描隧道显微镜(STM)应用中,对标准光栅(美国 DI 公司提供)的测试表明,在 $8 \mu\text{m}$ 扫描范围内,非线性度小于 3%,在任何 $3 \mu\text{m}$ 扫描范围内,非线性度小于 1.5%,在中心区域的 $3 \mu\text{m}$ 扫描范围内,非线性度小于 1%。也就是说,测量最好在扫描的中心区域进行。

采用管状压电陶瓷,是由于可以非常简单地实现三维扫描。Z 电压不加时,XY 方向的扫描不是在一个平面内进行的,是通过压电陶瓷管的扭摆产生的,由于几微米的扫描范围相对数厘米的机构尺寸非常小,对平面的偏离就不是很大,没必要通过计算机施加 Z 电压进行矫正。

另外光纤探针应采用收集模式的探针,也就是说,光纤锥体的表面都应镀上铝膜,以避免不必要的光进入光纤内。

4 结 论

通过更换激光器和调制方式(工作波长不同,使用的激光器也不同;激光器工作方式不同,光强调制

方式也不同),该装置可以直接用于测量光盘驱动器与母盘刻录机物镜的读写或刻录光斑的小光斑。实际上,所有大数值孔径光学系统的小光斑都可以用类似方法测量。根据被测光学系统的不同,光源既可以是单色激光器也可以是白光加小孔光阑(小孔光阑不够小时可随后增加一个倒置的显微镜光路);光路布置既可以是共轭距无穷远的,也可以是有限远的。根据小光斑的大小,光纤探针小孔既可以很小(十几纳米)也可以很大(十几微米),既可以采用压电陶瓷管的扫描(几微米到一百微米左右),也可以采用其他扫描机构扫描(扫描范围更大),就是说对于小数值孔径的光学系统的小光斑也可以测量。

不仅如此,这一方法还可给出小光斑的三维光强分布(通过自动离焦)。不仅可以测量小光斑的光强分布,还可以对小光斑进行光谱成像和偏振态成像。因此该方法具有很大的灵活性。由于测试装置原理简单,性能稳定,扫描头部体积小,使用方便,因此本方法具有非常大的应用潜力。

参 考 文 献

1 Eric Betzig, Jay K. Trautman. Near-field optics;

microscopy, spectroscope, and surface modification beyond the diffraction limit [J]. *Science*, 1992, **257** (5067):189~195

2 N. Essaidi, Y. Chen, V. Kottler *et al.*. Fabrication and characterization of optical-fiber nanoprobe for scanning near-field optical microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37** (4):609~615

3 J. A. Veerman, A. M. Otter, L. Kuipers *et al.*. High definition aperture probes for near-field microscopy fabricated by focused ion beam milling [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(24):3115~3117

4 Saeed Pilevar, Klaus Edinger, Walid Atia *et al.*. Focused ion-beam fabrication of fiber probes with well-defined apertures for use in near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(24):3133~3135

5 G. J. Collins. Near-field microscopy moves into the mainstream [J]. *Laser Focus World*, 1995, **31**(11):104~107

6 A. Roberts. Electromagnetic theory of diffraction by a circular aperture in a thick, perfectly conducting screen [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(10):1970~1983

7 A. Roberts. Near-zone fields behind circular apertures in thick, perfectly conducting screens [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(8):2896~2899



LASERS-16 Shanghai' 2003

第十六届全国激光学术会议征文通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十六届全国激光学术会议,定于2003年10月在上海举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名两院院士和著名专家到会作特邀报告,同时各分会将安排高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。

上海是全国著名的经济文化中心,拥有众多激光研究、应用、开发的研究所、高校和企业。近年来涌现许多著名的现代景观,如东方明珠电视塔、金茂大厦、APEC会址以及世界首列运营性磁悬浮列车等。热情欢迎激光领域研究与开发的专家学者光临会议。

会议主办单位:中国电子学会,中国光学学会;会议承办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所;会议时间:2003年10月中下旬;会议地点:上海;名誉主席:王大珩;主席:范滇元、周寿桓;副主席:朱健强、梅遂生、姚建铨、许祖彦、王益德;秘书长:田守云。

征稿范围:1) 激光物理;2) 超短脉冲激光与非线性光学;3) 全固态激光器与非线性光学;4) 光通讯有源及无源器

件;5) 工业激光及其应用;6) 医用激光及激光与生物组织相互作用;7) 光束传输、控制及光束质量;8) 激光光学材料、薄膜及元器件;9) 其他相关领域。

征文要求:需提交500字摘要和300字提要各一份,分别用于审稿和出版会议指南。摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括目的、方法、结果、结论等内容。请用第三人称叙述,不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文。论文截稿期为2003年6月30日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。用宋体小四号字按word格式编排,以E-mail附件方式发送,发送至laser2003@siom.ac.cn,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件,如发送E-mail确有困难者,可书面邮寄至上海800-211信箱《中国激光》编辑部收,邮编201800,请在信封上标明“会议投稿”及所属征文范围第几类,联系电话:021-69918016,网址:www.siom.ac.cn。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

2003年2月