

光纤共焦扫描显微术用于光盘盘基 预刻槽结构的检测*

杨莉松 王桂英 王建岗 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

摘 要 基于共焦扫描差分术, 提出了检测不同表面反射率的物体表面形貌的方法, 并提出了在光纤共焦扫描成像术中利用边缘判据进行边缘定位的极限尺度。上述思想用于检测光盘盘基预刻槽形结构, 在建立的一套光纤共焦扫描成像装置上进行了光盘盘基预刻槽结构的检测, 获得了槽宽、槽间距及槽深等实验数据, 与槽标准参数相符。

关键词 光盘盘基预刻槽结构, 光纤共焦扫描显微术, 纵向响应, 边缘判据。

1 引 言

光盘存储采用约 $0.6 \mu\text{m}$ 的聚焦激光光斑记录信息, 是存储密度非常高的记录技术。信息读出时, 需要检测光学头聚焦光照射到记录面上的反射信息的变化。这必然存在着聚焦伺服和轨道跟踪的问题。为保证高密度存储和信息正确读出, 光盘的信息写在有一定格式的预刻槽的盘基上。槽底、台阶及槽壁等的质量将直接影响到读出信号的信噪比及轨道跟踪信号。目前测量预刻槽形的最有效的手段是纳米探针扫描术, 如扫描隧道显微术 (STM), 原子力显微术 (AFM) 及扫描近场光学显微术 (SNOM) 等^[1~3]。它们能够满足预刻槽亚微米横向分辨及纳米纵向分辨甚至更高的检测要求。但由于存在仪器成本高、环境及样品要求苛刻等问题, 人们仍在探索实现高分辨材料面形检测的新途径。

众所周知, 共焦扫描显微系统的横向分辨率在相同成像条件下是普通显微系统的 1.2~2.0 倍, 容易实现亚微米横向分辨; 系统能够对透明、半透明物体 (如生物样品) 进行深度层析成像, 分辨率为微米量级^[4]; 90 年代以来, 研究者结合干涉术、差分术、变迹术等已在实验和理论上将共焦扫描显微成像的分辨率提高到了新的高度^[5~7]。共焦扫描干涉术及非干涉差分术用于检测物体表面形貌, 纵向分辨率均达到了纳米量级。干涉方法的不足之处在于, 系统结构复杂、数据处理慢。Chau-Hwang 等提出的非干涉差分共焦扫描显微术仅适用于检测表面反射率一致的材料。本文基于非干涉差分术, 提出了对于表面反射率不同的物体, 检测其表面形貌的方法; 提出了在光纤共焦扫描成像术中利用边缘判据进行边缘定位的极限尺度; 并将上述思想用于检测光盘盘基预刻槽微结构, 为光盘盘基检测开辟了新途径。

* 国家自然科学基金 (69637030 及 6977704) 资助项目。

收稿日期: 1999-01-14; 收到修改稿日期: 1999-03-02

2 光纤共焦扫描成像系统

反射式光纤共焦扫描成像系统装置如图 1 所示。He-Ne(波长为 632.8 nm, TEM₀₀) 激光束经透镜耦合至保偏单模光纤耦合器(分光比为 50/50, 光纤有效数值孔径为 0.13, 场模半径为 2.4 μm)。耦合器输出端 3(Port 3)与 4 倍率集光透镜及 40 倍率物镜组成反射式共焦光路。输出端 2(Port 2)浸入折射率与光纤匹配的甘油溶液中, 以避免光纤端面反射引起的干扰。微机通过压电陶瓷驱动源控制三维压电陶瓷平台(程长为 20.00 μm, 定位精度小于 5 nm)移动, 实现对样品的扫描, 并同步地对弱信号探测器 CCD(信噪比大于 48 dB, 最小照度为 0.02 lx)采集到的扫描点灰度量进行处理, 最后重构出样品的像。该系统 $A = 5.7$, 物镜有效数值孔径为 0.65, 测得系统直边展宽量 Δx_{\min} 及系统纵向响应曲线的半高宽 Δz_{FWHM} 分别为 0.47 μm、2.52 μm, 而理论值则分别为 0.45 μm、2.38 μm^[8]。

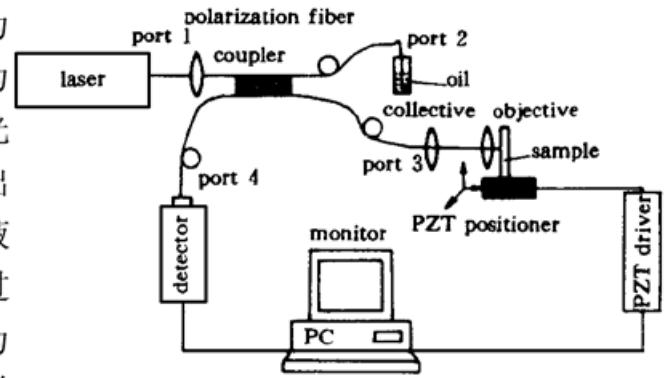


Fig. 1 Experimental setup of confocal reflection-mode scanning microscope using single-mode fiber coupler

3 光纤共焦扫描显微术检测光盘盘基预刻槽原理

3.1 槽深检测

利用共焦扫描非干涉差分成像术进行材料面形检测的原理如图 2 所示。系统对理想平面

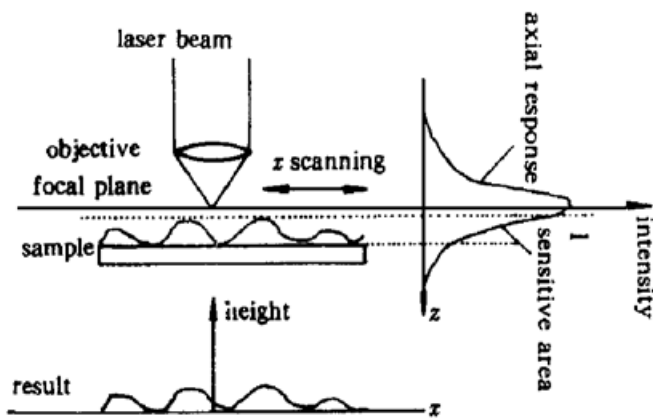


Fig. 2 Principle of differential confocal microscopy

存在纵向响应。从响应曲线可以看到, 焦点 ($z = 0$) 附近两侧存在一定的区域, 其光强 I 随 z 变化较其它位置敏感, 且呈现线性变化规律。理论上, $I(z)$ 的归一化斜率 $I(0)^{-1} |dI/dz|$ 近似表示为

$$S = \frac{4.5 \sin^2(\alpha/2)}{\lambda}$$

其中 $\sin \alpha$ 为物镜有效数值孔径^[9]。由此, 系统纵向响应曲线在 $z = 0$ 两侧的斜率为 $0.85/\mu\text{m}$ 。若激光器、外界扰动波动为 $r\%$, 则系统纵向分辨精度为 $0.01r/S$ (μm)。由于所用的激光器输出的波动小于 0.4%, 因此将限制纵向成像分辨约为

5 nm。线性区域归一化光强 0.2~0.9 对应的动态范围为 $0.82 \mu\text{m}$ 。

进行材料面形检测时, 若物体表面为准光滑平面, 表面反射率变化可忽略, 则可以先测量任意面的纵向响应, 得到实际曲线斜率; 然后将物体略偏离焦平面, 此时应保证被测的高度变化在系统动态范围之内; 最后, 根据横向扫描得到的归一化灰度数据的差值 ΔI 及测得的纵向响应曲线的斜率 S 可以得到物体表面的高度差 $\Delta h = \Delta I/S$, 从而重构出物体形貌像。若材料表面反射率不同, 则必须对上述方法测得的结果进行修正, 才能获得准确的表面高度信息。具体方法是: 将物体表面移离焦平面, 横向扫描的同时进行纵向扫描; 分别对纵向响应曲线进行归一化处理, 得到曲线斜率; 再将各点横向扫描的数据按照其纵向响应曲线的归一方式转换成可比灰度数据, 这样就可以排除反射率差异的影响, 重构出物体表面形貌。很明

显,还可以由纵向响应曲线的峰值强度得到物体表面的光学信息。由此可见,这种方法能够有效解决物体表面的形貌及光学信息分离的问题^[10],进行物体的三维扫描及像重构将获得包括物体表面形貌及光学信息的四维结构图像。

一般地,光盘盘基预刻槽槽底与台阶在扫描成像中受诸多因素影响,槽底纵向响应的峰值强度与台阶上的不同,因此应进行上述修正,修正后可以得到槽深信息。一般盘基台阶及槽底各为光滑表面,台阶较槽宽且纵向响应的峰值强度较强,因此可以首先测量台阶位置上一点的纵向响应曲线,得到纵向响应光强的最小值、峰值及归一化响应曲线的斜率;然后以该点为起始点开始横向扫描;得到的灰度数据统一以起始点纵向响应光强的最小值及峰值为归一标准,并将灰度差转换成初测的高度差;再用压电陶瓷定位于槽底进行纵向的扫描,并将槽底点的横向扫描量按其纵向响应光强的最小值及峰值为归一标准,并计算出实际的台阶与槽底的高度差,将初测的槽深除以实际槽深得到校正系数。实际槽形为初测的高度差除以校正系数。处理过程均由计算机完成,这样可以将三维(二维)扫描简化成二维(一维)扫描,减少检测时间。

3.2 槽边缘定位

明场下的光纤共焦扫描成像系统为纯相干成像系统,若不考虑系统像差等因素的影响,扫描像边缘处的像强度不依赖于系统的光学参数,恒为远离边缘且等于像强度强的位置的 $1/4$ ^[11]。这一判据是针对半无限大理想镜面的边缘定位而言的。但进一步分析可知,利用直边展宽为 s 的光纤共焦扫描系统对有对比度变化的两区域进行扫描成像,聚焦光斑中心只要向暗区移动至距离边缘 $s/4$ 处,光强将达极小,在这个移动过程中对光强变化起主要作用的聚焦光斑大小为 $s/2$ 。另一方面,光斑中心向亮区移动 $3s/4$ 时,光强达极大,这一过程直径 $3s/2$ 的聚焦光斑对光强变化起作用。由此可见,该系统可以对暗区尺度大于 $s/2$ 且亮区尺度大于 $3s/2$ 的物体进行成像,并准确地定位边缘。因此,对于直边展宽为 $0.47\ \mu\text{m}$ 的系统,可以进行边缘定位的极限尺度为暗区 $0.24\ \mu\text{m}$ 、亮区 $0.71\ \mu\text{m}$ 。设光盘盘基预刻槽为直边,常见光盘盘基预刻槽宽为 $0.5\ \mu\text{m}$ 及 $1.1\ \mu\text{m}$,槽间距为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。由于槽深变化将在扫描像中表现出各区域的明暗变化,因此可以利用上述判据进行边缘定位。对于槽宽 $0.5\ \mu\text{m}$ 的盘基,将利用焦面偏离槽底靠近台阶来达到准确测量的目的;对于槽宽 $1.1\ \mu\text{m}$ 的盘基,则将焦面偏离台阶而靠近槽底。

4 光盘盘基测试及讨论

实验中所用的光盘盘基预刻槽样品制备过程是:玻璃衬底经超声水剂清洗后旋涂光刻胶膜,再在光刻设备上曝光、显影、表面镀金膜而成。图3(a)为光盘盘基预刻槽二维扫描像,像面大小为 $5.0\ \mu\text{m}\times 5.0\ \mu\text{m}$ 。依据采样定理,扫描步长约取系统横向最小分辨量的一半($0.1\ \mu\text{m}$),以保证不欠取样或采样冗余^[8, 12, 13]。运用本文提出的面形检测及处理方法得到了相应的如图3(b)所示的一维槽面形图。为了获得较准确的槽形信息,可将横向扫描范围加大到 $8.0\ \mu\text{m}$ 。图像采样数据及扫描线分别经过了线性插值和三样条插值处理。表1列出了测试中所用的光盘盘基预刻槽参考量及测试结果。

可见测试得到了较准确的光盘盘基预刻槽槽形信息。从扫描图中看到个别槽底较尖锐。产生这一现象的原因可能是在这些位置上的槽边不是锐边,也有可能盘面有磨损等。此时扫

Table 1. References and experimental results of the pre-groove on an optical-disk substrate; width, pitch and depth

| optical disk pre-groove | width/ μm | pitch/ μm | depth/nm |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------|
| reference data | 0.5 | 1.6 | 90 |
| experimental results | 0.45 | 1.66 | 92 |

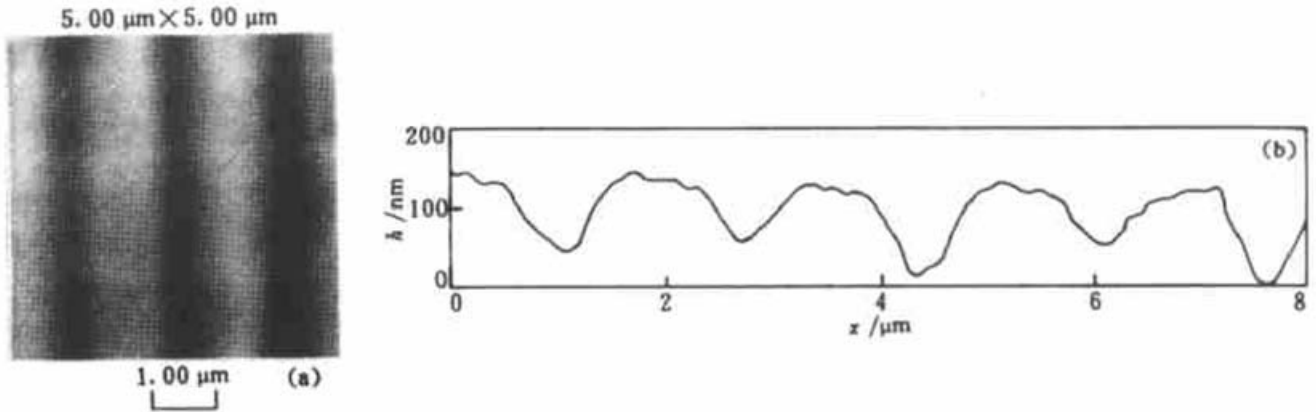


Fig. 3 2D images and surface profiling of optical disk pre-groove

描像边缘展宽大于直边展宽, 槽底锐化。对于这种情况, 边缘仍定位于 $1/4$ 强度处将引入测量误差, 误差量直接与槽的倾斜度相关。对于展宽量为 $0.6 \mu\text{m}$ 的槽边缘像, 若由于槽边倾斜, 实际边缘位置在 $1/3$ 光强处, 将存在 $0.05 \mu\text{m}$ 的测量误差。而分析此次测试结果, 边缘像展宽量大于直边展宽量的位置并不多, 因此可以认为由于槽边倾斜引起的定位误差将远小于 $0.05 \mu\text{m}$, 即横向测量相对误差小于 10% 。

结 论 改进了光纤共焦扫描非干涉差分数据处理方法, 用于检测表面反射率不同物体的形貌, 并提出了利用边缘判据进行边缘定位的极限尺度。这些思想用于检测光盘盘基预刻槽微结构, 获得了误差小于 10% 的实验结果, 为光盘盘基检测开辟了新途径。实验中若使用更高数值孔径的物透镜将获得更高的横向分辨率, 如数值孔径为 1.4 的物透镜对应 200 nm 的直边展宽量^[8]。而实验中激光源及环境的波动将直接影响纵向分辨率的量, 可以通过改善实验条件提高纵向分辨率。

由于光纤共焦扫描成像系统结构简单, 成本低, 抗干扰能力强, 易小型化, 将在材料表面检测领域有较大应用前景。共焦扫描成像术的透射层析能力还将使多层面材料结构检测成为可能。在这方面, 共焦扫描成像术将优于其它显微成像术。目前, 共焦扫描显微成像术亟待进一步提高横向分辨率及扫描成像速度。而引入变迹术及透镜阵列, 将使共焦扫描显微术有长足的发展。

作者衷心感谢中国科学院上海光机所光盘室顾冬红老师和孙洁林博后在光盘测试中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Best M E, Karis T E, Logan J A *et al.*. Prediction of optical disk tracking servo signals from surface microtopography measured by scanning tunneling microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(4): 993~

995

- [2] Bennett J M, Jahanmir J, Podlesny J C *et al.*. Scanning force microscope as a tool for studying optical surfaces. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(1) : 213~
- [3] Inouye Y, Kawata S. Near-field scanning optical microscope with a metallic probe tip. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3) : 159~ 161
- [4] Wilson T, Sheppard C J R. *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy*, London: Academic, 1984. 1~ 90
- [5] Juskaitia R, Wilson T, Rea N P. Compact confocal interference microscopy. *Opt. Commun.*, 1994, **109**(1, 2) : 167~ 177
- [6] Lee Chau-Hwang, Wang Jyhyng. Non-interferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(4~ 6) : 233~ 247
- [7] Ding Zhihua, Wang Guiying, Gu Min *et al.*. Super-resolution with an apodization film in a confocal setup. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1) : 360~ 363
- [8] 杨莉松, 王桂英, 王建岗等. 反射式光纤共焦扫描成像系统的研究. *光学学报*, 1999, **19**(7) : 962~ 967
- [9] Lee Chau-Hwang, Guo Chin-Lin, Wang Jyhyng. Optical measurement of the viscoelastic and biochemical responses of living cells to mechanical perturbation. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4) : 307~ 309
- [10] 杨莉松, 王桂英, 王建岗等. 共焦扫描成像研究. *中国激光*, 1999, **26**(9) : 931~ 934
- [11] Hewlett S J, Barnett S M, Wilson T. Image intensity at the edge of a straight edge object. *J. Modern Optics*, 1990, **37**(12) : 2017~ 2024
- [12] Goodmann J W. *Introduction to Fourier Optics*, New York: McGraw Hill, 1968. 17~ 25
- [13] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*, New York: Pergamon, 1980. 370~ 420

Fiber Confocal Scanning Microscopy for the Measurement of Optical Disk Pregrooves

Yang Lisong Wang Guiying Wang Jiangang Xu Zhizhan
 (High Intensity Laser and Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
 The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
 (Received 14 January 1999; revised 2 March 1999)

Abstract A new surface measurement method for an object with different reflection is demonstrated based on differential confocal microscopy. The limit ranges of edge positioning is proposed while using edge criteria in fiber confocal scanning microscopy. As application, the optical disk pre-groove is measured by using fiber optical confocal scanning imaging system. The gray image and cross-section profile with groove width, depth and pitch are given. The experimental results are in good agreement with the reference data.

Key words optical disk pre-groove, fiber confocal scanning microscopy, axial response, edge criteria.