

一种基于剪切力的距离控制方法在扫描近场光学显微镜中的应用

王 昕 王克逸 黄文浩 林 松

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系 合肥 230026)

摘要 介绍了扫描近场光学显微镜中基于剪切力的样品、探针间距离控制的方法。当受振动激励的光纤探针由远处逐渐接近样品表面时,样品与针尖间的剪切力使针尖的振动振幅减小,通过检测探针振幅的变化从而控制针尖与样品间的距离。此种方法可以方便地将光纤探针导入工作区域内并在扫描过程中保持适当的高度。我们测量了探针系统的幅频特性和力曲线,并用该方法获得 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 的范围内光盘表面的形貌信息。

关键词 剪切力 距离控制方法 扫描近场光学显微镜

1 引 言

扫描近场光学显微镜(SNOM)是用来探测与样品表面相距小于光波长范围的近场信息的有力工具,靠一个亚波长的光学接收器(通常是顶端直径为几十 nm 的光纤探针)在靠近样品表面亚波长尺度(0-50nm)的范围内,同时接受物体辐射的传导分量和非辐射分量,从而突破衍射极限,获得物体表面高分辨的结构信息^[2]。为了得到高分辨率图像,关键问题是针尖与样品间的距离控制^[1]。该控制机制用来控制光学探针进入几十纳米的近场范围,并保持探针与样品表面的距离。

最为常用的探针高度控制方法是利用剪切力^[3]。当以本振频率振动的针尖靠近样品表面时($< 50\text{nm}$),由于剪切力的影响使针尖的振动振幅和相位产生明显的变化,可以利用光学和非光学的检测方法检测出这种变化。光学方法会造成激光衍射,由于探测到的近场光的强度很低,一般都在 nW 量级,检测激光容易增加信号的背景噪声^[2],且整套仪器设备庞大,更换针尖

时需对整套光路系统重新调试。为了克服这些缺点,非光学的检测方法逐渐发展起来,大体上主要采用以下几种方法:(1)利用隧道电流来控制针尖与样品的间距:实际上是将 SNOM 和 STM 结合起来,它的主要缺点是必须用导电的样品和导电探针,这在很大程度上限制了使用范围^[4]。(2)超声共振式:将光纤粘在石英晶体振荡器的音叉的一个臂上,激励信号加在石英晶体上,当激励信号的频率与石英晶体一致时,石英振子的阻抗最低,晶体的探针的振幅最大,当探针靠近样品时,由于受到剪切力的影响振幅减小,同时石英振子的阻抗增大。因而可以通过检测石英晶体上流过的电流来控制探针高度。用这种方法可以获得分辨率较高的图像^[2]。由于石英晶体振荡器结构原因,将光纤针尖粘在石英晶体振荡器上十分困难,同时由于振荡频率不太高,扫描速率必须很低,即在图像采集时延时必须很长。(3)压电式:采用四象限的压电陶瓷管,一象限用于激励,其余三象限用于检测,针尖粘在压电陶瓷管的内部。这种振动方式下,针尖的振动有明显的共振峰。激励信号设定为探针共振峰值处的频率,利用锁相检测出振幅的变化^[5]。根据实验室现有的装置和设备,结合国内外的一些研究成果,我们研制了一种用压电陶瓷片作为振幅检测基于剪切力的距离控制装置,利用此种方法可以将探针的高度控制在近场区内。

2 实 验

2.1 实验装置

本文所采用的实验装置是在实验室原有的 PSTM 结构上加以改造而成的,原理图如图 1(a)所示。扫描方式采用典型的单管扫描方式,针尖 X 、 Y 、 Z 三个方向的运动均由一个扫描管控制。仪器的粗调部分是由探头的上盖上均匀分布的 3 个精密螺杆来实现的,两片压电陶瓷片的光纤探针固定在压电陶瓷扫描管端部,采用两片压电陶瓷片,其中一圆片(厚度约为 1mm),用于激励,沿着该片的径向方向粘有另一片压电陶瓷片(厚度约为 0.3mm),用于检测探针的振动,见图 1(b)。在检测片上粘有光纤探针。为了检测探针的样品表面的位置和探针和样品间的距离,引进了 CCD 摄像头,CCD 的照明光源置于仪器上盖内^[6]。

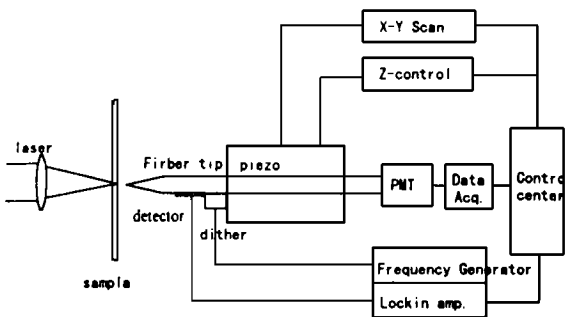


Fig. 1(a) Schematic diagram of the distance control unit between the tip and the sample

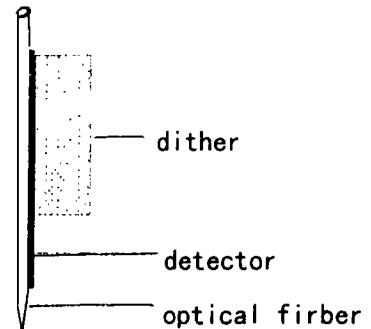


Fig. 1(b) Schematic diagram of the shear-force measurement

2.2 频率响应曲线和力曲线

根据共振频率的计算公式, $\omega = A \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}}$, 其中 μ : 单位长度质量, I : 惯性矩, E : 弹性模量,

l : 长度, 将检测片的截面近似为矩形, $I = \frac{1}{12}bh^3$, 其中 b 为宽度, h 为厚度, 计算得到的前三阶共振频率为 $f_1 = 5.82 \times 10^3 \text{ Hz}$, $f_2 = 30.8 \times 10^3 \text{ Hz}$, $f_3 = 102.3 \times 10^3 \text{ Hz}$ 。光纤探针为石英单模光纤, 直径为 $\Phi = 50 \mu\text{m}$, 端部拉伸成锥形, 光纤探针对检测片的共振频率的影响如图 4 所示, 其中 a 为未粘上光纤探针时的一段响应曲线, b 为粘上光纤后的频率响应曲线, 光纤探针的影响使得共振频率值下降。故图 2 所示的实验曲线与理论分析基本吻合。

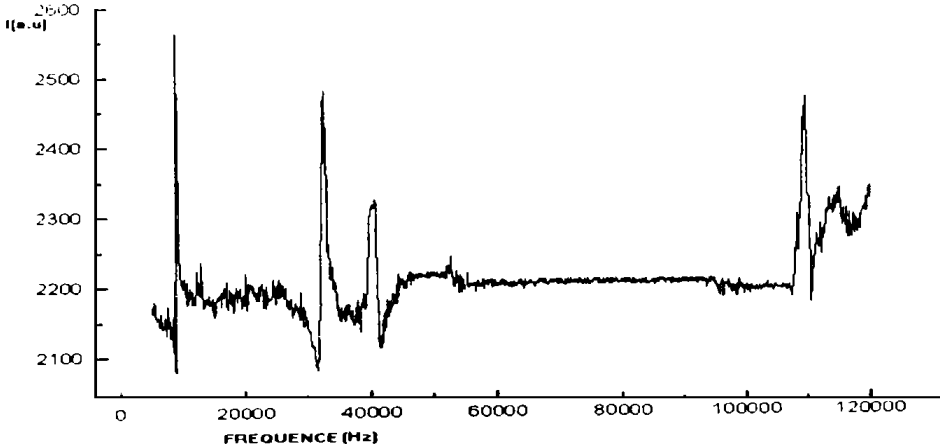


Fig. 2 Frequency response curve of the tip system at the range of 8~117kHz

分别选取前三阶共振频率作为正弦激励信号, 考虑图像建立时间 (即延时的选择与扫描范围的相互依赖制约性) 与图像的质量等因素, 选择 109.3kHz 频率的正弦信号为激励信号。

当针尖逐渐靠近样品表面时, 由于剪切力的影响, 针尖的振动振幅和相位发生较大的变化, 将锁相放大器锁定在 109.3kHz 的频率上, 检测出振幅的变化, 经 STM 的反馈控制电路保持探针样品间的距离。

图 4 给出了针尖样品间距与剪切力大小之间的关系 (力曲线), 其中激励信号为频率 $f = 109.3 \text{ kHz}$ 。

在图 4 所示的针尖与样品的作用力的变化与针尖与样品间距之间的关系图中, a 段表示自由振动, b 段表示剪切力作用区域。由该力曲线看出, 当振动着的针尖进入近场区后, 由于受到剪切力影响使振动的振幅下降。图中有一段明显的线性区, 距离控制的目的是将探针保持在此段工作区域内^[7]。

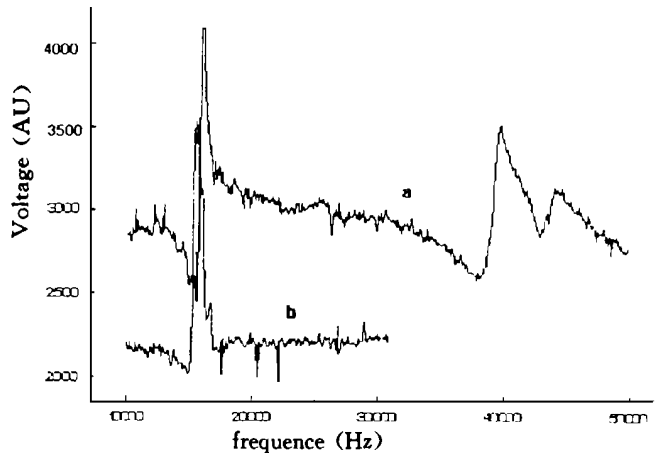


Fig. 3 Comparison of the frequency response curve before and after attaching the fiber tip



Fig. 4 Relation between the tip-sample force and the tip-sample distance

Fig. 5 SNOM image of the CD surface with a scan range of $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$

2.3 样品测试

为了考察该距离控制方法在 SNOM 中的应用结果,在室温常压下,利用它测试光盘样品,获得的光盘表面的形貌图像如图 5 所示。该光盘为从整张 CD 上取下一小部分,频率 109. kHz 的正弦信号,仪器的扫描范围为 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$,从图像上可以清楚的看见横向方向的 3 个信息点。

3 讨 论

我们提出了一种基于剪切力的针尖样品间间距控制方法并将成功的将其运用于扫描近场光学显微镜上,采用压电元件,整套仪器结构小巧,更换针尖时简单方便,电器部分元件简单,重复性较好。

在本文所提出的控制方法中,仍有一些值得改进的地方。首先,在近场范围内(小于 50nm)靠近样品时,随着针尖与样品距离的接近,共振频率略有上升,故实际的工作频率应略低于谐振点时的频率值;其次,影响其振频率的因素很多,如光纤针尖伸出检测片的长度对共振频率的影响等。关于针尖长度与共振频率的关系曲线有待后续工作,并且为了得到高质量的图像,应尽量减少激励信号的幅度值^[5]。

参 考 文 献

- 1 Courjon D, Banier C. Rep Prog Phys, 1994, 57: 989
- 2 Zhu X, Huang G S, Zhou H T, Dai Y D. Solid State Comm, 1996, 98: 661
- 3 Betzig E, Fin P L, Weiner J S. Appl Phys Lett, 1992, 60: 2484
- 4 During U, Pohl D W, Rohner F, J Appl Phys, 1986, 59: 3318
- 5 Barena J, Hollricher O, Marti O. Rev Sci Instrum, 1996, 67(5): 1912
- 6 林松. 多功能扫描探针显微系统软件设计及其应用. 硕士毕业论文

7 Bachelot R, Gleyzes P, Boccara A C. Probe Microscopy, 1997, 1: 89

A Shear-force Detection Method for Tip-Sample Distance Control in SNOM

WANG Xin, WANG Ke-Yi, HUANG Wen-Hao, LIN Song

(*Department of PMPI, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract

We present a non-optical shear-force detection system for tip-sample distant control in scanning near-field optical microscopes. When the vibrating tip is damped by the shear-force, the voltage of the tip is decreased. Detecting this decrement tip-sample distance can be easily controlled. Using the method, we can easily put the tip into the working area and keep the appropriate height while the tip is scanning. We measure the curve of the frequency dependence of the induced voltage on the tip system and the curve of shear-force signal versus tip-sample distance. We demonstrate the performance of our distance control on a surface of a CD with the scanning range $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$.

Key words: Shear-force, Distance control, Scanning near-field optical microscopy

王 昕 1974年9月生, 现为中国科学技术大学精密机械与精密仪器系 SPM 实验室硕士生, 主要从事扫描近场光学显微镜和原子显微镜中距离控制方法的研究。