

一种探针-样品距离的切变力控制新方法^{*}

白永林^① 张工力^② 任克惠^③ J·D·White^③ 侯 洵^{①②③}

①(西北大学光子学与光子技术研究所, 西安 710069)
②(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)
③(国家瞬态光学技术重点实验室, 西安 710068)

摘 要 报道了近场扫描光学显微镜(Near-field Scanning Optics Microscope-NSOM)中一种基于切变力的探针-样品间距控制新方法. 条形压电蜂鸣器片的上表面电极被沿着中心线分成两半, 一半用于驱动, 其上施加振荡源谐振频率进行激励, 另一半上粘附光纤探针, 并利用压电效应作为光纤探针的振幅传感器. 当受振动激励的光纤探针由远处逐渐接近样品表面时, 由于样品与探针之间的切变力阻尼作用使得探针的振幅减小, 通过检测探针振幅的变化可以控制探针与样品的间距. 我们建立了一套探针-样品间距探测控制系统并利用该系统获得了 CD 盘片表面 $8\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}$ 范围内的切变力形貌图.

关键词 近场扫描光学显微镜; 切变力; 压电陶瓷; 探针-样品间距

0 引言

在近场扫描光学显微镜(NSOM)^{1,2}中, 传统的光学镜头被亚波长小孔(直径 100nm 左右)所代替, 当把这样的亚波长小孔置于距样品表面一个波长以内, 即近场区域^{2,3}时, 可以探测到丰富的亚微米光学信息⁴, 从而突破衍射极限. 但这些精细结构光学信息仅存在于样品表面一个波长以内, 且其强度随针尖-样品距离的增大而呈指数衰减, 因而要得到一幅高分辨的图象, 除了使用尺度很小的探针以外, 最关键的问题就是控制探针-样品之间的距离. 同时又由于光纤探针的尺度非常小, 需要高质量的距离控制技术来防止探针与样品接触而损坏探针或样品. 切变力调控技术⁵作为一种行之有效的方法, 已被广泛地应用于 NSOM 中的探针-样品间距的调节上.

较早的切变力调控系统采用光学方法^{5,6}检测针尖振幅从而控制探针-样品间距, 虽然这种检测方法的效果较好, 被广泛地应用于早期的 NSOM 系统中⁷, 但它却有很多缺点. 首先, 光纤探针出射的近场光能量很低, 一般为 10nW 左右,

而切变力调控光的能量一般为 1mW 左右, 它的散射光也能激发样品从而造成很大的背景, 降低了系统的信噪比. 其次, 虽然通过选用样品不敏感的调控光波长、使用滤光片等措施可以改善系统的信噪比. 但这就必须对不同的样品选用不同的调控光波长, 并且对于一些样品这种方法也就不再有效了(比如窄带隙半导体材料, 超导体材料等). 第三, 光路的准直很不方便, 特别是应用于低温系统或真空系统时就变得更为困难. 光学切变力方法的不足使得人们将注意力转移到非光学切变力调控技术上. 目前非光学调控方法正在迅速地发展, 已经出现了一些成熟的技术. 比如基于隧道效应的隧道电流调控法⁸, 基于切变力技术的谐振音叉法⁹以及阻抗法¹⁰等. 本文将报道一种在同一块压电陶瓷片上制作起振和探测元件的非光学切变力调控新方法.

1 切变力非光学调控法

切变力探针-样品距离的控制机制如下: 光纤

探针垂直于样品表面被固定在一个压电元件上，二者构成的机械系统具有较高的机械品质因数 Q (30~100)，当施加一本征频率振荡驱动时，探针就在样品表面作切向振动。当探针接近样品表面时 ($<50\text{nm}$)，由于样品表面与探针相互之间的作用力使得谐振系统的阻尼增大， Q 值降低，探针的振幅减小。因而在探针接近样品的过程中，通过监测探针振幅的变化，就可以监测并控制探针-样品的间距。在我们的压电片切变力非光学调控系统中，光纤探针被粘附在条形压电陶瓷片上，二者一起可以看作一个谐振子。压电陶瓷片的上表面电极被沿着中心线分成两部分，其中一半用于驱动，其上施加谐振频率振荡源进行激励，驱动针尖沿着平行于样品表面的方向振动。另一半上粘附光纤，并利用压电效应作为光纤探针的振幅传感器，其输出是一个与振荡源同频率的交流信号。当探针尖接近样品表面时，相互作用力使得系统的 Q 值降低，振幅减小，压电传感部分的输出也就减小。扫描过程中通过反馈系统调节针尖-样品间距使得针尖的振幅保持在某一个设定值上，就可以将针尖控制在一个恒定的高度。系统结构如图 1 所示。

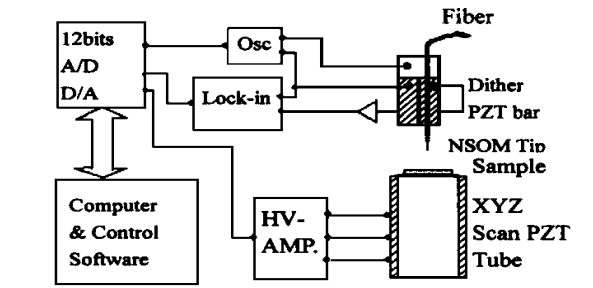


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

在切变力调控系统中，针尖-样品之间的切变力很小 (nN 量级)，这样小的力要对谐振的压电探测器起作用，要求压电探测器的内摩擦系数 η_i 足够的小⁹，而 η_i 又正比于 $B \cdot M$ ，其中 $B = \omega / Q$ ， M 为探测器和光纤的总质量，由此我们可以看出，探测系统的质量越小， Q 值越大，灵敏度也就越高。我们采用的这种同一块条形压电片驱动、探测的薄片结构，可以使探测系统的总质量 M 尽可能的小，提高探测灵敏度。提高灵敏度的意义在于不仅可以提高 Z 方向的分辨率，而且可以避免在对质地柔软的样品测试时造成对样品的损伤。系统中使用的压电片用普通的压电蜂鸣器片

磨制而成。该压电蜂鸣器材料具有以下几个优点：①机电耦和系数比较大，便于激励，输出信号大。②易于加工 (薄片状，很容易加工成要求的形状)。③谐振频率满足关系：

$$fr = \frac{\alpha_n \cdot t}{ab} \sqrt{\frac{Y_0}{3\rho(1-\sigma^2)}}$$

其中 Y_0 为材料的杨氏模量， ρ 为合成密度， σ 为泊松比， α_n 为由支撑方法决定的常数。· ab 为材料有效面积。· t 为厚度。由上式可以看出对于已有压电片材料，其材料参数已定确定，我们可以通过改变其形状及支撑方法来改变谐振频率。改变谐振频率的必要性在于：避开低频机械震动噪音，以利于提高系统信噪比。④材料来源广泛，价格低廉。图 2 是我们选用的压电蜂鸣器片频率响应曲线。当在片上粘附光纤以后，压电片的谐振频率升高了，但变化不大。我们实验中使用的谐振峰在没有光纤时频率为 3.31kHz ， Q 值为 58，粘上光纤后频率为 3.42kHz ， Q 值下降为 45。

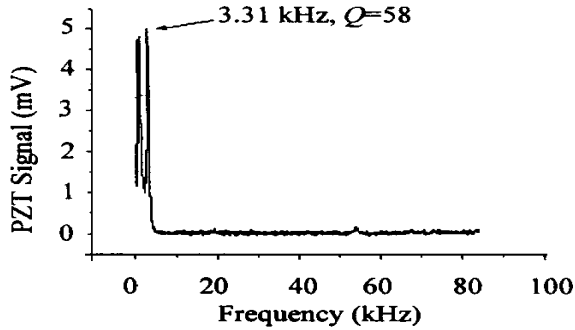


图 2 压电陶瓷片的频率响应曲线 (4mV 激励)

Fig. 2 PZT frequency response curve (for 4mV excitation)

图 1 中精密振荡源的频率由 12bits D/A 输出电压控制，使其精确地工作于压电陶瓷片的谐振频率上。图 1 中的压电陶瓷管已经定标，在工作电压为 400V 时，相应的最大行程 Z 方向为 $2\mu\text{m}$ 。高压放大器的增益可调，与 12bits D/A 相配合，逼近的精度可达到每步 1nm 。针尖在压电陶瓷片的驱动下在平行于样品表面的方向谐振，样品在压电陶瓷管的驱动下以 1nm 的步长向针尖逼近，当探针-样品的间距达到切变力起作用的范围时，探针受力发生变化，从而改变压电陶瓷片的谐振状态，导致振幅减小，输出相应减小，我们用锁相放大器检测这一变化过程，得到一逼近曲线如图 3(A) 所示。

从图 3(A) 逼近曲线可以得出切变力作用范

围不小于 19nm. 在检测过程中,将压电陶瓷片的

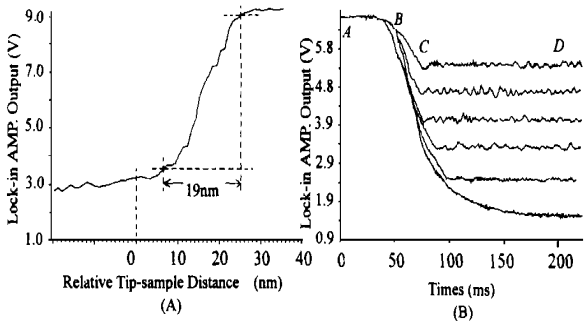


图 3 逼近曲线 . (A)探针由远处向样品表面逼近时锁相放大器的输出随探针-样品相对距离的变化曲线 . (B)反馈控制系统在不同的设定值下开始工作后锁相放大器的输出随时间的变化曲线 . (探针由远离 (AB 段) 到接近 (BC 段) 直至被保持 (CD 段) 在距样品表面不同的高度)

Fig.3 Approach curve . (A) Output of the Lock - in amplifier as a function of the relative probe - sample distance . (B) Lock - in amplifier output is plotted as a function of time when feedback distance control is in action. Curves are plotted for different threshold levels, corresponding to different probe-sample separations.

输出与设定值比较的结果负反馈给 Z 方向高压放大器,我们就可以将针尖-样品的间距维持在一个设定的高度 . 图 3(B)为反馈控制系统在不同的设定值下开始工作后锁相放大器的输出随时间的变化曲线 . 这些曲线记录了探针由远离 (AB 段)到接近 (BC 段)直至被保持 (CD 段)在距样品表面不同高度的动态过程 .

2 试验结果

用图 1 的系统作 XYZ 三维扫描,就可以对样品表面进行形貌分析 . 图 4 是对去掉保护层的 CD 盘片表面扫描得到的 256 级灰度切变力形貌图象 . 扫描时所用的针尖直径约为 100nm,压电片长度为 6mm,宽度为 2.5mm,驱动频率为

3.42kHz,压电片驱动电压为 2mV, Q 值 45. 锁相放大器的时间常数为 1ms. 扫描过程中探针被保持在距样品表面 10nm 处 . 扫描速率为 5ms/pixel. 图 4(A)的像素数为 100×100,大小为 8μm×8μm. 图 4(B)的像素数为 40×40,大小为 3μm×3μm.



图 4 CD 盘片表面切变力形貌图象 . (A) 100×100 Pixels, 8μm×8μm. (B) 40×40 Pixels, 3μm×3μm.

Fig.4 Topography of a CD surface. (A) 100×100 Pixels, 8μm×8μm. (B) 40×40 Pixels, 3μm×3μm.

3 总结

我们介绍了一种基于切变力技术,仅用一块压电陶瓷片就完成激励与检测的探针-样品间距调控新方法,并成功地将其应用于NSOM系统中. 该方法使得系统结构小巧,操作方便,灵敏度高,重复性好. 但该控制方法中仍有一些需要改进的地方. 比如压电片工作频率比较低,限制了扫描速度的提高. 针对这一缺点,我们可以采取选用合适的压电材料、改变压电片的形状、选用较高的谐振频率等措施来加以改善. 同时,也需要采用一些更好的措施来进一步优化压电片的形状,提高探测灵敏度 .

参考文献

1 Betzing E, Trautman J K, et al. Science, 1991, 251(5000), 1468~1470
2 Dürig U, Pohl D W, et al. J Appl Phys, 1986, 59(10), 3318~3327
3 Reddick R C, Warmack R, et al. J Rev Sci Instrum, 1990, 61(12), 3669~3677
4 Pohl D W, Courjon D. Near-Field Optics. NATO ASI Series E: Applied Sciences, Dordrecht Kluwer Academic, 1993, 242;
5 Bezig E, Finn P L, et al. Appl Phys Lett, 1992, 60(20), 2484~2486
6 Tarrach G, Bopp M A, et al. Rev Sci Instrum, 1995, 66(6), 3569~3575
7 Froehlich F, Miletter T. D. Appl Phys Lett, 1994, 70(12), 2254~2258
8 Reddick R C, Warmack R J, et al. Rev Sci Instrum, 1990, 61(12), 3669~3677

- 9 Khaled Karrai, Grober R D. Appl Phys Lett, 1995, 66(14): 1842~1844
10 Mark Lee, McDaniel E B, et al. Rev Sci Instrum, 1996, 67(4): 1468~1471

A NONOPTICAL SHEAR-FORCE METHOD FOR TIP-SAMPLE DISTANCE REGULATION

Bai Yonglin^①, Zhang Gongli^②, Ren Kehui^③, White J D^③, Hou Xun^{①②③}

^① Institute of Photonics & Photon Technology, Northwest University, Xi'an 710069

^② Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

^③ Key State Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Abstract A simple, compact and inexpensive non-optical method for maintaining a constant separation between a fixed sample and probe based on a single dither-detection piezoelectric slice is presented. The covering piezoceramic with electrodes of a thin cantilever, which produced from the piezoelectric slice of a miniature buzzer, is cut into 2 pads. One pad is for excitation and the other pad is for detection. The sharpen fiber is mounted on the surface of the detection pad, an ac voltage is applied to driving the cantilever at the combined fiber-cantilever resonance frequency. As the probe approaches the sample surface, “shear force” effectively damps its vibrational amplitude. This effect can be used to regulate probe-sample separation. Using this single dither-detection piezoelectric slice, we have obtained the topography of an $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ area of a CD. We expect that this technique will find application not only in the field of scanning force microscopy but also in Near-field Optical Microscopy as a means to maintain constant probe-sample separation.

Keywords Near-field scanning optical microscopy, Shear force, Piezoelectric ceramic; Probe-sample separation

Bai Yonglin was born in 1974, received his B.S. degree in 1997. He is currently studying for his M.S. degree in Northwest University. His research interests are near-field optics and ultrashort pulse laser-matter interactions.

