

# 采用 DDS 的近场扫描光学显微镜探针-样品的纳米距离检测\*

冯晓强<sup>1,2,3</sup> 贺锋涛<sup>1,2</sup> 张东玲<sup>4</sup> 白永林<sup>1,2</sup> 侯 洵<sup>1,5</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

(3 西北大学光子学与光子技术研究所,西安 710069)

(4 河南大学物理与信息光电子学院,河南开封 475001)

(5 西安交通大学电子科学与技术系,西安 710049)

**摘要** 近场扫描光学显微术中,近场距离的检测和控制是需要解决的核心技术之一.本文研究了基于 DDS 驱动的压电传感器,在一个压电陶瓷片上,电极被分成相同的两部分,分别用于振动驱动和振幅检测.近场扫描的光纤探针固定于此压电陶瓷片上.振动驱动信号采用 DDS,在样品的远场时,可以通过频率扫描得到误差在 0.006 Hz 以内的压电陶瓷片谐振频率驱动信号,而当光纤探针处于样品的近场距离之内时,压电陶瓷片的谐振频率偏离驱动信号频率,振幅明显减小,从而检测出近场距离.高精度振动驱动源 DDS 和高灵敏度压电传感器的采用提高了检测灵敏度和工作稳定性.

**关键词** 直接数字合成(DDS);近场扫描光学显微镜;压电传感器;近场距离

**中图分类号** TN16 **文献标识码** A

## 0 引言

80 年代初期,扫描隧道显微镜 (STM, Scanning Tunneling Microscope) 的发明使人们在纳米科学技术领域前进了一大步,人们不仅可以得到物质的纳米 ( $\leq 100$  nm) 尺度信息,而且提供了一个新的探测物质微观结构的思路.伴随 STM 的发明和近场扫描技术的发展和成熟,诞生了近场扫描光学显微术 (NSOM, Near-field Scanning Optical Microscope), 采用具有纳米尺度光阑的光纤探针将光场限制在波长范围之内,并在样品表面近场距离内逐点扫描成像,得到样品的纳米尺度内的光学性质. NSOM 的分辨率只取决于探针孔径和探针与样品之间的距离,与光波长无关,突破了远场光学的衍射极限. NSOM 将光学成像的空间分辨率提高到一个前所未有的水平,于是在许多领域中得到了广泛的应用,并取得了一些重要的成果.

NSOM 的关键技术在于如何产生一个尺度足够小、透过率足够高的探针,并且始终将探针控制在样品的近场距离之内进行逐点扫描. 光纤探针一般采用腐蚀法或熔拉法方法得到光纤锥尖,再在针尖绕轴旋转的条件下进行侧面镀膜,针尖处就形成了纳

米光阑. 间距控制方面常用的方法有切变力 (shear force) 控制方法、法向力控制方法等,但是比较稳定、可靠的是切变力控制方法:采用一个横向谐振的光纤探针针尖在逼近样品表面时,在很小的范围之内,针尖与样品之间的短程相互作用力会明显影响探针的固有频率,导致其振幅和相位发生明显变化,从而检测出针尖已经位于近场距离之内<sup>[1]</sup>. 通常这种作用力在样品表面几十纳米之内. 反馈控制系统以此振幅信号控制探针针尖和样品之间的距离,在扫描过程中使针尖和样品之间距离始终在近场距离之内. 为了得到较高的探测灵敏度和较好的稳定性,不仅需要高灵敏度的振幅探测器,而且需要精确的探针自由谐振时的谐振驱动信号. 光纤探针和切变力控制方法给 NSOM 带来了技术性突破,也对 NSOM 的发展起了巨大的促进作用.

## 1 原理

为了得到高精度的探针谐振驱动信号,必须采用高精度的频率合成器. 直接数字合成 (Direct Digital Synthesis, DDS) 技术是随着集成电路技术、计算机技术和数字处理技术的迅速发展而诞生的一种频率合成方法,采用数字电路接口,具有很高精度的频率和相位分辨力以及相对较宽的频率输出范围,输出频率的稳定性只取决于输入时钟信号的频率稳定性,而采用石英晶体作为时钟信号源. DDS 的频率输出非常稳定,可以作为高精度程控信号发生器<sup>[2]</sup>. 另外器件体

\*西安交通大学“行动计划”资助

Tel: 029-88303281 Email: xqfeng@nwu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-24

积小,功耗低,它在通信、雷达、仪器仪表、高速计算机及导航系统中有很大的应用潜力。

一个典型的 DDS 如图 1,其核心是一个相位累加器,由一个加法器和一个相位寄存器组成。DDS 工作时,DDS 频率控制寄存器中保存了输出频率值对应的相位增量值,在时钟信号的驱动下,DDS 从频率控制寄存器中读出相位增量值,将其与相位寄存器中的相位值相加,相加的结果输入到正弦查询

表的地址上,同时又送到加法器中准备与频率控制字作下一次累加。正弦查询表是一个完整周期内正弦波形的数据,每一个地址对应正弦波中  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围的一个相位点。这样,输入的地址相位信息映射成对应的正弦值,将此值送到 DAC 中经过数模转换和低通滤波器,输出瞬时的正弦值。由于整个输出是在时钟的驱动下进行的,DDS 的输出就成为正弦波形。

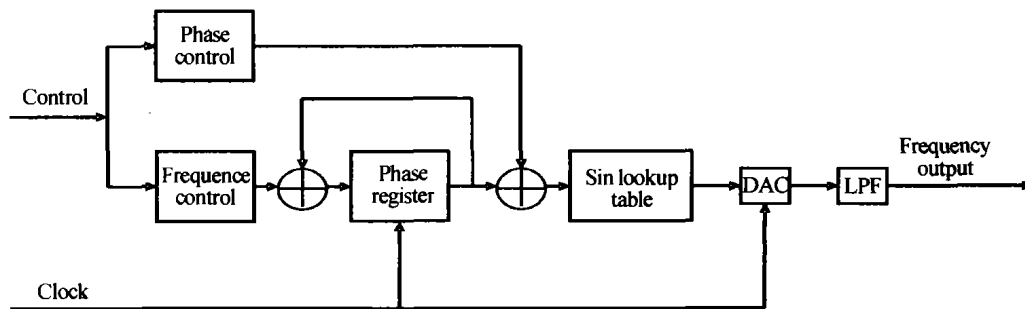


图 1 DOS 工作原理

Fig. 1 Working diagram of DDS

DDS 的输出频率只取决于时钟的频率和频率寄存器中的相位增量值,要改变其输出频率,只需通过串行总线向频率寄存器写入相应的相位增量值就可以了。这样,NSOM 扫描头采用 DDS 后可以很方便地更改输出频率,或者在程序的控制下完成在一定频率范围内的频率扫描,扫描过程中得到光纤探针的谐振频率,再将频率锁定在其谐振频率上,从而达到探针的频率准确定位。

NSOM 扫描头采用压电陶瓷片作为光纤探针针尖的振幅传感器,其结构如图 2。压电陶瓷片的一个电极被分成完全相同的两部分,一部分加激励振荡信号,另一部分检测光纤探针的振幅变化。激励振荡信号来自 DDS,压电陶瓷片在此信号的驱动下由于逆压电效应产生横向振动,振幅大小与驱动信号频率和振幅有关。压电陶瓷片的另一部分由于压电效应,电极上会产生与振动相关的电压信号,此电压信号的幅度反映了压电陶瓷片的振幅大小,检测其幅值就会得到振幅信息。光纤探针就固定在压电陶瓷片上。当探针向样品逼近前,计算机控制 DDS 输出一定频率范围内的频率扫描信号,当扫描到光纤探针的谐振频率时,光纤探针的振幅会相对很大,此时计算机记录了探针的谐振频率。频率扫描结束后计算机控制 DDS 输出探针的谐振频率,使得探针在自由状态以其固有频率谐振。这样,探针就可以在计算机的控制下向样品逼近了。在逼近过程中,当针尖距样品几十纳米的距离时,由于针尖和样品之间的短程作用力,会使得探针的谐振频率发生改变,谐振频率与驱动频率的偏移会导致探针的振幅减小,检测到振幅的减小之后程序控制探针停止向样品逼

近,并采集样品表面信息。目前探针和样品之间作用力的机理不是很清楚,可能的推测是毛细力和范德瓦尔斯力,或者由于针尖与样品之间的短程摩擦引起的针尖非线性弯曲力<sup>[3]</sup>。

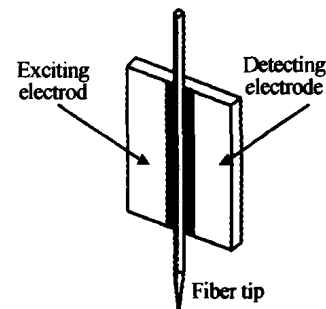


图 2 纳米压电传感器

Fig. 2 Piezo nanometer-scale sensor

## 2 试验装置

实验中 DDS 芯片采用 AD9835,这是一个采用串行数据输入的直接数字合成芯片,最高可以输出 25MHz 的信号。芯片内部包含 2 个 32 位的频率寄存器,4 个 12 位的相位寄存器以及 1 个 10 位的数模转换器。采用 24 MHz 的时钟频率,可以输出  $0 \sim 12$  MHz 以内、精度为 0.006 Hz 的任意频率。实验装置如图 3。在由计算机并口扩展的总线结构上连接了 AD9835 和 AD 转换器,由软件控制其正常工作所需要的脉冲时序并完成数据交换。AD9835 产生的频率信号经驱动放大和衰减之后成为 2 mV 的正弦信号加载在压电陶瓷片的激励电极上,驱动压电陶瓷片做微小的横向振动。类似的压电陶瓷片在 6 mV 谐振电压驱动下横向振动幅度为  $17 \text{ nm}$ <sup>[4]</sup>,而采用 2 mV 的信号驱动时振幅会更小,有助于得到

更高的分辨率. 检测电极上得到的振幅信号经过放大、精密检波后送到 AD 转换器,再由计算机采集. 计算机先在远场进行频率扫描,得到压电陶瓷片的谐振频率后锁定此频率作为 AD9835 的输出,然后控制探针向样品逼近. 样品是去掉铝膜的 CD 光盘. 在逼近过程中计算机始终监视着探针的振幅变化,只要振幅减小到设定的阈值,就可以判断出探针已经位于样品的近场区域之内,并控制光纤探针停止向样品逼近,并开始在样品表面进行扫描,采集样品表面信息.

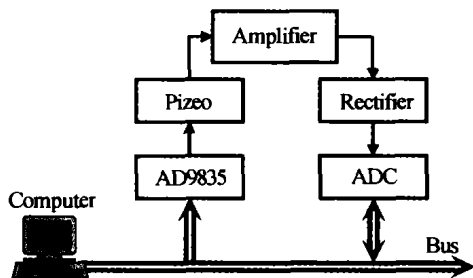


图3 近场距离的检测装置  
Fig.3 Setup of near-field distance detection

### 3 结果

利用包含 DDS 的光纤-探针距离检测的压电传感器,对 CD 光盘进行了形貌扫描. 在 CD 光盘的远场区域,计算机控制 DDS 从 3 kHz 到 10 kHz 频率范围内以 10 Hz 的步进频率扫描,在扫描过程中可以得到双压电陶瓷片的大致谐振频率. 为了进一步得到更准确的谐振频率,可以进行二次扫描,即在谐振频率附近以更小的步进频率扫描包含谐振频率的范围,在这里进行了从 7 kHz ~ 7.5 kHz 范围内以 0.5 Hz 的步进频率的扫描,结果如图 4. 由图可以看出,此压电陶瓷片比较准确的谐振频率为 7215.5 Hz. 在试验中如果扫描更大的频率范围,可以得到压电陶瓷片的高次谐振频率,但是如果把压电陶瓷片的工作点设定在高次谐振频率上,针尖-样品之间作用力对探针的振幅影响比较小,检测灵敏度比较低,故一般将其工作点设定在基频谐振频率上.

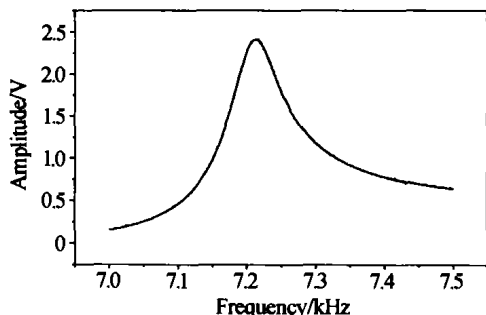


图4 光纤探针的谐振频率  
Fig.4 Resonant frequency of fiber tip

影响探针谐振频率的因素比较多,即使同一套试验装置在不同的时间使用也会得到不同的谐振频

率,但是如果每一次试验之前都进行一次谐振频率扫描,可以保证在当前试验条件下谐振频率的稳定性. 图 5 是频率扫描完成后 DDS 锁定在谐振频率 7215.5 Hz 上输出的驱动压电陶瓷片谐振的固定频率,图 6 是探针在距 CD 表面不同高度处的振幅,可以看出,探针距 CD 表面约 15 nm 处时,振幅明显减小,表示已经位于 CD 的近场之内.

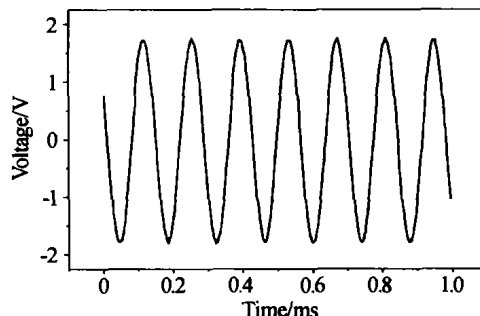


图5 压电陶瓷的驱动信号源  
Fig.5 Exciting signal source of piezo

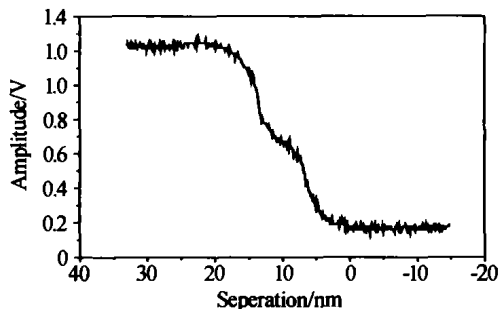


图6 探针逼近样品的过程  
Fig.6 Approaching of tip to sample

试验过程中,如果把 CD 光盘不同位置处的光纤针尖高度记录下来,就可以得到 CD 的表面形貌图,而探针针尖高度的控制是由加在竖直方向上压电陶瓷管上的电压决定的,所以对于样品形貌的记录实际上是对压电陶瓷管上的电压的记录. 图 7 是得到的 CD 光盘表面形貌,反映了记录在光盘上的信息坑道大小.

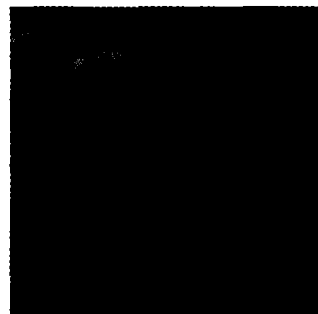


图7 CD 光盘的表面形貌  
Fig.7 Surface of CD

### 4 总结

近场距离检测和控制是近场扫描光学显微镜的核心技术之一,稳定可靠的检测和控制方法有助于得到更高的空间分辨率. 本文采用双压电陶瓷片作

为纳米距离传感器,结合高频率精度直接数字合成电路,可以得到准确的光纤探针谐振频率,并以此谐振频率作为压电陶瓷片工作点,以压电陶瓷片受迫振动的振幅变化确定针尖是否位于样品的近场之内,得到了较高的检测精度和稳定性,并扫描得到 CD 光盘的表面形貌.

#### 参考文献

- 1 白永林,张工力,任克惠,等. 一种探针-样品距离的切变力控制新方法. 光子学报, 1999, **28**(2): 120 ~ 123  
Bai Y L, Zhang G L, Ren K H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 120 ~ 123
- 2 崔建鹏,赵敏,江帆. 采用 DDS 技术实现的虚拟任意波形

发生器. 计算机测量与控制, 2003, **11**(7): 553 ~ 555

- Cui J P, Zhao M, Jiang F. *Computer measurement & Control*, 2003, **11**(7): 553 ~ 555
- 3 Gregor M J, Blome P G, Schofer J, *et al.* Ulbrich. Probe-surface interaction in near-field optical microscopy: the nonlinear bending force mechanism. *Appl Phys Letter*, 1996, **68**(3): 307 ~ 309
- 4 贺锋涛,白永林,冯晓强,等. 像散法对微位移和微振动的实时测量. 光子学报, 2003, **32**(10): 1208 ~ 1211  
He F T, Bai Y L, Feng X Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1208 ~ 1211

## Detection of Nanometer Distance between Sample and Fiber Tip of NSOM with DDS

Feng Xiaoqiang<sup>1,2,3</sup>, He Fengtao<sup>1,2</sup>, Zhang Dongling<sup>4</sup>, Bai Yonglin<sup>1,2</sup>, Hou Xun<sup>1,5</sup>

1 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Academic Sinica, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069

4 Institute of Physics & Information Photoelectronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475001

5 Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2004-03-24

**Abstract** To detect and control the nanometer distance between the sample and the fiber tip is part of the key technology of NSOM system. Here a pizeo sensor with DDS is discussed. One of the sensor's electrodes is separated into two like parts, one is for exciting the pizeo to shake and the other is for detecting the shake. The fiber tip is fixed on the pizeo and the pizeo is driven by a DDS. When the fiber tip is far from the sample surface, an exact resonant frequency of the fiber tip is obtained with the error of 0.006 Hz after frequency scanning, and when the tip is within the near-field of the sample, the resonant frequency of the fiber tip departs the resonant frequency in far-field, and the amplitude of the fiber tip obviously decreases because of the shear force between the fiber tip and the sample, and in this way the near-field distance is detected. The combination of high precision frequency source DDS and the pizeo sensor provides a higher sensitivity and stability of near-field detection.

**Keywords** Direct digital synthesis (DDS); Near-field scanning optical microscope (NSOM); Pizeo sensor; Near-field distance



**Feng Xiaoqiang** was born in 1974. He received the BS degree in 1998 from department of physics and M. S. degree in 2000 from Institute of Photonics & Photon Technology, Northwest University respectively. In September 2000, he began to work toward the Ph. D. in State Key Laboratory of Transient Optics, Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, CAS and engaged in the research of optical information processing and high density optical information storage with near-field optic technology.