

文章编号: 0253-2239(2010)08-2272-06

# 照明光可控收集式近场光学显微镜测量 样品倾角和折射率

王 昭 吴世法 李 宏 刘 琨

(大连理工大学物理系纳米与近场光学实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 对于收集模式的近场光学显微镜, 提出一种新的测量样品折射率和倾斜角的方法。这种方法中, 使用一个反馈回路控制照射样品的光强, 探针与样品保持等间距垂直振荡, 照射样品的光有两束且位置对称。数字信号处理器控制照射光强改变、近场光强采样与探针振荡同步。在一个振荡周期获取一组近场光强极值, 在另一个周期, 改变每束光强度, 隐失场分布发生改变, 得到一组不同的近场光强极值, 使用从多个振荡周期获取的不同近场光强极值, 计算得到样品倾角, 折射率。使用光栅和细胞膜对这种方法进行了测试, 对光栅样品的扫描得到的形貌图显示这种方法横向分辨率优于 400 nm, 对细胞膜样品的测试显示细胞膜的折射率在 1.4 左右, 从而表明这种方法不但能有效测量样品折射率, 而且提供了一种使用光学信息构建样品形貌的新途径。

**关键词** 收集模式近场信号处理器; 折射率; 倾斜角; 横向分辨率

**中图分类号** TH742 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2272

## Measuring Inclination and Refractive Index of the Sample in Collection-Mode Scanning Near-Field Optical Microscope with Controllable Illumination

Wang Zhao Wu Shifa Li Hong Liu Kun

(*Institute of Near-Field Optics and Nano-Technology, Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*)

**Abstract** A new method to measure the refractive index and the inclination of the sample in collection-mode scanning near-field optical microscope is presented. In this method, the illumination intensity is controlled by a feedback loop, the vertical vibrating tip scans the sample with a constant distance and the sample is illuminated by two symmetry light beams. Altering of the illumination intensity and the sampling of the local intensity are controlled by digital signal processing to be synchronized with the vibration of the tip. A group of extreme values of the tunneling light are obtained in one oscillation period. In another oscillation period, changing of any illumination beam will modify the near field distribution. Then, another group of extreme values of the tunneling light will be obtained. The refractive index and the angle of inclination of the object can be computed from groups of extreme values that obtained from multi-oscillation periods. Grating as well as erythrocytes membrane was analyzed in our experiment. Topography images of the grating produced by our prototype instrument are shown to have a lateral resolution better than 400 nm. As for the erythrocytes membranes, the refractive index of it is about 1.4. It can be concluded that this method could not only measure samples' refractive index effectively but also offer a new approach to rebuild samples' topography image using optical information.

**Key words** collection-mode scanning near-field optical microscope; refractive index; inclination; lateral resolution

### 1 引 言

近场扫描光学显微镜(SNOM)<sup>[1~4]</sup>能够给出两种性质的图像,一种是反应样品光学特性的图像,包

括透射率、折射率等。一种是反应样品表面起伏的形貌图像。对于光学图像,大多数 SNOM 只给出最简单的透射率图像,而很少给出折射率的图像,这是

收稿日期: 2009-11-05; 收到修改稿日期: 2009-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(60007011)资助课题。

作者简介: 王 昭(1978—),男,博士,主要从事近场成像技术、光学存储中信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: wangzhao\_1978@yahoo.com.cn

因为折射率的表现形式不象透射率那样直观。折射率的测量或者使用间接方法,例如 Raman-Nath 方法<sup>[5]</sup>、干涉方法<sup>[6]</sup>等,或者设计结构复杂的仪器<sup>[7,8,9]</sup>。光子扫描隧道显微镜(PSTM 或者称为 STOM)<sup>[10,11]</sup>作为 SNOM 中的一种,工作在收集模式。它仿照电子隧道显微镜,在全反射的条件下产生一个隐失场,使用这个隐失场照射样品,探针在近场收集光子,其光强是折射率的函数。利用这个性质,一些可以测量样品的折射率的 PSTM/STOM 被设计出来<sup>[12~15]</sup>,但是在这些仪器也带有一些缺点,例如需要进行曲线拟合近似、运算量大、控制逻辑复杂、耗时长、模型简单、只能测出少数特殊样品等。除了光学图像,PSTM/STOM 也经常使用两种方法获取样品形貌图像。1)从光学探针接收到的光学信息形成样品的形貌<sup>[1]</sup>,这种方法需要样品的折射率或者入射角等条件固定。2)SNOM 与一个辅助显微镜组合<sup>[3]</sup>。这个辅助显微镜的主要作用是控制光学探针-样品间距,同时提供样品的形貌信息。

本文主要介绍近场光学成像系统:照明光强可控从而改变近场分布的收集式 SNOM。这个收集式 SNOM 与一个原子力显微镜(AFM)组合,光学探针工作在轻敲模式(tapping-mode)。AFM 的作用是在扫描时保持探针-样品平均间距  $Z_c$  以及光学探针振幅  $A$  的恒定。在某个成像点  $(X, Y)$  处双光束照射样品产生的近场光强是探针-样品间距  $Z$  的单调函数,因此在一个振荡周期内,近场光强有唯一的最大最小值。在多个振荡周期,改变照射样品的光照条件可以得到多组的极值。根据这些极值可以计算得到样品的倾角和折射率等信息。

除了可变照明的设计,还使用数字信号处理器(DSP)处理收集到的信息,进行探针-样品间距控制和照射光强控制。这样使得仪器具有良好的灵活性,容易升级。为了得到不同条件下近场光强的极值,采用对称双光束照射样品,对双光束的强度控制采用与差动对组合的电流镜驱动技术。

## 2 计算样品折射率与倾角原理

收集式 SNOM 工作在全反射条件下,考虑到样品倾角引起入射角的变化,与样品表面距离为  $Z$  处的隐失场的光强可以近似表示为

$$I(z) \approx I_s \exp \left\{ -Z \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\bar{\theta} + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

式中  $I_s$  为样品表面的光强, $\lambda$  为入射波长, $n$  为样品

的折射率, $\bar{\theta}$  为平均表面入射角度, $\Delta\theta$  为样品的表面倾角,如图 1 所示。

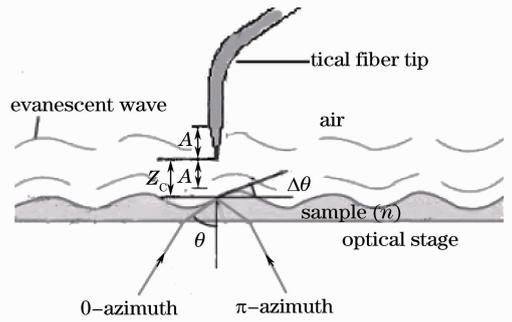


图 1 样品倾角、入射角和振荡探针的关系

Fig. 1 Relations between inclination of the sample, incident angle and the vibrating tip

如果在这束光对称的位置放置另外一个光源,这束光源与原来的光源具有等强度,等平均入射角,且互不相干。这两束光同时照射样品,可以得到在样品表面距离  $Z$  处总的隐失场的光强是两个单调递减指数函数的和

$$I = I_s \exp \left\{ - (Z + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\bar{\theta} + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + I_s \exp \left\{ - (Z + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\bar{\theta} - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}. \quad (2)$$

它依然是一个随着探针-样品间距  $Z$  增加的单调递减函数,在探针与样品发生接触后依然成立,图 2 是仪器测得光强的原子力信号与探针-样品间距的关系曲线。原点从探针与样品的接触点算起,可以从原子力曲线判断出来。虚线是两束光照射样品的近场光强度,实线为 0 向和  $\pi$  向光束光强增加 2 倍单独照射样品得到的近场光强。

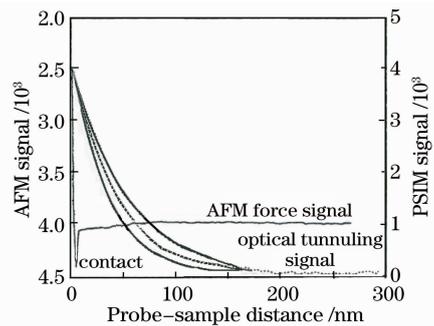


图 2 原子力-间距以及近场光强-间距曲线

Fig. 2 Atomic force-distance and near-field optical intensity-distance curve

因为 AFM 控制回路使探针-样品间距保持一个恒定平均间距  $Z_c$ ,且从平衡位置算起探针垂直振荡幅度为  $A$ ,所以两束光照射样品产生的隐失场在

探针的每个振荡周期具有唯一的最大和最小值。它们出现在探针振荡的两端位置,也就是  $Z-A$  和  $Z+A$  处,如图 1 所示。分析采用的是三介质两面模

型, $\theta$  是样品与空气之间的平均入射角,近场光最大最小值分别为

$$I_{\max 1} = I_s \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + I_s \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

$$I_{\min 1} = I_s \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + I_s \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}. \quad (4)$$

改变两束入射光的强度,0 向角的入射光强从  $I_s$  减小到  $I_s - \alpha I_s$ , $\pi$  向角的光强从  $I_s$  变化到  $I_s + \beta I_s$ , $\alpha, \beta$  已知,在一个振荡周期产生了另一组极值

$$I_{\max 2} = (I_s - \alpha I_s) \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + (I_s + \beta I_s) \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}, \quad (5)$$

$$I_{\min 2} = (I_s - \alpha I_s) \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + (I_s + \beta I_s) \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}. \quad (6)$$

两束光总强度反向变化,0 向角的入射光强增加到  $I_0 + \beta I_0$ , $\pi$  向角的光强减小到  $I_0 - \alpha I_0$ ,在另一个振荡周期又产生了第三组极值

$$I_{\max 3} = (I_s + \beta I_s) \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + (I_s - \alpha I_s) \exp \left\{ - (Z_C - A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

$$I_{\min 3} = (I_s + \beta I_s) \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\} + (I_s - \alpha I_s) \exp \left\{ - (Z_C + A) \frac{2\pi}{\lambda} [n^2 \sin^2(\theta - \Delta\theta) - 1]^{1/2} \right\}. \quad (8)$$

(3)式~(8)式是不相关的,共有  $I_s, Z_C, A, n, \theta, \Delta\theta$  六个未知数,系数  $\alpha, \beta$  可以通过照射光强控制测量回路得到,解方程组可以得到样品的折射率  $n$  和样品的倾角起伏  $\Delta\theta$ 。

### 3 实验装置和时序同步

图 3 是实现这种方法的试验装置。图 3(a)是整体架构图,系统中除了大多数 SNOM 所具有的探针-样品间距控制回路外,还有一个照射光强控制回路。

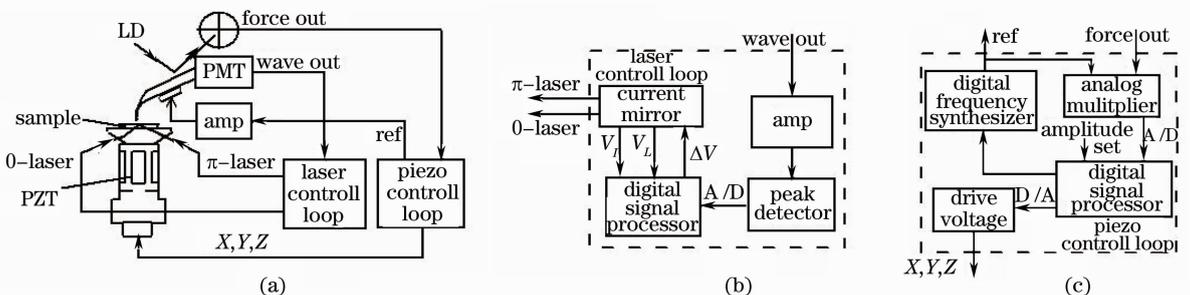


图 3 照明光可控收集式 SNOM 框架图。(a)整体系统;(b)探针-样品间距控制反馈回路;(c)光强反馈回路

Fig. 3 Block diagram of collection-mode SNOM with controllable illumination. (a) complete system;

(b) sample-tip distance regulation loop; (c) controllable illumination loop

进行探针-样品间距的控制许多文章里已经讲述<sup>[16~19]</sup>。在仪器中使用光学方法检测控制探针的振幅运动,如图 3(c)所示。数字频率合成器产生一个参考信号,激励固定有光纤的压电陶瓷(PZT)振荡在其共振频率附近。数字频率合成器由数字信号处理器(DSP)控制,这样可以精确获得探针振荡周期,使得近场光强峰值采样在一个完整的振荡周期内完成。使用一束激光照射到光纤探针的歪曲部位,反射光线进入四象限检测器(FQD),转化为电信号。从四象限检测器出来反应探针运动的信号 force out 与数字频率合成器产生的参考信号在送入一个模拟乘法器进行幅值解调,得到探针振幅经过 A/D 转换送入 DSP 中。探针-样品间距控制器由 DSP 来实现,采集到的探针真实振幅与设定的振幅的误差,经 PI 运算得到输出值,通过 D/A 接口,控制 Z 方向的压电陶瓷运动。

光强控制和测量子系统如图 3(b)所示。光纤探针收集到样品表面的近场光学信号,送入光电倍增管(PMT)中。经过转换的电信号 wave out 被放大,由峰值检测器检测到,经过 A/D 转换送入 DSP 中处理。

DSP 控制探针振荡模块,峰值采样模块,照射光强变化模块协同工作,逻辑时序如图 4 所示。

DSP 发送信号给数字频率合成器驱使探针振荡在第一周期中,两束对称光的光强相同,光纤探针

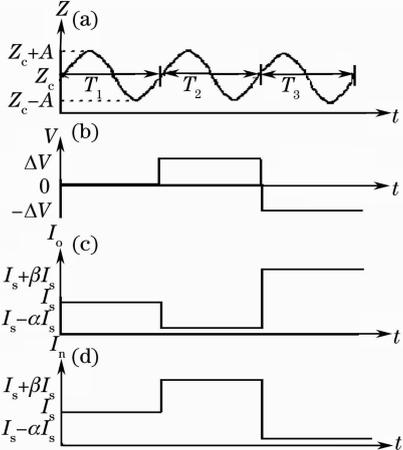


图 4 探针位置与控制电压、照明光强波形图。(a)探针位置;(b)控制电压;(c)0 向照射光束强度;(d)π 向照射光束强度

Fig. 4 Wave forms of control voltage, illumination intensity and the position of the tip. (a) position of the tip; (b) control voltage; (c) illumination intensity of 0 azimuth light beam; (d) illumination intensity of π azimuth light beam

采集到近场光强的一组最大最小值。探针从第一个振荡周期到第二个振荡周期切换过程中,DSP 使得两束对称照明光迅速变化,0 向光束减少  $\alpha I_c$ ,  $\pi$  向光束增加  $\beta I_c$ , 获取第二个振荡周期的最大和最小值。同样在第二个振荡周期到第三个振荡周期切换期间,0 向光束增加  $\beta I_c$ ,  $\pi$  向光束减少  $\alpha I_c$ , 获取第三组近场最大和最小值。

照射光强控制和测量采用了带有有源电流镜的差动电路<sup>[20]</sup>。图 5 显示的是  $T_2$  周期,两束电流分别为  $I_0$  和  $I_\pi$  时,照明光强  $P$  和控制电流  $I$  的关系。

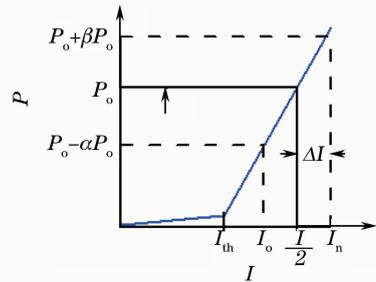


图 5 激光功率与电流曲线  
Fig. 5 Laser power-current curves

### 4 试验结果

图 6 是对长条光栅进行扫描的图像,图 6(a), (b)的扫描范围是  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ,图 6(c), (d)的扫描范围是  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。因为装置使用原子力显微镜使得探针-样品保持等间距进行扫描,所以也会形成一幅原子力形貌图像,图 6(a), (c)就是原子力形成的图像。图 6(b), (d)是使用带有光强控制电路,测得样品的倾角起伏  $\Delta\theta$  后形成的形貌图像。成像原理是,在同一行扫描过程中,从一个点  $(X, Y)$  扫描到另一个点  $(X', Y)$ , 两点间水平距离为  $X-X'$ , 倾角为  $\Delta\theta (\Delta\theta \neq \pi/2)$ , 则两点间的高度差近似为  $(X-X') \tan(\Delta\theta)$ 。对比这两种使用不同原理所得到的样品形貌图像可以看到,对于同一样品的扫描这两种方法形成的形貌图形是一致的,说明使用带有光强控制电路的方法可以获得样品倾斜角是可靠的。从图 6(c), (d)还可以看出使用样品的倾角起伏形成的形貌图,分辨率优于  $400 \text{ nm}$ 。

图 7 是扫描红细胞膜形成的折射率的图像。图 7(a)是样品  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  的扫描图像。图 7(b)是图 7(a)剖面图,从中可以观察到细胞膜的折射率在 1.4 左右,这与已知的结果是相符的。

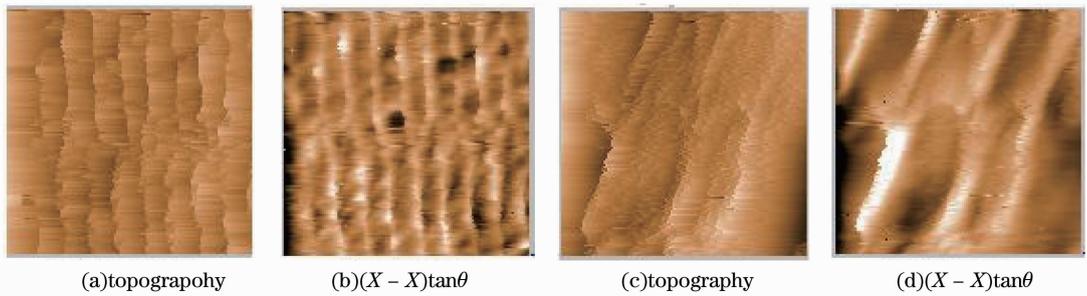


图 6 光栅样品使用原子力显微镜与使用倾角形成的形貌图像对比。(a)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  原子显微镜力图像；(b)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  倾角图像；(c)  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$  原子力显微镜图像；(d)  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$  倾角图像

Fig. 6 Comparison of the topographical images of a grating gained with AFM and the angle of inclination. (a)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  was measured with AFM; (b)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  using angle of inclination; (c)  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$  was measured with AFM; (d)  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$  using angle of inclination

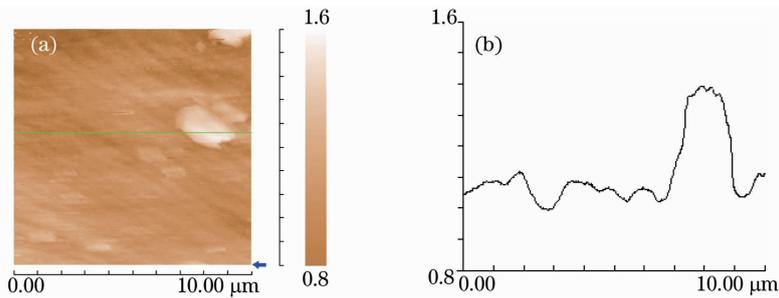


图 7 红细胞膜折射率。(a) 扫描范围  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ；(b) 对应(a)中剖面的折射率

Fig. 7 Refractive index of erythrocytes membrane. (a) scanning range is  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ; (b) refractive index profile at the position indicated in (a)

## 5 结 论

提出一种采用收集模式 SNOM 获取样品的倾角和折射率的方法,这种方法具有以下几个特点:1) 使用了对称照明,所以使样品倾角与照射光束入射角同时形成了和与差的关系。2) 探针工作在等振幅模式,在振荡的顶点收集到近场的极值。3) 特别增加了一个照明光控制回路,调整照射光强度,在样品表面的近场分布也随之发生改变。4) 采用了数字信号处理器,它不但有很强的解方程组运算能力,而且使得各个模块的时序同步,协调工作。可以预见制造出更好的探针,可以进一步提高这种方法的成像的质量。

## 参 考 文 献

- 1 D. W. Pohl, D. Denk, M Lanz. Optical stethoscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(7): 651~653
- 2 A. Lewis, M Isaacson, A. Harootunian *et al.*. Development of a  $500\ \text{\AA}$  spatial resolution light microscope [J]. *Ultramicroscopy*, 1984, **13**(3): 227~231
- 3 E. Betzig, P. L. Finn, S. J. Weiner. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(20): 2484~2486

- 4 Xu Tiejun, Xu Jiying, Wang Jia *et al.*. Numerical analysis of interaction and perturbation between evanescent field and probe in optical field detection by SNOM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 465~469
- 徐铁军, 许吉英, 王 佳等. 扫描近场光学显微镜探针与光场相互作用的分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 465~469
- 5 J. Lamela, J. M. Sanz-garcía, E. Cantelar *et al.*. SNOW study of ferroelectric domains in doped  $\text{LiNbO}_3$  crystals [J]. *Physics Procedia*, 2009, **2**(2): 479~492
- 6 S. Diziain, J. M. Merolla, M. Spajer *et al.*. Determination of local refractive index variations in thin films by heterodyne interferometric scanning near-field optical microscope [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, **80**(7): 093706
- 7 K. D. Weston, S. K. J. Buratto. A reflection near-field scanning optical microscope technique for subwavelength resolution imaging of thin organic films [J]. *Phys. Chem. B*, 1997, **101**(29): 5684~5691
- 8 M. Yamaguchi, Y. Sasaki, H. Sasaki *et al.*. Imaging of digital versatile rewritable disc using the reflection-mode scattering-type scanning near-field optical microscope [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(38): 1578~1580
- 9 I. P. Radko, V. S. Volkov, S. I. Bozhevolnyi. Near-field mapping of surface refractive-index distributions [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(9): 440~444
- 10 B. Hecht, H. Heinzelmann, D. W. Pohl. Forbidden light scanning near-field optical microscopy [J]. *Ultramicroscopy*, 1995, **57**: 228~234
- 11 R. Reddick, R. Warmack, T. Ferrell. New form of scanning optical microscopy [J]. *Phys. Rev. B*, 1989, **39**(1): 767~772
- 12 A. Mnoni, F. Quercioli, B. Tiribilli *et al.*. Measuring

- topography and refractive index of channel waveguides with a hybrid AFM-SNOM[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 388~394
- 13 D. P. Tsai, J. Kovacs, M. Moskovits. Applications of apertured photon scanning tunneling microscopy (APSTM) [J]. *Ultramicroscopy*, 1995, **57**: 130~140
- 14 J. Zhang, Y. L. Li, G. S. Jian *et al.*. Advantages of photon scanning tunneling microscope combined with atomic force microscope [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(05): 0313~315
- 15 H. Choo, E. Chudgar, N. Jackson *et al.*. Photon scanning tunneling microscopy of optical waveguide structures [J]. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1994, **332**: 543~548
- 16 Y. Martin, C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe. Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(10): 4723~4729
- 17 T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne. Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(2): 668~673
- 18 W. A. Atia, C. C. Davis. A phase-locked shear-force microscope for distance regulation in near-field optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(26): 405~407
- 19 S. Yasuhiro, N. Kobayashi, M. Kawakami. Elimination of instabilities in phase shift curves in phase-modulation atomic force microscopy in constant-amplitude mode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 194104
- 20 R. Gregorian. Introduction to CMOS OP-AMPS and Comparators [M]. A Wiley-Interscience Publication, New York: John Wiley & Sons Inc, 1999. 77~84