

一种基于偏振光干涉的原子力显微镜测头的研究

陈 成^{1,2} 高思田² 卢荣胜¹ 李 伟²

(¹ 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)
(² 中国计量科学研究院纳米新材料计量研究所, 北京 100013)

摘要 为了提高测头的抗干扰能力,达到较高的分辨率,设计了一种基于偏振光干涉原理的原子力显微镜测头。该测头采用偏振光干涉式方法探测针尖的位移,可提高测头的灵敏度。分析了测头设计中焦点聚焦在探针悬臂梁上的可行性,并通过实验进行了验证。实验表明,Wollaston 棱镜组可以有效地改变光程差。设计的共光路形式的 Nomarski 干涉仪光路,能够有效减小噪音的影响,并保证装置结构紧凑,适于实用。通过实验验证,此测头系统能够达到 1 nm 的纵向分辨精度,为原子力显微镜测量技术提供有力支持。

关键词 测量;激光光学;Wollaston 棱镜;Nomarski 干涉仪;轴向分辨率;偏振光干涉

中图分类号 TB921 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.041203

Gauging Head of Atomic Force Microscope Based on Interference of Polarized Light

Chen Cheng^{1,2} Gao Sitian² Lu Rongsheng¹ Li Wei²

(¹ School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

² Division of Nanometrology and Metrology in Advanced Material, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract A gauging head of atomic force microscopy (AFM) based on interference of polarized light is designed for high resolution and capacity of resisting disturbance. This AFM head detects the tip displacement based on interference, in order to increase the sensitivity. In the process of design, the feasibility of focal spot on the cantilever is analyzed, and verified with experiment. The experimental result shows that two Wollaston prisms can effectively change the optical-path difference between reference beam and measurement beam, and reduce the size of AFM head. The design of common-path Nomarski interferometer can reduce noise, keep the structure of head compact and make this system useful. The axial resolution of the system can reach up to 1 nm. It can support the research of AFM technology.

Key words measurement; laser optics; Wollaston prism; Nomarski interferometer; axial resolution; interference of polarized light

OCIS codes 120.3180; 120.3930; 180.3170

1 引言

随着纳米技术的快速发展和广泛应用,纳米结构的设计制造与观测分析技术已经成为纳米技术实现工业化的两个关键技术。为了满足设计、观察、实验纳米材料及器件以及掌握其性质的要求,需要更为精确的纳米测量技术作为支持。原子力显微镜(AFM)是扫描探针显微镜(SPM)技术^[1]的一种,是纳米测量中最重要的技术之一,并有多种分类和方法。干涉式就是众多 AFM 测头结构的一种^[2],其精确度可以达到光波波长的几分之一甚至几十分之一,拥有高精度的特点。为了满足对原子力显微镜探头的高精度、抗干扰需求,本文设计了一种基于偏振光干涉的原子力显微镜测头。首先提出测头的光路模型,然后利用刀口法测量光斑大小验证其可行性,最后通过实验验证给出了测头的性能评价。

收稿日期: 2012-11-21; 收到修改稿日期: 2013-01-10; 网络出版日期: 2013-03-11

作者简介: 陈 成(1986—),男,硕士研究生,主要从事纳米计量方面的研究。E-mail: chencheng@nim.ac.cn

导师简介: 高思田(1962—),男,研究员,主要从事纳米计量方面的研究。E-mail: gaost@nim.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

2 原子力显微镜测头光路模型

目前 AFM 多采用光束偏转法作为悬臂位移的检测方式^[3],干涉式结构的并不多,并且可以分为接触式、非接触式^[4]及轻敲式^[5]测量工作模式。本文所设计的就是一种基于偏振光干涉来测量针尖悬臂偏移的测头,属于接触式测量。采用改进型共光路形式的 Nomarski 干涉仪^[6]来探测悬臂的位移变化。该干涉法具有很高的灵敏度,很适合于微悬臂位置检测。参考与测量光共光路的设计可以有效减少空气和温度漂移引起的扰动。悬臂在样品作用力变化时的位移造成反射光与参考光的光程差发生变化,通过测量干涉信号的变化来测量针尖的位移^[7]。

测头光路如图 1 所示,由偏振分光棱镜(PBS)、分光棱镜(NPBS)、Wollaston 棱镜、Keoster 棱镜、1/4 波片、采集透镜、探针和光电探测器组成。

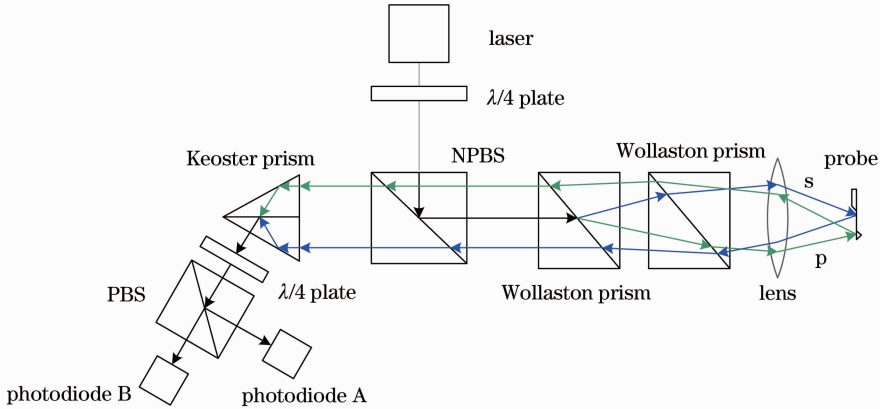


图 1 ATM 测头光路示意图

Fig. 1 Schematic of the optical path of ATM gauging bead

激光器发出的光为 45° 线偏振光,经过 1/4 波片成为圆偏振光,由分光棱镜改变光束方向入射到 Wollaston 棱镜^[8~10]。Wollaston 棱镜将入射的圆偏振光分为 p 光和 s 光两束线偏振光,呈 15° 夹角出射进入第二个 Wollaston 棱镜。两个 Wollaston 棱镜参数并不相同,使得经过 Wollaston 棱镜组出射的 p 光和 s 光相对夹角减小至 2° ,这样可以使光束入射到透镜时分开,以便两束返回光不会重合。光束经过透镜聚焦到悬臂梁的光滑平面,并各自反射回原光路元件,再次经过 Wollaston 棱镜的作用成为平行光,回到分光棱镜。损失部分光强后进入 Keoster 棱镜,p 光和 s 光经过 Keoster 棱镜中间镀膜层分别被透射和折射,重合于一条光路出射,设此时合成光可以用琼斯矢量^[11]表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \exp(i\phi) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 E_s 和 E_p 分别为 s 光和 p 光, a_s 和 a_p 分别为 s 光和 p 光的振幅, ϕ 为两光束的相位差。可以化简令 $a_s = a_p = a$,此时光强 $I_p = a_p^2 = I_s = a_s^2 = a^2$,得到

$$\mathbf{E} = a \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(i\phi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

通过 1/4 波片的作用后,形成的光束 E_{ol} 是两束圆偏振光相叠加:

$$E_{ol} = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \exp(i\frac{\pi}{2}) \\ \exp(i\frac{\pi}{2}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(i\phi) \end{bmatrix} = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + \exp[i(\frac{\pi}{2} + \phi)] \\ \exp(i\frac{\pi}{2}) + \exp(i\phi) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

再由偏振分光棱镜分解成两束偏振方向相互垂直的线偏振光 E_A 和 E_B :

$$E_A = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \exp[i(\frac{\pi}{2} + \phi)] \\ \exp(i\frac{\pi}{2}) + \exp(i\phi) \end{bmatrix} = \frac{a}{\sqrt{2}} \{1 + \exp[i(\frac{\pi}{2} + \phi)]\}, \quad (4)$$

$$E_B = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)\right] \\ \exp\left(i\frac{\pi}{2}\right) + \exp(i\phi) \end{pmatrix} = \frac{a}{\sqrt{2}} \left[\exp\left(i\frac{\pi}{2}\right) + \exp(i\phi) \right]. \quad (5)$$

此时的线偏振光是由 p 光和 s 光两束光经过变换形成的,所以会产生干涉信号并分别入射到光电探测器 A 和 B。光电探测器 A 和 B 测量到的光强

$$I_A = |E_A|^2 = a^2(1 - \sin \phi) = [I_s + I_p + 2\sqrt{I_p I_s} \cos(\delta + \varphi)]/2, \quad (6)$$

$$I_B = |E_B|^2 = a^2(1 + \sin \phi) = [I_s + I_p - 2\sqrt{I_p I_s} \cos(\delta + \varphi)]/2, \quad (7)$$

式中 $I_s + I_p$ 为信号的直流偏量, $2\sqrt{I_s I_p}$ 为信号的交流振幅。此时两光束的相位差用 $\varphi + \delta$ 表示, φ 为悬臂位移产生的相位差, $\varphi = 2\pi\Delta L/\lambda$, ΔL 为光程差, δ 为系统固有相位差, 且 $\phi = \varphi + \delta - \frac{\pi}{2}$ 。

调整光路,使参考光和测量光斑分别投射在悬臂梁的末端与顶端。检测样品时,悬臂梁受力发生弯曲,末端位置的参考光几乎不变,而顶端测量光斑位置产生变化,就会引起光程差 ΔL 的变化,其值与探针的位移量呈一定关系,通过光强变化可得知探针的位移。假设针尖在斥力作用下向上位移 Δz ,光线方向与悬臂反射面法线方向夹角 θ ,针尖的位移 Δz 引起的光程差 $\Delta L = 2\Delta z \cos \theta$,所以相位差 $\varphi = 4\pi\Delta z \cos \theta/\lambda$ 。本课题光源采用 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的氦氖激光器,预期达到轴向 1 nm 分辨率,则 $\Delta z = 1 \text{ nm}$,按照线性信号计算,信号峰峰值之差的绝对值与可能噪音值之比至少为 $316:1$ 。

用电光接收器接收两路光信号,并进行后续电路处理,得到和差信号后,用差信号除以和信号,减小光强变化对测量的影响,结果为

$$(I_A - I_B)/(I_A + I_B) = [2\sqrt{I_s I_p}/(I_s + I_p)] \cos(\delta + \varphi). \quad (8)$$

实际检测时,测量光束入射角 $\theta \approx 15^\circ$,悬臂梁长 $450 \mu\text{m}$,当针尖位移在 $\pm 20 \text{ nm}$ 范围内变化时, θ 角将会产生约为 0.00509° 的小角度变化,可以忽略。光程差此时可以近似为线性变化,如图 2 所示,红色曲线是信号在 $\pm 158 \text{ nm}$ 光程差范围内的变化情况,蓝色信号是信号线性化后在 $\pm 158 \text{ nm}$ 光程差范围内的变化情况,取其中 $\pm 20 \text{ nm}$ 范围可得图 3 所示。

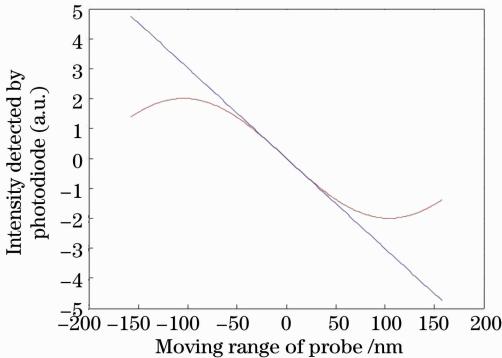


图 2 光程差在 $\pm 158 \text{ nm}$ 范围内时得到的光强

Fig. 2 Intensity detected when optical path difference is in the range of $\pm 158 \text{ nm}$

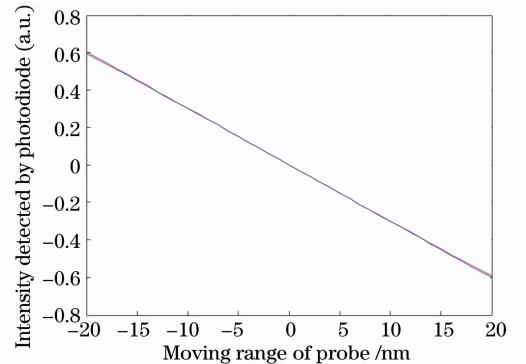


图 3 在光程差线性变化范围得到的光强

Fig. 3 Intensity detected when optical path difference is in the linear range

由此可得输出信号

$$(I_A - I_B)/(I_A + I_B) \approx [2\sqrt{I_s I_p}/(I_s + I_p)] \varphi, \quad (9)$$

即正比于光程差,其中和信号基本稳定,只需关心差信号的数据值。

3 刀口法验证光路可行性

光路模型中 p 光和 s 光通过透镜入射到探针的悬臂梁后反射,而 AFM 用探针悬臂梁尺寸较小,所以透镜焦平面上的光斑是否能完全打在悬臂梁上会直接影响实验结果,需要对光斑进行测量,确定可以完全投射在探针的反射面。

本文的探针采用 Nanosensors 的 PPP-CONTR(Point Probe Plus)型 AFM 探针,其参数如表 1 所示。

表 1 PPP-CONTR AFM 探针的相关参数

Table 1 Technical data of PPP-CONTR AFM probe

Technical parameter	Nominal value	Specified range
Thickness / μm	2	1.0~3.0
Mean width / μm	50	42.5~57.5
Length / μm	450	440~460
Force constant /(N/m)	0.2	0.02~0.77
Resonant frequency /kHz	13	6~21

测量光斑的方法有套孔法、刀口法、CCD 法等,其中刀口法^[12]测量装置简单,操作方便,测量精度高,故采用该方法。使用光功率计测量完整光斑信号功率后,利用刀片切割透镜出射光束,致使光斑缺损。此时光功率计测得数值为

$$P_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right) dx dy. \quad (10)$$

以光斑中心为原点,水平移动刀片切割光斑,当移动到 x_1 位置时,功率应为

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x_1}^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right) dx dy. \quad (11)$$

由此可以计算出 x_1 位置功率与初始功率的比值,记为

$$R_p(x_1) = \frac{P(x_1)}{P_0}. \quad (12)$$

继续移动刀片,功率随光斑减小,当移动到功率为 $1 - P(x_1)$ 时,记录此时位置为 x_2 。此时, x_1 与 x_2 关于光斑原点对称,取差的绝对值,得到两点间的距离为 $x = |x_2 - x_1|$ 。对应的光斑半径可以表示为 $r = \frac{x}{2}A$,其中 A 表示取不同的功率比值所对应的系数。当取功率比值为 90% 时, $A = 1.56$ 。

实验结果如图 4 所示,红色和蓝色曲线分别是刀片来回切割光斑得到的光功率曲线,且基本重合。功率为初始功率 P_0 的 90% 时, $x_1 \approx -13 \mu\text{m}$,而为 P_0 的 10% 时, $x_2 \approx -1 \mu\text{m}$,可得 $r = 18.76 \mu\text{m}$ 。可证明光斑可以完全入射在探针上。

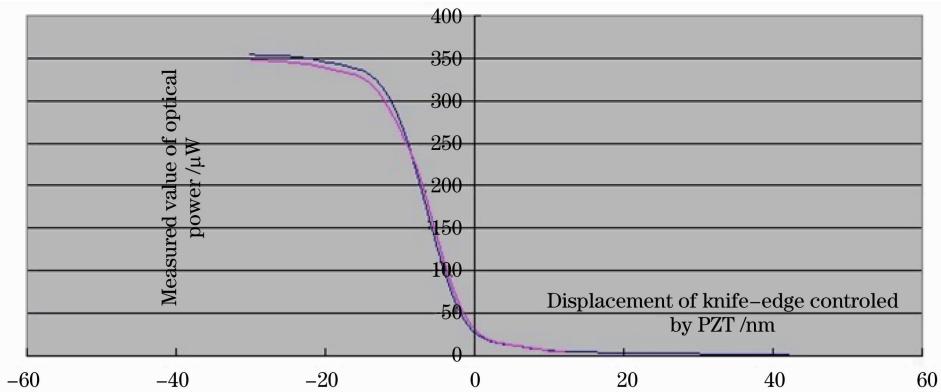


图 4 光斑功率数据

Fig. 4 Data of light-spot power

维持刀片与透镜的间距不变,平移固定压电陶瓷的位移台,使刀片依次切割两个光斑。当切割第一个光斑的时候,光功率计测量光强至 0 的时候记录位移台的位置 d_1 ,继续移动至第二个光斑处,并用功率计探测到第二个光斑有减小时记录该位置 d_2 。取两位置的差值 $d = |d_1 - d_2|$,则两个光斑中心之间的距离即 $d + 2r$ 。

测量 5 次得到数据如表 2 所示,取平均值,光斑中心间距为 $400.52 \mu\text{m}$ 。由此可见,两个光斑可以完全入射到悬臂梁的反射面上。

表 2 测量光斑中心间距的数据

Table 2 Data of separation distance between the centers of light spots

Item	Value				
Measurement times	1	2	3	4	5
Measured distance / μm	401.6	399.8	400.5	401.0	399.7

4 实验验证

依据光路模型原理搭建了如图 5 所示的显微镜测头。安装完毕后调节第一个 Wollaston 棱镜来改变系统固有相位差,可将灵敏度调节到最高。

实验中采用频率为 1 Hz,幅值是 1 V,一个周期 10 个台阶的阶梯波为压电陶瓷的激励信号,相邻台阶电压差的绝对值是 200 mV,如图 6 中绿色信号所示。实验前对 PI 公司的 P-143.03 压电陶瓷位移进行测量,结果显示,1 V 电压致使压电陶瓷 z 向位移约为 5 nm,可得阶梯波形每个台阶使压电陶瓷位移 1 nm。

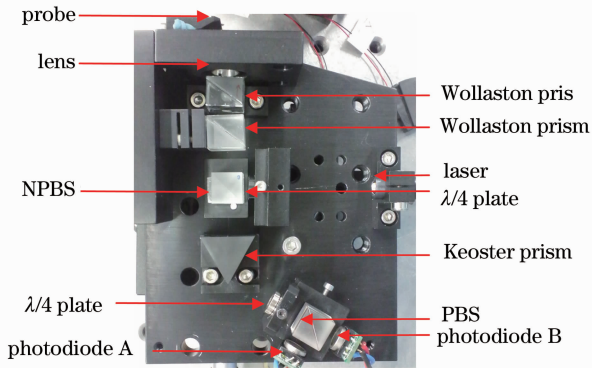


图 5 偏振光干涉式 AFM 测头的实验装置

Fig. 5 Experimental device of AFM head based on interference of polarized light

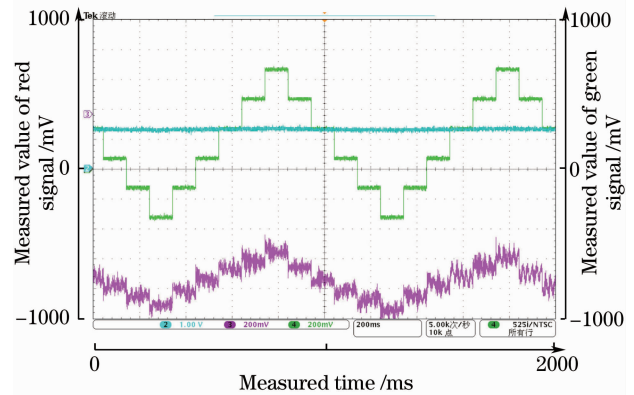


图 6 未经滤波处理的 1 nm 位移测量结果

Fig. 6 Measured data of 1 nm displacement without filtering

由于采集数据点较多,无法一一列举,故直接由测量图显示实验结果。图中绿色信号是压电陶瓷的激励电压,蓝色信号为前置信号,差信号为红色信号,可以看出,干涉信号随压电陶瓷的位移改变而产生阶梯型的光强变化。1 nm 台阶信号强度约为 160 mV,噪声约为 80 mV,如图 7 中所示,红色信号为系统噪声。其中存在高频噪音,可能是外部环境造成的,在电路中增加截止频率为 50 Hz 的低通滤波器电路,再次进行测量,结果如图 8 所示,可以清晰地看出台阶波形。实验数据可证明该测头可以达到轴向 1 nm 的分辨率。

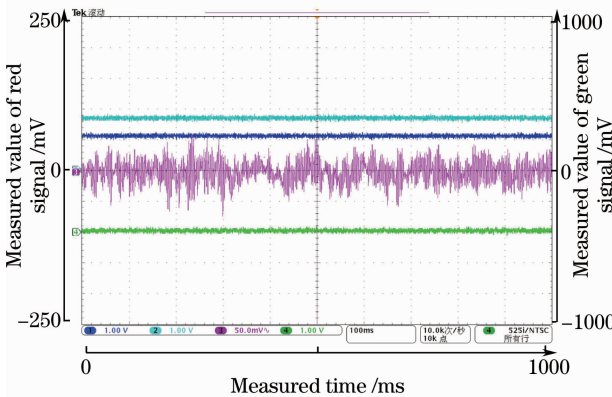


图 7 测量时系统噪声

Fig. 7 Noise of measurement system

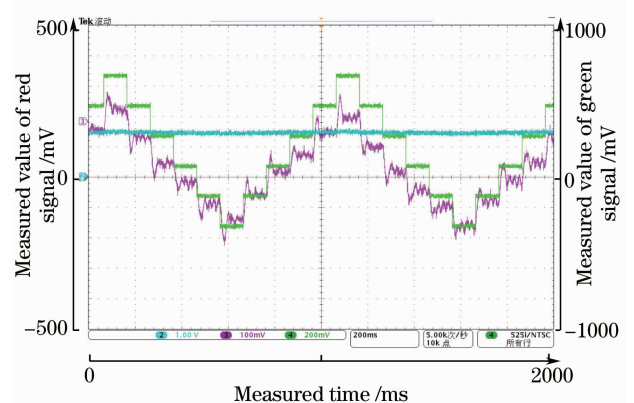


图 8 经滤波处理后的 1 nm 位移测量结果

Fig. 8 Measured data of 1 nm displacement with filtering

5 结 论

通过理论和实验对所设计的偏振光干涉型原子力显微镜测头进行了分析和验证。使用 Wollaston 棱镜可以有效分离偏振光,改变系统固有光程差,减小系统尺寸结构,但调节时系统反应敏感,会与理想的最灵敏位置存在偏差。另外由于外部环境的干扰和可能存在的一些结构不稳定性,测量会存在一些低频噪音。但上述问题并未影响测头分辨率,信噪比为 2:1,轴向分辨率可以达到 1 nm。如果进一步对测头进行机械降噪并改善测量环境,系统可以获得更高的轴向分辨率。

参 考 文 献

- 1 H. U. Danzebrink, L. Koenders, G. Wilkening *et al.*. Advances in scanning force microscopy for dimensional metrology [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2006, **55**(2): 841~878
- 2 M. J. Cunningham, S. T. Cheng, W. W. Clegg. A differential interferometer for scanning force microscopy[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1994, **5**(11): 1350~1354
- 3 Lu Mingzhen, Gao Sitian, Du Hua *et al.*. Model of a metrological AFM head and performance analysis[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(1): 33~37
卢明臻, 高思田, 杜 华 等. 计量型原子力测头模型研究及性能分析[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(1): 33~37
- 4 Bian Wenbin, Gao Sitian, Lu Rongsheng *et al.*. Analysis of optical characters of confocal Fabry-Perot interference microscopy probe[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 051203
边文宾, 高思田, 卢荣胜 等. 共焦法布里-珀罗干涉显微镜测头光学特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 051203
- 5 Leng Wei, Yang Yongying, Yang Liming *et al.*. A novel tapping mode atomic force microscopy using point-diffraction-interference technique[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3): 65~69
冷 炜, 杨甬英, 杨李茗 等. 一种新颖的点衍射干涉轻敲模式原子力显微镜[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3): 65~69
- 6 Yin Chunyong. Modern Interferometric Measuring Technique[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. 297~300
殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 1999. 297~300
- 7 A. J. Putman, G. De Groot, Jan Greve *et al.*. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(1): 6~11
- 8 Wang Wei, Wu Fuquan, Su Fufang. Symmetric polarization beam prism based on three-element Wollaston prism [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 182~186
王 伟, 吴福全, 苏富芳. 基于双 Wollaston 棱镜的对称分束角偏光分束镜[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 182~186
- 9 Zhu Huafeng, Nan Yujie, Yun Maojin *et al.*. Precise analysis of the intensity splitting ratio of double Wollaston prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0623002
朱化凤, 南玉杰, 云茂金 等. 双沃拉斯顿棱镜光强分束比精确分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0623002
- 10 Deng Hongyan, Wu Fuquan, Deng Mengmeng *et al.*. Splitting intensity ratio of three-element Wollaston prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1331~1334
邓红艳, 吴福全, 邓萌萌 等. 双 Wollaston 棱镜光强分束比研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1331~1334
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 440~454
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 440~454
- 12 Yang Xiaodong, Shao Jianxin, Liao Shenghong *et al.*. Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(8): 829~832
杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(8): 829~832