

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0707-04

用于减少漂移的纳米定位干涉仪集成系统

吴 健¹, 林德教¹, 殷纯永¹, 郭继华²

(清华大学¹精密仪器与机械学系 精密测量技术与仪器国家重点实验室²应用物理系, 北京 100084)

提要 基于表面等离子体共振 (SPR) 的纳米定位装置可以实现纳米级的定位分辨率和重复性。通过设计特殊四面体棱镜, 使四面体棱镜第一个反射面的入射角等于 SPR 的共振角, 在该反射面上镀上金属膜, 后面放置光纤探头构成 SPR 定位指零装置, 实现了纳米定位装置和干涉仪系统的集成。干涉仪测量前利用 SPR 纳米定位系统确定一个零位, 当发生漂移时回到定位零点进行读数校正, 就可以减少干涉仪的漂移误差。建立了集成纳米定位装置的干涉仪系统。实验表明, 干涉仪的测量不确定度从 70 nm 减小到 10 nm, 提高了系统的测量精度和稳定性。

关键词 纳米定位 表面等离子体共振 特殊四面体棱镜

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

Interferometer and Nanometer Positioning Integration System Used for Drift Reduction

WU Jian¹, LIN De-jiao¹, YIN Chun-yong¹, GUO Ji-hua²

(¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instrumentation, Department of Precision Instruments, ²Department of Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The positioning system based on surface plasmon resonance (SPR) can achieve nanometer resolution and repeatability. A special retroreflector is designed that incidence angle of its first reflection surface is equal to resonance angle of SPR. Then the surface is coated with gold film and a fibre probe is put behind the film to build up a SPR positioning system. The special retroreflector is component of SPR as well as the measurement mirror of interferometer to implement their integration. At the beginning of a measurement, a zero position is determined by SPR positioning system. If there is drift during measurement, reset interferometer data to diminish drift as soon as the special retroreflector reaches the zero position. The interferometer at nanometer positioning integration system is set up. Experiments show that uncertainty of interferometer is reduced from 70 nm to 10 nm. The measurement precision and stability of interferometer is increased.

Key words surface plasmon resonance, nanometer positioning, special retroreflector

1 引 言

纳米测量的发展要求干涉仪系统对环境具有较强的适应能力, 能够长时间连续工作, 具有高稳定性和低漂移。但在普通环境中, 温度变化会使干涉仪系统产生较大的漂移。比如 HP10706B 的稳定性指标为 40 nm/°C, HP10706A 甚至达到 500 nm/°C^[1]。减少温度漂移通常有两种方法: 精密恒温 and 温度补偿。精密恒温经济代价大, 目前虽然可以优于

0.01°C, 但距离纳米测量要求仍相差甚远。温度补偿由于温度模型的偏差和不可能得到完全一致的温度场分布, 因此存在着难以克服的残差。

由于温度漂移有如下特点: 是相对缓慢的漂移, 漂移是累加的。因此, 回到“原点”(回零)重新标定干涉仪是检查漂移量和修正漂移的可靠手段。所以需要高稳定、高灵敏的亚纳米零位指示器件。现有技术中, 隧道扫描显微镜、原子力显微镜可以达到亚纳米分辨率, 但由于是接触测量, 对环境要求苛

收稿日期 2001-05-15; 收到修改稿日期 2001-07-03

基金项目 国家自然科学基金 (No. 59875051) 和清华大学基础研究基金 (No. JC1999047) 联合资助项目。

作者简介 吴健 (1976—) 男, 博士生, 主要从事表面等离子体共振的传感应用研究。E-mail: spwsensor@sina.com

刻。光子扫描隧道显微镜是非接触测量且可以达到纳米级纵向分辨率。但是在超精加工环境下使用时,探针容易损坏,这是由于探针太细而且距离表面太近。为此需要一种直径相对较大、距离表面较远的高灵敏探头。

表面等离子体共振是指在金属与介质分界面上发生的表面电子气的共振波动现象。在一定条件下,当入射光和表面等离子体波的波矢匹配时,就会发生从入射光到表面等离子体 (SPW) 的能量转移。能量耦合的程度与入射角、各层材料的光学常数及厚度有关。目前,表面等离子体共振 (SPR) 对于角度、折射率等物理量变化的敏感特性已经广泛应用到角度^[2]、位移^[3]、生物和化学传感器的设计中,但对于厚度(间隙)的传感应用还十分少见。研究表明^[4],在三层 Krestschmann 结构的 SPR 器件中,金属层的厚度对于传感器的分辨率、工作范围、光强

相位曲线等都有很大影响。在多层结构 SPR 器件中,中间的气体或液体层的间隙变化同样会导致反射和透射光强的剧烈变化,可以利用这个性质来构建新颖的位置传感器,比如利用四层 SPR 结构中空气层间隙的变化建立纳米级的定位指零装置^[5],可以实现 0.1 nm/nV 的分辨率和 4 nm 的重复性标准偏差。把这个装置集成到干涉仪上,在干涉仪测量过程中,如果发生漂移,把干涉仪回到定位零点进行读数校正,可以减少漂移,提高干涉仪的稳定性和定位精度。

2 理论分析

如图 1,在四层介质棱镜-金属-空气-探头系统中,由 p 偏振光的 Fresnel 公式可以推导出如下公式^[5,6]

$$t_{1234} = \frac{t_{12}t_{23}t_{34}\exp(ik_{z2}d_2)\exp(ik_{z3}d_3)}{[(1+r_{23}r_{34}\exp(2ik_{z3}d_3))(1+r_{12}r_{234}\exp(ik_{z2}d_2))]} \quad (1)$$

其中 t_{1234} 、 t_{12} 、 t_{23} 、 t_{34} 是指下标所指示的层之间的透射光强, r_{234} 、 r_{23} 、 r_{34} 是指下标所指示的层之间的反射光强。

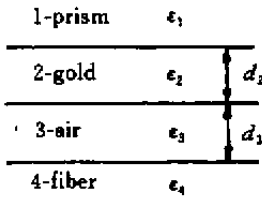


图 1 表面等离子体波激发装置层结构

Fig. 1 Multi-layer structure of surface plasma resonance excitation device

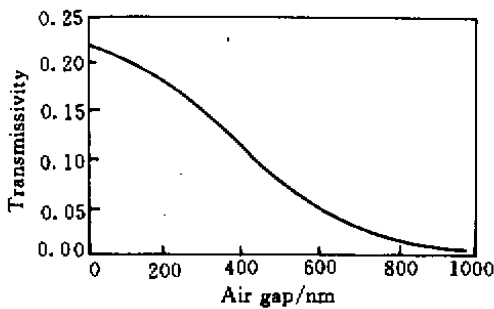


图 2 p 偏振光的 4 层 SPR 系统的空气层间隙-透射光强关系曲线

Fig. 2 p -polarization light transmissivity curve of 4 layers SPR configuration

为便于调节光纤探头和增大光纤探头的数值孔径,采用了半球形端面的光纤探头。根据公式(1)计算出整个 SPR 系统的透射率曲线(如图 2 所示)。透射光强和探头的位置是一一对应的,相应的干涉仪测量值为初始化值。在校正干涉仪漂移时,先选定一个透射光强值为判据值,令该光强对应的位置为零位,当干涉仪测量一段时间后,可以移动测量镜,使定位系统接收到的透射光强等于判据值,这时就认为测量镜回到了零位,把干涉仪的测量值设置为初始化值,就可以消除干涉仪的漂移误差。

3 集成器件设计

如图 3,作为干涉仪的测量镜的四面体棱镜 $OABC$ 应该满足两个要求:1)从 ABC 面入射和出射的光应该保持平行,以得到宽度稳定的干涉条纹;2)光在四面体棱镜三个反射面 OBC 、 OAC 、 OAB 上的入射角应该大于全反射角,以减少能量损失。为使 ABC 面上入射光和出射光互相平行,只需满足四面体棱镜的三条边互相垂直

$$OA \perp OB, OA \perp OC, OB \perp OC \quad (2)$$

在四面体棱镜 $OABC$ 上建立如图 3 所示的坐标系,假设光垂直于 ABC 面入射并交 ABC 面于 P_1 点,在 OBC 、 OAC 、 OAB 三个面反射后从 ABC 面上 P_2 点出射。由几何光学可以知道,三个反射面上的入射角 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别满足如下公式

$$\cos \varphi_1 = \left(1 + \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\cos \varphi_2 = \left(\frac{b^2}{a^2} + 1 + \frac{b^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\cos \varphi_3 = \left(\frac{c^2}{a^2} + \frac{c^2}{b^2} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

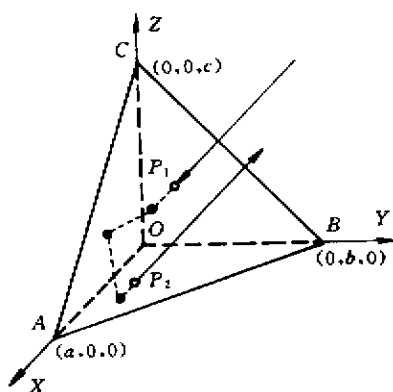


图 3 特殊四面体棱镜的设计(黑点:反射;圈点:透射)

Fig.3 Design of special retroreflector

(blank point : refraction ; black point : reflection)

由于通常玻璃材料的折射率大于 1.5,即全反射角小于 48.2° ;而对于普通的等腰角隅棱镜,由 a

$= b = c$ 可以算得 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 54.7^\circ$ 大于全反射角,所以一般用等腰角隅棱镜作为干涉仪的测量镜和参考镜。但是同时可以看到,等腰角隅棱镜三个反射面上的反射角不等于 SPR 的共振角。为实现干涉仪与 SPR 定位系统的集成,必须设计特殊四面体棱镜,除了满足上面两个条件外,还要满足共振角条件,即 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 中应该有一个角度等于 SPR 的共振角。例如:选择 SPR 各层介质为 K9 玻璃 ($n = 1.5147$)、金膜、空气、光纤 ($n = 1.4$),入射激光波长为 633 nm,则全反射角为 41.3° ,SPR 的共振角为 44° 。为简化设计和加工方便,设 $a \leq b = c$,则有 $\varphi_1 \leq \varphi_2 = \varphi_3$ 为保证 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 都大于全反射角,选择 $\varphi_1 = 44^\circ$ 则有 $b = c = 1.4645a$ 。令 $a = 20$ mm 则 $b = c = 29.3$ mm,该特殊四面体棱镜的尺寸参数就确定了。在与 φ_1 对应的反射面 OBC 上镀 40 nm 的金膜,在后面放置光纤探头;当四面体棱镜运动时,金膜与光纤探头的间隙发生变化,光纤接收到的光强也随之变化,确定的光强对应于确定的间隙,这样就构成了一个 SPR 纳米定位指零装置。该特殊四面体棱镜既是干涉仪的测量镜,又是 SPR 定位系统的一部分,就实现了干涉仪与 SPR 定位系统的集成。

4 实验

纳米定位系统的实验装置如图 4 所示。

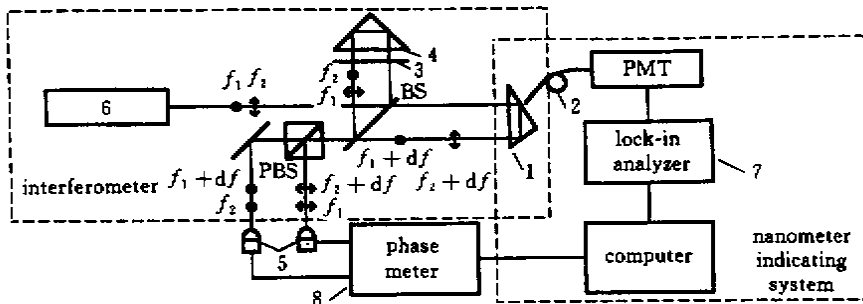


图 4 干涉仪集成实验装置图

1 特殊四面体棱镜 2 光纤探头 3 四分之一波片 4 参考镜 5 探测器;

6 双频激光器(330 kHz) 7 锁相放大器(EG&G5208) 8 相位计(分辨率 0.1°)

Fig.4 Experiment configuration of interferometer integration system

1 : special retroreflector ; 2 : fibre ; 3 : 1/4 wave plate ; 4 : reference retroreflector ; 5 : detector ;

6 : transverse zeeman dual-frequency laser (330 kHz) ; 7 : lock-in analyzer ; 8 : phase meter (0.1°)

由于透射接收方式下光纤探头接收到的透射光强很小,需要经过光电倍增管(PMT)放大后再到锁相放大器进行微弱信号检测。锁相放大器不能处理光频信号,所以光纤接收到的必须是双频光信号,经过 PMT 后变成差频信号后输入锁相放大器处理。

实验中采用了横向塞曼双频激光器,输出频差为 165 kHz 的正交线偏振光,由于 s 偏振光不会激发 SPR,所以透射的 s 偏振光的光强在空气层间隙变化时保持不变,锁相放大器的输出值与透射的 p 偏振光的光强成正比。干涉仪的参考和测量信号由光电

探测器 5 接收后,通过自制的分辨率为 0.1° 的相位计进行相位检测,可以实现 0.1 nm 的位移分辨率。

测量四面体棱镜放置在一个缩小比为 26 倍的微动工作台上,由一个最高电压 150 V ,最大行程 $18 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷 (PZT) 驱动,微动工作台的最大行程是 690 nm 。实验时在压电陶瓷上加电压 $0 \text{ V} \sim 150 \text{ V} \sim 0 \text{ V}$,步距 2.5 V ,重复 13 次。由于重复一次所需要的时间很短,只需 1 min ,在这么短的时间内检测到的干涉仪漂移值很小,无法体现出漂移校正的效果。因此实验时在测量 4 组数据后,延时 1 h ,再重

复剩余的 9 组实验。选取干涉仪的第一组测量值为基准值,在位移-锁相放大器电压曲线上选取合适的判据电压并计算出零位对应的位移值,如图 5(a);其余 12 组干涉仪测量值与基准值的差为误差值,如图 5(c);在其余 12 组干涉仪测量值的位移-电压曲线上,计算出判据电压所对应的位移,它们与零位位移值的差即漂移,把各组的位移测量值减去漂移值得到的校正曲线见图 5(d)。很明显,校正后长时间漂移减小,干涉仪回归确定位置的不确定度从 70 nm 减少到了 10 nm ,提高了干涉仪的测量精度。

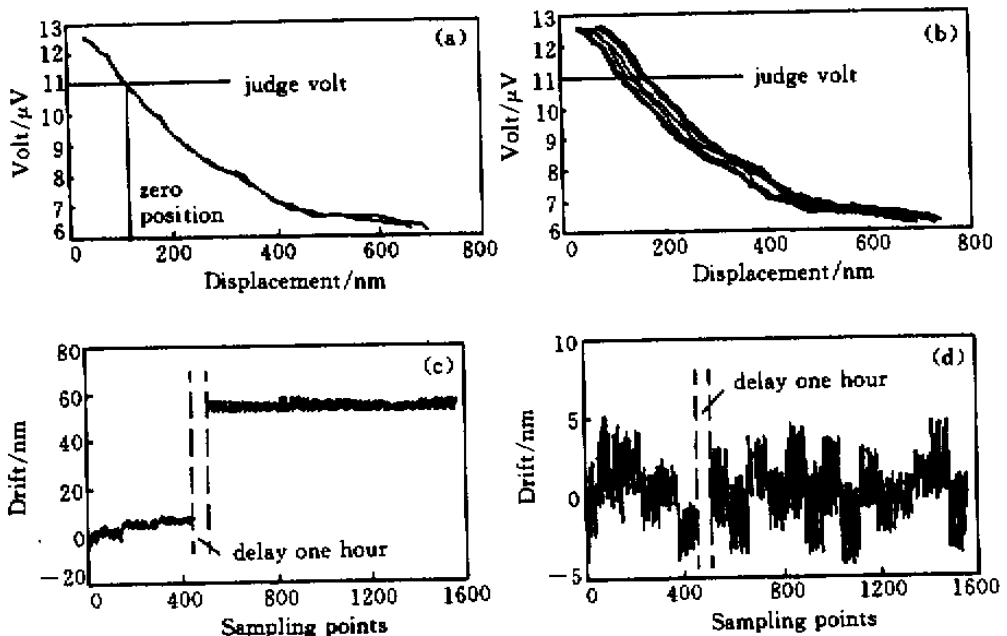


图 5 干涉仪长时间测量数据用 SPR 指零器件校正前后的误差曲线

Fig.5 Long time interferometer error curve before and after correction by SPR indicating device

5 结 论

通过设计特殊四面体棱镜,证明了该特殊四面体棱镜可以激发表面等离子体波,而且用它实现了 SPR 定位指零装置与双频激光干涉仪系统的集成。实验表明,集成系统可以有效地消除由于线性漂移引起的干涉仪测量值的误差,使干涉仪的测量不确定度从 70 nm 减小到 10 nm 。提高了普通干涉仪的测量精度和抗干扰能力。

参 考 文 献

1 Charles R. Steinmetz. Displacement measurement repeatability in tens of nanometers with laser interferometry [C]. *SPIE*,

1988, **921**:406~420
 2 J. K. Schaller, R. Czepluch, C. G. Stojanoff. Plasmon spectroscopy for high resolution angular measurements [C]. *SPIE*, 1997, **3098**:476~486
 3 G. Margheri, A. Mannoni, F. Quercioli. A new high-resolution displacement sensor based on surface plasmon resonance [C]. *SPIE*, 1996, **2783**:211~220
 4 S. G. Nelson, K. S. Johnston, S. S. Yee. High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on phase detection [J]. *Sensors and Actuators B*, 1996, **35~36**:187~191
 5 Wu Jian, Yin Chunyong, Guo Jihua. Surface plasma wave sub-nanometer indicating system [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12):1079~1081 (in Chinese)
 6 Zhaoming Zhu. Study on High-Resolution Angle Measurement Using Surface Plasmon Resonance Technique [M]. Master Dissertation to Tsinghua University, 1998 (in Chinese)