

文章编号: 0258-7025(2001)12-1079-03

表面等离子体波亚纳米指零系统^{*}

吴 健¹ 殷纯永¹ 郭继华²

(清华大学¹精密仪器系 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 提出了一种基于表面等离子体波(SPW)的纳米定位指零新方法。一个光纤探头可以等效于一个四层介质棱镜-金属膜-空气-光纤系统。分析了探头得到的近场光强度。分析表明光纤耦合到的光通量随空气层间距变化,利用这个特点可以建立纳米定位指零系统。实验表明该系统在 1℃ 恒温条件下 20 min 内的定位重复性标准偏差可以达到 2 nm,分辨率为 0.1 nm/nV。

关键词 纳米指零 表面等离子体波 非接触测量

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Surface Plasma Wave Sub-nanometer Indicating System

WU Jian¹ YIN Chun-yong¹ GUO Ji-hua²

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

Abstract A new method for nanometer positioning based on surface plasma wave is reported. A fiber probe approaching a coated prism can be equivalent to a four-layer prism-metal-air-fiber system. Analysis of the near-field beam intensity entering the fiber probe is presented. Theoretical analysis shows that the intensity coupling into the fibre probe changes according to the thickness of air gap. Non-contact nanometer indicating system can be set up according to this characteristic. Experiments show that standard deviation of 2 nm and resolution of 0.1 nm/nV in 20 minutes procedure of positioning repeatability can be achieved under air conditioning of $\pm 1^\circ\text{C}/\text{h}$.

Key words nanometer indicating, surface plasma wave, non-contact measurement

1 引 言

温度漂移是纳米测量中重要的误差源。减少温度漂移通常有两种方法:精密恒温和温度补偿。精密恒温经济代价大,目前虽然可以达到 0.01℃,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余误差。

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,重新回到“原点”(回零)是检查漂移量和修正漂移的可靠手段。所以需要一个小稳定、高灵敏的亚纳米零位指示器件。现有技术中,隧道显微镜、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。

表面等离子体波(SPW)检测技术近年来在生物传感领域得到了广泛应用^[1]。由于表面等离子体共振,反射光和透射光的光强和相位随入射角、介质折射率和其他参数的变化而剧烈变化,因此可以用于生物传感。当 P 偏振光入射到一个 Kretschmann 镀膜棱镜^[2]中,在金属膜和空气表面将产生表面等离子体波。这时用一个探头接近金属膜,如果间距小于波长量级,由于近场扰动将使光从 SPW 转换成传播波,进入探头。探头接收的光通量随探头离开金属膜的距离而剧烈变化,不同的光通量对应于不同的间距。利用这一原理可以构成一种全新的非接触高灵敏度的零位指示器。由于平端面探头调节端面平行很困难,因此本文提出了一种使

^{*} 国家自然科学基金(No. 59875051)资助项目。

收稿日期 2000-09-11

用半球形光纤探头的零位指示器,并对它的透射光强和探头与金属膜的间距的关系进行了理论分析和实验验证。

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^[3,4] 其中 t_{1234} r_{12} t_{23} r_{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。

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

$$r_{234} = \frac{r_{23} + r_{34}\exp(2ik_{z3}d_3)}{1 + r_{23}r_{34}\exp(2ik_{z3}d_3)} \quad (2)$$

$$r_{i,i+1} = \frac{X_i - X_{i+1}}{X_i + X_{i+1}}, t_{i,i+1} = \frac{2X_i}{X_i + X_{i+1}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$X_i = \frac{\epsilon_i}{k_{zi}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

$$k_{zi} = \sqrt{(\omega/c)^2 \epsilon_i - k_x^2}, k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin\theta \quad (5)$$

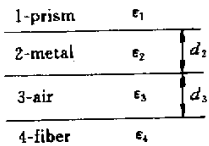


图 1 表面等离子体波激发装置层结构

Fig. 1 Layer system of surface plasma resonance excitation device

由于在纳米定位实验中,如果使用平端面探头就需要保证探头表面和金属膜表面相互平行。由于探头与金属膜的间隙要调节到几十纳米,而探头的直径为几百微米,因此,要调节探头表面与金属膜表面平行,调节装置的角度分辨率要达到 0.001° ,这在实现时很困难,而且也使实验不易成功。改用半球形光纤探头可以省去间隙调节的环节。半球形探头上各点与金属膜的间距各不相同,透射率也不相同,探头接收的光通量为各点透射光的总和。可以用图 2 所示的分割法进行计算。

$$I(r) = I_0 \exp\{-\alpha [R^2 - (R-r)^2] \omega^2\} \quad (6)$$

其中 $I(r)$ 为单位面积上的入射光强,为高斯分布。

$$S(r) = \pi [\alpha (R-r) - dr] dr \approx 2\pi (R-r) dr \quad (7)$$

其中 $S(r)$ 为坐标 r 处对应的 dr 分割圆周区域在垂直方向上的投影面积。

$$T(x) = t_{1234}^2(x) \times \sqrt{\epsilon_4/\epsilon_1} \times \cos\theta_t/\cos\theta_0 \quad (8)$$

其中 $T(x)$ 为空气间隙为 x 时的透射率。其中 θ_t 为光纤探头中的折射角, θ_0 为入射角。

$$\phi(x) = \int_0^R I(r) \cdot S(r) \cdot T(x+r) \quad (9)$$

其中 $\phi(x)$ 为总的透射光通量, R 为探头半径。

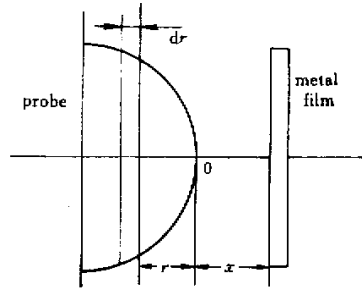


图 2 分割法计算实际的透射率曲线

Fig. 2 Split-run method to calculate flux coupling into the probe

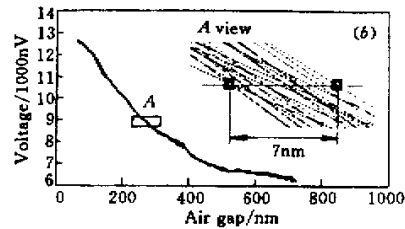
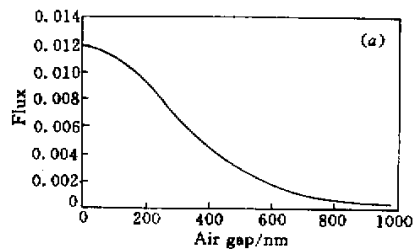


图 3 (a)透射率随空气层间距变化理论曲线; (b)纳米定位重复性实验结果

Fig. 3 (a)Relation curve of transmissivity; (b)Nanometer positioning experiment result

考虑公式(1)~(9),可以求得半球形光纤探头探测到的光通量曲线如图 3(a)所示。从图中可以

看出,在 300 nm 处曲线的斜率最大,所以可以用该点的电压值作为判据进行指零定位。很显然,与其他的近场纳米测量系统相比,SPW 纳米定位指零系统的探针与金属膜表面的间距要远得多。需要指出的是,图 3(a) 中的光通量是在 $R = 300 \mu\text{m}$ 和 $\theta_0 = 42.5^\circ$ 的规范化条件下计算的。

3 实验装置和结果

纳米定位系统的实验装置如图 4 所示。

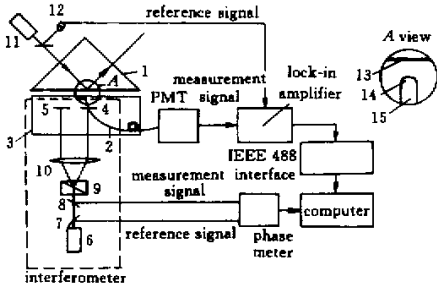


图 4 纳米定位指零实验装置图

- 1 镀膜棱镜 2,15 光纤探头 3 微动工作台 4 测量镜 5 参考镜 6,
- 11 横向塞曼双频激光器 7,8 分光镜 9 渥拉斯顿棱镜 10 凸透镜;
- 12 光电接收器;13 金属膜;14 半球形探头

Fig.4 Experiment setup for nanometer indicating

- 1 : coated prism ; 2 ,15 : fibre ; 3 : micro-positioning table ; 4 : measurement mirror ; 5 : reference mirror ; 6 :
- transverse Zeeman dual-frequency laser (300 kHz) ; 7,8 : beam splitter ; 9 : Wollaston prism ; 10 : convex lens ; 11 : transverse Zeeman dual-frequency laser (160 kHz) ; 12 :
- detector ; 13 : metal film ; 14 : semi-sphere end

入射光以共振角入射到镀膜棱镜,由于表面等离子体共振耦合到表面等离子体波,并通过近场相互作用进入光纤探头,经光电倍增管放大后进入锁相放大器,并输出光强信号。探头放置在一个缩小比为 24 倍的微动工作台上,由一个最高电压 150 V,最大行程 $16 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷(PZT)驱动,微动工作台的行程是 700 nm。并用一个分辨率为 0.1 nm 的差动干涉仪来测量探头的实际运动位移,实验室的恒温条件为 $\pm 1^\circ\text{C}/\text{h}$,微动台和镀膜棱镜的底座为微晶玻璃。

实验采用 $600 \mu\text{m}$ 的光纤,前端加工成半球形作为探头。在 PZT 上加电压 0 V-150 V-0 V,重复 12 次,历时 20 min 得到的重复性实验结果见图 3(b),其中纵坐标为锁相放大器的输出电压,它与

光纤接收的光通量成正比。可以看出,实验曲线图 3(b) 与理论曲线图 3(a) 在开头上很相似。由图 3(b) 可知,实验的重复性较好,在 300 nm 处的重复性精度标准偏差为 2 nm,这个标准偏差值是通过用一条等电压线截取实验曲线得到的 24 个数据点计算出来的,如图 3(b) 中 A view 部分所示。由于锁相放大器输出电压的变化范围为 $7 \mu\text{V}$,对应于 700 nm 的行程,而锁相放大器输出电压的分辨率为 1 nV,所以该指零系统的分辨率为 0.1 nm/nV。

4 结 论

本文通过理论分析和实验,验证了表面等离子体波定位指零位置的重复性标准偏差达 2 nm,分辨率达 0.1 nm/nV。由于该实验装置使用的探头为大直径半球形探头,工作点与金属膜的间距达几百纳米,为非接触测量,探头不易损坏,在普通恒温条件下也可以工作。在精密测量和生物传感中有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Jiang Hong, Yu Xing-long. Liquid refractive index measurement using phase detection of surface plasma wave. *Optical Technique*, 2000, **26**(1): 41~45
- 2 E. Kretschmann. The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons. *Z. Physik*, 1971, **241**: 313~324
- 3 Zhu Zhaoming. Study on high-resolution angle measurement using surface plasma resonance technique. *Master Dissertation to Tsinghua University*, 1998
- 4 E. Helene, de Bruijn, S. F. Bert et al.. Determination of thickness and dielectric constant of thin transparent dielectric layers using surface plasmon resonance. *Opt. Comm.*, 1991, **82**(5-6): 425~432