

文章编号: 0253-2239(2007)04-0673-7

一种分辨力达纳弧度量级的角位移传感新方法

舒建伟 曹庄琪 沈启舜 陈 凡

(上海交通大学物理系导波光电子器件实验室, 上海 200240)

摘要: 提出了一种测量微小角位移的新方法, 该法基于一种金属包覆波导结构, 通过棱镜耦合激发空气导波层中的超高阶导模作为灵敏探针。当被测部件发生微小偏转时, 空气层厚度和导模的有效折射率也因此改变, 从而引起耦合光束的反射光强急剧变动, 其变动幅度与部件的角位移量近似成正比关系。对传感的灵敏度进行了数值分析, 结果表明导模的有效折射率是影响灵敏度的重要参量。采用一种类似悬臂梁的结构产生可控微小角位移, 并以此对平均灵敏度进行了测算, 得到的结果与理论预测值符合得较好(相对误差约为 3%)。理论和实验结果表明, 只要部件的偏转半径达到厘米量级, 就可以实现分辨力达 10^{-9} rad 数量级的角位移传感。

关键词: 光学测量; 角位移传感; 金属包覆波导; 超高阶导模

中图分类号: TN247; TN252 文献标识码: A

Novel Angular Displacement Sensing Method with Resolution of 10^{-9} rad Magnitude

Shu Jianwei Cao Zhuangqi Shen Qishun Chen Fan

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: A new technique for measuring micro angular displacement is presented. Based on a symmetrical metal-cladding waveguide, ultrahigh-order modes in the guiding layer (air gap) can be excited through prism coupling to serve as sensitive probes. When a micro angular displacement of the objective occurs, the thickness of the air gap as well as the effective refractive index of the mode will be tuned. As a result, the intensity of the reflected beam will change remarkably with a magnitude proportional to the angular shift. It is shown through numerical calculation that the sensitivity is directly affected by the effective refractive index of the probe mode. A cantilever-like structure is employed in the experiment to generate controllable angular displacement, the mean sensitivity has been measured and found to be in well accordance with the results predicted by theory (relative error $\sim 39\%$). It is theoretically and experimentally shown that, for components with a centimeter-sized rotational radius, an angular resolution of the order of 10^{-9} rad can be successfully achieved by this technique.

Key words: optical measurement; angular displacement sensing; metal-cladding waveguide; ultrahigh-order mode

1 引 言

目前用于测量微小角位移的光学方法主要有全内反射差动法^[1~2]、迈克耳孙干涉法^[3]以及法布里珀罗干涉法^[4]等, 测量时都需要在被测件上安放特定的平面反射镜或棱镜等随转件, 通过探测反射光束的偏转角或光程差的变化来获得被测部件的角位移。由于迈克耳孙干涉法所用的随转件(角锥棱镜)

的体积和质量较大, 故该法主要用于对表面平整且面积较大的物体如转台等被测件进行转角标定, 不适用于小型元件的角位移实时检测。文献[4]介绍了一种结合法布里-珀罗板双光束干涉和正弦相位调制术的角位移传感法, 有效克服了迈克耳孙干涉测角法的这一缺陷, 并提高了相位差检测的精度。然而, 在用电流调制发射波长的同时, 激光的输出光

作者简介: 舒建伟(1981—), 男, 浙江龙游人, 硕士研究生, 主要从事平面光波导器件方面的研究。

E-mail: inywn@sjtu.edu.cn

导师简介: 曹庄琪(1945—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事波导光学、光波导器件、介质光波导理论方面的研究。E-mail: zqcao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-13; 收到修改稿日期: 2006-09-19

强也一起被调制,因此又会引入新的测量误差;另外,高精度地测量激光初始入射角仍是该法的一大难点。全内反射差动测量法的最大优点是体积小、灵敏度高,通过增加全内反射次数甚至可以达到几个纳弧度的分辨力^[5,6],但这需要加长临界角棱镜的尺寸,对各种影响测量结果的误差因素^[7]提出了很高的要求,从而带来了加长型临界角棱镜加工困难、光路不易对准等问题。

由于亚毫米金属包覆波导中的超高阶导模具有偏振不灵敏、有效折射率对导波层介质的折射率和厚度十分敏感等性质^[8],使其在生化传感、薄膜参量测量等领域有着良好的应用潜力。本文以此为基础提出了一种测量微小角位移的新方法,其基本思路是用部件的角位移调控空气导波层的厚度,然后利用超高阶导模的敏感激发特性,通过探测耦合光束的反射光强得到空气层厚度的改变量,最后推出部件角位移的大小。实验表明,此法不仅简单、有效,而且分辨力可达纳弧度量级,特别适合对部件极微小角位移的实时检测。

2 理 论

2.1 角位移传感原理

利用衰减全反射装置测量微小角位移的原理如图 1 所示。作为随转件的薄玻璃片可绕平行于 z 轴的 O 轴发生微小转动,而作为固定件的棱镜,其底面与玻璃片表面互相平行且垂直于 y 轴,两相对表面均镀上金膜,中间留有一层空气间隙作为导波层,这样就形成了一个棱镜-金属包覆波导耦合结构。将一束激光经由棱镜投射到金膜表面 P 点并使激光的入射面与 yz 面平行,当入射角 θ 满足同步匹配条件时,一部分激光能量被耦合到空气层中,另一部分能量在入射点反射并被探测器接收。

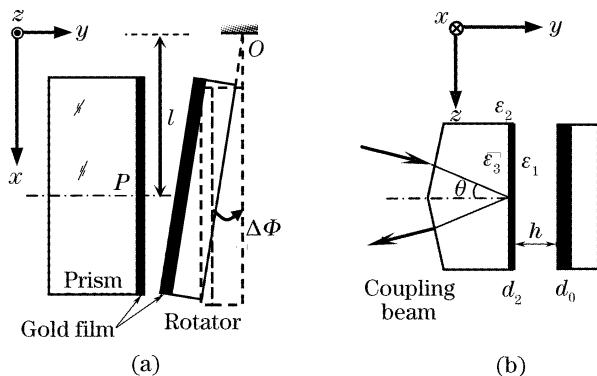


图 1 角位移传感原理图。(a)侧视图,(b)俯视图
Fig. 1 Schematic of the angular displacement sensing.

(a) Side view, (b) top view

l 为偏转半径在 x 方向上 P 点,到 O 轴的距离;图 1 中, d_0 和 d_2 分别为玻璃片表面和棱镜表面的金膜厚度, h 为空气层厚度, ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 分别为空气层、金膜和棱镜的介电常量。由于 d_0 在 400 nm 左右,足以屏蔽所有导模的能量,故可视为无限厚。将 h 调节到亚毫米量级并使激光入射角 θ 小于 10° , 这样激光束的能量可以被耦合到偏振不敏感的超高阶导模中^[8]。以 TM 偏振光为例,光强反射率可以表示为^[9]

$$R(\theta) = \left| \frac{r_{23} + r_{212} \exp(i2\alpha_2 d_2)}{1 + r_{23} r_{212} \exp(i2\alpha_2 d_2)} \right|^2, \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} r_{212} = \frac{r_{12} - r_{12} \exp(i2\alpha_1 h)}{1 - r_{12}^2 \exp(i2\alpha_1 h)}, \\ r_{ij} = \frac{\alpha_j \epsilon_i - \alpha_i \epsilon_j}{(\alpha_j \epsilon_i + \alpha_i \epsilon_j)}, \quad (i, j = 1, 2, 3) \\ \alpha_j = \sqrt{k_0^2 \epsilon_j - k_z^2}, \quad (j = 1, 2, 3) \\ k_z = k_0 \sqrt{\epsilon_3} \sin \theta = k_0 N, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为波长为 λ 的光在真空中的波数, k_z 为入射光的波矢在 z 方向的投影, N 为 k_z 与 k_0 的比值, α_j 为各层介质中光波场的横向振荡常量。当入射角 θ 等于某一同步角 θ_m 时, k_z 刚好与第 m 阶导模的传播常量 β_m 匹配,即 $k_z = \beta_m = k_0 N_m$, 这里 N_m 为该导模的有效折射率。在此条件下激光能量将被有效地耦合进导波层中,反射率因而明显下降,在此同步角附近形成一个衰减全反射(ATR)吸收峰,如图 2 所示,其中 $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = -8.0 + 1.2i, \epsilon_3 = 3.2, d_2 = 40 \text{ nm}, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。由图可知,衰减全反射吸收峰的下陷沿具有良好的线性度。

对于超高阶导模,其波导色散方程中与偏振有

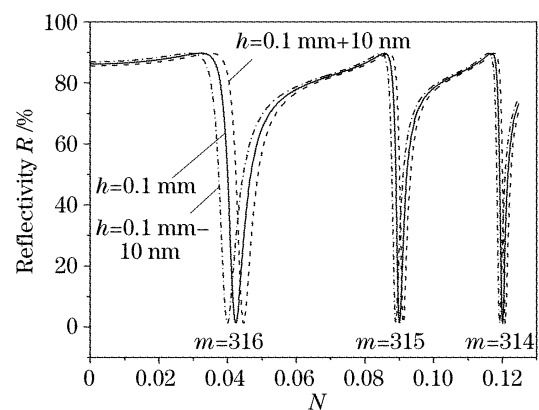


图 2 导波层厚度变化引起衰减全反射曲线移动的数值模拟

Fig. 2 Numerical simulation of the attenuated total reflection curve shift due to the thickness variation of the guiding layer

关的相移项可近似忽略,故第 m 阶超高阶导模的有效折射率 N_m 满足方程^[8]:

$$k_0 h \sqrt{\varepsilon_1 - N_m^2} = m\pi. \quad (3)$$

若图 1 中的玻璃片发生一微小偏转,设偏转角为 $\Delta\Phi$,则耦合点 P 处的导波层厚度相应减小了 $\Delta h = l\Delta\Phi$ 。因 $\Delta\Phi$ 极为微小,可近似认为两金属包覆面依然平行,(1)式仍适用。由(3)式知导波层厚度减小 Δh 将使导模有效折射率 N_m 相应减小 ΔN_m ,对(3)式作微分可得

$$\Delta N_m = \frac{\varepsilon_1 - N_m^2}{N_m} \frac{\Delta h}{h} = \left(\frac{\varepsilon_1 - N_m^2}{N_m} \right) \left(\frac{l}{h} \right) \Delta\Phi, \quad (4)$$

若将入射角固定在第 m 阶导模的吸收峰下降沿中部,由于此处的曲线具有良好的线性度,可设其斜率绝对值为 D_m ,则被测部件的角位移引起反射率 R 的改变量为

$$\Delta R = D_m \Delta N_m = \left[\frac{(\varepsilon_1 - N_m^2) D_m}{N_m} \right] \left(\frac{l}{h} \right) \Delta\Phi, \quad (5)$$

由(3)式得到 h 的表达式,将其连同空气的介电常量 $\varepsilon_1 = 1$ 一起代入(5)式,最终得到

$$\Delta R = \left[\frac{2D_m(1 - N_m^2)^{3/2}}{mN_m} \right] \left(\frac{l}{\lambda} \right) \Delta\Phi = \gamma_m \left(\frac{l}{\lambda} \right) \Delta\Phi, \quad (6)$$

其中 γ_m 为一个无量纲的物理量,其数值与选取的特定导模有关,并可预先由实验测定,方法为:对图 1 所示的波导结构进行入射角扫描,得到衰减全反射曲线后即可直接算出连续几个高阶模对应的 D_m 和 N_m 数值,然后再将各 N_m 值代入(3)式联立,可解出模阶数 m ,这样最终便求得各阶导模对应的 γ_m 值。对于一般的定轴转动部件,偏转半径 l 并不难测定,因此根据反射率的改变量 ΔR ,就可由(6)得出部件角位移的大小。

2.2 灵敏度分析

定义传感的灵敏度 S 为测量范围内反射率变化量 ΔR 与角位移 $\Delta\Phi$ 的比值,由(6)式可知

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta\Phi} = \gamma_m \left(\frac{l}{\lambda} \right), \quad (7)$$

(7)式表明,灵敏度 S 与敏感因子 γ_m 及偏转半径 l 成正比。图 3 显示了 γ_m 的理论值与导模有效折射率 N_m 的对应关系,除空气层厚度 h 外,波导的其他参量与图 2 中的相同, m_1 和 m_2 分别为当空气层厚度 h 处于两个不同值时波导所能容纳的最高阶导模的模序数。

由图 3 可以得出以下推论:

1) 随着导波层厚度 h 的增大,导模密度(单位

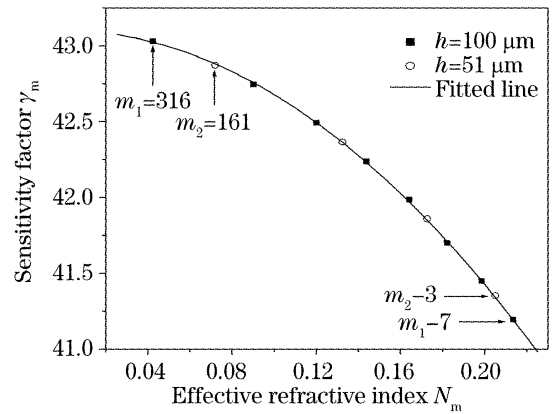


图 3 敏感因子 γ_m 与导模有效折射率 N_m 的理论关系
Fig. 3 Theoretical dependency of sensitivity factor γ_m on effective refractive index N_m

有效折射率范围内导模的数目)也成倍上升;

2) 当 h 为一定值时,阶数 m 越大的导模对应的有效折射率 N_m 就越小,而其 γ_m 则越大;

3) 比较不同 h 和 m 条件下的 γ_m 值,可知 γ_m , h 及 m 均无实质关系,其数值仅由 N_m 单独决定。因此提高传感灵敏度的关键是选取 N_m 尽可能小的导模,而当 h 处于亚毫米量级时,由于此时导模密度比较高,总能找到一些 N_m 值很小的超高阶导模。另一方面,提高灵敏度也会同时会缩小测量的量程,因此可根据需要合理选择空气层的厚度和工作导模的阶数。

2.3 激光束指向抖动分析

在其他几种测量角位移的光学方法中,激光束本身的指向抖动将对测量分辨力产生严重影响,因为这种指向抖动反映在测量结果上将等效于被测件发生了幅度相等的角位移,因而测量分辨力必然大于激光束的指向抖动幅度。而在本文所述方法中,入射光束的指向抖动和被测件的角位移对反射率的影响程度是不同的。事实上,对于相同幅度的角偏转,前者引起的反射率改变量相对于后者而言可以忽略不计。

设 i 为图 1(b) 中激光束从空气射入棱镜时的入射角,由于实际测量时 i 与 θ 一样都是小角度,根据折射定律易推得 $\Delta i \approx n_3 \Delta\theta$ 。另一方面,由(5)式中 D_m 的定义,可得

$$D_m = \frac{\Delta R}{\Delta N} = \frac{\Delta R}{\Delta(n_3 \sin \theta)} = \frac{\Delta R}{n_3 \cos \theta \Delta\theta} \approx \frac{\Delta R}{n_3 \Delta\theta} \approx \frac{\Delta R}{\Delta i}, \quad (8)$$

因此 D_m 的大小反映了反射率 R 对激光束指向抖动 Δi 的敏感程度,而由(7)式可知 S 反映了反射率 R 对被

测部件角位移 $\Delta\Phi$ 的敏感程度。根据(5)式可推得

$$\frac{S}{D_m} = \frac{\Delta R/\Delta\Phi}{D_m} = \left[\frac{(\epsilon_1 - N_m^2)}{N_m} \right] \left(\frac{l}{h} \right), \quad (9)$$

由于 N_m 值很小并且 $\epsilon_1 = 1$, (9) 式可简化为

$$\frac{S}{D_m} \approx \frac{1}{N_m} \left(\frac{l}{h} \right), \quad (10)$$

一般而言, (10) 式中的 l 在厘米量级以上, 而导波层厚度 h 为亚毫米量级, 二者相差两个数量级, 再加上 N_m 本身数值就很小, 因此 S 大约为 D_m 的数百倍至数千倍。以上分析表明, 反射率对被测部件的角位移要敏感得多; 相比之下, 激光束指向抖动对 R 产生的影响极为有限, 这也是本方法相对于其他光学测量手段的一大优点。

3 实 验

3.1 灵敏度测试装置

为实现足够微小的可控偏转以验证本方法的高灵敏度以及(7)式的正确性, 我们设计了图4所示的实验装置。其中用来产生微小角位移的元件是一块下部悬空的薄玻璃片, 其上部一小段与棱镜粘合在一起。粘合时将薄玻片与棱镜的两个相对面镀上金膜并调成平行, 当中留有空气层, 这样就形成了一个金属包覆波导结构。将激光器、分束镜、波导部件以及光电探测器固定在转台上, 由分束镜将出射激光分成两路, 其中一路作为参考光被探测器直接检测, 另一路作为耦合光束进入棱镜并激发空气层中的导模, 部分反射回来的能量被另一个探测器接收。两探测器的输出信号经过放大和模数转换后输入计算机进行比较, 最后得到耦合光束的反射率。引入参

考光束的目的是为了尽量减小光源输出功率漂移对测量结果的影响。

测量时由电脑控制匀转电动机的启停, 通过电动机带动底座内部齿轮, 使整个转台绕其正上方某一水平轴匀速转动。当棱镜随转台一起倾斜时, 薄玻璃片悬空的部分就会在自身重力的作用下发生微小弯曲, 如图5所示。在玻璃片与上部粘合块的粘结处建立如图所示的体坐标系, 该坐标系随转台一起转动, 其中 x 轴与转台平面垂直而与棱镜表面平行, y 轴与棱镜表面垂直。当转台处于水平状态时, xz 面与薄玻璃片表面重合; 当转台转动 Ψ 角后, 玻璃片将产生弯曲变形, 其表面是一个曲面, 曲面的形状可由均匀受力条件下悬臂梁的挠度方程^[10]给出:

$$y(x) = \frac{\rho g x^2 \sin \psi}{2Eb^2} (x^2 + 6L^2 - 4Lx), \quad (11)$$

其中 ρ 和 E 分别为薄玻璃片的密度和杨氏模量 (x 方向), L 为玻璃片悬空部分的总长度, g 为重力加速度。在 xy 面内过曲线 $y = y(x)$ 上任意一点作切线, 易知此切线与 x 轴的交点不随 Ψ 值变化, 故转台转动时玻璃片曲面上的每一面元均作定轴转动。在薄片末端 $x = L$ 处, 面元的偏转半径为

$$r_B = \frac{y(x)}{dy(x)/dx} \Big|_{x=L} = \frac{3}{4}L, \quad (12)$$

因而该处面元对应的角位移大小为

$$\Delta\phi = \frac{y(L)}{r_B} = \frac{2L^3 \rho g \sin \psi}{b^2 E}, \quad (13)$$

由(13)式可知, 改变倾斜角 ψ 就能实现可控的微小角位移。在其他各参量已知的情况下, 对 ψ 角进行连续扫描, 通过对扫描出的 $R \sim \psi$ 曲线进行分析, 我们就可以得到传感的平均灵敏度。

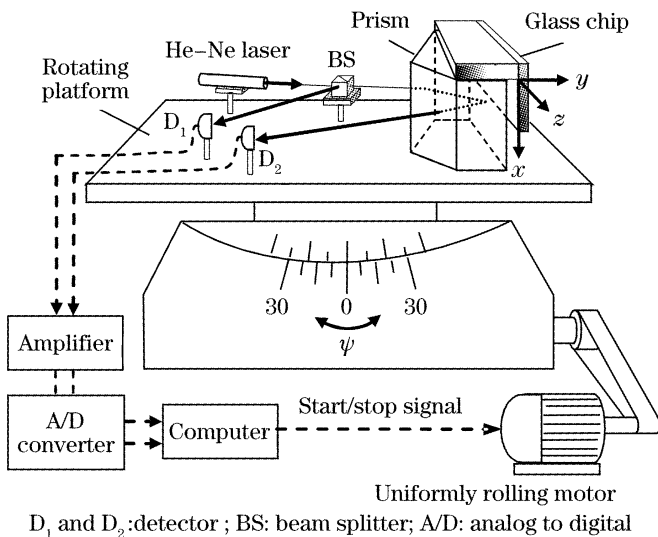


图4 角位移传感的灵敏度测试装置

Fig. 4 Experimental set-up for sensitivity testing of angular displacement sensing

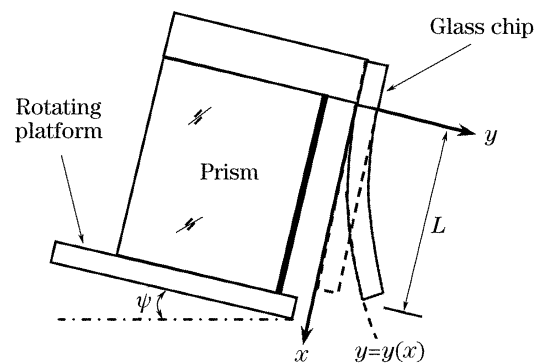


图5 用悬片结构产生微小角位移

Fig. 5 Micro angular displacement produced by a suspended glass chip

3.2 结果与分析

在波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 下耦合棱镜(ZF7)折射率为 $n_3 = 1.80$; 所用薄玻璃片为Z切石英晶片, 尺寸

30 mm×15 mm×0.5 mm,密度 $\rho=2.65 \text{ g/cm}^3$,杨氏模量 $E=76.5 \text{ GPa}$ (垂直于晶轴 Z 方向)。在棱镜和玻璃片表面溅射上金膜,用双波长法^[11]测得棱镜上的金膜介电常量和厚度分别为 $\epsilon_2 = -7.0 + 1.8i$, $d=35 \text{ nm}$,玻璃片上的金膜可以认为无限厚。将两者粘合成图 5 所示的波导结构,玻璃片下部悬空长度 $L=24 \text{ mm}$ 。将该波导竖直放置在 $\theta/2\theta$ 测量仪上,由步进电机驱动 $\theta/2\theta$ 转盘对其进行入射角扫描,获得的衰减全反射曲线及相应的理论拟合结果如图 6 所示。计算表明,当空气层厚度 $h=92.93 \mu\text{m}$ 时理论与实验曲线符合得最好,理论和实验曲线的差异主要由激光的发散所引起。

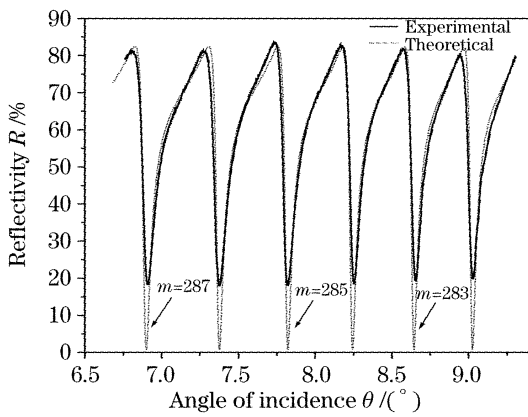


图 6 金属包覆波导的衰减全反射曲线

Fig. 5 Attenuated total reflection curve of the metal-cladding waveguide

将该波导结构和其他实验器件如图 4 所示放好,固定耦合光束的入射角 θ 在 8° 左右,并使入射点在薄玻璃片末端 ($x=L=24 \text{ mm}$),转台转动时的角速度为 $0.2^\circ/\text{s}$,测试结果如图 7 所示,三段平坦曲线分别对应于三个不同的转台倾斜角,在这些倾斜角处转台停止转动,其余部分的曲线是在转台匀速转动时测定的。倾斜角 ψ 的增大意味着空气层厚度增加,由(3)可知各阶导模的有效折射率也相应增大,使整

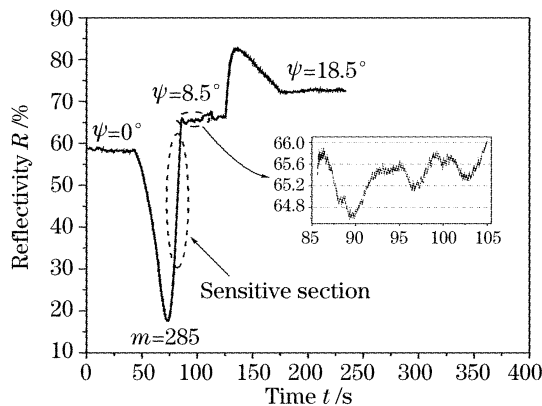


图 7 倾斜角 ψ 扫描结果

Fig. 7 Output curve of the inclining angle ψ scanning

条衰减全反射曲线朝正向移动,故扫描出来的 $R \sim \psi$ 曲线形状刚好与图 4 中的衰减全反射曲线左右相反。由于入射角在 8° 附近,对比图 6 中的模阶数,可知图 7 中扫描出的反射峰对应的导模阶数为 $m=285$ 。

图 7 中圈定了一段最陡直的曲线,在该处反射率对角位移最敏感。选取其中有代表性的几个数据点并根据(13)式算出它们对应的角位移大小,结果如图 8 所示。由图 8 的线性拟合结果可知,角位移传感的平均灵敏度 $S=4.23 \times 10^9/\text{rad}$;另一方面,由图 6 中的实测衰减全反射曲线可算出第 285 阶导模对应的敏感因子 $\gamma_m=14.4$,由(9)式得到偏转半径 $l=r_B=18 \text{ mm}$,将两者代入(7)式得到 $S'=4.10 \times 10^9/\text{rad} \approx S$ 。

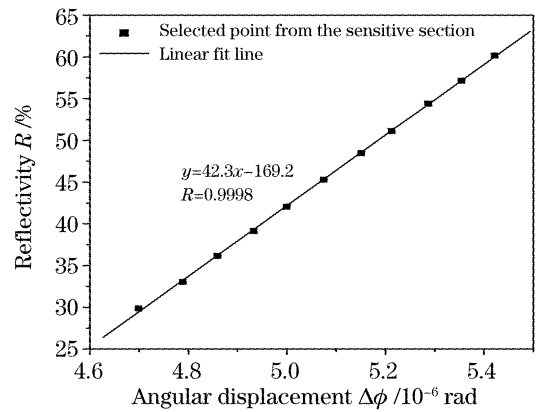


图 8 平均灵敏度的测算

Fig. 8 Calculation of mean sensitivity

为考察传感的最小角分辨力,图 7 中放大了 $\psi=8.5^\circ$ 对应的一段曲线,尽管在该处转台已停止转动,但是反射率一直在变化之中,具体而言又可以分为低频抖动和高频抖动两种,其中前者的幅度为后者的数倍。高频抖动主要由电路噪声和各部件的微弱机械振动所造成,而对于低频抖动,其产生的原因不外乎以下两点:1) 悬空薄玻璃片因受周围微弱空气流作用或者因转台倾角 ψ 的缓慢变动而产生随机的微小角位移;2) He-Ne 激光束指向的低频漂移(激光波长用波长计测定后发现极为稳定,故只需考虑光束的指向漂移)。根据分析,2)中所述因素与 1)相比,对反射率 R 的影响事实上要小得多,这可以从 S 与 D_m 的具体比值看出:由图 6 可知,第 $m=285$ 阶导模的有效折射率为 $N_m=0.245$,将该数值连同 $l=18 \text{ mm}$ 和 $h=92.93 \mu\text{m}$ 代入(10)式得到 $S/D_m \approx 790$,这意味着反射率 R 对薄玻璃片角位移的敏感度是对激光束指向抖动敏感度的 790 倍;而且,由于玻璃片处于悬空状态,其厚度也仅为

0.5 mm,因而更容易受周围的气流及其他各种复杂因素的影响而发生随机的低频微小偏转。综上所述,图7中反射率曲线的低频漂移应是由薄玻璃片本身的微小角位移引起,因此该低频漂移并不意味着传感分辨力的劣化,曲线的高频抖动则代表了传感器的输出噪声水平,其幅度决定了传感器所能感受的最小角位移。由图可知,高频抖动幅度(噪声带的宽度) δR 在0.2%左右,故本实验所能达到的角位移分辨力为 $\delta\Phi=\delta R/S=4.7\times 10^{-9}$ rad。

为进一步证实图7中曲线的低频抖动是由薄玻璃片本身的微小角位移所引起,一个简单的办法是利用图9所示的波导结构进行对比实验。该波导的导波层介质为玻璃,折射率为1.5,厚度约为0.38 mm。在某些入射角处,激光可以直接从空气耦合进玻璃导波层中,这种耦合方式也被称为自由空间耦合。由于玻璃层的厚度极为稳定,并不像图5中的空气层厚度那样随时可变,所以当激光入射角 θ 固定在该波导的耦合吸收峰附近时,反射率曲线的抖动必定是由其他因素所引起,而不可能是因为导波层厚度变化所致。若此时发现反射率曲线不存在低频抖动分量,则可证实图7中曲线的低频抖动的确由薄玻璃片本身的微小角位移所引起。实验结果如图10所示。

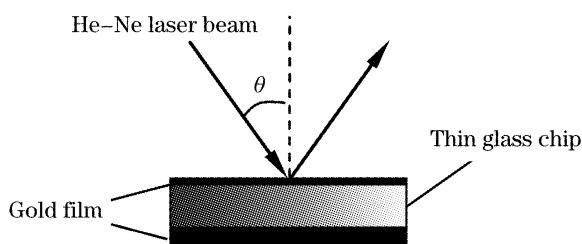


图9 以玻璃为导波介质的双面金属包覆波导

Fig. 9 Symmetrical metal-cladding waveguide with vitreous guiding layer

测量时将图9所示的波导结构放置在 $\theta/2\theta$ 测量仪上,固定初始入射角 θ_0 在 5° 以内,先由步进电机驱动 $\theta/2\theta$ 转盘对其进行入射角扫描,扫过的角度记为 $\Delta\theta$,当扫到第三个吸收峰下降沿时停止扫描,此时总共转过的角度为 $\Delta\theta=2.78^\circ$ (此后 $\Delta\theta$ 保持在该值不变,不过测量软件仍在不断记录角度的变化,事实上图中的横坐标应是转台设定的角速度与采样时间的乘积)。在入射角固定的情况下继续记录反射率的变化,获得了图10中所示的一段平坦曲线,此曲线几乎不存在低频抖动。由于该下降沿所对应的 $D_m=354$,与图7中的导模所对应的 $D_m=524$ 接

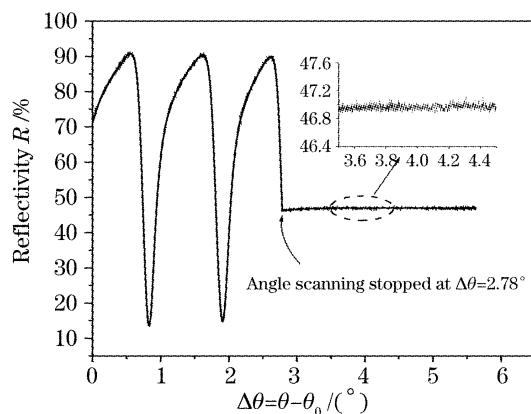


图10 对比实验结果:低频抖动消失

Fig. 10 Results of comparative experiment; low-frequency fluctuation disappeared

近,因此在这两种情况下反射率对激光指向漂移等误差因素的敏感度相差不大,由此可知图7中存在的低频抖动只可能由薄玻璃片本身的微小随机偏转所引起。

4 结 论

本文利用金属包覆波导中超高阶导模对导波层厚度极为敏感的特性,实现了对角位移的高灵敏度传感。从理论上推导了灵敏度的计算公式及其实际测定方法;由数值计算得出该灵敏度直接依赖于所选导模的有效折射率。通过实验证实了本方法的可靠性,并获得了纳弧度数量级的测量分辨力。与其他光学方法相比,此法具有测量装置简单、传感灵敏度高并且对激光指向抖动不敏感等优点,因而在定轴转动元件的微小角位移传感中具有独特的应用价值。

参 考 文 献

- Huang P S, Kiyono S, Kamada O. Angle measurement based on the internal reflection effect; A new method[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6047~6055
- Zhang A Y, Huang P S. Total internal reflection for precision small-angle measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40** (10): 1617~1622
- Masroor Ikram, Ghazanfar Hussain. Michelson interferometer for precision angle measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(1): 113~120
- Zhang Caini, Wang Xiangzhao. High-accuracy angular displacement measurement using sinusoidal phase modulating Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1141~1145 (in Chinese)
张彩妮, 王向朝. 法布里-珀罗板正弦相位调制型高精度角位移测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1141~1145
- Zhang Shizhou, Kiyono Satoshi, Uda Yutaka. Nanoradian angle sensor and in situ self-calibration [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4154~4159
- Ma Junshan, Yang Yongcai, Zhang Shizhou *et al.*. Angular

- displacement sensor with nanoradian resolution and calibration techniques of mean sensitivity[J]. *Opt. Technique*, 2003, **29**(2): 161~163
- 马军山, 杨永才, 张世宙等. 纳弧度分辨力角位移传感器及平均灵敏度标定[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2): 161~163
- 7 Liu Qinggang, Li Zhigang, Li Dechun *et al.*. The influence of error factors to a micro-angle sensor system [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(4): 355~358 (in Chinese)
- 刘庆纲, 李志刚, 李德春等. 误差因素对微角度传感器性能的影响[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(4): 355~358
- 8 Lu Haifeng, Cao Zhuangqi, Shen Qishun. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(20): 4579~4581
- 9 Cao Zhuangqi. *Transfer Matrix Method for Guided-Wave Optics* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. 185~186 (in Chinese)
- 曹庄琪. 导波光学中的转移矩阵方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. 185~186
- 10 Fan Qinshan, Wang Bo, Yin Yajun. *Mechanics of Materials* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 152 (in Chinese)
- 范钦珊, 王波, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 152
- 11 Chen W P, Chen J M. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic film[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2): 189~191

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自2004年5月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款2800元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn