

文章编号: 1000-5862(2013)02-0111-05

基于对称金属包覆波导的高精度微位移测量

桑明煌¹, 李新华², 余子星¹, 戴海浪¹

(1. 江西师范大学物理与通信电子学院 江西 南昌 330022;

2. 江西省星子中学 江西 九江 332800)

摘要: 利用对称金属包覆波导中超高阶导模对入射角度高度灵敏的特性, 提出了一种新型的实时高精度微位移测量方法. 与将压电材料置于导波层中不同, 该方法是在压电材料上粘合一平面镜, 并放置于一凸透镜的焦平面处. 当对压电材料加载电压而产生微位移时, 经凸透镜返回的 2 条边缘光线会产生微小的入射角度变化, 从而引起反射光强的急剧改变. 该方法的微位移测量精度和测量范围分别为 0.5 和 170 nm, 且具有结构简单、实时测量等优点, 可应用于微机电系统和精密控制领域.

关键词: 对称金属包覆波导; 超高阶导模; 微位移测量

中图分类号: TN 252

文献标志码: A

0 引言

高精度微位移测量是微机电系统和精密控制领域中的关键技术之一, 利用此技术可间接探知加速度^[1-2]、压强和应力^[3]等物理量. 目前多种原理可实现亚微米级位移的测量, 其中光学方案, 如频率扫描干涉^[4-5]、电外差干涉^[6]、Fabry-Perot 干涉^[7]、光栅衍射^[8]等, 因具有非接触无损的性能而备受关注, 但上述方案的设备结构相对复杂, 测量速度和精度也有待进一步提高. 众所周知, 准直光束经凸透镜后会聚于焦点, 若放置一平面镜于焦平面处, 再次经凸透镜返回的光束仍是准直的. 如果平面镜与焦平面之间存在一微小位移, 则返回光束有一微小角度的会聚或发散, 且偏折角度与微位移成正比. 1988 年, T. Kohno 等^[9]结合凸透镜与反射光强在全反射临界角附近急剧变化的特性, 提出了一种结构简单的高精度表面形貌分析方法. 与之类似, 表面等离子波 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 在共振角附近的反强光强同样急剧变化, 此特性也已被应用于高精度微位移的传感测量^[10-11]. 实验表明, 两者均可测量纳米级位移, 但所用的激光需为 TM 偏振, 且反射峰的半角宽度较大.

近期, 曹庄琪教授课题组研究发现, 在毫米尺度的对称金属包覆波导 (Symmetrical metal-clad waveguide, SMCW) 中可激发与偏振无关, 且半角宽度比 SPR 小 2 个量级的超高阶导模^[12]. 将一压电材料置于导波层中, 当施加电压引起导波层的厚度发生微小变化时, 其反射光强^[13-14]和 Goos-Hänchen 位移^[15]会急剧改变, 实现了皮米级的微位移测量. 除此之外, 超高阶导模的高灵敏特性也已被用于测量角位移^[16]、溶液浓度^[17-18]、生物分子相互作用^[19-20]等物理量. 本文结合凸透镜及 SMCW 反射光强对入射角极其灵敏的特性, 提出一种无需将压电材料置于导波层中的微位移测量方法, 扩大了 SMCW 的实用范围.

1 测量原理

1.1 反射光强与入射角度的关系

SMCW 如图 1 所示, 它由导波层、金属覆盖层和金属衬底组成.

工作时, 一束偏振光经上层金膜, 自由空间耦合^[21]进导波层后反射, 根据电磁场边界条件, 可得反射率公式为^[22]

$$R = |r|^2,$$

收稿日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61265001)和江西省教育厅科技课题(GJJ13237)资助项目.

作者简介: 桑明煌(1965-), 男, 江西德安人, 教授, 主要从事导波光学和光纤激光器方面的研究.

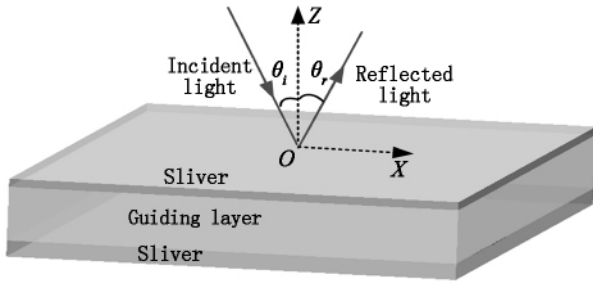


图1 对称金属包覆波导

$$r = (r_{12}(1 + r_{23}r_{34}\exp(2i\kappa_3d_3)) + (r_{23} + r_{34} \cdot \exp(2i\kappa_3d_3))\exp(2i\kappa_2d_2)) / (1 + r_{23}r_{34}\exp(2i\kappa_3d_3) + r_{12}(r_{23} + r_{34}\exp(2i\kappa_3d_3))\exp(2i\kappa_2d_2)) ,$$

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{\kappa_i/\varepsilon_i - \kappa_j/\varepsilon_j}{\kappa_i/\varepsilon_i + \kappa_j/\varepsilon_j}, & \text{TM mode} , \\ \frac{\kappa_i - \kappa_j}{\kappa_i + \kappa_j}, & \text{TE mode} , \end{cases}$$

其中 $\varepsilon_i = n_i^2$ 为介电常数, n_i 为折射率, $\kappa_i = 2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_i - \varepsilon_i \sin^2 \theta} / \lambda$, λ 为入射光波长, θ 为入射角度, d_i 为厚度, r_{ij} 为相邻层间的菲涅耳反射系数, $i, j = 1, 2, 3, 4$ 分别表示空气、上层金属膜、导波层、下层金属膜。当导波层的厚度 d_3 达到毫米尺度时, 波导中可容纳数千个导模。若以小角度 θ 入射, 可激发出一系列分立的超高阶导模^[12], 并满足色散方程

$$\kappa_3 d_3 = m\pi \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

其中 m 为模序数。

图2 为计算得到的一个超高阶导模图。

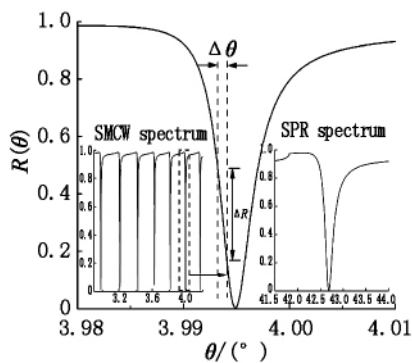


图2 SMCW与SPR谱线

所用参数如下: 激光波长 $\lambda = 860.0 \text{ nm}$; 上下两层银膜厚度分别为 $d_2 = 34 \text{ nm}$, $d_4 = 300 \text{ nm}$, 介电系数 $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -32.5 + 1.4i$; 导波层厚 $d_3 = 3 \text{ mm}$, 折射率 $n_3 = 1.5$ 。超高阶导模的反射光强在相位匹配条件下急剧下降, 反射率曲线形成一个吸收峰。吸收峰最低点对应的角度为该模式的共振角, 而吸收峰的上升沿(或下降沿)则对入射角度极其敏感。当入射

角度发生微小变化时, 反射光强会急剧改变。由反射率曲线可见, 在吸收峰的上升沿(或下降沿)范围内, 可认为反射光强随入射角度线性变化。不妨设斜率为 k_1 , 即

$$\Delta R = k_1 \Delta \theta. \quad (1)$$

选取其中的下降沿为研究对象, 超高阶导模的反射光强随入射角度的变化如图3所示, 其斜率约为 $k_1 = \Delta R / \Delta \theta \approx -240^\circ$ 。作为比较, 图2还分别给出了SMCW模式谱和SPR模式谱, 可知SMCW谱的半角宽度比SPR小2个量级, 即其反射光强变化对入射角度变化的斜率 k_1 比SPR模式谱大2个量级, 因此测量精度也同样提高了2个量级。

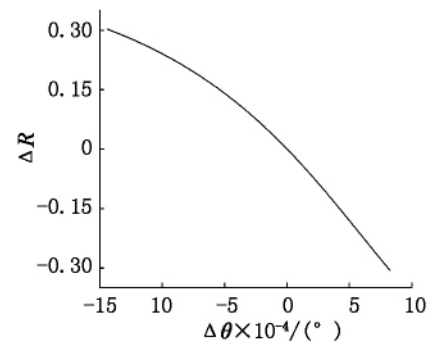


图3 反射光强随入射角度变化图

1.2 偏折角度与微小位移的关系

如图4所示, 将一平面镜放置于一凸透镜的焦平面处, 则平行于主光轴的准直光束经凸透镜后由平面镜反射再通过凸透镜时, 光束不会发生偏折, 仍为准直光束。若平面镜偏离焦平面一微小位移 Δz , 则光束的两条边缘光线相对于主光轴会有一微小角度 $\Delta \theta$ 偏折, 由几何光学有^[23]

$$\Delta z = -\frac{D}{4(NA)^2} \Delta \theta = -\frac{f^2}{D} \Delta \theta, \quad (2)$$

其中 NA 、 f 分别为凸透镜的数值孔径、焦距, D 为入射光束的直径。由(2)式可知, 微小位移 Δz 与 $1/(NA)^2$ 和偏折角度 $\Delta \theta$ 成正比, 也即是一个更大数值孔径的凸透镜, 相同的微位移可以得到更大的偏折角度。因此(2)式可简写为

$$\Delta \theta = k_2 \Delta z. \quad (3)$$

当 $\Delta z > 0$ 时, 相对于主光轴, 边缘光线 A 有一负的角度($-\Delta \theta$) 偏折, 而边缘光线 B 则有一正的角度($\Delta \theta$) 偏折。与之类似, 当 $\Delta z < 0$ 时, 边缘光线 A 有一正的角度($\Delta \theta$) 偏折, 而边缘光线 B 则有一负的角度($-\Delta \theta$) 偏折。同时, 由图4(b)可知, 一束发散光束

(会聚光束)经直角三棱分光镜后,仍为发散光束(会聚光束),且其偏折角度的大小不发生变化,但改变了偏折角度的正负符号。

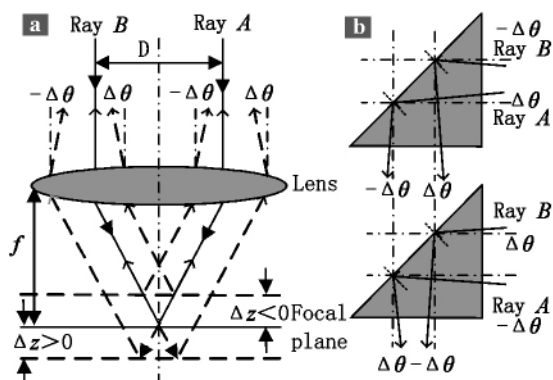


图4 (a) 凸透镜光路图 (b) 分光器光路图

1.3 反射光强与微小位移的关系

在实验中,用一线阵光电探测器记录反射光强。当 $\Delta z = 0$ 时,光束的两边缘光线 A 和光线 B 的入射角度差 $\Delta\theta_{AB} = 0$,则线阵光电探测器两边缘处的反射光强差为 0,即 $\Delta R_{AB} = R_A - R_B = 0$ 。当 $\Delta z \neq 0$ 时,由(1)式与(3)式可得线阵光电探测器两边缘处的反射光强差为

$$\Delta R_{AB} = 2k_1 k_2 \Delta z.$$

因此,可通过反射光强变化的测量而确定微小位移的变化。

2 实验结果

SMCW 的制备过程为:选取一块长 \times 宽 \times 厚为 $5.26 \text{ mm} \times 4.20 \text{ mm} \times 3.00 \text{ mm}$ 的 K7 玻璃,经超声波清洗烘干后,运用磁控溅射法分别在 K7 玻璃上下两面镀上厚约 34 和 300 nm 的银膜。压电材料为厚度约 2 mm 的铌酸锂薄片,在其上下两面用磁控溅射法镀上约 1 000 nm 的金膜,并在金膜上制作出电极,然后用 UV 光胶把 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的平面镜粘合在铌酸锂薄片上。

实验装置图如图 5 所示,由可调谐激光器出射的准直激光($\lambda = 860.0 \text{ nm}$)经小孔准直、扩束器扩束后(光斑直径 $D = 2 \text{ mm}$),再通过分束器、凸透镜(焦距 $f = 5 \text{ cm}$),入射到凸透镜焦平面处的平面镜上。经平面镜反射后的光束再次经过凸透镜、分束器,入射到位于 $\theta/2\theta$ 转台上的 SMCW 的上层薄银膜上,再次反射后的光强由一线阵光电探测器接收。

实验中,在未施加电压的条件下,通过精密控制台调节铌酸锂及平面镜的位置,使得线阵光电探测器的光斑两边缘处的反射光强相等,此时可认为平面镜位于凸透镜的焦平面上。然后转动 $\theta/2\theta$ 转台,使入射角处于反射光强吸收峰的下降沿中心 $\theta = 3.996^\circ$,此时反射率测量值为 46%。再通过电极在铌酸锂两面施加电压,由于压电效应,铌酸锂的厚度会发生微小改变,从而使平面镜偏离凸透镜的焦平面,所以线阵光电探测器的光斑两边缘处的反射光强大小不相等。通过测量两者的反射光强的差值,从而确定铌酸锂的微小位移。

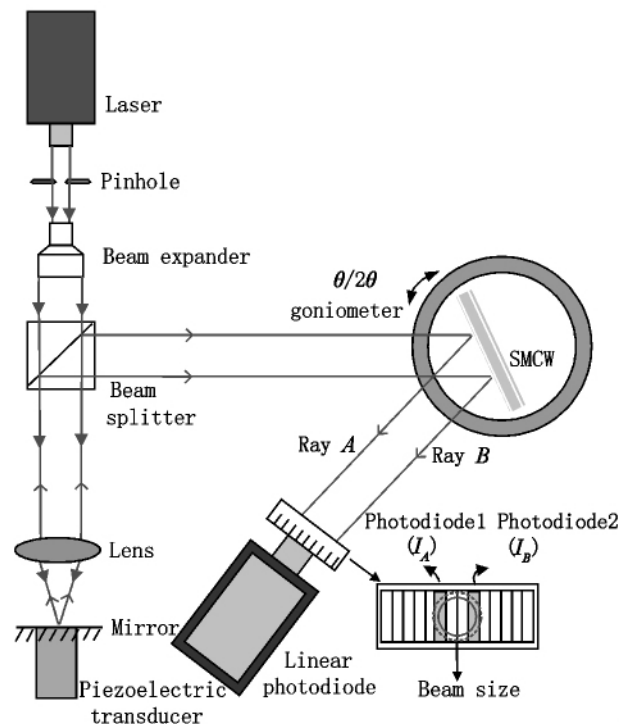


图5 实验装置图

实验结果如图 6 所示。

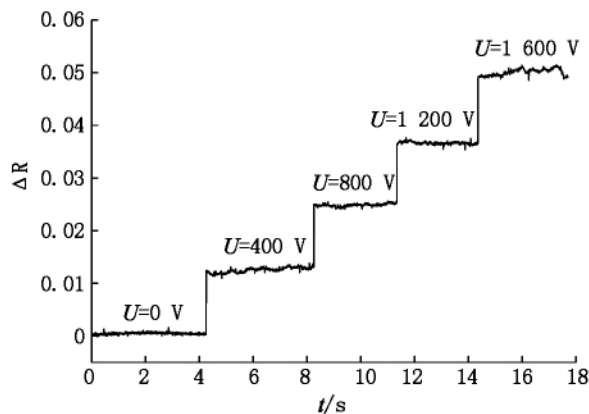


图6 实验结果图

在图 6 中,施加在铌酸锂上的电压分别为 0,

400, 800, 1200, 1600 V, 每 400 V 电压的改变可以引起线阵光电探测器上光斑两边缘处的反射光强差为 $\Delta R_{AB} = 1.25\%$, 且反射光强差值 ΔR_{AB} 与电压改变量 ΔV 呈线性关系. 由铌酸锂材料的压电系数^[15] $d_{33} = 8 \times 10^{-12}$ m/V 可得, 每 400 V 电压的改变可以引起铌酸锂厚度变化 $\Delta z = 3.2$ nm. 对实验数据去除噪音后, 较为认可的反射率最小分辨率为 $\Delta R_{AB} = 0.2\%$ ^[24], 可得微位移测量精度为 0.5 nm. 当电压继续增加时, 其反射光强变化 ΔR_{AB} 与电压变化量 ΔV 不再呈线性关系, 根据实验结果的线性区, 计算得到微位移的测量范围为 170 nm.

3 结论

结合 SMCW 和凸透镜, 实现了测量精度为 0.5 nm 及测量范围为 170 nm 的微位移测量. 与表面等离子波及全反射等微位移测量方法相比, 其反射光强的变化更加急剧, 因而具有更高的测量精度. 该方法无需将压电材料置于导波层中, 结构简单, 成本低, 扩大了 SMCW 的实用范围.

4 参考文献

- [1] Cooper E B, Post E R, Griffith S, et al. High-resolution micro-machined interferometric accelerometer [J]. Appl Phys Lett 2000, 76(22): 3316-3318.
- [2] 张群雁, 周震, 冯丽爽, 等. 新型微米光栅加速度计光学结构研究 [J]. 光学学报 2010, 30(6): 1796-1799.
- [3] 熊幸果, 陆德仁, 卢平芳, 等. 微力微位移天平测试方法 [J]. 传感技术学报 1997, 10(2): 47-52.
- [4] Kuwamura S, Yamaguchi L. Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement [J]. Appl Opt 1997, 36(19): 4473-4482.
- [5] Yang Haijun, Deibel J, Nyberg S, et al. High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency scanned interferometry [J]. Appl Opt 2005, 44(19): 3937-3944.
- [6] Wang S F, Chiu M H, Chen Weiwu, et al. Small-displacement sensing system based on multiple total internal reflections in heterodyne interferometry [J]. Appl Opt 2009, 48(13): 2566-2573.
- [7] Howard L, Stone J, Fu J. Real-time displacement measurements with a fabry-perot cavity and a diode laser [J]. Precis Eng 2001, 25(4): 321-335.
- [8] Zhao Shuangshuang, Hou Changlun, Zhang Juan, et al. A high-resolution displacement sensor based on a grating interferometer with the phase modulation technique [J]. Meas Sci Technol 2012, 23(10): 105102.
- [9] Kohno T, Ozawa N, Miyamoto K, et al. High precision optical surface sensor [J]. Appl Opt 1988, 27(1): 103-108.
- [10] Margheri G, Mannoni A, Quercioli F. High-resolution angular and displacement sensing based on the excitation of surface plasma waves [J]. Appl Opt 1997, 36(19): 4521-4525.
- [11] Chiu M H, Shih B Y, Lai Chih W, et al. Small absolute distance measurement with nanometer resolution using geometrical optics principles and a SPR angular sensor [J]. Sens Actuators A 2008, 141(1): 217-223.
- [12] Lu Haifeng, Cao Zhuangqi, Li Honggen, et al. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding waveguide [J]. Appl Phys Lett 2004, 85(20): 4579-4581.
- [13] Chen Fan, Cao Zhuangqi, Shen Qishun, et al. Nanoscale displacement measurement in a variable-air-gap optical waveguide [J]. Appl Phys Lett 2006, 88(16): 161111.
- [14] Chen Fan, Cao Zhuangqi, Shen Qishun, et al. Picometer displacement sensing using the ultrahigh-order modes in a submillimeter scale optical waveguide [J]. Opt Express 2005, 13(25): 10061-10065.
- [15] Yu Tianyi, Li Honggen, Cao Zhuangqi, et al. Oscillating wave displacement sensor using the enhanced Goos-Hanchen effect in a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. Opt Lett 2008, 33(9): 1001-1003.
- [16] Chen Fan, Cao Zhuangqi, Shen Qishun, et al. Optical approach to angular displacement measurement based on attenuated total reflection [J]. Appl Opt 2005, 44(26): 5393-5397.
- [17] Gu J H, Chen G, Cao Zhuangqi, et al. An intensity measurement refractometer based on a symmetric metal-clad waveguide structure [J]. J Phys D: Appl Phys 2008, 41(18): 185105.
- [18] Xiao Pingping, Wang Xianping, Sun Jingjing, et al. Biosensor based on hollow-core metal-cladding waveguide [J]. Sens Actuators A 2012, 183: 22-27.
- [19] 桑明煌, 余子星, 李翠翠, 等. 相位调制型振荡场生化传感器的理论分析 [J]. 中国科学: G 辑 2012, 42(2): 122-126.
- [20] Sun Jingjing, Wang Xianping, Chen Yin, et al. Optical transduction of E Coli O157: H7 concentration by using the enhanced Goos-Hanchen shift [J]. J Appl Phys,

- 2012, 112(8): 83104.
- [21] Li Honggen, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng, et al. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(14): 2757-2759.
- [22] Liu Xiangmin, Yang Qingfen, Qiao Zhi, et al. Physical origin of large positive and negative lateral optical beam shifts in prism-waveguide coupling system [J]. Opt Comm 2010, 283(13): 2681-2685.
- [23] Liao Shujen, Wang Shinn Fwu, Chiu Minghuang. A new method for measuring a small displacement by using the critical angle method and confocal technology [J]. SPIE 2005, 5635: 211-218.
- [24] Kabashin A V, Patskovsky S P, Grigorenko A N. Phase and amplitude sensitivities in surface plasmon resonance bio and chemical sensing [J]. Opt Express 2009, 17: 21191-21204.

High-Precision Measurement of Small Distance Utilizing the Symmetrical Metal-Cladding Waveguide

SANG Ming-huang¹, LI Xin-hua², YU Zi-xing¹, DAI Hai-lang¹

(1. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China;

2. Xingzi Middle School, Jiujiang Jiangxi 332800, China)

Abstract: Based on the ultra-high order mode with high-sensitivity to the variance of incidence angle in the symmetry metal-cladding waveguide, a real-time and high-precision micro-displacement measurement method has been theoretically analyzed and experimentally demonstrated. It is shown that the piezoelectric material is not placed in the guiding layer but connected with one mirror, and that the combination of piezoelectric material and mirror is located at the focal plane of one convex lens. In particular, when a voltage is applied to the piezoelectric material, the resulted micro-displacement will give rise to a tiny variance of incidence angle in the light coming back from the convex lens, and then a sharp change in the reflected light intensity will be obtained. The experiment shows that the micro-displacement measurement resolution is 0.5 nm and the measurement range is 170 nm, and furthermore, this scheme is of simple structure, real-time measurement and may be of potential application in micro-electro-mechanical systems and fine control area.

Key words: symmetry metal-cladding waveguide; ultra-high order mode; micro-displacement measurement

(责任编辑: 冉小晓)