

文章编号:1004-4213(2011)10-1595-4

# 基于古斯-汉欣位移效应的波长传感研究

肖平平<sup>a</sup>, 戚珉<sup>b</sup>, 胡红武<sup>a</sup>

(宜春学院 a. 物理科学与工程技术学院; b. 数学与计算机科学学院, 江西 宜春 336000)

**摘 要:** 利用双面金属包覆波导在导模共振激发时对古斯-汉欣位移具有极大的增强效应来实现激光波长微小变化的监测. 双面金属包覆波导由上层金膜、导波层和下层金膜组成. 当导波层厚度为亚毫米尺度时, 应用自由空间耦合技术使入射的激光以小角度入射, 在满足相位匹配的条件下激发超高阶导模. 理论研究表明, 当波导的辐射损耗等于本征损耗时, 反射光的侧向位移可达到数百微米, 并且此时激发的超高阶导模对波长具有极强的色散能力. 通过测量反射光的侧向位移可实现对激光波长变化的实时探测, 且具有很高的灵敏度. 同时, 实验中探测信号只与光束位置相关, 可有效避免因光源输出光强的波动带来的干扰. 实验测量结果表明对激光波长在 859nm 附近的分辨率可达到 0.2 pm.

**关键词:** 双面金属包覆波导; 超高阶导模; 古斯-汉欣位移; 波长传感

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114010.1595

## 0 引言

随着对通信容量要求的增长, 密集波分复用 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 系统中信道数目不断增加, 信道间距越来越小. 目前波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 的标准间隔为 100 GHz (0.8 nm)<sup>[1]</sup>, 密集型 DWDM 的间隔为 50 GHz (0.4 nm), 甚至达到了 25 GHz (0.2 nm)<sup>[2]</sup>. 这么小的波长间隔, 要防止邻近波道串扰就必须把光源的波长误差控制在波道间隔的 10% 以内, 实现波长漂移检测和锁定就显得尤为重要. 目前, 实现波长漂移监测的方法主要是利用介质波导<sup>[3]</sup>, 光纤光栅<sup>[4-5]</sup> 以及法布里-帕罗 (Fabry-Perot, FP) 标准具<sup>[6-7]</sup>. Nasu 等人利用两个光电探测器锁定 FP 标准具的工作点在传输函数斜率最大处, 实现了 4.41 pm 的波长锁定. 但 FP 标准具对光的约束能力不高, 这限制了灵敏度; 其次, FP 标准具两侧的反射镜一般由特殊材料的高反介质膜构成, 用以减小 FP 标准具透射峰的半宽度, 提高灵敏度, 这在工艺上具有较大难度; 而且传统的方法易受光源输出功率波动的影响. 上海交通大学陈麟等人利用双面金属包覆波导 (Symmetrical Metal Cladding Waveguide, SMCW) 激发超高阶时反射光强是波长的灵敏函数, 设计出

的波长传感器测量准确度达到了 1 pm, 但由于激光光源出射光强度的涨落给其测量准确度带来了较大的影响<sup>[8-9]</sup>. 为克服上述不足, 本文利用 SMCW 在导模共振激发的情况下增强古斯-汉欣位移效应监测激光波长的微小变化. 当导波层厚度为亚毫米尺度时, 激光以小角度入射, 在满足相位匹配的条件下激发超高阶导模, 极大地增强反射光的侧向位移. 由于超高阶导模对波长具有很强的色散能力, 通过测量反射光的侧向位移即可实现对激光波长变化的实时探测, 具有很高的灵敏度, 并且实验中探测信号只与光束位置相关, 有效地避免了因光源输出光强的波动带来的干扰, 可有效地提高测量的分辨率.

## 1 原理

如图 1, 用于波长传感的结构由两部分组成: 其中一部分是一个高折射率棱镜, 底面镀有一层薄金

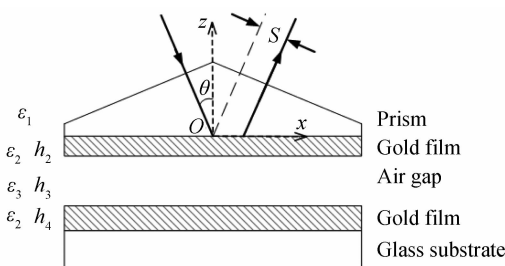


图 1 双面金属包覆波导结构  
Fig. 1 Structure of the SMCW

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61168002) 和国家重点实验室开放基金 (No. 2011GZFO31105) 资助

第一作者: 肖平平 (1972-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光纤通信、导波光电子器件、集成光学及其应用领域.

Email: xpp7967@163.com

收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-06-23

膜;另一部分是一块平板玻璃片,上表面镀有一层厚金膜.这两部分被刚性地固定在金属支架上以避免相对移动.两层金膜和中间包夹着的空气隙组成双面金属包覆波导,空气隙即为该波导结构的导波层.当一束激光以小角度入射到棱镜底面时,在相位匹配的条件下,波导内激发产生超高阶导模.由 Artmann 提出的静态位相法理论<sup>[10]</sup>,反射光的侧向位移可以表示为

$$S = -\frac{1}{\kappa} \frac{d\varphi}{d\theta} \quad (1)$$

式中  $\kappa = k_0 \sqrt{\epsilon_1} \cos \theta$  为波矢在棱镜介质里的  $z$  分量,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为入射光在真空中的波数,  $\theta$  为入射角,  $\varphi$  为反射光与入射光之间的相位差.事实上,反射光侧向位移的增强与波导能量耦合密切相关,如图 2,反射率  $R$  随入射角变化的曲线对应了一个导模的激发.当入射角逐渐接近共振条件时,反射率明显减小,大部分入射光能量耦合进波导,极大增强了反射光古斯-汉欣位移  $S$  并形成一个大峰.侧向位移的峰值对应的正是反射率的最小值.

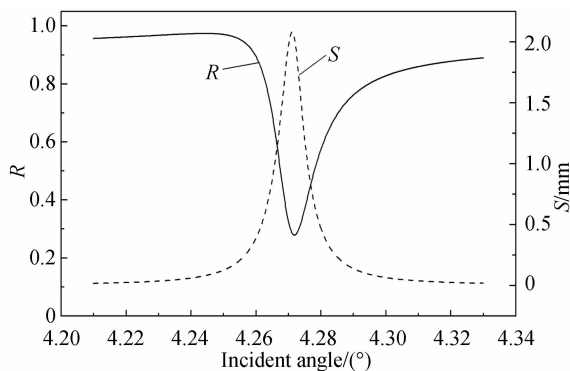


图 2 反射率( $R$ )和侧向位移( $S$ )随入射角变化关系  
Fig. 2 Reflectivity and lateral beam shift with respect to the incident angle

为了进一步说明波长探测的工作原理,采用高斯光束模型<sup>[11]</sup>(束腰半径为  $800 \mu\text{m}$ )模拟了不同波长情况下反射光侧向位移随入射角的变化情况.

由图 3 可见,古斯-汉欣位移峰的上升沿和下降沿都具有较好的线性特性.将入射角工作点固定在

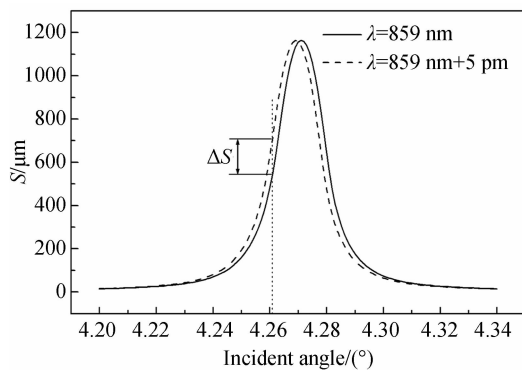


图 3 波长探测原理  
Fig. 3 Principle of wavelength sensing

上升沿线性部分的中点附近,波长变化引起位移峰的移动使反射光的侧向位置发生明显变化.因此,通过测量反射光的侧向位移,入射光波长变化就可以实现对激光波长的监测.理论模拟表明,选择合适的工作点,波长变化  $5 \text{ pm}$  可引起反射光侧向位移变化 ( $\Delta S$ ) 达到  $160 \mu\text{m}$ .

## 2 实验

采用真空溅射法,在棱镜底面和玻璃片(K9)上表面分别镀上一层金膜.棱镜的相对介电常量为  $\epsilon_1 = 2.25$ .由双波长法测得棱镜底面金膜的厚度和相对介电常数分别为  $h_2 = 19.8 \text{ nm}$ ,  $\epsilon_2 = -28 + 1.8i$  ( $\lambda = 860 \text{ nm}$ ).下层金膜厚度大于  $200 \text{ nm}$ ,已超过入射激光的穿透深度,可视为无限厚.空气的介电常量为  $\epsilon_3 = 1$ ,并由  $m$  线法测量其厚度为  $h_3 = 0.5 \text{ mm}$ .实验装置如图 4.将制备好的双面金属包覆波导置

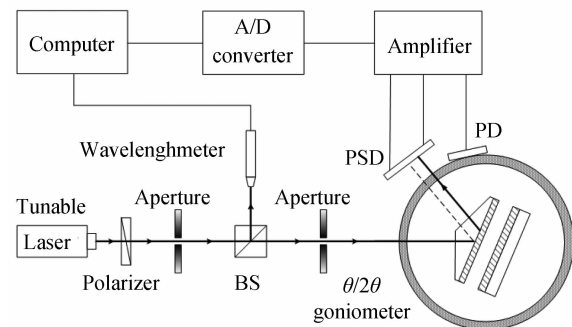


图 4 实验装置  
Fig. 4 Experimental setup

于  $\theta/2\theta$  仪的内盘上, $\theta/2\theta$  仪由内盘和外盘组成,当内盘旋转  $\theta$  角时,外盘旋转  $2\theta$  角,这样,置于外盘上的光电探测器就能确保始终与样品反射光同步.可调谐激光器发出的激光首先经过偏振器转换为 TE 偏振,然后通过两个小孔进一步准直,最后入射到波导表面.同时用一个分束片分一部分光到波长计.实验时首先固定波长 ( $\lambda = 859.003 \text{ nm}$ ),转动转台进行角度扫描把探测器接收到的光强信号经光电转换后直接输入到计算机,并在显示屏上记录下衰减全反射谱 (Attenuator Total Reflection, ATR) 实验谱线.然后将入射角固定在某个吸收峰下降沿变化较快的区域 ( $\theta = 4.263^\circ$ ).事实上这部分与古斯-汉欣位移峰上升沿线性部分基本对应(如图 2),且定其为工作点.调整一维位置灵敏传感器 (Position sensitive detector, PSD)<sup>[12]</sup>,使反射光垂直入射到 PSD 中心.实验使用的激光器为可调谐激光器 (DL100, 德国 TOPICA PHOTONICS 公司) 输出激光的中心波长是  $860 \text{ nm}$  的红外光.实验时调节激光波长以  $1 \text{ pm}$  为间隔从  $859.003 \text{ nm}$  调到  $859.006 \text{ nm}$ ,再以同样的间隔调回  $859.003 \text{ nm}$ .同

时把 PSD 反射光的位置信息采集处理后显示在计算机屏幕上,实验结果如图 5,曲线横坐标表明的是某测量波长下的监控时间.从实验曲线上可以表明波长改变 1 pm 引起反射光侧向位移变化( $\Delta S$ )平均值为约 10  $\mu\text{m}$ .考虑实验中的综合噪声,在测量同一波长时反射光点在 PSD 上的漂移约为 2  $\mu\text{m}$ ,也就是说系统噪音只有波长变化引起位移变化的 1/5.所以除去各种噪音的平均影响保守估计这种波长传感装置测量波长的分辨率完全可以达到 0.2 pm 以下.

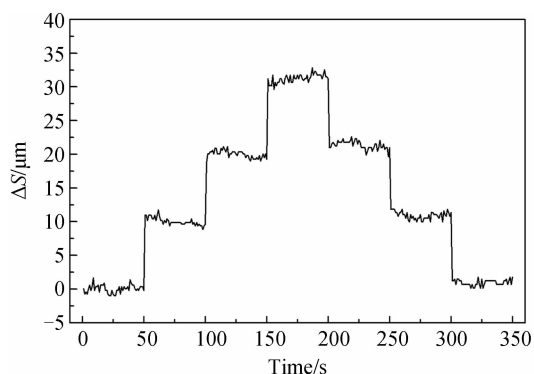


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental result

### 3 结论

提出了一种新颖的波长探测方法,该方法利用双面金属包覆波导结构在导模共振激发时增强的古斯-汉欣位移效应实时监测波长的变化.由于超高阶导模的强色散特性,波长的微小扰动可引起反射光侧向位移的明显改变.实验结果表明,激光波长在 859 nm 附近变化 1 pm 可引起反射光侧向移动约 10  $\mu\text{m}$ ,结合实验噪音水平可知对波长分辨率可以达到 0.2 pm.由于探测的是信号光束位置的移动,与信号光束强度的涨落完全没有关系,这样就有效避免了因光源输出光强波动带来的干扰,有利于大大提高监测的分辨率.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Zu-xing, DAI Guo-xing, KUANG Qing-qiang, *et al.*, Spacing-adjustable multiwavelength fiber laser based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5):815-819.
- 张祖兴,戴国星,况庆强,等,基于受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5):815-819.
- [2] YAMADA E, TAKARA H, OHARA T, *et al.* 150 channel supercontinuum CW optical source with high SNR and precise 25GHz spacing for 10 Gbit/s DWDM systems [J]. *Electron Lett*, 2001, **37**(5):304-306.
- [3] VELDHUIS G J, PAEELIAUX O, LAMBECK P V. Normalized analysis for the optimization of geometric wavelength dispersion in three-layer slab waveguides [J]. *Opt Commun*, 1999, **163**(4):278-284.
- [4] PARK Y, LEE S, CHAE C. A novel wavelength stabilization scheme using a fiber grating for WDM transmission [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, **10**(10):1446-1448.
- [5] WEI Xin, ZHAO Jian-lin, ZHOU Wang-min, *et al.* Reverse drift and restraining of centre-wavelength reflected by tensing fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):78-80.
- 魏昕,赵建林,周王民,等. 光纤布喇格光栅中心波长反向漂移的实验研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(1):78-80.
- [6] YANG C, LEE S, WU J. Wavelength control of tunable dense wavelength-division multiplexing sources by use of a Fabry-Perot etalon and a semiconductor optoelectronic diode [J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(9):1914-1921.
- [7] NASU H, TAKAGI T, SHINAGAWA T, *et al.* A highly stable and reliable wavelength monitor integrated laser module design [J]. *Journal Lightwave Technol*, 2004, **22**(5):1344-1351.
- [8] FENG Yao-jun, CAO Zhuang-qi, CHEN Lin, *et al.* New scheme for wavelength monitoring with 1 pm resolution [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6):4709-4712.
- 冯耀军,曹庄琪,陈麟,等. 分辨率为 1 pm 的波长监测新方法 [J] *物理学报*, 2006, **55**(6):4709-4712.
- [9] CHEN Lin, CAO Zhuang-qi, SHEN Qi-shun, *et al.* Wavelength sensing with subpicometer resolution using ultrahigh order modes [J]. *Journal Lightwave Technol*, 2007, **25**(2):539-543.
- [10] ARTMANN K. Berechnung der Seitenversetzung des totalreflektierten Strahles [J]. *Ann Phy*, 1948, **437**(1):87-102.
- [11] LI C, WANG Q. Prediction of simultaneously large and opposite generalized Goos-Hänchen shifts for TE and TM light beams in an asymmetric double-prism configuration [J]. *Physical Review E*, 2004, **69**(5):055601.
- [12] GILLES H, GIRARD S, HMEL J. Simple technique for measuring the Goos-Hänchen effect with polarization modulation and a position-sensitive detector [J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(16):1421-1423.

## Wavelength Sensing Based on the Goos-Hänchen Effect

XIAO Ping-ping<sup>a</sup>, QI Min<sup>b</sup>, HU Hong-wu<sup>a</sup>

(a. *College of Physics Science and Engineering Technology*;

b. *College of Mathematics and Computer Science, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China*)

**Abstract:** The Goos-Hänchen effect, which is enhanced by the resonance of the guided mode in a symmetrical metal-cladding waveguide with submillimeter scale, is used to detect the slight variation of wavelength. The symmetrical metal-cladding waveguide consists of a guiding layer and two metal-cladding layers. When the laser beam incidents on the surface of the coupling prism with a small incident angle, the ultrahigh-order mode will be excited under the phase-matching condition, which exhibits a strong dispersion ability of the wavelength. Theoretical analysis indicates that the GH lateral shift is closely related to the intrinsic and radiative dampings of the waveguide. As the two dampings of SMCW approach to the best matching condition, the GH shift will exhibit a great enhancement and the lateral GH shift may reach several hundreds of microns. Since the detecting signal is proportional to the displacement of the light beam, the measurement will not be affected by the fluctuation of the light intensity. A wavelength resolution of 0.2 pm near the wavelength of 859 nm is demonstrated in experiment.

**Key words:** Symmetrical metal-cladding waveguide; Ultrahigh-order mode; Goos-Hänchen effect; Wavelength sensing